POLYPUBLIE

Exploitation asymétrique des réseaux de transport d'énergie électrique

Abdou-Rahmani Sana

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2001
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Thèse de doctorat/Ph.D. thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/7074/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Sana, A.-R. (2001). Exploitation asymétrique des réseaux de transport d'énergie électrique [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7074/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Richard J. Marceau, Donald T. McGillis, & Xuan-Dai Do
Programme Program	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

INFORMATION TO USERS

This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.

The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.

In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.

Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.

ProQuest Information and Learning
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA
800-521-0600

UMI®

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE DES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

ABDOU-RAHMANI SANA
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (PH.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2001

©Abdou-Rahmani SANA, 2001

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-71317-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE DES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Présentée par: SANA Abdou-Rahmani

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. O'SHEA Jules, Ph.D., président

M. MARCEAU Richard, Ph.D., Membre et directeur de recherche

M. McGILLIS Donald T. Ing., Membre et codirecteur de recherche

M. DO Xuan Dai, D.Sc.A., Membre et codirecteur de recherche

M. SKOREK Adam Ph.D., Membre externe

M. LEFEBVRE Serge Ph.D., Membre

DÉDICACE

à Pamoussa SANA, mon très cher père

à Payébdé Azèta Ouédraogo ma très chère mère

à la Famille,

à l'Amitié et à l'Amour Essentiels entre les êtres

À travers cette dissertation philosophique je suis allé à la rencontre de moi-même,

... I still want to know : who am I ?

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée grâce à :

- une Bourse du Programme Canadien de Bourse de la Francophonie. Merci en particulier à Mme Micheline Roberge, conseillère au PCBF chargée des étudiants de Polytechnique, au Ministère de la Coopération à Québec.
- une aide financière des professeurs M. Richard MARCEAU et M. Xuan Dai DO au département de Génie Électrique.

Merci M. MARCEAU d'avoir contribué grandement à l'éclosion des idées, à la prise de forme de cette thèse et de l'avoir dirigée dans un style me donnant toute liberté d'initiative et me permettant d'exercer ma responsabilité dans ce domaine.

Merci M. DO de m'avoir fait profiter de votre expérience et de votre sagesse.

Merci au professeur Guy OLIVIER qui à grandement contribué à la partie application de cette thèse, de l'idée à la conclusion.

Special thanks to Mr. Donald McGILLIS. "Tomorrow, Van-Houte, Nine-o-clock" I heard this from Mr. McGILLIS each Monday evening during three years. So we met at this café Van Houte, 2000 University Street (Montreal), each Tuesday 9:00, since the conference in May 1998 in Waterloo (Ontario). Mr. McGILLIS? A young Man ("youngster is a quest of mind" he said to me one day); wise; experienced; that spent more than 40 years in Hydro-Québec; designer of the 735 kV system of Quebec; International Power System consultant that wrote more than 200 papers; visited more than 50 countries in the world; a man of thinking; a magician of Power Systems, full of tricks and knacks; The MAN. It was a time when you trusted me while I was doubting myself. I am fortunate, honoured, proud and happy of being coached by your greatness. I am grateful and I will never forget my "Conversations With McGILLIS". God bless you and your family.

Merci Spécial à mon cher ami et frère qui m'a été d'une aide que je ne peux malheureusement pas exprimer dans cet Espace. Chacune de vos visites, avec celui qui appelait le bus le Gring-Gring, a été pour moi un voyage dans la simplicité, le désintéressement et le nécessaire détachement qui ont, par la suite, engendré l'imagination créatrice. Tu sauras te reconnaître à travers cette oeuvre. Béni sois-tu avec ta famille, grand frère.

Merci à tous les amis (es) que je ne peux citer et qui ont contribué, à travers rencontres, discussions et disputes (les disputes offrent autant d'opportunités à l'éclosion des idées que les "sages" discussions), à ce que haut soit le moral et soutenu soit l'effort.

RÉSUMÉ

L'exploitation asymétrique des réseaux électriques est définie par l'exploitation du réseau triphasé comme trois ensembles séparés fonctionnellement. Appliquée aux réseaux de transport d'énergie électrique, elle se définit comme l'exploitation sur la base du long-terme, d'une ligne triphasée comme trois lignes indépendantes fonctionnellement. L'objectif de l'exploitation asymétrique est de maintenir la capacité de transport originale d'une ligne de transmission avec seulement une ou deux phases fonctionnelles, tout en préservant un système triphasé équilibré à l'entrée et à la sortie de la ligne.

Dans cette thèse, on pose les concepts fondamentaux, on détermine les exigences et on propose des solutions réalisables et pratiques pour l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité. Trois exigences principales sont à remplir pour assurer l'exploitation asymétrique d'une ligne triphasée: i) maintenir la puissance transitée; ii) maintenir les grandeurs des tensions aux accès de la ligne; iii) maintenir l'angle de transport. Une fois ces exigences remplies, la ligne bien qu'elle soit sujette à contingence, transmet l'énergie aux deux réseaux qu'elle interconnecte avec les mêmes marges de sécurité.

La compensation réactive est d'une importance stratégique dans la réalisation de l'exploitation asymétrique parce qu'elle est à la base de la plus grande partie des stratégies de mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique. On peut utiliser des dispositifs de compensation conventionnels (inductances et condensateurs) ou des dispositifs de compensation au sommet de l'art (les FACTS). La puissance réactive nécessaire est la même quel que soit le type de compensation utilisé.

Les stratégies de compensation sont différentes selon que le corridor possède une seule ligne ou plusieurs. La compensation d'un corridor avec une seule ligne est le pire cas en terme de difficultés de mise en oeuvre, cependant une seule ligne est le cas le plus vulnérable et le plus souvent rencontré: réseaux d'urgence, connexion d'une centrale isolée; alimentation d'une charge isolée; réseaux faibles, réseaux basse et moyenne tensions. La

compensation de corridor avec plusieurs lignes se fait avec moins de difficultés parce que, contrairement au cas d'une seule ligne, il existe le recours possible aux phases homologues de la ou des phases coupées, dans les lignes saines, pour transmettre l'énergie.

La compensation par dispositifs conventionnels offre des solutions plus économiques que la compensation par les FACTS à cause du coût élevé des convertisseurs utilisés par ces derniers. Les coûts de l'exploitation asymétrique tant par la compensation conventionnelle que par la compensation moderne sont inférieurs à celui des solutions alternatives impliquant des changements majeurs dans le réseau de transport comme la construction d'une nouvelle ligne ou la mise en oeuvre d'une phase de réserve.

L'exploitation asymétrique permet d'accroître la capacité des réseaux de transport d'électricité sans réduire les marges de sécurité. Elle permet donc d'accroître la rentabilité des investissements dans le transport de l'électricité et l'efficacité des systèmes de compensation tout-triphasés qui peuvent désormais opérer bien que la ligne soit assujettie à la coupure d'une phase ou deux. Elle permet ainsi de répondre aux exigences de la déréglementation des marchés d'électricité et aux pressions environnementalistes rendant la construction de nouvelles lignes très difficile.

ABSTRACT

Asymmetric Operation of electric power systems is defined as the operation of three-phase equipment as three single-phase elements operated separately. The particular case investigated in this thesis deals with a transmission system of one or several lines on the same corridor where one line has a phase out of service. Corrective measures are studied and proposed such that the transmission system at each end retains its original three-phase balanced voltages with the same magnitude, power transfer and angular spread.

The theory is developed to determine the corrective measures required in terms of series and shunt compensation to provide the restoration of the initial balanced conditions. In this development, transmission systems of one and many lines are considered using conventional and state-of-the art devices to compensate for positive, negative and zero sequence components of the voltage and current that arise from the unbalanced condition.

Numerical simulations are carried out on transmission systems of one, two and three lines to verify the theory developed and to quantify the compensation required to balance the system. It was found out that the one-line case is the most difficult to balance and yet it is the most vulnerable and frequently used for remote generation or loads. The two-line and three-line cases are more easily balanced to attain the prescribed solution. It was also found that the conventional (static) devices are more economical than the more sophisticated ones such as FACTS controllers because of the cost of the valves required.

The need for increased transmission capacity has received a certain impetus at this time mainly because of the environmental process involved in building new lines and the difficulty of apportioning the cost in a deregulated environment. The classical three-phase methods of series compensation and voltage support have been applied to three-phase systems for this purpose but they are limited in the end by the security criteria of the network. The concept of Asymmetric Operation is basically an approach to consider a

three-phase line as three single-phase lines and to treat them accordingly so that the security of the transmission system is enhanced and the available transmission capacity is maximized.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vii

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES TABLEAUX xix

LISTE DES FIGURES xxi

LISTE DE SYMBOLES xxvii

LISTE DES ANNEXES xxxiii

CHAPITRE I INTRODUCTION A LA PLANIFICATION ET A L'EXPLOITATION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES 1

I.1 Structure générale d'un réseau électrique 2

I.2 Planification des grands réseaux électriques 3

I.2.1 La planification en conception de réseau 3

I.2.2 La planification de l'exploitation 5

I.2.3 La symétrie dans l'exploitation des réseaux 5

I.3 La déréglementation 7

I.3.1 Contexte de la déréglementation 7

I.3.2 Un nouveau paradigme 7

I.4 Impacts de la déréglementation 8

I.5 Les problèmes techniques 10

I.5.1 Précision des transits de puissance 10

I.5.2 Congestion et transits parasites 11

I.5.3 Contrôle de tension et de puissance réactive: 11

I.5.4 Flexibilité dans l'exploitation 12

I.5.5 Fiabilité 12

I.5.6 Indépendance 12

I.6 Les solutions aux problèmes techniques 12

I.6.1 Les solutions Conventionnelles 13

I.6.2 Les solutions modernes: les FACTS. 14

I.7 Discussion des solutions 16

I.8 Contenu de la présente thèse 17

CHAPITRE II INTRODUCTION À L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE DES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ 20

II.1 Définition et objectif de la présente thèse : concept de l'exploitation asymétrique 20

II.2 Impacts de l'exploitation asymétrique sur les méthodologies 21

II.2.1 Sur la production 21

II.2.2 Sur le réseau de transport 22

II.2.3 Sur la sécurité des réseaux 22

II.2.4 Sur les méthodes d'analyse des réseaux 23

II.3 Stratégies d'implantation. 24

II.3.1 Stratégie "Système" 24

II.3.2 Stratégies localisées 25

II.3.2.1 Adaptation de la compensation: 25

II.3.2.2 Phase de réserve: 25

II.3.2.3 Condensateurs de réserve 26

II.3.2.4 Sources de tension séries 28

II.3.2.5 Filtrage des séquences: 29

II.3.3 Discussion des stratégies d'implantation 29

II.4 Importance stratégique de la compensation réactive 30

II.4.1 La compensation du réseau de transport 30

II.4.2 Compensation de la charge 32

II.4.3 Conclusion sur l'importance stratégique de la compensation réactive 36

II.5 Résumé 36

CHAPITRE III ASPECTS PROBABILISTES DE L'EXPLOITATION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES 37

III.1 Loi binomiale 37

III.1.1 Définitions 37

III.1.2 Deux appareils identiques réparables 39

III.1.3 Plusieurs appareils identiques 40
III.2 Distribution de Poisson 41
III.3 Distribution de Weibull 43
III.3.1 La loi de Gauss ou loi Normale : Définitions 43
III.3.2 Utilisation de la distribution de Weibull 44
III.4 Application à l'exploitation asymétrique 48
III.4.1 Statistiques des pannes dans les lignes de transport 48
III.4.2 Analyse de fiabilité 49
III.4.2.1. Espérance de la moyenne de puissance non transmise durant l'exploitation symétrique 51
III.4.2.2. Espérance de la moyenne de puissance non transmise durant l'exploitation asymétrique 52
III.4.2.3. Bénéfice de l'exploitation asymétrique 52
III.5 Résumé 54

CHAPITRE IV EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC PLUSIEURS LIGNES 55

IV.1 Modèle des lignes à paramètres localisés sans pertes 56
IV.1.1 Calcul des impédances et réactances de compensation 56
IV.1.2 Calcul de la puissance réactive requise 58
IV.1.2.1 Défauts sur la même ligne 58
IV.1.2.2 Défauts sur plusieurs lignes 59
IV.1.3 Exemple de mise en oeuvre 60
IV.2 Modèle des lignes à paramètres distribués 62
IV.2.1 Calcul des éléments de compensation 62
IV.2.1.1 Position quelconque de la compensation série dans la ligne 62
IV.2.1.1.1 Calcul de la valeur des impédances et réactances de compensation .. 63
IV.2.1.1.2 Calcul de la tension et du courant des éléments de compensation ... 65
IV.2.1.2 Position de la compensation série exactement au milieu de la ligne 66
IV.2.1.3 Position de la compensation série en bout de ligne côté source 67
IV.2.1.4 Position de la compensation série en bout de ligne côté charge 67
IV.2.2 Lignes symétriques sans pertes 68
IV.3 Effets de la résistance de la ligne 69
IV.3.1 Compensation par réactances et susceptances pures 69

IV.3.2 Compensation par sources de tensions et de courants contrôlées 71
IV.3.2.1 Sources de tensions localisées aux bouts des lignes 72
IV.3.2.1.1 Cas 1: une source de tension série et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne ; 74
IV.3.2.1.2 Cas 2: une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie des lignes 75
IV.3.2.1.3 Cas 3 : une source de tension série à chaque bout de ligne 77
IV.3.2.1.4 Cas 4: une source de courant shunt à chaque bout de ligne 78
IV.3.2.1.5 Cas 5: une source de tension série à l'entrée des lignes et une source de courant shunt à la sortie des lignes 79
IV.3.2.1.6 Cas 6: une source de tension série à la sortie des lignes et une source de courant shunt à l'entrée des lignes 80
IV.3.2.2 Source de tension en milieu de ligne 81
IV.3.2.2.1 Cas 7 : une source de tension série en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne 83
IV.3.2.2.2 Cas 8: une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à la sortie de la ligne 84
IV.3.2.3 Remarques 87
IV.4 Résumé 87

CHAPITRE V EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC UNE SEULE LIGNE .. 89

V.1 Introduction 89

V.2 Compensation par les dispositifs conventionnels 91

V.2.1 Compensation de la séquence directe par des condensateurs séries 91
V.2.1.1 Condensateurs séries placés à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente fournie par la source 93
V.2.1.2 Condensateurs séries placés à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à la charge 96
V.2.1.3 Condensateurs séries placés à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente fournie à la source 97
V.2.1.4 Condensateurs séries placés à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à la charge 100

V.2.1.5 Condensateurs séries placés au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne 101
V.2.1.6 Condensateurs séries placés au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne 103
V.2.2 Compensation de la séquence inverse par éléments passifs 104
V.2.2.1 Compensateurs de séquence inverse montés en étoile (Y) 105
V.2.2.2 Compensateur de séquence inverse monté en triangle 106
V.2.3 Filtrage de la séquence homopolaire par transformateurs 107
V.2.3.1 Filtrage par transformateur de mise à la terre 107
V.2.3.2 Filtrage de la séquence homopolaire par les transformateurs d'alimentation. 109
V.2.4 Exemple : exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV 110
V.2.5 Remarques 112
V.3 Compensation par les FACTS 112
V.3.1 Compensation de la séquence directe et filtrage de la séquence homopolaire par des sources de tension séries 112
V.3.1.1 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne 114
V.3.1.2 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne 116
V.3.1.3 Sources de tension placées à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne 117
V.3.1.4 Sources de tension placées à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne 118
V.3.1.5 Sources de tension placées au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne 119
V.3.1.6 Sources de tension placées au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne 121
V.3.2 Filtrage de la séquence inverse par convertisseur de courant 121
V.3.3 Exemple 122
V.3.4 Remarques 124
V.4 Filtrage jumelé et versatile des courants de séquence inverse et homopolaire 124
V.5 Résumé 126

CHAPITRE VI VALIDATIONS 127

VI.1 Exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne : utilisation de dispositifs de compensation conventionnels 127

VI.1.1 La source 128
VI.1.2 La charge 129
VI.1.3 La ligne 129
VI.1.4 Compensation série 129
VI.1.5 Compensateurs de séquence inverse 130
VI.1.6 Résultats de simulation 131
VI.1.7 Variation de la puissance 135

VI.2 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes : utilisation de dispositifs de compensation conventionnels 137

VI.2.1 Les lignes 138
VI.2.2 La source 138
VI.2.3 La charge 138
VI.2.4 La compensation série et la compensation shunt 138
VI.2.5 Résultats de simulation 139

VI.3 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes : utilisation de dispositifs de compensation conventionnels 142

VI.3.1 Les lignes 143
VI.3.2 La source 144
VI.3.3 La charge 144
VI.3.4 La compensation série et la compensation shunt 144
VI.3.5 Résultats de simulation 145

VI.4 Exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne et des dispositifs FACTS .. 148

VI.4.1 Configurations principales 148
VI.4.2 Configuration adoptée 151
VI.4.3 Résultats de simulation 152

VI.5 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes : utilisation des FACTS 155

VI.5.1 Les lignes 156
VI.5.2 La source 156
VI.5.3 La charge 156

VI.5.4 Configuration des compensateurs série et shunt pour la phase A 157
VI.5.5 Résultats de simulation 157
VI.6 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes : utilisation des FACTS 160
VI.6.1 Les lignes 162
VI.6.2 La source 162
VI.6.3 La charge 162
VI.6.4 La compensation série et la compensation shunt 162
VI.6.5 Résultats 163
VI.7 Résumé 166

CHAPITRE VII ANALYSE ÉCONOMIQUE 167

VII.1 Coûts d'installation de l'exploitation asymétrique et coût d'une nouvelle ligne 167
VII.1.1 Corridor avec une seule ligne 167
VII.1.2 Corridor avec deux lignes 168
VII.1.3 Corridor avec trois lignes 170
VII.2 Coûts d'installation de l'exploitation asymétrique et coût de l'énergie non livrée 171
VII.2.1 Évaluation du coût de l'énergie non livrée 171
VII.2.2 Réduction du risque de non transmission de l'énergie 173
VII.3 Résumé 175

CHAPITRE VIII APPLICATION DE L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE: CHAUFFAGE PAR ASYMÉTRIE POUR LE DÉGEL DES LIGNES ÉLECTRIQUES 176

VIII.1 Problématique du gel des lignes de transport 177
VIII.1.1 Les principales formations de glace sur les lignes 177
VIII.1.2 Le processus du dépôt de la glace sur les lignes 177
VIII.1.3 Les effets de la glace sur les lignes électriques aériennes 178
VIII.1.4 Les méthodes de déglaçage des lignes électriques 179
VIII.2 Principe du chauffage par asymétrie pour le dégel des lignes 180
VIII.2.1 Développement de l'innovation 183
VIII.2.2 Chauffage de ligne avec compensation série et une seule phase fonctionnelle transmettant une puissance arbitraire 183
VIII.2.2.1 Capacité du condensateur série pour transmission d'un courant arbitraire 184
VIII.2.2.2 Pertes par effet Joule 186

VIII.2.3 Chauffage de ligne sans compensation série et une seule phase fonctionnelle transmettant une puissance arbitraire 187
VIII.2.3.1 Tension en bout de ligne pour transmission d'un courant arbitraire 187
VIII.2.3.2 Pertes par effet Joule 188
VIII.2.4 Calcul des éléments des compensateurs de séquence inverse 188
VIII.2.5 Filtrage des courants de séquence homopolaire 189
VIII.2.6 Réseaux non mis à la terre 190
VIII.2.7 Exemples de calcul. 192
VIII.2.8 Exemple 1: Avec compensation série; une seule phase fonctionnelle 193
VIII.2.9 Exemple 3 : Sans compensation série; une seule phase fonctionnelle 195
VIII.2.10 Exemple 5 : Réseau non mis à la terre sans compensation série; deux phases fonctionnelles 197
VIII.3 Recherches futures. 199
VIII.4 Avantages et inconvénients de la méthode proposée 200
VIII.5 Résumé 201

CHAPITRE IX CONCLUSION GÉNÉRALE 202
IX.1 Synthèse 202
IX.1.1 De l'approche théorique 202
IX.1.2 De la validation de la théorie 204
IX.1.3 De l'économie et de la praticabilité 204
IX.2 Contributions et originalité 206
IX.3 Perspectives 207
RÉFÉRENCES 208
ANNEXES 215

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Nombre minimal de compensateurs statiques en réserve selon le taux d'indisponibilité pour garantir le fonctionnement simultané de six compensateurs avec une probabilité de 99% 41

Tableau 4.1 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV en exploitation asymétrique 61

Tableau 4.2 Récapitulatif des cas de compensation par des sources de tension et de courant pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec plusieurs lignes. 86

Tableau 5.2: Résultats de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs classiques. 111

Tableau 5.3 Récapitulatif des cas de compensation par des sources de tension séries pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne: élimination de la séquence homopolaire et compensation de la séquence directe. 113

Tableau 5.4: Résultats de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs moderne.. 123

Tableau 6.1: Résultats de calculs des courants de compensation pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec la phase a ouverte par l'utilisation de dispositifs moderne et le filtrage jumelé des courants de séquence 151

Tableau 7.1: Puissance réactive pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 100 km avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels 168

Tableau 7.2: Puissance réactive pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 100 km avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs modernes 168

Tableau 7.3 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels..... 169

Tableau 7.4 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs modernes 169

Tableau 7.5 Puissance réactive pour la compensation de trois lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels..... 170

Tableau 7.6 Puissance réactive pour la compensation de trois lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte par l'utilisation de dispositifs modernes 170

Tableau 7.7 Coût total de l'énergie non livrée 172

Tableau 7.8 Comparaison des coûts des options de réduction du risque de non transmission de l'énergie..... 173

Tableau 7.9 Coût d'investissement de l'exploitation asymétrique pour les lignes 735 kV, 150 km, avec dispositifs conventionnels. 175

Tableau 8.1 Caractéristiques d'une ligne à 735 kV 100 km..... 192

Tableau 8.2 Résultats pour chauffage avec compensation série; une phase fonctionnelle 193

Tableau 8.3 Résultats pour chauffage sans compensation série; une phase fonctionnelle 195

Tableau 8.4 Résultats pour chauffage sans compensation série; deux phases fonctionnelles; réseau non mis à la terre..... 197

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Structure générale d'un réseau électrique 2

Figure 1.2 Structure générale d'un réseau électrique dans un marché déréglementé . 9

Figure 1.3 Illustration de trois réseaux soumis aux transites parasites 11

Figure 2.1 Réseau électrique asymétrique 24

Figure 2.2 Ligne avec phase de réserve 26

Figure 2.3 Corridor à N lignes: condensateurs de réserve placés en milieu de ligne . 27

Figure 2.4 Condensateurs de réserve placés à l'entrée d'un corridor de N lignes ... 28

Figure 2.5 Corridor à N lignes: sources de tensions placées en milieu de ligne 28

Figure 2.6 Corridor à une ligne avec filtrage des séquences homopolaire et inverse. 29

Figure 2.7: Principe d'équilibrage d'une charge triphasée montée en triangle 33

Figure 2.8 Principe de compensation d'une charge linéaire triphasée non mise à la terre par la méthode des composantes symétriques 34

Figure 3.1 Les trois états d'un système formé de deux appareils réparables 39

Figure 3.2 Comparaison de la distribution de Weibull et de la Distribution normale . 45

Figure 3.3 Circuit logique équivalent d'une ligne triphasée 50

Figure 4.1 Représentation simplifiée d'un corridor à plusieurs lignes 56

Figure 4.2 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique .. 57

Figure 4.3 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique .. 57

Figure 4.4 Schéma de compensation pour l'exploitation asymétrique d'un corridor de deux lignes 400 kV-300 km 61

Figure 4.5 Position quelconque de la compensation série dans les lignes..... 62

Figure 4.6 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique .. 70

Figure 4.7 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique .. 71

Figure 4.8 Illustration de la compensation de la phase d'un corridor par des sources de tension séries et des sources de courant shunt 72

Figure 4.9 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne 74

Figure 4.10 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique . 75

Figure 4.11 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec source de courant et source de tension à l'entrée de la ligne 75

Figure 4.12 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie des lignes 76

Figure 4.13 Exploitation asymétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie de la ligne 76

Figure 4.14 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension à chaque bout des lignes 77

Figure 4.15 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de tension série à chaque bout de ligne 77

Figure 4.16 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de courant shunt à chaque bout des lignes 78

Figure 4.17 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de courant shunt à chaque bout de la ligne 78

Figure 4.18 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série à l'entrée des lignes et une source de courant shunt à la sortie des lignes 79

Figure 4.19 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de tension série à l'entrée de la ligne et source de courant shunt à la sortie 79

Figure 4.20 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série à la sortie des lignes et une source de courant shunt à l'entrée des lignes 80

Figure 4.21 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de courant shunt à l'entrée de la ligne et une source de tension série à la sortie. 80

Figure 4.22 Illustration de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et des sources de courants en bout de ligne: cas général 81

Figure 4.23 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne 83

Figure 4.24 Exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne 84

Figure 4.25 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à la sortie de la ligne 84

Figure 4.26 Exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne 85

Figure 5.1 Principe de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne 89

Figure 5.2 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne et des condensateurs à l'entrée de la ligne : séquence directe 93

Figure 5.3 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne avec condensateurs à la sortie de la ligne : séquence directe 98

Figure 5.4 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne avec condensateurs au milieu de la ligne : séquence directe 101

Figure 5.5 Principe de compensation des courants de séquence inverse d'une ligne en exploitation asymétrique par éléments passifs LC 104

Figure 5.6 Principe de filtrage de la séquence homopolaire 108

Figure 5.7 Transformateur en T pour le filtrage de la séquence homopolaire 108

Figure 5.8 Transformateurs D-Y et ZigZag pour filtrage de séquence homopolaire . 109

Figure 5.9 Filtrage de la séquence homopolaire par les transformateurs d'alimentation 110

Figure 5.10 Exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte par l'utilisation de dispositifs classiques 111

Figure 5.11 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne 114

Figure 5.12 Sources de tension séries placées à la sortie de la ligne 117

Figure 5.13 Sources de tension séries placées au milieu de ligne 119

Figure 5.14 Sources de courant shunts placées à chaque bout de ligne pour la compensation de la séquence inverse 122

Figure 5.15 Sources de courant shunts placée à chaque bout de ligne pour la compensation de la séquence inverse 123

Figure 6.1 Exploitation asymétrique d'un corridor d'une seule ligne avec des dispositifs conventionnels 128

Figure 6.2 Modèle général pour simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne avec compensation conventionnelle dans Matlab-simulink-PSB 132

Figure 6.3 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW, avec dispositifs conventionnels: tensions et courants de ligne, de source et de charge. 133

Figure 6.4 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec dispositifs conventionnels: courants des compensateurs de séquence inverse et des filtres de séquence homopolaire. 134

Figure 6.5 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV transportant 30 MW avec dispositifs conventionnels: courants des compensateurs de séquence inverse et filtre de séquence homopolaire 136

Figure 6.6 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes et des dispositifs conventionnels 137

Figure 6.7 Simulation de l'exploitation asymétrique: deux lignes à 400 kV; dispositifs conventionnels; tension des barres, tension série et courant shunt injectés 140

Figure 6.8 Simulation de l'exploitation asymétrique: deux lignes de 400 kV; dispositifs Conventionnels; tension et courants dans la ligne, la source et la charge 141

Figure 6.9 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes et des dispositifs conventionnels 143

Figure 6.10 Simulation de l'exploitation asymétrique: trois lignes à 400 kV; dispositifs conventionnels; tension des barres, tension série et courant shunt injectés 146

Figure 6.11 Simulation de l'exploitation asymétrique: trois lignes de 400 kV; dispositifs Conventionnels; tension et courants dans la ligne, la source et la charge 147

Figure 6.12 Compensation des séquences directe, homopolaire et inverse à l'entrée de la ligne 148

Figure 6.13 Filtrage des séquences inverse et homopolaire à la sortie de la ligne par des convertisseurs shunts 149

Figure 6.14 Sources séries placées à l'entrée de la ligne 150

Figure 6.15 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec des FACTS : tension et courants dans la ligne, la source et la charge..... 153

Figure 6.16 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec les FACTS: tensions séries et courants des compensateurs de séquence inverse et des filtres de séquence homopolaire shunts. 154

Figure 6.17 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes et des dispositifs FACTS 155

Figure 6.18 Simulation de l'exploitation asymétrique de deux lignes de 400 kV, 1400 MW avec des FACTS: tensions dans le réseau et courant injecté 158

Figure 6.19 Simulation de l'exploitation asymétrique de deux lignes de 400 kV, 1400 MW avec des FACTS: courants dans le réseau 159

Figure 6.20 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes et des dispositifs FACTS 161

Figure 6.21 Simulation de l'exploitation asymétrique de trois lignes à 400 kV, 2000 MW avec des FACTS: tensions dans le réseau et courant injecté 164

Figure 6.22 Simulation de l'exploitation asymétrique de trois lignes à 400 kV, 2000 MW avec des FACTS: courants dans le réseau 165

Figure 8.1 Illustration du principe de chauffage par asymétrie 181

Figure 8.2 Principe de chauffage par asymétrie avec compensation série: cas d'une seule phase fonctionnelle 184

Figure 8.3 Principe de filtrage de la séquence homopolaire 190

Figure 8.4 Principe de chauffage par asymétrie: réseau non mis à la terre, deux phases fonctionnelles 190

Figure 8.5 Une seule phase fonctionnelle avec compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile 194

Figure 8.6 Une seule phase fonctionnelle avec compensation série; compensateurs de séquence inverse en triangle 194

Figure 8.7 Une seule phase fonctionnelle sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile 196

Figure 8.8 Une seule phase fonctionnelle sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en triangle 196

Figure 8.9 Deux phases fonctionnelles; sans filtre de séquence homopolaire; sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile 198

Figure 8.10 Deux phases fonctionnelles; sans filtre de séquence homopolaire; sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en Triangle 198

LISTE DE SYMBOLES

$\Phi_z(z)$	Densité de probabilité de la loi normale centrée ou standard
α	Angle de la constante $\overline{A}_0$ du quadripôle de la ligne
β	Angle de la constante $\overline{B}_0$ du quadripôle de la ligne
γ	Angle de la constante $\overline{C}_0$ du quadripôle de la ligne
δ	Écart angulaire entre les tensions $\overline{V}_S$ et $\overline{V}_R$ (Angle de transport)
δ_R	Angle de la tension $\overline{V}_R$ de à la charge
δ_S	Angle de la la tension $\overline{V}_S$ à la source
λ	Taux de pannes d'un appareil
μ	Taux de réparation d'un appareil
μ	Moyenne de la loi normale
σ	Écart type de la loi normale
ω	Pulsation à la fréquence du réseau.
A	Disponibilité d'un appareil
$\overline{A}_0,\overline{B}_0,\overline{C}_0,\overline{D}_0$	Paramètre du quadripôle d'une ligne
$\overline{A}_1,\overline{B}_1,\overline{C}_1,\overline{D}_1$	Paramètre du quadripôle d'une section de ligne
$\overline{A}_2,\overline{B}_2,\overline{C}_2,\overline{D}_2$	Paramètre du quadripôle de la section complémentaire d'une section de ligne
B	Susceptance symbole général
B_a	Susceptance de la phase a dans un système de tension triphasée
B_b	Susceptance de la phase b dans un système de tension triphasée
B_C	Susceptance shunt du compensateur pour chaque phase *a* saine
$B^{(c)}$	Susceptance de compensation d'une charge
B_c	Susceptance de la phase c dans un système de tension triphasée
B_{ab}	Susceptance entre phase a - phase b dans un système de tension triphasée
B_{bc}	Susceptance entre phase b - phase c dans un système de tension triphasée

B_{ca}	Susceptance entre phase c - phase a dans un système de tension triphasée
B_L	Susceptance shunt de chaque phase de ligne
DT	Temps moyen passé dans l'état hors service
f	Fréquence du réseau
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems.
$F_x(x)$	Fonction de distribution cumulative de probabilité
$F_w(x)$	Fonction de distribution cumulative de probabilité alternative de Weibull
f_{ij}	Fréquence de transition d'un appareil de l'état i vers l'état j
$f_x(x)$	Fonction de distribution de probabilité est donnée par :
$f_w(x)$	Fonction de distribution de probabilité alternative de Weibull
G	Conductance symbole général d'une conductance
G_a	Conductance de la phase a dans un système de tension triphasée
G_{ab}	Conductance entre phase a - phase b dans un système de tension triphasée
G_b	Conductance de la phase b dans un système de tension triphasée
G_{bc}	Conductance entre phase b - phase c dans un système de tension triphasée
G_c	Conductance de la phase c dans un système de tension triphasée
G_{ca}	Conductance entre phase c - phase a dans un système de tension triphasée
$\bar{I}_{120}$	Vecteur des composantes symétriques du courant de charge,
$\bar{I}_{120}^{(c)}$	Vecteur des composantes symétriques du compensateur,
$\bar{I}_{eR}$	Courant des source de courant de compensation shunt côté charge
$\bar{I}_{eS}$	Courant des source de courant de compensation shunt côté source
$\bar{I}_L$	Courant total de phase du circuit équivalent d'un corridor
$\bar{I}_R$	Courant de phase à la sortie du corridor
$\bar{I}_{R0}$	Courant de séquence homopolaire à la sortie de la ligne durant l'exploitation normale
$\bar{I}_{R1}$	Courant de séquence directe à la sortie de la ligne durant l'exploitation normale
$\bar{I}_{R2}$	Courant de séquence inverse à la sortie de la ligne durant l'exploitation normale

$\bar{I}'_{R1}$	Courant de séquence directe à la sortie de la ligne durant l'exploitation asymétrique
$\bar{I}'_{R2}$	Courant de séquence inverse à la sortie de la ligne durant l'exploitation asymétrique
$\bar{I}'_{R0}$	Courant de séquence homopolaire à la sortie de la ligne
$\bar{I}_S$	Courant de phase à l'entrée du corridor
$\bar{I}_{S0}$	Courant de séquence homopolaire à l'entrée de la ligne durant l'exploitation normale
$\bar{I}_{S1}$	Courant de séquence directe à l'entrée de la ligne durant l'exploitation normale
$\bar{I}_{S2}$	Courant de séquence inverse à l'entrée de la ligne durant l'exploitation normale
$\bar{I}'_{S0}$	Courant de séquence homopolaire à l'entrée de la ligne pendant l'asymétrie
$\bar{I}'_{S1}$	Courant de séquence directe à l'entrée de la ligne durant l'exploitation asymétrique
$\bar{I}'_{S2}$	Courant de séquence inverse à l'entrée de la ligne durant l'exploitation asymétrique
$\bar{I}_x$	Courant de chaque élément de compensation série
L	Nombre de phases individuelles de même nature coupées dans un corridor
LOLE	Espérance de la moyenne de la puissance non transmise
N	Nombre de lignes dans un corridor
P	Puissance active transmise à la charge par une ligne
P_i	Probabilité pour que le système soit dans l'état i
P_k	Probabilité d'avoir exactement k appareils en service parmi un ensemble de N appareils
P_t	Puissance totale transmise par un corridor
p	Probabilité pour qu'un appareil soit dans l'état fonctionnel
p_{asym}	Probabilité combinée de transmission d'une ligne triphasée durant l'exploitation asymétrique

p_{sym}	Probabilité combinée de transmission d'une ligne triphasée durant l'exploitation symétrique normale
$p_w(x)$	Densité de probabilité de décharge correspondant à une impulsion de tension U
Q	Puissance réactive dans la ligne
Q_S	Puissance réactive totales requise pour la compensation série
Q_{SeTmax},	Puissance réactive totale série
Q_{SeTmin},	Puissance réactive totale série minimale
Q_{sh}	Puissance réactive totale requise pour la compensation shunt
Q_{ShTmin}	Puissance réactive totale shunt minimale
Q_{ShTmax},	Puissance réactive totale shunt maximale
q	Probabilité pour qu'un appareil soit en panne
q_{asym}	Probabilité combinée de non transmission d'une ligne triphasée durant l'exploitation asymétrique:
q_{sym}	Probabilité combinée de non transmission d'une ligne triphasée durant l'exploitation symétrique:
R_{ad}, R_{bd}, R_{cd}	Résistances des phases a b et du compensateur de séquence inverse en étoile du côté source
R_{ag}, R_{bg}, R_{cg}	Résistances des phases a b et du compensateur de séquence inverse en étoile du côté source
$\overline{T}_{120}^{-1}$	Transformée de Fortescue
U	Tension de contournement des isolateurs
U_{50}	Tension de tenue à 50% des isolateurs, pour laquelle la probabilité de contournement est 0.5
U_{aw}	Tension de tenue absolue des isolateurs
UT	Temps moyen passé à l'état fonctionnel
V	Grandeur de la tension à chaque bout de la ligne
V_a	Tension de la phase a dans un système de tension triphasée
V_{ab}	Tension de ligne phase a - phase b dans un système de tension triphasée

$\overline{V}_{abc}$	Vecteur des tensions d'alimentation
V_b	Tension de la phase a dans un système de tension triphasée
V_{bc}	Tension de ligne phase b - phase c dans un système de tension triphasée
V_c	Tension de la phase a dans un système de tension triphasée
V_{ca}	Tension de ligne phase c - phase a dans un système de tension triphasée
$V_{L\text{-}N}$	Valeur efficace de la tension ligne-neutre
$\overline{V}_R$	Tension de phase à la sortie du corridor
V_{RL}	Valeur efficace des tensions ligne-ligne à la sortie du corridor
$\overline{V}_S$	Tension de phase à l'entrée du corridor
V_{SL}	Valeur efficace des tensions ligne-ligne à l'entrée d'un corridor
$\overline{V}_x$	Tension des sources de tension de compensation série en milieu de ligne ou tension aux bornes d'un élément de compensation série
$\overline{V}_{xR}$	Tension de la borne côté charge de chaque élément de compensation série
$\overline{V}_{xS}$	Tension de la borne côté source de chaque élément de compensation série
$\overline{v}_{eR}$	Tension des sources de tension de compensation série côté charge
$\overline{v}_{eS}$	Tension des sources de tension de compensation série côté source
X_{ag}, X_{bg}, X_{cg}	Réactances des phases a b et du compensateur de séquence inverse en étoile du côté source
X_{ad}, X_{bd}, X_{cd}	Réactances des phases a b et du compensateur de séquence inverse en étoile du côté source
X	Symbole général d'une réactance et réactance série de la ligne
X_a	Réactance de la phase a dans un système de tension triphasée
X_{ab}	Réactance entre phase a - phase b dans un système de tension triphasée
X_{bc}	Réactance entre phase b - phase c dans un système de tension triphasée
X_b	Réactance de la phase b dans un système de tension triphasée
X_c	Réactance de la phase c dans un système de tension triphasée
X_{ca}	Réactance entre phase c - phase a dans un système de tension triphasée
X_L	Impédance série de chaque phase de ligne

X_s Impédance série du compensateur pour chaque phase *a* saine

$\bar{x}$ Impédance de compensation série par phase de ligne

$\bar{Y}$ Admittance symbole général

$\bar{Y}_a$ Admittance phase a

$\bar{Y}_{ab}$ Admittance entre phase a et b

$\bar{Y}_{abc}$ Matrice d'admittance de la charge

$\bar{Y}_{abc}^{(c)}$ Matrice d'admittance d'un compensateur de séquence inverse

$\bar{Y}_b$ Admittance phase b

$\bar{Y}_{bc}$ Admittance entre phases a et b

$\bar{Y}_c$ Admittance phase c

$\bar{Y}_{ca}$ Admittance entre phases c et a

$\bar{y}_1$ Admittance de compensation shunt par phase de ligne à l'entrée de la ligne

$\bar{y}_2$ Admittance de compensation shunt par phase de ligne à la sortie de la ligne

$\bar{Z}$ Impédance complexe symbole général

Z_0 Impédance caractéristique de la ligne

$\bar{Z}_a$ Impédance phase a

$\bar{Z}_{ab}$ Impédance entre phases a et b

$\bar{Z}_{a2d}, R_{a2d}, X_{a2d}$ Impédance, résistance et réactance de séquence inverse du compensateur de séquence inverse côté source;

$\bar{Z}_{a2g}, R_{a2g}, X_{a2g}$ Impédance, résistance et réactance de séquence inverse du compensateur de séquence inverse côté source;

$\bar{Z}_b$ Impédance phase b

$\bar{Z}_{bc}$ Impédance entre phases b et c

$\bar{Z}_c$ Impédance phase c

$\bar{Z}_{ca}$ Impédance entre phase c et a

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A. CALCUL DE L'ESPÉRANCE MATHÉMATIQUE DE LA LOI BINOMIALE 216

ANNEXE B. MODÈLE À PARAMÈTRES DISTRIBUÉS DES LIGNES: CALCUL DES ÉLÉMENTS DE COMPENSATION SITUÉS À L'ENTRÉE ET À LA SORTIE DE LA LIGNE ... 218

ANNEXE C. CALCUL DES ÉLÉMENTS DES COMPENSATEURS DE SÉQUENCE INVERSE MONTÉS EN ÉTOILE 221

ANNEXE D. CALCUL DES ÉLÉMENTS DES COMPENSATEURS DE SÉQUENCE INVERSE MONTÉS EN TRIANGLE 224

ANNEXE E. RELATION ENTRE IMPÉDANCES DES COMPENSATEURS MONTÉS EN ÉTOILE ET EN TRIANGLE 226

ANNEXE F. DÉTAIL DES MODÈLES UTILISÉS POUR LA SIMULATION 230

CHAPITRE I INTRODUCTION A LA PLANIFICATION ET A L'EXPLOITATION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Les grands réseaux électriques sont apparus dans les années 1950 avec la construction de grands centres de production de l'énergie et la naissance des réseaux de transport à Très Haute Tension (THT). L'expansion de ces grands réseaux qui a été fulgurante jusqu'à la fin des années 1970 était basée essentiellement sur la planification de grands projets (Baril et McGillis, 1988, [1]) avec plusieurs centres de production et la construction de nouvelles lignes exploitées à des niveaux de tension toujours plus élevés: l'Ultra Haute Tension (UHT) de 1200 kV a été expérimentée même si une limite pratique compatible avec les effets électromagnétiques semble être 800 kV. Les crises des années 70 ont induit des contraintes d'origine économique (crises financières, crise pétrolière) et écologique (naissance des groupes de pression environnementalistes) qui ont imposé la rationalisation des méthodologies en planification et en exploitation des réseaux électriques: on envisagea et pratiqua la compensation réactive comme alternative à la construction de nouvelles lignes (Gavrilovic et McGillis, 1982, [2]). Parallèlement à cela, la demande d'énergie électrique est allée croissante à cause du développement des électrotechnologies: l'énergie électrique s'est avérée plus flexible, plus écologique et mieux adaptée aux besoins de l'industrie et au confort de vie. Le développement de l'électronique de puissance a permis de produire des équipements de compensation, de contrôle et de gestion de l'exploitation des réseaux de transport. Grâce à l'électronique de puissance, la disponibilité de l'énergie a été améliorée en augmentant la capacité du réseau de transport tout en préservant son intégrité (Ooi, Gavrilovic, McGillis et Galiana, 1992, [3]).

Aujourd'hui, les contraintes sur les réseaux électriques sont plus fortes que jamais: les électrotechnologies se développent encore plus vite, induisant un grand besoin d'expansion; les pressions écologistes sont de plus en plus fortes, impliquant moins de possibilités d'expansion; la déréglementation, nouveau paradigme issu de la globalisation de l'économie, impose que l'électricité devienne un article de commerce négociable en

bourse à la demi-heure près, comme tout autre. Ceci implique que les réseaux de transport doivent être exploités pendant de longues périodes avec des congestions et des surcharges, jusqu'à leurs limites de sécurité. De nouveaux défis technologiques doivent donc être relevés si l'on ne veut pas altérer la fiabilité du réseau de transport. Dans cette perspective, on peut utiliser à bon escient la capacité additionnelle qui résulterait de l'exploitation des lignes triphasées comme trois ensembles monophasés distincts. L'Exploitation Asymétrique des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique, basée sur cette idée de séparation fonctionnelle des phases d'une ligne triphasée, constitue un champ d'opportunités que l'on se propose d'explorer dans la présente thèse.

I.1 Structure générale d'un réseau électrique

L'objectif principal d'un réseau électrique est de produire l'électricité à partir des sources d'énergie primaire, de la transporter et de la distribuer aux consommateurs. La structure d'un grand réseau est donc généralement subdivisée en trois grandes parties ou zones fonctionnelles qui sont: le système de production, le réseau de transport (transmission et répartition) et le réseau de distribution (Figure 1.1).

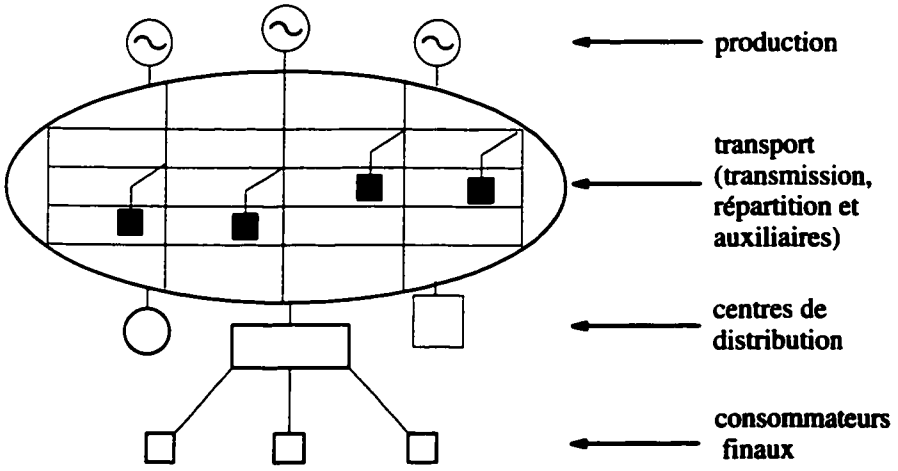


Figure 1.1 Structure générale d'un réseau électrique

Le réseau de transport est constitué de lignes et d'équipements qui forment une grille à laquelle sont connectés les générateurs (production) et les charges à travers le réseau de distribution. Le fonctionnement du réseau de transport est soutenu par un ensemble de services auxiliaires qui regroupent les équipements de support tels que: compensation réactive (support de tension), réserves froides, réserves chaudes, compensation des pertes, protections et systèmes de mesures.

L'énergie électrique est produite à basse ou moyenne tension, puis cette tension est transformée en haute ou très haute tension propice à un transport économique et enfin rabaissée à un niveau compatible avec les besoins des usagers pour la distribution .

I.2 Planification des grands réseaux électriques

La planification des grands réseaux comporte deux volets: la planification du réseau à la conception et la planification de l'exploitation.

I.2.1 La planification en conception de réseau

Dans la planification en conception de réseau, le réseau est conçu avec l'objectif de satisfaire la demande avec un niveau de fiabilité donné (Marceau, Endrenyi & al., 1997, [4]). Les critères de fiabilité, essentiellement déterministes, et la quantité d'énergie disponible étant connus, le réseau adéquat est conçu. L'objectif est donc la fiabilité et plus précisément l'adéquation en fiabilité: le réseau est-il adéquat quant à sa capacité à satisfaire la demande d'énergie? Pour l'analyse de l'adéquation en fiabilité, les zones fonctionnelles du réseau électrique sont souvent regroupées en trois niveaux hiérarchiques (HL) (Billinton, Oteng-Adjei, 1991, [5]):

- le niveau hiérarchique 1 (HLI) contient la production. Les indices d'adéquation (en fiabilité) donnent une indication de la capacité de la production à satisfaire la demande d'énergie. Les critères de conceptions sont en général probabilistes: les unités de production sont combinées de sorte à réduire le plus possible l'espérance mathématique de la perte de

capacité de production. Naturellement, il y a toujours une corrélation entre le besoin d'obtenir la plus grande capacité de production possible et les coûts.

- le second niveau hiérarchique (HLII) contient le système de production et le réseau de transport. Les indices de fiabilité donnent une indication de la capacité de ces deux zones fonctionnelles à alimenter les poches de charge. C'est une extension de HLI pour inclure la capacité de transit de l'énergie à travers le réseau de transport. Le réseau de transport est conçu principalement sur la base de critères déterministes: par exemple le critère habituel est le critère N-1 , c'est à dire que le réseau de transport doit pouvoir alimenter les poches de charge sans délestage et sans rejet de générateur s'il advenait une contingence (par exemple un défaut trois phases-terre) entraînant la perte d'un élément majeur (transformateur, ligne etc.) sur les N qu'il contient.

- le troisième niveau hiérarchique (HLIII) inclut les deux premiers et l'analyse de l'adéquation du réseau de distribution.

Les indices des niveaux hiérarchiques HLI et HLII sont les paramètres les plus importants parce que la défaillance du système de production ou du système de transport peut affecter de grandes sections du réseau et donc avoir des conséquences désastreuses sur l'environnement, la société et l'économie (Billinton, 1991, [5]; Nicolet et al, 1998, [6-7]). Traditionnellement, le réseau de production est planifié avec suffisamment de réserve (froide et chaude) pour satisfaire les besoins de la charge, même dans les conditions de contingences sévères non planifiées. C'est un système fiable qui ne pose pas problème en adéquation. Le réseau de transport est donc le maillon le plus important de la chaîne et requiert le plus d'attention. Habituellement, la capacité du réseau de transport est augmentée tout en respectant les critères de conception, en renforçant les sous réseaux de transmission et de répartition par l'ajout de nouvelles lignes ou par la compensation triphasée conventionnelle série ou shunt.

Les pressions écologistes et économiques ont conduit aux interconnexions entre grands réseaux comme solutions alternatives pour répondre à l'accroissement de la

demande d'énergie et à l'accroissement de la capacité de transport. Les interconnexions permettaient, entre autre, le partage des surplus d'énergie d'une région à l'autre, le partage et l'exploitation d'unités de production moins couteuses et moins polluantes. La plupart des interconnexions étaient des liens asynchrones entre deux pays ou deux grands réseaux électriques. Le rôle du lien asynchrone était de préserver l'intégrité de chacun des deux réseaux vis à vis des perturbations du réseau auquel il est interconnecté.

I.2.2 La planification de l'exploitation

En planification de l'exploitation, l'objectif et les méthodologies sont différents: le réseau étant déjà construit, l'objectif du planificateur de l'exploitation est de transmettre le maximum d'énergie possible à travers le réseau tout en préservant son intégrité. Le travail de l'exploitant est donc mené dans les court et très court termes et la détermination des limites de sécurité dynamiques en constitue la substance (Marceau, Endrenyi & al., 1997, [4]). Les limites de sécurité ainsi déterminées sont transmises aux opérateurs qui sont tenus de les respecter dans la conduite du réseau. Cependant, la fiabilité du réseau, du point de vue de l'exploitant, est une mesure à long terme de la performance de toutes les actions de planification de l'exploitation et la conduite du réseau. Ceci étant, la tendance naturelle du planificateur en exploitation c'est d'utiliser le maximum des ressources disponibles du réseau. Cela, à l'évidence, n'est pas sans conflits avec les planificateurs réseaux.

I.2.3 La symétrie dans l'exploitation des réseaux

Les réseaux électriques sont planifiés et exploités sur la base de plusieurs unités de lignes et d'équipements triphasés. Cette pratique que nous qualifions d'approche symétrique provient des travaux de Tesla sur les systèmes polyphasés et sur les vecteurs symétriques. La somme de N vecteurs coplanaires concourants, de même grandeur et régulièrement espacés en angle (vecteurs symétriques) est nulle. Tesla montra que cette propriété de symétrie, lorsqu'elle est mise en oeuvre dans les circuits polyphasés, résulte en un équilibre parfait (aux imperfections matérielles près). De ce fait, un circuit polyphasé parfait de N phases est plus économique et plus efficace qu'un ensemble de N circuits

monophasés équivalents, pour transporter la même quantité d'énergie. En plus, le circuit polyphasé parfaitement équilibré génère les pertes de puissance minimales dans les lignes de transport. Un circuit polyphasé parfait est donc idéal et le concept clé sur lequel il repose est la symétrie et l'équilibre naturels. Cela étant, tout système polyphasé doit tendre vers cette notion de symétrie pour être optimal.

Les premiers circuits polyphasés étaient biphasés (Tesla Museum, 1999, [8]; Nikola Tesla Information Source, 1999, [9]). D'autres systèmes tels que le système hexaphasé ont été essayés mais le système triphasé s'est imposé parce qu'il offre le meilleur compromis entre économie, simplicité et capacité de transfert de puissance.

La recherche nécessaire de la symétrie a donc façonné la philosophie de planification et d'exploitation des réseaux: la planification et l'exploitation sont symétriques. La symétrie de l'exploitation se manifeste sur le plan technique par la règle de coupure des trois phases quel que soit le défaut. Un défaut sur une phase ou deux provoque un déséquilibre et génère des ondes de séquences inverse et homopolaire qui, à leur tour, se superposent aux phases saines et provoquent des surtensions et des surintensités. L'équipement du réseau, conçu à la base pour un fonctionnement symétrique permanent ne peut supporter ces surintensités et surtensions que pour un temps très limité. Les moyens utilisés pour combattre ce phénomène sont mis en oeuvre juste pour réduire l'impact des contraintes sur l'équipement, le temps qu'une coupure des trois phases intervienne. La solution est donc la coupure, à très court terme, des trois phases d'autant que cette coupure omnipolaire règle en même temps le problème des défauts simultanés sur les trois phases.

Sur le plan stratégique, l'exploitation symétrique a dicté les pratiques dans l'analyse de sécurité des réseaux: les critères de fiabilité sont essentiellement déterministes et le critère le plus répandu est le défaut trois phases-terre suivi de la coupure d'une ligne (i. e. défaut 3Φ et N-1).

Sur le plan économique et historique, l'approche triphasée symétrique fait l'objet d'un conservatisme soutenu par l'industrie d'autant plus qu'une excellente fiabilité a résulté

de la pratique actuelle et que les changements de technologie ne sont adoptés que si la nouvelle technologie est innovatrice et si elle répond à un besoin. La déréglementation vient-elle exprimer un besoin de changement qui n'existait pas auparavant ?

I.3 La déréglementation

L'environnement des réseaux électriques est en train de connaître des transformations dont l'impact pourrait changer les méthodologies en exploitation. L'un des facteurs de changement est la déréglementation (Püttgen, Haubrich, Stotz, Winje, Klappa et Denton, 1997, [10-14]). On en donne un aperçu dans la présente section.

I.3.1 Contexte de la déréglementation

Le contexte de globalisation de l'économie et les forces qui en émanent, façonnent les marchés. La conséquence directe sur les marchés de l'énergie électrique est la libéralisation ou la déréglementation. La déréglementation qui est en marche depuis le début des années 90 va engendrer de la compétition dans un marché qui est mu par cinq forces principales:

- la rivalité parmi des unités en compétition
- des alternatives de production comparables
- l'arrivée potentielle de nouveau opérateurs dans la compétition
- la création de regroupement de producteurs pour protéger les prix à la vente
- la création de regroupement d'acheteurs pour agir sur les prix à l'achat.

I.3.2 Un nouveau paradigme

La déréglementation constitue un changement de paradigme (Dietmar Winje, 1997, [12]):

- l'électricité devient un article de commerce négociable comme tout autre. Les sources et la qualité de cette énergie, la fiabilité et la sécurité de l'alimentation, deviennent des facteurs de négoce aussi importants que les prix.
- il n'y aura plus de monopole ni de droit d'exclusivité. À la place, il y aura des producteurs indépendants et des clients grossistes ou détaillants qui auront libre

accès au réseau de transport pour vendre ou acheter l'électricité; la demande et l'exigence de qualité vont donc augmenter. Les producteurs voudraient minimiser les coûts de production; les distributeurs voudraient acheter l'énergie au plus bas prix possible et la livrer à travers des chemins qui leurs offrent les meilleures marges bénéficiaires afin de maximiser leur profit. Les usagers finaux voudraient quant à eux, un niveau de fiabilité, de flexibilité et des prix qui reflètent leurs besoins, leur choix, leur fantaisie.

I.4 Impacts de la déréglementation

Cet environnement hautement compétitif avec plusieurs acteurs ayant des objectifs concurrents aura plusieurs impacts sur les réseaux électriques, parmi lesquels on peu citer:

- Un changement de géométrie du réseau. La taille du réseau s'accroît (en très grande proportion par rapport à la construction de nouvelles lignes) à cause des multiples interconnexions et de la construction de nouveau site de production. La notion même d'interconnexion va changer. Une interconnexion ne sera plus vue comme un lien entre deux pays ou deux grands réseaux, mais comme "tous les liens possibles entre deux points appartenant à un même réseau ou à des réseaux différents, pour faciliter le transfert de l'énergie pour un profit mutuel" (Cheng & McGillis, 1996, [15]).
- Un changement de structure du réseau. Les unités de production, les réseaux de distribution et les services auxiliaires sont privatisés. Cela est d'autant faisable que ces systèmes sont composés d'unités individuelles qui peuvent être administrées séparément. Par contre, il est difficilement envisageable de privatiser le réseau de transport: l'écoulement de l'énergie suit des lois naturelles (lois d'Ohm et de Kirchoff). L'énergie produite emprunte les chemins de plus faible impédance en fonction du gradient de tension (angle et grandeur) entre les générateurs et les charges. Cet écoulement naturel de l'énergie est difficilement contrôlable une fois les niveaux de tension fixés et les lignes construites (Alain le Du, 1992, [16]). Ce

faisant, il est difficile d'attribuer le transit dans une ligne particulière à un producteur particulier ou à un consommateur particulier qui rejette des harmoniques dans le réseau. Le réseau de transport restera donc la propriété d'un pool. La structure générale d'un réseau dans un environnement déréglementé est montrée à la Figure 1.2.

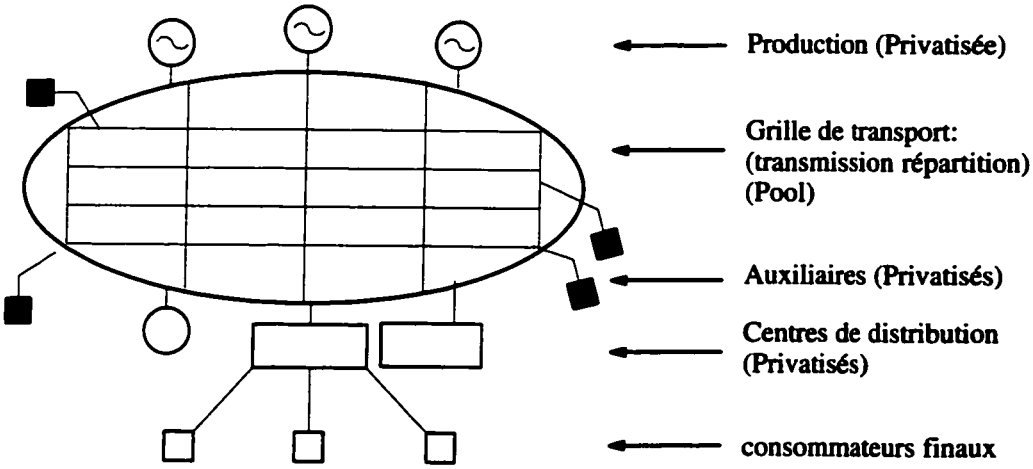


Figure 1.2 Structure générale d'un réseau électrique dans un marché déréglementé

- Une augmentation de la demande d'énergie et une haute exigence de flexibilité. Ceci implique une grande complexité dans la planification de l'exploitation: en essence, la planification à court et très court terme devient une priorité (Chang & McGillis, 1996, [15]).
- Un accroissement de la quantité d'énergie transitée dans le réseau et le besoin économique d'utiliser le réseau de transport plus intensivement.
- Une réduction des réserves de capacité et des marges de sécurité à cause de la fermeture de centres de production non rentables.
- Une réduction des marges de manoeuvre en terme de maintenance des équipements à cause d'une exigence accrue de la continuité de l'alimentation.
- paradoxalement il est de plus en plus difficile si non impossible de construire de nouvelles lignes pour renforcer le réseau de transport. Il y a au moins deux raisons à

cela: i) il semble que les nouveaux producteurs indépendants et les acheteurs intermédiaires ne soient pas intéressés à construire de nouvelles lignes à cause du coût énorme en capital, engendré. Ils préfèrent minimiser le risque financier en partageant les coûts d'un renforcement minimum du réseau actuel de transport en investissant dans les services auxiliaires, eux-mêmes privatisés, ou construire de petites à moyennes centrales à gaz hautement rentables à côté des grands centres de consommation. ii) les impacts directs et indirects des lignes de transports sur l'environnement tels que décriés par les lobbies écologistes entraînent des difficultés énormes dans l'obtention des droits de passage pour de nouvelles lignes.

Les impacts de la déréglementation vont engendrer des problèmes techniques et technologiques qu'il faut résoudre: les réseaux existants vont être exploités jusqu'à leur limite de sécurité et ce, pendant de longues périodes. Le risque d'affecter la fiabilité des réseaux actuels est évident.

I.5 Les problèmes techniques

Rencontrer les exigences de la déréglementation requiert la solution des problèmes techniques suivants:

I.5.1 Précision des transits de puissance

Le réseau de transport doit garantir la transmission et le contrôle des transits de puissance d'un point à l'autre tel que prescrit par les contrats des transactions sur le marché. À la nature arbitraire des contrats (durée, localisation, chemins de transits) s'ajoutent les contraintes physiques et opérationnelles (les limites de sécurités). L'écoulement naturel de puissance active risque de ne pas offrir suffisamment de flexibilité propre à assurer les besoins du marché. De nouveaux degrés de liberté doivent être introduits et de nouveau schémas et système de contrôle peuvent être nécessaires.

I.5.2 CONGESTION ET TRANSITS PARASITES

Les besoins du marché et l'augmentation du volume des transactions risque de créer des congestions dans certains corridors qui seraient alors surchargés. Des transits de puissance non désirés ou parasites pourraient survenir dans un réseau tiers suite à un contrat entre deux premiers réseaux. La Figure 1.3 en donne une illustration. Le réseau B a un contrat de fourniture avec le réseau A. L'énergie emprunte les chemins B-A et B-C-A. Dans le cas d'une perte totale du lien B-A le transit à travers le réseau C doit augmenter pour assurer le volume prescrit. Ce transit non désiré dans le réseau C provoque des surcharges, l'accroissement des pertes, l'échauffement et le vieillissement prématuré des équipements, et des problèmes de planification dans l'exploitation. Comme il est difficile de construire de nouvelles lignes, d'autres moyens seront nécessaires pour optimiser l'exploitation des équipements actuels. Des schémas de contrôle et de compensation aussi bien sur le plan technologique qu'économique doivent être trouvés pour garantir la transparence dans le contexte d'un marché ouvert avec de multiples transactions car les pertes causées par les transactions bilatérales seront difficiles à évaluer et à répartir entre les différents acteurs.

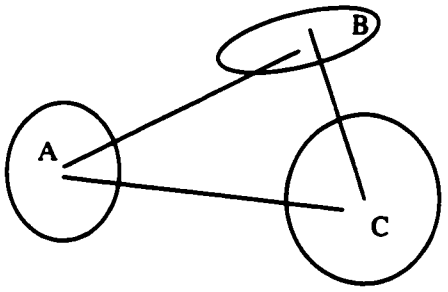


Figure 1.3 Illustration de trois réseaux soumis aux transites parasites

I.5.3 CONTRÔLE DE TENSION ET DE PUISSANCE RÉACTIVE:

Comme l'écoulement de puissance active dépend essentiellement des niveaux de tension et de la quantité de puissance réactive dans le réseau de transport, il est nécessaire, pour garantir les besoins du marché, de maintenir les tensions dans certaines limites et de disposer d'une capacité suffisante de production et d'absorption de puissance réactive.

I.5.4 Flexibilité dans l'exploitation

L'électricité devient un article de commerce et les spéculateurs vont chercher les meilleurs rapports qualité-prix sur le marché dans une agitation permanente. La flexibilité dans l'exploitation devient donc indispensable pour s'adapter aux conditions changeantes du marché. Pour Chang et McGillis (1996, [15]), la définition même de la notion de flexibilité pose problème puisque les fluctuations des conditions du marché sont parfois imprévisibles. Pour moi, la notion de flexibilité devrait être reliée à des méthodes d'analyse et à des indices probabilistes comme la planification court-terme de la charge, la probabilité de perte de charge (LOLP -Loss Of Load Probability-), l'espérance mathématique de perte de charge (LOLE -Loss Of Load Expectation-), l'analyse de tendance du marché ... Le plus grand défi est l'évaluation de ces indices qui doit être effectuée quasiment en temps réel.

I.5.5 Fiabilité

Le réseau de transports sera exploité proche de ses limites. Avec très peu de chance de construire de nouvelles lignes il est possible que les critères de fiabilité soient révisés, pour assurer les transactions. La question qui se pose à ce niveau est : jusqu'à quel point peut-on affecter les critères de sécurité pour assurer les transactions? S'il n'y a pas obligation d'alimenter, on peut toujours faire un compromis entre le coût d'une nouvelle structure et le coût de la perte de charge, pour prendre une décision.

I.5.6 Indépendance

Même si les réseaux sont interconnectés, certaines compagnies voudraient garder une certaine indépendance, en particulier vis à vis des contingences survenant dans les réseaux auxquels ils sont interconnectés. Un équilibre doit être effectué entre ce besoin d'indépendance, les besoins du marché et la fiabilité de l'alimentation.

I.6 Les solutions aux problèmes techniques

Les solutions aux problèmes techniques peuvent être regroupées en deux catégories : les solutions conventionnelles et les solutions modernes.

I.6.1 Les solutions Conventionnelles

Les appareillages conventionnels utilisés pour accroître la capacité de transfert de puissance dans le contexte ou la construction de nouvelles lignes s'avère difficile, sont les transformateurs déphaseurs pour le contrôle des angles de transport, les condensateurs séries pour réduire l'impédance série de la ligne, les condensateurs et réactances shunts et les compensateurs synchrones. La compensation shunt était aussi utilisée comme moyen de support de tension tandis que la compensation série était sollicitée pour accroître la stabilité transitoire du réseau de transport. Ces équipements conventionnels étaient commandés par des dispositifs électromécaniques avec un temps de réponse lent à très lent: supérieur à la seconde.

Le développement des commutateurs de l'électronique de puissance (élévation des niveaux de tensions et baisse des coûts des thyristors de puissance) a permis de remplacer les dispositifs électromécaniques des anciens systèmes par des actionneurs plus rapides et plus fiables (Gyugyi, 1976, [17]; Gyugyi, Otto et Putman, 1978, [18]). Les compensateurs statiques (SVC -Static Vars Compensator-) (Gyugyi, 1976, [17]) sont intervenus dans les années 70 et 80 pour contrôler un des paramètres fondamentaux du transfert de puissance: la grandeur de la tension à un terminal donné. Les compensateurs statiques sont plus couteux que les autres solutions conventionnelles, mais sont révélés être des solutions compétitives parce qu'ils procurent à la fois les fonctions de support de tension et une amélioration des marges dans l'accroissement de la capacité de transit du réseau de transport.

Les appareillages conventionnels ainsi améliorés par l'électronique de puissance sont assez rapides pour assurer un réglage dynamique des transits de puissance. Cependant, ils sont très couteux et volumineux à cause des éléments passifs LC, ils manquent de flexibilité, ils sont très difficiles à installer et la coordination de leur fonctionnement dans le réseau s'avère délicate. Ce ne sont donc pas des solutions économiques à long terme (L. Gyugyi, 1988, [19]).

I.6.2 LES SOLUTIONS MODERNES: LES FACTS.

Le développement des FACTS (Flexible Alternate Current Transmission Systems (Gyugyi, 1988, [19] - Ooi, Kazerani, Marceau, Wolanski, Galiana, McGillis et Joos, 1997, [35]) toujours en cours, promet de grandes innovations dans l'accroissement des performances du réseau électrique. Dans cette section, on donne une brève description des FACTS les plus fréquemment rencontrés dans la littérature.

L'acronyme FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) à été introduit par Hingorani Narain G. en 1988 (Hingorani, 1993, [20]). Il s'agit, dans le principe, de l'utilisation des dispositifs de compensation du type avancé, équipés de thyristors à ouverture par la gâchette (GTO -Gate Turn On thyristor-) commandés par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI, PWM -Pulse Width Modulated), des télécommunications et de l'informatique pour commander et réguler en temps réel, les réseaux de transport d'électricité.

La capacité réelle d'un réseau à transporter l'électricité dépend de plusieurs limites dont les plus élevées sont les limites thermiques. Celles-ci sont généralement deux fois plus grandes que la capacité naturelle de la ligne. L'objectif ultime des FACTS c'est d'étendre la capacité des réseaux existants à leurs limites thermiques sans nécessité d'ajout de nouvelles lignes.

Les FACTS seraient capables d'offrir un réglage dynamique, rapide (temps-réel) et flexible des transits de puissance à travers des chemins choisis, d'augmenter la sécurité par le renforcement de la stabilité (transitoire, dynamique, long terme), de supprimer ou mitiger les transits parasites. Tout cela serait réalisable à un coût compétitif malgré l'utilisation abondante de composants électroniques de grande puissance (Hingorani, 1993, [20]).

Les FACTS peuvent être classifiés selon la nature des paramètres qu'ils contrôlent. On a donc des FACTS qui contrôlent les impédances séries (Ooi , Shu-Zu et Xiao, 1992, [21] - Sen, 1998, [24]) ou shunt (Edwards et al., 1988, [25] - Larsen, Miller et al., 1992, [26]) de la ligne, l'angle de transport (Mathur et Basati, 1981, [27]; Ooi, Shu-Xudai et

Galiana, 1993, [28]), les tensions des barres (Gyugyi, 1978, [18] et 1988, [17] ; Edwards et al., 1988, [25]) ou plusieurs de ces paramètres à la fois (Cheng & McGillis, 1996, [15] ; Gyugyi, 1988 [19]; Gyugyi L. et al., 1995, [29] - Nabavi-Niaki et Iravani, 1996, [30]).

Parmi ces FACTS, ceux qui utilisent les GTO, sont les plus en vues :

- Le STATCOM (Static Synchronous Compensator) dont la fonction est de procurer de la puissance réactive pour maintenir la tension à une barre donnée. Il peut être décrit comme le compensateur statique idéal.
- Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) (Sen, 1998, [24]). C'est l'équivalent du STATCOM mais monté en série dans la ligne. Il procure un déphasage pour contrôler avec rapidité et précision le transit de puissance réelle dans une ligne.
- Le UPFC (Unified Power Flow Controller) (Gyugyi, 1988, [19]; Gyugyi et al., 1995, [29] - Bian, Ramey, Nelson et Edris, 1997, [31]): Ce type de dispositif FACTS combine les fonctions du STATCOM et du SSSC et peut contrôler les puissances réactive et réelle dans une ligne, l'une indépendamment de l'autre.
- le régulateur de puissance interphase (RPI) (IPC - Inter-Phase-Power Controller -) (Brochu, 1997, [32]). Ce FACTS combine la compensation série et le déphasage angulaire. Il est capable aussi de contrôler les puissances active et réactive d'une ligne, l'une indépendamment de l'autre.

Tous ces FACTS font l'objet d'études depuis 1988 mais les notions de FACTS universel ou idéal ont fait jour et ont tendance à s'imposer comme modèle unifié pouvant contrôler les paramètres fondamentaux du transfert de puissance les uns indépendamment des autres. Le UPFC et le RPI en sont des réalisations pratiques. Le FACTS idéal définit les limites supérieures de ce qui est faisable avec les FACTS (Galiana, Almeida, Toussaint, Griffin, Atanackovic, Ooi et McGillis, 1997, [34]).

I.7 DISCUSSION DES SOLUTIONS

La déréglementation vient exprimer un besoin de changement qui n'existait pas auparavant: les réseaux existants vont être exploités jusqu'à leur limite de sécurité et ce, pendant de longues périodes. Puisque la sécurité à court terme assure la fiabilité à long terme, cela représente un défi technologique énorme si on ne veut pas porter atteinte à la fiabilité actuelle des réseaux.

Or dans l'exploitation symétrique, la pratique est de considérer que l'ouverture d'une ligne après un défaut est une contingence normale quelle que soit la nature du défaut (critère N-1). Cette pratique, trop restrictive, possède le désavantage d'ignorer que les contingences comme le défaut monophasé peuvent avoir un impact moins important sur le réseau que ce qu'envisage le critère N-1. Donc, la réponse du réseau n'est pas nécessairement optimale. Une approche différente en exploitation peut conduire à une réponse plus flexible, mieux adaptée à la nature du défaut, à une région de sécurité plus grande et à un accroissement significatif de la capacité de transport du réseau.

S'il est vrai que les FACTS promettent de grandes performances dans l'exploitation et qu'ils vont bientôt remplacer les matériels conventionnels dans l'équipement des réseaux, il est tout aussi vrai que ces mêmes FACTS sont ou seront conçus et mis en oeuvre dans des scénarios d'exploitation privilégiant la coupure triphasée sur les contingences monophasées : la coupure triphasée permanente serait, encore pour longtemps, la règle quel que soit le défaut.

La question essentielle qui se pose ici, à ce stade de notre investigation et qui constitue les fondements de la présente thèse est la suivante : quelle est la capacité de transport d'une ligne, quelque soit le degré de compensation ou muni du FACTS idéal après un défaut monophasé suivi de la coupure triphasée permanente de règle ? La réponse à cette question est évidemment : nulle. La règle de coupure triphasée (symétrique) systématique limite les capacités du réseau et le bénéfice que l'on peut tirer de l'utilisation de compensateur de type avancé.

I.8 CONTENU DE LA PRÉSENTE THÈSE

On propose dans cette recherche une nouvelle approche, l'Exploitation Asymétrique, dans laquelle le réseau de transport est vu comme un ensemble de lignes dont les phases sont indépendantes et peuvent être exploitées séparément. On admet que le réseau de transport puisse fonctionner avec des déséquilibres ou dissymétries importantes dans certaines lignes. On admet par exemple qu'une ou plusieurs lignes puissent fonctionner avec une phase ou deux en moins. Ce concept est défini plus en détail dans les chapitres 2 et suivants.

Le chapitre 1 qui s'achève, a présenté une revue du développement des réseaux de transport d'électricité avec un accent particulier sur la période des 50 dernières années. Depuis les années 1950, la construction massive de centres de production majeurs a entraîné la naissance du transport extra haute tension (EHT) avec les problèmes de planification et d'exploitation associés. La sécurité et sa relation avec les critères de conception et d'exploitation déterministes ont été décrites. L'impact de la déréglementation des marchés d'électricité sur la sécurité des réseaux a été déterminé : les pressions exercées par les transactions bilatérales aléatoires peuvent compromettre l'adéquation du réseau de transport même si sa sécurité est préservée. Finalement on a discuté des solutions classiques et modernes pour accroître la capacité du réseau de transport tout en préservant sa sécurité.

Le chapitre 2 concerne la définition de l'exploitation asymétrique et consacre les objectifs et la méthodologie de cette thèse. Il débute par la définition de l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité. Puis on explicite l'objectif à atteindre comme la possibilité d'une ligne de transmission donnée de maintenir sa capacité de transport originale avec seulement une ou deux phases fonctionnelles, tout en préservant un système triphasé équilibré à ses accès. On y discute des impacts de l'exploitation asymétrique sur la conception et l'exploitation des réseaux et on décrit la méthodologie et les stratégies par lesquelles les objectifs peuvent être réalisés à travers l'utilisation judicieuse de l'équipement de compensation. Enfin, on fait un choix des stratégies qui sont

les plus appropriées, stratégies dont la mise en oeuvre est explorée dans les chapitres subséquents.

Le chapitre 3 est consacré à la justification de l'exploitation asymétrique des réseaux de transport par l'examen de sa relation spécifique avec la théorie des probabilités. Ce chapitre commence par une brève revue de l'application des probabilités à l'exploitation des réseaux de transport d'électricité, puis la relation spécifique de l'exploitation asymétrique avec la théorie des probabilités est décrite. On s'inspire de l'analyse des statistiques des pannes dans les réseaux de transport et de l'analyse comparative de la fiabilité d'une ligne de transport dans l'exploitation normale et dans l'exploitation asymétrique pour démontrer la viabilité de cette dernière.

Le chapitre 4 traite de l'exploitation asymétrique d'un corridor de plusieurs lignes. Lorsqu'une phase d'une ligne est ouverte, la stratégie implique l'application de la compensation série et de la compensation shunt dans les phases homologues des lignes saines. Cette compensation permet de restaurer les paramètres équivalents du corridor initial. Même le cas extrême d'une contingence simultanée sur les trois phases, peut être réglé par cette structure de compensation sans coût additionnel.

Le chapitre 5 traite de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne. Dans ce cas, l'exploitation asymétrique implique la compensation série et la compensation shunt. Les éléments de compensation doivent être ajustés selon la charge afin de filtrer les séquences inverses et homopolaires du courant, résultant du fonctionnement asymétrique. La compensation d'une seule ligne est très complexe. La ligne seule est très vulnérable et c'est le cas le plus souvent rencontré dans l'alimentation de charges isolées, dans la connexion de centrales isolées ou les situations dans lesquelles la construction d'une nouvelle ligne est impossible.

Au chapitre 6, les approches théoriques développées dans les chapitres 4 et 5 sont validées. La validation est effectuée par des simulations avec l'outil d'analyse des réseaux qu'est Power System Blockset de Matlab-Simulink version 5.3 (The Mathworks Inc.,

1998, [36]). Dans le cas de l'exploitation asymétrique avec une seule ligne, on présente un exemple de simulation avec des compensateurs conventionnels et un autre avec des FACTS pour une ligne de 120 kV et 100 km de long. Dans le cas de l'exploitation asymétrique avec plusieurs lignes, on présente des résultats de simulation pour la compensation avec des dispositifs conventionnels et avec des dispositifs modernes. Dans chaque situation, on présente deux exemples de simulation : un réseau de transport de deux lignes de 400 kV, 150 km transportant 1400 MW, et un corridor de transport avec trois lignes de 400 kV, 150 km, transportant 2000 MW.

Le chapitre 7 concerne l'analyse économique qui est limitée à dessein dans la présente thèse à une analyse des coûts de l'exploitation asymétrique. Les coûts d'investissement de l'exploitation asymétrique sont évalués selon le nombre de ligne et la nature de la compensation. Puis, on évalue le coût de l'énergie non livrée dans la situation de l'exploitation normale en terme du coût du risque de non transmission de l'énergie. Enfin, les différents coûts sont comparés pour chaque configuration donnée afin de dégager l'option la plus économique.

Dans le chapitre 8, on traite d'une application originale et innovatrice de l'exploitation asymétrique au chauffage des lignes triphasées en général. Par asymétrie, on peut augmenter le courant dans une phase ou deux d'une ligne triphasée afin de la chauffer suffisamment selon le besoin. On démontre que le chauffage par asymétrie peut être utilisé par exemple pour le dégel des lignes électriques dans les régions froides.

Au chapitre 9 sont présentées les conclusions de la présente thèse : on y expose de manière synthétique, les résultats clés obtenus au cours de cette recherche. Puis, on discute des contributions de cette thèse, de son originalité et l'on finit par l'ouverture de perspectives pour le futur de l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'énergie électrique.

CHAPITRE II INTRODUCTION À L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE DES RÉSEAUX DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ

II.1 DÉFINITION ET OBJECTIF DE LA PRÉSENTE THÈSE : CONCEPT DE L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE

Lorsque l'exploitation du réseau de transport est symétrique avec une règle de coupure triphasée (symétrique) permanente, on limite ses capacités et le bénéfice qu'on peut tirer de l'utilisation de compensateurs de type avancé. Ces limites sont intrinsèquement liées à la règle de coupure triphasée sans égard à la nature de la contingence. Pour une ligne triphasée, quel que soit le degré de compensation, la puissance effectivement transmise après un défaut phase-terre est nulle après la coupure triphasée permanente de règle. L'objectif fondamental est d'aller plus loin, et de pouvoir répondre avec flexibilité aux contingences qui peuvent se présenter dans l'exploitation normale du réseau, en particulier lorsqu'un événement conduit à un changement de topologie ou à la perte de symétrie dans le réseau (Sana, McGillis, Marceau, Do et Carlo, 1999, [37]).

Du point de vue de l'exploitant, toute solution permettant de transmettre de la puissance sans altérer l'intégrité du réseau est bienvenue. Autrement dit, s'il arrive que l'on puisse transmettre de la puissance d'une manière sécuritaire par une ligne malgré la perte d'une phase, on obtient un gain immédiat en terme de capacité relative à l'exploitation. Cela revient aussi à dire que, si l'on pouvait exploiter chaque ligne, non plus symétriquement comme une seule entité constituée de trois tiers indissociables, mais asymétriquement comme trois entités distinctes qui participent à l'ensemble et qui, à l'occasion, peuvent supporter les charges des phases absentes, au moins le temps que des mesures correctives non nécessairement urgentes soient mises en oeuvre, il résulterait un gain considérable en matière de capacité de transport, de flexibilité et d'économie.

Aussi, dans la perspective de répondre aux exigences de la déréglementation des marchés de l'électricité, peut-on profiter de la capacité additionnelle qui résulterait de

l'exploitation des trois phases les unes indépendamment des autres, de manière asymétrique, pour accroître les limites de sécurité et la flexibilité dans la gestion des contrats d'échanges d'énergie.

L'objectif de cette thèse intitulée "l'Exploitation Asymétrique des Réseaux de transport d'énergie Électrique" est de poser les concepts de base, de déterminer les contraintes liées à l'exploitation d'une ligne triphasée comme trois lignes indépendantes et de proposer des solutions réalisables et pratiques pour exploiter un réseau de transport HT et THT de manière asymétrique et sécuritaire.

Plus spécifiquement, puisque tout système polyphasé doit tendre vers la symétrie pour être optimal, il s'agit, advenant l'ouverture d'une phase ou deux dans une ligne, de trouver les moyens de restaurer un système triphasé symétrique aux deux bouts de la ligne de sorte à transmettre la même puissance qu'avant la contingence avec le même écart angulaire afin de maintenir les mêmes marges de stabilité.

Ainsi, sur le plan philosophique, l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité n'est pas contre la symétrie, bien au contraire, elle tend essentiellement à restaurer l'équilibre dans les parties essentielles du réseau tout en admettant que certains équipements comme les lignes soient assujettis à un déséquilibre. Donc, l'exploitation asymétrique des réseaux électriques est basée essentiellement sur une recherche de la symétrie.

II.2 Impacts de l'exploitation asymétrique sur les méthodologies

Dans les sections suivantes on examine les impacts possibles de l'exploitation asymétrique sur la conception et l'exploitation des systèmes électriques.

II.2.1 Sur la production

Dans l'optique de faire fonctionner les phases individuellement, l'approche la plus simple serait d'opter pour une production monophasée. Mais, même si cette solution est théoriquement et pratiquement concevable, elle est à écarter principalement à cause des

problèmes de dimensionnement et du fait que le couple mécanique des machines monophasées fluctue, ce qui leur confère une faible espérance de vie contrairement aux machines triphasées.

Le principe de la production triphasée ne doit donc pas être remis en cause par l'approche asymétrique. Cependant, la protection des générateurs contre la propagation des ondes de séquence résultant intrinsèquement du fonctionnement asymétrique du réseau doit être réexaminée. Il faut aussi déterminer jusqu'à quel point les générateurs triphasés peuvent fonctionner avec des séquences autres que positives sans avoir à être modifiés.

II.2.2 Sur le réseau de transport

L'indépendance des phases ne signifie pas nécessairement une séparation physique des phases. Il s'agit plutôt d'une séparation fonctionnelle dans le sens que chaque phase puisse fonctionner sans la présence de l'autre. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et au développement des FACTS séries, shunts et série-shunts, il est envisageable techniquement, de suppléer à toute asymétrie, par exemple l'absence d'une phase, dans un temps acceptable, en rééquilibrant les tensions et les courants. Dans cette perspective, il faut repenser les systèmes de protection: détection et localisation des défauts, ainsi que les systèmes de coupure. Le mécanisme de coupure doit, par exemple, pouvoir faire la discrimination entre les phases quand il le faut, et les considérer en bloc aussi quand il le faut. En gros, la pratique de l'observation et de la commande doit être revue avec une optique phase tout en incluant, de manière compatible, les principes actuels de traitement des contingences triphasées.

II.2.3 Sur la sécurité des réseaux

La perte d'une ligne triphasée est un événement qui réduit les limites de sécurité et jugé très grave pour un réseau. Pourtant les méthodes d'analyse des limites de sécurité sont basées sur l'exploitation triphasée symétrique qui préconise l'ouverture de la ligne sur un défaut monophasé. Une nouvelle façon d'exploiter le réseau conduit nécessairement à un changement des critères de sécurité. L'exploitation d'un réseau électrique par l'approche

asymétrique offre à celui-ci la capacité de répondre au défaut monophasé par la perte de la phase en défaut plutôt que la perte de la ligne. Ainsi, on évite la perte totale d'une ligne et on obtient un gain immédiat en puissance et en sécurité. Si l'exploitation du réseau électrique par cette approche asymétrique aboutit à une bonne fiabilité, alors on peut considérer désormais que le critère du défaut triphasé-terre suivi de la perte d'une ligne (i.e *défaut* 3Φ *et* N–1) relève d'une contingence extrême. Vu dans le sens des phases, ce critère équivaut à un défaut triphasé suivi de la perte de trois phases (*défaut* 3Φ *et* $3N$–3*phases*).

Même si l'application de la théorie des probabilités dans l'analyse des limites de sécurité n'est qu'à ses débuts (Marceau, Endrenyi et al., 1998, [4]), avoir de la flexibilité dans les critères d'assertion de la limite de sécurité et adapter ces critères aux conditions d'exploitation permettent d'exploiter le réseau avec plus de rentabilité: si la probabilité d'un défaut triphasé est très élevée, par exemple une situation avec présence de verglas, de tempête, de tremblement de terre etc... le critère classique *défaut* 3Φ *et* N–1 est utilisé. Si la probabilité d'une contingence triphasée est basse, pratiquement nulle, c'est-à-dire quand les conditions météorologiques le permettent, on pourrait utiliser un critère de sécurité moins sévère, par exemple *défaut* 3Φ *et* $3N$–1 *phases*, qui est plus proche de la réalité. On peut donc dans une approche intermédiaire, adopter le critère *défaut* 3Φ *et* N–1 comme critère de base et, chaque fois que les conditions le permettent, passer au fonctionnement asymétrique par coupure d'une phase sur une contingence monophasée plutôt que la ligne entière.

II.2.4 Sur les méthodes d'analyse des réseaux

Les méthodes d'analyse des réseaux électriques (analyse transitoire, répartition de puissance, stabilité dynamique, etc.) doivent intégrer l'exploitation asymétrique. Pour cela, dans la simulation d'un réseau en exploitation asymétrique, on doit représenter les phases séparément. Par exemple, si l'on utilise des FACTS pour la compensation, on doit envisager des FACTS monophasés avec une commande propre à chaque phase : le passage des angles d'ouverture et de fermeture des commutateurs d'électronique de puissance d'une phase à l'autre peut varier grandement.

II.3 Stratégies d'implantation.

Il y a deux grandes catégories de stratégies possibles: la stratégie système et les stratégies localisées.

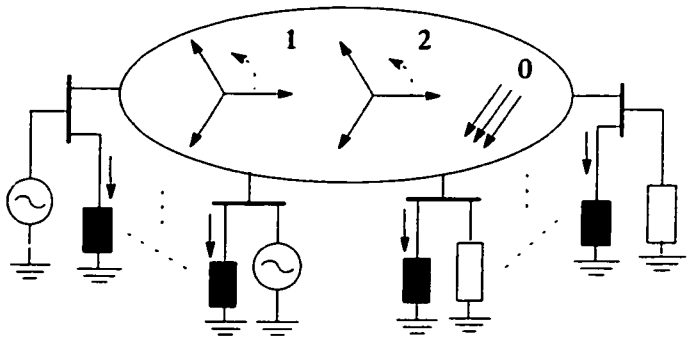


Figure 2.1 Réseau électrique asymétrique

II.3.1 Stratégie "Système"

Considérons un réseau général constitué de générateurs, de charges et du système de transport Figure 2.1. Le réseau de transport est déséquilibré et génère des séquences négatives et homopolaires qui peuvent se propager jusque dans les générateurs et les charges si aucune action n'est entreprise. L'approche système consiste à filtrer les séquences négatives et homopolaires au niveau des barres de production et des barres de charge du réseau à l'aide de FACTS pour empêcher ces séquences d'atteindre les générateurs et les charges. En première approche on ne se préoccupe pas de ce qui se passe dans le réseau de transport: on considère qu'en régime permanent, le système de transport peut supporter ses propres déséquilibres et que l'impact du déséquilibre du réseau de transport sur la qualité de l'alimentation est moindre comparé à celui d'une charge non équilibrée. Le plus important est donc que les générateurs ni les charges ne perçoivent les séquences nuisibles. Cette stratégie peut, par exemple, être mise en oeuvre pour un réseau ayant des corridors à grand nombre de lignes. Il peut y avoir beaucoup de flexibilité selon que l'on admettra un seuil de tolérance de la présence des séquences dans tout ou partie des charges et des générateurs ou pas. Pour ce faire, il conviendrait de développer des stratégies d'identification des barres

importantes, de détermination des FACTS adaptés, du nombre minimal et des meilleurs emplacements pour ces FACTS pour un réseau électrique donné.

II.3.2 Stratégies localisées

Les stratégies localisées regroupent l'adaptation de la compensation, la mise en oeuvre de phases de réserve, la mise en oeuvre de condensateurs de réserve, le filtrage de séquence ou une combinaison de ces éléments, selon les besoins, dans des corridors particuliers.

II.3.2.1 *Adaptation de la compensation*:

Il s'agit de mettre en oeuvre des stratégies pour exploiter les sources de compensation existantes sur le réseau (compensateur statique SVC, compensateur synchrone, compensation série) pour compenser les asymétries topologiques par une asymétrie de compensation réactive dans les phases. Des stratégies shunts, séries ou combinées peuvent être utilisées. Par exemple, si la compensation série est installée, on peut ajouter une commande pour compenser les asymétries des phases. Dans le cas de la compensation shunt, on a montré que des SVC peuvent être amorcés de manière asymétrique pour compenser les asymétries du réseau (Gyugyi, Otto et Putman, 1978, [18]). Cependant, il faut déterminer pour chaque situation donnée, la quantité optimale et le type de puissance réactive nécessaire. La recherche doit aussi déterminer si le dimensionnement des FACTS pour compenser les séquences autres que positives, résulterait en des valeurs réalisables et économiquement acceptables.

II.3.2.2 *Phase de réserve*:

Il s'agit de constituer une phase de réserve pour chaque ligne ou pour un ensemble de plusieurs lignes. Cette phase de réserve serait utilisée lors d'une contingence monophasée, comme phase de remplacement (Figure 2.2). C'est une solution "distribuée" de réduction de l'impédance de la ligne proposée dans (Sana, Marceau, Todde, Do, Mahseredjian & Joos, 1998, [38]). Par exemple, pour un corridor à trois lignes avec une phase de remplacement par ligne, il n'y a plus de perte de ligne pour le défaut 3 phases-terre.

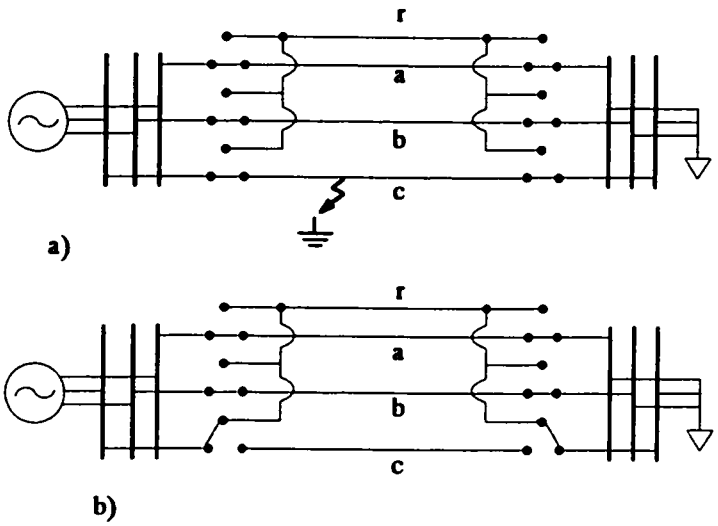


Figure 2.2 Ligne avec phase de réserve (r).
a) défaut phase-terre. b) commutation sur la phase de réserve

Les coûts relatifs d'une telle stratégie par rapport à la construction d'une nouvelle ligne (sans phase de réserve) doivent être évalués. En attendant, on peut dire qu'il est possible qu'elle soit moins coûteuse qu'une ligne entière car elle nécessite de prime abord la modification des pylônes de support des lignes. On peut renforcer la structure existante ou reconstruire d'autres types de supports sur le même droit de passage. Une nouvelle ligne nécessite de l'espace géographique supplémentaire, plus de matériaux et de ressources pour sa construction.

II.3.2.3 *CONDENSATEURS DE RÉSERVE*

Pour les corridors ayant plus d'une ligne, la perte d'une phase dans une ligne résulte en l'augmentation de l'impédance globale de la phase en question. L'insertion d'un condensateur série dans la phase homologue dans une ou plusieurs des lignes saines permet une compensation dynamique de l'impédance globale afin de maintenir le même transfert de puissance. Par exemple, pour le circuit de la Figure 2.3 représentant un corridor à N lignes et pour un défaut phase-terre à la phase c_1, la stratégie consiste à:

- couper la phase c_1 de la ligne 1,

- insérer un condensateur série dans la phase homologue c_2 de la ligne 2 ou les autres phases homologues c_3 à c_N, afin de compenser l'impédance de cette phase et maintenir le transit de puissance.

Pour mettre en oeuvre une telle solution, on doit évaluer les contraintes électriques dans les lignes et l'équipement comme par exemple les surtensions aux bornes des condensateurs, et le taux des tensions et courants de séquence générés lors du fonctionnement asymétrique. Cette solution ne garantit pas un système triphasé équilibré à l'entrée et à la sortie de la ligne. En effet, l'insertion de la compensation série dans une phase crée un déséquilibre dans les lignes (les pertes sont plus élevées dans les phases compensées). Se déséquilibre se répercute sur les tensions des barres à l'entrée et à la sortie des lignes. Un système de support de tension est donc nécessaire au niveau de ces barres.

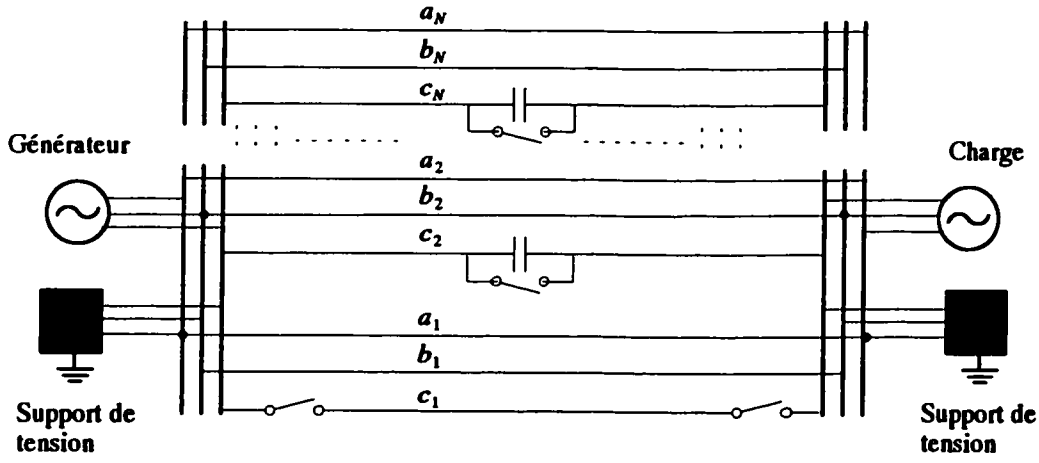


Figure 2.3 Corridor à N lignes: condensateurs de réserve placés en milieu de ligne

Les condensateurs séries peuvent être placés aussi bien au milieu des lignes qu'à l'entrée (Figure 2.4) ou à la sortie du corridor. Dans ces deux derniers cas, les condensateurs doivent être munis d'un dispositif de sectionnement pour les isoler du réseau quand ils ne sont pas sollicités.

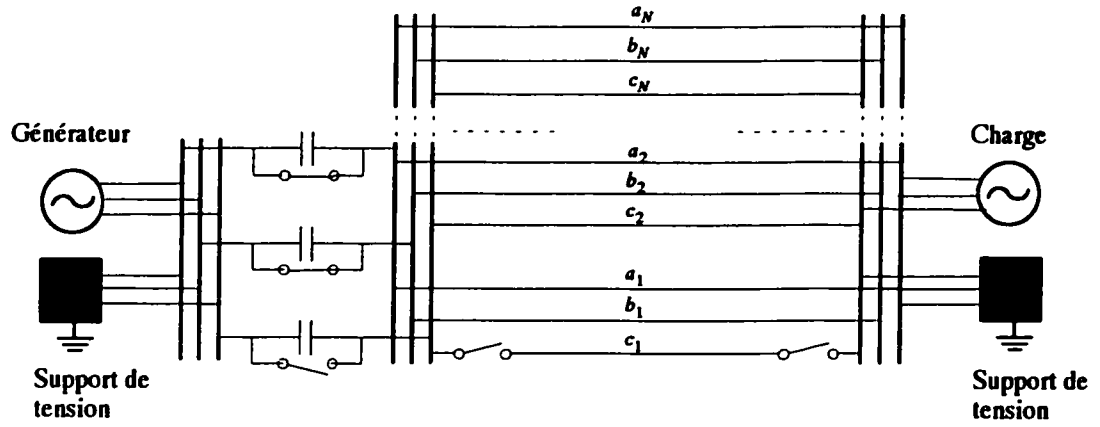


Figure 2.4 Condensateurs de réserve placés à l'entrée d'un corridor de N lignes

II.3.2.4 Sources de tension séries

Les condensateurs séries peuvent être remplacés de façon équivalente par des sources de tension séries (Figure 2.5). Ces sources de tensions peuvent être placées aux même endroits i.e en milieu de ligne ou aux bouts du corridor.

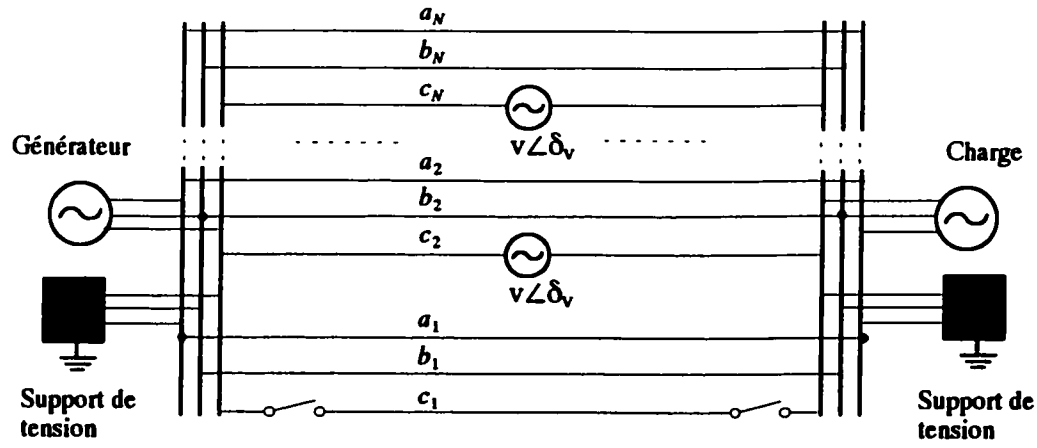


Figure 2.5 Corridor à N lignes: sources de tensions placées en milieu de ligne

Dans ces conditions, la grandeur et le déphasage de la source de tension série doivent être contrôlables afin de couvrir les besoins. Cette stratégie peut apporter plus de flexibilité car on peut simuler la compensation de l'effet de la résistance de ligne, chose impossible à

réaliser avec les condensateurs séries. Cependant, il faut là aussi, un système de support de tension pour compenser le déséquilibre de puissance réactive dans la ligne.

II.3.2.5 *Filtrage des séquences*:

Le filtrage de séquence est appliqué en particulier à un corridor avec une seule ligne quand celle-ci est soumise à un défaut phase-terre suivi de la coupure de cette phase (phase c à la Figure 2.6). Les séquences homopolaire et inverse doivent être filtrées pour les empêcher d'atteindre la charge et la source. Par analogie avec les barrières de feu (Fire-Wall), les filtres constituent une barrière de séquences homopolaire et inverse protégeant le générateur et la charge.

Pour transmettre la même puissance qu'avant la contingence, dans ces conditions, on peut envisager la compensation série dans les phases saines (a et b de la Figure 2.6) soit à l'aide de condensateurs séries soit à l'aide de sources de tension séries.

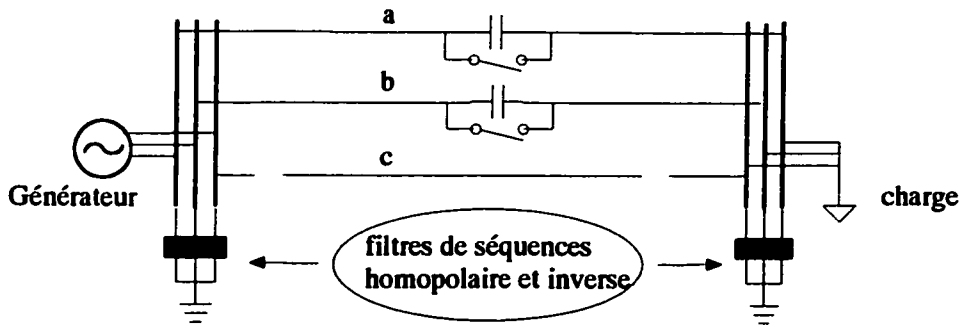


Figure 2.6 Corridor à une ligne avec filtrage des séquences homopolaire et inverse.

II.3.3 Discussion des stratégies d'implantation

L'avantage de la stratégie système est qu'elle est systématique et permet de régler les problèmes de transits d'une manière globale. Sur le plan technique elle résultera en une grande complexité dans la coordination du fonctionnement des différents compensateurs localisés à des endroits stratégiques même si les nouveaux systèmes de contrôle centralisé peuvent offrir un environnement favorable à la mise en oeuvre d'une telle solution. La

détermination des barres les plus à même d'offrir les réglages optimaux, l'analyse de sensibilité (facteurs de distributions) et les théorèmes généraux de l'observabilité et de la commandabilité des réseaux peuvent être mis en oeuvre. Cette solution qui représente un lointain avenir ne sera pas examinée plus en détail dans la présente thèse. Pour des échéances plus proches, les solutions localisées sont propices à la compensation d'un corridor particulier et offrent de bonnes perspectives. Les stratégies localisées les plus en vues sont: l'utilisation de la compensation shunt et de la compensation série, le filtrage des séquences et la phase de réserve. L'utilisation de la phase de réserve peut être réservée aux projets de nouvelles lignes, si la modification des pylônes des lignes existantes s'avère trop coûteuse. La compensation peut être utilisée à la fois pour les lignes existantes et les nouvelles. Les solutions de la compensation seront examinées plus en détail dans la thèse.

II.4 Importance stratégique de la compensation réactive

La compensation réactive a été utilisée au niveau du réseau de transport et au niveau de la charge comme moyen de réglage des performances des systèmes triphasés. Dans les sections suivantes on effectue un survol de l'usage de la compensation réactive et l'on montre son rôle crucial dans la recherche de solutions pour l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité.

II.4.1 La compensation du réseau de transport

Les années 1950 ont marqué le début de l'ère des grands réseaux électriques avec la construction de grands centres de production en dehors des villes et la naissance du transport Haute Tension (HT) et Très Haute Tension (THT). Les problèmes à résoudre à l'époque (et qui sont toujours actuels) étaient l'augmentation de la puissance transmise à travers les lignes et le problème de stabilité inhérent aux grandes structures.

La puissance active est transmise dans une ligne sans pertes (idéale) selon la loi d'Ohm:

$$P = \frac{V^2}{X}\sin\delta$$
$$\cos\delta = 1 - \frac{QX}{V^2} \qquad (1)$$

où P est la puissance active transmise, Q la puissance réactive dans la ligne, V la grandeur de la tension à chaque bout de la ligne, X la réactance série de la ligne et δ l'angle de transport (différence des angles des tensions à l'entrée et à la sortie de la ligne). D'après l'équation (1), l'augmentation de la puissance transmise peut se faire de trois manières différentes :

- en augmentant la grandeur de la tension de ligne, d'où la naissance de la Haute Tension et de la Très Haute Tension: 345 kV et 500 kV en Amérique, 400 kV en Europe (RFA), 735 kV au Québec, 765 kV en Russie, etc.
- en réduisant la réactance série de la ligne soit par l'ajout de nouvelles lignes soit par le biais de la compensation série,
- par action sur l'angle de transport directement lié à la quantité de puissance réactive dans la ligne une fois le niveau de tension fixé et la ligne construite (X fixé). Dans certains cas, l'angle est gardé constant tout en augmentant la puissance par l'apport de la compensation shunt en milieu de ligne (déplacement de la courbe P-δ vers le haut). Dans d'autres, on introduit un déphaseur dans la ligne pour modifier l'angle de transport mais cela requiert une boucle.

Deux autres solutions pour augmenter le bilan énergétique d'une ligne et qui ne sont pas souvent prises en considération sont la réduction des pertes de capacité par l'assurance de la continuité de l'alimentation et l'augmentation de la qualité de la charge.

Kimbark E. (1948, [39] -1964, [42]) est une des références de l'ère des grands réseaux. Ses travaux concernent principalement la stabilité et l'augmentation de la capacité de transport. Dans les deux cas, il montra l'intéret de la compensation série et shunt comme solutions de remplacement à la construction de nouvelles lignes. Dans le domaine de la continuité de service il a proposé un schéma de compensation permettant l'ouverture et la refermeture d'une phase sur défaut monophasée (Single Pole Reclosure - SPR-) comme alternative à la coupure triphasée définitive (Kimbark, 1964, [42]). Le principal problème

qui fut résolu était l'extinction de l'arc secondaire alimenté par couplage inductif et capacitif de la phase en défaut avec les phases saines lors de l'ouverture du disjoncteur. Un ensemble de réactance shunt constituant un circuit résonnant parallèle avec la capacité interphase de la ligne opposait une grande impédance au courant d'arc secondaire.

D'autres travaux sur la SPR (Shperling, Fakheri & Ware, 1978, [43]- Blyakov et al., 1990, [47]) concernent diverses applications du schéma de Kimbark comme l'optimisation de la compensation dans l'application de la SPR à des lignes non transposées (Shperling, Fakheri & Ware, 1978, [43]), l'étude de schémas de compensation non optimisés dans l'application de la SPR à des lignes biternes (Thomann, Lambert & Phaloprakarn, 1993, [44]), la représentation de la SPR dans les études de stabilité (Atmuri, Malone et Burtnyk, 1991, [45]), la commande adaptative (Phadke, Horowitz & McLabe, 1990, [46] et l'analyse des performances (Blyakov et al., 1990, [47]).

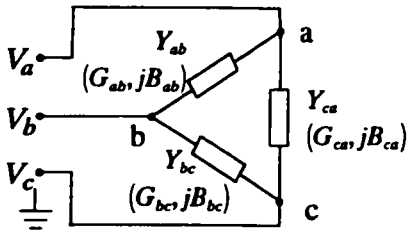
Les objectifs et la pratique de la SPR s'inscrivent dans le très court terme (jusqu'à 30 cycles) et la SPR n'est efficace que pour des défauts monophasés furtifs. Cependant, sur un défaut permanent, il n'a pas été envisagé le fonctionnement avec un pôle ouvert sur une base permanente.

II.4.2 Compensation de la charge

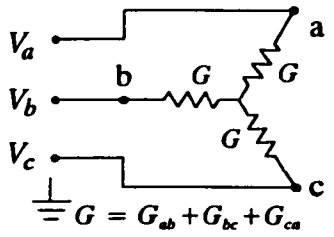
L. Gyugyi, R. A. Otto et T. H. Putman, [18], en étendant les travaux de Steinmetz en 1978 pour couvrir la compensation des admittances linéaires, ont établit les principes théoriques de la compensation des charges linéaires, triphasées, arbitraires non mise à la terre. Ils ont montré par deux méthodes différentes, la méthode directe et la méthode des composantes symétriques, que :

- une charge linéaire triphasée, arbitraire, déséquilibrée et non mise à la terre peut être transformée en une charge triphasée, équilibrée avec un facteur de puissance arbitraire, sans modifier la puissance active échangée entre la charge et la source.
- cette transformation appelée compensation de la charge se fait en général en deux étapes: la compensation du facteur de puissance et le rééquilibrage de la charge.

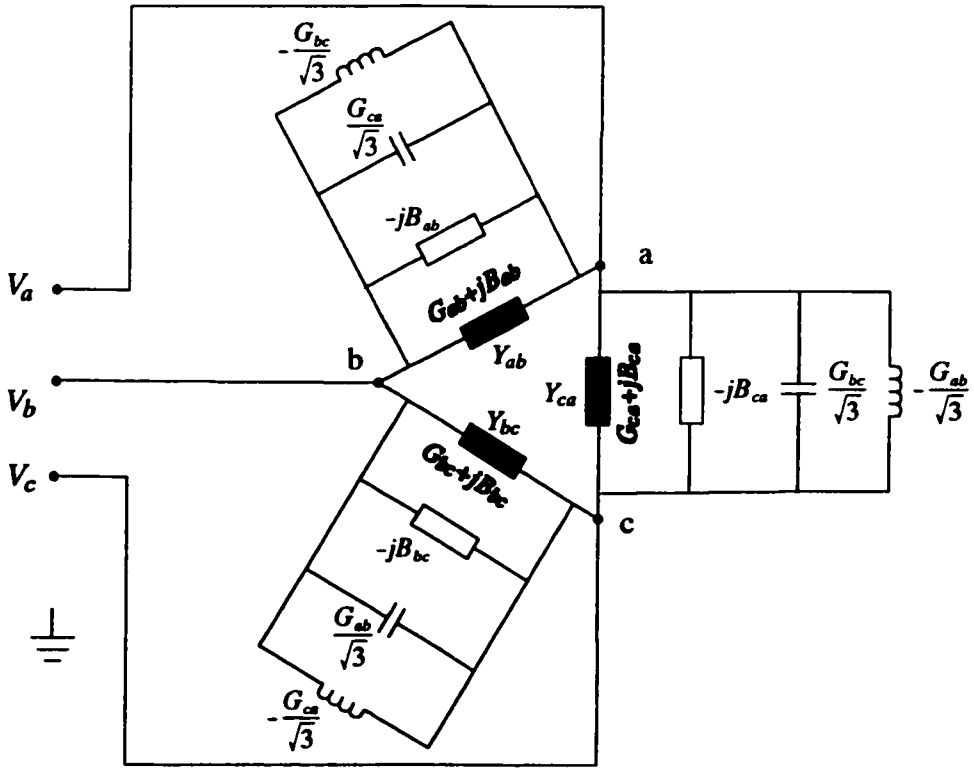
- la compensation de la charge triphasée requiert l'apport de puissance réactive dans les trois phases.
- toute charge linéaire triphasée, arbitraire, déséquilibrée et non mise à la terre peut être compensée en régime permanent par la connexion de trois impédances réactives appropriées entres les trois phases.
- si la charge varie dans le temps, la compensation requerra des réactances variables pouvant être ajustées en conséquence.



a) Charge triphasée déséquilibrée



c) Circuit équilibré équivalent



b) Équilibrage de la charge par des condensateurs et des inductances entre les phases *a* et *b* et c.

Figure 2.7: Principe d'équilibrage d'une charge triphasée montée en triangle

Par la méthode directe, telle qu'illustrée à la Figure 2.7, une charge linéaire arbitraire déséquilibrée en triangle peut être ré-équilibré en deux étapes : d'abord dans chaque phase i on annule la susceptance B_i par l'apport d'une susceptance de compensation duale $-B_i$; puis, la conductance G_i est équilibrée par la méthode de Steinmetz en introduisant une inductance de valeur adéquate dans la seconde phase et un condensateur de valeur appropriée dans la troisième phase. La sommation de ces susceptances dans chaque phase donne les réactances nécessaires pour la compensation de la charge (équation (2)) :

$$\begin{aligned} B_{ab}^{(c)} &= -B_{ab} + \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} - \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} \\ B_{bc}^{(c)} &= -B_{bc} + \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} - \frac{G_{ca}}{\sqrt{3}} \\ B_{ca}^{(c)} &= -B_{ca} + \frac{G_{bc}}{\sqrt{3}} - \frac{G_{ab}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \qquad (2)$$

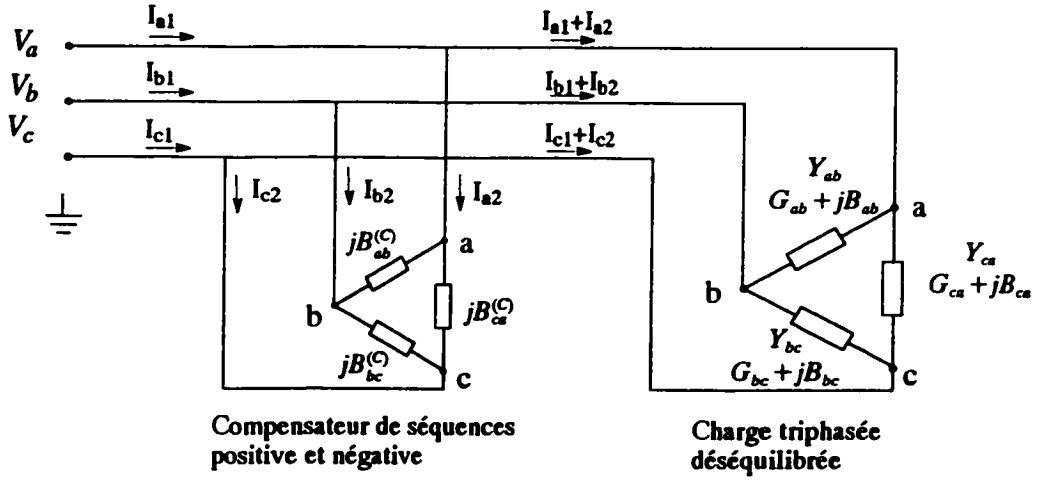


Figure 2.8 Principe de compensation d'une charge linéaire triphasée non mise à la terre par la méthode des composantes symétriques

Le principe de la compensation de charge par la méthode des composantes symétriques est illustré à la Figure 2.8 pour une charge triangulaire non mise à la terre. Le compensateur connecté en triangle est constitué de susceptances pures. Le courant dans la charge et le courant dans le compensateur sont d'abord exprimés en fonction de la tension et

des admittances respectives de la charge et du compensateur, puis ces courants sont décomposés en leurs composantes symétriques:

$$\begin{aligned} I_{120} &= T_{120}^{-1} Y_{abc} V_{abc} \\ I_{120}^{(c)} &= T_{120}^{-1} Y_{abc}^{(C)} V_{abc} \end{aligned} \tag{3}$$

où I_{120} est le vecteur des composantes symétriques du courant de charge, $I_{120}^{(c)}$ le vecteur des composantes symétriques du courant du compensateur, Y_{abc} la matrice d'admittance de la charge, $Y_{abc}^{(c)}$ la matrice d'admittance du compensateur, T_{120}^{-1} la transformée de Fortescue (1918, [48]) et V_{abc} la tension d'alimentation qui est supposée équilibrée.

Il est à noter que les composantes de séquence homopolaire des courants sont nuls parce que la charge ni le compensateur ne sont mis à la terre.

Le compensateur est mis en oeuvre pour :

- éliminer la composante de séquence négative du courant de charge en lui offrant un chemin de faible impédance, ce qui se traduit par la condition suivante:

$$I_2 + I_2^{(c)} = 0 \tag{4}$$

- éliminer (ou réduire) la partie réactive de la séquence directe pour corriger le facteur de puissance ce qui se traduit par la condition qui suit:

$$\mathrm{Im}(I_1) + \mathrm{Im}\left(I_1^{(c)}\right) = 0 \tag{5}$$

En utilisant les conditions ci dessus et l'équation (3) tout en séparant les parties imaginaires et réelles on trouve les valeurs des susceptances du compensateur telles que fournies par l'équation (2). Dans une étape intermédiaire il est montré que les séquences positives et négatives peuvent être compensées séparément et que le compensateur peut être scindé en deux parties indépendantes: une pour la séquence positive (correction du facteur de puissance), et une pour l'élimination de la séquence négative.

II.4.3 Conclusion sur l'importance stratégique de la compensation réactive

De la revue de la pratique de la compensation réactive on peut conclure qu'on peut rendre la symétrie à une charge linéaire déséquilibrée par une compensation shunt appropriée :

- pour les charges non mises à la terre, les compensateurs sont requis pour éliminer les courants de séquence négative uniquement;
- pour les charges mises à la terre, la compensation de la séquence inverse et le filtrage de la séquence homopolaire sont nécessaires ;
- ces mesures correctives doivent être ajustées avec les variations de la charge.

Dans la mesure où les lignes de transports d'électricité peuvent être considérées comme des charges linéaires, il est possible d'étendre le principe de compensation des charges à celles-ci. Cette perspective doit, toute fois, considérer le cas des charges mises à la terre comme c'est le cas d'une ligne de transport à travers les côtés haute tension des transformateurs de charge. Au-delà du rééquilibrage de la charge, on peut augmenter la puissance transitée dans une ligne en exploitation asymétrique grâce à la compensation série et à la compensation shunt.

II.5 Résumé

L'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité se défini par l'exploitation d'un ensemble de lignes triphasées comme trois lignes indépendantes. L'objectif de cette thèse est d'en poser les concepts de base, de déterminer les contraintes et de proposer des solutions réalisables et pratiques.

L'exploitation asymétrique aura des impacts sur la production, le réseau de transport, la sécurité et les méthodes d'analyse des réseaux électriques.

Plusieurs stratégies de réalisation de l'exploitation asymétrique sont possibles. Les stratégies les plus en vue sont celles qui impliquent l'utilisation de la compensation réactive dont l'importance stratégique est montrée. Ces stratégies sont explorées plus en détail dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III ASPECTS PROBABILISTES DE L'EXPLOITATION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

L'analyse de probabilité est un outil essentiel dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques pour la prise de décisions dans le cadre de la gestion de risque, le choix entre plusieurs alternatives, la détermination des contraintes en terme de probabilité d'occurrence, l'évaluation de la fiabilité, etc. L'application des concepts de probabilité dans les réseaux est basée, essentiellement, sur la loi binomiale et les distributions de Poisson, Weibull et Gauss. La viabilité de l'exploitation asymétrique est essentiellement liée à la notion de probabilité et de fiabilité. Son application dépend des risques incorporés par le système de transport. Par exemple, si le risque de la perte d'une ligne est nul ou très faible, il n'est pas essentiel d'envisager une exploitation asymétrique. Si par contre le risque de perdre une ligne est très élevé, alors l'exploitation asymétrique peut être envisagée. Quelques exemples d'application sont montrés dans les sections suivantes pour fins d'illustration. Le rapport avec l'exploitation asymétrique est par la suite décrit, confirmant la relation étroite entre l'exploitation asymétrique et l'approche probabiliste.

III.1 LOI BINOMIALE

III.1.1 DÉFINITIONS

Un appareil réparable a deux états : un état fonctionnel ou disponible et un état hors service ou indisponible. On considère que l'appareil tombe en panne avec un taux donné, désigné par λ et qu'il est réparé avec un taux donné désigné par μ. Le temps moyen (UT) passé à l'état fonctionnel est donc

$$UT = 1/\lambda \tag{6}$$

et le temps moyen passé dans l'état hors service (DT) est

$$DT = 1/\mu \tag{7}$$

On définit la disponibilité A, comme étant le rapport du temps moyen de l'appareil dans l'état fonctionnel sur le temps total de fonctionnement pour une période donnée (TT) :

$$A = \frac{UT}{TT} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{8}$$

tandis que la non disponibilité ($\tilde{A}$) est définie par le rapport du temps moyen de l'appareil dans l'état non fonctionnel sur le temps total de fonctionnement pour la même période donnée (TT).

$$\tilde{A} = \frac{DT}{TT} = \frac{1/\mu}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tag{9}$$

La probabilité p pour que l'appareil soit dans l'état fonctionnel est obtenue par :

$$p = A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tag{10}$$

et la probabilité q pour que l'appareil soit en panne est obtenue par :

$$q = \tilde{A} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = 1 - p \tag{11}$$

On définit la fréquence de transition d'un état (initial) vers un autre état (final) par le produit de la probabilité d'être dans l'état initial et le taux de transition de l'état initial vers l'état final. Par exemple la fréquence de transition de l'état de marche vers l'état de panne pour un seul appareil a deux états est obtenu par :

$$f_{12} = p\lambda = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu} \tag{12}$$

et la fréquence de transition de l'état de panne vers l'état de marche est obtenue par :

$$f_{21} = q\mu = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu} \tag{13}$$

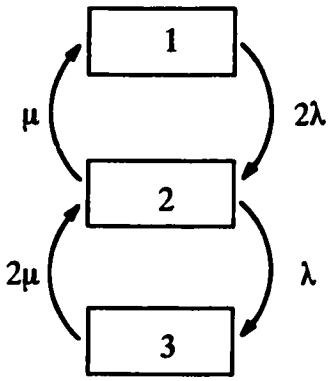
En régime permanent les fréquences de transition d'un état vers l'état voisin et vice versa sont constantes et identiques.

III.1.2 Deux appareils identiques réparables

Considérons, maintenant, un système de deux appareils identiques et réparables, ayant chacun un taux de panne λ, et un taux de réparation μ. Pour chaque appareil, désignons par p la probabilité pour que l'appareil soit fonctionnel et par q la probabilité pour qu'il soit en panne. Pour un système ainsi défini, il y a en tout trois états possibles qui sont :

- les deux appareils sont fonctionnels (aucun appareil en panne),
- un seul appareil fonctionnel (un appareil en panne),
- aucun appareil fonctionnel (deux appareils en panne) .

La Figure 3.1 illustre les trois états possibles d'un tel système. On y indique les taux de transition d'un état à l'autre.



État 1 : deux appareils fonctionnels

État 2 : 1 seul appareil fonctionnel

État 3 : aucun appareil fonctionnel

Figure 3.1 Les trois états d'un système formé de deux appareils identiques réparables

On désigne par P_i, la probabilité pour que le système soit dans l'état i (i = 1, 2 ou 3). La somme des probabilités est égale à l'unité. De plus, en régime permanent stationnaire, les fréquences de transition d'un état vers l'autre sont constantes ; donc on a :

$$\begin{aligned} P_1(2\lambda) &= P_2\mu \\ P_2\lambda &= P_3(2\mu) \\ P_1 + P_2 + P_3 &= 1 \end{aligned} \qquad (14)$$

La résolution de l'équation ci dessus donne les probabilités :

$$P_1 = \frac{\mu^2}{(\lambda + \mu)^2} = p^2$$
$$P_2 = 2\frac{\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2} = 2pq \qquad (15)$$
$$P_3 = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} = q^2$$

On remarque que les probabilités des trois états possibles sont données par les termes du développement de l'expression $(p + q)^2$.

III.1.3 Plusieurs appareils identiques

De façon similaire, si un système comprend N appareils identiques, chaque appareil ayant deux états avec les probabilités respectives correspondantes p et q, alors il existe N + 1 états possibles (N, N-1, ., 0) et la probabilité pour que le système soit dans un état précis est donnée par le terme approprié de l'expansion de l'expression $(p + q)^N$.

Si on désire connaître la probabilité P_k d'avoir exactement k appareils en service parmi un ensemble de N appareils, alors cette probabilité est donnée par :

$$P_k = \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k} \qquad (16)$$

où $\binom{N}{k} = \frac{N!}{k!\,(N-k)!}$ est le coefficient de $p^k(1 - p)^{N-k}$ dans l'expansion binomiale $(p + q)^N$.

Exemple 1 : Compensateurs statiques

Pour l'exploitation d'un corridor de transport d'électricité on veut garder en permanence six compensateurs statiques en service. On désire déterminer le nombre de compensateurs statiques à installer (les six en service et les unités en réserve) pour rencontrer un critère de fiabilité donné dans l'exploitation. Les compensateurs statiques implantés ont les caractéristiques suivantes :

- taux de pannes : une (1) panne par mois;
- temps moyen (durée) de réparation : un jour et demi;

Donc le taux de panne ramené sur une base annuelle est $\lambda = 12$ pannes/an et le temps moyen de réparation ramené sur une base annuelle est de 18 jours. Pour chaque compensateur statique, le taux d'indisponibilité ($\tilde{A}$) et les probabilités de fonctionnement (p) et de panne (q) sont données par :

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \frac{18}{365} = 0.05 = q \\ p &= 1 - q = 0.95 \end{aligned} \tag{17}$$

Dans ces conditions, il faut installer huit compensateurs statiques (six en fonction et deux en réserve) pour garantir au moins six compensateurs statiques en service à tout moment avec une probabilité de 99%. Le Tableau 3.1 permet de résumer les résultats pour divers taux d'indisponibilité. Pour un taux d'indisponibilité de 0.1 (2 pannes par mois), il faut installer trois (3) compensateurs statiques de réserve et pour un taux d'indisponibilité de 0.15 (3 pannes par mois), il faut plus de trois compensateurs de réserve.

Tableau 3.1: Nombre minimal de compensateurs statiques en réserve selon le taux d'indisponibilité pour garantir le fonctionnement simultané de six compensateurs avec une probabilité de 99%

	Nombre de compensateurs statiques installés			
Taux d'indisponibilité (A)	6	7	8	9
0.05	0.7351	0.9556	**0.9942**	0.9994
0.10	0.5314	0.8503	0.9619	**0.9917**
0.15	0.3771	0.7166	0.8948	0.9660
Nombre de compensateurs statiques en Réserve	0	1	2	3

III.2 Distribution de Poisson

Un processus pour lequel le nombre moyen d'événements par unité d'intervalle de temps ou d'espace est constant et les événements tous indépendants, peut être décrit par un processus de Poisson. Si X_t est une variable aléatoire représentant le nombre d'événements dans un intervalle de longueur t et λ le nombre moyen d'événements par unité d'intervalle, alors la fonction de distribution de probabilité d'un processus de Poisson est donnée par :

$$P(X_t = n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \ , \ n = 0, 1, 2, ... \qquad (18)$$

La distribution de Poisson est utilisée pour décrire une grande variété de processus stochastiques dans les réseaux tels que le nombre de défaillance des lignes de transport par intervalle de temps, le nombre de défaillance des matériels (générateurs, transformateurs etc..) par intervalle de temps ou zone.

Exemple 2 : Transformateurs 735 kV

On veut déterminer la probabilité d'avoir exactement un certain nombre de défaillances majeures dans l'année en cours sur un total de 600 transformateurs 735 kV. Des observations sur un total de 4 000 transformateurs à 735 kV ont permis de dénombrer 100 défaillances majeures au cours de la période d'observation.

Le taux de défaillance statistique est de 2.5%, donc sur une population de 600 transformateurs, l'espérance du taux de défaillances majeures est $\lambda = 15$ défaillances / an. La probabilité d'avoir exactement 15 défaillances majeures dans l'année en cours est donc

$$P(X_1 = 15) = \frac{(15 \cdot 1)^{15}}{15!} e^{-15} = 0.10 \qquad (19)$$

Donc, même si le nombre de défaillances majeures attendues est de 15, la probabilité d'avoir exactement 15 défaillances est seulement de 10%

Exemple 3 : Ligne de transport

Soit à déterminer la probabilité qu'il y ait au moins une panne de ligne dans les 24 h à venir. Les pannes de la ligne peuvent être causées par le vent (galop), la foudre, la défaillance d'un transformateur ou le dysfonctionnement des protections. On suppose que les défaillances surviennent selon un processus de Poisson indépendant pour chaque cause avec les taux moyens de défaillances respectifs suivants en nombre de défaillances par an : 0.2, 8, 0.5, 1.5.

La combinaison des processus de Poisson est elle-même un processus de Poisson avec pour taux moyen de défaillance la somme des taux moyens respectifs :

$$\lambda_l = \lambda_{vent} + \lambda_{foudre} + \lambda_{transfo} + \lambda_{prot} = 10.2\ déf/an = 0.028\ déf/jour \quad (20)$$

La probabilité pour qu'il n'y ait pas de panne dans les 24 heures est

$$P(X_{24h} = 0) = \frac{(0.028)^0}{0!} e^{-0.028} = 0.9724 \quad (21)$$

et la probabilité qu'il y ait au moins une panne dans les 24 h est

$$P(X_{24h} > 0) = 1 - P(X_{24h} = 0) = 1 - 0.9724 = 0.0276 \quad (22)$$

III.3 Distribution de Weibull

III.3.1 La loi de Gauss ou loi Normale : Définitions

Une variable aléatoire obéit à la loi de Gauss ou loi normale si sa fonction de distribution de probabilité est donnée par :

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty \leq x \leq \infty,\ \sigma > 0 \quad (23)$$

où μ est la moyenne et σ l'écart type. La fonction de distribution cumulative de probabilité est donnée par

$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad -\infty \leq x \leq \infty,\ \sigma > 0 \quad (24)$$

Il est difficile d'évaluer l'intégrale de l'équation (24) entre deux nombres quelconques a et b. Pour contourner cette difficulté, la fonction de distribution cumulative des probabilités est donnée dans des tables spéciales utilisant la loi de distribution de Gauss centrée ou loi normale standard avec pour moyenne $\mu = 0$ et pour écart type $\sigma = 1$ et qui a pour densité de probabilité :

$$\Phi_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad -\infty \leq z \leq \infty \quad (25)$$

Le passage de l'équation (24) à l'équation (25) se fait par un changement de variable $z = (x-\mu)/\sigma$ dans l'équation (24) et donc la fonction de distribution cumulative des probabilités est évaluée par l'intermédiaire de la loi normale standard par :

$$F_x(x) = \Phi_z\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \tag{26}$$

et la probabilité que la variable X aie une valeur située entre deux nombres a et b donnés est :

$$P(a \leq X \leq b) = F_x(b) - F_x(a) = \Phi_z\left(\frac{b-\mu}{\sigma}\right) - \Phi_z\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right) \tag{27}$$

III.3.2 Utilisation de la distribution de Weibull

La fonction de distribution de probabilité d'une variable aléatoire selon Weibull est: :

$$f_x(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}, \quad \alpha,\beta > 0,\ x > 0 \tag{28}$$

et la fonction de distribution cumulative de probabilité est donnée par :

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^{x} f_x(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}, \quad \alpha,\beta > 0,\ x > 0 \tag{29}$$

Une représentation alternative de la distribution de Weibull utilisée dans le cadre des réseaux électriques et donnée par :

$$f_w(x) = \frac{m}{n}\left(1 + \frac{x}{n}\right)^{m-1} \ln\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)^{\left(1+\frac{x}{n}\right)^{m}}, \quad n > 0,\ m > 0,\ x \geq -n \tag{30}$$

et la fonction de distribution cumulative des probabilités correspondante est :

$$F_w(x) = \int_{-\infty}^{x} f_w(t)dt = 1 - 0.5^{\left(1+\frac{x}{n}\right)^{m}}, \quad n > 0,\ m > 0,\ x \geq -n \tag{31}$$

Exemple 4 : Tension de tenue critique de chaînes d'isolateurs en parallèles.

Soit à déterminer la tension de tenue critique de l'isolement pour un ensemble de N chaînes d'isolateurs identiques en parallèle connaissant la tension de tenue critique d'une

chaîne d'isolateurs et sachant que la tension de tenue de l'isolement suit une loi normale. La loi de distribution de Weibull permet de remplacer la loi normale standard et d'éviter ainsi l'utilisation des tables de probabilité (Canadian Standard Association, 1998, [50]).

Pour une chaîne d'isolateurs, la fonction de distribution cumulative de probabilité de décharge correspondant à une impulsion de tension U est donnée par une distribution de Weibull :

$$p_w(x) = P(X = x) = F_w(x) = 1 - 0.5^{(1+\frac{x}{n})^m} \tag{32}$$

Les paramètres m et n sont choisis afin que cette fonction de densité soit approximativement la même que celle de la loi normale. n est le point de troncature et est déterminé de sorte que $F_w(x) = 0$ pour $x = -4$; m est déterminé de sorte que les probabilités pour $x = -1$ soient les mêmes selon la loi normale standard et la distribution de Weibull :

$$\begin{aligned} F_w(-4) &= 0 \\ F_w(-1) &= \Phi_z(-1) = 0.16 \end{aligned} \tag{33}$$

On obtient $n = 4$ et $m = 5$ et donc, la fonction de densité de probabilité de décharge correspondant à une impulsion de tension U devient :

$$p_w(x) = P(X = x) = F_x(x) = 1 - 0.5^{(1+\frac{x}{4})^5} \tag{34}$$

Cette fonction et la fonction cumulative associée sont représentées à la Figure 3.2 où on les compare aux fonctions correspondantes pour la loi normale centrée.

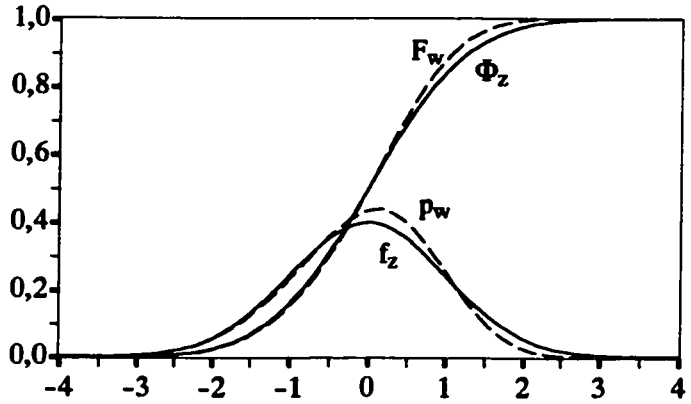


Figure 3.2 Comparaison de la distribution de Weibull et de la Distribution normale

La valeur de la tension de contournement, U, est exprimée par rapport à x par la relation suivante:

$$x = \frac{U - U_{50}}{\sigma} \tag{35}$$

où sigma est l'écart type de la loi normale. Comme $p_w(x) = 0$, pour $x = -4$, la distribution de Weibull donne la tension de tenue absolue U_{aw} à -4σ en dessous de U_{50}.

$$U_{aw} = U_{50} - 4\sigma \tag{36}$$

Pour N chaînes d'isolateurs en parallèle, si l'on définit

$$p_w(50) = U_{50_N} \tag{37}$$

et l'on désigne l'écart type de la loi normale par σ_N, alors on peut écrire que :

$$p_w(x') = 1 - 0.5^{\left(1+\frac{x'}{4}\right)^5} \tag{38}$$

où

$$x' = \frac{U - U_{50_N}}{\sigma_N} \tag{39}$$

Là aussi, la tension de tenue absolue U_{awN} est à $-4\sigma_N$ en dessous de U_{50_N}.

$$U_{aw} = U_{50_N} - 4\sigma_N \tag{40}$$

Si p est la probabilité de contournement et q la probabilité de tenue d'une chaîne d'isolateurs, alors :

$$\begin{aligned} p &= p_w(x) = 1 - 0.5^{\left(1+\frac{x}{4}\right)^5} \\ q &= 1 - p \end{aligned} \tag{41}$$

et pour N chaînes d'isolateurs en parallèle, la probabilité de tenue est :

$$p_w(N) = 1 - q^N = 1 - (1 - p)^N \tag{42}$$

ou

$$p_w(N) = 1 - 0.5^{N\left(1+\frac{x}{4}\right)^5} \tag{43}$$

D'un autre côté, on a :

$$p_w(N) = 1 - 0.5^{\left(1+\frac{x'}{4}\right)^5} \tag{44}$$

De l'égalité des équations (43) et (44) on aboutit à :

$$1 + \frac{x'}{4} = \sqrt[5]{N}\left(1 + \frac{x}{4}\right) \tag{45}$$

Remplaçant x et x' par les valeurs données dans les équations (35) et (39) respectivement, on aboutit à :

$$\frac{U - \left(U_{50_N} - 4\sigma_N\right)}{\sigma_N} = \sqrt[5]{N}\,\frac{U - \left(U_{50} - 4\sigma\right)}{\sigma} \tag{46}$$

étant donné que la tension de tenue absolue est la même pour une chaîne d'isolateurs que pour l'ensemble des N chaînes d'isolateurs, on a :

$$U_{50_N} - 4\sigma_N = U_{50} - 4\sigma \tag{47}$$

et

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{\sqrt[5]{N}} \tag{48}$$

Donc, si la tension de tenue critique (U_{50}) et l'écart type (σ) pour la loi normale et pour une chaîne d'isolateurs sont connus, on peut déterminer la tension de tenue critique (U_{50_N}) et l'écart type pour la loi normale et pour N chaînes d'isolateurs en parallèle, en utilisant la distribution de Weibull.

Exemple 5 : Application numérique pour pylônes à 735 kV

Pour une ligne 735 kV on a : $U_{50} = 1600$ kV, $\sigma = 100$ kV, et $U_{-4\sigma} = 1200$ kV. Pour une ligne de 333 km de long il y a 1024 chaînes d'isolateurs en parallèle, donc, N = 1024, $\sigma_N = \sqrt[5]{1024} = 25$ et $U_{50_N} = U_{-4\sigma} + 4\sigma_N = 1300$ kV;

III.4 APPLICATION À L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE

Dans cette section, l'intérêt de l'exploitation asymétrique est démontré par des arguments probabilistes. On examine dans un premier temps, les statistiques des pannes dans les lignes de transport, puis dans un second temps, la fiabilité des lignes de transport sous l'exploitation symétrique et sous l'exploitation asymétrique dans le but de les comparer.

III.4.1 STATISTIQUES DES PANNES DANS LES LIGNES DE TRANSPORT

Les pannes des lignes de transport sont causées par des événements comme le mauvais temps, les défauts dans l'équipement ou les erreurs humaines. Les effets induits par ces causes sont le plus souvent le défaut une phase-terre (plus de 95% des cas), quelques défauts phase-phase (provenant essentiellement du galop de conducteurs) et très rarement le défaut trois phases terre (provenant essentiellement d'événements extraordinaires comme les feux de forets). En effet, les statistiques des défauts dans les réseaux électriques montrent que le pourcentage du défaut monophasé augmente avec la tension nominale et les dimensions de la ligne: de 60% pour les 220 kV, il atteint 97% pour les lignes 750 kV (Phadke, Horowitz et McLabe, 1990, [46]- Blyakov et al., 1990, [47]).

Le réenclenchement automatique (SPR - Single Pole Reclosing -) a été adopté par plusieurs compagnies d'électricité pour accroître la performance du réseau de transport même si le critère du défaut trois phase-terre a été à la base de la conception du réseau. Le nombre de réenclenchements automatiques monophasés réussis, chute à partir de 330kV : de 72% pour 330 kV, il atteint 52% pour 750kV (Phadke, Horowitz et McLabe, 1990 [46] - Blyakov et al., 1990, [47]). Cela est dû, en partie, au fait que l'influence des défauts qui ne peuvent être éliminés par ré-enclenchement automatique devient prépondérante en très haute tension. Pour les lignes haute-tension (< 300 kV), la SPR connaît un succès relatif parce que la foudre et les contournements de l'isolation associés à sa manifestation sont les principales causes des pannes. Pour les lignes Extra-haute-tension, le niveau d'isolement est très élevé et résulte en un faible taux des pannes causées par la foudre, mais un plus grand

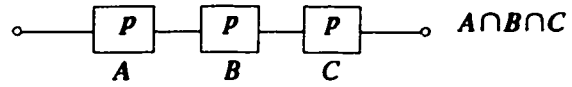
taux des pannes causées par les équipements terminaux des lignes. Comme le matériel EHV est monophasé, les pannes EHV peuvent aussi être classifiées dans la catégorie de celles causées par les défauts phase-terre. Cependant, le réenclenchement ne peut être effectué sur un équipement défectueux. Dans tous les cas, il n'est pas possible d'appliquer la SPR quand les lignes sont en permanence équipées de réactances shunts comme c'est le cas pour le réseau 735 kV d'Hydro-Québec.

Le fait que la plupart des pannes des lignes de transport soit causée par le défaut phase-terre est une motivation pour l'étude de l'Exploitation Asymétrique, même si la pratique de la SPR résulte en un succès de près de 50%. L'adoption du critère du défaut trois phase-terre pour la planification et l'exploitation a été généralement acceptée parce qu'il est simple à définir, à analyser, à tester et parce qu'il est un critère parapluie qui permet de couvrir un grand nombre de contingences. Cependant, il serait faut d'accorder trop de signification physique à ce critère qui reste essentiellement un concept (les statistiques prouvant un taux de panne de moins de 1% attribuables au défaut trois-phase-terre). Ceci étant dit, il est plus simple ou juste de considérer l'Exploitation Asymétrique pour suppléer au critère du défaut trois-phase-terre dans la grande majorité des cas où ce dernier ne s'applique pas. Ainsi, on augmenterait le bilan énergétique global et l'efficience du système de transport si l'Exploitation Asymétrique était mis en oeuvre.

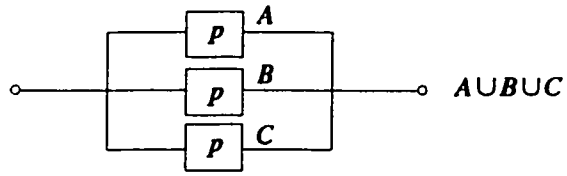
III.4.2 Analyse de fiabilité

L'indice de fiabilité le plus utilisé dans la planification est le LOLE (Loss of load Expectation) qui est l'espérance de la moyenne de l'énergie non livrée du fait de la configuration du réseau et des défaillances de ces composantes (Anders, 1990, [51]). Une autre forme du LOLE utilisée couramment est, cette fois, l'espérance de la moyenne de la puissance non transmise. Cette dernière forme du LOLE est utilisée dans les sections suivantes pour l'analyse de fiabilité de la transmission de puissance d'un corridor ayant plusieurs lignes et fonctionnant selon les approches symétrique et asymétrique. Cette

analyse de fiabilité permet de montrer le potentiel de l'exploitation asymétrique (Sana, McGillis, Marceau, Do et Carlo, 1999, [37]).



a) Exploitation symétrique $p_{sym} = p^3$



b) Exploitation asymétrique $p_{asym} = 1 - (1 - p)^3$

Figure 3.3 Circuit logique équivalent d'une ligne triphasée .

La Figure 3.3 montre le circuit logique équivalent d'une ligne pour l'analyse élémentaire de fiabilité d'une ligne de transport selon les deux approches d'exploitation. Dans l'approche symétrique, la perte d'une quelconque des trois phases provoque la perte totale de la ligne, donc, les trois phases sont en série. Dans l'approche asymétrique, les trois phases fonctionnent indépendamment les unes des autres et donc, elles sont en parallèle. La probabilité de transmission de l'énergie entre l'entrée et la sortie de la ligne est différente selon les modes d'exploitation et le but est de calculer la moyenne de la puissance non transmise (LOLE) dans les deux approches et de les comparer.

Considérons, pour se faire, un corridor ayant N lignes triphasées transportant une puissance totale P_t et considérons que chaque phase de chaque ligne a une probabilité de transmission de puissance, p, et une probabilité de non transmission de puissance, $q = 1 - p$.

La pratique habituelle dans l'industrie est de considérer la probabilité p, comme étant la probabilité combinée de transmission d'une phase parmi trois à cause de l'exposition totale de la ligne à l'environnement. Cela étant, cette probabilité peut être éclatée et la contribution de chaque composante à l'ensemble peut être retrouvée. De toute évidence, comme l'exploitation asymétrique est une approche phase par phase on doit ramener

l'exploitation symétrique en ces composantes de phase pour trouver une base commune de départ pour les calculs. Donc, dans ce qui suit, p est la probabilité de transmission de chaque phase telle que soumise à sa propre exposition aux aléas.

III.4.2.1. ESPÉRANCE DE LA MOYENNE DE PUISSANCE NON TRANSMISE DURANT L'EXPLOITATION SYMÉTRIQUE

Dans les conditions de l'exploitation symétrique les probabilités combinées de transmission (p_{sym}) et de non transmission (q_{sym}) de chaque ligne triphasée sont données par les équations suivantes , respectivement:

$$p_{sym} = p^3 \tag{49}$$

$$q_{sym} = 1 - p^3 \tag{50}$$

où p est la probabilité de transmission de puissance de chaque phase. Donc, la probabilité de non transmission de k lignes parmi N suit une loi de distribution binomiale de paramètres (N,q_{sym}) et est donnée par :

$$Q_{sym} = \binom{N}{k} q_{sym}^{k} \left(1 - q_{sym}\right)^{N-k} = \frac{N!}{k!(N-k)!} \left(1 - p^3\right)^{k} p^{3(N-k)} \tag{51}$$

La perte de capacité de transmission causée par la perte totale de k lignes parmi N est $\frac{k}{N} P_t$. La contribution au *LOLE* est le produit de la probabilité de perte de capacité et de la capacité perdue :

$$LOLE(k,N) = \frac{k}{N} P_t \binom{N}{k} q_{sym}^{k} \left(1 - q_{sym}\right)^{N-k} = P_t \frac{k}{N} \frac{N!}{k!(N-k)!} \left(1 - p^3\right)^{k} p^{3(N-k)} \tag{52}$$

Le *LOLE* est lui-même obtenu par la somme des contributions individuelles de chaque événement et est donné par ce qui suit (voir l'annexe A pour la démonstration) :

$$(LOLE)_{sym} = \sum_{k=0}^{N} LOLE(k,N) = P_t \sum_{k=0}^{N} \frac{k}{N} \frac{N!}{k!(N-k)!} \left(1-p^3\right)^{k} p^{3(N-k)} = P_t \left(1-p^3\right) \tag{53}$$

III.4.2.2. ESPÉRANCE DE LA MOYENNE DE PUISSANCE NON TRANSMISE DURANT L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE

Dans les conditions de l'exploitation asymétrique, les probabilités combinées de transmission p_{asym}, et de non transmission (i.e défaillance totale) q_{asym}, de chaque ligne triphasée résultent d'une distribution binomiale sur les trois phases avec pour paramètres (3, p) et (3, q) respectivement. Donc, nous avons pour chaque ligne :

$$p_{asym} = 1-(1-p)^3 \tag{54}$$

$$q_{asym} = (1-p)^3 \tag{55}$$

Dans ces conditions, la probabilité de non transmission de k lignes parmi N, (Q_{asym}), est aussi donnée par une loi de distribution binomiale avec pour paramètres (N,q_{asym}) :

$$Q_{asym} = \binom{N}{k} q_{asym}^{k}\left(1-q_{asym}\right)^{N-k} = \frac{N!}{k!(N-k)!}(1-p)^{3k}\left[1-(1-p)^3\right]^{N-k} \tag{56}$$

La contribution au *LOLE* de chaque événement et le *LOLE* sont donnés par les équations (57) et (58) respectivement.

$$\begin{aligned} LOLE(k,N) &= \frac{k}{N}P_t\binom{N}{k}q_{asym}^{k}\left(1-q_{asym}\right)^{N-k} \\ &= P_t\frac{k}{N}\frac{N!}{k!(N-k)!}(1-p)^{3k}\left[1-(1-p)^3\right]^{N-k} \end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned} (LOLE)_{asym} &= \sum_{k=0}^{N} LOLE(k,N) \\ &= P_t\sum_{k=0}^{N}\frac{k}{N}\frac{N!}{k!(N-k)!}(1-p)^{3k}\left[1-(1-p)^3\right]^{N-k} = P_t(1-p)^3 \end{aligned} \tag{58}$$

III.4.2.3. BÉNÉFICE DE L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE

La différence entre les LOLE de l'exploitation symétrique et de l'exploitation asymétrique donne le bénéfice de l'exploitation asymétrique qui peut être évalué au coût de production de l'énergie.

$$\Delta LOLE = (LOLE)_{sym} - (LOLE)_{asym}$$
$$\Delta LOLE = \left[\left(1-p^3\right) - (1-p)^3\right] P_t \qquad (59)$$

Comme on le voit, si la probabilité de transmission de l'énergie est la même pour toutes les phases, alors la probabilité de défaillance totale d'une ligne et le risque de non transmission sont toujours plus élevés pour l'exploitation symétrique. Le risque de non transmission ne dépend pas du nombre de ligne mais de la puissance totale transportée et de la probabilité de non transmission.

En planification de la production, la détermination du LOLE est un exercice de probabilité dont les paramètres sont les taux de défaillances des générateurs. La valeur présente du LOLE dépend du taux des réserves de production dans le réseau et est adéquate si elle satisfait les standards de l'industrie qui peuvent être, par exemple, 5 heures/an ou 1 jour/an.

En planification du réseau de transport, la détermination du LOLE est aussi un exercice probabiliste dont les paramètres sont, cette fois, les taux de défaillance des lignes et la réduction correspondante de la capacité de transport qui en est la conséquence. Cette réduction de la capacité de transport n'est pas absolue (effective) car elle dépend des caractéristiques de la charge du réseau ou des besoins actuels vis à vis de la capacité de transport réduite. En d'autres termes, la courbe de variation de la charge va modifier la puissance perdue en tenant compte du fait que la perte de capacité de transport due à la défaillance des lignes peut survenir à tout instant au cours du cycle de la charge. Cette modification, généralement une réduction, donne la puissance effectivement perdue comme résultat du produit de la capacité totale par un facteur de charge.

Il est généralement admis dans l'industrie qu'un facteur de charge de 50 à 75% est raisonnable. Ce facteur de charge est quelque peut arbitraire mais il permet d'approcher les coûts réels tenant compte du cycle de la charge en mitigeant la valeur du LOLE. Le coût du LOLE en planification du transport est donc une base de référence servant à établir la viabilité d'une modification du réseau afin d'en améliorer la capacité de transport. Pour cela

la puissance effectivement perdue résultant du LOLE est évaluée au coût local de la production d'énergie.

Exemple 6 : Calcul du risque pour un corridor de 300 km ayant deux lignes de 400 kV (N = 2). La probabilité de non transmission peut être évaluée par 0.133% par 100 km de ligne (Canadian Electrical Association, 1990, [52]). Donc, pour chaque phase qui a une longueur équivalente de 300 km on a $q = 0.4\%$ et $p = 99.6\%$. Le bénéfice de l'exploitation asymétrique est obtenu de l'équation (59) : $\Delta LOLE = 0.01195 P_t$. En supposant un coût de production de l'énergie de 2 500 \$/kW et un facteur de charge de 75%, le bénéfice de l'aproche asymétrique par unité de puissance transmise est approximativement de 23 \$/kW.

Au chapitre VII, le bénéfice de l'exploitation asymétrique est rapproché du coût de l'équipement nécessaire pour son implantation.

III.5 Résumé

L'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité est justifiée à travers l'examen de sa relation spécifique avec la théorie des probabilités. Après une brève revue de l'application des probabilités à l'exploitation des réseaux de transport d'électricité, la relation spécifique de l'exploitation asymétrique avec la théorie des probabilités est décrite, d'abord, à travers l'analyse des statistiques des pannes dans les réseaux de transport, puis, par l'analyse comparative de la fiabilité d'une ligne de transport dans l'exploitation normale et dans l'exploitation asymétrique. L'analyse de fiabilité permet de déterminer la moyenne de l'énergie non livrée (LOLE) dans le cas de l'exploitation normale et durant l'exploitation asymétrique et de les comparer. De cette comparaison résulte le bénéfice de l'exploitation asymétrique comme étant la différence entre les risques de non transmission de l'énergie durant l'exploitation normale et l'exploitation asymétrique. On peut évaluer le bénéfice de l'exploitation asymétrique au coût de production de l'énergie.

CHAPITRE IV EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC PLUSIEURS LIGNES

La stratégie d'implantation par compensation pour les corridors ayant plusieurs lignes telle que décrite dans la section II.3.2.3 est examinée en détail dans ce chapitre. On sait que pour de tels corridors, la perte d'une phase dans une ligne résulte en l'augmentation de l'impédance globale de la phase en question. L'utilisation de la compensation série et de la compensation shunt dans la phase homologue dans une ou plusieurs des lignes saines permet une compensation dynamique de l'impédance globale afin de maintenir le même transfert de puissance.

Dans ce chapitre on évalue la puissance réactive nécessaire à l'implantation d'une telle stratégie ainsi que les contraintes sur l'équipement. Les hypothèses générales de calcul suivantes sont considérées :

- les lignes ne sont pas couplées
- chaque ligne peut supporter le déséquilibre provenant de la perte d'une phase propre,
- chaque ligne peut supporter les déséquilibres provenant de l'insertion de la compensation série dans une phase qui lui est propre.

La Figure 4.1a) représente un corridor avec N lignes. Compte tenu de l'hypothèse 1 on peut séparer les phases du corridor tel que montré à la Figure 4.1b).

Lorsqu'une phase *a* d'une ligne est coupée à l'issu d'un défaut , les phases *a* saines restantes sont compensées dans le but de maintenir la capacité de transport de la phase *A* du corridor. La compensation série est nécessaire pour ramener l'impédance série équivalente de la phase *A* du corridor à sa valeur initiale. La compensation shunt doit être fournie dans le but de maintenir l'équilibre des tensions des barres à l'entrée et à la sortie du corridor.

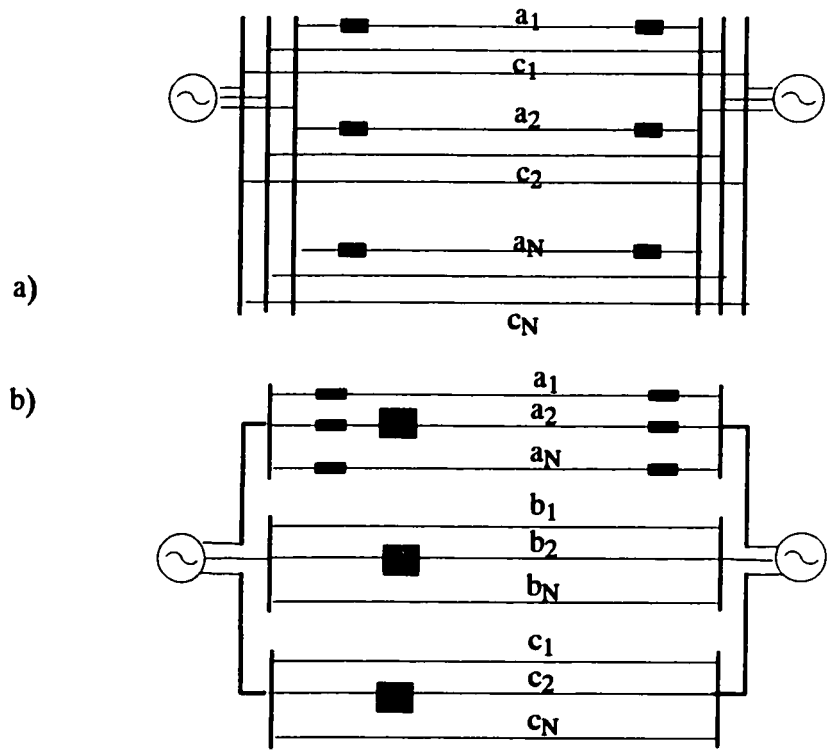


Figure 4.1 Représentation simplifiée d'un corridor à plusieurs lignes

IV.1 Modèle des lignes à paramètres localisés sans pertes

Une méthode de calcul dans le cas simple des lignes sans perte a été proposée en 1999 par (Sana, McGillis, Marceau, Do et Carlo, 1999, [37]). Dans cette section on fait un résumé de la méthode proposée.

IV.1.1 Calcul des impédances et réactances de compensation

Soit L le nombre de phases individuelles a perdues dans un corridor contenant N lignes. Les lignes sont sans pertes et le problème revient à déterminer dans quelles conditions la puissance transmise avec N-L phases a compensées en exploitation asymétrique est égale à celle de N phases a en exploitation symétrique.

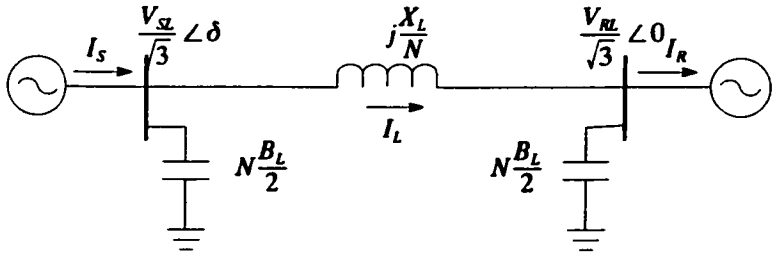


Figure 4.2 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique

La Figure 4.2 montre le circuit équivalent des N phases a en parallèles dans les conditions de l'exploitation symétrique. V_{SL} et V_{RL} sont les valeurs efficaces des tensions ligne-ligne aux deux bouts du corridor respectivement. X_L et B_L sont respectivement, l'impédance série et la susceptance shunt de chaque phase a. En supposant $V_{SL} = V_{RL}$, le courant total dans la ligne du circuit équivalent $\bar{I}_L$ est donné par :

$$\bar{I}_L = \frac{NV_{RL}}{\sqrt{3}X_L}[\sin\delta - j(\cos\delta - 1)] \tag{60}$$

Avec L phases a hors service le circuit équivalent des N-L phases a saines restantes fonctionnant en parallèle dans les conditions de l'exploitation asymétrique est montré à la Figure 4.3. X_S et B_C tels que donnés par l'équation (61) sont respectivement l'impédance série et la susceptance shunt du compensateur pour chaque phase a saine.

$$\begin{aligned} X_S &= -\frac{L}{N}X_L \\ B_C &= \frac{L}{N-L}B_L \end{aligned} \tag{61}$$

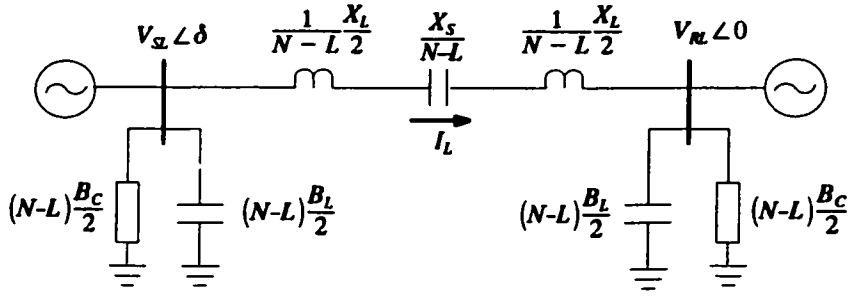


Figure 4.3 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique

Avec ces éléments de compensation, le circuit équivalent en exploitation asymétrique avec L phases ouvertes possède les mêmes caractéristiques que le circuit équivalent en exploitation symétrique et transmet la même puissance à travers le corridor.

La même démarche peut être appliquée pour les contingences survenant sur les phases *b* et *c* et les mêmes formules sont applicables pour le calcul des éléments des compensateurs.

Dans cette approche, le compensateur série est situé au milieu de la ligne. Tel que montré par (Ooi, Kazerani, Marceau., Wolanski, Galiana, McGillis et Joos, 1997, [35]), la localisation au point milieu des FACTS offre les meilleurs résultats en terme d'augmentation de la capacité de transport. Mais compte tenu de l'hypothèse des lignes sans perte, la position du condensateur série n'est pas déterminante ici.

IV.1.2 Calcul de la puissance réactive requise

IV.1.2.1 Défauts sur la même ligne

Les contingences peuvent arriver aléatoirement sur une des trois phases de chaque ligne et donc chaque phase de ligne doit être équipée avec la compensation série en standby. Pour les mêmes raisons, la compensation shunt doit aussi être installée pour chaque phase mais aux deux bouts du corridor et les condensateurs peuvent être regroupés par phase sur les barres terminales au niveau des postes. Tenant compte de ces remarques, les puissances réactives totales requises pour les compensations série et shunt sont alors déterminées par les équations (62) et (63) suivantes respectivement :

$$Q_S = 3NX_S\left(\frac{I_L}{N-L}\right)^2 = -3\frac{L}{(N-L)^2}X_L {I_L}^2 \qquad (62)$$

$$Q_{sh} = 3\,(N-L)\,B_C\,V_{L\text{-}N}^2 = 3\,L\,B_L\,V_{L\text{-}N}^2 \qquad (63)$$

où I_L est la valeur absolue du courant efficace de ligne et $V_{L\text{-}N}$ est la valeur efficace de la tension ligne-neutre supposée égale aux deux bouts du corridor.

On remarque qu'avec la compensation série et shunt ainsi installée, c'est à dire, un condensateur série par phase et un condensateur shunt par barre aux bouts du corridor, le cas

d'un défaut sur une, deux ou trois phases appartenant à la même ligne est automatiquement pris en compte. Autrement dit, on dispose de suffisamment de capacité pour compenser les contingences sur une, deux ou trois phases appartenant à la même ligne. Donc malgré la perte d'une ligne on assure une transmission convenable de la puissance; ceci couvre le critère de conception conventionnel *N-1*.

IV.1.2.2 Défauts sur plusieurs lignes

La puissance totale varie d'un minimum à un maximum selon les cas considérés. Par exemple si on décide de se limiter juste à une phase ouverte sur chaque ligne et donc qu'un aléa simultané sur plus d'une phase appartenant à la même ligne est rejeté, alors chaque ligne peut être équipée de l'équivalent pour la compensation d'une phase seulement, et d'un système de commutation pour insérer le compensateur série dans la phase requise. Dans ces mêmes conditions la compensation shunt peut être limitée à un seul groupe de compensation par poste terminal qui sera commuté selon la phase en défaut. Cette situation procure la puissance réactive minimum à installer.

Le cas d'une contingence simultanée sur la même phase de plusieurs lignes est considéré improbable et le coût de la compensation pour couvrir ce cas serait prohibitif. Néanmoins, ce cas extrême fournit la puissance réactive maximale à installer. Tous les autres cas se situent entre ces deux extrêmes.

Pour un système polyphasé quelconque, on peut donc trouver, les quantités minimale et maximale de puissance réactive tenant compte des remarques ci-dessus. On obtient par inspection les formules suivantes où Q_{SeTmax}, Q_{ShTmax}, Q_{SeTmin} et Q_{ShTmin} sont les puissances réactives totales série et shunt, maximales et minimales respectivement :

$$Q_{SeTmax} = -N\eta\, sup\left\{\frac{L_i}{N}\right\} X_L \left[\frac{I_L}{N - sup\{L_i\}}\right]^2 = -\eta\, sup\{L_i\}\, X_L \left[\frac{I_L}{N - sup\{L_i\}}\right]^2 \; ; i = 1,.$$

$$Q_{shTmax} = \eta\left(N - sup\{L_i\}\right)\frac{sup\{L_i\}}{N - sup\{L_i\}}\, Y_L\, V_{LN}^2 = \eta\, sup\{L_i\}\, Y_L\, V_{LN}^2 \; ; \; i = 1,.,\eta \quad (64)$$

avec η le nombre de phases du réseau, N le nombre de lignes du corridor, X_L et Y_L la réactance et la susceptance par phase de chaque ligne, L_i le nombre de phase de même nature (a, b ou c) coupées, I_L la valeur efficace du courant total de ligne du corridor, V_{LN} la valeur efficace de la tension de phase aux bouts du corridor.

La puissance totale minimum à installer est obtenue en ajoutant un contrôle permettant de partager un groupe de compensation entre plusieurs phases de chaque ligne.

$$Q_{seTmin} = -N(\eta-\sigma)\, sup\left\{\frac{L_i}{N}\right\} X_L \left[\frac{I_L}{N-sup\{L_i\}}\right]^2 = \left(1-\frac{\sigma}{\eta}\right) Q_{seTmax} \;;\; i = 1,..,\eta$$

$$Y_{shTmin} = (\eta-\sigma)\left[N-sup\{L_i\}\right]\frac{sup\{L_i\}}{N-sup\{L_i\}}\, Y_L\, V_{LN}^2 = \left(1-\frac{\sigma}{\eta}\right) Q_{shTmax} \;;\; i = 1,..,\eta \qquad (65)$$

σ est le nombre de phases du corridor n'ayant perdu aucune phase de ligne.
$\eta - \sigma$ est le nombre de phases du corridor ayant perdu au moins une phase de ligne.

Les formules ci-dessus (64) à (65) ne tiennent pas compte des pertes supplémentaires dans les transformateurs de connexion lorsque ce sont des convertisseurs qui sont utilisés.

IV.1.3 Exemple de mise en oeuvre

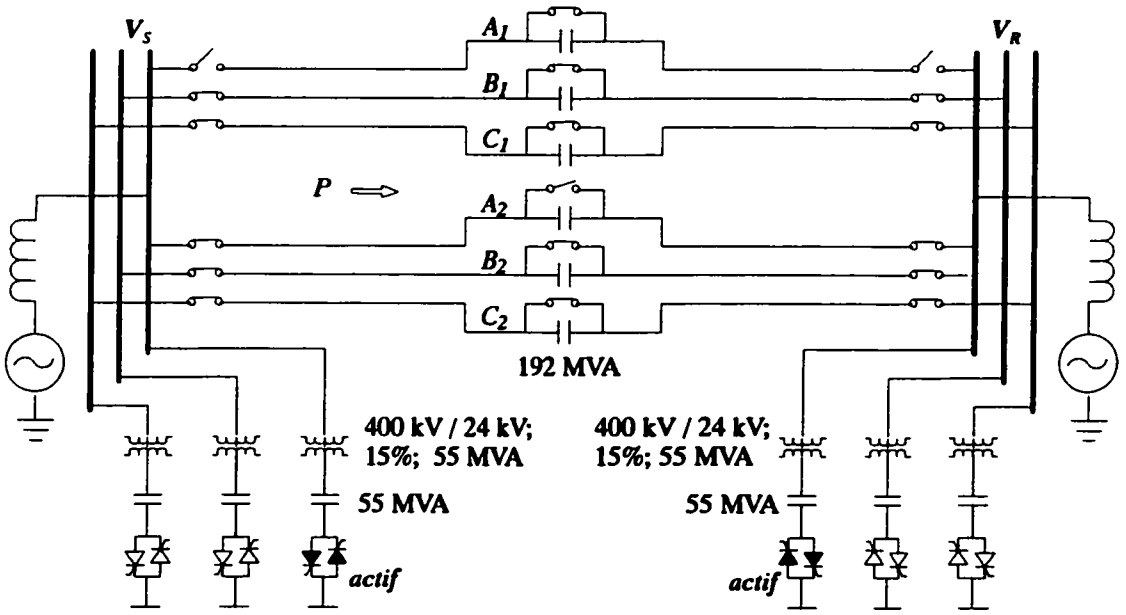
Dans cet exemple, la méthodologie est appliquée au cas particulier d'un corridor avec deux lignes sans pertes de 300 km de long, exploitées à 400 kV. Les lignes sont complètement transposées et transportent la puissance caractéristique (1400 MW). Une phase est ouverte dans une des lignes comme montré à la Figure 4.4. Les paramètres par unité de longueur sont : x_L = 0.3 Ω/km et b_L = 6.0 µS/km. Donc pour 300 km, X_L = 90 Ω et B_L = 1.80×10^{-3} S.

Pour L = 1, le Tableau 4.1 donne la puissance réactive requise pour la compensation telle que calculée des équations (62) et (63) et les coûts de la compensation. Les coûts unitaires des compensations série et shunt sont estimés respectivement à 40 $/kvar et 70 $/kvar. Un total de 1152 Mvar est requis pour la compensation série pour un coût total de 46 M$, tandis que le coût de la compensation shunt incluant 15% pour les pertes dans les

transformateurs est évalué à 23 M$ pour 330 Mvar. Le coût total de la compensation est de 69 M$ soit seulement 46 % du coût d'une nouvelle ligne de 400 kV estimée à 150 M$. Ce pourcentage dépendra des considérations concernant les probabilités de pannes et une analyse plus en détail est fournie au chapitre VII.

Tableau 4.1 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV en exploitation asymétrique

Puissance totale transportée P = 1400MW			
	Q (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série	1152	40	46
Compensation shunt	330	70	23
Total			69



P = 1400 MW; $V_{L\text{-}L}$ = 400 kV ; l = 300 km; x_L = 0.3 Ω/km; bL = 6.0 µS/km

Figure 4.4 Schéma de compensation pour l'exploitation asymétrique d'un corridor de deux lignes 400 kV-300 km

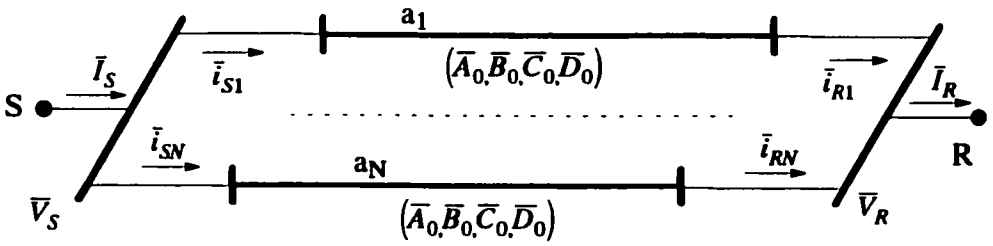
IV.2 MODÈLE DES LIGNES À PARAMÈTRES DISTRIBUÉS

L'utilisation du modèle à paramètres distribués tient compte de la résistance de la ligne et donc des pertes. On montre aussi que d'autres positions des éléments de compensation de la ligne sont admissibles.

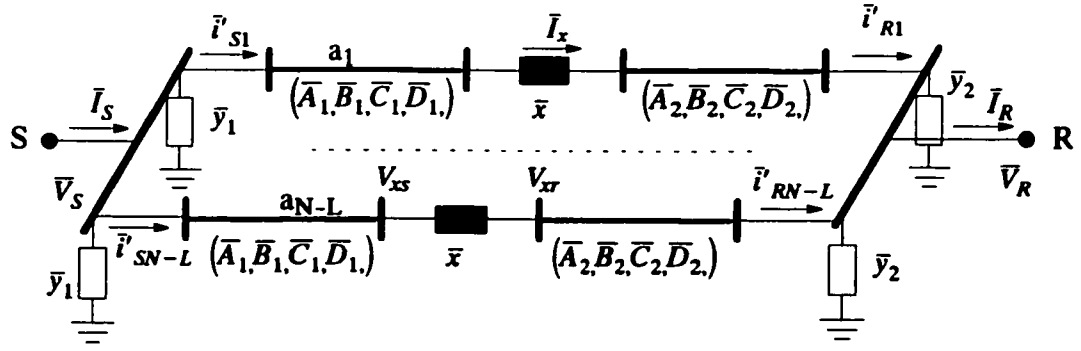
IV.2.1 CALCUL DES ÉLÉMENTS DE COMPENSATION

IV.2.1.1 POSITION QUELCONQUE DE LA COMPENSATION SÉRIE DANS LA LIGNE

On considère un corridor constitué de N lignes. La Figure 4.5 représente la phase A d'un tel corridor, constituée par la mise en parallèle des phases a_i des N lignes du corridor.



a) Arrangement précontingence de N phases a_i



b) Arrangement post-contingence de N-L phases a_i

Figure 4.5 Position quelconque de la compensation série dans les lignes

La Figure 4.5.a représente l'arrangement de la phase A du corridor pendant l'exploitation symétrique ou avant contingence. Chaque phase a de ligne est représentée par le quadripôle équivalent. La Figure 4.5.b représente l'arrangement post-contingence de la

phase A du corridor. Des éléments de compensation $\bar{x}$, $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ sont ajoutés aux deux bouts de chaque phase.

Les paramètres des quadripôles des deux portions de ligne et ceux de la ligne sont liés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{A}_1\bar{A}_2 + \bar{B}_1\bar{C}_2 &= \bar{A}_0 \\ \bar{A}_1\bar{B}_2 + \bar{B}_1\bar{D}_2 &= \bar{B}_0 \\ \bar{C}_1\bar{A}_2 + \bar{D}_1\bar{C}_2 &= \bar{C}_0 \\ \bar{C}_1\bar{B}_2 + \bar{D}_1\bar{D}_2 &= \bar{D}_0 \end{aligned} \qquad (66)$$

Le but est de transmettre la même puissance pendant une marche sous contingence que pendant un fonctionnement normal. Notre objectif est d'établir les équations reliant la tension et le courant à l'entrée du corridor (coté *S*, $\bar{V}_S$ et $\bar{I}_S$) à la tension et le courant à la sortie du corridor (coté *R*, $\bar{V}_R$ et $\bar{I}_R$), pendant le fonctionnement normal (marche symétrique) et pendant une marche asymétrique durant laquelle le corridor ne possède que *N-L* lignes actives (à l'issue de *L* contingences élémentaires) afin de les comparer.

On considère qu'une contingence élémentaire (ou de base) se traduit par la coupure d'une phase. On désigne par *L* le nombre des lignes parmi *N* qui sont soumises à une contingence élémentaire.

IV.2.1.1.1 Calcul de la valeur des impédances et réactances de compensation

Pendant l'exploitation normale (sans contingence), le corridor possède N lignes fonctionnelles et les valeurs des éléments $\bar{x}$, $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ sont nuls (pratiquement, ils sont déconnectés). Donc,

$$\{ L = 0 \} \Rightarrow \left\{ (\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{y}_2) = (0, 0, 0, 0) \right\} \qquad (67)$$

Pour chaque phase a_i, les relations entre tensions et courants sont données par :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{i}_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \bar{B}_0 \\ \bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{i}_{Ri} \end{bmatrix} \qquad (68)$$

Le courant total de la phase A du corridor est la somme des courants des phases a_i.

$$\bar{I}_S = N\bar{i}_{Si} \; ; \quad \bar{I}_R = N\bar{i}_{Ri} \tag{69}$$

donc les équations reliant la tension et le courant de l'entrée du corridor (coté S, $\bar{V}_S$ et $\bar{I}_S$) à la tension et le courant de la sortie du corridor (coté R, $\bar{V}_R$ et $\bar{I}_R$), sont obtenues, mathématiquement, par la mise en parallèle de N quadripôles identiques, soit :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \bar{B}_0 \\ \bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix}_N \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \dfrac{\bar{B}_0}{N} \\ N\bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N \tag{70}$$

Pendant l'exploitation asymétrique, à l'issue de L contingences élémentaires, le corridor ne possède que N-L lignes actives en parallèle, les éléments de compensation $\bar{x}$, $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ sont activés selon les besoins et l'on obtient pour chaque phase a_i :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{i}'_{Si} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{B}_1 \\ \bar{C}_1 & \bar{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \bar{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_2 & \bar{B}_2 \\ \bar{C}_2 & \bar{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_2 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{i}'_{Ri} \end{bmatrix} \tag{71}$$

où $\bar{i}'_{Si}$ et $\bar{i}'_{Ri}$ sont les courants à l'entrée et à la sortie de chaque phase saine a_i respectivement. Pour l'ensemble du corridor, les courants I_S et I_R sont la sommes des courants $\bar{i}'_{Si}$ et $\bar{i}'_{Ri}$ des N-L phases a_i saines durant l'exploitation asymétrique; on obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix}_{N-L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & N\text{-}L \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{B}_1 \\ \bar{C}_1 & \bar{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \bar{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_2 & \bar{B}_2 \\ \bar{C}_2 & \bar{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_2 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{N\text{-}L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_{N-L} \tag{72}$$

Les conditions d'égalité des puissances précontingence et postcontingence sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix}_{N-L} = \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix}_N \qquad \text{et} \qquad \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_{N-L} = \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N \tag{73}$$

ce qui se traduit par l'égalité des quadripôles équivalents tels que donnés par les équations (70) et (72) : on obtient :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & N\text{-}L \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{B}_1 \\ \bar{C}_1 & \bar{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \bar{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_2 & \bar{B}_2 \\ \bar{C}_2 & \bar{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \bar{y}_2 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{N\text{-}L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \dfrac{\bar{B}_0}{N} \\ N\bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \tag{74}$$

En multipliant d'abord à gauche par l'inverse de la première matrice du membre de gauche puis à droite par l'inverse des septième et sixième matrices du membre de gauche et en utilisant les relations de l'équation (66), l'équation (74) est développée comme suit:

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_0+\bar{A}_1\bar{C}_2\bar{x} & \bar{B}_0+\bar{A}_1\bar{D}_2\bar{x} \\ \bar{y}_1(\bar{A}_0+\bar{A}_1\bar{C}_2\bar{x})+\bar{C}_0+\bar{C}_1\bar{C}_2\bar{x} & \bar{y}_1(\bar{B}_0+\bar{A}_1\bar{D}_2\bar{x})+\bar{D}_0+\bar{C}_1\bar{D}_2\bar{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0-\frac{N-L}{N}\bar{B}_0\bar{y}_2 & \frac{N-L}{N}\bar{B}_0 \\ \frac{N}{N-L}\bar{C}_0-\bar{D}_0\bar{y}_2 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \quad (75)$$

La solution de l'équation (75) donne les résultats suivants:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= -\frac{L}{N}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_1\bar{D}_2} \\ \bar{y}_1 &= \frac{L}{N-L}\frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1} \\ \bar{y}_2 &= \frac{L}{N-L}\frac{\bar{C}_2}{\bar{D}_2} \end{aligned} \quad (76)$$

IV.2.1.1.2 CALCUL DE LA TENSION ET DU COURANT DES ÉLÉMENTS DE COMPENSATION

Le courant qui traverse l'élément série et la tension à sa borne gauche peuvent être déterminés en fonction de la tension et du courant de la source de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{xs} \\ \bar{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 & -\bar{B}_1 \\ -\bar{C}_1 & \bar{A}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{i}'_{Si} \end{bmatrix} \quad (77)$$

en posant que:

$$\bar{i}'_{Si} = \frac{\bar{I}_S}{N-L} \; ; \quad \bar{i}'_{Ri} = \frac{\bar{I}_R}{N-L} \quad (78)$$

et en remplaçant dans l'équation (77) on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{V}_{xs} &= (\bar{D}_1 + \bar{B}_1\bar{y}_1)\bar{V}_S - \frac{\bar{B}_1}{N-L}\bar{I}_S \\ \bar{I}_x &= -(\bar{C}_1 + \bar{A}_1\bar{y}_1)\bar{V}_S + \frac{\bar{A}_1}{N-L}\bar{I}_S \end{aligned} \quad (79)$$

En remplaçant y_1 par sa valeur telle que donnée dans (76) on obtient :

$$\begin{aligned}\bar{V}_{xs} &= \left(\frac{N}{N-L}\bar{D}_1 - \frac{L}{N-L}\frac{1}{\bar{A}_1}\right)\bar{V}_S - \frac{\bar{B}_1}{N-L}\bar{I}_S \\ \bar{I}_x &= -\frac{N}{N-L}\bar{C}_1\bar{V}_S + \frac{\bar{A}_1}{N-L}\bar{I}_S\end{aligned} \tag{80}$$

La tension aux bornes de l'élément x est donnée alors par :

$$\begin{aligned}\bar{v}_x = \bar{x}\,\bar{I}_x &= \frac{L}{N-L}\frac{\bar{C}_1\bar{B}_0}{\bar{A}_1\bar{D}_2}\bar{V}_S - \frac{L}{N(N-L)}\frac{\bar{B}_0}{\bar{D}_2}\bar{I}_S \\ &= \frac{L}{N-L}\frac{\bar{B}_0}{\bar{D}_2}\left(\frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1}\bar{V}_S - \frac{1}{N}\bar{I}_S\right)\end{aligned} \tag{81}$$

et la tension de la borne droite de l'élément x est obtenue après quelques manipulations par :

$$\bar{V}_{xr} = \bar{V}_{xs} - \bar{v}_x = \frac{1}{N-L}\left[N\bar{D}_1 - L\frac{\bar{D}_0}{\bar{D}_2}\right]\bar{V}_S + \frac{1}{N(N-L)}\left[L\frac{\bar{B}_0}{\bar{D}_2} - N\bar{B}_1\right]\bar{I}_S \tag{82}$$

IV.2.1.2 POSITION DE LA COMPENSATION SÉRIE EXACTEMENT AU MILIEU DE LA LIGNE

Si la compensation se fait exactement au milieu de la ligne alors on montre que :

$$\begin{aligned}\bar{A}_1 = \bar{A}_2 = \bar{D}_1 = \bar{D}_2 &= \sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\bar{A}_0 + 1\right)} \\ \bar{B}_1 = \bar{B}_2 = \frac{\bar{B}_0}{2\bar{A}_1} &= \frac{\bar{B}_0}{2}\frac{1}{\sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\bar{A}_0 + 1\right)}} \\ \bar{C}_1 = \bar{C}_2 = \frac{\bar{C}_0}{2\bar{A}_1} &= \frac{\bar{C}_0}{2}\frac{1}{\sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\bar{A}_0 + 1\right)}}\end{aligned} \tag{83}$$

Dans ces conditions, l'impédance $\bar{x}$ et les réactances $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ sont données par ce qui suit :

$$\begin{aligned}\bar{x} &= -\frac{L}{N}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_1^2} \\ \bar{y}_1 = \bar{y}_2 &= \frac{L}{N-L}\frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1}\end{aligned} \tag{84}$$

et le courant et la tension de l'élément série sont :

$$\bar{I}_x = -\frac{N}{N-L}\bar{C}_1\bar{V}_S + \frac{\bar{A}_1}{N-L}\bar{I}_S$$
$$\bar{v}_x = \bar{x}\bar{I}_x = \frac{L}{N-L}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_1}\left(\frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1}\bar{V}_S - \frac{1}{N}\bar{I}_S\right) \quad (85)$$

IV.2.1.3 POSITION DE LA COMPENSATION SÉRIE EN BOUT DE LIGNE CÔTÉ SOURCE

Si la compensation se fait en bout de ligne côté source alors

$$\bar{A}_1 = 1 \; ; \quad \bar{B}_1 = 0 \; ; \quad \bar{C}_1 = 0 \; ; \quad \bar{D}_1 = 1$$
$$\bar{A}_2 = \bar{A}_0 \; ; \quad \bar{B}_2 = \bar{B}_0 \; ; \quad \bar{C}_2 = \bar{C}_0 \; ; \quad \bar{D}_2 = \bar{D}_0 = \bar{A}_0 \quad (86)$$

Dans ces conditions, les éléments de compensation deviennent :

$$\bar{x} = -\frac{L}{N}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_0}$$
$$\bar{y}_1 = 0 \quad (87)$$
$$\bar{y}_2 = \frac{L}{N-L}\frac{\bar{C}_0}{\bar{A}_0}$$

et les courant et tension de chaque élément série sont obtenus par :

$$\bar{I}_x = \frac{1}{N-L}\bar{I}_S$$
$$\bar{v}_x = \bar{x}\bar{I}_x = -\frac{L}{N(N-L)}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_0}\bar{I}_S \quad (88)$$

IV.2.1.4 POSITION DE LA COMPENSATION SÉRIE EN BOUT DE LIGNE CÔTÉ CHARGE

Si la compensation se fait en bout de ligne côté charge alors,

$$\bar{A}_1 = \bar{A}_0 \; ; \quad \bar{B}_1 = \bar{B}_0 \; ; \quad \bar{C}_1 = \bar{C}_0 \; ; \quad \bar{D}_1 = \bar{D}_0$$
$$\bar{A}_2 = 1 \; ; \quad \bar{B}_2 = 0 \; ; \quad \bar{C}_2 = 0 \; ; \quad \bar{D}_2 = 1 \quad (89)$$

Dans ces conditions, les éléments de compensation deviennent :

$$\begin{aligned} \bar{x} &= -\frac{L}{N}\frac{\overline{B}_0}{\overline{A}_0} \\ \bar{y}_1 &= \frac{L}{N-L}\frac{\overline{C}_0}{\overline{A}_0} \\ \bar{y}_2 &= 0 \end{aligned} \tag{90}$$

et les courant et tension de chaque élément série sont obtenus par :

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= -\frac{N}{N-L}\overline{C}_0\bar{V}_S + \frac{\overline{A}_0}{N-L}\bar{I}_S \\ \bar{v}_x &= \bar{x}\bar{I}_x = \frac{L}{N-L}\overline{B}_0\left(\frac{\overline{C}_0}{\overline{A}_0}\bar{V}_S - \frac{1}{N}\bar{I}_S\right) \end{aligned} \tag{91}$$

IV.2.2 Lignes symétriques sans pertes

Si l'on suppose que les lignes sont sans pertes, alors les paramètres du quadripôle sont obtenus par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} &\overline{A}_0 = A = \cos\theta \\ &\overline{B}_0 = jZ_0\sin\theta = jB \\ &\overline{D}_0 = D_0 = \cos\theta = A \\ &\overline{C}_0 = j\frac{\sin\theta}{Z_0} = jC \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \theta &= \sqrt{X_L Y_L} = \omega\sqrt{L_L C_L} \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{X_L}{Y_L}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \end{aligned} \tag{92}$$

Si en plus, la compensation série est placée exactement en milieu de ligne, alors on a :

$$\begin{aligned} \overline{A}_1 = \overline{D}_1 = \overline{A}_2 = \overline{D}_2 &= \cos\frac{\theta}{2} \\ \overline{B}_1 = \overline{B}_2 &= jZ_0\sin\frac{\theta}{2} \\ \overline{C}_1 = \overline{C}_2 &= j\frac{\sin(\theta/2)}{Z_0} \end{aligned} \tag{93}$$

et les valeurs des impédance et susceptances $\bar{x}$, $\bar{y}_1$ et $\bar{y}_2$ du compensateur sont déduites de l'équation (76) et on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{x} &= -j\frac{L}{N}Z_0\frac{\sin\theta}{\cos^2(\theta/2)} \\ \bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \bar{y} &= j\frac{L}{N-L}\frac{tg(\theta/2)}{Z_0} \end{aligned} \tag{94}$$

Dans la mesure des longueurs de ligne admissibles, θ est tel que $\sin(\theta)$ et $tg(\theta/2)$ sont positifs et donc $\bar{x}$ et $\bar{y}$ représentent les impédance et admittance de condensateur.
Les courant et tension de chaque élément série sont obtenus par :

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= -\frac{N}{N-L}\bar{C}_1\bar{V}_S + \frac{\bar{A}_1}{N-L}\bar{I}_S \\ \bar{v}_x &= \bar{x}\bar{I}_x = \frac{L}{N-L}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_1}\left(\frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1}\bar{V}_S - \frac{1}{N}\bar{I}_S\right) \end{aligned} \tag{95}$$

IV.3 Effets de la résistance de la ligne

Les impédances et admittances données dans les équations (76), (84), (87) et (90) contiennent une partie réelle résistive ou conductive or, dans la pratique, il est impossible de compenser la partie résistive des lignes de transport; il serait nécessaire d'ajouter une résistance négative, difficilement réalisable en Haute Tension. Cette difficulté peut cependant être levée de deux façons:

- en remplaçant les impédances par des réactances pures et les admittances par des susceptances pures. Dans ce cas, un léger déséquilibre va subsister et il convient de l'évaluer.
- en remplaçant les impédances par des sources de tension commandées et les admittances par des sources de courants commandées;

IV.3.1 Compensation par réactances et susceptances pures

Comme l'apport d'une résistance négative est difficilement envisageable en haute tension, on peut négliger la contrepartie résistive des impédances et susceptances de compensation et ne retenir que la partie réactive (le cas idéal est montré dans la section IV.1). Dans ces conditions, pour maintenir les tensions aux deux bouts de la ligne, une redistribution de la puissance réactive est nécessaire. Les courants ne peuvent pas être conservés et il subsistera un minimum de distorsion.

Exemple 1: Deux lignes 400 kV, 1400 MW, 300 km;

Les paramètres de chaque ligne sont : $r_L = 0.02\ \Omega$/km, $x_L = 0.3\ \Omega$/km et $b_L = 6.0$ µS/km. Donc pour 300 km, $R_L = 6\ \Omega\ X_L = 90\ \Omega$ et $B_L = 1.80 \times 10^{-3}$ S.

Avec les paramètres $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{C}$ et $\overline{D}$, et les tensions à l'entrée et à la sortie de la ligne définis comme dans l'équation (96),

$$\begin{aligned} \overline{A} &= \overline{D} = Ae^{j\alpha} & \overline{V}_S &= V_S\, e^{j\delta_S} \\ \overline{B} &= Be^{j\beta} & \overline{V}_R &= V_R\, e^{j0} \\ \overline{C} &= Ce^{j\gamma} \end{aligned} \qquad (96)$$

on obtient les puissances apparentes $\overline{S}_S$ et $\overline{S}_R$ aux deux bouts de la ligne par :

$$\overline{S}_S = V_S^2\frac{A}{B}\cos(\beta-\alpha) - \frac{V_S V_R}{B}\cos(\beta+\delta) + j\left[V_S^2\frac{A}{B}\sin(\beta-\alpha) - \frac{V_S V_R}{B}\sin(\beta+\delta)\right] \qquad (97)$$

$$\overline{S}_R = -V_R^2\frac{A}{B}\cos(\beta-\alpha) + \frac{V_S V_R}{B}\cos(\beta-\delta) + j\left[-V_R^2\frac{A}{B}\sin(\beta-\alpha) + \frac{V_S V_R}{B}\sin(\beta-\delta)\right]$$

<u>Exploitation symétrique</u>. Bilan de puissance pour la phase A du corridor (2 phases a_i) : Le bilan de puissance de la phase A du corridor qui résulte de la mise en parallèle de deux phases a_i de ligne durant l'exploitation symétrique est montré à la Figure 4.6.

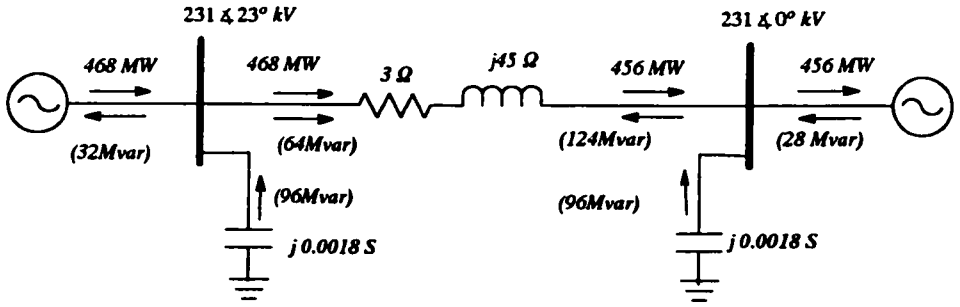


Figure 4.6 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique

<u>Exploitation asymétrique avec une phase a_i ouverte dans une ligne</u>.

Le Bilan de puissance pour la phase A du corridor (Une phase a_i compensée à 50%) durant l'exploitation asymétrique est donné à la Figure 4.7. Ce bilan de puissance montre qu'il faut un compensateur statique de 96 Mvar à la sortie de la ligne. On conserve ainsi les grandeurs et l'écart angulaire entre les tensions des deux bouts de la ligne. Cependant, le

courant dans la phase A est différent du courant avant contingence et donc un déséquilibre existe entre la phase A et les phases B et C du corridor. Les courants de déséquilibres résultants peuvent être éliminés par des filtres et cette question est traitée en détail dans le chapitre V

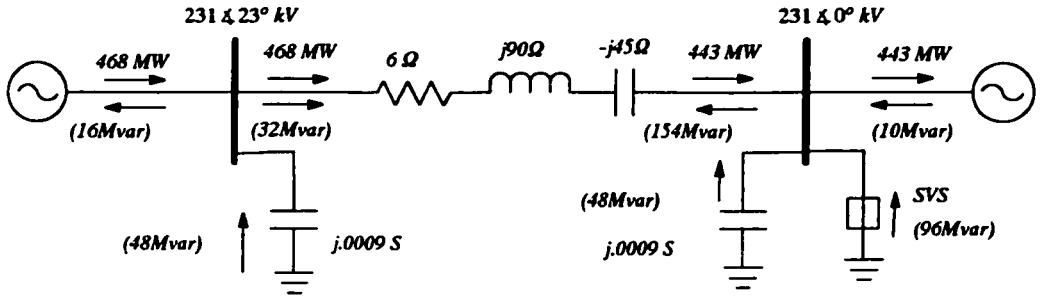


Figure 4.7 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique

IV.3.2 Compensation par sources de tensions et de courants contrôlées

Une source de tension série et une source de courant shunt peuvent être placées soit au début de la ligne soit à la fin ou même au milieu de la ligne pour compenser les déséquilibres provenant de la perte d'une phase dans une ligne.

Les sources de tension et de courant peuvent être obtenues de plusieurs façons mais, on s'intéresse ici aux sources d'origine électronique, i.e. les convertisseurs de l'électronique de puissance. Le développement des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture permet de réaliser des formes d'onde variées. Les convertisseurs de courant à base de GTO (Gate Turn Off thyristor) et la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permettent de créer des sources de tension et de courant commandées de grande puissance avec le maximum de flexibilité. Les FACTS (Flexible AC Transmission Systems) comme le STATCON (STATic CONverter), le PSSS (Static Synchronous Series Compensator) et le UPFC (Unified Power Flow Converter) sont basés sur la conversion par GTO et de la commande PWM (Pulse Width Modulation) et constituent des sources de courant et de tension shunts ou séries commandables, utilisables pour l'exploitation asymétrique.

Dans les sections suivantes, on examine les différentes possibilités de mise en oeuvre de sources idéales de tension et de courant pour l'exploitation asymétrique. On considère toujours que la phase A d'un corridor est constituée de plusieurs phases a_i de ligne. Les sources de courant seront toujours placées à l'entrée et/ou à la sortie des lignes. Selon l'emplacement des sources de tension et de courants on obtient plusieurs possibilités que l'on peut regrouper en deux catégories :

- les sources de tension sont localisées aux bouts des lignes,
- les sources de tension sont localisées en milieu de ligne

IV.3.2.1 Sources de tensions localisées aux bouts des lignes

Une approche générale est de considérer pour la phase A du corridor, une source de tension série et une source de courant shunt à chaque bout de la ligne comme illustré à la Figure 4.8. Connaissant les conditions avant et après contingence, on détermine les conditions à satisfaire par les sources pour réaliser l'exploitation asymétrique du corridor. Les cas particuliers sont par la suite déduits du cas général selon la valeur des sources.

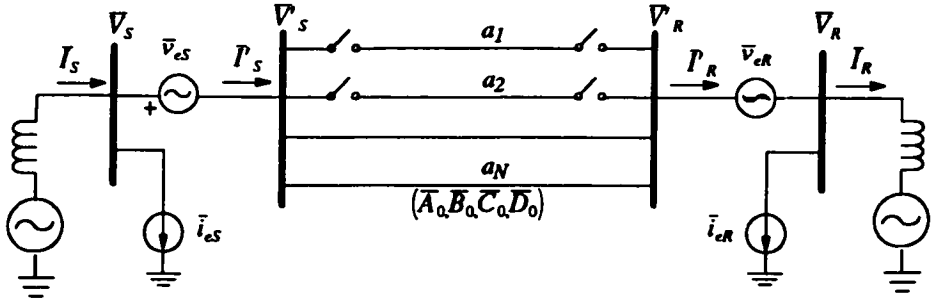


Figure 4.8 Illustration de la compensation de la phase d'un corridor par des sources de tension séries et des sources de courant shunt

Les relations entre tension et courant de la phase A du corridor avant contingence sont données par les équations (98) et (99) qui sont un rappel de l'équation (70)

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \frac{\bar{B}_0}{N} \\ N\bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \qquad (98)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N\dfrac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0} & -\dfrac{N}{\bar{B}_0} \\ \dfrac{N}{\bar{B}_0} & -N\dfrac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{V}_R \end{bmatrix} \tag{99}$$

Après la coupure de L phases a , les relations entre tension et courant de la phase A du corridor deviennent :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}'_S \\ \bar{I}'_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \dfrac{\bar{B}_0}{N-L} \\ (N-L)\bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}'_R \\ \bar{I}'_R \end{bmatrix} \tag{100}$$

où

$$\begin{aligned} \bar{V}'_S &= \bar{V}_S - \bar{v}_{eS} \\ \bar{I}'_S &= \bar{I}_S - \bar{i}_{eS} \\ \bar{V}'_R &= \bar{V}_R + \bar{v}_{eR} \\ \bar{I}'_R &= \bar{I}_R + \bar{i}_{eR} \end{aligned} \tag{101}$$

En remplaçant (101) dans (100) et en développant on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{v}_{eS} + \bar{A}_0\bar{v}_{eR} + \frac{\bar{B}_0}{N-L}\bar{i}_{eR} &= \bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R - \frac{\bar{B}_0}{N-L}\bar{I}_R \\ (N-L)\bar{C}_0\bar{v}_{eR} + \bar{i}_{eS} + \bar{D}_0\bar{i}_{eR} &= \bar{I}_S - (N-L)\bar{C}_0\bar{V}_R - \bar{D}_0\bar{I}_R \end{aligned} \tag{102}$$

En remplaçant dans l'équation (102) I_S et I_R par leur valeur déduites de (98) on obtient:

$$\begin{bmatrix} 1 & \bar{A}_0 & 0 & \dfrac{\bar{B}_o}{N-L} \\ 0 & (N-L)\bar{C}_0 & 1 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{eS} \\ \bar{v}_{eR} \\ \bar{i}_{eS} \\ \bar{i}_{eR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dfrac{L}{N-L} & \dfrac{L\bar{A}_0}{N-L} \\ 0 & L\bar{C}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{V}_R \end{bmatrix} \tag{103}$$

L'équation (103) montre que deux sources suffisent à assurer l'équilibre mais il en faut au moins deux. Cependant, si l'on a plus de deux sources, une optimisation peut s'avérer nécessaire.

Si l'on se limite à deux sources parmi les quatre alors il y a six possibilités qui sont :

- une source de tension série et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne;
- une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie de la ligne;

- une source de tension série à chaque bout de ligne;
- une source de courant shunt à chaque bout de ligne;
- une source de tension série à l'entrée de la ligne et une source de courant shunt à la sortie de la ligne;
- une source de tension série à la sortie de la ligne et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne.

Le Tableau 4.2 donne un recapitulatif de ces six cas (cas 1 à 6). Les sous-sections suivantes fournissent des détails de calculs pour les sources des cas considérés.

IV.3.2.1.1 CAS 1: UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE ET UNE SOURCE DE COURANT SHUNT À L'ENTRÉE DE LA LIGNE ;

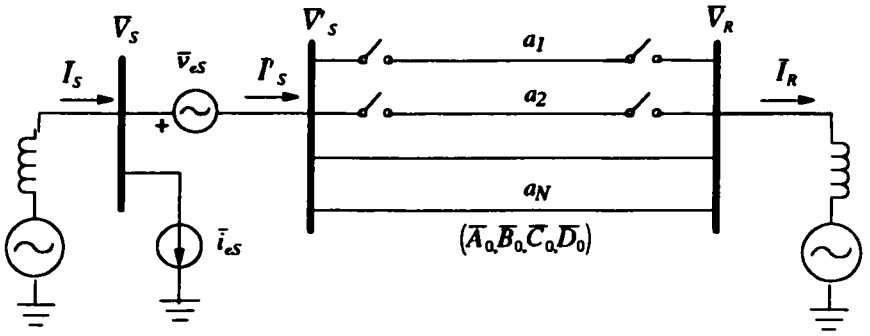


Figure 4.9 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne

La phase A d'un corridor avec une source de tension série et une source de courant shunt du côté de la source durant l'exploitation asymétrique est illustrée à la Figure 4.9. Cette situation est obtenue du cas général en posant $\bar{v}_{eR} = 0$ et $\bar{i}_{eR} = 0$ dans l'équation (103). En résolvant pour $\bar{v}_{eS}$ et $\bar{i}_{eS}$ on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{v}_{eS} &= -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R) \\ \bar{i}_{eS} &= L\bar{C}_0\bar{V}_R \end{aligned} \qquad (104)$$

Le courant traversant la source de tension est ensuite déduit de (101) :

$$\bar{I}'_S = N\frac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_S - \left(\frac{N}{\bar{B}_0} + L\bar{C}_0\right)\bar{V}_R \qquad (105)$$

Exemple 2 :

On reprend le même exemple que celui de la section IV.3.1 soit 2 lignes 400 kV, 1400 MW, 300 km; avec les paramètres suivants: r_L = 0.02 Ω/km, x_L = 0.3 Ω/km et b_L = 6.0 µS/km. Donc pour 300 km, R_L = 6 Ω X_L = 90 Ω et B_L = 1.80×10^{-3} S et finalement,

$\bar{A}$ = 0.919∡0.34, $\bar{B}$ = 90.2∡86.19 et $\bar{C}$ = 1.727×10^{-3}∡90.16.

Exploitation symétrique : bilan de puissance pour la phase A du corridor (2 phases a)

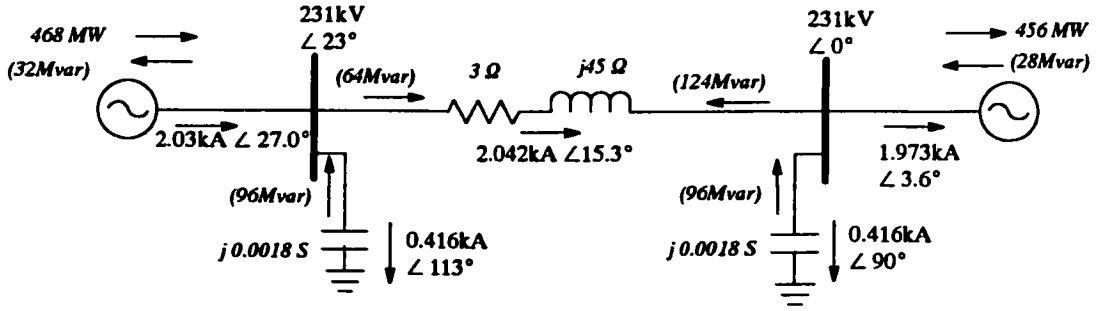


Figure 4.10 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation symétrique

Exploitation asymétrique avec la phase a ouverte dans une ligne ; bilan de puissance

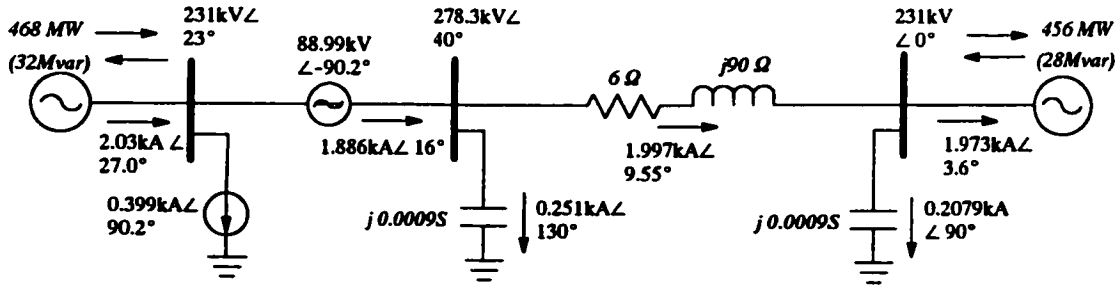


Figure 4.11 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec source de courant et source de tension à l'entrée de la ligne

IV.3.2.1.2 CAS 2: UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE ET UNE SOURCE DE COURANT SHUNT À LA SORTIE DES LIGNES

La phase A d'un corridor avec une source de tension série et une source de courant shunt du côté de la charge durant l'exploitation asymétrique est illustrée à la Figure 4.12.

Cette situation est déduite du cas général en posant $\bar{v}_{eS} = 0$ et $\bar{i}_{eS} = 0$ dans l'équation (103).

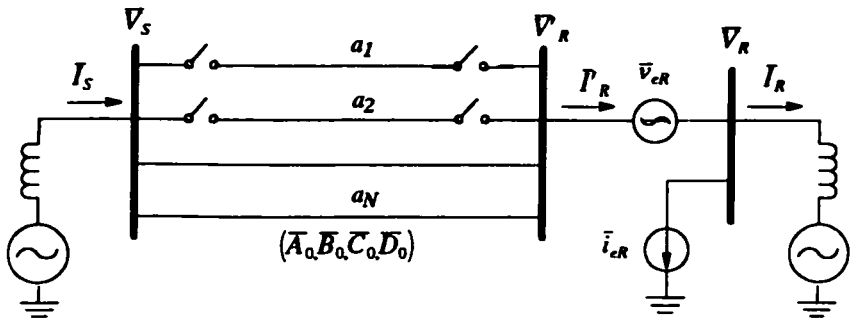


Figure 4.12 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie des lignes

La tension $\bar{v}_{eR}$ et le courant $\bar{i}_{eR}$ sont donnés par :

$$\begin{aligned} \bar{v}_{eR} &= -\frac{L}{N-L}(\bar{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R) \\ \bar{i}_{eR} &= L\bar{C}_0\bar{V}_S \end{aligned} \tag{106}$$

Le courant traversant la source de tension est déduit de (101) :

$$\bar{I}'_R = \left(\frac{N}{\bar{B}_0} + L\bar{C}_0\right)\bar{V}_S - N\frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_R \tag{107}$$

Exemple 3 :

Dans les mêmes conditions que dans l'exemple précédant, le bilan de puissance de la phase A du corridor compensé par une source de tension et une source de courant du côté de la charge, durant l'exploitation asymétrique, est montrée à la Figure 4.13.

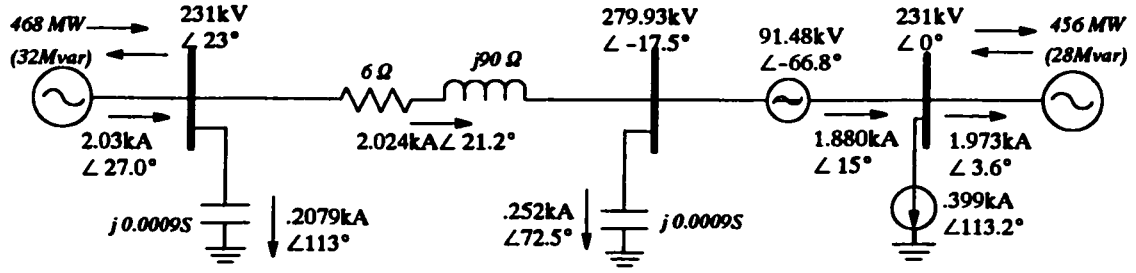


Figure 4.13 Exploitation asymétrique avec une source de tension série et une source de courant shunt à la sortie de la ligne

IV.3.2.1.3 CAS 3 : UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE À CHAQUE BOUT DE LIGNE

La mise en oeuvre de deux sources de tensions séries comme indiqué (Figure 4.14) est obtenue du cas général en posant $\bar{i}_{eS} = 0$ et $\bar{i}_{eR} = 0$ dans l'équation (101) et en résolvant pour les tensions $\bar{v}_{eS}$ et $\bar{v}_{eR}$:

$$\bar{v}_{eS} = -\frac{L}{N-L}\bar{V}_S$$
$$\bar{v}_{eR} = \frac{L}{N-L}\bar{V}_R \qquad (108)$$

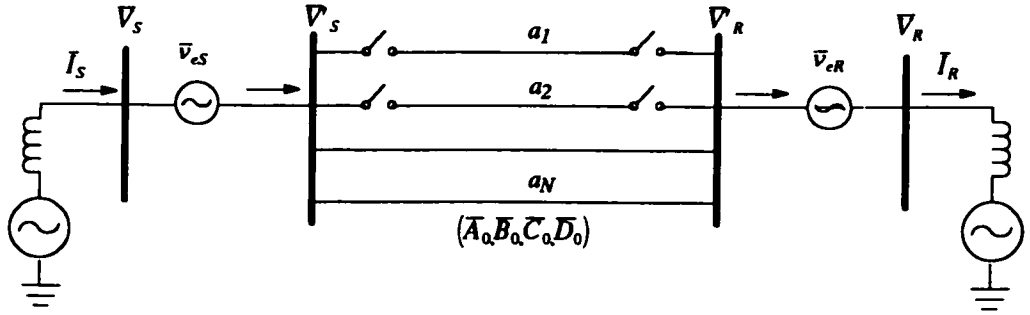


Figure 4.14 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension à chaque bout des lignes

Exemple 4: Dans les mêmes conditions que dans l'exemple précédant, le bilan de puissance de la phase A du corridor compensé par une source de tension série à chaque bout de la ligne durant l'exploitation asymétrique est montrée à la Figure 4.15. On remarque que les tensions des barres aux accès de la ligne de 461.9 kV sont inacceptables.

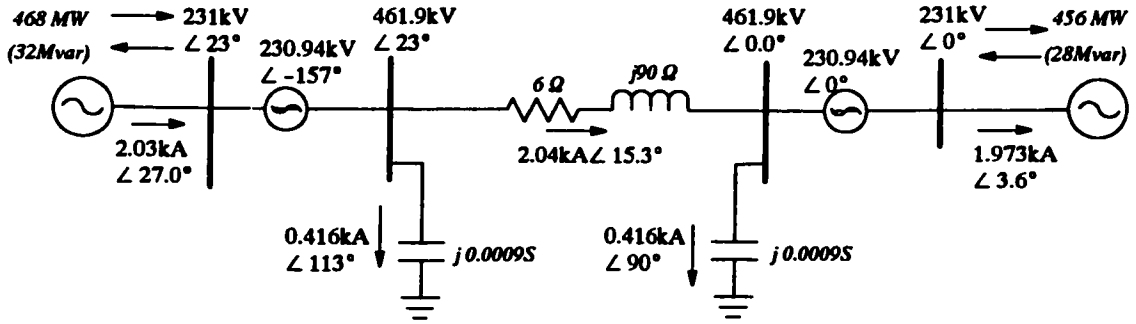


Figure 4.15 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de tension série à chaque bout de ligne

IV.3.2.1.4 CAS 4: UNE SOURCE DE COURANT SHUNT À CHAQUE BOUT DE LIGNE

La mise en oeuvre de deux sources de courant shunts, une à chaque bout de ligne est montrée à la Figure 4.16. Ce cas est déduit du cas général en posant $\bar{v}_{eS} = 0$ et $\bar{v}_{eR} = 0$ dans l'équation (101). Les courants fournis par les deux sources $\bar{i}_{eS}$ et $\bar{i}_{eR}$ sont alors :

$$\begin{aligned} \bar{i}_{eS} &= \frac{L}{\bar{B}_0}(\bar{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R) \\ \bar{i}_{eR} &= -\frac{L}{\bar{B}_0}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R) \end{aligned} \tag{109}$$

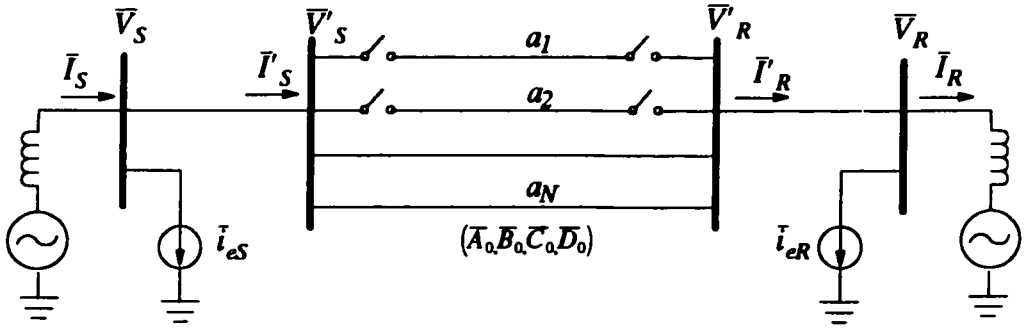


Figure 4.16 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de courant shunt à chaque bout des lignes

Exemple 5: La Figure 4.17 montre le bilant de puissance de la phase A d'un corridor de deux lignes de 400 kV durant l'exploitation asymétrique avec deux sources de courant shunt. La valeur du courant de compensation reste très élevée (environ 1 kA).

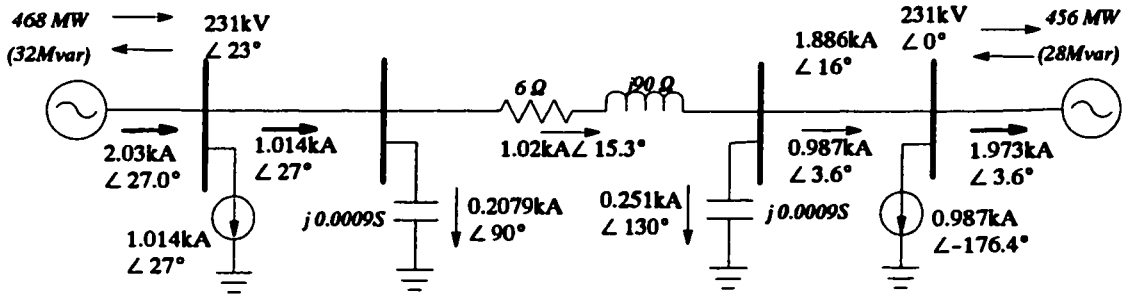


Figure 4.17 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de courant shunt à chaque bout de la ligne

IV.3.2.1.5 CAS 5: UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE À L'ENTRÉE DES LIGNES ET UNE SOURCE DE COURANT SHUNT À LA SORTIE DES LIGNES

La Figure 4.18 illustre la phase A d'un corridor avec une source de tension série à l'entrée des lignes et une source de courant shunt à la sortie, durant l'exploitation asymétrique. Ce cas est obtenu en posant $\bar{v}_{eR} = 0$ et $\bar{i}_{eS} = 0$ dans l'équation (103).

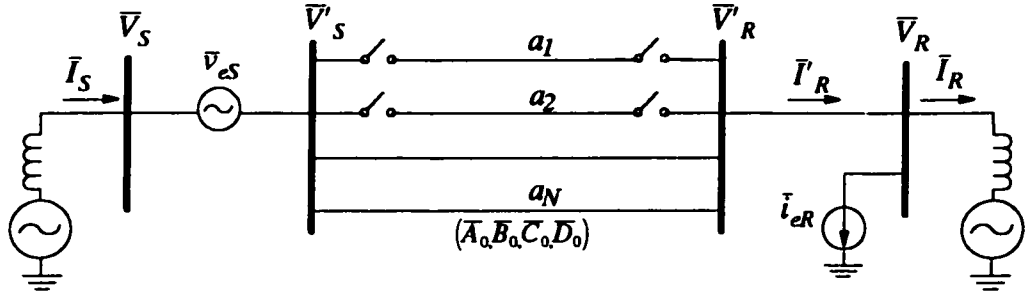


Figure 4.18 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série à l'entrée des lignes et une source de courant shunt à la sortie des lignes

En résolvant pour $\bar{v}_{eS}$ et $\bar{i}_{eR}$ on obtient :

$$\bar{v}_{eS} = -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_R)$$
$$\bar{i}_{eR} = L\frac{\bar{C}_0}{\bar{D}_0}\bar{V}_R \qquad (110)$$

Exemple 6 : Exploitation asymétrique avec la phase a ouverte dans une ligne: bilan de puissance

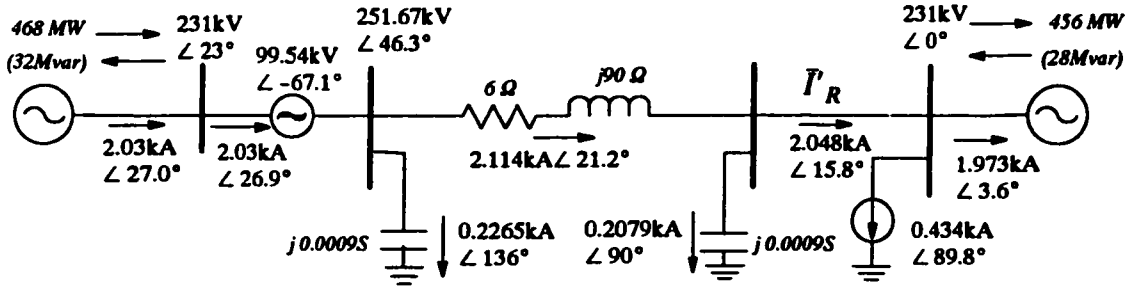


Figure 4.19 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec source de tension série à l'entrée de la ligne et source de courant shunt à la sortie

IV.3.2.1.6 CAS 6: UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE À LA SORTIE DES LIGNES ET UNE SOURCE DE COURANT SHUNT À L'ENTRÉE DES LIGNES

L'exploitation asymétrique d'un corridor de plusieurs lignes peut être obtenue par la mise en oeuvre d'une source de tension série $\bar{v}_{eR}$ du côté de la charge et d'une source de courant shunt $\bar{i}_{eS}$ du côté de la source. La Figure 4.20 montre la phase A d'un tel corridor. Ce cas est obtenu du cas général en posant $\bar{v}_{eS} = 0$ et $\bar{i}_{eR} = 0$ dans l'équation (103).

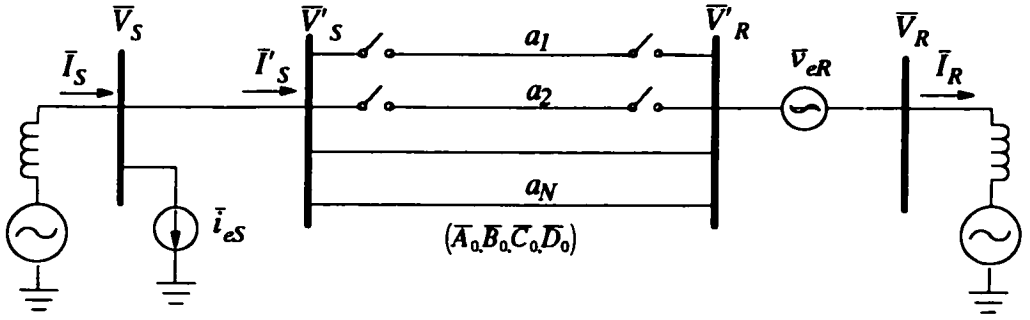


Figure 4.20 Principe de l'exploitation symétrique avec une source de tension série à la sortie des lignes et une source de courant shunt à l'entrée des lignes

En résolvant pour $\bar{v}_{eR}$ et $\bar{i}_{eS}$ on obtient :

$$\bar{v}_{eR} = -\frac{L}{N-L}\left(\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_S - \bar{V}_R\right)$$
$$\bar{i}_{eS} = L\frac{\bar{C}_0}{\bar{A}_0}\bar{V}_S \qquad (111)$$

Exemple 7 :

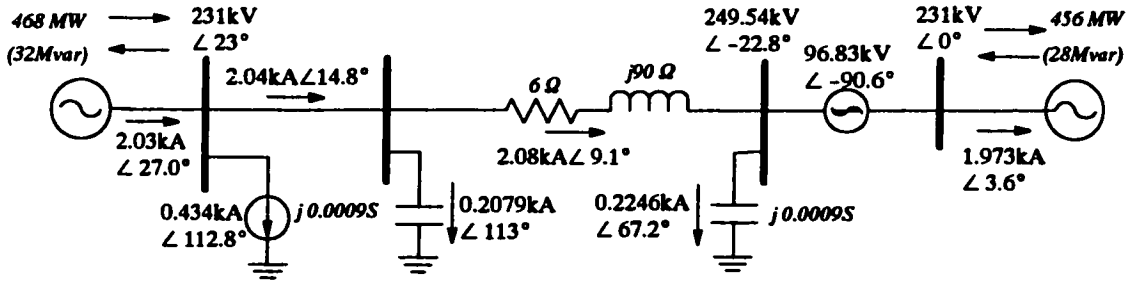


Figure 4.21 Circuit équivalent d'une phase de corridor en exploitation asymétrique avec une source de courant shunt à l'entrée de la ligne et une source de tension série à la sortie.

IV.3.2.2 SOURCE DE TENSION EN MILIEU DE LIGNE

Pour réaliser l'exploitation asymétrique d'un corridor de plusieurs lignes, la source de tension peut être placée dans les lignes comme montrée à la Figure 4.22.

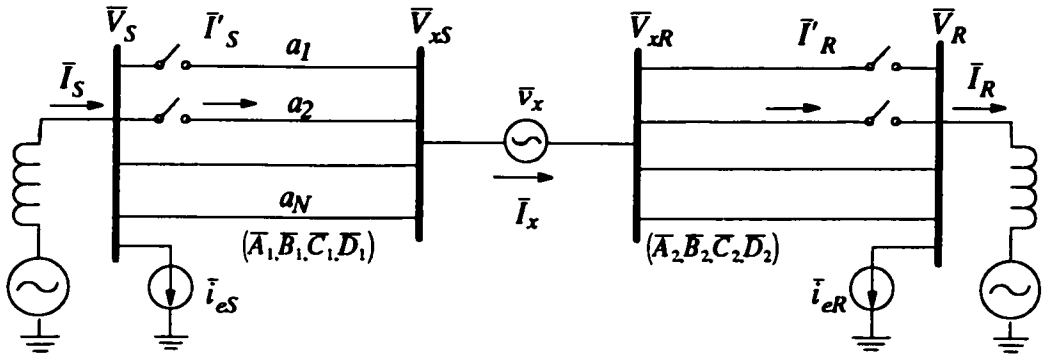


Figure 4.22 Illustration de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et des sources de courants en bout de ligne: cas général

En utilisant la même approche qu'à la section IV.3.2.1, on détermine pour la configuration générale, les conditions à remplir par les trois sources (une source de tension série et deux sources de courant shunts - Figure 4.22-) pour l'exploitation asymétrique. Puis, de la configuration générale on déduit les conditions pour les configurations particulières.

Les relations pré-contingence entre tensions et courants dans la phase A du corridor sont :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N\dfrac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0} & -\dfrac{N}{\bar{B}_0} \\ \dfrac{N}{\bar{B}_0} & -N\dfrac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{V}_R \end{bmatrix} \tag{112}$$

et les relations post-contingence (L phase a coupées, sur N) sont données par ce qui suit :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}'_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \dfrac{\bar{B}_1}{N-L} \\ (N-L)\bar{C}_1 & \bar{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{xS} \\ \bar{I}_x \end{bmatrix} \tag{113}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{xR} \\ \overline{I}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_2 & \dfrac{\overline{B}_2}{N-L} \\ (N-L)\overline{C}_2 & \overline{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_R \\ \overline{I}'_R \end{bmatrix} \tag{114}$$

La tension aux bornes de la source de tension série est obtenue de :

$$\overline{V}_{xS} = \overline{V}_{xR} + \overline{v}_x \tag{115}$$

En remplaçant $\overline{V}_{xS}$ de (115) dans (113) et utilisant (114) on aboutit après développement à :

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_S \\ \overline{I}'_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_1 & \dfrac{\overline{B}_1}{N-L} \\ (N-L)\overline{C}_1 & \overline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{v}_x \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{A}_1 & \dfrac{\overline{B}_1}{N-L} \\ (N-L)\overline{C}_1 & \overline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{A}_2 & \dfrac{\overline{B}_2}{N-L} \\ (N-L)\overline{C}_2 & \overline{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_R \\ \overline{I}'_R \end{bmatrix} \tag{116}$$

Les courants $\overline{I}'_S$ et $\overline{I}'_R$ sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \overline{I}'_S &= \overline{I}_S - \overline{i}_{eS} \\ \overline{I}'_R &= \overline{I}_R + \overline{i}_{eR} \end{aligned} \tag{117}$$

En remplaçant (117) dans (116) et développant on obtient :

$$\begin{aligned} \overline{v}_x - \frac{\overline{B}_1}{N-L}\overline{i}_{eS} + \frac{\overline{B}_2}{N-L}\overline{i}_{eR} &= \overline{D}_1\overline{V}_S - \frac{\overline{B}_1}{N-L}\overline{I}_S - \overline{A}_2\overline{V}_R - \frac{\overline{B}_2}{N-L}\overline{I}_R \\ \overline{A}_1\overline{i}_{eS} + \overline{D}_2\overline{i}_{eR} &= -(N-L)\overline{C}_1\overline{V}_S + \overline{A}_1\overline{I}_S - (N-L)\overline{C}_2\overline{V}_R - \overline{D}_2\overline{I}_R \end{aligned} \tag{118}$$

et compte tenu de (112) et de (66) on aboutit finalement à :

$$\begin{bmatrix} 1 & -\dfrac{\overline{B}_1}{N-L} & \dfrac{\overline{B}_2}{N-L} \\ 0 & \overline{A}_1 & \overline{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{v}_x \\ \overline{i}_{eS} \\ \overline{i}_{eR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{D}_1 - \dfrac{N}{N-L}\left(\dfrac{\overline{B}_1\overline{D}_0}{\overline{B}_0} + \dfrac{\overline{B}_2}{\overline{B}_0}\right) & -\overline{A}_2 + \dfrac{N}{N-L}\left(\dfrac{\overline{B}_1}{\overline{B}_0} + \dfrac{\overline{B}_2\overline{A}_0}{\overline{B}_0}\right) \\ L\overline{C}_1 & L\overline{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_S \\ \overline{V}_R \end{bmatrix} \tag{119}$$

Deux sources sont suffisantes, donc de l'équation (119) on obtient trois possibilités :

- une source de tension série en milieu de ligne et une source de courant shunt à l'entrée de la ligne;
- une source de tension série en milieu de ligne et une source de courant shunt à la sortie de la ligne;
- une source de courant à chaque bout de la ligne; ce dernier cas est le même que celui de la section IV.3.2.1.4, c'est à dire le cas 4.

Le Tableau 4.2 donne un recapitulatif de ces cas (cas 7, 8 et 9). Les sous-sections suivantes fournissent des détails de calculs pour les sources des cas considérés.

IV.3.2.2.1 CAS 7 : UNE SOURCE DE TENSION SÉRIE EN MILIEU DE LIGNE ET UNE SOURCE DE COURANT À L'ENTRÉE DE LA LIGNE

L'exploitation asymétrique utilisant une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne est montrée à la Figure 4.23. Ce cas est obtenu du cas général en posant $\bar{i}_{eR} = 0$ dans l'équation (119). On obtient alors la tension $\bar{v}_x$ et le courant $\bar{i}_{eS}$ par les relations suivantes :

$$\bar{v}_x = -\frac{L}{N - L\bar{A}_1}\frac{1}{\bar{A}_1}\left(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R\right)$$
$$\bar{i}_{eS} = \frac{L}{\bar{A}_1}\left(\bar{C}_1\bar{V}_S + L\bar{C}_2\bar{V}_R\right) \qquad (120)$$

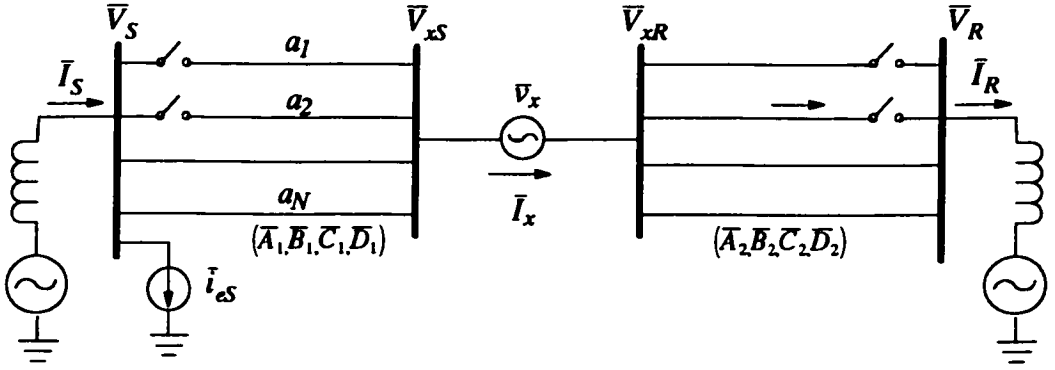


Figure 4.23 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne

Utilisant (113), (117) et (66), on déduit le courant $\bar{I}_x$ traversant la source de tension $\bar{v}_x$

$$\bar{I}_x = N\frac{\bar{D}_2}{\bar{B}_0}\bar{V}_S - \left(N\frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_0} + L\bar{C}_2\right)\bar{V}_R \qquad (121)$$

Si la compensation se fait exactement au milieu de la ligne, alors en utilisant l'équation (83) on montre que :

$$\bar{V}_x = \frac{L}{N - L\sqrt{\frac{2}{\bar{A}_0 + 1}}}\left(-\bar{V}_S + \bar{A}_0\bar{V}_R\right)$$

$$\bar{I}_x = \sqrt{\frac{\bar{A}_0 + 1}{2}}\left[\frac{N}{\bar{B}_0}\bar{V}_S - \left(\frac{N}{\bar{B}_0} + L\frac{\bar{C}_0}{\bar{A}_0 + 1}\right)\bar{V}_R\right] \qquad (122)$$

et que :

$$\bar{i}_{eS} = L\frac{\bar{C}_0}{\bar{A}_0 + 1}\left(\bar{V}_S + \bar{V}_R\right) \qquad (123)$$

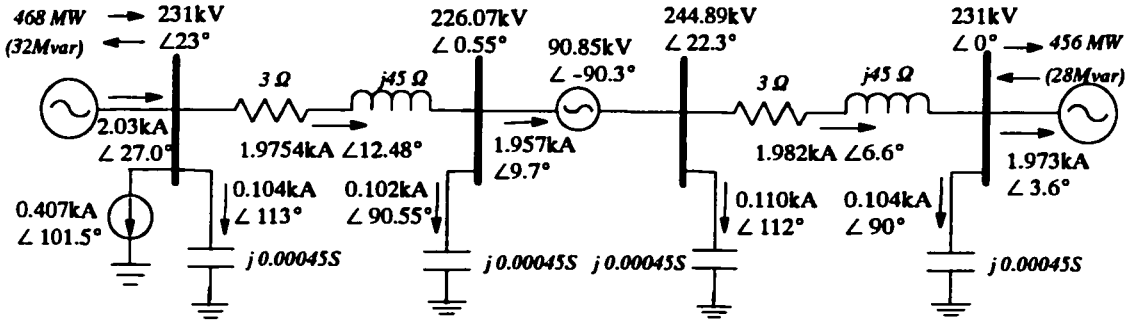


Figure 4.24 Exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne

IV.3.2.2.2 Cas 8: une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à la sortie de la ligne

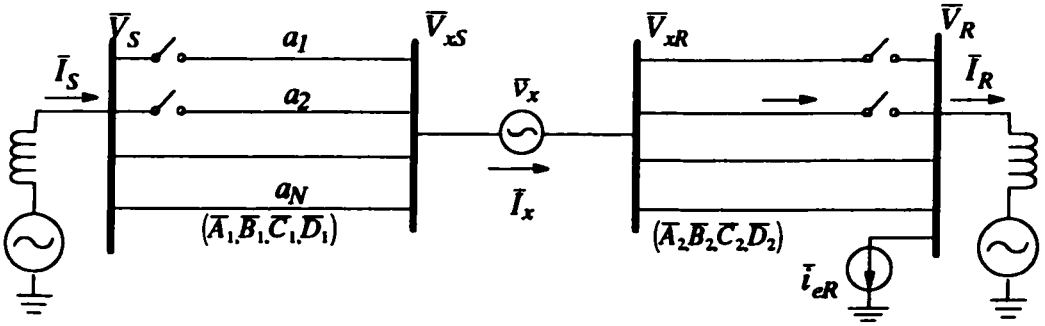


Figure 4.25 Principe de l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à la sortie de la ligne

La configuration correspondant à l'exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à la sortie de la ligne est illustrée à la Figure 4.23.

Ce cas est obtenu en posant $\bar{i}_{eS} = 0$ dans l'équation (119). La tension $\bar{v}_x$ et le courant $\bar{i}_{eR}$ sont obtenus par les relations suivantes :

$$\bar{v}_x = -\frac{L}{N - L\overline{D}_2}\frac{1}{\overline{D}_2}\left(\overline{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R\right)$$
$$\bar{i}_{eR} = \frac{L}{\overline{D}_2}\left(\overline{C}_1\bar{V}_S + L\overline{C}_2\bar{V}_R\right) \qquad (124)$$

En utilisant encore les relations (113), (117) et (66) on obtient le courant $\bar{I}_x$ qui traverse la source de tension $\bar{v}_x$.

$$\bar{I}_x = \left(N\frac{\overline{D}_2}{\overline{B}_0} + L\overline{C}_1\right)\bar{V}_S - N\frac{\overline{A}_1}{\overline{B}_0}\bar{V}_R \qquad (125)$$

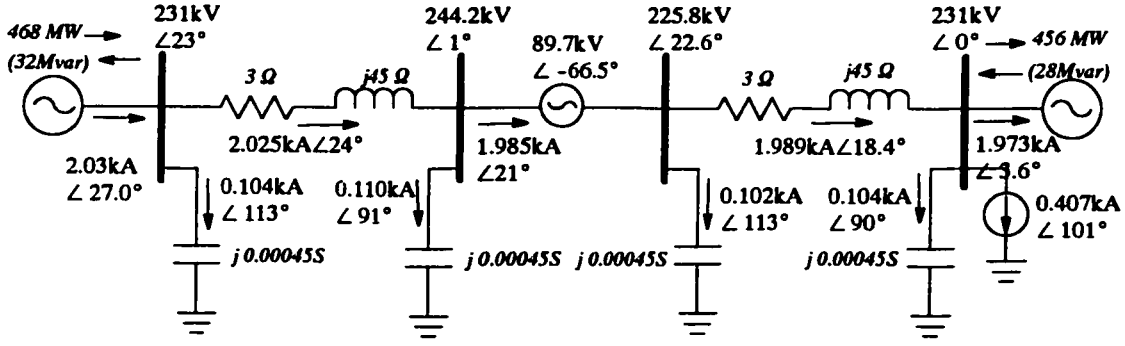
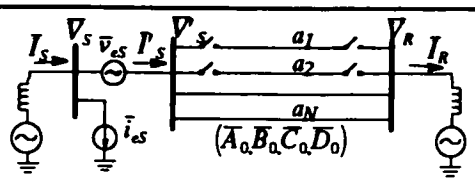
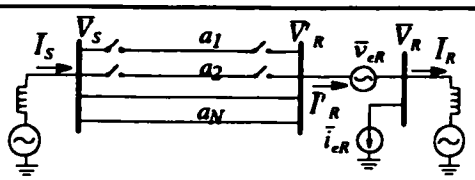
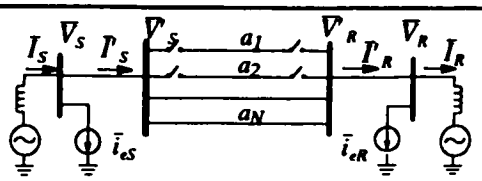
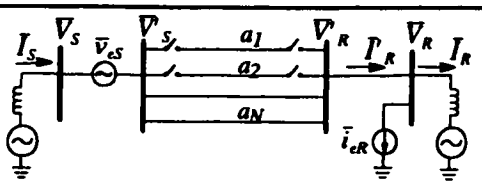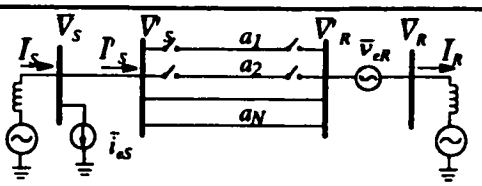
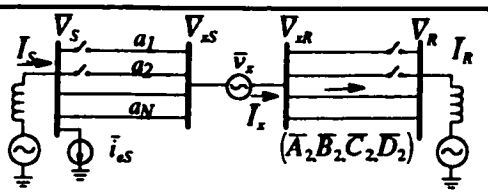
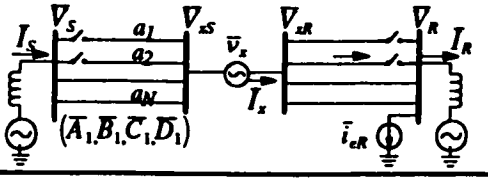


Figure 4.26 Exploitation asymétrique avec une source de tension en milieu de ligne et une source de courant à l'entrée de la ligne

Tableau 4.2 Récapitulatif des cas de compensation par des sources de tension et de courant pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec plusieurs lignes.

Cas	Figure	Valeur des sources
1		$\bar{v}_{eS} = -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eS} = L\bar{C}_0\bar{V}_R$
2		$\bar{v}_{eR} = -\frac{L}{N-L}(\bar{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eR} = L\bar{C}_0\bar{V}_S$
3		$\bar{v}_{eS} = -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eS} = L\bar{C}_0\bar{V}_R$
4 et 9		$\bar{i}_{eS} = \frac{L}{\bar{B}_0}(\bar{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eR} = -\frac{L}{\bar{B}_0}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R)$
5		$\bar{v}_{eS} = -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eR} = L\frac{\bar{C}_0}{\bar{D}_0}\bar{V}_R$
6		$\bar{v}_{eR} = -\frac{L}{N-L}(\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_S - \bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eS} = L\frac{\bar{C}_0}{\bar{A}_0}\bar{V}_S$
7		$\bar{v}_x = -\frac{L}{N-L}\frac{1}{\bar{A}_1}(\bar{V}_S - \bar{A}_0\bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eS} = \frac{L}{\bar{A}_1}(\bar{C}_1\bar{V}_S + L\bar{C}_2\bar{V}_R)$
8		$\bar{v}_x = -\frac{L}{N-L}\frac{1}{\bar{D}_2}(\bar{D}_0\bar{V}_S - \bar{V}_R)$ $\bar{i}_{eR} = \frac{L}{\bar{D}_2}(\bar{C}_1\bar{V}_S + L\bar{C}_2\bar{V}_R)$

IV.3.2.3 Remarques

Avec la compensation effectuée grâce à des sources parfaites de tension et de courant on obtient un équilibre parfait du réseau.

On remarque, cependant, que dans les exemples ci-dessus, où la longueur des lignes est de 300 km, les tensions des barres auxquelles sont connectées les sources de tension peuvent atteindre 1.2 p.u. pour les cas 1 et 2, c'est à dire pour la compensation avec une source de tension et une source de courant localisées au même endroit. Ces surtensions qui sont maximales pour le corridor avec seulement deux lignes sont inacceptables. Elles sont, cependant, plus faibles pour un nombre de lignes plus grand que deux et pour des longueurs de ligne plus faibles. Pour le cas 3, compensation avec deux sources de tensions (une à chaque terminal), la tension des barres internes atteint 2 p.u. et comme les cas 1 et 2, ce profil de tension est inacceptable.

Un profil de tension acceptable est obtenu pour tous les autres cas malgré la longueur de la ligne. Pour le cas 4, la solution avec deux sources de courant, le courant dans les convertisseurs demeure élevé : autour de 1 p.u.. Pour les cas où la source de tension est localisée en milieu de ligne (cas 7 et cas 8) le profil de tension est acceptable mais ces configurations exigent la construction d'une sous-station en milieu de ligne. Elles permettent, cependant, de séparer la ligne en deux sections distinctes où l'exploitation asymétrique séparée de chaque section est possible avec le même équipement. Les cas 5 et 6 où la source de tension et la source de courant ne sont pas localisées au même endroit donnent des surtensions acceptables (1.1. pu) et demeurent des solutions viables au plan des tensions, des courants et de la mise en oeuvre.

IV.4 Résumé

La théorie permettant de déterminer la quantité de puissance réactive nécessaire pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec plusieurs lignes a été développée. On montre qu'on peut utiliser deux sortes de dispositifs de compensation: les dispositifs

conventionnels (éléments passifs) et les sources de tensions et courant. Les dispositifs de compensation conventionnels donnent des solutions approchées à cause de l'impossibilité de compenser la résistance série des lignes (dans l'état actuel de l'art). Mais ce sont des solutions suffisamment précises parce que la résistance de la ligne est très faible. Les sources parfaites de tension et de courant sont offertes par les dispositifs de compensation modernes comme les FACTS. En théorie, la précision qu'offrent ces dispositifs est totale car ils permettent de compenser la résistance de la ligne par l'injection de courant et de tension.

La stratégie de compensation proposée permet de résoudre les contingences simultanées sur une, deux ou trois phases appartenant à la même ligne. Donc, la perte d'une ligne n'affecte plus la capacité du réseau de transport, ce qui va au-delà du critère de conception conventionnel *N-1*.

Indépendamment de la localisation de la compensation série la quantité de puissance réactive pour la compensation sont les mêmes dans la perspective de l'analyse coût-bénéfice des stratégies mises en oeuvre dans ce chapitre. L'analyse coût-bénéfice est traitée en détail au chapitre VII et couvrira les cas d'une et plusieurs lignes.

CHAPITRE V EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC UNE SEULE LIGNE

V.1 INTRODUCTION

Il est possible d'étendre la théorie de la compensation des charges linéaires triphasées non équilibrées et non mise à la terre aux lignes de transport très haute tension si ces lignes sont assimilables à des circuits linéaires du point de vue de l'analyse des circuits électriques (Sana, McGillis, Marceau, Do et Olivier, 2000, [53]).

Dans l'exploitation asymétrique d'un corridor de plusieurs lignes, les déséquilibres causés par l'ouverture d'une phase dans une ligne étaient réduits à l'issue de la compensation de la séquence directe et donc, les courants des séquences inverse et homopolaire pouvaient être négligés. Les schémas de compensation proposés dans ce cas étaient donc exclusivement axés sur le courant de séquence directe.

Dans le cas d'un corridor avec une seule ligne, les courants des séquences inverse et homopolaire qui résultent de l'ouverture d'une phase ne sont pas négligeables et doivent donc être filtrés ou compensés afin de garantir une exploitation asymétrique adéquate.

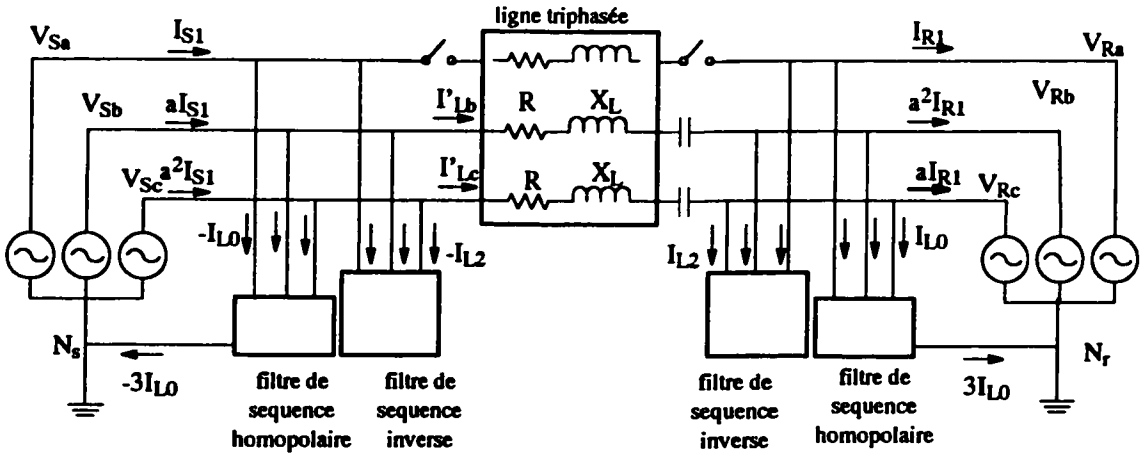


Figure 5.1 Principe de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne

La Figure 5.1 représente le schéma de principe de l'exploitation asymétrique d'une ligne triphasée dont la phase a est hors service. Dans l'exploitation normale, les deux réseaux et la ligne qui les relie sont parfaitement équilibrées. Durant l'exploitation asymétrique avec une phase ou deux ouvertes, des éléments de compensation doivent être ajoutés afin de rééquilibrer les courants et tension des réseaux connectés et préserver leur intégrité. Ces éléments de compensation servent à filtrer ou éliminer les courants de séquence homopolaire et inverse. Trois éléments principaux doivent être ajoutés :

- La compensation série dans les phases saines (phases b et c dans la Figure 5.1) est nécessaire afin de maintenir l'écart angulaire et la même capacité de transport pour la ligne. La compensation série peut être obtenue à l'aide de condensateurs série ou de sources de tension série. Les condensateurs série ou les sources de tension série peuvent être placés à l'entrée au milieu ou à la sortie de la ligne.
- Des filtres de séquence homopolaire (un à chaque bout de la ligne) permettent de créer un chemin de faible impédance aux courants de séquence homopolaire, les empêchant d'atteindre les réseaux interconnectés par la ligne. Chaque filtre de séquence homopolaire peut être constitué de plusieurs façons :
  - par un transformateur en T, en Zigzag ou Δ-Y;
  - par une combinaison d'éléments passifs L et C variables pour refléter le régime de charge de la ligne;
  - par des sources de courant shunts (convertisseurs d'électronique de puissance) qui injectent un courant opposé aux courants de séquence homopolaire.
- Des compensateurs ou filtres de courant de séquence inverse (un à chaque bout de ligne) permettent d'éliminer les courants de séquence inverse en injectant un courant opposé. Les compensateurs de séquence inverse peuvent être constitués par des éléments passifs L et C variables (Compensateur Statique) montés en triangle ou en étoile, ou par des sources de courant shunt (convertisseurs de courants en électronique de puissance).

Les filtres de séquence homopolaire et les compensateurs de séquence inverse peuvent être jumelés en un seul ensemble.

Dans les sections suivantes, on examine le design des trois éléments de compensation utilisables pour l'exploitation asymétrique en utilisant les dispositifs conventionnels et les FACTS.

On procède à rebours. A la fin de la compensation, i.e. durant l'exploitation asymétrique, les tensions sont équilibrées et de mêmes grandeur et angle qu'avant la contingence. Les courants de la charge et les courants de la source sont de séquence directe parce que les courants des autres séquences sont filtrés. Les filtres de séquences inverse et homopolaire sont donc soumis à un système de tension équilibré avant et après la contingence, à chaque bout de ligne. Aussi, la résultante des courants absorbés ou fournis pas les filtres et des courants circulant dans la ligne doit-elle être un courant de séquence directe aux deux bouts de la ligne.

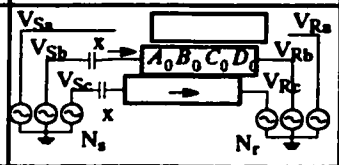
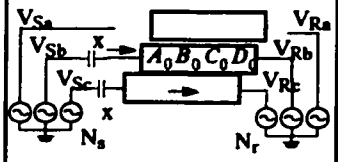
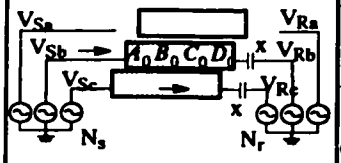
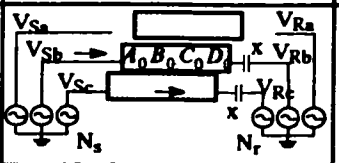
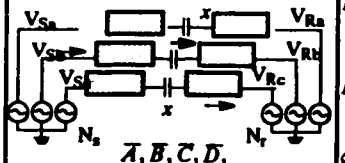
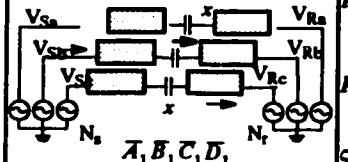
V.2 Compensation par les dispositifs conventionnels

La compensation du courant de séquence directe peut être effectuée à l'aide de condensateurs séries. La compensation de la séquence inverse se fait à l'aide d'éléments passifs LC et le filtrage de la séquence homopolaire se fait à l'aide de transformateurs ou d'éléments passifs LC.

V.2.1 Compensation de la séquence directe par des condensateurs séries

La compensation des courants de séquence directe par des condensateurs séries dépend de la position du condensateur et du choix de la puissance à conserver. Les condensateurs séries peuvent être placés à l'entrée, à la sortie ou au milieu de la ligne. Pour chacune des ces positions, la valeur des condensateurs peut être calculée pour conserver les puissances active et réactive à la source ou à la charge. Ceci donne deux sous-cas pour chaque position du condensateur donc, au total six cas à considérer. Les sous-sections suivantes montrent quelques détails de calcul de chacun des cas examinés et le Tableau 5.1 donne un récapitulatif de l'ensemble.

Tableau 5.1 Récapitulatif des cas de compensation par des condensateurs pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne.

Cas	Figure	Constantes de l'équation donant la réactance x $x^2 + 2K_1x + K_2 = 0$
1		$x^2 + 2\left[\frac{B_0}{A_0}\sin(\beta-\alpha)\right]x + \frac{5}{9}\frac{B_0^2}{A_0^2} = 0$
2		$K_1 = \frac{\frac{9}{4}A_0B_0\varsigma_1^2\sin(\beta-\alpha) - C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma-\delta) - A_0V_{Ra}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_1^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$ $K_2 = \frac{\frac{5}{4}B_0^2\varsigma_1^2}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_1^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$ $\varsigma_1 = \lvert\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}\rvert = \sqrt{V_{Sa}^2 + A_0^2V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta-\alpha)}$ $\delta = \delta_S - \delta_R$
3		$K_3 = \frac{\frac{9}{4}A_0B_0\varsigma_2^2\sin(\beta-\alpha) - C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma+\delta) - A_0V_{Sa}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_2^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2}$ $K_4 = \frac{\frac{5}{4}B_0^2\varsigma_2^2}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_2^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2}$ $\varsigma_2 = \lvert\overline{A}_0\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}\rvert = \sqrt{A_0^2V_{Sa}^2 + V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta+\alpha)}$ $\delta = \delta_S - \delta_R$
4		$x^2 + 2\left[\frac{B_0}{A_0}\sin(\beta-\alpha)\right]x + \frac{5}{9}\frac{B_0^2}{A_0^2} = 0$
5		$K_5 = \frac{\frac{9}{4}B_0\varsigma_3^2\left[2A_0\sin(\beta-\alpha) + 2\sin\beta\right] - 2C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma+\delta) - A_0V_{Sa}^2\sin(\gamma-\alpha\right.}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2}$ $K_6 = \frac{\frac{5}{4}(4B_0^2)\varsigma_3^2}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2}$ $\varsigma_3 = \lvert\overline{A}_0\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}\rvert = \sqrt{A_0^2V_{Sa}^2 + V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta+\alpha)} = \varsigma_2$ $\delta = \delta_S - \delta_R$
6		$K_7 = \frac{\frac{9}{4}B_0\varsigma_4^2\left[2A_0\sin(\beta-\alpha) + 2\sin\beta\right] - 2C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma-\delta) - A_0V_{Ra}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_4^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$ $K_8 = \frac{\frac{5}{4}(4B_0^2)\varsigma_4^2}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$ $\varsigma_4 = \lvert\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}\rvert = \sqrt{V_{Sa}^2 + A_0^2V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta-\alpha)} = \varsigma_1$ $\delta = \delta_S - \delta_R$

V.2.1.1 Condensateurs séries placés à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente fournie par la source

La Figure 5.2 illustre la mise en oeuvre de condensateurs série à l'entrée de la ligne pour la compensation des courants de séquence directe pendant l'exploitation asymétrique. Les filtres de séquence directe et homopolaires ne sont pas représentés pour des besoins de clarté de la figure.

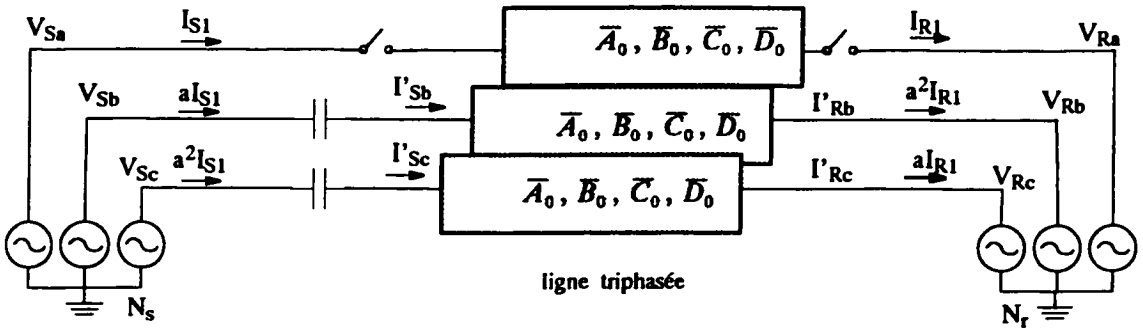


Figure 5.2 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne avec condensateurs à l'entrée de la ligne : séquence directe

Les courants et tensions pour chaque phase i (i = a, b ou c) avant la coupure de la phase a sont :

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{Si} \\ \overline{I}_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{A}_0 & \overline{B}_0 \\ \overline{C}_0 & \overline{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_{Ri} \\ \overline{I}_{Ri} \end{bmatrix} \tag{126}$$

En supposant un équilibre parfait avant toute contingence, les courants de séquence directe à l'entrée ($\overline{I}_{S1}$) et à la sortie ($\overline{I}_{R1}$) de la ligne sont donnés respectivement par :

$$\overline{I}_{S1} = \overline{I}_{Sa} = \frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Sa} - \frac{1}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Ra} \tag{127}$$

$$\overline{I}_{R1} = \overline{I}_{Ra} = \frac{1}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Sa} - \frac{\overline{A}}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Ra} \tag{128}$$

Les courants et tensions pour chaque phase saine i (b ou c) après coupure de la phase a sont obtenus de l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix}\overline{V}_{Si}\\ \overline{I}'_{Si}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & \bar{x}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{A}_0 & \overline{B}_0\\ \overline{C}_0 & \overline{D}_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V}_{Ri}\\ \overline{I}'_{Ri}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\overline{A}_0 + \overline{C}_0\bar{x} & \overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}\\ \overline{C}_0 & \overline{D}_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V}_{Ri}\\ \overline{I}'_{Ri}\end{bmatrix} \tag{129}$$

d'où les courants à l'entrée et à la sortie de la ligne pour les phases b et c :

$$\begin{bmatrix}\overline{I}'_{Si}\\ \overline{I}'_{Ri}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}} & -\dfrac{1}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\\ \dfrac{1}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}} & -\dfrac{\overline{A}_0 + \overline{C}_0\bar{x}}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V}_{Si}\\ \overline{V}_{Ri}\end{bmatrix} \quad ; \; i = b, \, c \tag{130}$$

Après la coupure de la phase a, les courants de séquence directe à l'entrée ($\overline{I}'_{S1}$) et à la sortie ($\overline{I}'_{R1}$) de la ligne sont donnés respectivement par :

$$\overline{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\overline{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\overline{I}'_{Sc} = \frac{2}{3}\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\overline{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{1}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\overline{V}_{Ra} \tag{131}$$

$$I'_{R1} = \frac{1}{3}a\overline{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\overline{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\frac{1}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\overline{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{\overline{A}_0 + \overline{C}_0\bar{x}}{\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}}\overline{V}_{Ra} \tag{132}$$

Pour conserver le courant de séquence directe avant et après contingence au niveau de la source il faut :

$$\overline{I}'_{S1} = \overline{I}_{S1} \tag{133}$$

et donc, d'après les équations (127) et (131), la valeur de l'impédance $\bar{x}$ est :

$$\bar{x} = -\frac{1}{3}\frac{\overline{B}_0}{\overline{D}_0} \tag{134}$$

Cette impédance $\bar{x}$ contient une partie résistive difficile à réaliser en haute tension (résistance négative). Cependant, on peut choisir une réactance pure (un condensateur) permettant de conserver la puissance active fournie par la source ou la grandeur de la puissance apparente (en MVA) fournie par la source. Dans le cadre de la présente thèse le condensateur sera choisi pour conserver la puissance apparente fournie par la source.

Étant donné que les séquences homopolaire et directe sont filtrées et que les tensions des deux bouts de lignes restent inchangées, pour conserver la grandeur de la puissance

apparente fournie par la source, il suffit de conserver la grandeur des courants de séquence directe avant et après contingence à la source. Ceci se traduit par :

$$|\bar{I}'_{S1}| = |\bar{I}_{S1}| \tag{135}$$

En tenant compte de (127) et (131) et en développant on obtient :

$$|\bar{B}_0 + \bar{D}_0\bar{x}| = \frac{2}{3}|\bar{B}_0| \tag{136}$$

En posant:

$$\begin{aligned} \bar{A}_0 &= \bar{D}_0 = A_0 e^{j\alpha} \\ \bar{B}_0 &= B_0 e^{j\beta} \\ \bar{C}_0 &= C_0 e^{j\gamma} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \bar{x} &= x e^{j\pi/2} \\ \bar{V}_S &= V_S\, e^{j\delta_S} \\ \bar{V}_R &= V_R\, e^{j\delta_R} \\ \delta &= \delta_S - \delta_R \end{aligned} \tag{137}$$

L'équation (136) devient :

$$\left|- A_0 x \sin\alpha + B_0 \cos\beta + \left(A_0 x \cos\alpha + B_0 \sin\beta\right)\right|^2 = \frac{4}{9}B_0^2 \tag{138}$$

et après développement on obtient l'équation suivante :

$$x^2 + 2\left[\frac{B_0}{A_0}\sin(\beta - \alpha)\right]x + \frac{5}{9}\frac{B_0^2}{A_0^2} = 0 \tag{139}$$

dont les solutions sont :

$$x_{1,2} = \frac{B_0}{A_0}\left[- \sin(\beta - \alpha) \pm \sqrt{\sin^2(\beta - \alpha) - \frac{5}{9}}\right] \tag{140}$$

Pour les lignes de transport, on a :

$$\begin{aligned} &\beta \leq \pi/2 \ ; \ \alpha \geq 0 \ \ ; \ et \\ &\frac{\pi}{2} > \beta - \alpha > \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{5}{9}}\right) > 0 \end{aligned} \tag{141}$$

Il existe donc, deux solutions réelles négatives et la solution acceptable est celle qui donne une réactance de grandeur plus petite que B_0 , c'est à dire :

$$x = x_1 = \frac{B_0}{A_0}\left[- \sin(\beta - \alpha) + \sqrt{\sin^2(\beta - \alpha) - \frac{5}{9}}\right] \tag{142}$$

Si la ligne est courte et sans pertes alors $\beta = \pi/2$, $\alpha = 0$, $B_0 = X_L$, $A_0 = 1$ et

$$x = -X_L/3 \tag{143}$$

On remarque que la réactance x des condensateurs ne dépend que des paramètres de la ligne. En particulier, x est indépendant des conditions de charge de la ligne.

V.2.1.2 Condensateurs séries placés à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à la charge

Les considérations relatives aux équations (126) à (133) restent valables pour ce cas-ci. Pour assurer l'égalité des courants de séquence directe avant et après contingence on peut montrer qu'il faut une impédance de compensation $\bar{x}$ donnée par:

$$\bar{x} = -\frac{1}{3}\frac{\overline{B}_0}{\overline{D}_0}\frac{\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}}{\overline{V}_{Sa} - \frac{1}{3}(\overline{A}_0 + 2/\overline{D}_0)\overline{V}_{Ra}} \tag{144}$$

Cette impédance possède une partie résistive que l'on peut éviter en conservant la grandeur de la puissance apparente à la charge.

Pour conserver la grandeur de la puissance apparente (en MVA) à la charge, il suffit de conserver la grandeur des courants de séquence directe avant et après contingence à la charge, comme discuté dans la section précédente pour la conservation de la puissance apparente à la source.

$$|\overline{I}'_{R1}| = |\overline{I}_{R1}| \tag{145}$$

en tenant compte de (128) et de (132) et en développant ont abouti à :

$$|\overline{B}_0|^2|\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra} - \overline{C}_0\bar{x}\overline{V}_{Ra}|^2 = \frac{9}{4}|\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}|^2|\overline{B}_0 + \overline{D}_0\bar{x}|^2 \tag{146}$$

Compte tenu des relations définies dans (137) on peut développer (146) sous forme d'équation du second degré :

$$x^2 + 2K_1x + K_2 = 0 \tag{147}$$

avec :

$$K_1 = \frac{\frac{9}{4}A_0B_0\varsigma_1^2\sin(\beta-\alpha) - C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma-\delta) - A_0V_{Ra}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_1^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$$

$$K_2 = \frac{\frac{5}{4}B_0^2\varsigma_1^2}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_1^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2} \qquad (148)$$

$$\varsigma_1 = |\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}| = \sqrt{V_{Sa}^2 + A_0^2V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta-\alpha)}$$

$$\delta = \delta_S - \delta_R$$

Pour les lignes de transport haute tension, on a : $\beta \leq \pi/2, \alpha \geq 0, A_0 \leq 1, C_0 \geq 0$ et $\delta < \pi/2 \leq \gamma$. En plus, les grandeurs des tensions sont voisines : $V_{Ra} \cong V_{Sa}$. Ce faisant, on a $K_1^2 > k2 > 0$ et donc, l'équation précédente possède deux solutions réelles dont la solution pratique à prendre est une réactance négative x telle que :

$$-X_L < x < 0 \qquad (149)$$

où X_L est la réactance série de la ligne. Cette solution pratique est donnée, toujours dans le contexte des lignes de transport, par :

$$x = -K_1 + \sqrt{K_1^2 - K_2} \qquad (150)$$

Si la ligne est courte et sans pertes alors $\beta = \pi/2, \alpha = 0, B_0 = X_L, A_0 = 1, C_0 \cong 0$ et

$$K_1 = B_0 = X_L$$

$$K_2 = \frac{5}{9}B_0^2 \qquad (151)$$

Dans ces conditions, la réactance x cherchée est simplement égale à $-X_L/3$.

On remarque que les paramètres K_1 et K_2 dépendent des tensions dans la ligne et donc la réactance x dépendra des conditions de charges dans la ligne.

V.2.1.3 Condensateurs séries placés à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente fournie à la source

La Figure 5.3 illustre la compensation des courants de séquence directe d'une ligne triphasée pendant l'exploitation asymétrique avec des condensateurs situés du côté de la

charge. Là encore, les filtres de séquence homopolaire et les compensateurs de séquence inverse ne sont pas représentés pour des besoins de clarté.

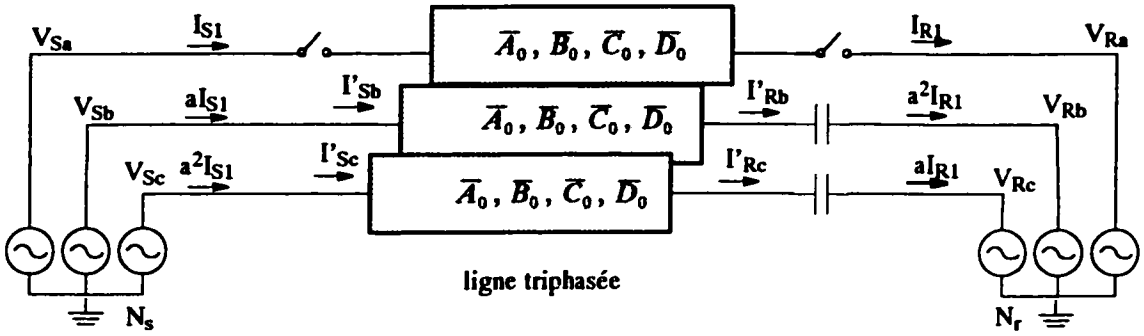


Figure 5.3 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne avec condensateurs à la sortie de la ligne : séquence directe

Les conditions précontingence sont les mêmes que celles définies par les équations (126) à (128). Après ouverture de la phase a et mise en oeuvre des condensateurs, les tensions et courants pour chaque phase saine i (i = b ou c) (conditions postcontingence) sont quant à eux données par :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{Si} \\ \bar{I}'_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \bar{B}_0 \\ \bar{C}_0 & \bar{D}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \bar{x} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{Ri} \\ \bar{I}'_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_0 & \bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x} \\ \bar{C}_0 & \bar{D}_0 + \bar{C}_0\bar{x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{Ri} \\ \bar{I}'_{Ri} \end{bmatrix} \tag{152}$$

d'où les courants à l'entrée et à la sortie de la ligne pour les phases b et c :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}'_{Si} \\ \bar{I}'_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\bar{D}_0 + \bar{C}_0\bar{x}}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}} & -\dfrac{1}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}} \\ \dfrac{1}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}} & -\dfrac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{Si} \\ \bar{V}_{Ri} \end{bmatrix} \tag{153}$$

Les courants de séquence directe du côté source et du côté charge sont donnés respectivement par les équations suivantes :

$$\bar{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Sc} = \frac{2}{3}\frac{\bar{D}_0 + \bar{C}_0\bar{x}}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}}\bar{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{1}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}}\bar{V}_{Ra} \tag{154}$$

$$\bar{I}'_{R1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\frac{1}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}}\bar{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}}\bar{V}_{Ra} \tag{155}$$

L'impédance $\bar{x}$ qui permet d'assurer l'égalité des courants de séquence directe avant et après la contingence est obtenue des équations (127) et (154) par:

$$\bar{x} = -\frac{1}{3}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_0}\frac{\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\frac{1}{3}(\bar{D}_0 + 2/\bar{A}_0)\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}} \tag{156}$$

Cette impédance $\bar{x}$, possède une partie réelle et comme dans la section précédente (V.2.1.1), pour éviter la compensation de la résistance de la ligne on peut choisir la réactance x d'un condensateur permettant de conserver soit la puissance active fournie par la source soit la grandeur de la puissance apparente fournie par la source.

Pour conserver la grandeur de la puissance apparente à la source, il suffit de conserver la grandeur des courants de séquence directe avant et après contingence à la charge.

$$|\bar{I}'_{S1}| = |\bar{I}_{S1}| \tag{157}$$

En utilisant (127) et (154) on développe (157) comme suit :

$$|\bar{B}_0|^2|\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{C}_0\bar{x}\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}|^2 = \frac{9}{4}|\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}|^2|\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}|^2 \tag{158}$$

Compte tenu des relations définies dans (137) on peut développer (158) sous forme d'équation du second degré :

$$x^2 + 2K_3x + K_4 = 0 \tag{159}$$

avec :

$$\begin{aligned}
K_3 &= \frac{\frac{9}{4}A_0B_0\varsigma_2^2\sin(\beta - \alpha) - C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma + \delta) - A_0V_{Sa}^2\sin(\gamma - \alpha)\right]}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_2^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2} \\
K_4 &= \frac{\frac{5}{4}B_0^2\varsigma_2^2}{\frac{9}{4}A_0^2\varsigma_2^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2} \\
\varsigma_2 &= |\bar{A}_0\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}| = \sqrt{A_0^2V_{Sa}^2 + V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta + \alpha)} \\
\delta &= \delta_S - \delta_R
\end{aligned} \tag{160}$$

L'équation (159) est similaire à l'équation (147) excepté le fait que les constantes K_3 et K_4 soient légèrement différentes de K_1 et K_2 respectivement, à cause de la localisation des condensateurs séries.

V.2.1.4 Condensateurs séries placés à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à la charge

Pour assurer l'égalité des courants de séquence directe avant contingence donnés par (128) et après contingence donnés par (155) il faut une impédance $\bar{x}$ telle que :

$$\bar{x} = -\frac{1}{3}\frac{\bar{B}_0}{\bar{A}_0} \tag{161}$$

Là aussi, il existe une partie réelle qui n'est pas acceptable. On choisit plutôt, la valeur du condensateur série pour conserver la puissance active ou la puissance apparente en MVA livrée à la charge. Pour conserver la grandeur de la puissance apparente fournie à la charge, il suffit de conserver la grandeur des courants de séquence directe avant et après contingence à la sortie de la ligne :

$$|\bar{I}'_{R1}| = |\bar{I}_{R1}| \tag{162}$$

Compte tenu de (128) et (155) et après développement on obtient :

$$|\bar{B}_0 + \bar{A}_0\bar{x}| = \frac{2}{3}|\bar{B}_0| \tag{163}$$

En tenant compte des définitions de l'équation (137) et en développant on aboutit à :

$$x^2 + 2\left[\frac{B_0}{A_0}\sin(\beta - \alpha)\right]x + \frac{5}{9}\frac{B_0^2}{A_0^2} = 0 \tag{164}$$

Comme $A_0 = D_0$, l'équation (161) est identique à l'équation (134) et l'équation (164) est la même que l'équation (139). Donc, les mêmes considérations (équations (140) à (143)) restent valables. On obtient en essence, exactement les mêmes solutions que dans la conservation de la puissance à la source lorsque les condensateurs sont placés à la source (section V.2.1.1).

V.2.1.5 Condensateurs séries placés au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne

La compensation des courants de séquence directe d'une ligne triphasée pendant l'exploitation asymétrique avec des condensateurs situés au milieu de la ligne est illustrée à la Figure 5.4. Là aussi, les filtres de séquence homopolaire et les compensateurs de séquence inverse ne sont pas représentés pour des besoins de clarté.

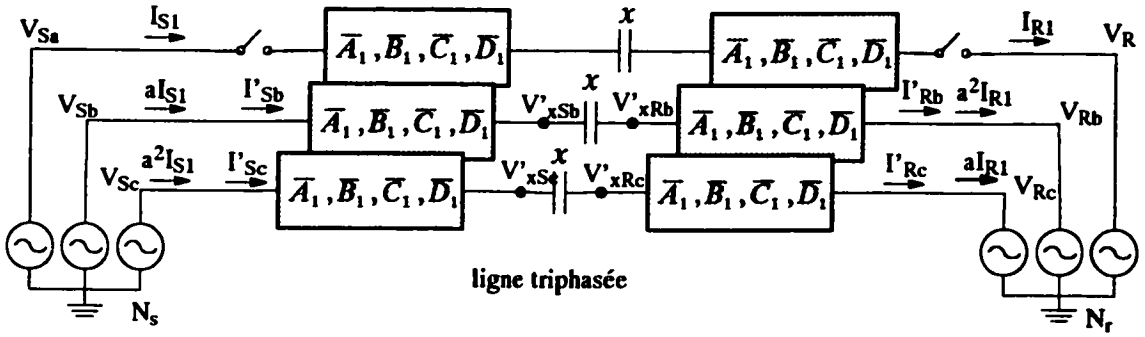


Figure 5.4 Exploitation symétrique d'un corridor avec une seule ligne avec condensateurs au milieu de la ligne : séquence directe

On considère pour simplifier, que les condensateurs sont placés exactement au milieu de la ligne. De ce fait les éléments des quadripôles sont donnés par l'équation (83) que l'on rappelle ici :

$$\begin{aligned}
\overline{A}_1 &= \overline{A}_2 = \overline{D}_1 = \overline{D}_2 = \sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\overline{A}_0 + 1\right)} \\
\overline{B}_1 &= \overline{B}_2 = \frac{\overline{B}_0}{2\overline{A}_1} = \frac{\overline{B}_0}{2}\frac{1}{\sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\overline{A}_0 + 1\right)}} \\
\overline{C}_1 &= \overline{C}_2 = \frac{\overline{C}_0}{2\overline{A}_1} = \frac{\overline{C}_0}{2}\frac{1}{\sqrt{\tfrac{1}{2}\left(\overline{A}_0 + 1\right)}}
\end{aligned} \tag{165}$$

Les courants dans les conditions pré-contingence sont donnés par les relations (126) à (128) tandis que les courants dans les conditions postcontingence sont pour chaque phase saine i (i = b ou c) :

$$\begin{bmatrix}\overline{V}_{Si}\\ \overline{I}'_{Si}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\overline{A}_1 & \overline{B}_1\\ \overline{C}_1 & \overline{D}_1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & \overline{x}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{A}_2 & \overline{B}_2\\ \overline{C}_2 & \overline{D}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V}_{Ri}\\ \overline{I}'_{Ri}\end{bmatrix} \quad ;i = b,\ c \tag{166}$$

En développant tout en considérant les relations définies dans l'équation (165) on obtient les courants $\overline{I}'_{Si}$ et $\overline{I}'_{Ri}$ pour chaque quadripôle (phase b ou c) par ce qui suit :

$$\begin{bmatrix}\overline{I}'_{Si}\\ \overline{I}'_{Ri}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dfrac{2\overline{A}_0 + \overline{C}_0\overline{x}}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}} & -\dfrac{2}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\\ \dfrac{2}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}} & -\dfrac{2\overline{A}_0 + \overline{C}_0\overline{x}}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{V}_{Si}\\ \overline{V}_{Ri}\end{bmatrix} \tag{167}$$

Le courant de séquence directe entrant dans la ligne du côté de la source est donc :

$$\overline{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\overline{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\overline{I}'_{Sb} = \frac{2}{3}\frac{2\overline{A}_0 + \overline{C}\overline{x}}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\overline{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{2}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\overline{V}_{Ra} \tag{168}$$

et le courant de séquence directe sortant de la ligne au niveau de la charge est :

$$\overline{I}'_{R1} = \frac{1}{3}a\overline{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\overline{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\frac{2}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\overline{V}_{Sa} - \frac{2}{3}\frac{2\overline{A}_0 + \overline{C}_0\overline{x}}{2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}}\overline{V}_{Ra} \tag{169}$$

A l'instar des sections précédentes, on peut montrer que l'impédance de compensation qui assure l'égalité des courants de séquence directe avant et après contingence contient une partie réelle. Pour contourner cette difficulté, on choisit la réactance d'un condensateur qui permette de conserver la puissance apparente à l'entrée de la ligne. Pour cela et tenant compte du fait que les tensions sont fixes, il faut :

$$|\overline{I}'_{S1}| = |\overline{I}_{S1}| \tag{170}$$

Tenant compte de (127) et de (168) on obtient après développement :

$$|\overline{B}_0|^2|(2\overline{A}_0 + \overline{C}_0\overline{x})\overline{V}_{Sa} - 2\overline{V}_{Ra}|^2 = \frac{9}{4}|\overline{A}_0\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}|^2|2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}|^2 \tag{171}$$

En utilisant les relations définies dans (137) on peut développer (171) sous forme d'une équation du second degré :

$$x^2 + 2K_5x + K_6 = 0 \tag{172}$$

avec :

$$K_5 = \frac{\frac{9}{4}B_0\varsigma_3^2\left[2A_0\sin(\beta-\alpha)+2\sin\beta\right] - 2C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma+\delta)-A_0V_{Sa}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2}$$

$$K_6 = \frac{\frac{5}{4}(4B_0^2)\varsigma_3^2}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Sa}^2} \qquad (173)$$

$$\varsigma_3 = |\overline{A}_0\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}| = \sqrt{A_0^2V_{Sa}^2 + V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta+\alpha)} = \varsigma_2$$

$$\delta = \delta_S - \delta_R$$

l'équation (172) est similaire à l'équation (147) sauf que les constantes K_5 et K_6 sont différentes de K_1 et K_2 respectivement, à cause de la localisation des condensateurs séries.

V.2.1.6 Condensateurs séries placés au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne

Les relations (126) à (128) et les relations (165) à (169) restent valables dans ce cas-ci. Aussi, comme dans les sections précédentes, la réactance de compensation contiendrait une partie réelle indésirable si l'on veut une égalité des courants de séquence directe avant et après contingence. La compensation dans ce cas vise plutôt la conservation de la grandeur de la puissance apparente (en MVA). Pour conserver la grandeur de la puissance apparente à la sortie de la ligne il faut :

$$|\overline{I}'_{R1}| = |\overline{I}_{R1}| \qquad (174)$$

en utilisant (128) et (169) on obtient :

$$|\overline{B}_0|^2|2\overline{V}_{Sa} - (2\overline{A}_0 + \overline{C}_0\overline{x})\overline{V}_{Ra}|^2 = \frac{9}{4}|\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}|^2|2\overline{B}_0 + (\overline{A}_0 + 1)\overline{x}|^2 \qquad (175)$$

Tenant compte des relations définies dans (137) on peut développer (175) sous forme d'une équation du second degré :

$$x^2 + 2K_7x + K_8 = 0 \qquad (176)$$

avec :

$$K_7 = \frac{\frac{9}{4}B_0\varsigma_4^2\left[2A_0\sin(\beta-\alpha)+2\sin\beta\right] - 2C_0B_0^2\left[V_{Sa}V_{Ra}\sin(\gamma-\delta)-A_0V_{Ra}^2\sin(\gamma-\alpha)\right]}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_4^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2}$$

$$K_8 = \frac{\frac{5}{4}(4B_0^2)\varsigma_4^2}{\frac{9}{4}\left(A_0^2 + 2A_0\cos\alpha + 1\right)\varsigma_3^2 - B_0^2C_0^2V_{Ra}^2} \qquad (177)$$

$$\varsigma_4 = |\overline{V}_{Sa} - \overline{A}_0\overline{V}_{Ra}| = \sqrt{V_{Sa}^2 + A_0^2V_{Ra}^2 - 2A_0V_{Sa}V_{Ra}\cos(\delta-\alpha)} = \varsigma_1$$

$$\delta = \delta_S - \delta_R$$

L'équation (176) est similaire à l'équation (172) sauf que les constantes K_7 et K_8 sont différentes de K_5 et K_6 respectivement, à cause de la localisation des condensateurs séries.

V.2.2 Compensation de la séquence inverse par éléments passifs

La compensation des courants de séquence inverse d'une ligne en exploitation asymétrique par des éléments passifs se fait par la connexion de réactances inductives (L) et capacitives (C) entre les phases a, b et c aux deux bouts de la ligne (Figure 5.5). Cette connexion interphase permet de créer un chemin de faible impédance pour ces courants de séquence inverse qui s'annulent par symétrie dans le compensateur. Les éléments passifs L et C peuvent être montés en étoile ou en triangle.

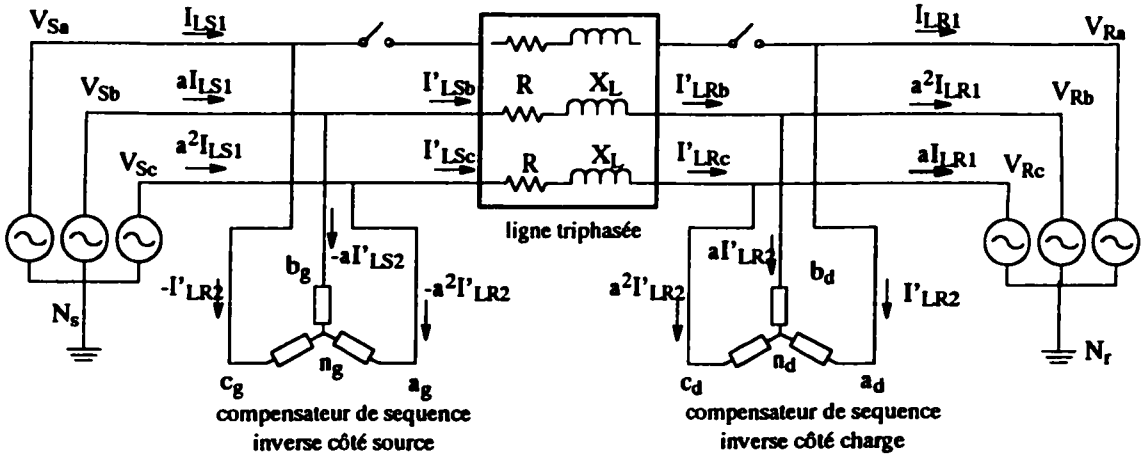


Figure 5.5 Principe de compensation des courants de séquence inverse d'une ligne en exploitation asymétrique par éléments passifs LC

V.2.2.1 Compensateurs de séquence inverse montés en étoile (Y)

Le calcul est effectué pour le compensateur de gauche et pour le montage en Y en s'inspirant de la méthode proposée par Olivier et Bouchard en 1997, [54]. Les valeurs des impédances du compensateur de droite en seront déduites, par la suite.

En appliquant la transformée de Fortescue (Fortescue 1918, [48]; Clarke, 1943, [49]) aux tensions phase-neutre, aux courants de ligne et aux impédances du compensateur, et en y ajoutant la condition que le compensateur ne consomme pas de la puissance apparente, on aboutit, tous calculs faits, aux relations suivantes dans lesquelles R_{ag}, R_{bg}, R_{cg} sont les résistances du compensateur; X_{ag}, X_{bg}, X_{cg} sont les réactances du compensateur; $\overline{Z}_{a2g}$, R_{a2g}, X_{a2g} sont respectivement l'impédance, la résistance et la réactance de séquence inverse du compensateur; $\overline{V}_{Sa}$ est la tension phase-neutre en bout de ligne (coté gauche ou source); $\overline{I}_{a2g}$ est la séquence inverse du courant entrant dans compensateur et $\overline{I}'_{LS2}$ est la séquence inverse du courant dans la ligne lors du fonctionnement asymétrique (voir l'Annexe C pour la démonstration) :

$$\begin{aligned} &R_{ag} = R_{bg} = R_{cg} = 0 \\ &\overline{Z}_{a2g} = R_{a2g} + jX_{a2g} = \frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}_{a2g}} = -\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}} \end{aligned} \tag{178}$$

$$\begin{aligned} X_{ag} &= 2X_{a2g} = -2\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) \\ X_{bg} &= \sqrt{3}R_{a2g} - X_{a2g} = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) + \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) \\ X_{cg} &= -\sqrt{3}R_{a2g} - X_{a2g} = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) + \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) \end{aligned} \tag{179}$$

En procédant de la même manière que pour le compensateur gauche, les valeurs des impédances du compensateur de droite sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} &R_{ad} = R_{bd} = R_{cd} = 0 \\ &\overline{Z}_{a2d} = R_{a2d} + jX_{a2d} = \frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}_{a2d}} = \frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}} \end{aligned} \tag{180}$$

$$
\begin{aligned}
X_{ad} &= 2X_{a2d} = 2\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) \\
X_{bd} &= \sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) \\
X_{cd} &= -\sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right)
\end{aligned}
\tag{181}
$$

$\overline{V}_{Ra}$ est la tension entre la phase a et le neutre du côté droit de la ligne, $\overline{I}'_{LR2}$ est le courant de séquence inverse de la ligne, $\overline{I}_{a2d}$ le courant de séquence inverse entrant dans le compensateur droit, $\overline{Z}_{a2d}$, R_{ad2} et X_{ad2} respectivement l'impédance, la résistance et la réactance de séquence inverse du compensateur de droite.

V.2.2.2 Compensateur de séquence inverse monté en triangle

Le calcul est effectué pour le compensateur de droite et pour le montage en Δ s'inspire de la méthode proposée par Gyugyi L., Otto R. A. et Putman T. H. en 1978, [18].

Pour le compensateur de séquence inverse de droite et supposant un compensateur constitué uniquement de réactances pures, la séquence inverse des courants entrant dans celui-ci est d'abord exprimée en fonction des impédances de ce compensateur et des tensions phase-phase à ses bornes. Puis, en égalisant cette expression au courant de séquence inverse de la ligne on extrait les valeurs des réactances de compensation comme suit (voir l'Annexe D pour la démonstration complète) :

$$
\begin{aligned}
B_{abd} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Rab}}\right) + \Im m\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Rab}}\right) \\
B_{bcd} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Rab}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Rab}}\right) \\
B_{cad} &= \frac{2}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Rab}}\right)
\end{aligned}
\tag{182}
$$

B_{abd}, B_{bcd}, B_{cad} sont les susceptances du compensateur droit connectées respectivement entre les phases a et b, b et c, et c et a, $\overline{V}_{Rab}$ est la tension ligne-ligne de la ligne du coté droit et $\overline{I}'_{LR2}$ est le courant de séquence directe de la ligne du coté droit.

En fonction de la tension phase-neutre du coté droit ($\overline{V}_{Ra}$) on obtient les relations suivantes:

$$\begin{aligned} B_{abd} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) \\ B_{bcd} &= -\frac{2}{3}\Im m\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) \\ B_{cad} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\overline{I}'_{LR2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) \end{aligned} \qquad (183)$$

Les susceptances pour le compensateur de gauche sont déduites des équations (182) ou (183) en remplaçant $\overline{I}'_{LR2}$ par $-\overline{I}'_{LS2}$, $\overline{V}_{Rab}$ par $\overline{V}_{Sab}$ et $\overline{V}_{Ra}$ par $\overline{V}_{Sa}$.

Les compensateurs de séquence inverse montés en triangle et en étoile sont équivalents l'un à l'autre pour la compensation d'un même courant de séquence inverse. L'annexe E fournit des indications à cet effet, en prenant l'exemple des compensateurs de séquence inverse du côté droit de la ligne, décrits par les équations (181) et (183) pour les configurations étoile et triangle respectivement.

V.2.3 Filtrage de la séquence homopolaire par transformateurs

Le filtrage des courants de séquence homopolaire peut être mis en oeuvre de deux façons: par transformateur de mise à la terre ou par transformateur d'alimentation.

V.2.3.1 Filtrage par transformateur de mise à la terre

Le filtrage de la séquence homopolaire du courant par transformateur de mise à la terre se fait soit à l'aide de deux transformateurs en T, Δ-Y ou en zigzag (un à chaque bout de ligne), soit à l'aide d'éléments passifs. Dans les deux cas, on crée un chemin d'écoulement pour la séquence homopolaire du courant de ligne vers le fil de garde (la terre) (Figure 5.6).

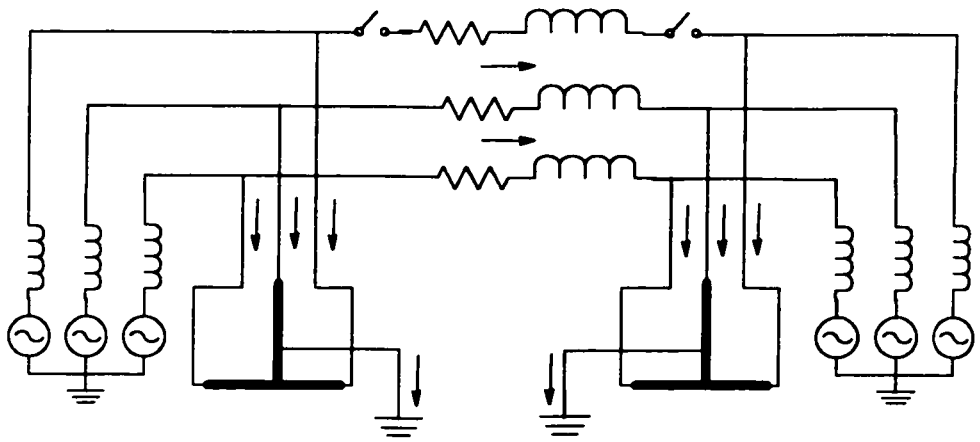
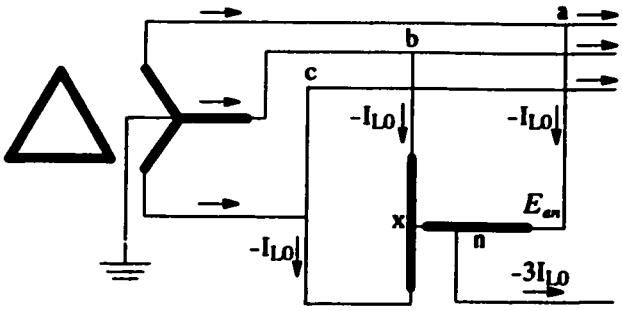


Figure 5.6 Principe de filtrage de la séquence homopolaire

L'écoulement de la séquence homopolaire vers le fil de garde suppose aussi une connexion aux pylônes de support des lignes et à la terre .

Si l'on utilise un transformateur en T pour filtrer la séquence homopolaire, la Figure 5.7 en illustre la mise en oeuvre. La puissance des enroulements (S_{an} et S_{bx}) et la puissance du transformateur monophasé utilisable pour la connexion (S_T) sont données par les relations suivantes (184) :

$$\begin{aligned} S_{an} &= S_{xn} = |V_{an}||I_{L0}| \\ S_{bx} &= S_{cx} = \frac{\sqrt{3}}{2}|V_{an}||I_{L0}| \\ S_T &= \frac{1}{2}(S_{an} + S_{bx}) = 0.933|V_{an}||I_{L0}| \end{aligned} \qquad (184)$$



$$V_{ax} = \frac{3}{2}V_{an}$$

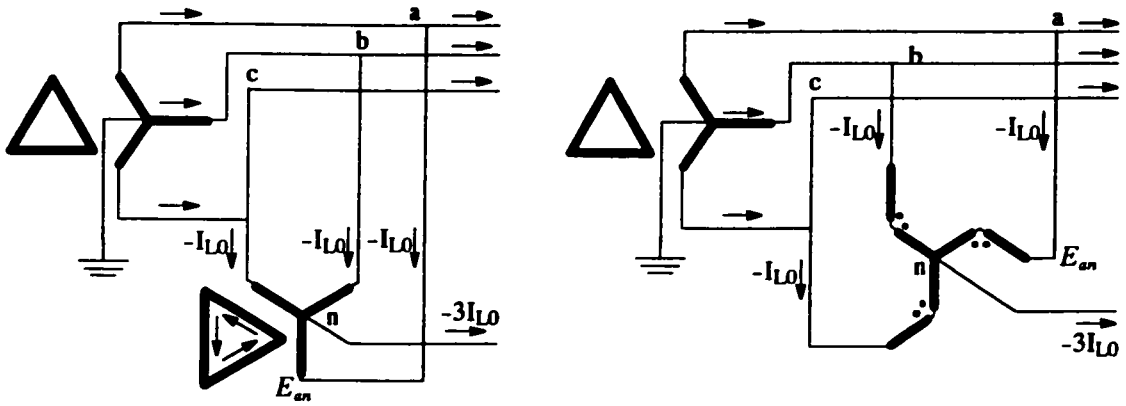
$$V_{bx} = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{an}\angle 90^{o}$$

$$V_{cx} = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{an}\angle -90^{o}$$

$$V_{xn} = \frac{V_{an}}{2}\angle 180^{\bullet}$$

Figure 5.7 Transformateur en T pour le filtrage de la séquence homopolaire

Si l'on utilise des transformateurs D-Y ou Zigzag les Figure 5.8 a) et b) montrent les connexions respectives.



a) Transformateur Δ-Y

b) Transformateur ZigZag

Figure 5.8 Transformateurs en Δ-Y et ZigZag pour filtrage de séquence homopolaire

Le transformateur en T est cependant avantageux car il requiert moins d'enroulements.

V.2.3.2 Filtrage de la séquence homopolaire par les transformateurs d'alimentation.

Dans le cas d'une ligne mise à la terre, les transformateurs d'alimentation aux bouts de la ligne peuvent avoir une configuration permettant le filtrage des courants de séquence homopolaire qui proviennent de l'asymétrie de la ligne. La Figure 5.9 représente un exemple de configuration avec un transformateur Dy11 à l'entrée de la ligne et un transformateur Yd1 à la sortie. Les courants de séquence homopolaire provenant de la ligne traversent les enroulements secondaires du côté de la source et les enroulements primaires du côté de la charge. Les transformateurs doivent donc être dimensionnés en conséquence.

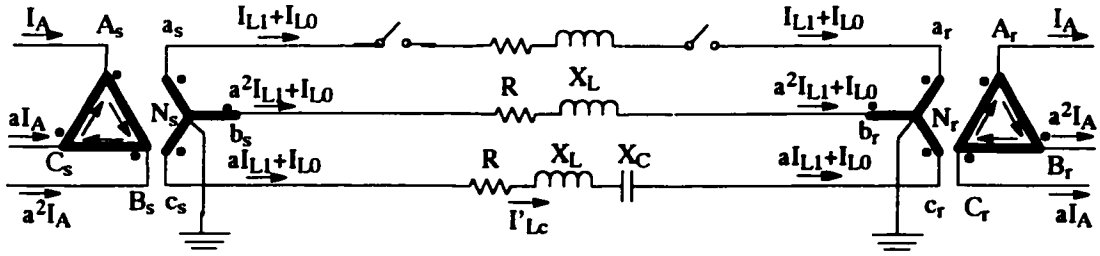


Figure 5.9 Filtrage de la séquence homopolaire par les transformateurs d'alimentation

Toutes les configurations de transformateur avec mise à la terre peuvent être utilisées pour le filtrage de la séquence homopolaire pour autant qu'une connexion adéquate soit choisie pour chaque bout de la ligne (secondaire mis à la terre pour le transformateur à la source et primaire mis à la terre pour le transformateur à la charge). Parmi les configurations possibles on retrouve les connexions Dz, Tt, Ydy, Dy, Yz, Yd (Olivier et Bouchard, 1997, [54]).

Ce mode de filtrage des courants de séquence homopolaire permet de supprimer les transformateurs de mise à la terre et peut résulter en une économie substantielle même si le design des transformateurs d'alimentation doit être renforcé.

V.2.4 Exemple : exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV

Une ligne triphasée de 120 kV, 100 km avec les paramètres r = 0.061 Ω/km, x_L = 0.3644 Ω/km, $b_L = 4.54 \times 10^{-6}$ S/km est considérée. La puissance totale transmise à travers la ligne est 50 MW et le facteur de puissance de la charge est 0.95. La tension ligne-ligne à la source est de 120 kV∠30°. La Figure 5.10 et le Tableau 5.2 montrent les résultats de calculs, illustrant la puissance réactive nécessaire pour l'exploitation asymétrique avec la phase a ouverte.

La compensation de la séquence directe requiert trois condensateurs de 2 Mvar chacun soit un total de 6 Mvar. La compensation de la séquence inverse exige au total 67 Mvar pour les deux compensateurs aux bouts de la ligne. Quant au filtrage de la séquence homopolaire, il faut 17 Mvar.

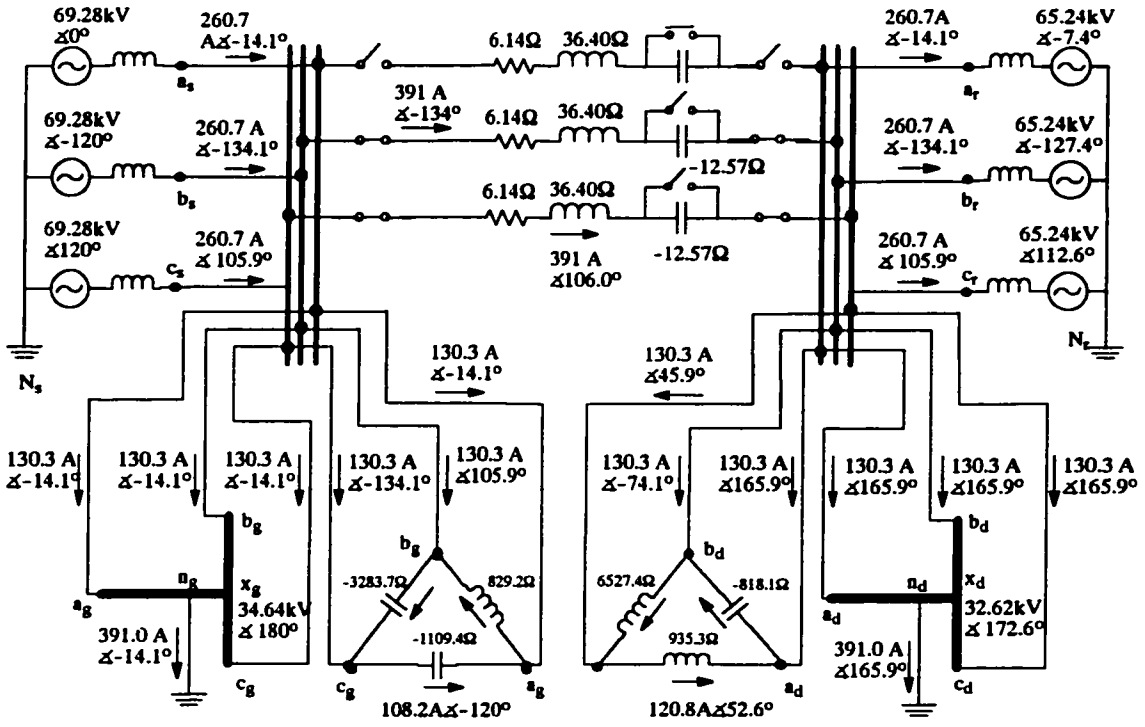


Figure 5.10 Exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs classiques

Tableau 5.2: Résultats de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs classiques

Caractéristiques de ligne			Côté source	Côté charge 50MW, 16.4Mvar
$R_L = 6.14\Omega$ $X_L = 36.4\ \Omega$ $B_c = 4.54\times10^{-4}$ S $X_c = 12.57\ \Omega$ (3× 2 Mvar)	Tensions du système	E_{ab} (kV)	120.00 ∠30°	113.0 ∠ 22.6°
	Courants de ligne avant l'exploitation asymétrique	I_{La} (kA)	0.2607∠-18.9°	0.2607∠-18.92°
	Courants de la ligne durant l'exploitation asymétrique	I'_{Lb} (kA)	0.391∠-134°	0.391 ∠-134.0°
		I'_{Lc} (kA)	0.391 ∠106.0°	0.391 ∠ 106.0°
Compensateur de séquence inverse	Impédances du compensateur	X_{ab} (Ω)	829.2	-818.1
		X_{bc} (Ω)	-3283.7	6527.4
		X_{ca} (Ω)	-1109.4	935.3
	Puissance réactive du compensateur	S_{ab}(Mvar)	17.4	-15.6
		S_{bc}(Mvar)	-4.4	2.0
		S_{ca}(Mvar)	-13.0	13.7
	Total	S_T(Mvar)	35.2	31.3
Homopolaire	Puissance du transformateur	S_{Tg} (MVA)	8.4	7.9

V.2.5 Remarques

La valeur des réactances de compensation pour la séquence directe est approximativement la même quelle que soit la localisation de ces réactances. Le choix d'une localisation spécifique va donc dépendre de critère comme la contrôlabilité, la flexibilité, la fiabilité et l'accessibilité.

La compensation de la séquence inverse est effectuée par une combinaison d'éléments passifs L et C. Ces éléments passifs dépendent de la charge à travers le courant dans la ligne, et donc, leur ajustage en fonction de la charge peut être nécessaire.

Le filtrage de la séquence homopolaire se fait aux deux bouts de la ligne par des transformateurs de mise à la terre. L'ajustement des transformateurs de mise à la terre par rapport au régime de charge n'est pas nécessaire.

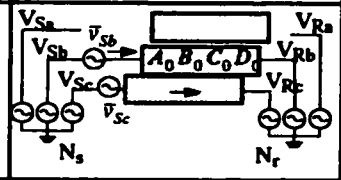
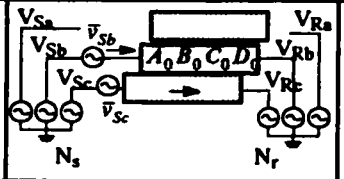
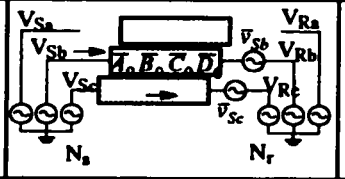
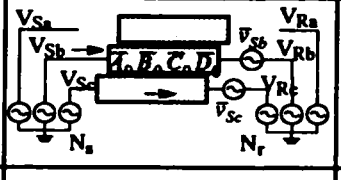
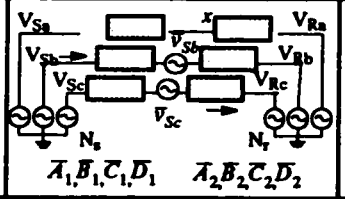
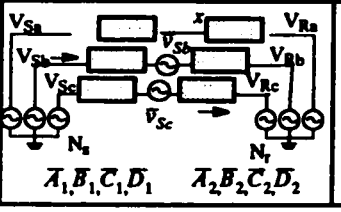
V.3 Compensation par les FACTS

Les courants des séquences directe, inverse et homopolaire peuvent être compensés ou filtrés par des sources de tensions séries et par des sources de courant shunt. Ces sources sont créées grâce aux dispositifs modernes tels que les FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

V.3.1 Compensation de la séquence directe et filtrage de la séquence homopolaire par des sources de tension séries

Les courants des séquences directe et homopolaire sont pris en compte, en même temps, par deux sources de tension séries ayant un déphasage adéquat pour annuler la séquence homopolaire et pour compenser la séquence directe. Les sources de tension séries utilisables pour rencontrer ces objectifs peuvent être localisées à l'entrée, au milieu ou à la sortie de la ligne. Pour chaque position des sources de tension série, il y a le choix de calibrer la valeur de ces sources pour conserver la puissance active et réactive à la charge ou à la source. Donc, il y a six cas à examiner, tous résumés dans le Tableau 5.3. Les sous-sections suivantes montrent quelques détails de calcul de chacun des cas examinés.

Tableau 5.3 Récapitulatif des cas de compensation par des sources de tension séries pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne: élimination de la séquence homopolaire et compensation de la séquence directe.

Cas	Figure	Valeur des sources
1		$\bar{v}_{Sb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{Sc} = \frac{1-a}{a^2-a}(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra})$
2		$\bar{v}_{Sb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{Sc} = \frac{1-a}{a^2-a}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra})$
3		$\bar{v}_{Rb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{Rc} = \frac{1-a}{a^2-a}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$
4		$\bar{v}_{Sb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{Sc} = \frac{1-a}{a^2-a}(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$
5		$\bar{v}_{xb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}\frac{1}{\bar{D}_2}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°\frac{1}{\bar{D}_2}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{xb} = \frac{1-a}{a^2-a}\frac{1}{\bar{D}_2}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°\frac{1}{\bar{D}_2}(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra})$
6		$\bar{v}_{xb} = \frac{a^2-1}{a^2-a}\frac{1}{\bar{A}_1}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}) = 1\angle -60°\frac{1}{\bar{A}_1}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra})$ $\bar{v}_{xc} = \frac{1-a}{a^2-a}\frac{1}{\bar{A}_1}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}) = 1\angle 60°\frac{1}{\bar{A}_1}(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra})$

V.3.1.1 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne

La Figure 5.11 illustre la compensation des séquences directe et inverse pour le cas de l'exploitation asymétrique d'une ligne avec des sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne.

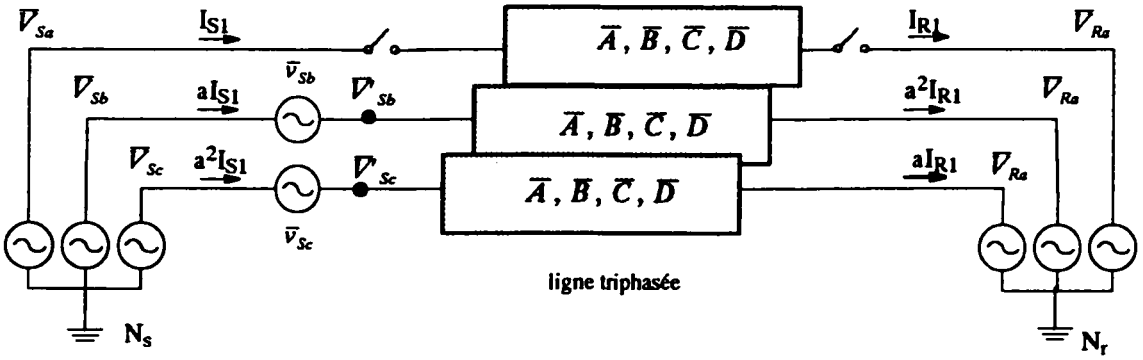


Figure 5.11 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne

Les conditions précontingence sont données toujours par les équations (126), (127) et (128).

Les tensions à l'entrée de la ligne pendant l'exploitation asymétrique avec les sources séries deviennent pour chaque phase saine i (b ou c):

$$\overline{V}'_{Si} = \overline{V}_{Si} - \overline{v}_{Si} \tag{185}$$

et les courants dans chaque phase i (b ou c) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} \overline{I}'_{Si} \\ \overline{I}'_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0} & -\dfrac{1}{\overline{B}_0} \\ \dfrac{1}{\overline{B}_0} & -\dfrac{\overline{A}_0}{\overline{B}_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}'_{Si} \\ \overline{V}_{Ri} \end{bmatrix} \tag{186}$$

Le courant de séquence directe entrant dans la ligne du coté de la source est donc :

$$\overline{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\overline{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\overline{I}'_{Sc} = \frac{2}{3}\left(\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Sa} - \frac{1}{\overline{B}_0}\overline{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\left(a\overline{v}_{Sb} + a^2\overline{v}_{Sc}\right) \tag{187}$$

et le courant de séquence directe sortant de la ligne du côté de la charge est :

$$\bar{I}'_{R1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{\overline{A}_0}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc}\right) \quad (188)$$

Comme pour les condensateurs séries, les sources de tension peuvent être mises en oeuvre pour remplir un certain nombre de critères donnés. On peut par exemple vouloir conserver la puissance apparente à l'entrée ou à la sortie de la ligne. On peut aussi, par delà la conservation de la puissance à un point donné, choisir les sources séries pour annuler en même temps la séquence homopolaire à un endroit précis. Bien que la séquence homopolaire puisse être traitée séparément, le fait qu'elle puisse être éliminée en même temps que la compensation de la séquence directe est adressé dans cette section. Les courants de séquence homopolaires à l'entrée de la ligne ($\bar{I}'_{S0}$) et à la sortie ($\bar{I}'_{R0}$) sont respectivement :

$$\bar{I}'_{S0} = \frac{1}{3}\bar{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}\bar{I}'_{Sc} = \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\left(\bar{v}_{Sb} + \bar{v}_{Sc}\right) \quad (189)$$

$$\bar{I}'_{R0} = \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rc} = \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(-\bar{V}_{Sa} + \overline{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(\bar{v}_{Sb} + \bar{v}_{Sc}\right) \quad (190)$$

La conservation de la puissance apparente est réalisée si l'égalité des courants de séquences directe avant et après contingence est réalisée :

$$\bar{I}'_{S1} = \bar{I}_{S1} \quad (191)$$

Ceci conduit, compte tenu de (127) et (187), à :

$$\frac{2}{3}\left(\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{1}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\left(a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc}\right) = \frac{\overline{D}_0}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{1}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Ra} \quad (192)$$

et finalement à la relation suivante entre les tensions des deux sources.

$$a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc} = -\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\overline{D}_0}\bar{V}_{Ra} \quad (193)$$

A ce stade-ci, il y a plusieurs choix possibles pour les tensions $\bar{v}_{Sb}$ et $\bar{v}_{Sc}$. Pour annuler les courants de séquence homopolaire à l'entrée de la ligne il faut d'après l'équation (189) :

$$\bar{v}_{Sb} + \bar{v}_{Sc} = -\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra} \tag{194}$$

Donc, pour compenser la séquence directe à l'entrée de la ligne et éliminer la séquence homopolaire à l'entrée de la ligne il faut que $\bar{v}_{Sb}$ et $\bar{v}_{Sc}$ respectent les équations (193) et (194), soit :

$$\begin{aligned} \bar{v}_{Sb} &= \frac{a^2 - 1}{a^2 - a}\left(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\left(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}\right) \\ \bar{v}_{Sc} &= \frac{1 - a}{a^2 - a}\left(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\left(-\bar{V}_{Sa} + \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_{Ra}\right) \end{aligned} \tag{195}$$

V.3.1.2 Sources de tension séries placées à l'entrée de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne

Pour conserver la puissance apparente à la sortie de la ligne il faut :

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \tag{196}$$

Si l'on tient compte de (128) et de (188) on obtient :

$$\frac{2}{3}\left(\frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{1}{\bar{B}_0}\left(a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc}\right) = \frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ra} \tag{197}$$

et finalement les conditions suivantes :

$$a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc} = -\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra} \tag{198}$$

Pour annuler les courants de séquence homopolaire à la sortie de la ligne il faut selon l'équation (190) :

$$\bar{v}_{Sb} + \bar{v}_{Sc} = -\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra} \tag{199}$$

et pour conserver le courant de séquence directe toujours à l'entrée de la ligne et éliminer en même temps la séquence homopolaire cette fois à la sortie de la ligne, il faut résoudre simultanément les équations (193) et (199) pour $\bar{v}_{Sb}$ et $\bar{v}_{Sc}$:

$$\bar{v}_{Sb} = \frac{a^2 - 1}{a^2 - a}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right)$$
$$\bar{v}_{Sc} = \frac{1 - a}{a^2 - a}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) \quad (200)$$

V3.1.3 Sources de tension placées à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne

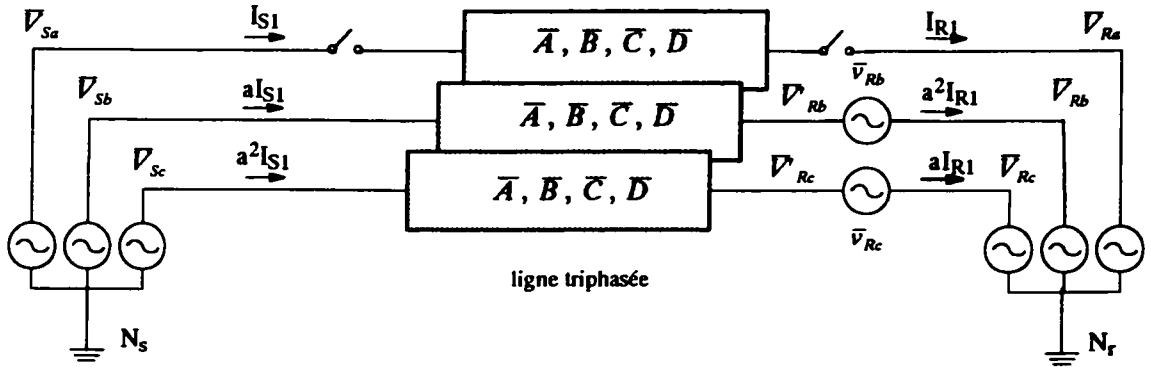


Figure 5.12 Sources de tension séries placées à la sortie de la ligne

Les tensions à la sortie de la ligne pendant l'exploitation asymétrique avec les sources de tension séries telle que illustrée à la Figure 5.12 deviennent :

$$\bar{V}'_{Rb} = \bar{V}_{Rb} + \bar{v}_{Rb}$$
$$\bar{V}'_{Rc} = \bar{V}_{Rc} + \bar{v}_{Rc} \quad (201)$$

et les courants dans chaque phase i (b ou c) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}'_{Si} \\ \bar{I}'_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0} & -\frac{1}{\bar{B}_0} \\ \frac{1}{\bar{B}_0} & -\frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{Si} \\ \bar{V}'_{Ri} \end{bmatrix} \quad (202)$$

Le courant de séquence directe entrant dans la ligne du coté de la source est donc :

$$\bar{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Sc} = \frac{2}{3}\left(\frac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{1}{\bar{B}_0}\left(a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc}\right) \quad (203)$$

et le courant de séquence directe sortant de la ligne du coté de la charge est :

$$\bar{I}'_{R1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{\overline{A}_0}{\overline{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\overline{A}_0}{\overline{B}_0}\left(a\bar{v}_{Sb} + a^2\bar{v}_{Sc}\right) \quad (204)$$

Les courants de séquence homopolaires à l'entrée de la ligne ($\bar{I}'_{S0}$) et à la sortie ($\bar{I}'_{R0}$) sont respectivement :

$$\bar{I}'_{S0} = \frac{1}{3}\left(\bar{I}'_{Sb} + \bar{I}'_{Sc}\right) = \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(\bar{v}_{Rb} + \bar{v}_{Rc}\right) \quad (205)$$

$$\bar{I}'_{R0} = \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rc} = \frac{1}{3}\frac{1}{\overline{B}_0}\left(-\bar{V}_{Sa} + \overline{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\overline{A}_0}{\overline{B}_0}\left(\bar{v}_{Rb} + \bar{v}_{Rc}\right) \quad (206)$$

De l'égalité des courants de séquence directe avant et après contingence à l'entrée de la ligne tels que donnés par (127) et (203) on obtient une première condition sur les tensions $\bar{v}_{Rb}$ et $\bar{v}_{Rc}$ recherchées :

$$a\bar{v}_{Rb} + a^2\bar{v}_{Rc} = -\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra} \quad (207)$$

et de l'annulation du courant de séquence homopolaire à l'entrée de la ligne tel que donné par l'équation (205) on obtient une deuxième condition qui est :

$$\bar{v}_{Rb} + \bar{v}_{Rc} = -\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra} \quad (208)$$

Des équations (207) et (208) on obtient $\bar{v}_{Rb}$ et $\bar{v}_{Rc}$:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{Rb} &= \frac{a^2 - 1}{a^2 - a}\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right)\\ \bar{v}_{Rc} &= \frac{1 - a}{a^2 - a}\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\left(-\overline{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right)\end{aligned} \quad (209)$$

V.3.1.4 Sources de tension placées à la sortie de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne

Comme pour le cas précédent, on obtient une première condition sur les tensions $\bar{v}_{Rb}$ et $\bar{v}_{Rc}$ de l'égalité des courants de séquence directe avant et après contingence du côté de la charge (équations (128) et (204)); soit :

$$a\bar{v}_{Rb} + a^2\bar{v}_{Rc} = -\frac{1}{\overline{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra} \quad (210)$$

Une deuxième condition résulte de l'annulation de la séquence homopolaire à la sortie de la ligne (équation (206)) :

$$\bar{v}_{Rc} + \bar{v}_{Rc} = -\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra} \tag{211}$$

Finalement, les tensions $\bar{v}_{Rb}$ et $\bar{v}_{Rc}$ sont obtenues par solution de (210) et (211) :

$$\begin{aligned}
\bar{v}_{Sb} &= \frac{a^2 - 1}{a^2 - a}\left(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\left(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) \\
\bar{v}_{Sc} &= \frac{1 - a}{a^2 - a}\left(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\left(-\frac{1}{\bar{A}_0}\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right)
\end{aligned} \tag{212}$$

V.3.1.5 Sources de tension placées au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à l'entrée de la ligne

La Figure 5.13 illustre l'exploitation asymétrique d'une ligne avec des sources de tension séries en milieu de ligne pour la compensation de la séquence directe. Les courants et tension des deux moitiés de ligne sont données respectivement par les équations (213) et (214) pour chaque phase saine i (i = b ou c).

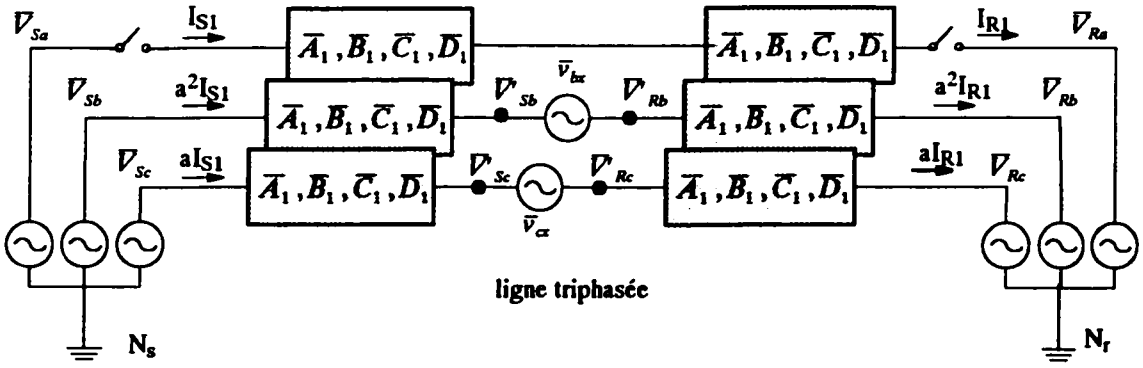


Figure 5.13 Sources de tension séries placées au milieu de ligne

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{Si} \\ \bar{I}'_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{B}_1 \\ \bar{C}_1 & \bar{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}'_{Si} \\ \bar{I}_{xi} \end{bmatrix} \tag{213}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}'_{Ri} \\ \bar{I}_{xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_2 & \bar{B}_2 \\ \bar{C}_2 & \bar{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{Ri} \\ \bar{I}'_{Ri} \end{bmatrix} \tag{214}$$

Les tensions au milieu de la ligne sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{V}'_{Sb} &= \bar{V}'_{Rb} + \bar{v}_{xb} \\ \bar{V}'_{Sc} &= \bar{V}'_{Rc} + \bar{v}_{xc} \end{aligned} \tag{215}$$

et les courants dans chaque phase saine i (i = b ou c) sont obtenus en combinant les équations (213), (214) et (215) et en tenant compte de l'équation (66) :

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{Si} &= \frac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Si} - \frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ri} - \frac{\bar{D}_2}{\bar{B}_0}\bar{v}_{xi} \\ \bar{I}'_{Ri} &= \frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Si} - \frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ri} - \frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_0}\bar{v}_{xi} \end{aligned} \tag{216}$$

Le courant de séquence directe entrant dans la ligne du côté de la source est donc :

$$\bar{I}'_{S1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Sc} = \frac{2}{3}\left(\frac{\bar{D}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\bar{D}_2}{\bar{B}_0}\left(a\bar{v}_{xb} + a^2\bar{v}_{xc}\right) \tag{217}$$

et le courant de séquence directe sortant de la ligne du côté de la charge est :

$$\bar{I}'_{R1} = \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Rc} = \frac{2}{3}\left(\frac{1}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Sa} - \frac{\bar{A}_0}{\bar{B}_0}\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_0}\left(a\bar{v}_{xb} + a^2\bar{v}_{xc}\right) \tag{218}$$

Les courants de séquence homopolaires à l'entrée de la ligne ($\bar{I}'_{S0}$) et à la sortie ($\bar{I}'_{R0}$) sont respectivement :

$$\bar{I}'_{S0} = \frac{1}{3}\left(\bar{I}'_{Sb} + \bar{I}'_{Sc}\right) = \frac{1}{3}\frac{1}{\bar{B}_0}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\bar{D}_2}{\bar{B}_0}\left(\bar{v}_{xb} + \bar{v}_{xc}\right) \tag{219}$$

$$\bar{I}'_{R0} = \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}\bar{I}'_{Rc} = \frac{1}{3}\frac{1}{\bar{B}_0}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) - \frac{1}{3}\frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_0}\left(\bar{v}_{xb} + \bar{v}_{xc}\right) \tag{220}$$

Pour conserver la puissance apparente à l'entrée de la ligne il faut réaliser l'égalité des courants de séquence directe avant et après contingence du côté de la source :

$$\bar{I}'_{S1} = \bar{I}_{S1} \tag{221}$$

ce qui donne, compte tenu de (127) et (217) et après développement :

$$a\bar{v}_{xb} + a^2\bar{v}_{xc} = \frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) \tag{222}$$

Pour annuler la séquence homopolaire du côté de la source il faut d'après l'équation (219) que :

$$\bar{v}_{xb} + \bar{v}_{xc} = \frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) \tag{223}$$

Des équations (222) et (223) on obtient $\bar{v}_{xb}$ et $\bar{v}_{xc}$:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{xb} &= \frac{a^2-1}{a^2-a}\frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right)\\ \bar{v}_{xb} &= \frac{1-a}{a^2-a}\frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\frac{1}{\bar{D}_2}\left(-\bar{D}_0\bar{V}_{Sa} + \bar{V}_{Ra}\right)\end{aligned} \tag{224}$$

V.3.1.6 Sources de tension placées au milieu de la ligne et conservation de la puissance apparente à la sortie de la ligne

En procédant comme précédemment, c'est à dire en égalisant les courants de séquence directe avant et après contingence du côté de la charge (équations (128) et (218)) on obtient après développement :

$$a\bar{v}_{xb} + a^2\bar{v}_{xc} = \frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) \tag{225}$$

et en annulant le courant de séquence homopolaire (équation (220)) on :

$$\bar{v}_{xb} + \bar{v}_{xc} = \frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) \tag{226}$$

La résolution simultanée des équations (225) et (226) donne pour $\bar{v}_{xb}$ et $\bar{v}_{xc}$:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{xb} &= \frac{a^2-1}{a^2-a}\frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle -60^o\frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right)\\ \bar{v}_{xc} &= \frac{1-a}{a^2-a}\frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right) = 1\angle 60^o\frac{1}{\bar{A}_1}\left(-\bar{V}_{Sa} + \bar{A}_0\bar{V}_{Ra}\right)\end{aligned} \tag{227}$$

V.3.2 Filtrage de la séquence inverse par convertisseur de courant

Les courants de séquence inverse sont compensés par des sources de courant shunts obtenues grâce aux convertisseurs de courant (Figure 5.14). Parmi les convertisseurs utilisables, il y a le UPFC et le STATCON. Grâce à ces convertisseurs on peut créer des

sources de courant contrôlables et injecter un courant opposé au courant de séquence inverse à chaque bout de la ligne afin de l'annuler.

A partir des courants de ligne donnés par les équations (186), (202), ou (216) selon que les sources de tension séries sont localisées à l'entrée, à la sortie ou au milieu de la ligne et après l'évaluation de ces sources de tensions séries, les courants de séquence inverse dans la ligne sont évalués par :

$$\bar{I}'_{S2} = \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Sb} + \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Sc}$$
$$\bar{I}'_{R2} = \frac{1}{3}a^2\bar{I}'_{Rb} + \frac{1}{3}a\bar{I}'_{Rc} \qquad (228)$$

où $\bar{I}'_{s2}$ et $\bar{I}'_{R2}$ sont les courants de séquence inverse de la phase a à l'entrée et à la sortie de la ligne respectivement, obtenus des équations (186), (202) ou (216) selon le cas.

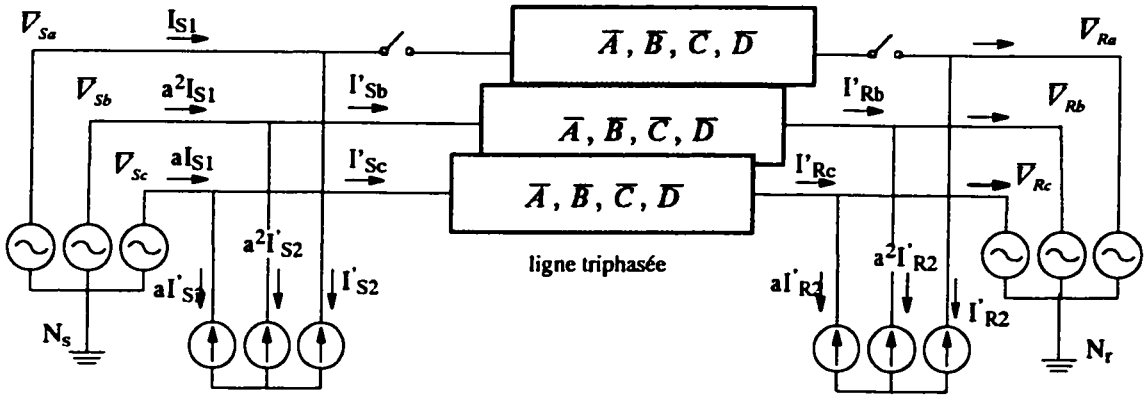


Figure 5.14 Sources de courant shunts placées à chaque bout de ligne pour la compensation de la séquence inverse

V.3.3 Exemple

Une ligne triphasée de 120 kV, 100 km avec les paramètres r = 0.061 Ω/km, x_L = 0.3644 Ω/km, $b_L = 4.54 \times 10^{-6}$ S/km est considérée. La puissance totale transmise à travers la ligne est 50 MW et le facteur de puissance de la charge est 0.95. La tension ligne-ligne à la source est de 120 kV$\angle 30^o$. Dans le présent exemple on considère que la séquence directe et la séquence homopolaire sont pris en compte par des sources de tensions séries placées à l'entrée de la ligne et que les courants de séquence inverse sont

compensés par des sources de courant shunts à chaque bout de la ligne. La Figure 5.15 et le Tableau 5.4 montrent les résultats obtenus.

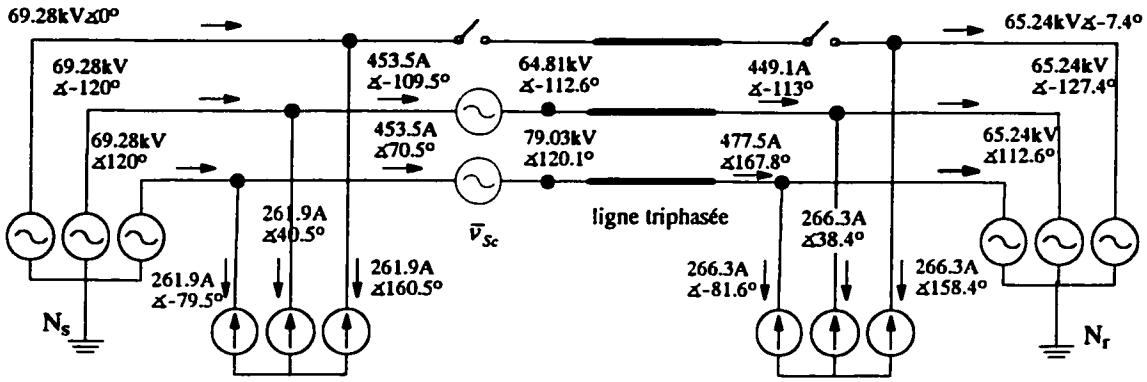


Figure 5.15 Sources de courant shunts placée à chaque bout de ligne pour la compensation de la séquence inverse

Tableau 5.4: Résultats de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs moderne

			Côté source	Côté charge 50MW, 16.4Mvar
Caractéristiques de ligne $R_L = 6.14\Omega$ $X_L = 36.4\ \Omega$ $B_c = 4.54\times10^{-4}$ S	Tensions du système	E_{ab} (kV)	120.00 ∠30°	113.0 ∠ 22.6°
	Courants dans la ligne avant l'exploitation asymétrique	I_{La} (kA)	0.2619∠-19.5°	0.2663∠-18.92°
	Courants dans la ligne durant l'exploitation asymétrique	I'_{Lb} (kA)	0.4535∠-109.5 o	0.4491∠-113.0°
		I'_{Lc} (kA)	0.453.5 ∠70.5°	0.4775∠ 167.8°
Compensateur de séquence inverse	courant de ligne	I'_2 (A)	261.9	266.3
	tension de ligne	V(kV)	120.0	113.0
	Puissance réactive du compensateur	S_2(Mvar)	54.43	52.12
séquences directe et homopolaire	Tension des sources de compensation v_b et v_c	v_{sb}(kV)	9.74 ∠-179°	
		v_{sc}(kV)	9.74 ∠-59°	
	puissance des sources de compensation v_b et v_c	S_{Vb} (MVA)	4.42	
		S_{Vc} (MVA)	4.42	
		S_{Tot}(MVA)	8.84	

La compensation de la séquence directe et de la séquence homopolaire par les sources de tensions placées du côté source requière 8.64 MVA au total. La séquence

homopolaire du coté charge est négligeable. La compensation de la séquence inverse exige au total 54.43 MVA et 52.12 MVA pour les deux compensateurs aux bouts de la ligne soit au total 106.55 MVA, ce qui représente une puissance considérable.

V.3.4 Remarques

La localisation des sources de tension séries pour la compensation de la séquence directe peut se faire arbitrairement à n'importe quel endroit de la ligne. La valeur de ces sources de tensions séries peut être ajustée pour éliminer en même temps la séquence homopolaire.

La compensation de la séquence inverse nécessite la mise en oeuvre de convertisseurs modernes à chaque bout de la ligne. Ceci requiert une puissance considérable lorsque la séquence homopolaire est éliminée parallèlement à la compensation de la séquence directe par des sources de tensions séries.

V.4 Filtrage jumelé et versatile des courants de séquence inverse et homopolaire

Le filtrage de la séquence homopolaire et de la séquence inverse par des éléments passifs ou par des convertisseurs de courant peut se faire simultanément par un même dispositif. C'est le filtre de courant de séquence versatile. Le principe du filtre de séquence versatile vient de ce que le courant de chaque phase résulte de la somme des courants de séquence directe, inverse et homopolaire. Par exemple pour la phase a on a :

$$\bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \qquad (229)$$

où $\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$ et $\bar{I}_0$ sont respectivement, les composantes des séquences directe, inverse et homopolaire du courant $\bar{I}_a$ de la phase a.

Donc, un dispositif pour éliminer les courants de séquence inverse et homopolaire simultanément durant l'exploitation asymétrique doit injecter dans les phases a, b et c les courants de compensation suivants à l'entrée de la ligne :

$$\begin{aligned}
\bar{I}_{Sa}^{(c)} &= -(\bar{I}'_{S2} + \bar{I}'_{S0}) \\
\bar{I}_{Sb}^{(c)} &= -(a\bar{I}'_{S2} + \bar{I}'_{S0}) \\
\bar{I}_{Sc}^{(c)} &= -(a^2\bar{I}'_{S2} + \bar{I}'_{S0})
\end{aligned} \tag{230}$$

où $\bar{I}'_{S2}$ et $\bar{I}'_{S0}$ sont respectivement, les composantes des séquences inverse et homopolaire du courant de ligne côté source, obtenus de l'équation (228) et de l'une des équations (186), (202) ou (216) selon le cas.

Pour le côté charge de la ligne il faut injecter les courants suivants :

$$\begin{aligned}
\bar{I}_{Ra}^{(c)} &= \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} \\
\bar{I}_{Rb}^{(c)} &= a\bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} \\
\bar{I}_{Rc}^{(c)} &= a^2\bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0}
\end{aligned} \tag{231}$$

où $\bar{I}'_{R2}$ et $\bar{I}'_{R0}$ sont respectivement, les composantes des séquences inverse et homopolaire du courant de ligne côté charge, obtenus également de l'équation (228) et de l'une des équations (186), (202) ou (216) selon le cas considéré.

Par delà l'utilisation de convertisseurs, comme ces courants de compensation ne forment pas un système symétrique à cause de la présence de la séquence homopolaire, on ne peut pas utiliser les convertisseurs triphasés avec une commande standard. Il faut un contrôle spécifique pour chaque phase. Donc, des convertisseurs monophasés seraient mieux adaptés.

Comme le filtrage de la séquence homopolaire est effectué par des convertisseurs shunt, la compensation série sert uniquement à ajuster la séquence directe du courant de ligne. Selon l'emplacement de la compensation série et la puissance à conserver, l'une des équations (193), (198), (207), (210), (222) et (225) est utilisée conjointement avec une deuxième condition sur les sources de tensions $\bar{v}_{Sb}$ et $\bar{v}_{Sc}$ ou $\bar{v}_{Rb}$ et $\bar{v}_{Rc}$ ou $\bar{v}_{xb}$ et $\bar{v}_{xc}$. Pour $\bar{v}_{Sb}$ et $\bar{v}_{Sc}$ par exemple, on peut prendre la condition suivante :

$$\bar{v}_{xc} = a^2\bar{v}_{xb} \tag{232}$$

Ainsi, si la phase a est coupée et si la compensation série est située à l'entrée de la ligne, les équations (193) et (232) donnent les tensions de compensation dans les phases b et c comme suit :

$$\begin{aligned} \overline{v}_{Sb} &= 0.5a^2(-\overline{V}_{Sa} + \frac{1}{\overline{D}_0}\overline{V}_{Ra}) \\ \overline{v}_{Sc} &= 0.5a(-\overline{V}_{Sa} + \frac{1}{\overline{D}_0}\overline{V}_{Ra}) \end{aligned} \tag{233}$$

Si l'on utilise des éléments passifs LC, il peut être nécessaire d'ajuster leur valeur selon la charge en présence.

V.5 Résumé

On peut réaliser l'exploitation asymétrique d'une ligne aussi bien par la mise en oeuvre de la compensation classique que par les compensateurs modernes.

Dans la compensation classique, la valeur des réactances de compensation pour la séquence directe est approximativement la même quelle que soit la localisation de ces réactances. Le choix d'une localisation spécifique va donc dépendre de critères comme la contrôlabilité, la flexibilité, la fiabilité et l'accessibilité. La compensation de la séquence inverse est effectuée par une combinaison d'éléments passifs L et C. Ces éléments passifs dépendent de la charge et il peut être nécessaire de les ajuster en fonction de celle-ci par un système de manoeuvre ou par des compensateurs statiques. Le filtrage de la séquence homopolaire se fait aux deux bouts de la ligne, par des transformateurs mis à la terre. L'ajustement des transformateurs de mise à la terre par rapport au régime de charge n'est pas nécessaire.

Dans la compensation avec des FACTS, la localisation des sources de tension séries pour la compensation de la séquence directe peut se faire arbitrairement à n'importe quel endroit de la ligne. La valeur de ces sources de tension séries peut être ajustée pour éliminer en même temps la séquence homopolaire. La compensation de la séquence inverse nécessite la mise en oeuvre de convertisseurs à chaque bout de la ligne.

CHAPITRE VI VALIDATIONS

Dans ce chapitre on procède à des simulations afin de vérifier et de valider la théorie développée dans les chapitres précédents. Le logiciel de base utilisé est le Power System Blockset (PSB) avec Maltab et Simulink de Mathtworks (Version 5.3.; 1998, [36]). Six exemples de simulations sont traités :

- exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne de transport d'électricité utilisant la compensation par des dispositifs conventionnels;
- exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes de transport d'électricité et compensation par des dispositifs conventionnels;
- exploitation asymétrique d'un corridor de transport avec trois lignes électriques et compensation par des dispositifs conventionnels;
- exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne de transport d'électricité en utilisant la compensation par les FACTS;
- exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes électriques et compensation par FACTS
- exploitation asymétrique d'un corridor de transport avec trois lignes électriques et compensation par FACTS

Dans les sections suivantes on décrit les différents dispositifs et l'on fournit les résultats de leurs simulations.

VI.1 EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC UNE SEULE LIGNE : UTILISATION DE DISPOSITIFS DE COMPENSATION CONVENTIONNELS

Une ligne triphasée de 120 kV, 100 km avec les paramètres r = 0.0614 Ω/km, x_L = 0.3644Ω/km, $b_L = 4.54 \times 10^{-6}$ S/km est considérée. La puissance totale transmise à la charge est 50 MW. Les tensions ligne-ligne à la source et à la réception sont de 120 kV. La Figure 6.1 montre la configuration adoptée.

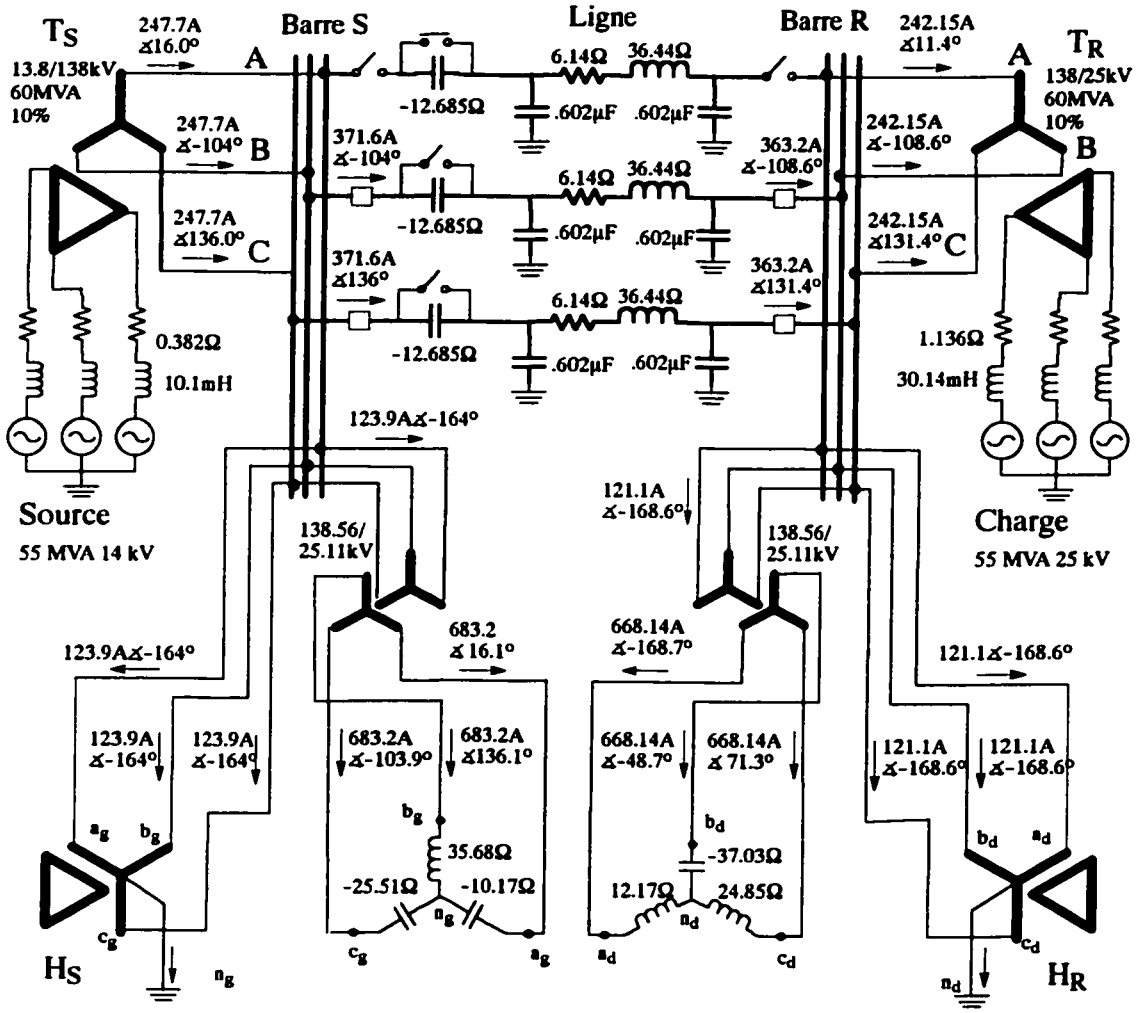


Figure 6.1 Exploitation asymétrique d'un corridor d'une seule ligne avec des dispositifs conventionnels

VI.1.1 La source

La source triphasée de 60 Hz possède une résistance interne de 10% sur une base de 55 MVA et 14 kV soit $R_s = 0.382\ \Omega$ et une inductance $L_s = 10.1$ mH sur la même base. La tension de la phase A de la source est ajustée de sorte que la tension de la phase A à la barre S soit égale à 69.4 kV avec un angle nul, ce qui donne une tension de ligne de 120 kV à 30 degrés. Le transformateur à la source (T_s) possède une puissance de 60 MVA, des tensions

de 13.8 kV/ 138 kV, et une connexion delta-étoile avec secondaire mis à la terre (DYg1). L'impédance interne du transformateur est de 10%.

VI.1.2 La charge

La charge est un équivalent triphasé à 60 Hz, représenté par une source de tension en série avec une inductance et une résistance. La puissance et la tension nominales de la source de tension sont 55 MVA et 25 kV respectivement. Elle possède une résistance interne R_c = 1.136 Ω (10%) et une inductance L_c = 30.14 mH. La tension interne de la source est ajustée afin que la tension de ligne à la barre de charge soit 120 kV. Le transformateur de la charge (T_R) est de 60 MVA, 138 kV/ 25 kV, d'impédance interne égale à 10% et de connexion étoile-delta avec primaire mis à la terre (YgD1).

VI.1.3 La ligne

La ligne triphasée de 120 kV et 100 km est représentée par un équivalent en pi, soit une résistance R_L = 6.14Ω, une inductance X_L = 36.4 Ω (96.554 mH) et deux condensateurs de 0.60214 μF par phase.

Les tensions aux bouts de la ligne sont calculées par répartition de puissance en considérant la barre de source comme barre de référence et la barre de charge comme une barre PV (50 MW et 120 kV). On trouve V_{sa} = 69.28∠ 0° kV pour la barre S et V_{ra} = 69.56∠-7.3° kV pour la barre R. La puissance à la barre R est de 50 MW et -6.51 Mvar et celle de la barre S de 50.51 MW et -10 Mvar. Les courants de ligne dans la phase a à l'entrée et à la sortie de la ligne sont I_{Sa} = 247.7∠ 11.2° A et I_{Ra} = 241,6∠ 3.9° A respectivement.

VI.1.4 Compensation série

Les condensateurs séries pour la compensation de la séquence directe sont placés à l'entrée de la ligne. Ils ont chacun une réactance x = -12.685 Ω (209.1 μF). La valeur de cette réactance est calculée selon l'équation (142) (Section V.2.1.1) qu'on reprend ici :

$$x = x_1 = \frac{B_0}{A_0}\left[- \sin(\beta - \alpha) + \sqrt{\sin^2(\beta - \alpha) - \frac{5}{9}}\right] \qquad (234)$$

Les constantes de la ligne, B_0, A_0, α et β, pour le modèle en pi découplé sont données par :

$$\begin{aligned}
\overline{A}_0 &= (1 - X_L Y_L/2) + jR_L Y_Y/2 = A_0 \angle \alpha \\
\overline{B}_0 &= R_L + jX_L = B_0 \angle \beta \\
\overline{C}_0 &= -R_L \frac{Y_L^2}{4} + j\left(-X_L Y_L^2/4 + Y_L\right) = C_0 \angle \gamma
\end{aligned} \tag{235}$$

où R_L, X_L, et Y_L sont respectivement, la résistance, l'inductance et la susceptance de la ligne.

VI.1.5 Compensateurs de séquence inverse

Les compensateurs de séquence inverse triphasés sont montés en étoile et sont calculés selon l'équation (179) (section V.2.2.1) pour le compensateur à l'entrée de la ligne et d'après l'équation (181) pour le compensateur à la sortie de la ligne. Ces équations sont reprises ici par convenance. Pour le compensateur de séquence inverse à l'entrée de la ligne on a :

$$\begin{aligned}
X_{ag} &= -2\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) \\
X_{bg} &= -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) + \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) \\
X_{cg} &= \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right) + \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Sa}}{\overline{I}'_{LS2}}\right)
\end{aligned} \tag{236}$$

où $\overline{V}_{Sa}$ est la tension entre la phase a et le neutre à l'entrée de la ligne et $\overline{I}'_{LS2}$ est le courant de séquence inverse à l'entrée de la ligne pendant l'exploitation asymétrique.

Pour le compensateur de séquence inverse à la sortie de la ligne on a :

$$\begin{aligned}
X_{ad} &= 2\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) \\
X_{bd} &= \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) \\
X_{cd} &= -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{LR2}}\right)
\end{aligned} \tag{237}$$

$\overline{V}_{Ra}$ est la tension entre la phase a et le neutre à la sortie de la ligne, $\overline{I}'_{LR2}$ est le courant de séquence inverse à la sortie de la ligne.

Tenant compte du rapport de transformation, on obtient pour le compensateur en étoile à l'entrée de la ligne x_{as} = -10.17 Ω (260.8 μF), x_{bs} = 35.68 Ω (94.64 mH) et x_{cs} = -25.507 Ω (103.99 μF); et pour le compensateur en étoile à la sortie de la ligne x_{ar} = 12.17 Ω (32.19 mH), x_{br} = -37.03 Ω (71.63 μF) et x_{cr} = 24.85 Ω (65.92 mH)

VI.1.6 RÉSULTATS DE SIMULATION

La Figure 6.2 montre le schéma général du réseau utilisé pour la simulation d'une charge de 50 MW. Les courants sont mesurés à la charge et à la source du côté haute-tension. On y a ajouté des analyseurs de séquence pour déterminer les taux des courants de séquence dans la charge et la source. On mesure aussi les tensions des barres A à l'entrée et à la sortie de la ligne, ainsi que les courants dans les phases saines B et C à l'entrée de la ligne, les courants appelés par les compensateurs de séquence inverse et les courants de neutre des filtres de séquence homopolaire. Le détail des modèles est fourni dans l'annexe F

La Figure 6.3 montre les tensions et les courants dans la ligne et dans la charge. La Figure 6.4 montre les courants des filtres de séquence directe et homopolaire. Comme le montrent la Figure 6.3 et la Figure 6.4, les courants et tensions dans le système sont parfaitement équilibrés, ce qui montre l'efficacité de la compensation. Le taux des séquences homopolaire et négative dans les courants à la source et à la charge est négligeable.

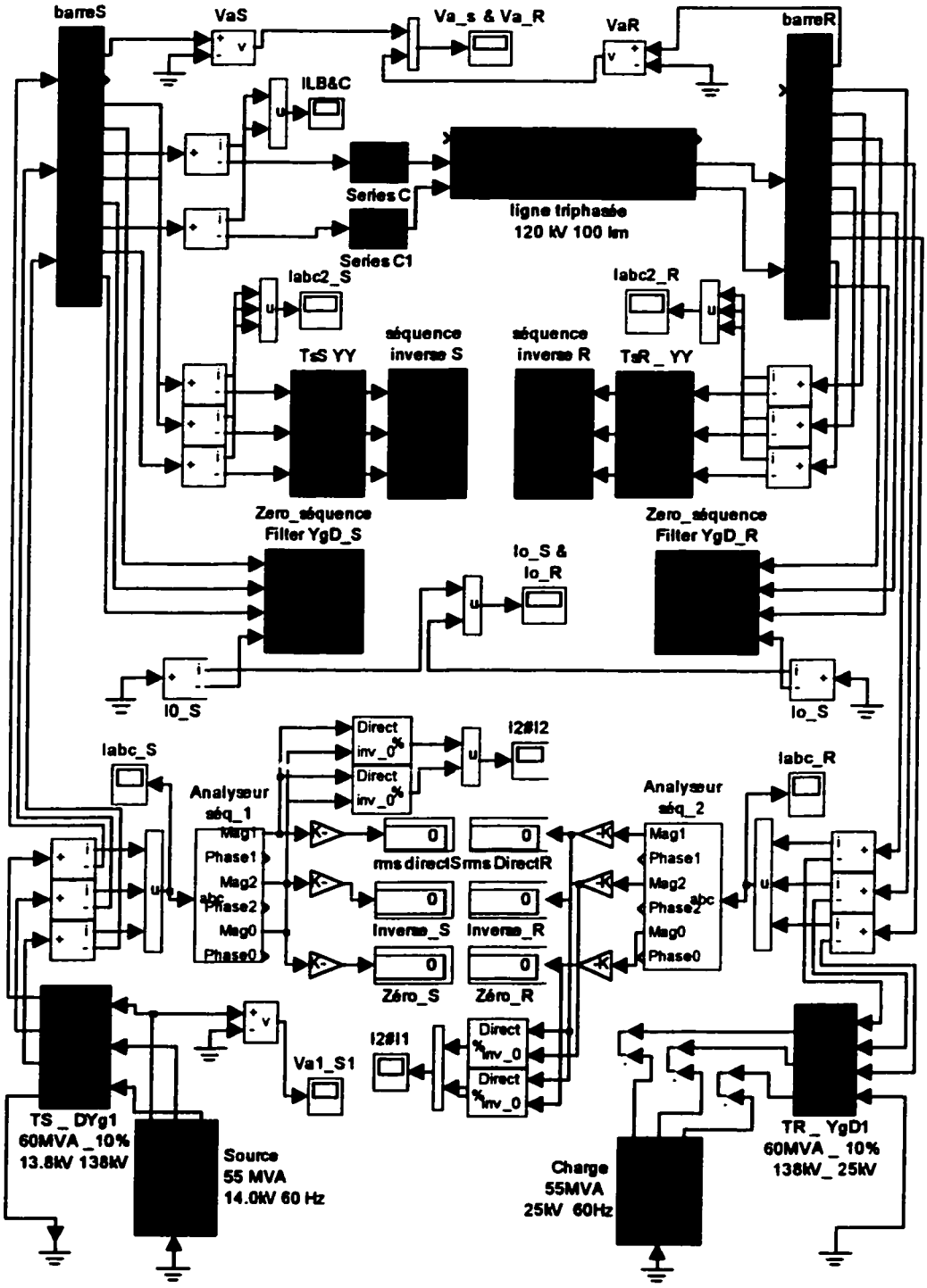


Figure 6.2 Modèle général pour simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne avec compensation conventionnelle dans Matlab-simulink-PSB

Figure 6.3a

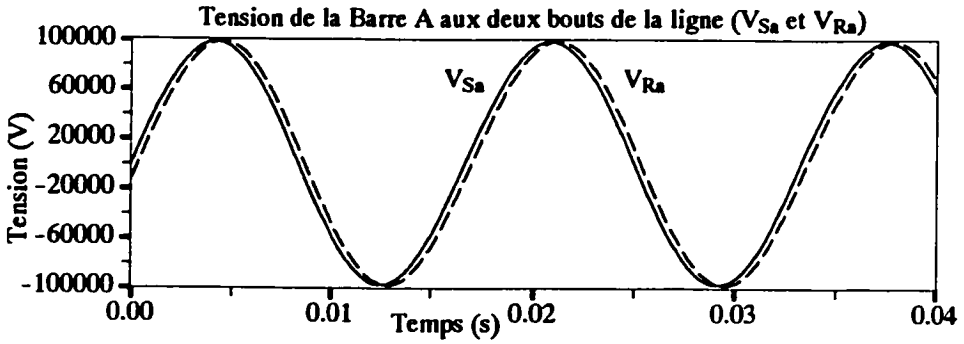


Figure 6.3b

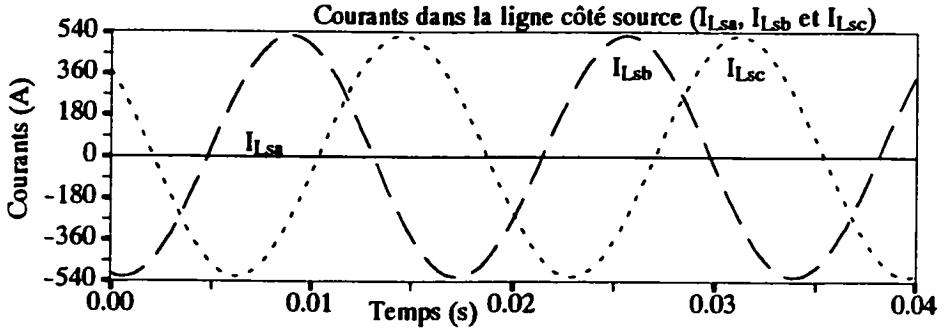


Figure 6.3c

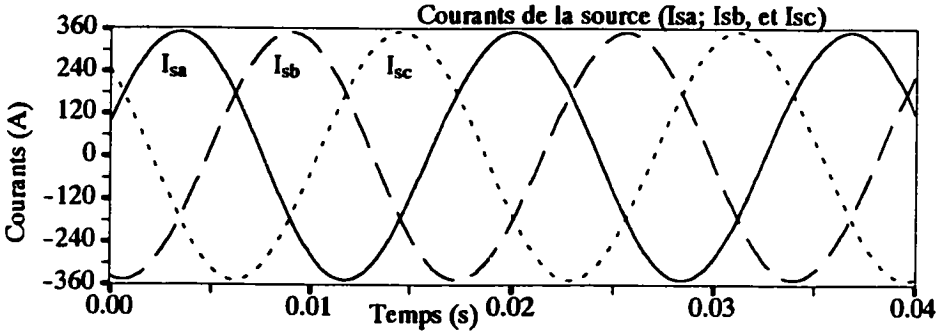


Figure 6.3d

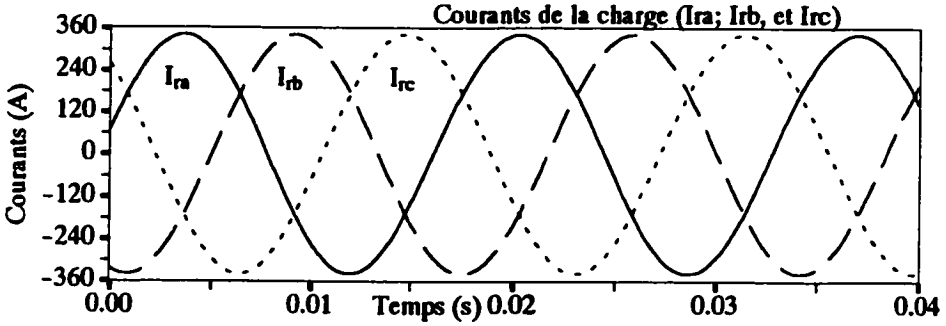


Figure 6.3 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec dispositifs conventionnels: tensions et courants de ligne, de source et de charge.

Figure 6.3f Courants dans le compensateur de séquence inverse côté source (I_{2sa}, I_{2sb} et I_{2sc})

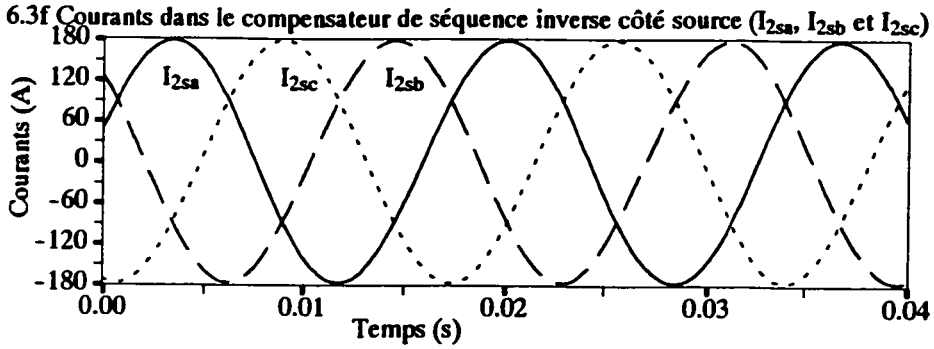


Figure 6.3g Courants dans le compensateur de séquence inverse côté charge (I_{2ra}, I_{2rb} et I_{2rc})

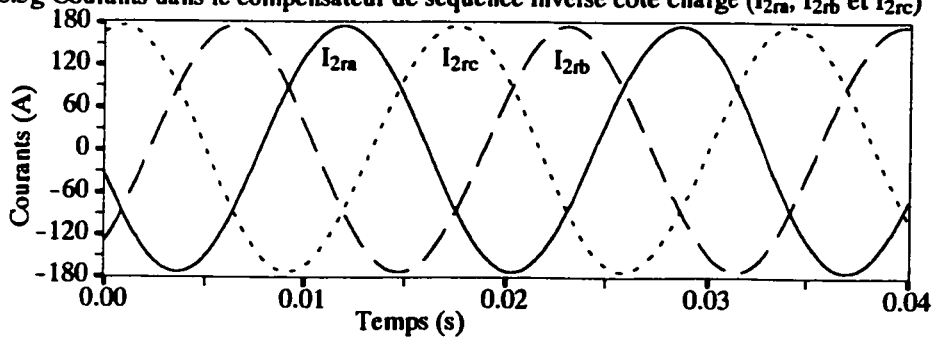


Figure 6.3h Courants de neutre dans les compensateurs de séquence homopolaire côté source et coté charge (I_{SO}, I_{RO})

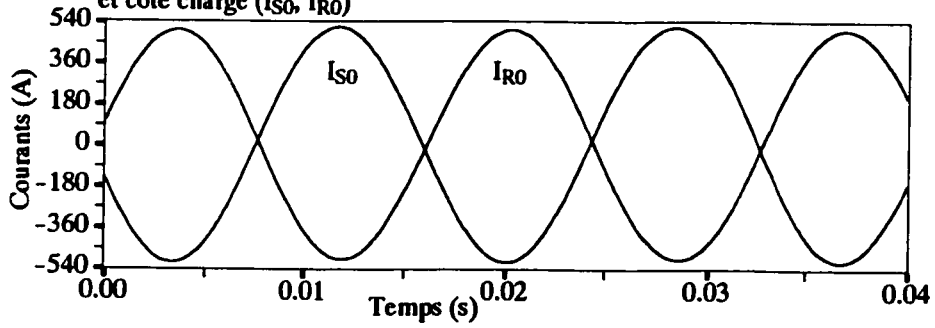


Figure 6.3e Taux des séquences homopolaire et inverse

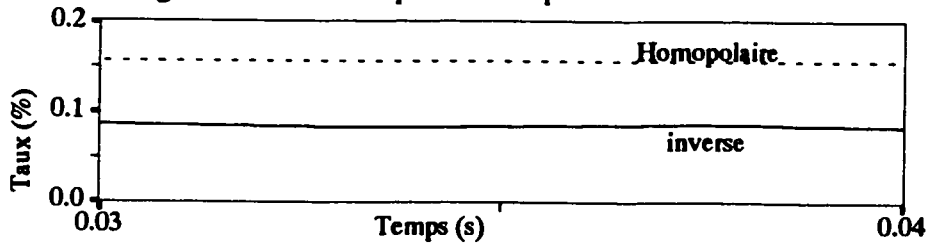


Figure 6.4 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec dispositifs conventionnels: courants des compensateurs de séquence inverse et des filtres de séquence homopolaire.

VI.1.7 Variation de la puissance

L'objectif de l'exploitation asymétrique, faut-il le rappeler, est de maintenir les tensions et l'angle de transport afin de conserver la puissance transportée dans la ligne pour une charge donnée. Lorsque la puissance de la charge varie, la valeur des éléments de compensation dans les compensateurs de séquence inverse et homopolaire qui dépendent du courant de charge doit changer en conséquence. Cependant, si l'on fixe la valeur des éléments de compensation et que la charge varie, alors le taux des courants de séquence inverse dans la charge et dans la source varierait. Donc, pour une configuration donnée des compensateurs de courants de séquence, le déséquilibre, mesuré par le taux des courants de séquence inverse et homopolaire par rapport au courant de séquence directe, sera d'autant plus élevé que la puissance transitée s'écarte de la puissance pour laquelle le filtre est conçu. On est intéressé de savoir pour une compensation donnée, l'écart maximal de puissance admissible sans altérer la qualité des courants à la charge et à la source. Pour cela, on estime qu'un taux maximal de courant de séquence homopolaire ou inverse de 6% par rapport au courant de séquence directe est admissible. On reprend le modèle de la Figure 6.2 avec les mêmes données que dans la section précédente. Les filtres de séquence qui sont conçus pour la puissance caractéristique ne sont pas modifiés. La charge et la source sont modifiées pour refléter la variation de la puissance.

La Figure 6.5 montre les courants de source et les courants de séquence directe et homopolaire dans les filtres pour une charge de 30 MW. La charge est donc réduite de 40%. On observe de légères distorsions des courants à la source, des courants dans les compensateurs de séquence inverse et dans les filtres de séquence homopolaire. Le taux du courant de séquence inverse par rapport au courant de séquence directe est inférieur à 6%, ce qui demeure acceptable.

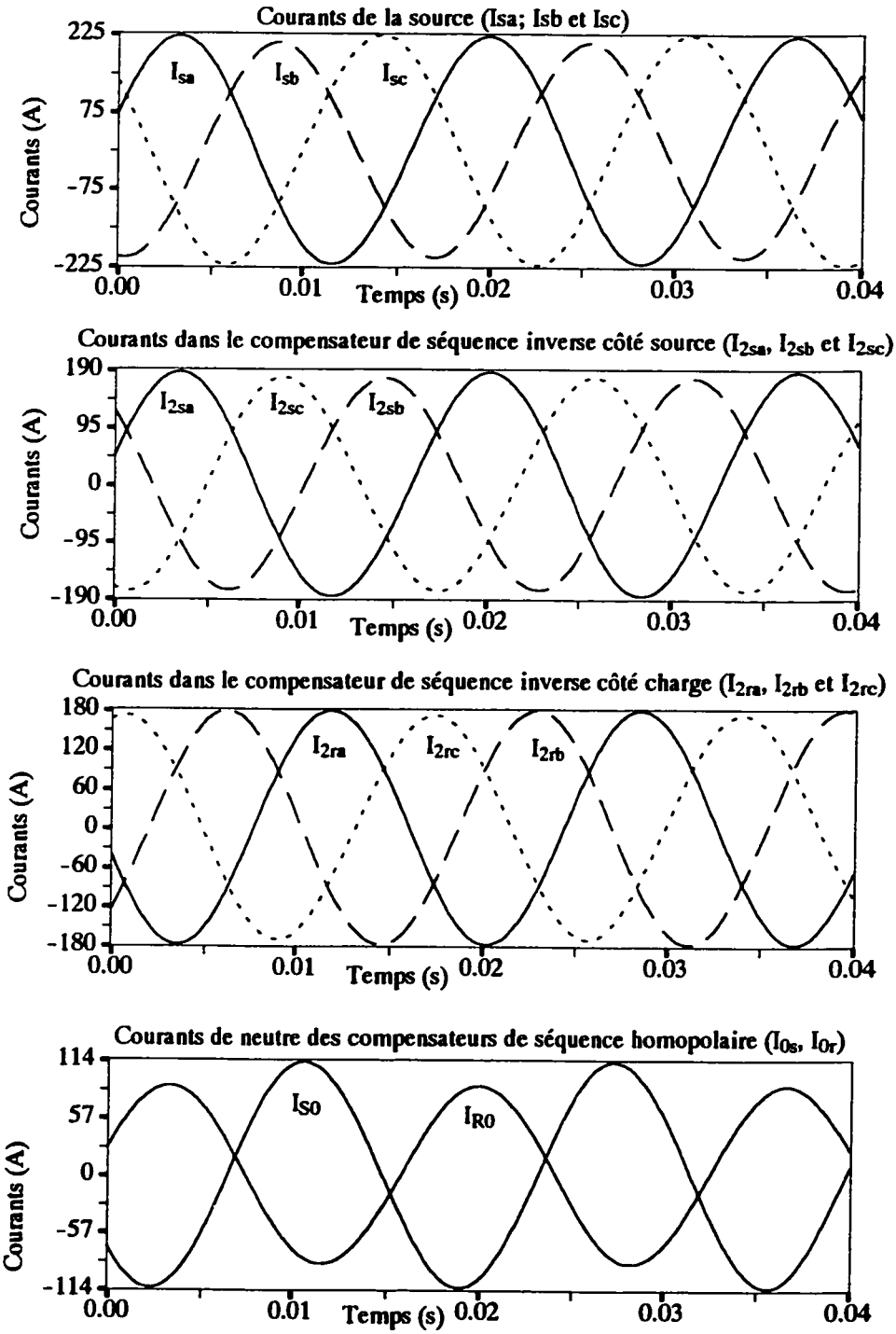


Figure 6.5 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV transportant 30 MW avec dispositifs conventionnels: courants des compensateurs de séquence inverse et filtre de séquence homopolaire

VI.2 EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC DEUX LIGNES : UTILISATION DE DISPOSITIFS DE COMPENSATION CONVENTIONNELS

La Figure 6.6 illustre la compensation en vu de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes 400 kV transportant une puissance totale de 1400 MW. Cette configuration correspond au cas étudié dans la section IV.2.1.3 avec la compensation série à l'entrée de la ligne. La phase a de la ligne 1 est ouverte. Le condensateur série à l'entrée de la ligne et le condensateur shunt à la sortie de la ligne dans la phase A du corridor sont activés afin de compenser l'ouverture de la phase a de la première ligne.

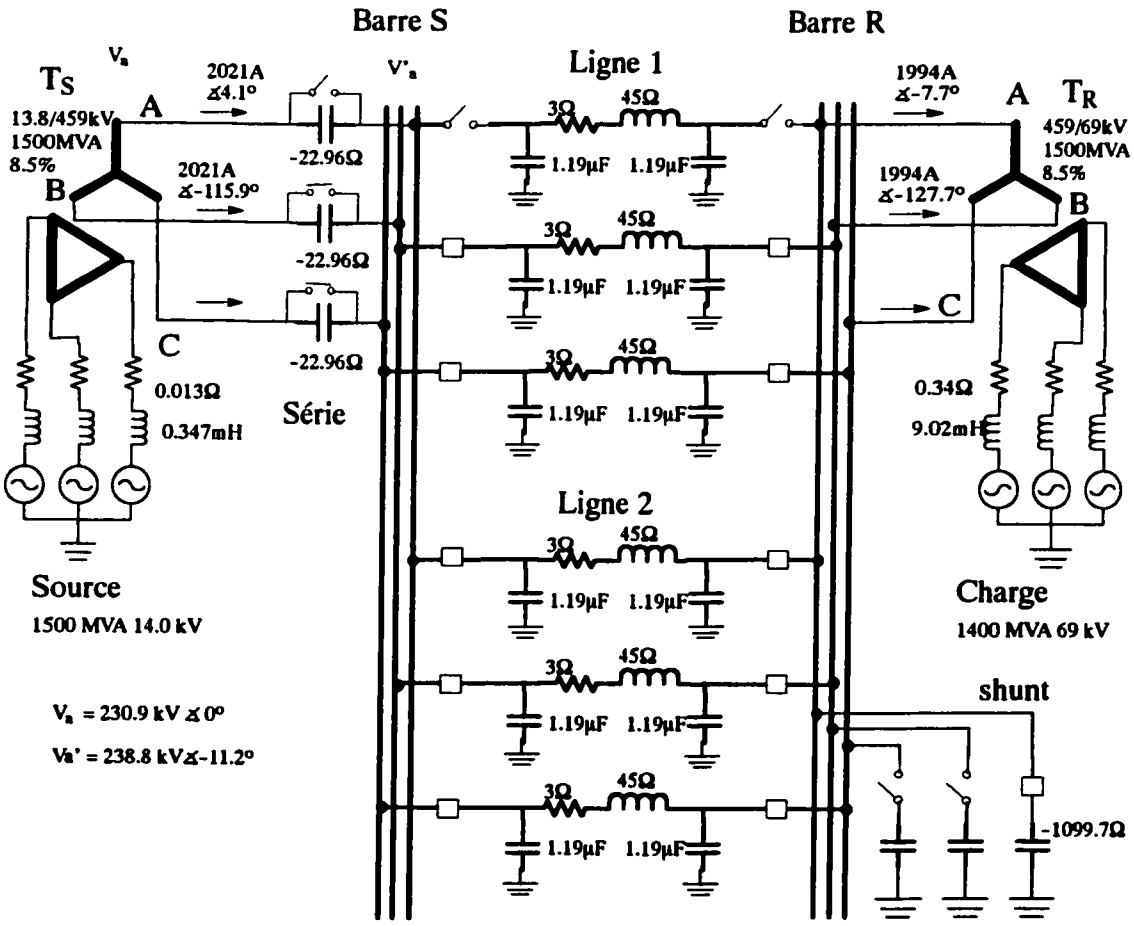


Figure 6.6 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes et des dispositifs conventionnels

VI.2.1 Les lignes

Les deux lignes sont à 400 kV, 150 km et transportent en tout 1400 MW, avec les paramètres suivants: $r_L = 0.02\ \Omega$/km, $x_L = 0.3\ \Omega$/km et $b_L = 6.0\ \mu$S/km. Donc pour 150 km, $R_L = 3\ \Omega$ $X_L = 45\ \Omega$ et $B_L = 0.909 \times 10^{-3}$ S et finalement, les paramètres du quadripôle sont $\overline{A} = 0.919 \measuredangle 0.34$, $\overline{B} = 45.1 \measuredangle 86.19$ et $\overline{C} = 8.91 \times 10^{-4} \measuredangle 90.04$.

VI.2.2 La source

La source triphasée de 60 Hz possède une résistance interne de 10% sur une base de 1500 MVA et 14.0 kV soit $R_s = 0.013\ \Omega$ et une inductance de 100% sur la même base soit $L_s = 0.346$ mH. La tension de la phase A de la source est ajustée de sorte que la tension de la phase A à la barre S soit égale à 231 kV 0°. Le transformateur à la source (T_s) possède une puissance nominale de 1500 MVA, des tensions de 13.8 kV / 459 kV, une impédance interne de 8.5% et une connexion delta-étoile avec secondaire mis à la terre (DYg1).

VI.2.3 La charge

La charge est un équivalent triphasé à 60 Hz représenté par une source de tension en série avec une inductance et une résistance. La puissance et la tension nominales de la source de tension sont 1400 MVA et 69 kV respectivement. Elle possède une résistance interne $R_c = 0.34$ et une inductance $L_c = 9.02$ mH. La tension interne de la source est ajustée selon la tension de ligne à la barre de charge. Le transformateur de la charge (T_R) est de 1500 MVA, 459 kV / 69 kV, possède une impédance interne égale à 8.5% et une connexion étoile-delta avec primaire mis à la terre (YgD1).

VI.2.4 La compensation série et la compensation shunt

La compensation série étant localisée à l'entrée de la ligne, la compensation shunt est effectuée uniquement à la sortie de la ligne comme le suggère l'équation (87) (section IV.2.1.3) que l'on reprend ici :

$$\begin{aligned} \bar{x} &= -\frac{L}{N}\frac{\overline{B}_0}{\overline{A}_0} \\ \bar{y}_1 &= 0 \\ \bar{y}_2 &= \frac{L}{N-L}\frac{\overline{C}_0}{\overline{A}_0} \end{aligned} \tag{238}$$

x est l'impédance série à placer à l'entrée de la ligne dans chaque phase a saine; y_1 est l'admittance shunt par phase a saine, à placer à l'entrée de la ligne et est identiquement nulle. y_2 est l'admittance shunt par phase a saine, à placer à la sortie de la ligne. L est le nombre de phases a coupées et N est le nombre de lignes. Lorsque les impédances de compensation série des phases a saines sont regroupées à l'entrée du corridor (avant la barre d'entrée des lignes) et les admittances shunt de compensation de ces mêmes phases regroupées à la sortie du corridor, on obtient l'équivalent parallèle suivant :

$$\begin{aligned} \bar{x}_{eq} &= -\frac{L}{N(N-L)}\frac{\overline{B}_0}{\overline{A}_0} \\ \bar{y}_{eq} &= L\frac{\overline{C}_0}{\overline{A}_0} \end{aligned} \tag{239}$$

$\bar{x}_{eq}$ et $\bar{y}_{eq}$ ayant une partie réelle négligeable par rapport à la partie réactive à cause de la faible résistance de la ligne, on assimile les condensateurs séries et shunts à la partie réactive.

Pour N = 2 et L = 1, la partie réactive de l'équation (239) donne x_{eq} = -22.96 Ω et y_{eq} = 0.909×10^{-3} S (-1099.7 Ω). Des impédances séries et admittances shunts similaires doivent être prévues pour les phases B et C afin de traiter les défauts survenant à celles-ci.

VI.2.5 Résultats de simulation

La Figure 6.7 et la Figure 6.8 montrent les résultats de simulation. La Figure 6.7 montre que: les tensions de barre sont équilibrées à la source (Figure 6.7d); les tensions des phases a à la barre d'entrée et à la barre de sortie de la ligne ont un écart angulaire de 11.5 degrés correspondant à la valeur théorique d'avant compensation (Figure 6.7c); la tension du condensateur série dans la phase a à l'entrée du corridor a une valeur efficace de

46.4 kV (Figure 6.7a) et le courant du condensateur shunt à la barre a à la sortie de la ligne a une valeur efficace de 210 A (Figure 6.7b) correspondant aux valeurs théoriques.

Figure 6.7d

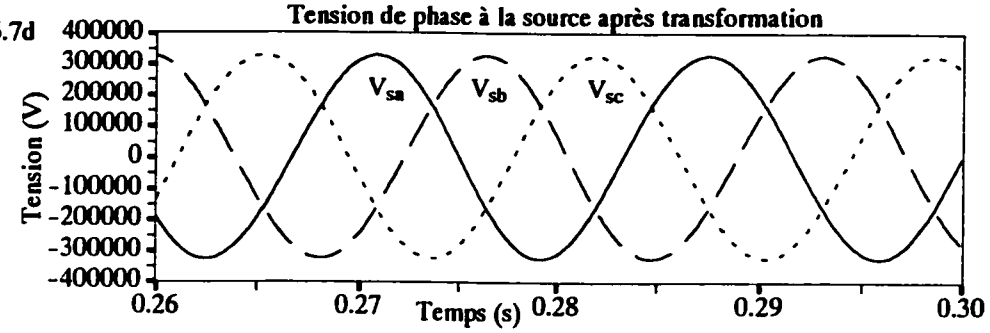


Figure 6.7c

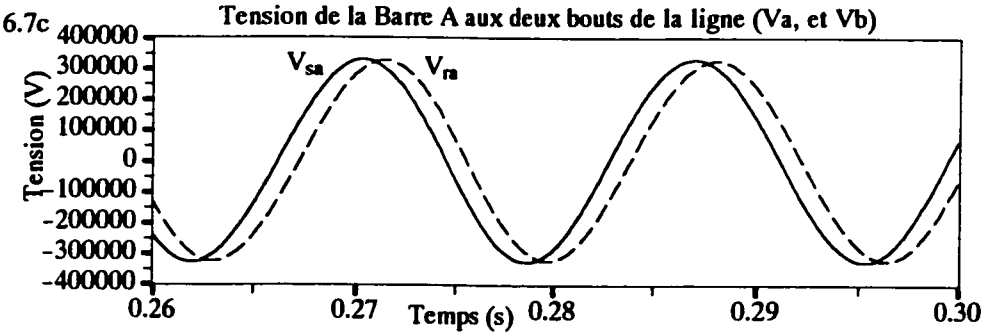


Figure 6.7a

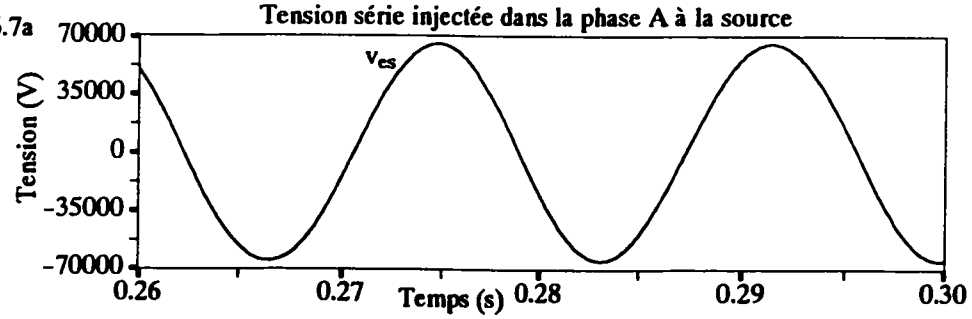


Figure 6.7b

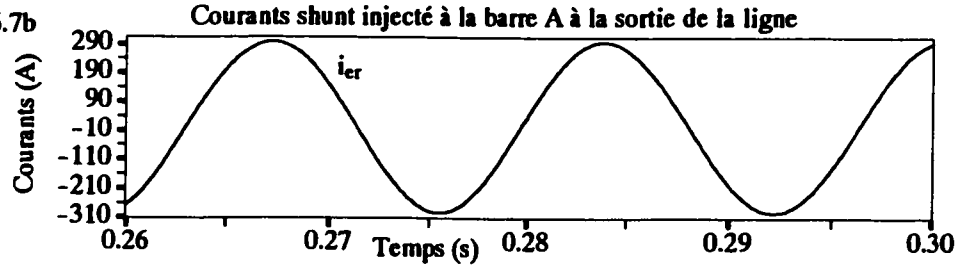


Figure 6.7 Simulation de l'exploitation asymétrique: deux lignes à 400 kV; dispositifs conventionnels; tension des barres, tension série et courant shunt injectés

Figure 6.8a

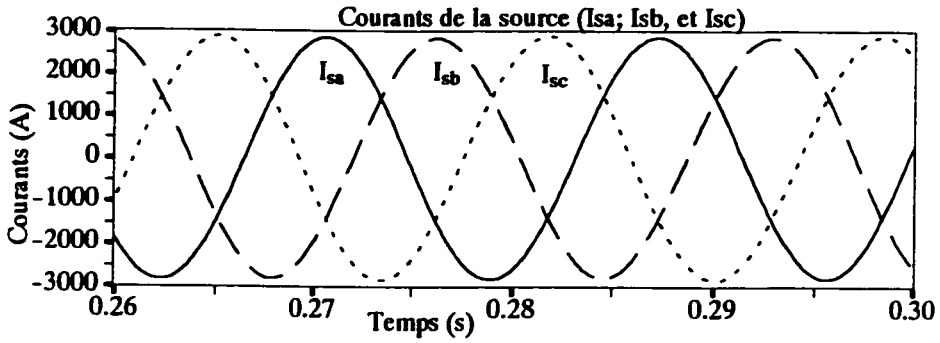


Figure 6.8b

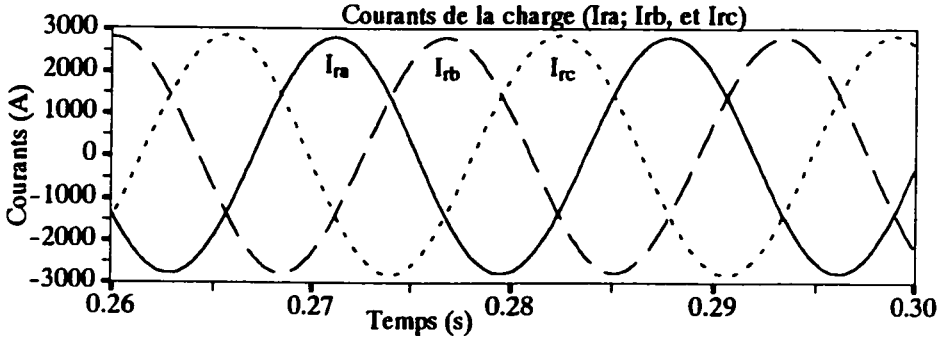


Figure 6.8c

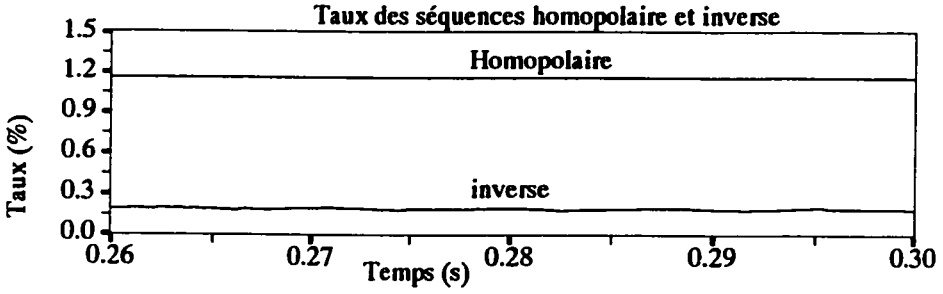


Figure 6.8d

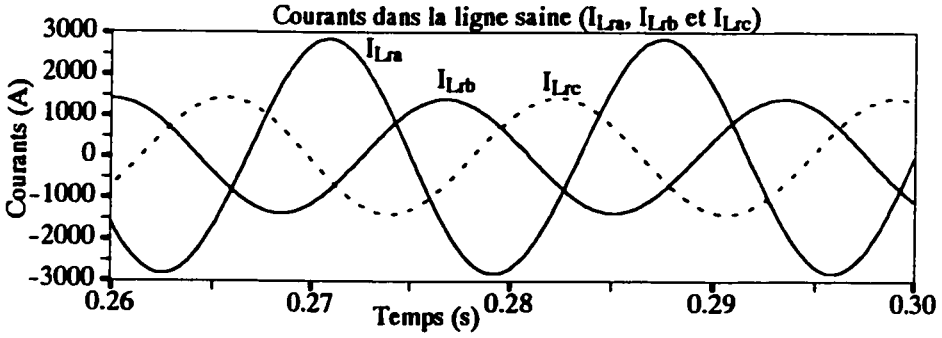


Figure 6.8 Simulation de l'exploitation asymétrique: deux lignes de 400 kV; dispositifs Conventionnels; tension et courants dans la ligne, la source et la charge

La Figure 6.8 montrent les courants à la source, à la charge et dans la ligne saine. Les courants à la source (Figure 6.8a) et les courants à la charge (Figure 6.8b) ont une valeur efficace en moyenne de 2017A et de 1988 A respectivement. Il existe un léger déséquilibre à cause de la non compensation de la résistance de la phase en défaut, mais ce déséquilibre est tout à fait négligeable comme le montre le taux des séquences homopolaire et inverse à la charge, illustré à la Figure 6.8c. Le taux le plus élevé est celui de la séquence homopolaire et vaut seulement 1.2% de la séquence directe, ce qui est largement en deçà de la limite de 6% qu'on a fixé .

Les courants dans la ligne saine (à la sortie) sont représentés à la Figure 6.8d. On remarque que la phase a de la ligne saine transporte l'équivalent du courant de deux phases. Dans les limites des hypothèses posées (non couplage des phases et des lignes), cette situation est parfaitement possible grâce à la compensation. Cependant, étant donné que la phase a de la ligne saine transporte deux fois le courant nominal, une attention particulière doit être portée sur le choix des conducteurs de la ligne.

VI.3 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes : utilisation de dispositifs de compensation conventionnels

L'exploitation asymétrique d'un corridor de trois lignes est illustrée à la Figure 6.9. La puissance livrée à la charge est 2000 MW environ. A la suite d'un aléa, la phase a de la ligne 1 est ouverte. Un condensateur est inséré en série avec la phase a après le transformateur d'alimentation afin de compenser l'impédance série de la phase A du corridor et un condensateur shunt est connecté à la barre A à la sortie de la ligne afin de compenser l'admittance shunt de la phase A du corridor. Dans les sections suivantes, les éléments du réseau configuré pour l'exploitation asymétrique sont décrits, puis les résultats de simulations sont exposés.

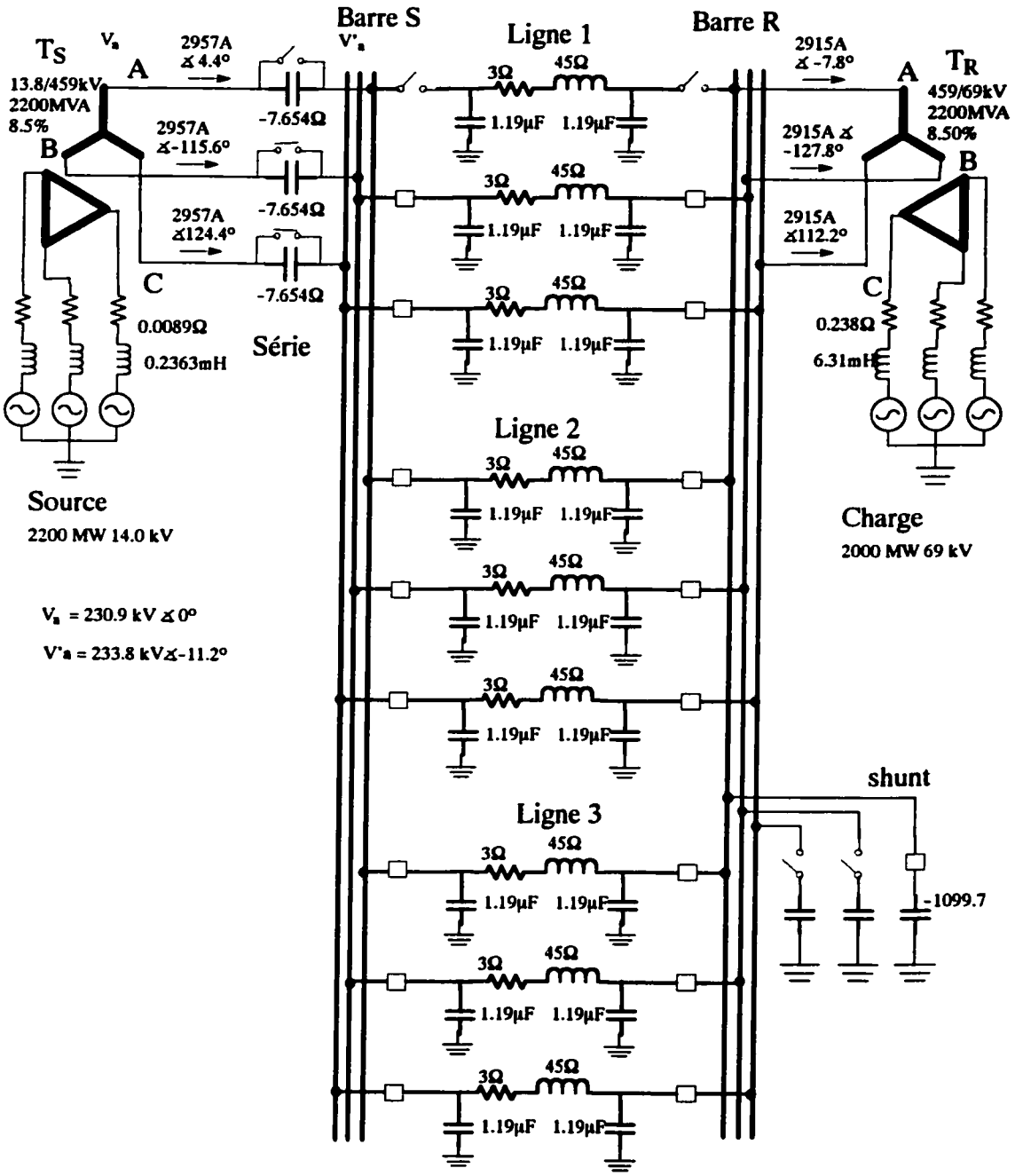


Figure 6.9 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes et des dispositifs conventionnels

VI.3.1 Les lignes

Les trois lignes sont à 400 kV, 150 km et transportent en tout 2000 MW, avec les paramètres suivants: r_L = 0.02 Ω/km, x_L = 0.3 Ω/km et b_L = 6.0 μS/km. Donc pour 150

km, $R_L = 3\ \Omega$ $X_L = 45\ \Omega$ et $B_L = 0.909 \times 10^{-3}$ S et finalement, les paramètres du quadripôle sont $\overline{A} = 0.919 \measuredangle 0.34$, $\overline{B} = 45.1 \measuredangle 86.19$ et $\overline{C} = 8.91 \times 10^{-4} \measuredangle 90.04$.

VI.3.2 La source

La source triphasée de 60 Hz possède une résistance interne de 10% sur une base de 2200 MVA et 14.0 kV soit $R_s = 0.0089\ \Omega$ et une inductance de 100% sur la même base soit $L_s = 0.236$ mH. La tension de la phase A de la source est ajustée de sorte que la tension de la phase A à la barre S soit égale à 231 kV avec un angle nul. Le transformateur à la source (T_s) possède une puissance nominale de 2200 MVA, des tensions de 13.8 kV / 459 kV, et une connexion delta-étoile avec secondaire mis à la terre (DYg1). L'impédance interne du transformateur est de 8.5%.

VI.3.3 La charge

La charge est un équivalent triphasé à 60 Hz, représentée par une source de tension en série avec une inductance et une résistance. La puissance et la tension nominales de la source de tension sont 2000 MVA et 69 kV respectivement. Elle possède une résistance interne $R_c = 0.238$ et une inductance $L_c = 6.31$ mH. La tension interne de la source est ajustée selon la tension de ligne à la barre de charge. Le transformateur de la charge (T_R) est de 2200 MVA, 459 kV/ 69 kV, possède une impédance interne égale à 8.5% et de connexion étoile-delta avec primaire mis à la terre (YgD1).

VI.3.4 La compensation série et la compensation shunt

La compensation série est localisée à l'entrée de la ligne et la compensation shunt à la sortie. L'équation (239) sert à évaluer la réactance série et l'admittance shunt équivalente pour la compensation de la phase a. Là aussi, on assimile les condensateurs séries et shunts à la partie réactive de la réactance série x_{eq} et de l'admittance shunt y_{eq} à cause de la faible résistance de la ligne.

Pour N = 3 et L = 1 la partie réactive de l'équation (239) donne $x_{eq} = -22.96\ \Omega$ et $y_{eq} = 0.909 \times 10^{-3}$ S (-1099.7 Ω). Des impédances séries et des admittances shunts

similaires doivent être prévues pour les phases B et C afin de traiter les défauts survenant à ces phases.

VI.3.5 Résultats de simulation

Les résultats de simulation de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes de 400 kV transportant 2000 MW sont montrés à la Figure 6.10 et à la Figure 6.11 . La Figure 6.10a montrent les tensions de phase à la source et la Figure 6.10d, les tensions de la barre a aux deux bouts de la ligne confirmant, comme dans le cas de deux lignes, l'exactitude de la compensation. La tension aux bornes du condensateur série est montrée à la Figure 6.10b et elle a une valeur efficace de 22.6 kV. Le courant dans le condensateur shunt montré à la Figure 6.10c a une valeur efficace de 210 A. Par rapport à la compensation pour l'exploitation avec deux lignes (Figure 6.7a) la tension série est plus faible alors que le courant shunt qui reflète le courant des condensateurs de la phase absente est le même.

La Figure 6.11b et la Figure 6.11c montre les courants à la source et les courants à la charge respectivement avec des valeurs efficaces de 2952 A et 2910 A pour la séquence directe.

Les taux de séquence homopolaire et inverse représentés à la Figure 6.11d sont très faibles (0.6% maximum) et sont deux fois plus faibles que ceux de l'exploitation asymétrique avec deux lignes (Figure 6.8c).

Les courants dans une des lignes saines (la ligne 3) sont représentés à la Figure 6.11a. Le courant de la phase a qui est la phase absente dans la ligne 1, est 1.5 fois plus élevé que le courant des autres phases. Malgré ce déséquilibre dans les lignes saines, le corridor se comporte, à ces accès, comme un système équilibré. Ainsi l'efficacité de la compensation réside dans ce qu'il confine les asymétries au sein même des lignes prises individuellement. Naturellement, le design des lignes doit leur permettre de supporter les distorsions venant de l'exploitation asymétrique.

Figure 6.10a

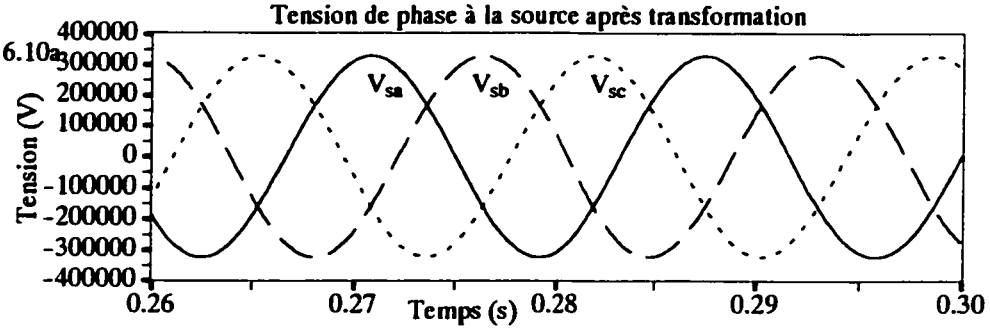


Figure 6.10d

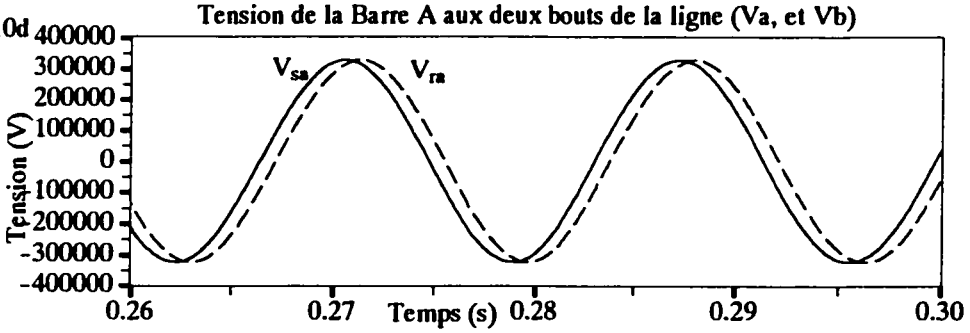


Figure 6.10b

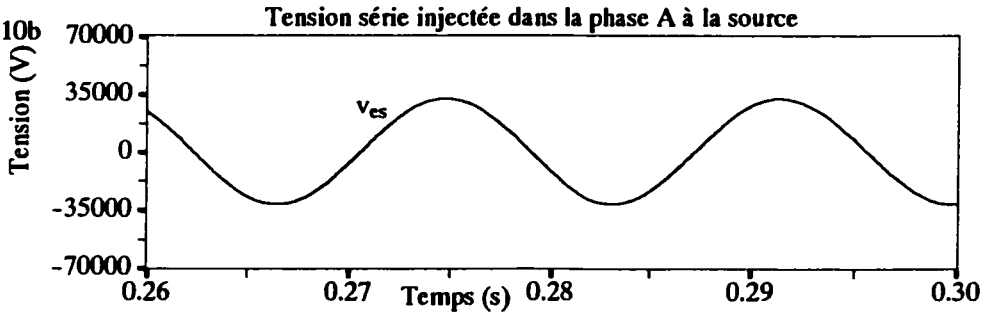


Figure 6.10c

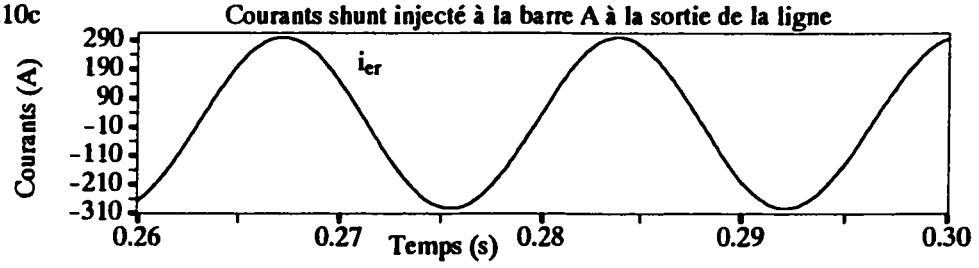


Figure 6.10 Simulation de l'exploitation asymétrique: trois lignes à 400 kV; dispositifs conventionnels; tension des barres, tension série et courant shunt injectés

Figure 6.11b

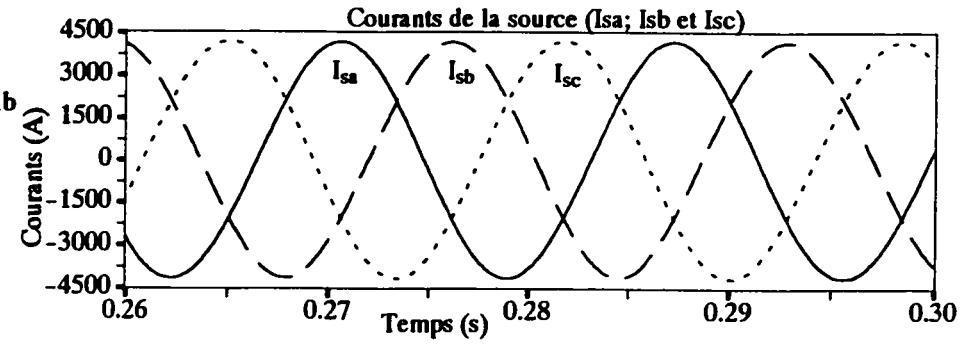


Figure 6.11c

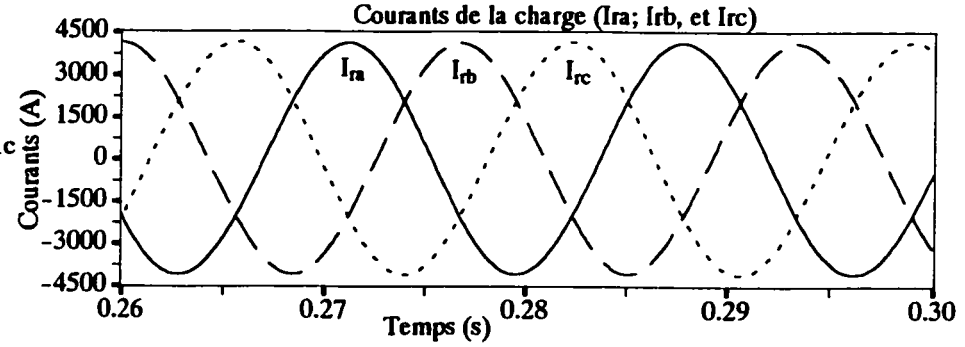


Figure 6.11d

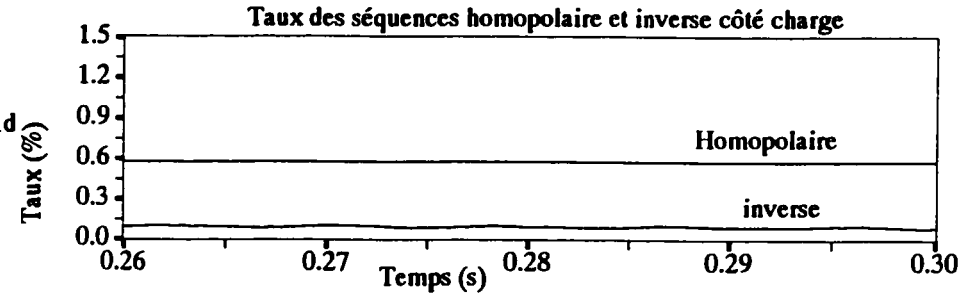


Figure 6.11a

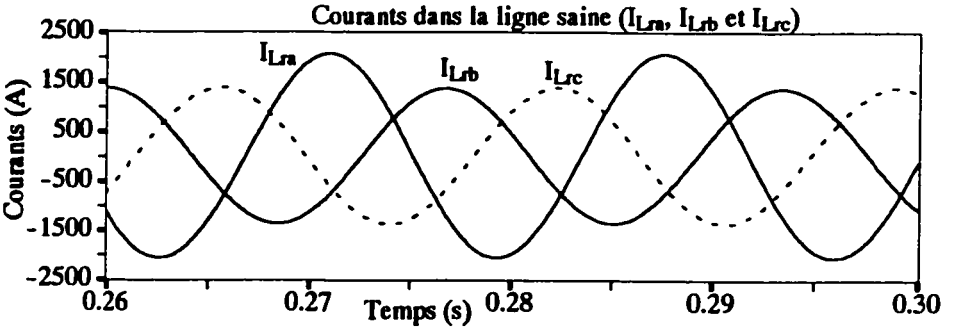


Figure 6.11 Simulation de l'exploitation asymétrique: trois lignes de 400 kV; dispositifs Conventionnels; tension et courants dans la ligne, la source et la charge

VI.4 EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE D'UN CORRIDOR AVEC UNE SEULE LIGNE ET DES DISPOSITIFS FACTS

VI.4.1 CONFIGURATIONS PRINCIPALES

Deux configurations principales peuvent être adoptées. Il s'agit de mettre en oeuvre des convertisseurs de courants monophasés à l'entrée et à la sortie de la ligne pour filtrer les séquences directe et homopolaire et compenser la séquence directe.

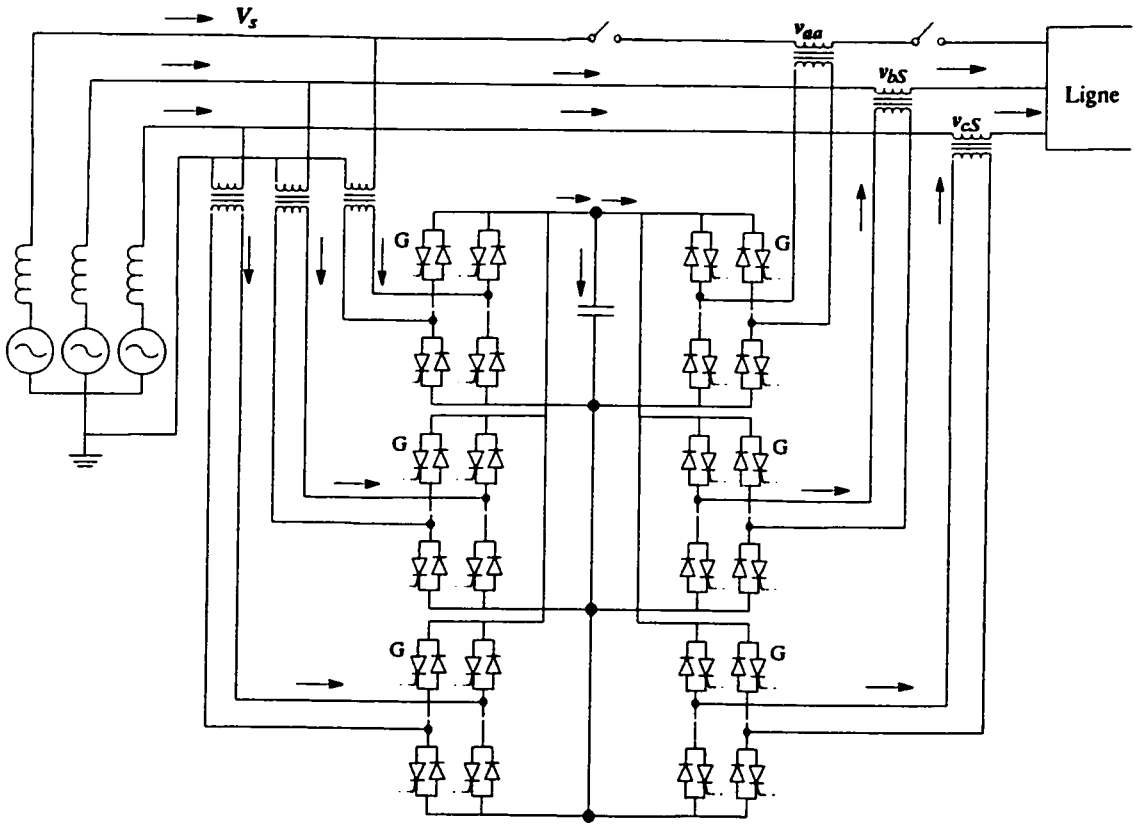


Figure 6.12 Compensation des séquences directe, homopolaire et inverse à l'entrée de la ligne

La séquence directe est compensée à l'entrée de la ligne par trois convertisseurs séries (source de tension série) (Figure 6.12). Ces trois convertisseurs modulent la tension continue d'un condensateur intermédiaire. Ces convertisseurs séries peuvent être utilisés en même temps pour la suppression de la séquence homopolaire à l'entrée de la ligne. Le

condensateur intermédiaire est chargé par la tension redressée qui provient de trois convertisseurs shunt (un par phase) dont le rôle est la compensation de la séquence inverse à l'entrée de la ligne. Ces convertisseurs shunts peuvent être utilisés en même temps pour l'élimination de la séquence homopolaire dans le cas où celle-ci ne serait pas traitée par les convertisseurs séries. Dans cette configuration (Figure 6.12) chaque convertisseur (shunt ou série) peut avoir son propre condensateur pour simplifier le système de contrôle.

A l'autre bout de la ligne, les séquences inverse et homopolaire sont compensées par des convertisseurs shunts (Figure 6.13), qui modulent aussi la tension d'un condensateur de stockage. Là aussi, chaque convertisseur peut avoir son propre condensateur de stockage.

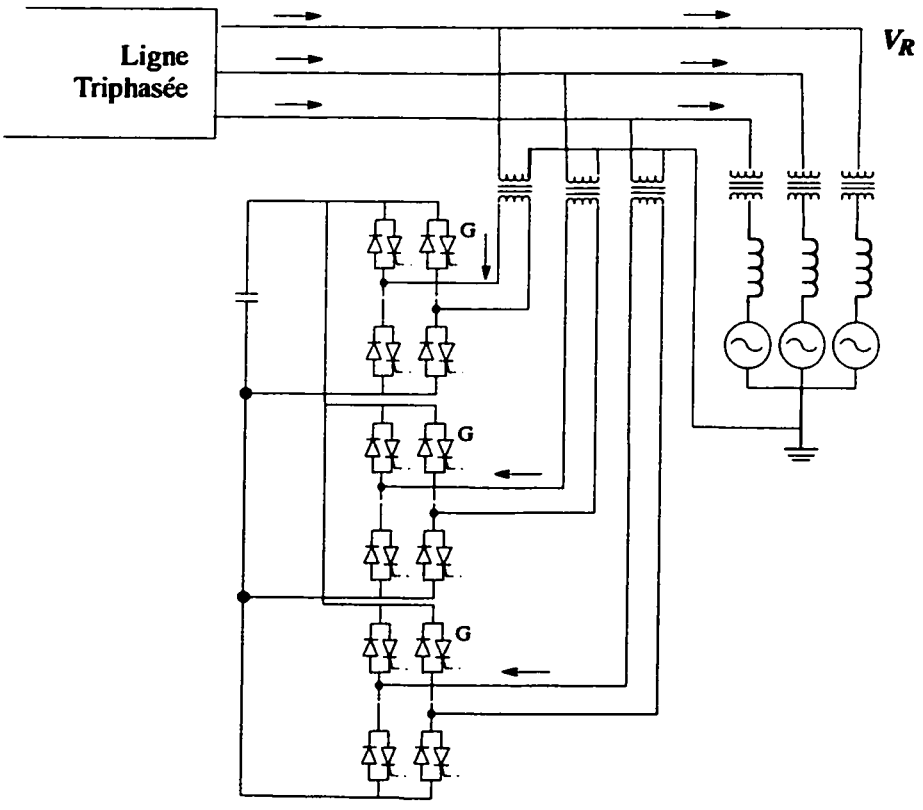


Figure 6.13 Filtrage des séquences inverse et homopolaire à la sortie de la ligne par des convertisseurs shunts

La différence entre la Figure 6.12 et la Figure 6.13, réside dans le fait que la séquence directe soit compensée à l'entrée de la ligne par les convertisseurs séries. Les

compensateurs de séquences inverse et homopolaire sont localisées à chaque bout de la ligne. Il est possible aussi de localiser la compensation de la séquence directe à la sortie de la ligne si cela s'avère plus pratique. Dans ces conditions, la Figure 6.12 et la Figure 6.13 sont inversées.

La Figure 6.14 montre une disposition alternative pour l'ensemble de compensateurs shunt-séries à l'entrée de la ligne. Dans cette configuration, le compensateur shunt qui est un convertisseur en pont triphasé est destiné en priorité à la compensation de la séquence inverse. La séquence directe et la séquence homopolaire sont compensées simultanément par les compensateurs séries formés par des convertisseurs en pont monophasés. On peut aussi remplacer l'ensemble des trois convertisseurs en pont monophasé pour la compensation série par un seul convertisseur en pont triphasé s'il s'avère que les tensions de compensation sont décalées de 120 degrés. À ce moment, le compensateur de la phase ouverte reste non alimentée.

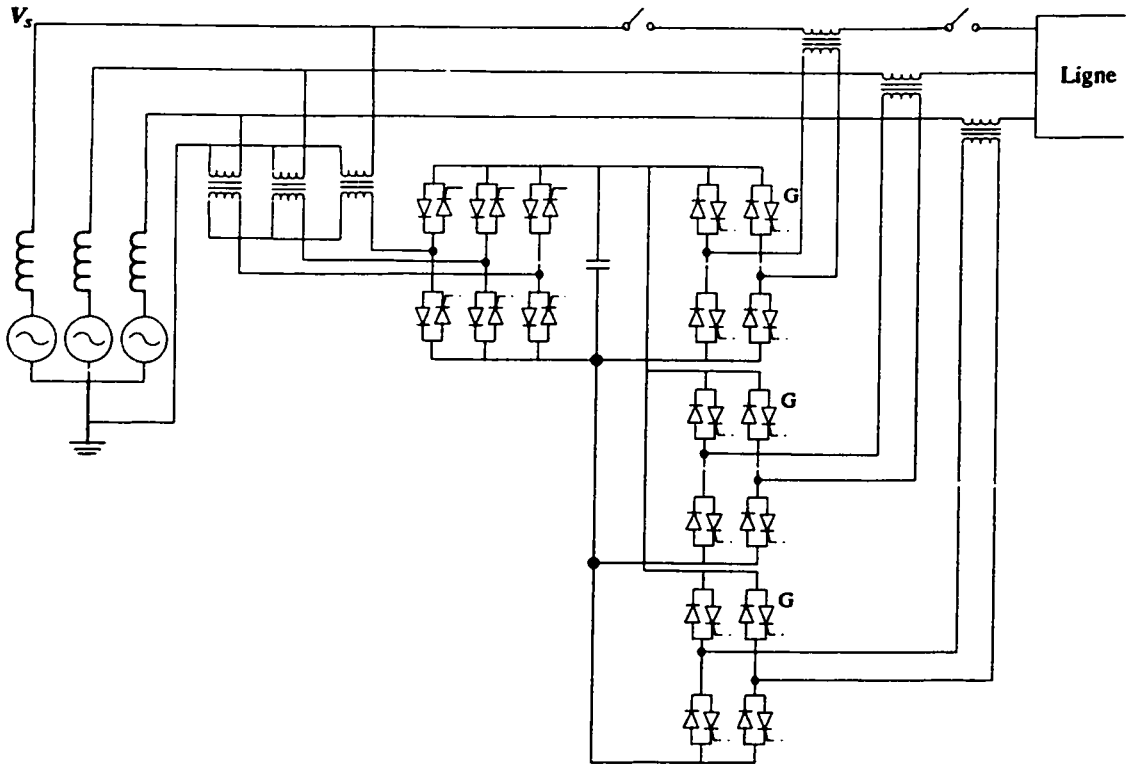


Figure 6.14 Sources séries placées à l'entrée de la ligne

VI.4.2 Configuration adoptée

La source, la ligne et la charge sont identiques à celles décrites à la section VI.1

La configuration adoptée pour la compensation de la séquence inverse et le filtrage de la séquence homopolaire est le filtrage jumelé, correspondant à celle décrite à la section V.4. On adopte la configuration de la Figure 6.13 pour les convertisseurs shunt à la sortie de la ligne et on modifie légèrement la Figure 6.12 en séparant les parties shunt et série des convertisseurs du côté source. Les sources de tensions séries sont obtenues de la modulation d'une source de tension continue tandis que la partie shunt reste inchangée: un condensateur chargé par la tension redressée qui provient des trois convertisseurs shunt (un par phase) dont le rôle est la compensation de la séquence inverse et de la séquence homopolaire. Les courants de compensation shunt du côté source et du côté charge sont obtenus des équations (230) et (231) respectivement, après utilisation des équations (228) et (186). Le Tableau 6.1 montre les résultats de calculs des courants de compensation des compensateurs jumelés des deux côtés de la ligne.

Tableau 6.1: Résultats de calculs des courants de compensation pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV avec la phase a ouverte, par l'utilisation de dispositifs moderne et le filtrage jumelé des courants de séquence

Caractéristiques de ligne $R_L = 6.14\Omega$ $X_L = 36.4\ \Omega$ $B_c = 4.54\times10^{-4}$ S			Côté source	Côté charge 50MW
Tensions du système		v_{ab} (kV)	120.0 ∠30°	120.5 ∠ 22.5°
Courants dans la ligne avant l'exploitation asymétrique		I_{La} (A)	247.7 ∠11.2°	241.6 ∠ 3.9°
Courants dans la ligne durant l'exploitation asymétrique (tension série injectée $v_{Sb} = v_{Sc} = 4.6$ kV)		I'_{La} (A)	0.0	0.0
		I'_{Lb} (A)	371.6A ∠-104°	363.2A ∠-108°
		I'_{Lc} (A)	371.6A ∠136°	363.2A ∠131.4°
Courants de séquence des courants de ligne durant l'exploitation asymétrique		I'_{L1} (A)	247.7 ∠ 11.2°	243.873 ∠6.4°
		I'_{L2} (A)	123.9 ∠-168.8°	121.9∠ -173.6°
		I'_{L0} (A)	123.9 ∠-168.8°	121.9∠-173.6°
Compensateur de séquences jumelées	courant phase a	I_{a20} (A)	247.7 ∠11.2°	243.9∠ 173.6°
	courant phase b	I_{b20} (A)	123.9 ∠71.2°	121.9∠-113.6°
	courant phase c	I_{c20} (A)	123.9 ∠-48.8°	121.9 ∠126.4°

Quant aux tensions de compensation série du côté source, elles sont obtenues de l'équation (233). On obtient $\bar{v}_{Sb}$= 4.6 kV ∠ 151.6° et $\bar{v}_{Sc}$ = 4.6 kV ∠31.6°.

VI.4.3 Résultats de simulation

La Figure 6.15 et la Figure 6.16 montrent les résultats de simulation de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne par l'utilisation des FACTS et le filtrage jumelé des courants des séquences inverse et homopolaire aux bouts respectifs de la ligne. Dans ce cas précis d'un corridor avec une seule ligne, on a eu recours au filtrage pour éliminer les harmoniques causées par la modulation, contrairement au cas de plusieurs lignes présenté dans les sections VI.5 et VI.6 plus loin.

La Figure 6.15a montre les tensions de la phase a à l'entrée et à la sortie de la ligne avec le décalage angulaire de 6 degrés. Les courants de la ligne du côté source sont montrés à Figure 6.15b et les courants de source et de charge sont montrés aux Figure 6.15c et Figure 6.15d. respectivement. On remarque que les courants de source et de charge sont équilibrés malgré le déséquilibre des courants de ligne (courant de la phase a nul)

La Figure 6.16 montre les ondes de compensation générées par les convertisseurs shunts et série. Les deux tensions de compensation série à l'entrée de la ligne sont montrées à la Figure 6.15g. Elles sont décalées de 120 degrés. Les courants shunt de compensation de la séquence inverse et homopolaire du côté source et du côté charge sont montrés aux Figure 6.15e et Figure 6.15f respectivement. On constate que le courant de compensation de la phase a ouverte est deux fois plus grand que celui des autres phases. Il y a donc de grandes asymétries dans les convertisseurs qui, pour ce cas, favorise la conversion monophasée.

La précision de la compensation après filtrage des harmoniques est démontrée par un taux de distorsion très bas comme montré à la Figure 6.15h. Le taux le plus élevé qui est celui de la séquence homopolaire du côté charge est en dessous de 0.25 %.

Figure 6.15a

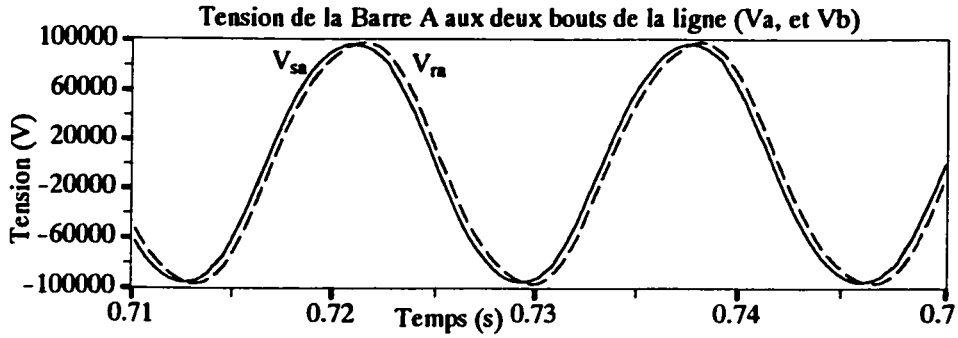


Figure 6.15b

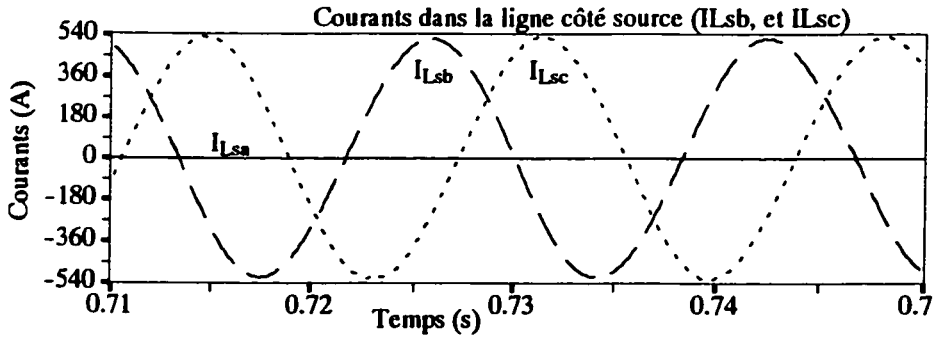


Figure 6.15c

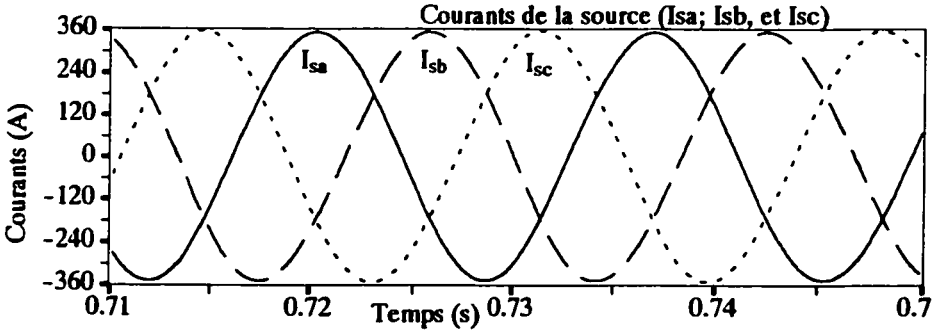


Figure 6.15d

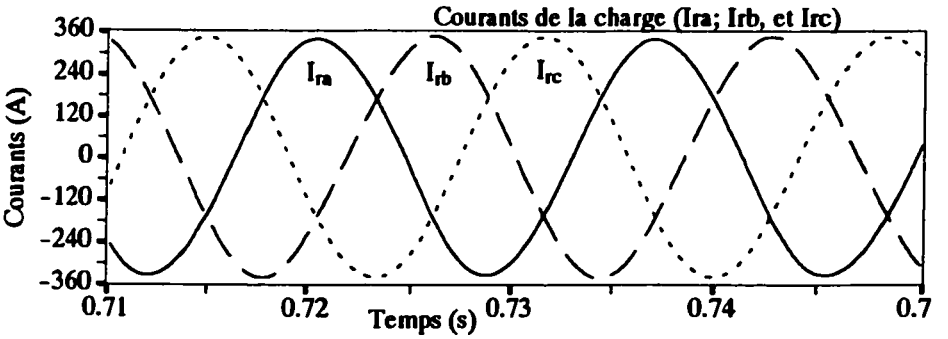


Figure 6.15 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec des FACTS : tension et courants dans la ligne, la source et la charge.

Figure 6.15g

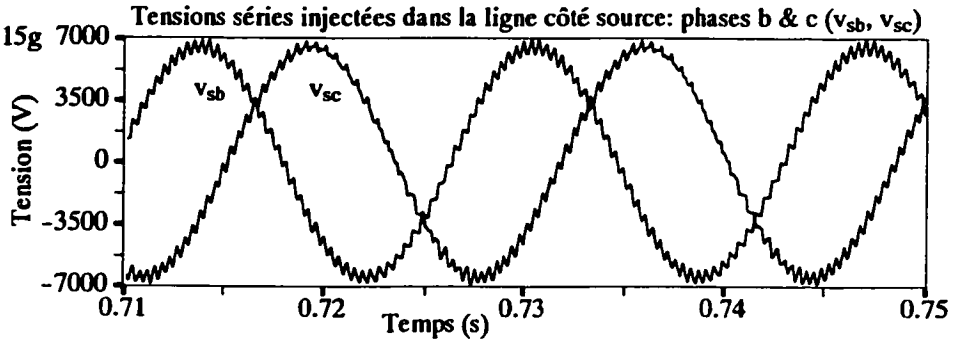


Figure 6.15e

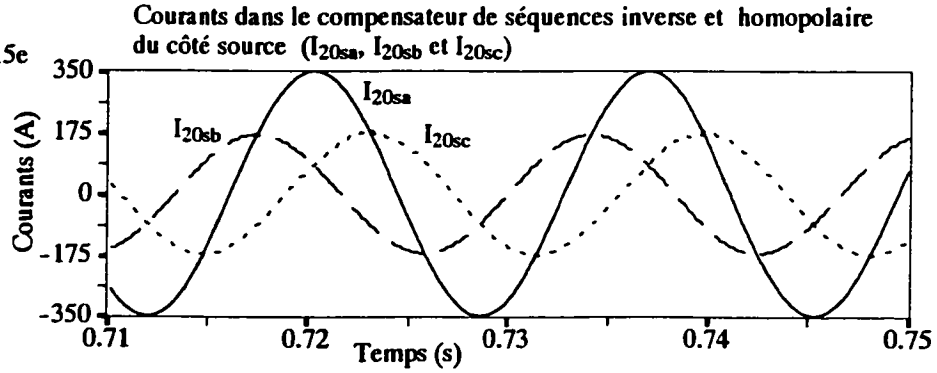


Figure 6.15f

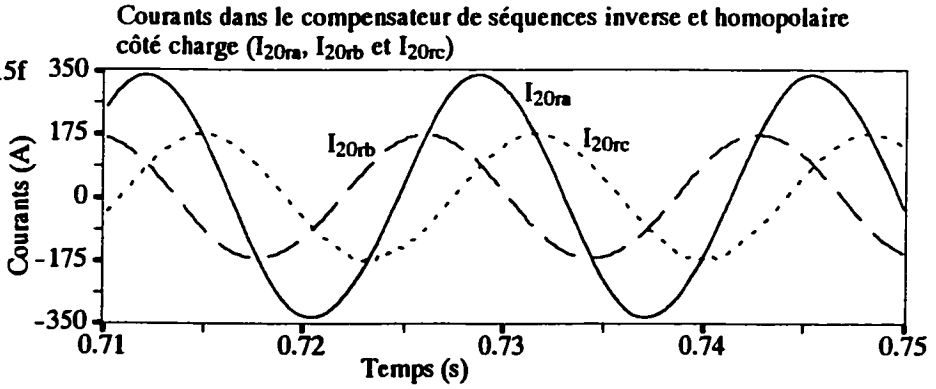


Figure 6.15h

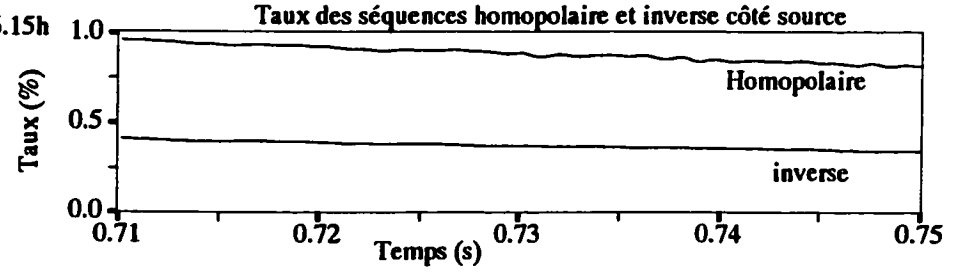


Figure 6.16 Simulation de l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 50 MW avec les FACTS: tensions séries et courants des compensateurs de séquence inverse et des filtres de séquence homopolaire shunts.

VI.5 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes : utilisation des FACTS

La Figure 6.17 illustre le principe de l'exploitation asymétrique d'un corridor de deux lignes avec des compensateurs source de tension et source de courant (FACTS). Ce schéma correspond à l'application du cas no 5 section IV.3.2.1.5 avec N = 2 et L = 1.

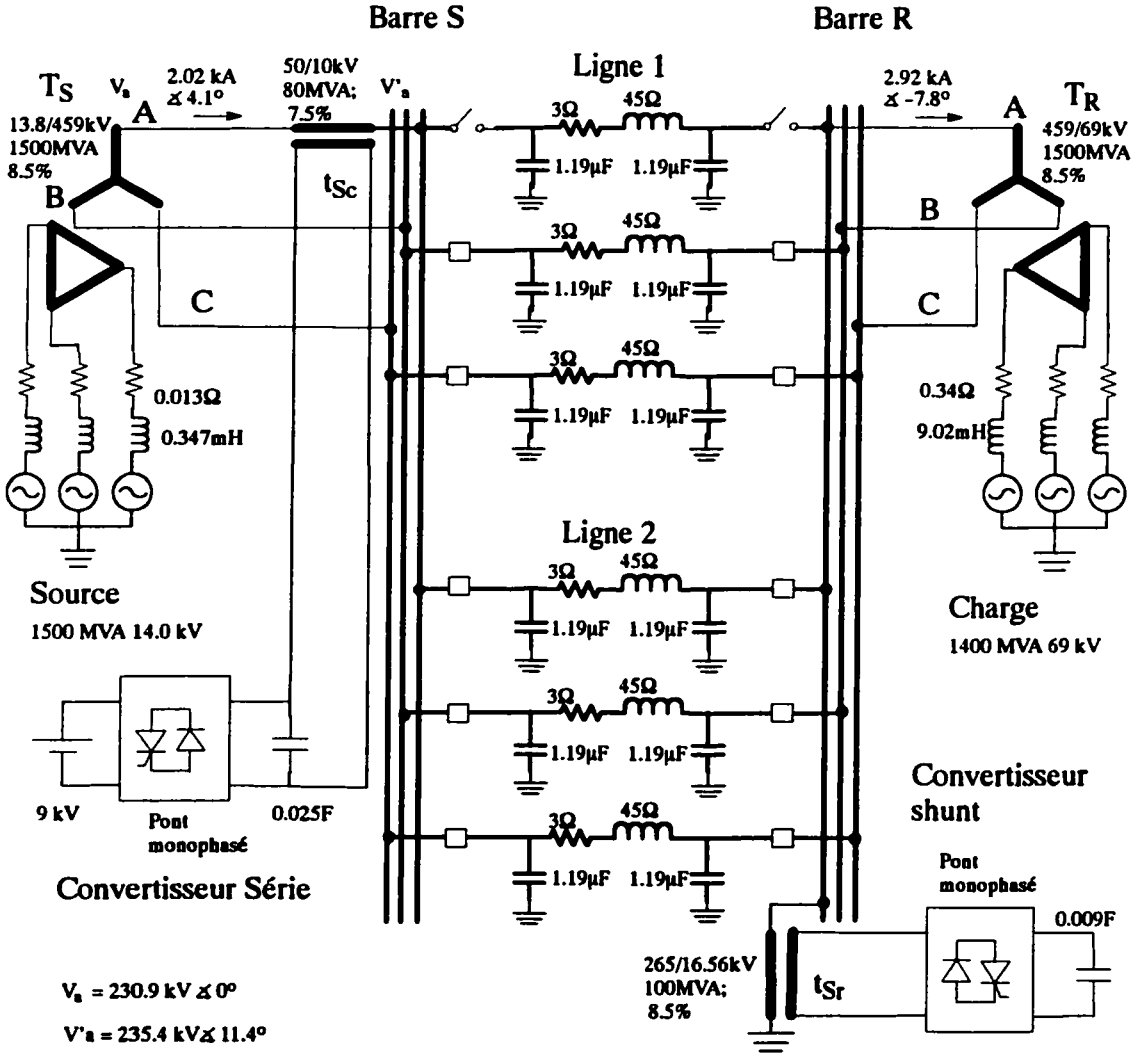


Figure 6.17 Exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes et des dispositifs FACTS

Les FACTS utilisés ici sont des convertisseurs monophasés en pont. La source de tension est en série dans la phase A du corridor à l'entrée de la ligne et la source de courant est en dérivation à la phase A à la sortie de la ligne. Les phases B et C doivent avoir les mêmes dispositifs i.e un convertisseur série à l'entrée de la ligne et un convertisseur shunt à la sortie de la ligne, mais ces convertisseurs ne sont pas représentés à la Figure 6.17 pour des besoins de clarté.

VI.5.1 Les lignes

Les deux lignes sont à 400 kV, 150 km et transportent en tout 1400 MW, avec les paramètres suivants: r_L = 0.02 Ω/km, x_L = 0.3 Ω/km et b_L = 6.0 μS/km. Donc pour 150 km, R_L = 3 Ω X_L = 45 Ω et B_L = 0.9×10^{-3} S et finalement, les paramètres du quadripôle sont $\overline{A} = 0.919 \measuredangle 0.34$, $\overline{B} = 45.1 \measuredangle 86.19$ et $\overline{C} = 8.91 \times 10^{-4} \measuredangle 90.04$.

VI.5.2 La source

La source triphasée de 60 Hz possède une résistance interne de 10% sur une base de 1500 MVA et 14.0 kV soit R_s = 0.013 Ω et une inductance L_s = 0.346 mH sur la même base. La tension de la phase A de la source est ajustée de sorte que la tension de la phase A à la barre S soit égale à 231 kV avec un angle nul. Le transformateur à la source (T_s) possède une puissance de 1500 MVA, des tensions de 13.8 kV / 459 kV, et une connexion delta-étoile avec secondaire mis à la terre (DYg1). L'impédance interne du transformateur est de 8.5%.

VI.5.3 La charge

La charge est un équivalent triphasée à 60 Hz représenté par une source de tension en série avec une inductance et une résistance. La puissance et la tension nominales de la source de tension sont 1400 MVA et 69 kV respectivement. Elle possède une résistance interne R_c = 0.34 et une inductance L_c = 9.02 mH. La tension interne de la source est ajustée afin que la tension de ligne à la barre de charge soit maintenue à 400 kV. Le transformateur de la charge (T_R) est de 1500 MVA, 459 kV/ 69 kV, possède une impédance interne égale à 8.5% et de connexion étoile-delta avec primaire mis à la terre (YgD1).

VI.5.4 Configuration des compensateurs série et shunt pour la phase A

On suppose que la phase A de la ligne 1 est coupée. Les convertisseurs série et shunt de la phase A sont alors mis en fonction pour rééquilibrer le corridor (tension, courant, puissance transmise). La valeur des sources de tension et de courant est calculée d'après l'équation (110) que nous reprenons ici:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{eS} &= -\frac{L}{N-L}(\bar{V}_S - \frac{1}{\bar{D}_0}\bar{V}_R) \\ \bar{i}_{eR} &= L\frac{\bar{C}_0}{\bar{D}_0}\bar{V}_R \end{aligned} \tag{240}$$

$\bar{v}_{eS}$ est la tension série injectée à l'entrée de la ligne dans la phase A, $\bar{i}_{eR}$ est le courant shunt injecté à la sortie à la barre A, V_S est la tension de la phase A à la barre source et V_R est la tension de la phase A à la barre de sortie. L est le nombre de phases coupées, N est le nombre de lignes du corridor et C_0 et D_0 sont les paramètres du quadripôle de chaque ligne. Pour N = 2, L = 1, $\bar{V}_S = 231\angle 0^o$ kV, $\bar{V}_R = 231\angle -11.3^o$ kV, $\bar{D}_0 = 0.919\angle 0.34$ et $\bar{C}_0 = 8.91 \times 10^{-4}\angle 90.04$, on trouve $\bar{v}_{eS} = 46.52\angle -89.8^o$ kV et $\bar{i}_{eR} = 210\angle 78.7^o$A. Ces tension et courant sont donc prises comme référence pour les convertisseurs série et shunt respectivement.

Le convertisseur série module une tension continue de 9 kV calibrée en fonction des besoins. La source de tension continue est autonome dans la Figure 6.17. Cependant, cette tension pourrait être obtenue de la source triphasée grâce à la mise en oeuvre d'un autre convertisseur shunt (un redresseur) alimentant un condensateur intermédiaire. Le convertisseur de courant shunt à la sortie de la ligne est un redresseur qui charge un condensateur.

VI.5.5 Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont montrés à la Figure 6.19 et à la Figure 6.18. Les tensions de phase à la source, les tensions de la barre A aux deux bouts de la ligne, la

tension série et le courant shunt injectés sont montrés à la Figure 6.19 tandis que les courants à la source à la charge et dans la ligne sont montrés à la Figure 6.18.

Figure 6.18a

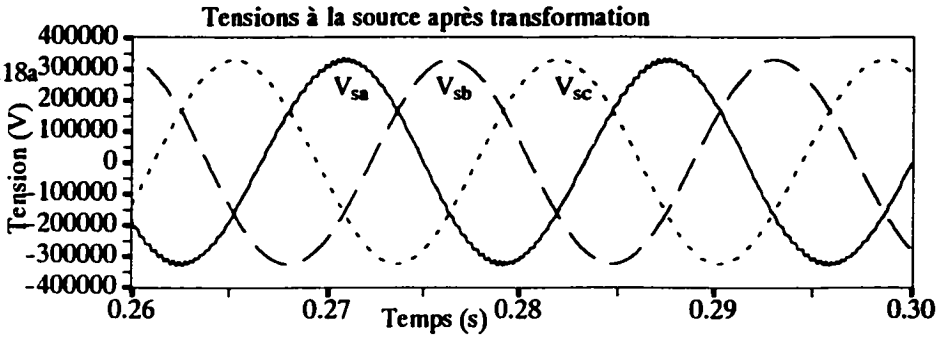


Figure 6.18b

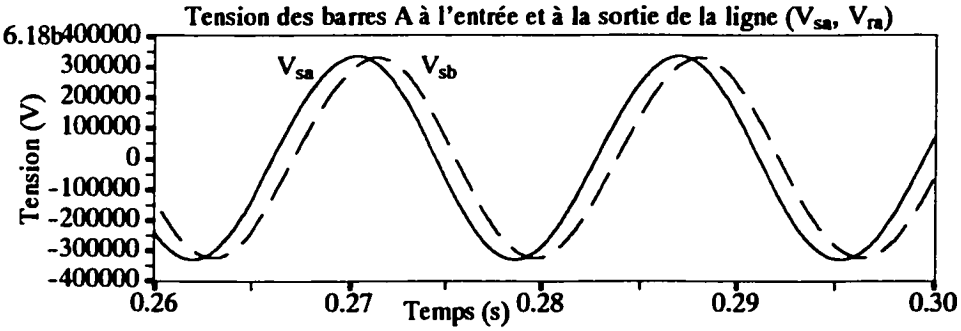


Figure 6.18c

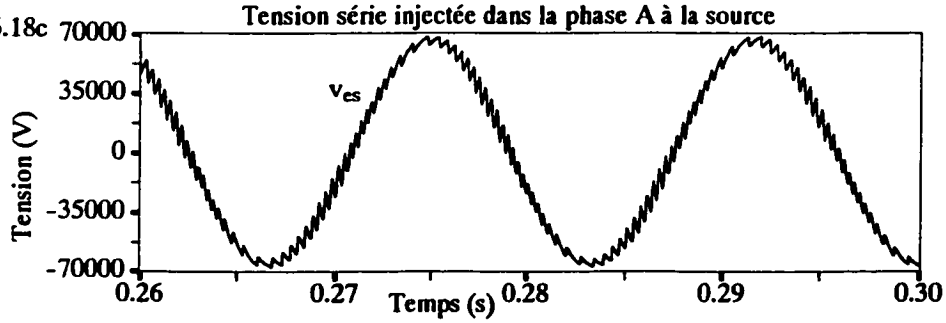


Figure 6.18d

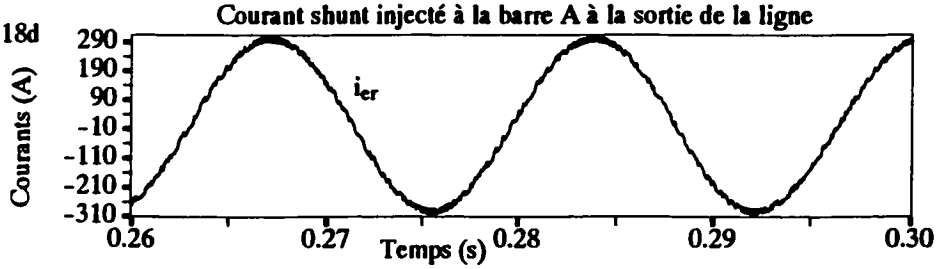


Figure 6.18 Simulation de l'exploitation asymétrique de deux lignes de 400 kV, 1400 MW avec des FACTS: tensions dans le réseau et courant injecté

Figure 6.19a

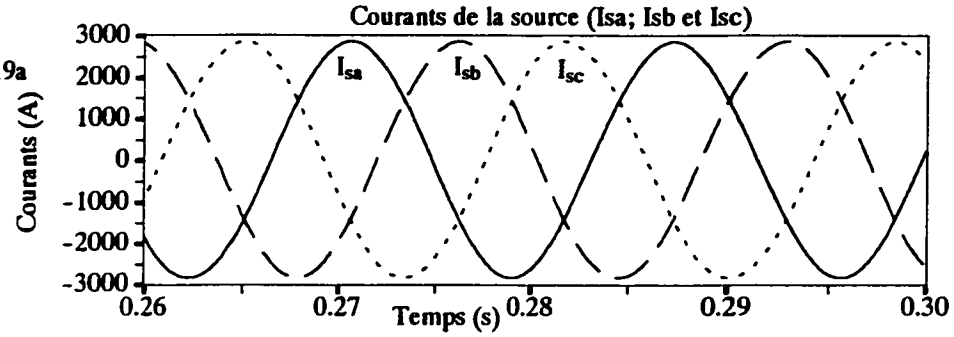


Figure 6.19b

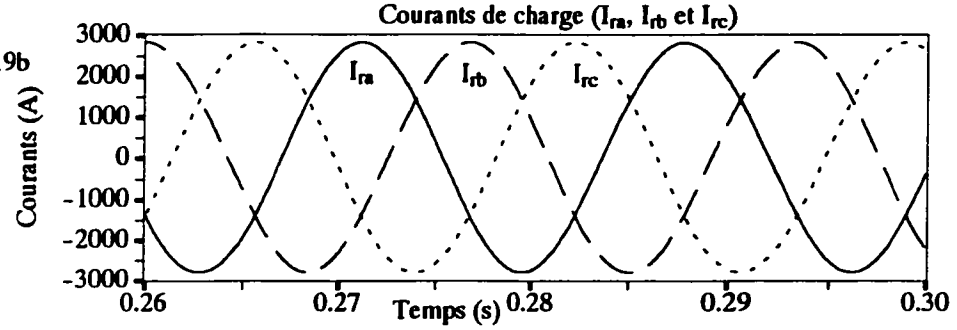


Figure 6.19d

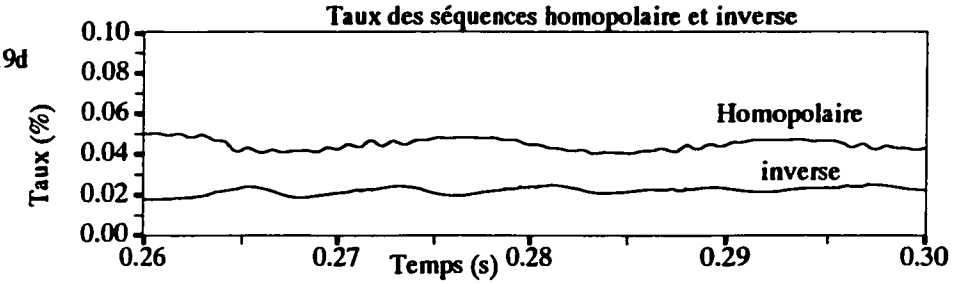


Figure 6.19c

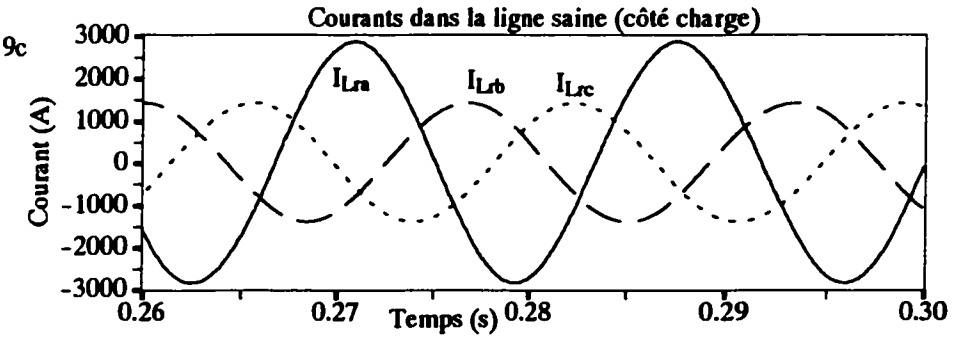


Figure 6.19 Simulation de l'exploitation asymétrique de deux lignes de 400 kV, 1400 MW avec des FACTS: courants dans le réseau

Ces résultats ne sont différents de ceux obtenus par la compensation avec des dispositifs classiques que dans le contenu harmonique et le taux des séquences homopolaire et inverse.

Le taux de séquence inverse et homopolaire dans les courants de source et de charge est pratiquement nul (Figure 6.19d) parce que la compensation est exacte : on tient compte de la résistance de la ligne. Le courant dans la phase a de la ligne saine est cependant deux fois le courant nominal et les conducteurs doivent être choisis en conséquence.

Les convertisseurs MLI introduisent des harmoniques de rang élevé comme le montre la Figure 6.18c pour la tension série injectée et la Figure 6.18d. pour le courant shunt injecté à la barre A à la sortie de la ligne. Les harmoniques de tension se propagent jusqu'à la source comme le montre la Figure 6.18a. Les harmoniques de courants se retrouvent aussi dans la charge et dans une moindre mesure, à la source. La fréquence de commutation des valves peut être ajustée afin de réduire ces harmoniques à un niveau acceptable. En plus de l'ajustement de la fréquence on peut aussi envisager un filtrage supplémentaire.

VI.6 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes : utilisation des FACTS

L'exploitation asymétrique d'un corridor de trois lignes compensé par FACTS est illustrée à la Figure 6.20. La puissance livrée à la charge est 2000 MW environ. La phase a de la ligne 1 est ouverte et un convertisseur série est inséré dans la phase A à l'entrée du corridor afin de compenser la tension de la barre A à ce point. Un convertisseur shunt est connecté à la barre A à la sortie de la ligne afin de compenser le courant de la barre A à la sortie du corridor. Les mêmes dispositifs sont prévus pour les phases B et C mais ne sont pas représentés à la Figure 6.20 pour des besoins de clarté.

Dans les sections suivantes, on décrit les éléments du réseau configuré pour l'exploitation asymétrique et l'on discute les résultats de simulation obtenus.

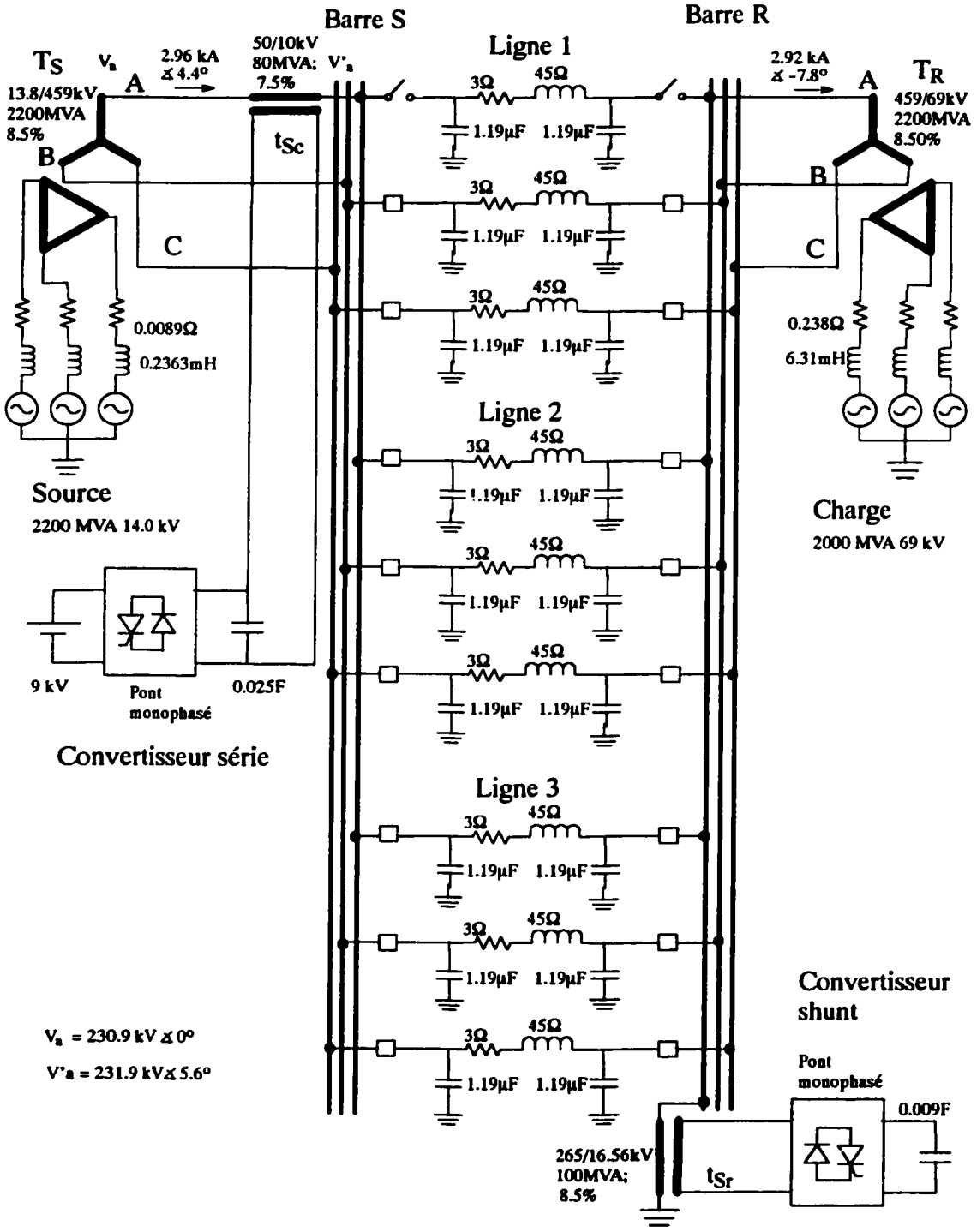


Figure 6.20 Exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes et des dispositifs FACTS

VI.6.1 Les lignes

Les trois lignes sont à 400 kV, 150 km et transportent en tout 2000 MW, avec les paramètres suivants: $r_L = 0.02\ \Omega$/km, $x_L = 0.3\ \Omega$/km et $b_L = 6.0\ \mu$S/km. Donc pour 150 km, $R_L = 3\ \Omega$, $X_L = 45\ \Omega$ et $B_L = 0.909 \times 10^{-3}$ S et finalement, les paramètres du quadripôle sont $\overline{A} = 0.919 \measuredangle 0.34$, $\overline{B} = 45.1 \measuredangle 86.19$ et $\overline{C} = 8.91 \times 10^{-4} \measuredangle 90.04$.

VI.6.2 La source

La source triphasée de 60 Hz possède une résistance interne de 10% sur une base de 2200 MVA et 14.0 kV soit $R_s = 0.0089\ \Omega$ et une inductance de 100% sur la même base soit $L_s = 0.236$ mH. La tension de la phase A de la source est ajustée de sorte que la tension de la phase A à la barre S soit égale à $231 \measuredangle 0^o$ kV. Le transformateur à la source (T_s) possède une puissance nominale de 2200 MVA, des tensions de 13.8 kV / 459 kV, et une connexion delta-étoile avec secondaire mis à la terre (DYg1). L'impédance interne du transformateur est de 8.5%.

VI.6.3 La charge

La charge est un équivalent triphasé à 60 Hz, représenté par une source de tension en série avec une inductance et une résistance. La puissance et la tension nominales de la source de tension sont 2000 MVA et 69 kV respectivement. Elle possède une résistance interne $R_c = 0.238$ et une inductance $L_c = 6.31$ mH. La tension interne de la source est ajustée selon la tension de ligne à la barre de charge. Le transformateur de la charge (T_R) est de 2200 MVA, 459 kV / 69 kV, possède une impédance interne égale à 8.5% et de connexion étoile-delta avec primaire mis à la terre (YgD1).

VI.6.4 La compensation série et la compensation shunt

En supposant que la phase A de la ligne 1 est coupée, les convertisseurs série et shunt de la phase A sont alors mis en fonction pour rééquilibrer le corridor (tension, courant, puissance transmise). La valeur des sources de tension et de courant est calculée d'après l'équation (110) ou (240) avec N = 3 et L = 1. Pour N = 2, L = 1, $\overline{V}_S = 231 \measuredangle 0^o$ kV,

$\bar{V}_R = 231\angle -11^o$ kV, $\bar{D}_0 = 0.919\angle 0.34$ et $\bar{C}_0 = 8.91 \times 10^{-4}\angle 90.04$, on obtient $\bar{v}_{eS} = 22.68\angle -89.5^o$ kV et $\bar{i}_{eR} = 210\angle 78.9^o$A. Ces valeurs de la tension et du courant sont prises comme référence pour les convertisseurs série et shunt respectivement.

La tension modulée par le convertisseur série est une tension continue de 9 kV. Cette tension continue est fournie par une source autonome mais elle pourrait être obtenue de la source triphasée par un redresseur alimentant un condensateur intermédiaire. Le convertisseur de courant shunt à la sortie de la ligne est un redresseur qui charge un condensateur.

VI.6.5 Résultats

La Figure 6.21 montre les tensions à la source après le transformateur (Figure 6.21c), les tensions des barres A à l'entrée et à la sortie de la ligne (Figure 6.21a), la tension série injectée dans la phase A à la source par le convertisseur MLI (Figure 6.21b), et le courant shunt injecté à la barre A à la sortie du Corridor (Figure 6.21d).

Les courants à la source, à la charge et dans les lignes saines sont montrés à la Figure 6.22. La Figure 6.22a et la Figure 6.22b confirment la symétrie résultant de la compensation série et shunt à la source et à la charge respectivement. L'exactitude de la compensation est montrée par un taux de séquence homopolaire et de séquence inverse quasi nul (inférieur à 0.03%; Figure 6.22d). Le courant dans la phase A des lignes saines est 1.5 le courant nominal comme montré à la Figure 6.22c et donc, les lignes doivent être conçues pour supporter cette intensité.

En comparaison avec la compensation classique (Figure 6.10 et Figure 6.11) on relève la même efficacité à restaurer la symétrie avec, toute fois, une plus grande précision quant à l'utilisation des FACTS. Cependant, à Utiliser les FACTS, on augmente le contenu harmonique des tensions (Figure 6.21c, Figure 6.21b) et des courants (Figure 6.21d) à causes de la nature non linéaire des convertisseurs.

Figure 6.21c

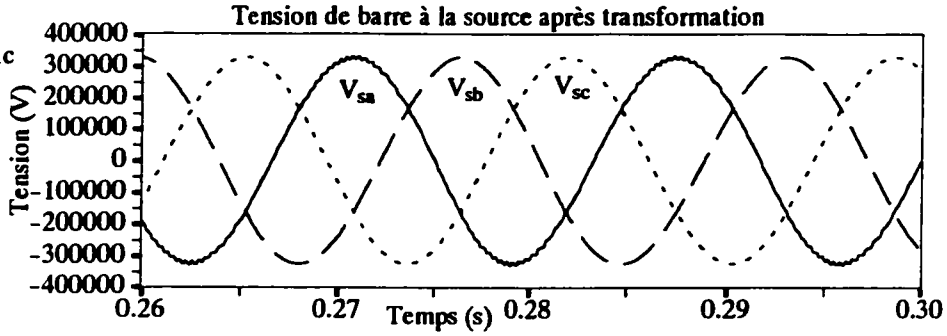


Figure 6.21a

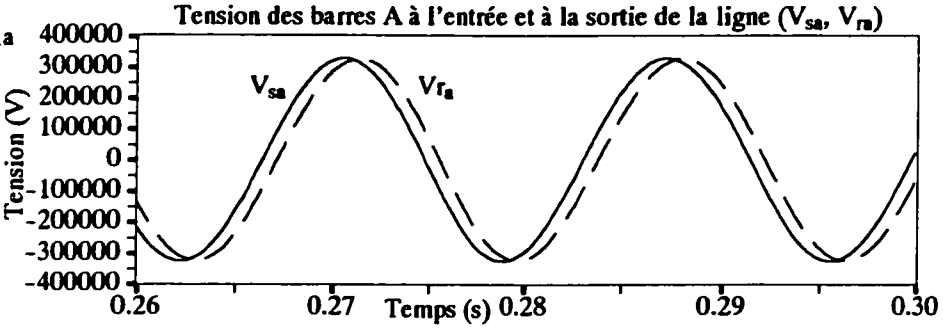


Figure 6.21b

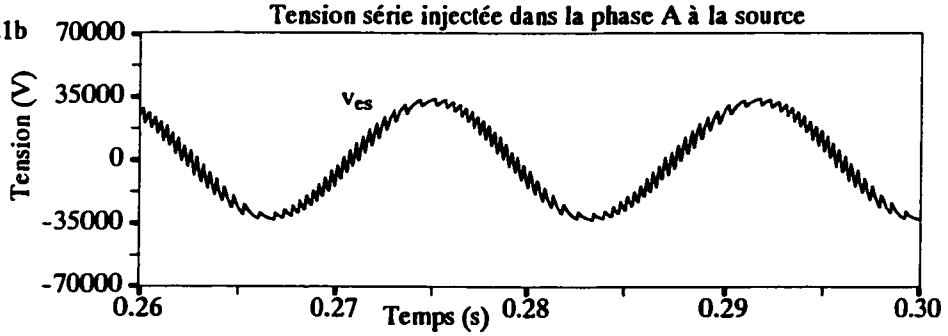


Figure 6.21d

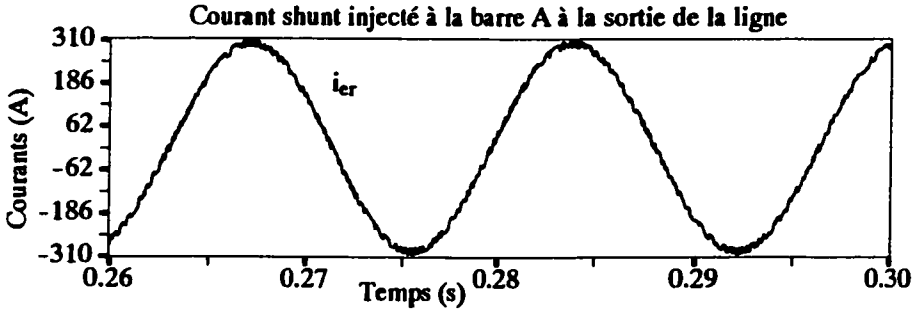


Figure 6.21 Simulation de l'exploitation asymétrique de trois lignes à 400 kV, 2000 MW avec des FACTS: tensions dans le réseau et courant injecté

Figure 6.22a

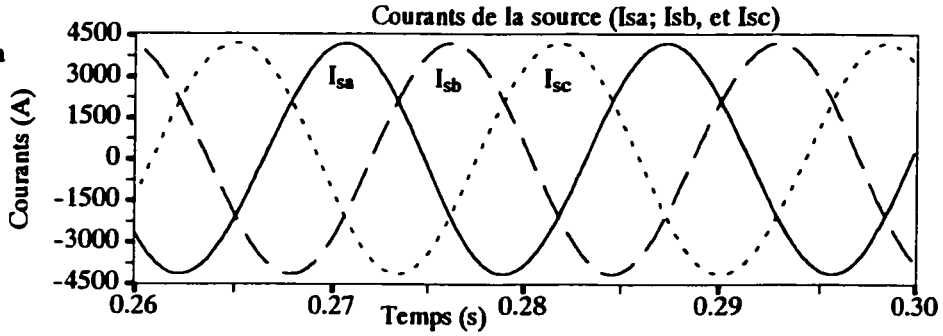


Figure 6.22b

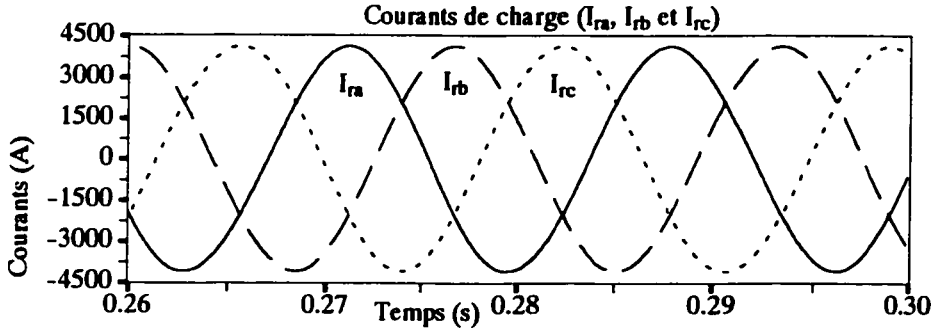


Figure 6.22d

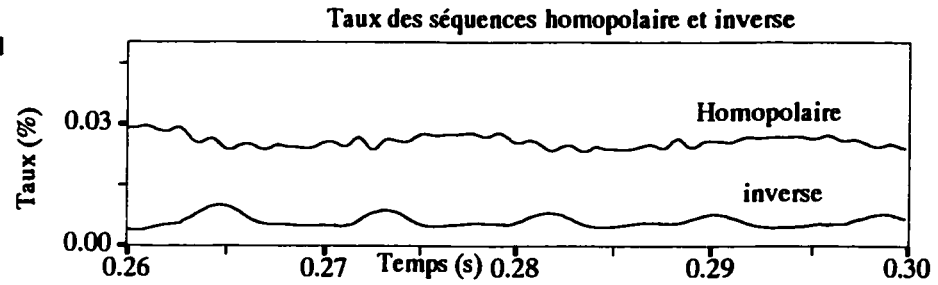


Figure 6.22c

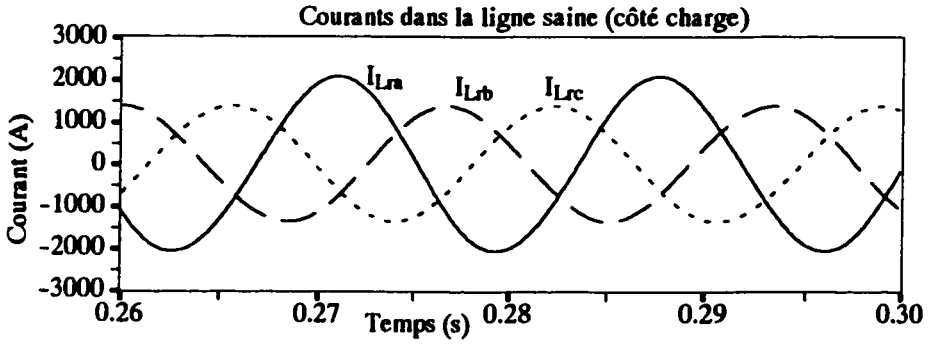


Figure 6.22 Simulation de l'exploitation asymétrique de trois lignes à 400 kV, 2000 MW avec des FACTS: courants dans le réseau

VI.7 RÉSUMÉ

Les simulations effectuées dans ce chapitre concernent l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ou avec plusieurs lignes, aussi bien par l'utilisation de dispositifs de compensation conventionnels que par l'utilisation de dispositifs de compensation au sommet de l'art qui sont les FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Les dispositifs de compensation conventionnels offrent une bonne précision de compensation. Ils ne fournissent que de la puissance réactive et ils ne produisent pas d'harmoniques.

Les dispositifs de compensation modernes, les FACTS, offrent une meilleure précision et une plus grande flexibilité dans la compensation car ils peuvent fournir de la puissance active et réactive à la fois. Le contenu harmonique requiert une attention particulière car ces dispositifs non linéaires utilisent la commutation d'interrupteurs d'électronique de puissance pour la conversion de l'énergie. La commutation peut entraîner la production d'harmoniques non synchrones avec la fréquence du réseau.

Les résultats de simulation obtenus valident les développements théoriques effectués dans les chapitres IV et V et montrent hors de tout doute, que l'exploitation asymétrique de corridors avec une seule ou plusieurs lignes est réalisable en pratique, si les dispositifs appropriés sont mis en oeuvre.

CHAPITRE VII ANALYSE ÉCONOMIQUE

Par analyse économique on entend d'abord une évaluation du coût de mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique puis une comparaison de ce coût avec : i) le coût de l'énergie non livrée (perte de charge liée au LOLE); ii) le coût de l'installation d'une nouvelle ligne et enfin une comparaison du coût des différentes options, i.e, dispositifs modernes par rapport aux dispositifs conventionnels, effet du nombre de lignes, etc.

VII.1 COÛTS D'INSTALLATION DE L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE ET COÛT D'UNE NOUVELLE LIGNE

VII.1.1 CORRIDOR AVEC UNE SEULE LIGNE

Les coûts d'installation de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ligne sont montrés au Tableau 7.1 pour la compensation avec des dispositifs conventionnels et au Tableau 7.2 pour la compensation avec des dispositifs modernes (FACTS). Le coût total de la compensation avec les dispositifs conventionnels est 4.3 M$ dont seulement 0.2 M$ pour la compensation série. Ce coût est bien inférieur au coût d'une nouvelle ligne de 120 kV et 100 km estimé approximativement à 10 M$ (Picard, Galiana, McGillis, 1997, [57]). Le coût total de la compensation par dispositifs FACTS est 11.8 M$, ce qui est supérieur au coût d'une nouvelle ligne de 100 km de long .

Dans le cas d'un corridor avec une seule ligne, la puissance de la compensation pour l'exploitation asymétrique dépend, plus, des courants et tensions de charge et de source. Lorsque la tension et la puissance sont fixées, la puissance des compensateurs de séquence inverse et homopolaire ne dépend pas de la longueur de la ligne. Seule la puissance de la compensation série dépend de la longueur de la ligne. Ainsi par exemple, le coût de compensation d'une ligne de 150 km à 120 kV par dispositifs conventionnels est 4.5 M$ tandis que le coût de compensation par FACTS est de 12.00 M$. Le coût d'une nouvelle ligne de même longueur et de même niveau de tension est de 15 M$, ce qui est largement supérieur au coût résultant de la mise en oeuvre des deux types de compensation.

Tableau 7.1: Puissance réactive pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 100 km avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels

Puissance totale transportée P = 50 MW					
Référence Figure 6.1			Q (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série			5.2	40	**0.2**
Compensation shunt	Séquence inverse	Transformateurs	60	10	0.60
		réactances	67.87	40	2.72
		Matrice de commutation	67.87	4	0.27
		Total Inverse			3.6
	séquence homopolaire		51.5	10	0.52
	Total Shunt				**4.1**
Coût Total					**4.3**

Tableau 7.2: Puissance réactive pour l'exploitation asymétrique d'une ligne de 120 kV, 100 km avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs modernes

Puissance totale transportée P = 50 MW				
Référence: Figure 6.12, Figure 6.13 et Tableau 6.1		Puissance (Mva)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série		5.144	100	**0.51**
Compensation shunt	à la source	51.5	100	5.15
	à la charge	50.89	100	5.09
	Total Shunt	102.39	100	**10.24**
	Transformateurs	100	10	**1.00**
Coût Total				**11.8**

VII.1.2 Corridor avec deux lignes

Les coûts d'installation de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec deux lignes de 400 kV et 150 km sont montrés au Tableau 7.3 pour la compensation avec des dispositifs conventionnels et au Tableau 7.4 pour la compensation avec des dispositifs modernes (FACTS).

Tableau 7.3 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels

Puissance totale transportée P = 1379MW			
Référence Figure 6.6	*Q* (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série	282	40	11.3
Compensation shunt	146	40	5.8
Coût Total			17.1

Tableau 7.4 Puissance réactive pour la compensation de deux lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs modernes

Puissance totale transportée P = 1400MW			
Référence Figure 6.17	*Q* (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série	282	100	28.2
Compensation shunt	146	100	14.6
Coût Total			42.8

Le coût total de la compensation avec les dispositifs conventionnels est 17.1 M$ (Tableau 7.3). Dans cette option le coût de la compensation série (11.3 M$) est très supérieur à celui de la compensation shunt (5.8) à cause du nombre de phases à compenser.

Le coût total de la compensation par dispositifs FACTS est 42.8 M$ (Tableau 7.4) avec une proportion de 2 contre 1 pour la compensation série.

Le coût total d'une nouvelle ligne de 400 kV, 150 km étant estimé à 75 M$ (0.5 M$/km) (Picard, Galiana, McGillis, 1997, [57]), on constate que le coût de la compensation par FACTS est seulement la moitié de celui d'une nouvelle ligne. Le coût de la compensation classique est largement en dessous du coût de la compensation moderne (2.5 fois inférieur) et de celui d'une nouvelle ligne (77% inférieur). La compensation classique est donc la plus efficace en terme de coût, pour cette configuration.

VII.1.3 Corridor avec trois lignes

Le Tableau 7.5 montre les coûts d'installation de l'exploitation asymétrique d'un corridor avec trois lignes de 400 kV et 150 km utilisant la compensation conventionnelle tandis que le Tableau 7.6 montre les coûts de la compensation avec des dispositifs modernes (FACTS).

Tableau 7.5 Puissance réactive pour la compensation de trois lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte, par l'utilisation de dispositifs conventionnels

Puissance totale transportée P = 2020MW			
Référence Figure 6.9	*Q* (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série	201	40	8.04
Compensation shunt	146	40	5.84
Coût Total			13.9

Tableau 7.6 Puissance réactive pour la compensation de trois lignes de 400 kV, 150 km en exploitation asymétrique avec une phase ouverte par l'utilisation de dispositifs modernes

Puissance totale transportée P = 2020MW			
Référence Figure 6.20	*Q* (Mvar)	Coût unitaire ($/kVA)	Coût total (M$)
Compensation série	201	100	20.1
Compensation shunt	146	100	14.6
Coût Total			34.7

Le coût de la compensation conventionnelle est 13.9 M$ (Tableau 7.5). Celui de la compensation par les FACTS est 34.7 M$ (Tableau 7.6) soit plus du double du côut de la compensation avec des dispositifs conventionnels. Cependant, par rapport au coût d'une nouvelle ligne (75 M$), l'installation de FACTS pour l'exploitation asymétrique est plus économique car elle couterait deux fois moins.

Les coûts de compensation pour l'exploitation asymétrique d'un corridor de deux lignes par dispositifs conventionnels (17.1 M$, Tableau 7.3) ou par FACTS (42.8,

Tableau 7.4) sont supérieurs à ceux d'un corridor de trois lignes (13.9 M$, Tableau 7.5 et 34.7 M$, Tableau 7.6). Cela s'explique par le fait que, si l'on admet la coupure d'une seule phase de ligne à la fois, alors la puissance réactive nécessaire à la compensation shunt reste constante tandis que la puissance réactive pour la compensation série diminue avec le nombre de lignes .

Même si la puissance requise pour la compensation est la même quelque soit l'option de compensation, la compensation conventionnelle est nettement avantagée pour toutes les options, par un coût relativement bas et par une grande simplicité de mise en oeuvre au plan technique.

VII.2 Coûts d'installation de l'exploitation asymétrique et coût de l'énergie non livrée

VII.2.1 Évaluation du coût de l'énergie non livrée

On entend par coût de l'énergie non livrée, le coût des pertes liées à l'espérance mathématique de l'énergie non livrée (Loss of Load Expectation - LOLE -), ou au risque de non transmission de l'énergie. Sans l'exploitation asymétrique, le risque de non transmission de l'énergie n'est pas nul et est donné par l'équation suivante :

$$(LOLE)_{sym} = P_t\left(1-p^3\right) \tag{241}$$

tandis qu'avec l'exploitation asymétrique, le risque de non transmission est pratiquement nul et donné par :

$$(LOLE)_{asym} = P_t(1-p)^3 \tag{242}$$

Comme discuté à la section III.4.2.3., le bénéfice de l'exploitation asymétrique résulte de la différence entre l'espérance de l'énergie non transmise dans l'exploitation symétrique et celle de l'énergie non transmise dans l'exploitation asymétrique (équation (59)).

$$\Delta LOLE = \left[\left(1-p^3\right) - (1-p)^3\right] f_{ch} P_t \tag{243}$$

p est la probabilité de transmission de l'énergie par phase, P_t est la puissance totale transportée et f_{ch} est un facteur de charge qui tient compte du cycle de la charge, comme discuté à la section III.4.2.3.

L'énergie non livrée est évaluée au coût de production de l'énergie soit en moyenne 2500 $/kW. Le bénéfice de l'exploitation asymétrique en terme monétaire est aussi évalué au coût de production de l'énergie et peut être interprété comme le coût de la non mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique. Autrement dit, c'est ce qu'on perd quand l'exploitation asymétrique n'est pas mise en oeuvre. Ce coût représente un capital à investir pour réduire le risque de non transmission, donc l'espérance mathématique de l'énergie non livrée, à un niveau acceptable (idéalement nul).

Tableau 7.7 Coût total de l'énergie non livrée

Nombre de lignes	1	2	3
Tension (kV)	120	400	400
longueur (km)	100	150	150
Puissance transportée (MW)	50	1400	2000
facteur de charge	75%	75%	75%
Probabilité de défaillance d'une phase (Canadian Electrical Association, 2000, table 2, p.4)	0.0013	0.002	0.002
Espérance de l'énergie non livrée (MW)	0.2	8.4	12
Coût unitaire de l'énergie non livrée ($/kW)	2500	2500	2500
Coût Total de l'énergie non livrée (M$)	**.4**	**16**	**23**

Le Tableau 7.7 montre les résultats de calculs du coût total de l'énergie non livrée pour un corridor avec une seule ligne de 120 kV et 100 km, un corridor avec deux lignes de 400 kV et 150 km et un autre corridor avec trois lignes de 400 kV et 150 km.

La première configuration (une ligne de 120 kV, 100 km) a un coût de 0.4 M$. Ce coût est relativement faible parce que la puissance totale transportée est aussi relativement faible (50 MW). Par contre, pour les lignes de 400 kV où la puissance transportée est très grande (1400 MW et 2000 MW), le coût de l'énergie non livrée devient significatif : 16 M$ et 23 M$ respectivement. Cela s'explique par le fait que le coût de l'énergie non livrée

croît avec la puissance transportée lorsque la probabilité de défaillance est la même, comme l'indique l'équation (243).

VII.2.2 Réduction du risque de non transmission de l'énergie

Pour réduire le risque de non transmission de l'énergie, on doit choisir entre la construction d'une ligne supplémentaire, la mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique et la construction d'une unité de production fournissant l'équivalent de l'espérance de l'énergie non livrée à l'endroit de la charge. On doit donc comparer le bénéfice de l'exploitation asymétrique (en dollars), avec le coût de mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique et le coût de construction d'une nouvelle ligne.

Tableau 7.8 Comparaison des coûts des options de réduction du risque de non transmission de l'énergie

Nombre de lignes	1	2	3
Tension (kV)	120	400	400
longueur (km)	100	150	150
Puissance transportée (MW)	50	1400	2000
facteur de charge	75%	75%	75%
Option 1; Coût de l'énergie non livrée (M$)	**.4**	**16**	**23**
Option 2; Coût de l'exploitation asymétrique conventionnelle (M$)	**4.3**	**17.1**	**13.9**
Option 3; Coût de l'exploitation asymétrique par FACTS (M$)	**11.8**	**42.8**	**34.7**
Option 4; Coût d'une nouvelle ligne (M$)	**10**	**75**	**75**

Le Tableau 7.8 donne un récapitulatif des coûts des quatre options possibles pour chacune des configurations étudiées plus haut (une ligne de 120 kV et 100 km, deux et trois lignes de 400 kV et 150 km).

Pour une seule ligne de 120 kV et 100 km de long, transportant 50 MW, le coût de l'énergie non livrée (0.4 M$) est plus bas que celui de l'exploitation asymétrique par dispositifs conventionnels (4.3 M$) et encore plus bas que le coût d'une nouvelle ligne (10 M$) et le coût de la compensation par les FACTS (11.8 M$). Cette situation s'explique,

comme mentionné plus haut, par le fait que le coût de l'énergie non livrée dépend de la puissance transportée et de la longueur de la ligne qui, elle, détermine l'exposition aux aléas. La puissance transportée par une ligne de 120 kV est relativement faible (50 MW) d'où la faiblesse du coût de l'énergie non livrée. Le coût de l'énergie non livrée dans le cas d'un corridor avec une seule ligne est très faible mais cependant, le coût social associé à la perte totale de l'alimentation dans le cas de l'exploitation standard d'une seule ligne est exorbitant et l'on doit en tenir compte. Ce coût social n'est pas pris en compte dans le LOLE et le calcul du coût de l'énergie non livrée. Son évaluation n'est pas adressée par la présente thèse.

Pour deux lignes, le coût de l'exploitation asymétrique par des dispositifs conventionnels (17.1 M$) est comparable au coût de l'énergie non livrée (16 à 18 M$ selon le facteur de charge). L'option de l'exploitation asymétrique par FACTS avec 42.8 M$ est beaucoup plus coûteuse que l'énergie non livrée et reste moins économique que la compensation conventionnelle. La dernière option, à savoir la construction d'une nouvelle ligne, a un coût de 75 M$, ce qui est loin d'être pratique.

Pour trois lignes, le coût de l'énergie non livrée (23 M$) est nettement supérieur à celui de l'exploitation asymétrique avec des dispositifs conventionnels qui est la meilleure solution au plan du coût avec 13.9 M$. La compensation par les FACTS et la construction d'une nouvelle ligne avec des coûts de 34.7 M$ et 75 M$ respectivement sont désavantagées par rapport aux deux autres options.

Le Tableau 7.9 donne les coûts d'investissement pour l'exploitation asymétrique de corridors avec une, deux et trois lignes à 735 kV et des dispositifs conventionnels, confirmant la baisse du coût avec le nombre de lignes (97.4 M$, 40.6 M$, 34.3 M$, pour une, deux et trois lignes respectivement). Le coût des FACTS est 2.5 fois supérieur à cause du coût unitaire de 100$/kVA. Le coût d'une nouvelle ligne à 735 kV estimé à 113 M$ (750 k$/km, Picard, Galiana, McGillis, 1997, [57]) est encore plus élevé, confirmant l'avantage de l'exploitation asymétrique par rapport à la construction d'une nouvelle ligne.

Tableau 7.9 Coût d'investissement de l'exploitation asymétrique pour les lignes 735 kV, 150 km, avec dispositifs conventionnels.

	Coût unit.	1 ligne 735 kV (1800 MW)		2 lignes 735 kV (3600 MW)		3 lignes 735 kV (5400 MW)	
	$/kVA	Mvar	M$	Mvar	M$	Mvar	M$
Compensation série	40	242.5	**9.7**	639	**25.6**	480	**19.2**
Compensation Shunt	40	2193	**87.7**	375	**15**	375	**15**
Coût Total (M$)			**97.4**		**40.6**		**34.2**

VII.3 Résumé

Le coût d'investissement pour la réalisation de l'exploitation asymétrique aussi bien par compensation conventionnelle que par compensation moderne, a été déterminé pour des corridors avec une, deux ou trois lignes. L'analyse des coûts montre que la compensation conventionnelle est plus économique que la compensation par FACTS dans tous les cas examinés, principalement à cause du coût élevé des convertisseurs utilisés par les FACTS. On montre aussi que le coût d'investissement pour la réalisation de l'exploitation asymétrique diminue avec le nombre lignes dans un corridor donné et que, dans tous les cas, ces coûts sont inférieurs au coût de construction d'une nouvelle ligne.

Le coût de l'énergie non livrée ou le coût du risque ne non transmission de l'énergie (LOLE) a aussi été déterminé pour des corridors avec une, deux et trois lignes sur la base des statistiques les plus récentes et relatives aux pannes des lignes de transport d'électricité au Canada (Canadian Electrical Association, 2000, [55]). Le coût du risque de non transmission de l'énergie (LOLE) pour un corridor avec une seule ligne est bien inférieur à celui de l'investissement pour la réalisation de l'exploitation asymétrique, mais ne tient pas compte du coût social de la perte totale de la ligne, i.e. de l'alimentation. D'un autre côté, le coût du risque de non transmission de l'énergie pour les corridors avec plusieurs lignes est supérieur au coût d'investissement pour la réalisation de l'exploitation asymétrique justifiant l'adoption des stratégies proposées.

CHAPITRE VIII APPLICATION DE L'EXPLOITATION ASYMÉTRIQUE: CHAUFFAGE PAR ASYMÉTRIE POUR LE DÉGEL DES LIGNES ÉLECTRIQUES

Dans les chapitres IV et V où l'on a discuté des stratégies de mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique par la compensation réactive, on a vu que la résistance série de la ligne quoi que petite, constitue un obstacle notable que l'on contournait par la stratégie appropriée. On se pose, ici, la question de savoir dans quelles circonstances peut-on tirer avantage de la résistance de la ligne. Dans le contexte d'une application particulière et originale de l'exploitation asymétrique qu'on explore dans ce chapitre, la petite résistance de la ligne devient un allié stratégique: il s'agit du chauffage par asymétrie des conducteurs des lignes électriques. En effet, l'exploitation asymétrique permet de provoquer un déséquilibre des courants de la ligne et la surcharge d'une ou deux phases de sorte à créer une surchauffe par effet Joule. Cette surchauffe peut être utilisée, par exemple, pour le déglaçage des lignes verglacées dans les régions froides (Sana, Marceau, Olivier, McGillis et Do, 2000, [58]).

L'accumulation de glace sur les lignes de transport d'électricité, en hiver, peut entraîner la rupture des conducteurs ou la chute en cascade des structures et conduire à des catastrophes techniques, socio-économique et environnementale (Nicolet et al., 1999, [6-7]). Il est très difficile de chauffer suffisamment pour le déglaçage, une ligne triphasée avec des courants symétriques par l'augmentation de la charge car la limite de transfert maximale en puissance de la ligne, est atteinte bien avant les limites thermiques qui lui sont largement supérieures. Le chauffage par asymétrie permet de lever cette difficulté car on tire avantage de la possibilité de reporter la charge d'une ou deux phases sur les autres sans le besoin de modifier la charge globale alimentée par la ligne. Le déséquilibre créé par l'asymétrie est confiné au sein de la ligne et n'affecte pas les réseaux aux bouts respectifs de celle-ci.

Le déglaçage des lignes par asymétrie est une méthode innovatrice. Les sections qui suivent décrivent le contexte de l'innovation, le principe de l'innovation, une méthodologie de calculs du système de chauffage en vue du dégel des lignes, quelques exemples de réalisations, une discussion des principaux avantages et inconvénients et un listing de travaux futurs à effectuer pour compléter cette innovation.

VIII.1 PROBLÉMATIQUE DU GEL DES LIGNES DE TRANSPORT

VIII.1.1 LES PRINCIPALES FORMATIONS DE GLACE SUR LES LIGNES

Les principales formations de glace qui conduisent à de grandes charges sur les lignes sont le givre léger, le givre lourd, et le verglas.

Le givre léger se forme surtout dans les régions montagneuses quand la température est basse (-10°C) et les vents plutôt faibles mais humides et porteurs de nuages constitués de très fines gouttelettes d'eau sur-refroidies. La congélation des gouttelettes d'eau au contact avec la structure des lignes est presque instantanée. Le givre léger est de structure granulaire, de couleur blanc-opaque, de densité moyenne à faible (inférieure à 0,6) et d'adhésion faible.

Le givre lourd se forme à des températures moins basse que le givre léger mais avec des vents plus forts et des gouttelettes d'eau se congelant moins vites au contact avec la structure des lignes. La glace se forme en couches alternativement claires et opaques avec une adhésion bien ferme. La densité du givre lourd varie entre 0,6 et 0,9.

Le verglas apparait surtout dans les plaines à la suite d'une pluie verglaçante, à des températures proches du point de congélation et accompagnées de vents forts (10 m/s). La glace est transparente, de structure amorphe et d'adhésion ferme. La densité du verglas se situe entre 0,9 et 0,92.

VIII.1.2 LE PROCESSUS DU DÉPÔT DE LA GLACE SUR LES LIGNES

Le dépôt de glace commence à l'endroit des structures de support des lignes puis, s'étend graduellement le long des conducteurs de part et d'autre des pylônes. La glace se

dépose sur les conducteurs des lignes, d'abord d'un seul côté (unilatéralement) puis, peu à peu, le conducteur se tourne par gravité et le dépôt de glace se distribue graduellement autour de celui-ci en une couche plus ou moins uniforme. On montre que dans le cas d'une tempête prolongée et de caractère invariant, l'épaisseur de la glace recouvrant un conducteur dépend du diamètre du conducteur, de la vitesse du vent et du rayon des particules de givre. Cette épaisseur de glace tend vers une limite qui ne dépend que de la vitesse du vent et du rayon des particules de givre (Timascheff, 1970, [59] ; Bourgsdorf, Nikiphorov et Zelichenko, 1968, [60]). Ceci explique que dans le cas de fort givre, les dimensions atteintes par les conducteurs engivrés deviennent voisines quel que soit le diamètre de base de ces conducteurs. Dans ces conditions, les conducteurs de diamètre plus faible tels que les fils de garde des lignes haute tension sont plus vulnérables.

VIII.1.3 Les effets de la glace sur les lignes électriques aériennes

Le dépôt de glace sur les lignes électriques aériennes peut avoir des effets mécaniques ou électriques.

Les effets mécaniques de la glace sur les lignes sont d'ordres statique et dynamique. Le poids de la glace augmente la charge statique dans les conducteurs et les structures porteuses et peut entraîner une rupture de ceux-ci si la limite de charge statique est atteinte. Le diamètre des conducteurs chargés de glace ayant augmenté, la pression du vent augmente et la susceptibilité des conducteurs au galop et aux vibrations causés par le vent augmente. Ces effets dynamiques causés par le vent induisent des contraintes qui sont susceptibles de provoquer la rupture par fatigue ou par surcharge des conducteurs, des pylônes ou des éléments de suspension.

Les effets électriques de l'accumulation de glace sur les lignes sont surtout la modification de l'isolement: l'accumulation de glace sur les isolateurs favorise l'apparition d'arcs électriques causant des interruptions de service. L'élongation du conducteur de protection peut conduire à des court-circuits par contact de celui-ci avec les conducteurs de phases.

L'accumulation de glace sur les lignes peut résulter en une catastrophe technologique, économique, sociologique et environnementale comme ce que le Québec à vécu en janvier 1998 (Nicolet et al, 1999, [6-7]). De ce fait, le déglaçage des lignes qui constitue une solution efficace au problème du gel revêt un caractère stratégique.

VIII.1.4 Les méthodes de déglaçage des lignes électriques

Les principales méthodes de déglaçage mises en oeuvre sont les méthodes mécaniques, et les méthodes thermiques.

Les méthodes mécaniques sont basées sur le cassage de la glace soit par des impulsions électromagnétiques (Allaire et al., 1997, [62]), soit par roulage ou tirage d'un mécanisme le long du conducteur pour briser le manchon de glace qui s'y est formé. Le mécanisme de tirage peut être mis en oeuvre par un système embarqué. Le déglaçage par roulage est très lent et lors de tempête provoquant de fortes accumulations de glace il est très difficile de l'étendre à l'ensemble du réseau dans des temps convenables.

Les méthodes de déglaçage thermiques sont basées sur la fonte de la glace par effet Joule ou par courant de Foucault. Les techniques utilisant l'effet Joule sont les plus en vue. Le chauffage est obtenu en augmentant le courant transitant dans les lignes soit par l'augmentation de la charge (Pohlman et Landers, 1982, [63]), soit par un court circuit en bout de ligne (méthode de Manitoba Hydro) (Nicolet et al, 1999, [6-7]). L'augmentation de la charge pour accroître le courant de ligne n'est pas toujours applicable car la charge possède un cycle de pointes et de creux pratiquement immuable. La méthode mise au point par Manitoba Hydro est rapide et efficace mais son application reste limitée à de courtes sections de ligne car elle requiert une énergie relativement élevée (Nicolet et al, 1999, [6-7]). Cette technique exige aussi l'interruption de l'alimentation de la charge connectée à la ligne qui subit le court-circuit pendant la durée de l'opération de déglaçage. Ce faisant, les poches de charge alimentées par une artère peuvent rester non alimentées durant quelques heures (3 heures environ). Peirce (1957, [64]) a proposé un dispositif dans lequel la charge est normalement alimentée par deux conducteurs parallèles et isolés l'un de

l'autre. En présence de verglas, l'un des conducteurs est coupé et le conducteur restant subit une surcharge et une surchauffe qui réalise le dégel. Greenfield et al. (Greenfield et al., 1959, [65]) ont proposé un système avec deux conducteurs coaxiaux isolés, l'un interne l'autre externe. Dans les conditions normales, les deux conducteurs sont reliés en parallèle pour transmettre le courant. En présence de givre, un courant élevé est transité par le conducteur externe pour faire fondre la glace accumulée sur le câble. Burgsdorf et al (Burgsdorf et al. 1979, [66]) ont proposé une méthode par laquelle on applique un courant continu à une ligne de transport aérienne. Genrikh et al. (Genrikh et al., 1978, [67-69] et 1979, [70]) ont proposé quatre dispositifs "off-line" utilisant un transformateur triphasé (Genrikh et al., 1978, [67]) ou du courant continu (Genrikh et al., 1978, [68-69] et 1979, [70]) pour charger une phase coupée afin de la surchauffer. Allaire et al. ont proposé une méthode par laquelle le courant est forcé de circuler dans quelques conducteurs parmi un faisceau de sorte que la puissance excessive absorbée par les conducteurs produit de la chaleur par effet Joule propre au déglaçage du faisceau (Allaire et al., 2000, [73]).

La nouvelle méthode faisant l'objet de cette proposition est une méthode thermique basée sur l'effet Joule et l'exploitation asymétrique ou l'exploitation d'une ligne triphasée avec des courants de ligne non symétriques (par exemple une phase ou deux coupées). Cette méthode ne nécessite pas la déconnexion de la charge pendant le processus de chauffage et de dégel. Le principe de la méthode est décrit dans la section suivante.

VIII.2 Principe du chauffage par asymétrie pour le dégel des lignes

La Figure 8.1 illustre le principe du chauffage des lignes par asymétrie. On y montre deux réseaux électriques (Réseau S et Réseau R), supposés avoir des tensions équilibrées symétriques et reliés par une ligne triphasée représentée par le modèle des lignes courtes. Le modèle des lignes courtes est choisit pour des fins d'illustration.

Le principe du chauffage de la ligne par asymétrie, consiste à ouvrir une ou deux phases et à accroître le courant dans la ou les phases saines en leur superposant le courant des séquences négative et homopolaire, afin d'y accroître les pertes par effet Joule

nécessaires à la fonte de la glace. Cela est équivalent à transférer le courant qui circulait dans la ou les phases ouvertes sur la ou les phases non ouvertes tout en préservant l'intégrité des deux réseaux aux bouts de la ligne et, possiblement, sans affecter les tensions et courants de ces réseaux.

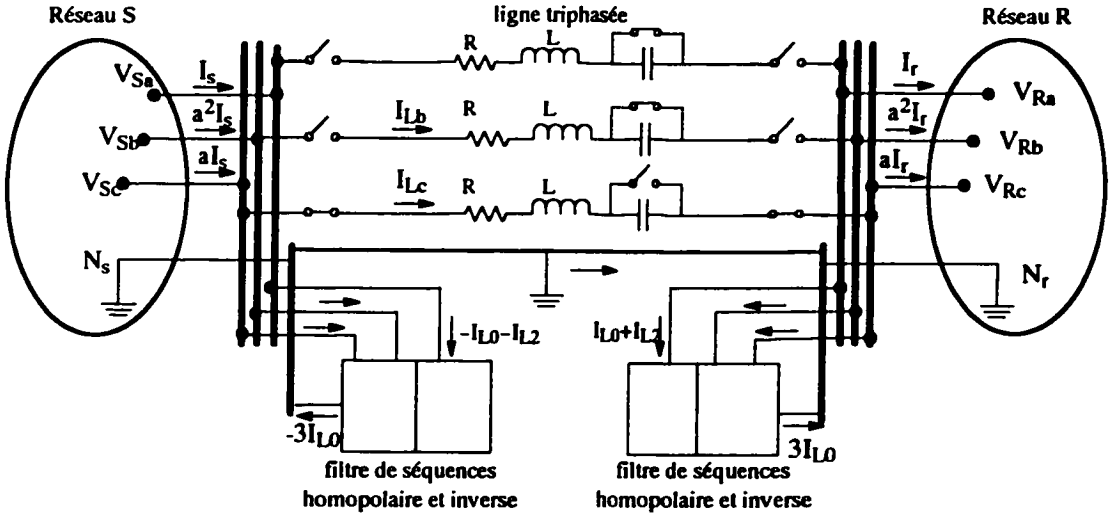


Figure 8.1 Illustration du principe de chauffage par asymétrie

L'objectif de mise en oeuvre du principe de chauffage par asymétrie en vue du dégel des lignes verglacées c'est de calculer les pertes résistives et de les corréler aux conditions climatiques afin de réaliser les conditions de la fonte de la glace.

Il est à noter que la coupure d'une phase ou deux constituent des cas extrêmes. Dans certaines situations il est possible d'obtenir le chauffage sans coupure de phase. On peut se contenter de déséquilibrer les courants circulant dans les trois phases de sorte que le courant circulant dans la phase à chauffer soit juste suffisant pour les besoins du dégel. Pour vérifier cela il faut connaître la relation entre les conditions climatiques et le courant nécessaire au chauffage de la phase en question.

Dans la Figure 8.1, les phases a et b de la ligne sont ouvertes et on y ajoute des éléments de compensations pour filtrer les courants des séquences homopolaire et inverse et pour accroître le courant dans la phase restante comme suit :

- un compensateur série (ici constitué d'un condensateur) dans la phase saine (ici la phase c) pour réduire la réactance série et augmenter ainsi le courant transitant dans cette phase. Le condensateur série n'est pas nécessaire si la tension du réseau de droite n'est pas régulée autour d'une consigne; auquel cas on tolère une plus grande chute de tension en bout de ligne pendant l'exploitation asymétrique.
- deux filtres de séquence homopolaire (un à chaque bout de ligne). Ces filtres peuvent être constitués chacun par un transformateur en T, en zigzag ou Δ-Y. L'utilisation d'un transformateur en T, en Zigzag ou Δ-Y conduit habituellement à une connexion à la terre, mais dans le cas de la présente thèse on montre qu'un autre chemin est possible. Les filtres de séquence homopolaire ne sont pas nécessaires lorsque que réseau de transport n'est pas mis à la terre (section VIII.2.6)
- deux compensateurs de séquence inverse (un à chaque bout de ligne). Les compensateurs de séquence inverse peuvent être montés en étoile ou en triangle.

Le condensateur série et les filtres de séquence inverse et homopolaire peuvent être remplacés de manière équivalente par des convertisseurs de courant.

Dans les conditions de l'exploitation asymétrique (Figure 8.1) l'absence d'une phase fait reporter le courant dans les phases saines dont l'impédance est réduite grâce à la compensation réactive série. Dans les phases saines compensées, les courants de séquence inverse et homopolaire s'ajoutent au courant de séquence directe pour produire un courant total I_L dans la ligne. Ainsi, en superposant les courants de séquence homopolaire et inverse résultant du déséquilibre de la ligne fonctionnant avec une phase ou deux en moins, au courant normal dans la ou les phases fonctionnelles, on accroît grandement les pertes par effet Joule d'où le chauffage des lignes.

En ajoutant la compensation série, les tensions et la grandeur des courants aux deux bouts de la ligne ne sont pas affectées, seule l'angle des courants varie légèrement à cause de l'impossibilité de compenser la résistance de la ligne. Ainsi il n'est pas besoin d'augmenter la charge pour accroître le courant dans les phases.

VIII.2.1 DÉVELOPPEMENT DE L'INNOVATION

La mise en oeuvre du système de dégel dépend de plusieurs paramètres qui sont :

- le nombre de phases fonctionnelles : une phase fonctionnelle (i.e deux phases coupées); deux phases fonctionnelles ; trois phases fonctionnelles,
- utilisation ou non de la compensation série.
- transmission pendant l'exploitation asymétrique, de la même puissance qu'avant, ou d'une puissance arbitraire.

Dans les sections qui suivent, des calculs sont développés pour les cas suivants:

- une seule phase fonctionnelle avec compensation série
- une seule phase fonctionnelle sans compensation série
- ligne non mise à la terre.

La capacité du condensateur série est déterminée en fonction du courant que l'on veut faire circuler dans la phase saine (la phase c dans la Figure 8.1). Le courant de la phase saine peut être déterminé de deux manières différentes: Pour transporter la même puissance que les trois phases saines réunies i.e. avant la compensation (fonctionnement symétrique) ou pour transporter une puissance arbitraire donnée après compensation.

VIII.2.2 CHAUFFAGE DE LIGNE AVEC COMPENSATION SÉRIE ET UNE SEULE PHASE FONCTIONNELLE TRANSMETTANT UNE PUISSANCE ARBITRAIRE

La Figure 8.2 illustre le principe de chauffage par asymétrie pour le cas d'une seule phase fonctionnelle avec compensation série. Si l'on veut transiter dans la phase c la même puissance (moins les pertes additionnelles) que celle d'avant l'asymétrie (puissance des trois phases), il faut que le courant de séquence directe de la ligne dégradée et compensée soit dans le rapport approprié avec le courant fondamental de la ligne en situation normale.

La compensation rigoureuse de la séquence directe va impliquer la réduction de la résistance (R) de la ligne et cela n'est pas souhaitable dans ce cas précis puisqu'on veut s'en servir pour le déglaçage. Seule la réactance de ligne (X_L) qui est la plus part du temps très supérieure à la résistance (R) peut être réduite. A défaut de fournir le même courant en

grandeur et en angle, la compensation de la réactance peut être effectuée pour que la grandeur du courant de séquence directe soit dans le bon rapport avant et après compensation.

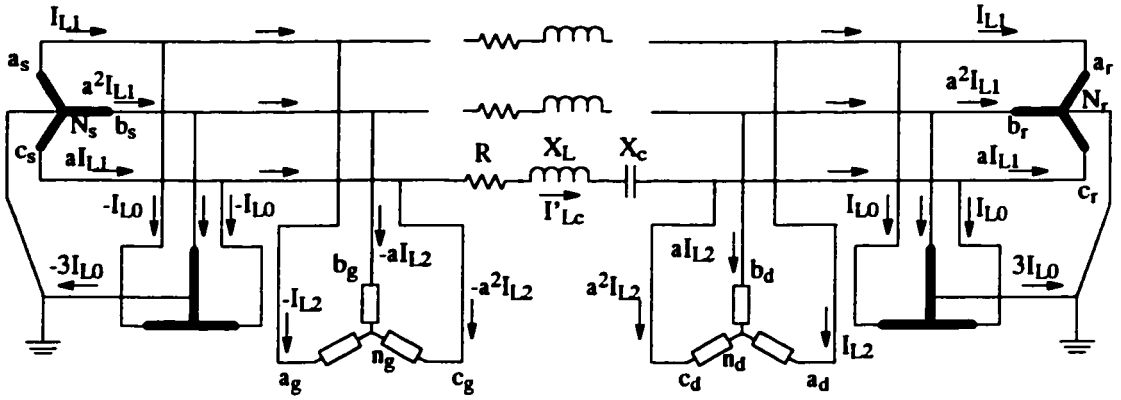


Figure 8.2 Principe de chauffage par asymétrie avec compensation série: cas d'une seule phase fonctionnelle

VIII.2.2.1 Capacité du condensateur série pour transmission d'un courant arbitraire

On suppose que les courants de ligne avant asymétrie sont équilibrés, symétriques et sont donnés par:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{La} &= \frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}_L} \\ \bar{I}_{Lb} &= a^2 \frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}_L} \\ \bar{I}_{Lc} &= a \frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}_L} \end{aligned} \qquad (244)$$

où $\bar{Z}_L = R + jX_L$ est l'impédance série de la ligne dans les conditions normales d'exploitation (symétrique), V_{Sa} et V_{Ra} sont les tensions ligne-neutre à l'entrée et à la sortie de la ligne respectivement et a, le phaseur $1 \angle 120^o$.

Durant l'exploitation asymétrique avec deux phases ouvertes, la réactance X_L de la ligne est réduite par la réactance X_c du condensateur série et cela résulte en une réactance équivalente de ligne X'_L telle que:

$$X'_L = X_L - X_c \tag{245}$$

Donc l'impédance de la ligne après compensation devient :

$$\bar{Z}'_L = R + jX'_L = R + j(X_L - X_c) \tag{246}$$

Les courants de la ligne durant l'exploitation asymétrique sont alors obtenus par:

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{La} &= 0 \\ \bar{I}'_{Lb} &= 0 \\ \bar{I}'_{Lc} &= \frac{\bar{V}_{Sc} - \bar{V}_{Rc}}{\bar{Z}'_L} = a\frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}'_L} \end{aligned} \tag{247}$$

et les courants de séquence résultants sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}'_{L1} \\ \bar{I}'_{L2} \\ \bar{I}'_{L0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a\dfrac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}'_L} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} \dfrac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}'_L} \\ a^2\dfrac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}'_L} \\ a\dfrac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{\bar{Z}'_L} \end{bmatrix} \tag{248}$$

On suppose un niveau de compensation k, et on veut faire circuler dans la phase c un courant λ fois plus élevé en valeur absolue que le courant dans la même phase avant compensation. On obtient donc les relations suivantes:

$$\frac{X_c}{X_L} = k \qquad \frac{|\bar{I}'_{Lc}|}{|\bar{I}_{Lc}|} = \lambda \qquad \frac{P'_c}{P_c} = \lambda^2 \tag{249}$$

Le courant dans la phase c avant compensation est donné par:

$$\bar{I}_{Lc} = \frac{\bar{V}_{Sc} - \bar{V}_{Rc}}{\bar{Z}_L} = a\frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{R + jX_L} \tag{250}$$

et le courant dans cette même phase c après compensation est obtenu par:

$$\bar{I}'_{Lc} = \frac{\bar{V}_{Sc} - \bar{V}_{Rc}}{\bar{Z}'_L} = a\frac{\bar{V}_{Sa} - \bar{V}_{Ra}}{R + jX'_L} \tag{251}$$

En effectuant le rapport des modules des deux courants on a :

$$\frac{1}{R^2 + X'^2_L} = \frac{\lambda^2}{R^2 + X^2_L} \tag{252}$$

et de là, on obtient la relation donnant la réactance équivalente après compensation :

$$X'_L = \frac{1}{\lambda}\sqrt{X_L^2 - (\lambda^2 - 1)R^2} \tag{253}$$

La valeur de la réactance capacitive pour la compensation série est donnée par:

$$X_C = X_L - X'_L = X_L - \frac{1}{\lambda}\sqrt{X_L^2 - (\lambda^2 - 1)R^2} = kX_L \tag{254}$$

et la relation entre le niveau de compensation et le rapport des courants est donnée par:

$$k = 1 - \frac{X'_L}{X_L} = 1 - \frac{1}{\lambda}\sqrt{1 - (\lambda^2 - 1)\frac{R^2}{X_L^2}} \tag{255}$$

On rappelle qu'en Haute et Très Haute tension, R est très inférieur à X_L, ($X_L >> 4R$), de sorte qu'il y a toujours une solution réelle pour X'_L et X_c.

Si l'on veut obtenir dans la phase saine un courant 3 fois supérieur au courant avant contingence, $\lambda = 3$, alors la valeur de la réactance totale équivalente de la ligne :

$$X'_L = \frac{1}{3}\sqrt{X_L^2 - 8R^2} \tag{256}$$

et la valeur de la réactance capacitive série est obtenue par :

$$X_c = X_L - X'_L = X_L - \frac{1}{3}\sqrt{X_L^2 - 8R^2} \tag{257}$$

Dans ces conditions on transmet la même puissance pendant le chauffage qu'avant.

VIII.2.2.2 PERTES PAR EFFET JOULE

Le courant circulant I'_{Lc} dans la phase saine est évalué à partir de la connaissance de l'impédance de cette phase après compensation par l'équation (251). La puissance perdue par effet Joule dans la phase saine (phase c) est obtenue par :

$$P'_c = R|\bar{I}'_{Lc}|^2 = \lambda^2 P_c \tag{258}$$

Pour $\lambda = 3$ la puissance perdue par effet Joule dans la phase saine (phase c) est neuf fois plus grande durant le chauffage. La puissance dissipée par unité de longueur est obtenue en divisant P'_c de la relation ci-dessus par la longueur totale de la ligne.

VIII.2.3 CHAUFFAGE DE LIGNE SANS COMPENSATION SÉRIE ET UNE SEULE PHASE FONCTIONNELLE TRANSMETTANT UNE PUISSANCE ARBITRAIRE

Lorsqu'on supprime le condensateur série de la phase c dans la Figure 8.2 on obtient une illustration du principe du chauffage par asymétrie pour le cas d'une seule phase fonctionnelle sans compensation série. Dans ce contexte, la tension en bout de ligne doit être modifiée afin de pouvoir transporter le même courant qu'avant l'asymétrie.

VIII.2.3.1 TENSION EN BOUT DE LIGNE POUR TRANSMISSION D'UN COURANT ARBITRAIRE

On suppose toujours que le courant avant asymétrie est équilibré symétrique (équation (244)). Les courants de ligne après compensation sont alors obtenus par :

$$\begin{bmatrix} I'_{La} \\ I'_{Lb} \\ I'_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{\overline{V}_{Sc} - \overline{V}'_{Rc}}{\overline{Z}_L} \end{bmatrix} \tag{259}$$

et les courants de séquence dans la ligne après compensation par :

$$\begin{bmatrix} \overline{I}'_{L1} \\ \overline{I}'_{L2} \\ \overline{I}'_{L0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a\dfrac{\overline{V}_{Sa} - \overline{V}'_{Ra}}{\overline{Z}_L} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} \dfrac{\overline{V}_{Sa} - \overline{V}'_{Ra}}{\overline{Z}_L} \\ a^2\dfrac{\overline{V}_{Sa} - \overline{V}'_{Ra}}{\overline{Z}_L} \\ a\dfrac{\overline{V}_{Sa} - \overline{V}'_{Ra}}{\overline{Z}_L} \end{bmatrix} \tag{260}$$

Pour transmettre un courant $\overline{I}'_{Lc}$ tel que:

$$\overline{I}'_{Lc} = \lambda \overline{I}_{Lc} \tag{261}$$

il faut que les tensions ligne-neutre des deux bouts de la ligne vérifient la relation suivante:

$$\overline{V}_{Sa} - \overline{V}'_{Ra} = \lambda\left(\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}\right) \tag{262}$$

et finalement la tension en bout de ligne E'_{ra} est obtenue par :

$$\overline{V}'_{Ra} = \overline{V}_{Sa} - \lambda\left(\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}\right) = \overline{V}_{Ra} - (\lambda - 1)\left(\overline{V}_{Sa} - \overline{V}_{Ra}\right) \tag{263}$$

Pour transmettre la même puissance qu'avant le dégel il faut $\lambda = 3$.

VIII.2.3.2 PERTES PAR EFFET JOULE

Les pertes par effet Joule pour la phase saine (phase c) sont données par :

$$P'_c = R|\bar{I}'_{Lc}|^2 = \lambda^2 P_c \tag{264}$$

où I'_{Lc} est le courant dans la phase c durant le fonctionnement asymétrique tel que donné par la relation (261).

VIII.2.4 CALCUL DES ÉLÉMENTS DES COMPENSATEURS DE SÉQUENCE INVERSE

Pour le compensateur de séquence inverse monté en Y, le calcul est effectué selon les équations suivantes reprises de la section V.2.2.1 : Pour le compensateur du côté de la source et considérant que $\bar{V}_{Sa}$ est la tension entre la phase a et le neutre et que $\bar{I}'_{L2}$ est le courant de séquence inverse de la ligne, on obtient :

$$\begin{aligned} X_{ag} &= -2\Im m\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\ X_{bg} &= -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) + \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\ X_{cg} &= \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) + \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \end{aligned} \tag{265}$$

et pour le compensateur du côté de la charge, $\bar{V}_{Ra}$ étant la tension de la phase a, on obtient :

$$\begin{aligned} X_{ad} &= 2\Im m\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\ X_{bd} &= \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\ X_{cd} &= -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \end{aligned} \tag{266}$$

Pour le compensateur de séquence inverse monté en triangle, le calcul est effectué selon les équations données aussi à la section V.2.2.2. On les reprend ici par convenance. Pour le compensateur de séquence inverse du côté de la charge, les susceptances de compensation sont :

$$
\begin{aligned}
B_{abd} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\
B_{bcd} &= -\frac{2}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\
B_{cad} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right)
\end{aligned}
\qquad (267)
$$

B_{abd}, B_{bcd}, B_{cad} sont les susceptances du compensateur droit connectées respectivement entre les phases a et b, b et c, et c et a, $\bar{V}_{Ra}$ est la tension phase-neutre de la ligne du coté charge et $\bar{I}'_{L2}$ est le courant de séquence directe de la ligne du côté charge. Les susceptances pour le compensateur du côté source sont déduites des équations (267) en remplaçant $\bar{I}'_{L2}$ par $-\bar{I}'_{L2}$ et $\bar{V}_{Ra}$ par $\bar{V}_{Sa}$.

VIII.2.5 Filtrage des courants de séquence homopolaire

Le filtrage des courants de séquence homopolaire peut être mis en oeuvre de deux façons: par transformateur de mise à la terre ou par transformateur d'alimentation (section V.2.3). On donne ici, des détails quant à l'utilisation de transformateurs de mis à la terre.

Le filtrage de la séquence homopolaire du courant par transformateur de mise à terre se fait soit à l'aide de deux transformateurs en T, Δ-Y ou en zigzag (un à chaque bout de ligne), soit à l'aide d'éléments passifs. Dans les deux cas, on crée un chemin d'écoulement pour la séquence homopolaire. Deux chemins peuvent être envisagés pour écouler la séquence homopolaire du courant de ligne: vers le fil de garde ou vers une phase coupée.

L'écoulement de la séquence homopolaire vers le fil de garde est illustré dans l'option 2 de la Figure 8.3. Cette option suppose aussi une connexion aux pylônes de support des lignes et à la terre. Cependant, on peut prendre avantage de cette configuration pour chauffer le fil de garde si celui-ci peut être isolé sur toute la longueur de la ligne.

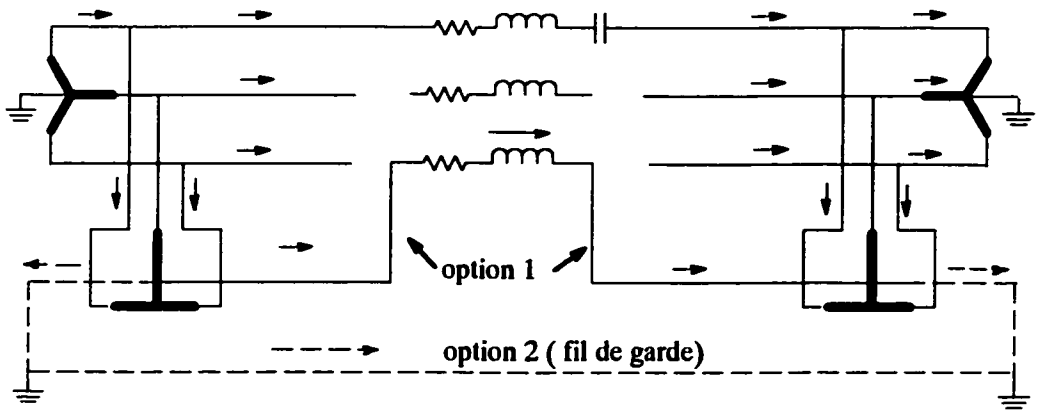


Figure 8.3 Principe de filtrage de la séquence homopolaire

L'écoulement de la séquence homopolaire par une phase coupée est obtenu en reliant les neutres des deux filtres de séquence homopolaire par une phase coupée. On forme ainsi une boucle avec les phases non coupées, propice à l'écoulement du courant homopolaire (option 1 de la Figure 8.3).

VIII.2.6 Réseaux non mis à la terre

Dans cette section on explore les conditions pour lesquelles on peut supprimer les filtres de séquence homopolaire pour les réseaux non mis à la terre comme montré à la Figure 8.4. Le courant de séquence homopolaire n'existe pas dans la ligne.

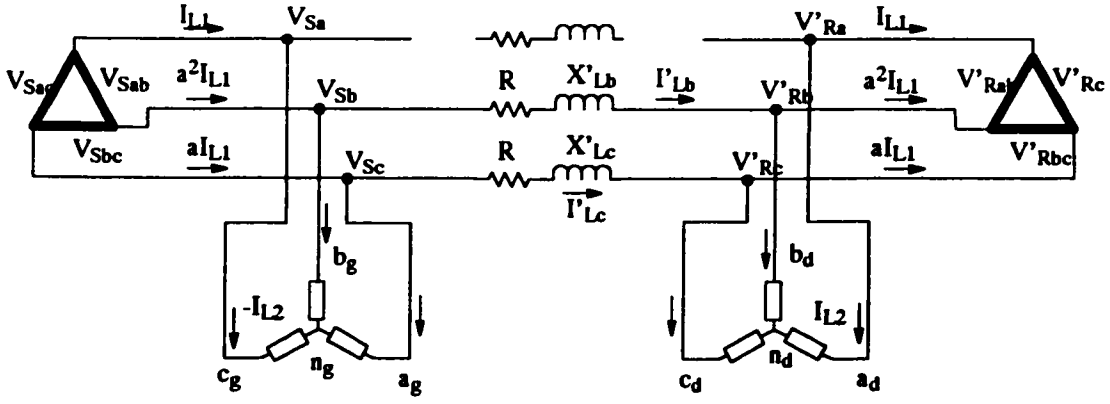


Figure 8.4 Principe de chauffage par asymétrie: réseau non mis à la terre, deux phases fonctionnelles

En se référant à la Figure 8.4, les courants de ligne en fonctionnement asymétrique sont donnés par :

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{La} &= 0 \\ \bar{I}'_{Lb} &= \frac{\bar{V}_{Sb} - \bar{V}'_{Rb}}{\bar{Z}'_{Lb}} \\ \bar{I}'_{Lc} &= \frac{\bar{V}_{Sc} - \bar{V}'_{Rc}}{\bar{Z}'_{Lc}} \end{aligned} \tag{268}$$

où $\bar{Z}'_{Lb}$ et $\bar{Z}'_{Lc}$ sont les impédances séries respectives des phases b et c de la ligne, $\bar{V}_{Sb}$ et $\bar{V}_{Sc}$ sont respectivement les tensions phase-neutre des phases b et c à la source et $\bar{V}'_{Sb}$ et $\bar{V}'_{Sc}$ sont respectivement les tensions phase-neutre des phases b et c à la charge.

Le courant de séquence homopolaire dans la ligne est nul donc,

$$\bar{I}'_{Lb} = -\bar{I}'_{Lc} \tag{269}$$

Les courants des séquences directe et inverse résultant de l'asymétrie sont donc donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{I}'_{L1} &= \frac{1}{3}\left(a\bar{I}'_{Lb} + a^2\bar{I}'_{Lc}\right) = \frac{1}{3}\left(a - a^2\right)\bar{I}'_{Lb} \\ \bar{I}'_{L2} &= \frac{1}{3}\left(a^2\bar{I}'_{Lb} + a\bar{I}'_{Lc}\right) = \frac{1}{3}\left(a^2 - a\right)\bar{I}'_{Lb} \end{aligned} \tag{270}$$

Pour transmettre la même puissance, les courants de séquence directe avant et après asymétrie ($\bar{I}_{L1}$ et $\bar{I}'_{L1}$) sont égaux, donc les courants dans les phases b et c de la ligne sont donnés par :

$$\bar{I}'_{Lb} = -\bar{I}'_{Lc} = \frac{3}{a - a^2}\bar{I}_{L1} \tag{271}$$

La tension ligne à ligne $\bar{V}'_{Rbc}$ en bout de ligne est obtenue par :

$$\bar{V}'_{Rbc} = \bar{V}_{Sbc} - 2\bar{Z}'_{L}\bar{I}'_{Lb} \tag{272}$$

et les autres tensions ligne à ligne ($\bar{V}'_{Rab}$ et $\bar{V}'_{Rca}$) se déduisent de l'équation (272).

Le calcul des compensateurs de séquence inverse se fait comme pour les autres cas étudiés plus haut. Le courant de séquence inverse est plus élevé, mais l'absence des filtres de séquence homopolaire rend ce schéma attrayant au plan économique. Un exemple de calcul est montré au Tableau 8.4 et à la Figure 8.10.

VIII.2.7 EXEMPLES DE CALCUL.

Pour une ligne de 735 kV de longueur l = 100 km et de paramètres r = 0.01 Ω/km et x_L = 0.35 Ω/km, b_L = 4.52 × 10^{-6} S/km alimentant une charge de 1800 MW avec un facteur de puissance de +0.95. On considère une tension de source de 740 kV∠ 30°. Le Tableau 8.1 montre les caractéristiques de la ligne, les tensions et les courants présents dans la ligne pendant le fonctionnement normal symétrique. La tension du côté droit est obtenue par répartition de puissance.

Trois exemples de calcul sont effectués :

- ligne avec une seule phase fonctionnelle et compensation série;
- ligne avec une seule phase fonctionnelle sans compensation série;
- ligne avec réseau non mis à la terre et sans compensation série.

Les Tableau 8.2 à Tableau 8.4 montrent les résultats obtenus et les Figure 8.5 à Figure 8.10 montrent les montages respectifs correspondants.

Les résultats obtenus montrent une puissance dissipée par phase de 198 W/m pour le chauffage avec une seule phase fonctionnelle, de 66W/m pour le chauffage avec deux phases fonctionnelles pour les réseaux non mis à la terre et environs 49W/m pour le chauffage avec deux phases fonctionnelles pour réseaux mis à la terre.

Tableau 8.1: Caractéristiques d'une ligne à 735 kV 100 km

			Côté gauche	Côté droit
Ligne	Caractéristiques	R_L = 1.0Ω	X_L = 35 Ω	B_c= 4.51×10^{-4}S
		P=1800MW		Q_r=365.5MVAR
	Tension dans la ligne avant asymétrie.	E_{ab} (kV)	740.00 ∠30°	714.36 ∠23.2°
		E_{aN} (kV)	427.24 ∠0°	412.44∠-06.8°
	Courant de la ligne avant asymétrie	I_{La} (kA)	1.4845 ∠-18.3°	1.4845 ∠-18.3°
		I_{Lb} (kA)	1.4845∠-138.3°	1.4845∠-138.3°
		I_{Lc} (kA)	1.4845 ∠101.7°	1.4845∠ 101.7°

VIII.2.8 Exemple 1: Avec compensation série; une seule phase fonctionnelle

Tableau 8.2: Résultats pour chauffage avec compensation série; une phase fonctionnelle

			Côté gauche	Côté droit
Ligne	Tension de ligne après asymétrie	V_{ab} (kV)	740.00 ∠30°	714.36 ∠23.2°
		V_a (kV)	427.24 ∠0°	412.44∠-06.8°
	Condensateur série	X_c (Ω)	23.37	
	Courant de la ligne après asymétrie	I'_{La} (kA)	0.0	0.0
		I'_{Lb} (kA)	0.0	0.0
		I'_{Lc} (kA)	4.453 ∠105.0°	4.453 ∠105.0°
	Puissance dissipée	W/m/phase	198.3	
	Courant de séquence de la ligne	I'_{L1} (kA)	1.4845 ∠ -15°	1.4845 ∠-15°
		I'_{L2} (kA)	1.4845 ∠ -135°	1.4845 ∠-135°
		I'_{L0} (kA)	1.4845 ∠ 105°	1.4845 ∠ 105°
Compensateur de séquence inverse en Y	Impédances du compensateur	X_{an} (Ω)	-406.99	436.68
		X_{bn} (Ω)	556.01	-515.93
		X_{cn} (Ω)	-149.02	79.25
	Puissance réactive du compensateur	S_{an}(MVAR)	-896.85	962.28
		S_{bn}(MVAR)	1225.2	-1136.9
		S_{cn}(MVAR)	-328.39	174.64
	Tensions du compensateur	V_{nN} (kV)	427.24 ∠90°	412.43 ∠96.8°
		V_a (kV)	604.20 ∠-45°	648.23 ∠-45°
		V_b (kV)	825.38∠-105°	765.88 ∠-105°
		V_c (kV)	221.20∠-165°	117.65∠-165°
Compensateur de séquence inverse en Δ	Impédances du compensateur	X_{ab} (Ω)(S)	1667.5(-0.0006)	-2922.0(0.0003)
		X_{bc} (Ω)(S)	610.6 (-0.0016)	-530.3 (0.0019)
		X_{ca} (Ω)(S)	-446.93 (0.0022)	448.9(-0.0022)
	Courants des phases du compensateur	I_{ab} (kA)	0.4438 ∠-60°	0.2445∠113.2°
		I_{bc} (kA)	1.212∠-180°	1.3470 ∠-6.8°
		I_{ca} (kA)	1.656∠-120°	1.5920 ∠53.2°
	Puissance réactive du compensateur	S_{ab}(MVAR)	328.4	-174.6
		S_{bc}(MVAR)	896.9	-962.2
		S_{ca}(MVAR)	-1225.2	1136.9
		S_{total}(MVAR)	2450.2	2273.8
Filtre séquence homopolaire	Courant du neutre	I_n (kA)	4.453 ∠-75°	4.453 ∠105°
	Puissance du transformateur en T	S_T (MVA)	592.0	571.2

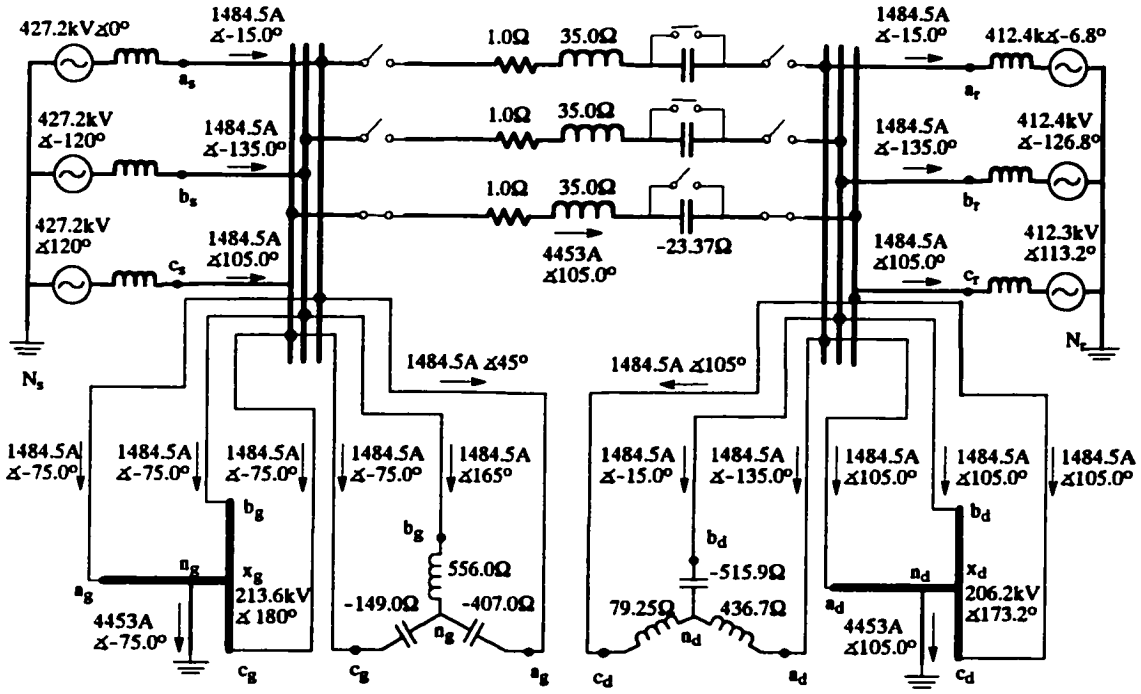


Figure 8.5 Une seule phase fonctionnelle avec compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile

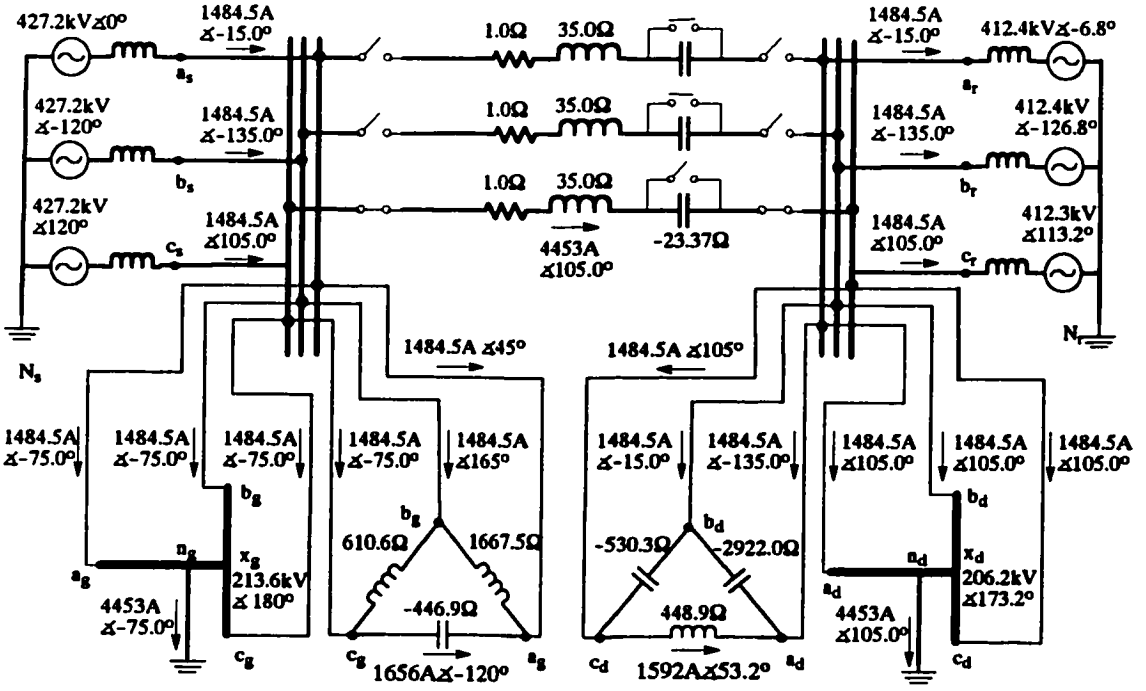


Figure 8.6 Une seule phase fonctionnelle avec compensation série; compensateurs de séquence inverse en triangle

VIII.2.9 Exemple 3 : Sans compensation série; une seule phase fonctionnelle

Tableau 8.3: Résultats pour chauffage sans compensation série; une phase fonctionnelle

			Côté gauche	Côté droit
Ligne	Tensions dans la ligne après asymétrie	V_{ab} (kV)	740.00 ∠30°	696.0 ∠ 8.6°
		V_a (kV)	427.24 ∠0°	401.8 ∠-21.4°
	Condensateur série	X_c (Ω)	0.0	
	Courant de la ligne après asymétrie	I'_{La} (kA)	0.0	0.0
		I'_{Lb} (kA)	0.0	0.0
		I'_{Lc} (kA)	4.4530 ∠ 101.7°	4.4530 ∠ 101.7°
	Puissance dissipée	W/m/phase	198.3	
	Courant de séquence de la ligne	I'_{L1} (kA)	1.4845 ∠ -18.3°	1.4845 ∠ -18.3°
		I'_{L2} (kA)	1.4845 ∠-138.3°	1.4845 ∠-138.3°
		I'_{L0} (kA)	1.4845 ∠ 101.7°	1.4845 ∠ 101.7°
Compensateur de séquence inverse en Y	Impédances du compensateur	X_{an} (Ω)	-383.0	482.8
		X_{bn} (Ω)	563.6	-453.4
		X_{cn} (Ω)	-180.6	-29.4
	Puissance réactive du compensateur	S_{an}(MVAR)	-844.1	1064.0
		S_{bn}(MVAR)	1242.0	-999.2
		S_{cn}(MVAR)	-397.9	-64.8
	Tensions du compensateur	V_{nN} (kV)	427.24 ∠ 83.4°	401.8 ∠104.8°
		V_a (kV)	568.6 ∠-48.3°	716.8 ∠-48.3°
		V_b (kV)	836.7∠-108.3°	673.1∠-108.3°
		V_c (kV)	268.1∠-138.3°	436.8∠ 11.7°
Compensateur de séquence inverse en Δ	Impédances du compensateur	X_{ab} (Ω)(S)	1376.1(-0.0007)	7470.4(-0.0001)
		X_{bc} (Ω)(S)	648.8 (-0.0015)	-455.2 (0.0022)
		X_{ca} (Ω)(S)	-440.9 (0.0023)	484.8(-0.0021)
	Courants des phases du compensateur	I_{ab} (kA)	0.5377 ∠-60°	0.0932∠-81.4°
		I_{bc} (kA)	1.1406 ∠-180°	1.5288 ∠-21.4°
		I_{ca} (kA)	1.6784 ∠-120°	1.4356 ∠ 38.6 °
	Puissance réactive du compensateur	S_{ab}(MVAR)	397.9	64.84
		S_{bc}(MVAR)	844.1	-1064.0
		S_{ca}(MVAR)	-1242.0	999.2
		S_{total}(MVAR)	2484.0	2128
Filtre séquence homopolaire	Courant du neutre	I_n (kA)	4.453 ∠-78.3°	4.453 ∠ 101.7°
	Puissance du transformateur en T	S_T(MVA)	591.7	556.5

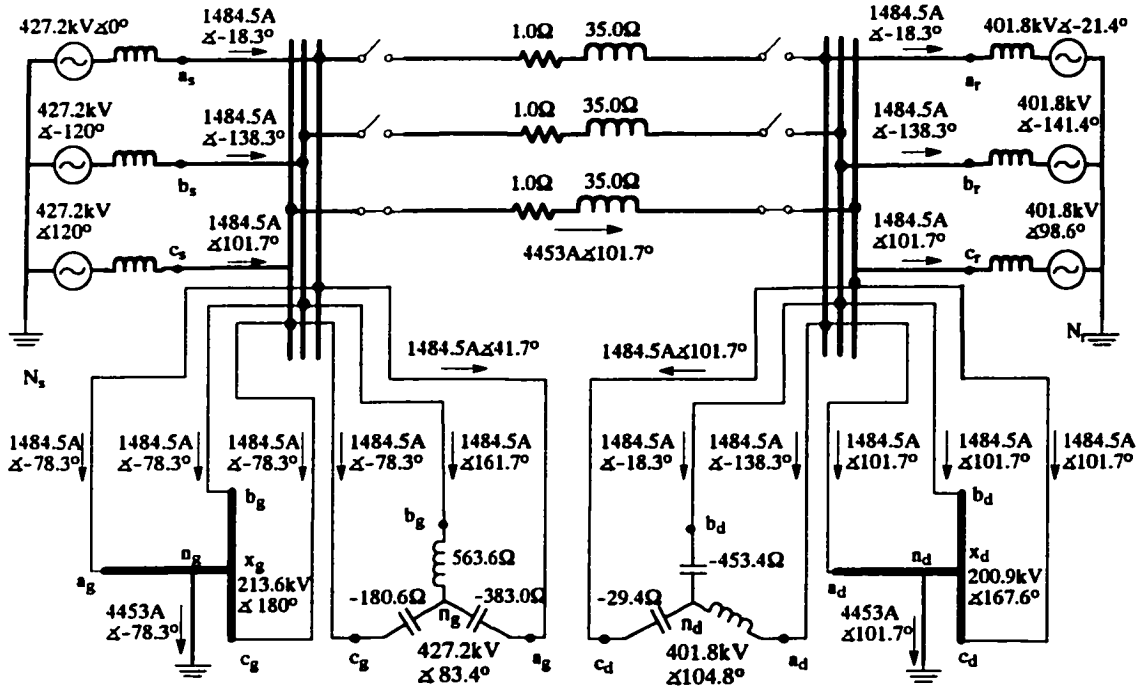


Figure 8.7 Une seule phase fonctionnelle sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile

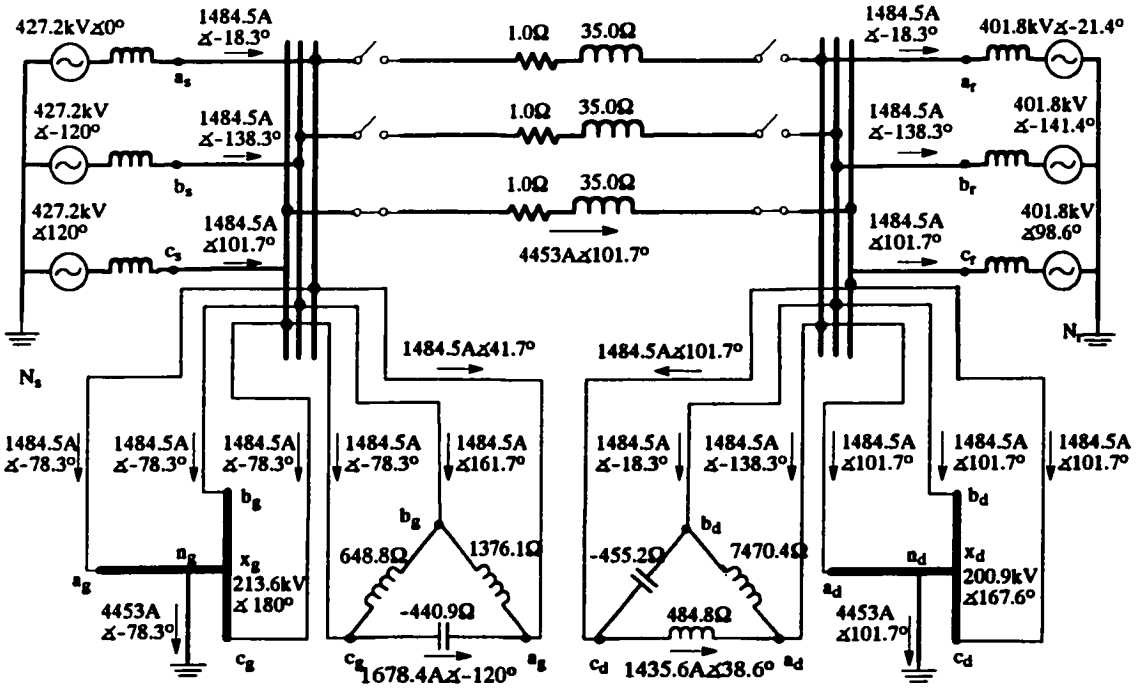


Figure 8.8 Une seule phase fonctionnelle sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en triangle

VIII.2.10 Exemple 5 : Réseau non mis à la terre sans compensation série; deux phases fonctionnelles

Tableau 8.4: Résultats pour chauffage sans compensation série; 2 phases fonctionnelles; réseau non mis à la terre

			Côté gauche	Côté droit
Ligne	Tensions dans la ligne après asymétrie	V_{ab} (kV)	740.00 ∠30°	699.4 ∠16.0°
		V_a (kV)	427.24 ∠0°	403.8 ∠-14.0°
	Condensateur série	X_c (Ω)	0.0	
	Courant de la ligne après asymétrie	I'_{La} (kA)	0.0	0.0
		I'_{Lb} (kA)	2.571∠-108.3°	2.571 ∠ -108.3°
		I'_{Lc} (kA)	2.571 ∠ 71.7°	2.571 ∠ 71.7°
	Puissance dissipée	W/m/phase	66.1	
	Courant de séquence de la ligne	I'_{L1} (kA)	1.4845∠-18.3°	1.4845∠-18.3°
		I'_{L2} (kA)	1.4845∠161.7°	1.4845 ∠161.7°
		I'_{L0} (kA)	0.0	0.0
Compensateur de séquence inverse en Y	Impédances du compensateur	X_{an} (Ω)	180.6	-40.68
		X_{bn} (Ω)	383.0	-449.6
		X_{cn} (Ω)	-563.6	490.2
	Puissance réactive du compensateur	S_{an}(MVAR)	397.9	-89.42
		S_{bn}(MVAR)	844.1	-990.7
		S_{cn}(MVAR)	-1242.0	1080.1
	Tensions du compensateur	V_{nN} (kV)	427.2∠ -36.6°	403.8∠ -22.6°
		V_a (kV)	268.1∠ 71.7°	602.3 ∠ -71.7°
		V_b (kV)	568.6∠-168.3°	667.3∠-168.3°
		V_c (kV)	836.7 ∠131.7°	727.6 ∠131.7°
Compensateur de séquence inverse en Δ	Impédances du compensateur	X_{ab} (Ω)(S)	440.9(-0.0023)	-452.9(0.00221)
		X_{bc} (Ω)(S)	-1376.1(0.0007)	5471.3(-0.0018)
		X_{ca} (Ω)(S)	-648.7(0.0015)	493.8(-0.00203)
	Courants des phases du compensateur	I_{ab} (kA)	1.6784 ∠-60°	1.544.2∠106.0°
		I_{bc} (kA)	0.5377∠0.0°	0.1278 ∠166.0°
		I_{ca} (kA)	1.1401 ∠-120°	1.4164 ∠ 46.0 °
	Puissance réactive du compensateur	S_{ab}(MVAR)	1242.0	-1080.1
		S_{bc}(MVAR)	-397.9	89.4
		S_{ca}(MVAR)	-844.1	990.7
		S_{total}(MVAR)	2484.0	2160

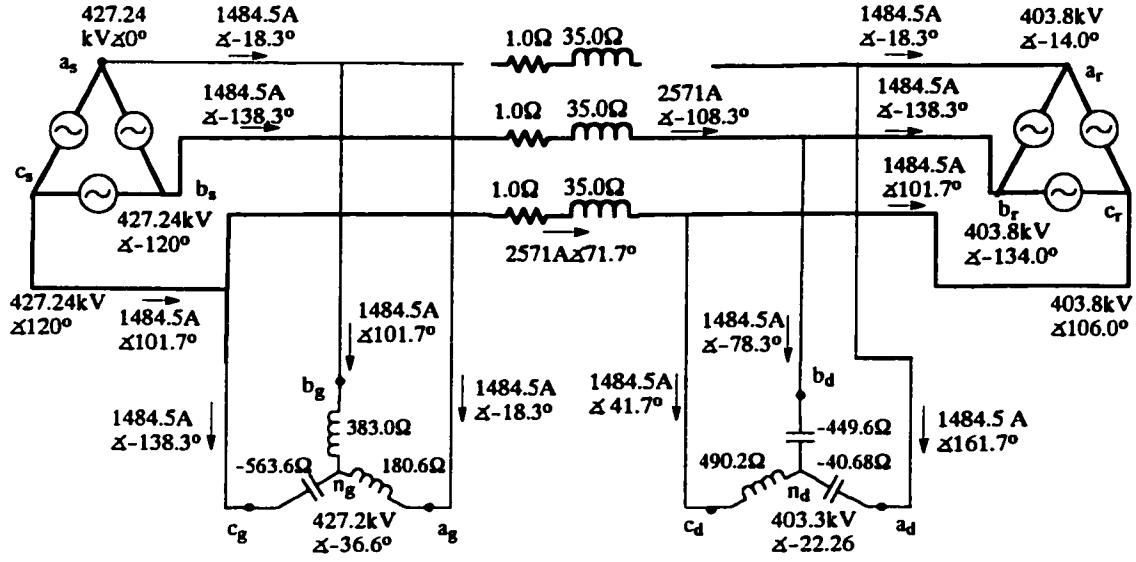


Figure 8.9 Deux phases fonctionnelles; sans filtre de séquence homopolaire; sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en étoile

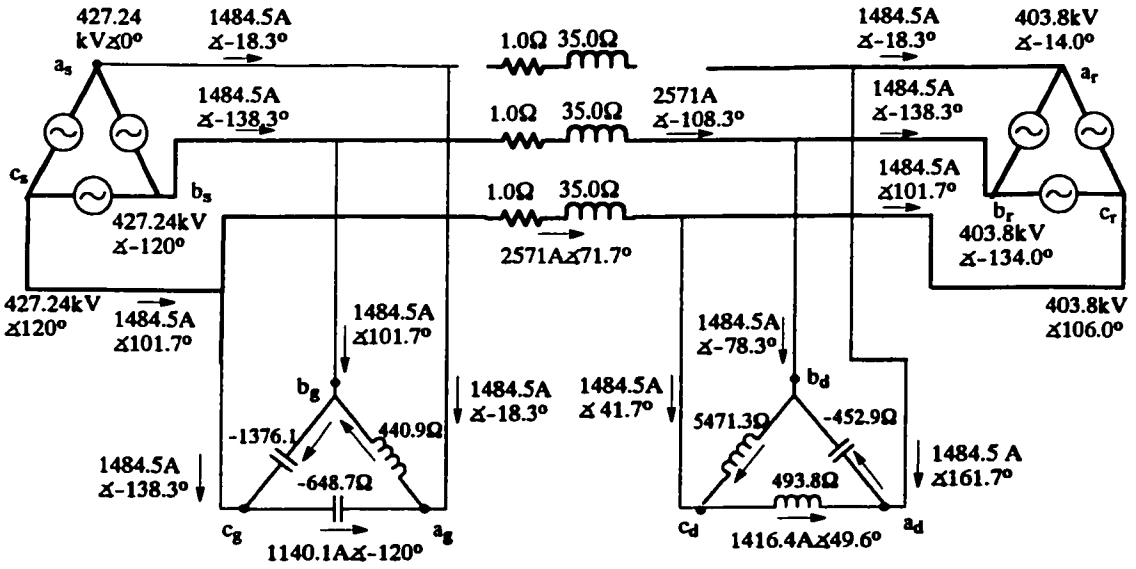


Figure 8.10 Deux phases fonctionnelles; sans filtre de séquence homopolaire; sans compensation série; compensateurs de séquence inverse en Triangle

VIII.3 Recherches futures.

Les travaux supplémentaires suivants doivent être réalisés pour parachever cette innovation et confirmer sa viabilité. Il s'agit de :

- Examiner la possibilité d'utiliser un compensateur en étoile d'un côté, jumelé à un compensateur en triangle de l'autre; ceci pour obtenir toujours une inductance et deux condensateur dans chaque compensateur. Cette combinaison est beaucoup moins coûteuse que les combinaisons à deux inductances et un condensateur.
- Utiliser un modèle plus élaboré des lignes dans les calculs : le principe du chauffage est illustré dans cette thèse par un modèle simplifié des lignes sans perte de généralité. L'essentiel est la connaissance des courants et tensions de séquence au point de connexion des compensateurs. Un modèle de ligne plus élaboré permettra, cependant, de déterminer les contraintes avec plus de précision.
- Examiner la possibilité de supprimer les transformateurs de mise à la terre pour filtrer les courants de séquence homopolaire dans la situation où ces courants sont redirigés vers la ligne par une phase coupée (option 1 de la Figure 8.3).
- Effectuer une étude des protections, de la commande et du régime transitoire.
- Étudier la relation entre puissance dissipée par effet Joule et température extérieure afin de déterminer les courants à transiter dans les conducteurs de phase pour réaliser le dégel et par extension, le temps de dégel pour des conditions atmosphériques et pour une configuration des phases données. La puissance nécessaire au dégel est de l'ordre de 0,19 W/cm par conducteur (Luan Phan et Sévigny, 1978, [61]). Les résultats montrés dans cette thèse sont pour le cas d'une seule phase fonctionnelle, une puissance de 1,98W/cm/phase soit 0,495 W/cm par conducteur pour un faisceau de quatre conducteurs par phase, ce qui est largement suffisant. Pour le cas de deux phases fonctionnelles, la puissance dissipée est de 0,49 W/cm/phase pour les réseaux mis à la terre et 0,66 W/cm/phase pour les réseaux flottants. La recherche doit montrer dans quelle mesure la puissance dissipée dans le cas de deux phases fonctionnelles est suffisante pour les conducteurs en faisceau.

- Développer des calculs pour le système de chauffage de ligne avec trois phases fonctionnelles. Ces calculs seront effectués avec la même méthodologie que celle présentée dans cette thèse. Les compensateurs de séquence seront calculés pour que les courants des trois phases soient déséquilibrés afin qu'une des phases ou deux dissipent une puissance suffisante pour le dégel. L'essentiel réside dans la connaissance des courants désirés dans les trois phases. Par la configuration avec trois phases fonctionnelles on obtient une puissance dissipée intermédiaire entre le cas extrême d'une seule phase fonctionnelle et celui de deux phases fonctionnelles.

VIII.4 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

La méthode proposée dans la présente thèse offre les principaux avantages suivants:

- Un chauffage uniforme sur toute la longueur du conducteur et donc, le dégel effectif en une seule opération, tout le long de la ligne.
- Le dégel est effectué sans besoin d'interrompre l'alimentation de la charge en bout de ligne car la mise en oeuvre des compensateurs de séquence inverse et des filtres de séquence homopolaire permet de confiner les déséquilibres au sein de la ligne en régime permanent, épargnant ainsi la source et la charge.
- Il n'y a pas de perturbation de l'écoulement de puissance si l'opération avec puissance et tensions constantes est mise en oeuvre c'est à dire si on utilise la compensation série.
- En basse et moyenne tension (réseau de distribution) un équipement mobile de dégel peut être obtenu par la méthode proposée.
- En cas de perte d'un conducteur dans l'exploitation normale, on peut utiliser l'équipement prévu pour le dégel pour assurer l'exploitation asymétrique et transmettre un minimum de puissance à travers la ligne.
- Dans l'exploitation normale sans contingence, l'équipement de compensation prévu pour le dégel peut être utilisé pour la compensation du facteur de puissance.

Le chauffage par asymétrie proposé dans cette thèse requiert de la compensation réactive. Cependant on peut mettre à profit l'équipement de compensation déjà installé sur le réseau pour réduire les coûts et faciliter la mise en oeuvre.

VIII.5 RÉSUMÉ

En déséquilibrant suffisamment une ligne électrique triphasée, on peut transférer sur une phase ou deux, l'équivalent du courant total transitant dans la ligne non déséquilibrée afin de surchauffer les conducteurs de ces phases et provoquer le dégel de la glace. La mise en oeuvre de ce principe nécessite l'apport de puissance réactive par compensation, pour confiner les courants des séquences négative et homopolaire résultant du déséquilibre, au sein même de la ligne. Ainsi, on empêche ces courants de séquence nuisibles d'atteindre les deux réseaux aux bouts respectifs de la ligne. Il n'est donc pas nécessaire d'augmenter la charge pour créer la surchauffe, et l'intégrité des deux réseaux connectés par la ligne est préservée.

Une méthodologie de calcul du système de chauffage en vue du dégel a été présentée et des exemples de calcul confirmant la validité de la méthode ont été montrés. C'est une innovation qui comporte plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer :

- la possibilité d'utilisation d'un équipement mobile de dégel en basse et moyenne tension (réseau de distribution).
- le chauffage uniforme sur toute la longueur du conducteur, et donc le dégel effectif d'une phase ou deux en une seule opération, tout le long de la ligne,
- le dégel de ligne sans interruption de l'alimentation à la charge,

Des travaux supplémentaires doivent être réalisés pour parachever cette innovation, confirmer sa viabilité au plan technique et démontrer sa faisabilité au plan économique.

CHAPITRE IX CONCLUSION GÉNÉRALE

IX.1 SYNTHÈSE

Dans un contexte de déréglementation où les contraintes d'exploitation des réseaux électriques sont plus ardues que jamais, le nouveau défi technologique à relever est l'augmentation de la capacité des réseaux de transport sans en altérer la fiabilité. Dans cette perspective, on a montré qu'on peut utiliser à bon escient la capacité additionnelle qui résulte de l'exploitation des lignes triphasées comme trois ensembles monophasés distincts. L'Exploitation Asymétrique des Réseaux de Transport d'Énergie Électrique, basée sur cette séparation fonctionnelle des phases d'une ligne triphasée, offre des solutions pratiques et économiques pour accroître la capacité des réseaux de transport d'électricité. Lorsqu'une ou plusieurs phases sont coupées dans une ligne, en appliquant les mesures correctives appropriées, on peut conserver l'angle de transport, la puissance transmise et les tensions aux bouts respectifs de la ligne. La faisabilité de l'exploitation asymétrique est démontrée à la fois en théorie, par simulation et par l'analyse des coûts des mesures correctives.

IX.1.1 DE L'APPROCHE THÉORIQUE

Nous avons développé la théorie permettant de déterminer les conditions dans lesquelles le respect des critères de conservation de la puissance, de la grandeur des tensions et de l'angle de transmission est garanti lorsqu'une ligne a perdu une ou plusieurs phases. Selon le nombre de lignes du corridor de transport, deux méthodes de calcul sont offertes :

- pour un corridor avec plusieurs lignes et pour une phase coupée dans une ligne donnée, on "reconstruit" de manière équivalente la phase manquante en utilisant les phases homologues des lignes saines, la compensation série et la compensation shunt. L'impédance shunt de l'ensemble du corridor est restaurée grâce à la compensation shunt, ce qui permet de conserver la grandeur des tensions en bouts de

ligne. L'impédance série du corridor est restaurée grâce à la compensation série, ce qui permet de transmettre le courant à travers la ligne avec le même écart angulaire et donc, de transmettre la même puissance (moins les pertes additionnelles) par dévers la conservation des grandeurs de la tension.. La reconstruction des paramètres du corridor par la compensation permet donc d'obtenir un équilibre parfait au niveau du corridor bien que la ligne défectueuse soit le siège de distorsions liées à une perte de phase. La compensation du corridor se fait donc avec la séquence directe uniquement. La stratégie de compensation proposée permet de résoudre les contingences simultanées sur deux ou trois phases appartenant à la même ligne. Donc, la perte d'une ligne n'affecte plus la capacité du réseau de transport ni sa limite de sécurité; ceci va au-delà du critère de conception conventionnel *N-1*.

- pour un corridor avec une seule ligne, la méthode développée consiste à reporter le courant manquant de la phase coupée vers les phases saines grâce d'abord à la compensation série, puis au filtrage des ondes de distorsion (séquences inverse et homopolaire). La compensation série est utilisée pour la compensation des courants de séquence directe et l'angle de transport et donc pour assurer la conservation de la puissance transmise (moins les pertes additionnelles). Dans certaines situations, on peut aussi utiliser la compensation série pour éliminer la séquence homopolaire tout en assurant la compensation de la séquence directe. Quant à la compensation shunt, elle permet la compensation des ondes de séquence inverse, le filtrage de la séquence homopolaire et assure la conservation des grandeurs des tensions aux bouts respectifs de la ligne. La méthode développée reste applicable même dans le cas extrême de la perte de deux phases pour un corridor avec une seule ligne.

La théorie développée permet d'identifier et de quantifier les mesures correctives nécessaires pour assurer l'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'électricité. À ce sujet on peut faire les assertions additionnelles suivantes :

- pour réaliser l'exploitation asymétrique, on peut utiliser la compensation conventionnelle (éléments LC, inductances et condensateurs) ou les compensateurs

au sommet de l'art qui sont les convertisseurs de l'électronique de puissance, les FACTS (Flexible AC Transmission Systems) en occurrence;

- la quantité de puissance de compensation requise pour l'exploitation asymétrique est la même quelque soit la nature de la compensation (conventionnelle ou FACTS) ;
- la quantité de puissance réactive nécessaire pour l'exploitation asymétrique ne varie pas de manière significative avec l'emplacement des compensateurs dans la ligne où le corridor (entrée de ligne, sortie de ligne ou milieu de ligne).
- pour les corridors avec plusieurs lignes, la quantité de puissance réactive nécessaire à l'exploitation asymétrique diminue avec le nombre de lignes à cause de la compensation série. La compensation shunt ne varie pas avec le nombre de lignes.

IX.1.2 De la validation de la théorie

La théorie développée a été validée par des simulations sur la plate-forme de Matlab-Simulink Power System Blockset (The Mathworks, 1998, [36]) :

- la compensation par les FACTS offre plus de flexibilité car ceux-ci équivalent à des sources de tensions et de courants contrôlables avec la précision voulue. Cependant, on doit porter une grande attention au contenu harmonique des ondes formées par la commutation des convertisseurs. Dans le cas de l'exploitation asymétrique avec une seule ligne, le filtrage des harmoniques s'avère nécessaire. En plus, la mise en oeuvre des FACTS est loin d'être triviale.
- la compensation conventionnelle ne génère pas d'harmoniques significatifs en régime permanent et donc, il n'est pas besoin de filtrage. La flexibilité est moins grande que ce qu'offrent les FACTS mais l'efficacité de la compensation et la simplicité de mise en oeuvre sont édifiantes et clairement établies.

IX.1.3 De l'économie et de la praticabilité

La détermination des mesures de compensations et des options de compensation nous a permis d'effectuer des estimations de coût. Nous avons estimé le coût de mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique selon le mode de compensation (conventionnelle ou

FACTS) et effectué une comparaison de ce coût avec le coût de l'énergie non livrée et le coût de l'installation d'une nouvelle ligne.

Le coût de l'énergie non livrée est le coût du risque de non transmission de l'énergie associé à l'exploitation standard symétrique ou le coût associé à la non application de l'exploitation asymétrique. Pour réduire le risque de non transmission de l'énergie et donc son coût, on a le choix entre les options suivantes :

- la construction d'une ligne supplémentaire ;
- la mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique avec compensation par des dispositifs conventionnels;
- la mise en oeuvre de l'exploitation asymétrique avec compensation par les FACTS ;
- et la construction d'une unité de production fournissant l'équivalent de l'espérance de l'énergie non livrée à l'endroit de la charge.

La comparaison des coûts des options montre que :

- dans le cas d'un corridor de transport avec une seule ligne de 120 kV transportant une puissance relativement faible de 50 MW, l'exploitation asymétrique avec des dispositifs conventionnels dont le coût est de 4.45 M$ est plus économique que l'exploitation asymétrique avec compensation par FACTS et la construction d'une nouvelle ligne qui ont des coûts de 12 M$ et 15 M$ respectivement. Le coût de l'énergie non livrée qui ne tient pas compte du coût social de la perte de la ligne, est inférieur à celui de l'exploitation asymétrique. Une analyse économique plus fine prenant en compte le coût social de la perte totale de l'alimentation, est requise pour départager l'exploitation asymétrique par compensation conventionnelle et la construction d'une unité de production.
- dans le cas d'un corridor de transport avec plusieurs lignes, l'exploitation asymétrique avec des dispositifs conventionnels est toujours l'option la plus économique. Pour deux lignes de 400 kV et 150 km transportant 1400 MW, le coût de cette option qui est de 17.1 M$ est équivalent à celui de l'énergie non livré (16 à 18 M$) et nettement inférieur au coût de la compensation par FACTS (42.8 M$) et à

celui d'une nouvelle ligne (75 M$). Pour trois lignes de 400 kV et 150 km transportant 2000 MW, le coût de l'exploitation asymétrique avec dispositifs conventionnels n'est que 13.9 M$ contre 23 M$ pour le coût de l'énergie non livrée, 35 M$ pour l'exploitation asymétrique avec FACTS et 75 M$ pour la construction. Le coût de la compensation pour l'exploitation asymétrique diminue avec le nombre de lignes conformément à la diminution de la puissance de compensation série avec le nombre de lignes.

IX.2 Contributions et originalité

L'exploitation asymétrique est en elle-même un sujet original et c'est la première fois qu'on montre sa faisabilité aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique avec un tel niveau d'élaboration. Nous avons défriché un concept nouveau et un domaine de recherche promu à de futures investigations.

Sur les plans de l'approche théorique et des simulations, nous apportons les contributions originales suivantes:

- analyse des lignes de transport d'électricité non symétriques, aboutissant à une meilleure compréhension des mécanismes de transit des courants de séquence homopolaire inverse et directe dans les corridors de transport soumis en partie à des distorsions;
- présentation de stratégies pour l'exploitation asymétrique de corridors avec une seule ligne et de corridors avec plusieurs lignes ;
- développement et validation d'une méthode de calcul des éléments de compensation pour l'exploitation asymétrique de corridor avec une seule ou plusieurs lignes ;
- développement de modèle de simulation pour l'exploitation asymétrique d'un corridor avec une seule ou avec plusieurs lignes avec Matlab-Simulink-PSB .
- élaboration d'une méthode d'évaluation du coût des mesures correctives et du risque de non transmission de l'énergie inspirée de la planification des systèmes de

production et appliquée pour la première fois à la détermination du bénéfice de l'exploitation asymétrique;

Du point de vue application de l'exploitation asymétrique, nous apportons une contribution innovatrice ayant aboutit au dépôt d'une divulgation d'invention sur le chauffage par asymétrie à l'École Polytechnique. Selon une recherche de brevetabilité menée par une compagnie spécialisée dans la propriété intellectuelle, la divulgation soumise est brevetable et suit son cours.

IX.3 Perspectives

L'exploitation asymétrique est un domaine nouveau et la recherche dans ce domaine, vient d'avoir un élan. Dans la lancée, il convient de porter désormais l'attention sur les points suivants entre autres :

- Analyse du régime transitoire. Si l'exploitation asymétrique est faisable en régime permanent comme démontré dans cette thèse, les transitions de l'exploitation symétrique à l'exploitation asymétrique et vice versa doivent être étudiées avec soins afin d'éviter les surtensions et les surintensités nuisibles. L'analyse du régime transitoire permettra aussi de renforcer le design des dispositifs de compensation en vue de l'exploitation asymétrique.
- Synthèse de contrôleurs dans le cas de l'exploitation asymétrique avec des FACTS. Le besoin de flexibilité, de précision et de robustesse implique beaucoup de soins dans le design des systèmes de contrôle des circuits de conversion qui sont de nature non linéaire.
- Effets du couplage mutuel entre les lignes dans un même corridor.
- Possibilité d'interaction entre les éléments de compensation (par exemple les oscillations LC).
- Influence de la dynamique des machines et leur tolérance aux courants de séquence.
- Sensibilité des filtres de séquences à la fréquence.

RÉFÉRENCES

[1] Baril G.A., McGillis D., (1988), "Transmission Systems for Large Blocks of Power over Very Long Distances", Power Technology International, London.

[2] Gavrilovic M., McGillis D., (November 1982), "Basic Configurations for Reactive Power Compensators for Power Systems", COPIMERA 9, San Jose, Costa Rica.

[3] B. T. Ooi, M. Gavrilovic, D. McGillis, F.D. Galiana, (1992), "The Expanding Role of Power Electronics in Transmission Systems", Power Technology International, London.

[4] R. J. Marceau, J. Endrenyi & al. (June 30, 1997), "Power System Security Assessment: a Position Paper ", CIGRE Task Force 38.3.12 Final Report.

[5] R. Billinton, J. Oteng-Adjei (August 1991) "Utilization of interrupted energy assessment rates in generation and transmission system planning", IEEE Trans. Power systems, Vol. 6. No. 3.

[6] R. Nicolet et al., (avril 1999), "Pour affronter l'imprévisible : les enseignements du verglas 98: Rapport de la commission chargée d'analyser les événements relatifs à la tempête de verglas survenue du 5 au 9 janvier 1998", Les publications du Québec.

[7] R. Nicolet et al., (avril 1999), "Les conditions climatiques et l'approvisionnement en énergie : Études sectorielles du rapport de la commission chargée d'analyser les événements relatifs à la tempête de verglas survenue du 5 au 9 janvier 1998", Les publications du Québec.

[8] Tesla Museum, (1955), http://meri.yurope.com/org/tesla/muzeje.htm

[9] Nikola Tesla Information Source, (1999), http://www.hightension.org

[10] H. B. Püttgen, H. J. Haubrich, J. Stotz, D. Winje, G. Klappa, D. H. Denton, (Nov. 1997), "Energy Market Environment in Europe and United States", IEEE Power Eng. Review.

[11] J. Stotz (Nov. 1997) "The Process of Integration of the East and West European Networks", IEEE Power Eng. Review.

[12] D. Winje, (Nov. 1997), "Electric Power Turns Into a Commodity: A Change of Paradigm", IEEE Power Eng. Review.

[13] D. H. Denton, (Nov. 1997) "Deregulation Risks and Opportunities", IEEE Power Engineering Review.

[14] G. Klappa, (Nov. 1997). "Brave New Wold of Customer Satisfaction", IEEE Power Engineering Review.

[15] Cheng John W. M., McGillis Donald T., (October 1996), "The Application of FACTS Devices and Their Possibilities for Power Transmission Systems", 11th CEPSI Kuala Lumpur, Malaysia.

[16] Alain Le Du, (Juin 1992), "Pour un réseau électrique plus performant: le Projet FACTS", RGE -Nº 6/92.

[17] Laszlo Gyugyi, (April 1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators", IEEE Proc. Vol. 76, No. 4.

[18] Gyugyi L., Otto R. A., Putman T. H., (Sept/Oct. 1978),"Principles And Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97. No 5, pp. 1935-1945.

[19] L. Gyugyi, (April 1988), "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE Proceedings-. Vol. 76, No. 4.

[20] Hingorani Narain. G., (April 1993), "Flexible AC transmission", IEEE Spectrum, pp40-45.

[21] Ooi Boon. Teck., Shu-Zu Dai, Xiao Wang, (April 1992), "A Solid-State Series Capacitive Reactance Compensators" PWM Phase-shifter", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 7 No 2.

[22] Noroozian M., Aderson G., (July 1993), "Power flow control by use of controllable series components" IEEE Trans. Power Delivery Vol. 8 No3.

[23] M. Noroozian L. Ängquist M. Ghandhari G. Andersson, (October 1997), "Improving Power System Dynamics By Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 12. No 4.

[24] Sen Kalyan K, (January 1998), "SSSC -Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13 No1.

[25] Edwards C. et al, (October 1988), "Advanced Static Var Generator", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3 No 4.

[26] Larsen E., Miller N., et al, (Oct. 1992), "Benefit of GTO-Based Compensation Systems for Electric Utility Applications", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 7, No 4.

[27] Mathur R., Basati R., (May 1981), "A Thyristor Controlled Static Phase Shifter for AC Power Transmission", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-100, No5.

[28] Ooi Boon-Teck, Shu-Xudai, Francisco D. Galiana, (April 1993), "A solid State PWM Phase-shifter", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 8 No 2.

[29] Gyugyi L. et al, (April 1995), "Unified Power-flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 10. No 2, p1085-1097.

[30] Nabavi-Niaki A., Iravani M. R. Nov., (1996), "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No 4.

[31] Bian J., Ramey D. G., Nelson R. J., Edris A., (July 1997), "A Study of Equipment Size ands Constraints For a Unified Power Flow Controller ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12., No 3.

[32] Brochu J., (Avril 1997), "Les régulateurs de puissance interphases", Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal.

[33] J. Brochu F. Beauregard J. Lemay G. Morin P. Pelletier R. S. Thallam, (April 1997), "Application of The Interphase Power Controller Technology for Transmission line Power Flow Control", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 12. No 2.

[34] Galiana F.D., Almeida K., Toussaint M., Griffin J., Atanackovic D., Ooi B. T., McGillis D. T., (Nov. 1993), "Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance", IEEE Transactions on Power Systems Vol.11. No 4, pp1931-1936.

[35] Ooi B. T., Kazerani M., Marceau R., Wolanski Z., Galiana F. D, McGillis D., Joos G., (Oct. 1997), "Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines", IEEE Trans. PWRD. Vol. 12, No 4.

[36] The Mathworks Inc., (1998), "Power System Blockset For Use With Simulink : Users Guide version 1", TEQSIM international Inc. & The Mathworks Inc.

[37] Sana A.-R.,. McGillis D. T, Marceau R. J., DO D. X., TODDE C., (June 1999), "On the Asymmetrical Operation of Transmission Systems", Proc. of CIGRE Symposium London, U.K..

[38] Sana A.-R., Marceau R. J, Todde C, Do X. D, Mahseredjian J, Joos G, (May 1998), "L'exploitation asymétrique des réseaux de transport d'énergie électrique", Proc. IEEE-CCECE'98 Waterloo (Ont.), pp. 485-488.

[39] Kimbark E. W. "Power system stability, vol.1, elements of stability calculations", (1948), wiley, New York.

[40] Kimbark E. W., (1950), "Power system stability, vol.2, power circuits", Wiley, New York.

[41] Kimbark E. W., (1956), "Power system stability, vol.3, synchronous machines", Wiley, New York.

[42] Kimbark E. W., (March 1964), "Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, p 285.

[43] Shperling B. R., Fakheri A., Ware B. J., (July/Aug. 1978), "Compensation Scheme For Single-Pole Switching On Untransposed Transmission Lines", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-97, No. 4, p 1421.

[44] Thomann G. C., Lambert S. R., Phaloprakarn S., (April 1993), "Non-Optimum Compensation Schemes For Single Pole Reclosing On EHV Double Circuit Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, No. 2, p 651

[45] Atmuri S. Rao, Malone L. R., Burtnyk V., (February 1991), "Representation of Single-Pole Open Condition in Stability Studies", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 6, No 1, p9.

[46] A.G. Phadke, S. Horowitz, AG. McLabe (1990), "Réenclenchement automatique adaptatif", CIGRE 34-204.

[47] N. N. Blyakov, V. L. Volchek; V. V. Ilyinichin; S. B Losev, Yu. I. Lyskov; V. N. Novella; V. S. Rahkes; V. M. Strelkov; G. G. Fokin, M. I Khoroshev, (1990), "Utilisation du réenclenchement monophasé automatique dans un grand réseau EHT comportant des lignes 1200 kV", CIGRE, 34-207.

[48] Fortescue C. L., (1918), "Methods of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", Trans. AIEE 37: 1027-1140.

[49] Edith Clarke, 1943, "Circuit Analysis of AC Power Systems", John Willey & Sons.

[50] Association Canadienne de Normalisation, (Juin 1998), "Coordination de l'isolement: Partie 2: Guide d'application", Norme Nationale du Canada, CAN/CSA-C71-2-98, pp. 130-157.

[51] George J. Anders, "Probability Concepts in Electric Power Systems", (1990), John Wiley & Sons.

[52] Canadian Electrical Association, (April 1990), "Forced-Outage Performance of Transmission Equipment, Period January 1, 1984 to December 31, 1988".

[53] Sana A-R., McGillis D. T., Marceau R. J., Do X. D, Olivier G., (7-10 May 2000), "Asymmetrical Operation of a Corridor With One Single Line", Proceedings of IEEE-Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE - CCECE' 2000, Halifax (N.S.) pp. 936-940.

[54] Guy Olivier, R. P. Bouchard, (1997), "Electrotechnique" Edition de l'École Polytechnique de Montréal.

[55] Canadian Electrical Association, (February 2000), "Forced-Outage Performance of Transmission Equipment, For the Period of January 1, 1994 to December 31, 1998".

[56] IEEE Power System Relaying Committee Report, (1984), "Automatic Reclosing of Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-103, No 2.

[57] B. Picard, F.D. Galiana, D. McGillis, (1999), "A Knowledge-Based System For the Structural Design of High-Voltage Lines", Proceedings of IEEE-Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE-CCECE'1999, Edmonton (AL).

[58] Sana A.-R., Marceau R., Olivier G., McGillis D. T., Do X. D, (avril 2000), "Chauffage par asymétrie pour le dégel des lignes de transport d'électricité", Divulgation de technologie, École Polytechnique de Montréal.

[59] A.S. Timascheff, (juin 1970), "Formation de glace sur conducteurs pour conditions marginales", L'Ingénieur, pp. 7-11.

[60] L. V.V Bourgsdorf, E.P. Nikiphorov, A.S. Zelichenko, (1968), "Charge de givre sur les lignes aériennes", Cigré, 23-05.

[61] C. Luan Phan, A. Sévigny (juillet-Août 1978) "Recherche sur le Dégivrage des lignes de transport d'énergie électrique", L'Ingénieur.

[62] Allaire et al., "Dispositif pour déglacer un conducteur sous tension", (24/10/1997), Brevet Canadien CA2219449.

[63] Joe C. Pohlman, Phillip Landers, (August 1982), "Present State-of-the-art of Transmission Line Icing", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No 8.

[64] Peirce "De-icing apparatus for electric cables", (25/6/1957), Us Patent US2797344.

[65] Greenfield et al., "Electrical conductor and system", (20/01/1959), Us Patent US2870311.

[66] Burgsdorf et al., "Device for melting the icing by direct current an conductors of overhead power transmission line", (04/04/1979), Us Patent US4082962.

[67] Genrikh et al., "High-voltage network for areas with high rate of icing", (18/04/1978), Us Patent US4085338.

[68] Genrikh et al., "High-voltage network for areas of increased intensity of icing", (10/10/1978), Us Patent US4119866.

[69] Genrikh et al., "High-voltage network for ereas of increased intensity of icing", (21/11/1978), Us Patent US4126792.

[70] Genrikh et al., "Ice melting circuit arrangement for a high-voltage transmission network", (16/01/1979), Us Patent US4135221.

[71] Shimada et al., "Apparatus for deicing of trolley wires", (26/02/1980)", Us Patent US4190137.

[72] Murphy et al., "Overhead electric conductor de-icing", (11/07/1993), European patent, EP 0377285.

[73] Allaire et al., (25/01/2000), "Method and device for de-icing conductors of a bundle of conductors", Us Patent US6018152.

[74] Marceau R. J., Sana A-R., Sirandi M., DO X. D., Brochu J., McGillis D. T., (Janvier 1999), "L'alimentation des grandes agglomérations: quelques idées novatrices", Revue de L'Électricité et de l'Électronique (REE).

ANNEXES

ANNEXE A CALCUL DE L'ESPÉRANCE MATHÉMATIQUE DE LA LOI BINOMIALE

La transmission de l'énergie à travers une ligne électrique est une variable aléatoire dont la probabilité suit une loi Binomiale. Si N est le nombre de lignes d'un corridor de transport et p la probabilité de transmission pour chaque phase, alors on peut définir les paramètres suivants :

Paramètres par phase :

- Probabilité de transmission: p
- Probabilité de non transmission : $q = 1-p$

Paramètres par ligne :

- Probabilité de transmission : $p_{sym} = p^3$
- Probabilité de non transmission : $q_{sym} = 1 - p_{sym} = 1 - p^3$
- Puissance totale transportée par le corridor : P_t
- Perte de capacité suite à la perte totale de k lignes parmi N: $\frac{k}{N}P_t$.

La probabilité de non transmission de k lignes parmi N suit une distribution binomiale avec pour paramètres N et q_{sym} et est donnée par :

$$Q_{sym}(k,N) = C_k^N q_{sym}^k \left(1-q_{sym}\right)^{N-k} = \frac{N!}{k!(N-k)!}\left(1-p^3\right)^k p^{3(N-k)} \qquad \text{(A.1)}$$

Le risque associé à la perte de charge est donné par :

$$LOLE(k,N) = \frac{k}{N}P_t Q_{sym}(k,N) = \frac{k}{N}P_t C_k^N q_{sym}^k \left(1-q_{sym}\right)^{N-k} \qquad \text{(A.2)}$$

L'espérance mathématique de perte de charge alors :

$$(LOLE)_{sym} = \sum_{k=0}^{N} \frac{k}{N}P_t C_k^N q_{sym}^k \left(1-q_{sym}\right)^{N-k} \qquad \text{(A.3)}$$

$$(LOLE)_{sym} = \frac{P_t}{N}\sum_{k=0}^{N} k\frac{N!}{k!(N-k)!} q_{sym}^k \left(1-q_{sym}\right)^{N-k} \qquad \text{(A.4)}$$

Si k = 0, la relation ci-dessus devient nulle. On peut donc prendre la sommation à partir de k = 1. En faisant apparaître N-1 et k-1 dans l'équation ci-dessus on obtient :

$$(LOLE)_{sym} = \frac{P_t}{N} \sum_{k=1}^{N} \frac{N(N-1)!}{(k-1)!\,[N-1-(k-1)]!} q_{sym} q_{sym}^{k-1} \left(1 - q_{sym}\right)^{N-1-(k-1)} \quad \text{(A.5)}$$

En sortant N et q_{sym} de la somme et en posant :

$$r = k - 1 \quad \text{(A.6)}$$

on obtient :

$$(LOLE)_{sym} = \frac{P_t}{N} N q_{sym} \sum_{r=0}^{N-1} \frac{(N-1)!}{r!\,(N-1-r)!} q_{sym}^{r} \left(1 - q_{sym}\right)^{N-1-r} \quad \text{(A.7)}$$

Dans le membre de droite de l'équation (A.7), la somme représente la somme des probabilités d'une loi binomiale de paramètres N-1 et r et vaut donc l'unité

$$\sum_{r=0}^{N-1} \frac{(N-1)!}{r!\,(N-1-r)!} q_{sym}^{r} \left(1 - q_{sym}\right)^{N-1-r} = 1 \quad \text{(A.8)}$$

on obtient donc finalement :

$$(LOLE)_{sym} = P_t\, q_{sym} = \left(1 - p^3\right) P_t \quad \text{(A.9)}$$

ANNEXE B MODÈLE À PARAMÈTRES DISTRIBUÉS DES LIGNES: CALCUL DES ÉLÉMENTS DE COMPENSATION SITUÉS À L'ENTRÉE ET À LA SORTIE DE LA LIGNE

On considère un corridor constitué de N lignes non couplées et suffisamment transposées. Pour un tel corridor, la Figure A.1 représente la phase A qui est constituée par la mise en parallèle des phases a des N lignes du corridor. Chaque phase est représentée par le quadripôle équivalent et des éléments de compensation x_1, x_2, y_1, et y_2 sont ajoutés à ses deux bouts.

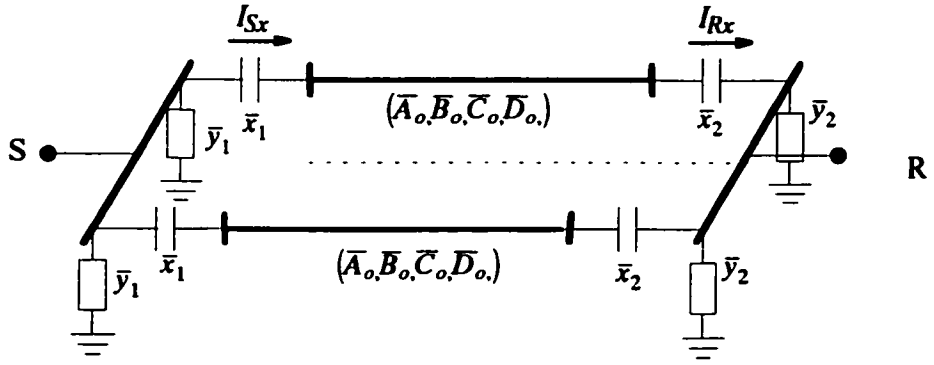


Figure A.1 Circuit équivalent d'une phase d'un corridor de N lignes à paramètres distribués, en exploitation asymétrique.

On considère qu'une contingence élémentaire (ou de base) se traduit par la coupure d'une ligne. On désigne par L le nombre des lignes parmi N qui sont soumises à une contingence élémentaire. Pendant l'exploitation normale symétrique (sans contingence), les valeurs des éléments $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{y}_1$, et $\bar{y}_2$ sont nuls (ils sont déconnectés). Donc,

$$\{ L = 0 \} \Rightarrow \left\{ (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_1, \bar{y}_2) = (0, 0, 0, 0) \right\} \qquad \text{(A.10)}$$

On établit les équations reliant la tension et le courant de l'entrée du corridor (coté S, $\bar{V}_S$ et $\bar{I}_S$) à la tension et le courant de la sortie du corridor (coté R, $\bar{V}_R$ et $\bar{I}_R$), pendant le fonctionnement normal (marche symétrique) puis pendant une marche asymétrique durant laquelle le corridor ne possède que N-L lignes actives (à l'issue de L contingences élémentaires).

Pour N lignes en parallèle en fonctionnement symétrique on obtient, mathématiquement, la mise en parallèle de N quadripôles identiques, soit :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} \bar{A}_o & \bar{B}_o \\ \bar{C}_o & \bar{D}_o \end{bmatrix}_N \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} \bar{A}_o & \frac{\bar{B}_o}{N} \\ N\bar{C}_o & \bar{D}_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_N \tag{A.11}$$

Pour N-L lignes en parallèle en fonctionnement asymétrique, les éléments de compensation $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{y}_1$, et $\bar{y}_2$ sont activés selon les besoins et on obtient la mise en parallèle de N-L quadripôles équivalents:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_{N-L} &= \begin{bmatrix} \bar{A}'_o & \bar{B}'_o \\ \bar{C}'_o & \bar{D}'_o \end{bmatrix}_{N-L} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}_{N-L} \\ &= \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ y_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_o & \bar{B}_o \\ \bar{C}_o & \bar{D}_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ y_2 & 1 \end{bmatrix} \right)_{N-L} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}_{N-L} \end{aligned} \tag{A.12}$$

Les conditions d'égalité des transits de puissance sont données par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix}_{N-L} = \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix}_N \qquad et \qquad \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}_{N-L} = \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}_N \tag{A.13}$$

En intégrant les équations (A.11) et (A.12) dans les équations (A.13) et après développement de l'équation ci-dessus on aboutit finalement aux équations générales régissant la marche asymétrique comme suit: (A.14).

$$\begin{aligned} &\bar{A}_o\bar{x}_2 + \bar{D}_o\bar{x}_1 + \bar{C}_o\bar{x}_1\bar{x}_2 = -\frac{L}{N}\bar{B}_o \\ &\bar{C}_o\bar{x}_1 + \frac{N-L}{N}\bar{B}_o\bar{y}_2 = 0 \\ &\bar{A}_o\bar{y}_1 + \bar{D}_o\bar{y}_2 + \bar{C}_o\bar{x}_1\bar{y}_1 + \bar{C}_o\bar{x}_2\bar{y}_2 + \frac{N-L}{N}\bar{B}_o\bar{y}_1\bar{y}_2 = \frac{L}{N-L}\bar{C}_o \\ &\bar{C}_o\bar{x}_2 + \frac{N-L}{N}\bar{B}_o\bar{y}_1 = 0 \\ &\{ l = 0 \} \Rightarrow \left\{ (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_1, \bar{y}_2) = (0, 0, 0, 0) \right\} \end{aligned} \tag{A.14}$$

Physiquement, un tel problème n'a pas une solution unique: il y a une dualité entre la compensation série et la compensation shunt de sorte que pour $\bar{x}_1$ donné, on trouvera toujours une valeur de $\bar{x}_2$, $\bar{y}_1$, et $\bar{y}_2$ de sorte que l'équilibre soit réalisé.

Mathématiquement, ceci se traduit par de la redondance dans le système d'équation (A.14) et des méthodes d'optimisation peuvent être appliquées pour trouver des solutions selon les besoins.

L'équation (A.15) est une forme résolue du système (A.14).

$$
\begin{aligned}
&\bar{x}_1 \neq -\bar{A}_o/\bar{C}_o \\
&\bar{x}_2 = -\frac{\frac{l}{N}\bar{B}_o + \bar{D}_o\bar{x}_1}{\bar{C}_o\bar{x}_1 + \bar{A}_o} \\
&\bar{y}_1 = -\frac{N}{N-l}\frac{\bar{C}_o}{\bar{B}_o}\bar{x}_2 = \frac{N}{N-l}\frac{\bar{C}_o\frac{l}{N}\bar{B}_o + \bar{D}_o\bar{x}_1}{\bar{B}_o\,\bar{C}_o\bar{x}_1 + \bar{A}_o} \\
&\bar{y}_2 = -\frac{N}{N-l}\frac{\bar{C}_o}{\bar{B}_o}\bar{x}_1 \\
&\bar{A}_o\bar{y}_1 + \bar{D}_o\bar{y}_2 + \bar{C}_o\bar{x}_1\bar{y}_1 + \bar{C}_o\bar{x}_2\bar{y}_2 + \frac{N-l}{N}\bar{B}_o\bar{y}_1\bar{y}_2 = \frac{l}{N-l}\bar{C}_o \\
&\{\, l = 0 \,\} \Rightarrow \left| \; (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_1, \bar{y}_2) = (0, 0, 0, 0) \; \right|
\end{aligned}
\qquad \text{(A.15)}
$$

L'équation (A.15) montre que si la compensation série est nulle à un bout de la ligne, alors la compensation shunt doit être nulle à l'autre bout et vice versa (e.g. $x_1 = 0 \Rightarrow y_2 = 0$).

Pour le cas particulier des lignes symétriques sans pertes, les paramètres du quadripôle sont obtenus par les relations suivantes :

$$
\begin{aligned}
&\bar{D}_o = \bar{A}_o = A = \cos\theta \qquad && \theta = \theta = \sqrt{X_L Y_L} = \omega\sqrt{L_L C_L} \\
&\bar{B}_o = j\,Z_o \sin\theta = j\,B && \\
&\bar{C}_o = j\frac{\sin\theta}{Z_o} = j\,C && Z_o = \sqrt{\frac{X_L}{Y_L}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}
\end{aligned}
\qquad \text{(A.16)}
$$

Si en plus, la ligne est compensée symétriquement c'est à dire si on pose :

$$
\begin{aligned}
&\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x} \\
&\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \bar{y}
\end{aligned}
\qquad \text{(A.17)}
$$

alors, les valeurs des impédance et susceptance x et y du compensateur sont comme suit :

$$
\begin{aligned}
&\bar{x} = -j\frac{A}{C}\left[-1 + \sqrt{1 + \frac{L}{N}\frac{BC}{A^2}}\right] = jx \\
&\bar{y} = -\frac{N}{N-L}\frac{C}{B}x = j\frac{N}{N-L}\frac{A}{B}\left[-1 + \sqrt{1 + \frac{L}{N}\frac{BC}{A^2}}\right] = jy
\end{aligned}
\qquad \text{(A.18)}
$$

Avec les valeurs de $\bar{x}$ et $\bar{y}$ ci-dessus, on peut calculer les courants et évaluer la puissance réactive nécessaire.

ANNEXE C CALCUL DES ÉLÉMENTS DES COMPENSATEURS DE SÉQUENCE INVERSE MONTÉS EN ÉTOILE

Le calcul est effectué pour le compensateur de gauche et pour le montage en Y selon la méthode proposée par Olivier et Bouchard (1997, [54]). Les valeurs des impédances du compensateur de droite en seront déduites, par la suite.

C.1 Courants dans le compensateur de gauche

Les courants de lignes ($\bar{I}_{ag}$, $\bar{I}_{bg}$, $\bar{I}_{cg}$) entrant dans le compensateurs de séquence inverse de gauche sont :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ag} \\ \bar{I}_{bg} \\ \bar{I}_{cg} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \bar{I}'_{La2} \\ a\bar{I}'_{La2} \\ a^2\bar{I}'_{La2} \end{bmatrix} \tag{A.19}$$

et les courants de séquences ($\bar{I}_{a1g}$, $\bar{I}_{b1g}$, $\bar{I}_{c1g}$) associés aux courants de ligne entrant dans le compensateur de gauche sont:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a1g} \\ \bar{I}_{a2g} \\ \bar{I}_{a0g} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}'_{La2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.20}$$

C.2 Tensions de séquence phase neutre du compensateur de gauche

Les tensions de séquence phase-neutre ($\bar{V}_{a1g}$, $\bar{V}_{a2g}$, $\bar{V}_{a0g}$) du compensateur de gauche sont obtenues de la relation les reliant aux tensions de ligne (phase-phase, $\bar{V}_{abg}$, $\bar{V}_{bcg}$, $\bar{V}_{cag}$) aux bornes de ce même compensateur:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{abg} \\ \bar{V}_{bcg} \\ \bar{V}_{cag} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{V}_{a1g} \\ \bar{V}_{a2g} \\ \bar{V}_{a0g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-a^2)\bar{V}_{a1g} + (1-a)\bar{V}_{a2g} \\ (a^2-a)\bar{V}_{a1g} + (a-a^2)\bar{V}_{a2g} \\ (a-1)\bar{V}_{a1g} + (a^2-1)\bar{V}_{a2g} \end{bmatrix} \tag{A.21}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \overline{V}_{a1g} &= \frac{1-a}{3}\overline{V}_{Sab} = \overline{V}_{Sa} \\ \overline{V}_{a2g} &= 0 \\ \overline{V}_{a0g} &= \overline{V}_{a0g} \end{aligned} \tag{A.22}$$

$\overline{V}_{Sa}$ et $\overline{V}_{Sab}$ sont les tensions de phase et de ligne de la source respectivement. La tension de séquence homopolaire phase-neutre du compensateur reste indéterminée à cette étape.

C.3 Relations entre tension de séquence phase-neutre et courants de séquence du compensateur gauche

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{a1g} \\ \overline{V}_{a2g} \\ \overline{V}_{a0g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{z}_{a0g} & \overline{z}_{a2g} & \overline{z}_{a1g} \\ \overline{z}_{a1g} & \overline{z}_{a0g} & \overline{z}_{a2g} \\ \overline{z}_{a2g} & \overline{z}_{a1g} & \overline{z}_{a0g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_{a1g} \\ \overline{I}_{a2g} \\ \overline{I}_{a0g} \end{bmatrix} \tag{A.23}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{Sa} \\ 0 \\ \overline{V}_{a0g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{z}_{a0g} & \overline{z}_{a2g} & \overline{z}_{a1g} \\ \overline{z}_{a1g} & \overline{z}_{a0g} & \overline{z}_{a2g} \\ \overline{z}_{a2g} & \overline{z}_{a1g} & \overline{z}_{a0g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{I}_{a2g} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{z}_{a2g}\overline{I}_{a2g} \\ \overline{z}_{a0g}\overline{I}_{a2g} \\ \overline{z}_{a1g}\overline{I}_{a2g} \end{bmatrix} \tag{A.24}$$

C.4 Évaluation des impédances de compensation

Conditions sur les puissances dans le compensateur de gauche pour que le compensateur ne consomme pas de la puissance apparente.

Il faut que:

$$z_{ag}|\overline{I}_{ag}|^2 + z_{bg}|\overline{I}_{bg}|^2 + z_{cg}|\overline{I}_{cg}|^2 = 0 \tag{A.25}$$

Compte tenu de l'équation (A.19) on obtient les conditions suivantes

$$R_a = R_b = R_c \tag{A.26}$$

$$X_{ag} + X_{bg} + X_{cg} = 0 \tag{A.27}$$

Valeurs des impédances pour le compensateur de gauche :

$$j\begin{bmatrix} X_{ag} \\ X_{bg} \\ X_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{z}_{a1g} \\ \overline{z}_{a2g} \\ \overline{z}_{a0g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{a1g} + jX_{a1g} \\ R_{a2g} + jX_{a2g} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.28}$$

En séparant les parties réelles et imaginaires de l'équation ci-dessus on détermine les valeurs des impédances comme suit:

$$\bar{z}_{a2g} = R_{a2g} + jX_{a2g} = \frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}_{a2g}} = -\frac{V_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}} \tag{A.29}$$

$$\bar{z}_{a1g} = R_{a1g} + jX_{a1g} = -R_{a2g} + jX_{a2g} \tag{A.30}$$

$$\bar{V}_{a0g} = \bar{z}_{a1g}\bar{I}_{a2g} \tag{A.31}$$

$$X_{ag} = 2X_{a2g} = -2\Im m\left(\frac{V_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right)$$

$$X_{bg} = \sqrt{3}R_{a2g} - X_{a2g} = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) + \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \tag{A.32}$$

$$X_{cg} = -\sqrt{3}R_{a2g} - X_{a2g} = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{L2}}\right) + \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Sa}}{\bar{I}'_{La2}}\right)$$

C.5 Valeurs des impédances pour le compensateur de droite

En procédant de la même manière que pour le compensateur gauche, les valeurs des impédances du compensateur de droite sont données par les équations suivantes :

$$\bar{z}_{a2d} = R_{a2d} + jX_{a2d} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}_{a2d}} = \frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}} \tag{A.33}$$

$$\bar{z}_{a1d} = R_{a1d} + jX_{a1d} = -R_{a2d} + jX_{a2d} \tag{A.34}$$

$$V_{a0d} = z_{a1d}I_{a2d} \tag{A.35}$$

$$X_{ad} = 2X_{a2d} = 2\Im m\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right)$$

$$X_{bd} = \sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \tag{A.36}$$

$$X_{cd} = -\sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right)$$

$\bar{V}_{Ra}$ la tension entre la phase a et le neutre du côté droit, $\bar{I}'_{L2}$ le courant de séquence inverse rentrant dans le compensateur droit, R_{ad2} et X_{ad2} respectivement la résistance et la réactance de séquence inverse du compensateur droit.

ANNEXE D CALCUL DES ÉLÉMENTS DES COMPENSATEURS DE SÉQUENCE INVERSE MONTÉS EN TRIANGLE

Le calcul est effectué pour le compensateur de droite et pour le montage en Δ selon la méthode proposée par Gyugyi L., Otto R. A. et Putman T. H. (1978, [18]). Les valeurs des impédances du compensateur de gauche en seront déduites, par la suite.

Les courants entrant dans le compensateur de séquence inverse côté droit sont donnés par l'expression suivante:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ad} \\ \bar{I}_{bd} \\ \bar{I}_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}'_{L2} \\ a\bar{I}'_{L2} \\ a^2\bar{I}'_{L2} \end{bmatrix} \tag{A.37}$$

Les courants des séquences résultant de (A.37) sont:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{1d} \\ \bar{I}_{2d} \\ \bar{I}_{0d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}'_{L2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.38}$$

D'un autre côté, en utilisant les relations ligne-ligne aux bornes du compensateur et en supposant celui-ci constitué uniquement de susceptances pures, on a:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{abd} \\ \bar{I}_{bcd} \\ \bar{I}_{cad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{abd}\bar{V}_{abd} \\ jB_{bcd}\bar{V}_{bcd} \\ jB_{bcd}\bar{V}_{bcd} \end{bmatrix} \tag{A.39}$$

Les courants de ligne du compensateur sont alors donnés par la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ad} \\ \bar{I}_{bd} \\ \bar{I}_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{abd} - \bar{I}_{cad} \\ \bar{I}_{bcd} - \bar{I}_{abd} \\ \bar{I}_{cad} - \bar{I}_{bcd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{abd} \\ \bar{I}_{bcd} \\ \bar{I}_{cad} \end{bmatrix} \tag{A.40}$$

Les courants de séquence du compensateur sont déduits des équations (A.39) et (A.40) comme suit:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{1d} \\ \bar{I}_{2d} \\ \bar{I}_{0d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{I}_{ad} \\ \bar{I}_{bd} \\ \bar{I}_{cd} \end{bmatrix} = \frac{j}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} B_{abd}\bar{V}_{abd} \\ a^2 B_{bcd}\bar{V}_{abd} \\ aB_{cad}\bar{V}_{abd} \end{bmatrix} \quad \text{(A.41)}$$

En égalisant les expressions données dans les équations (A.38) et (A.41), on aboutit à:

$$\frac{j}{3}\begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} B_{abd} \\ a^2 B_{bcd} \\ aB_{cad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}'_{L2} \\ \bar{V}_{abd} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}'_{L2} \\ \bar{V}_{Rab} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(A.42)}$$

En séparant l'équation ci-dessus en partie imaginaire et réelle et en résolvant, on obtient les valeurs des susceptances de compensation comme suit:

$$\begin{bmatrix} B_{abd} \\ B_{bcd} \\ B_{cad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{abr}}\right) + \Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Rab}}\right) \\ -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Rab}}\right) - \Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Rab}}\right) \\ \frac{2}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Rab}}\right) \end{bmatrix} \quad \text{(A.43)}$$

En fonction de la tension phase-neutre on a les relations suivantes:

$$\begin{bmatrix} B_{abd} \\ B_{bcd} \\ B_{cad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{La2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\ -\frac{2}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \end{bmatrix} \quad \text{(A.44)}$$

Les susceptances pour le compensateur de gauche sont déduites des équations (A.43) ou (A.44) en remplaçant $\bar{I}'_{L2}$ par $-\bar{I}'_{L2}$ et $\bar{V}_{Rab}$ par $\bar{V}_{Sab}$ ou $\bar{V}_{Ra}$ par $\bar{V}_{Sa}$.

ANNEXE E RELATION ENTRE IMPÉDANCES DES COMPENSATEURS MONTÉS EN ÉTOILE ET EN TRIANGLE

Le but de cette section est de montrer qu'un compensateur de séquence négative monté en triangle dont les susceptances sont décrites par les relations (A.45) est équivalent, du point de vue électrique, à un compensateur de séquence inverse monté en étoile et dont les réactances sont données par les relations (A.46). On montre aussi qu'on peut passer de l'un à l'autre à l'aide des relations générales de transformation des impédances triphasées en triangle et en étoile et vice versa .

$$
\begin{aligned}
B_{abd} &= -\frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\
B_{bcd} &= -\frac{2}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) \\
B_{cad} &= \frac{1}{\sqrt{3}}\Re e\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right) + \frac{1}{3}\Im m\left(\frac{\bar{I}'_{L2}}{\bar{V}_{Ra}}\right)
\end{aligned}
\qquad \text{(A.45)}
$$

$$
\begin{aligned}
X_{ad} &= 2X_{a2d} = 2\Im m\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\
X_{bd} &= \sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) \\
X_{cd} &= -\sqrt{3}R_{a2d} - X_{a2d} = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right)
\end{aligned}
\qquad \text{(A.46)}
$$

Pour passer de l'équation (A.45) à l'équation (A.46) on réécrit le rapport du courant $\bar{I}'_{L2}$ sur la tension de phase $\bar{V}_{Ra}$ pour le compensateur de droite sous la forme suivante :

$$
\frac{\bar{I}'_{La2}}{\bar{V}_{Ra}} = \frac{1}{\frac{\bar{V}_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}} = \frac{\Re e\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right) - j\Im m\left(\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right)}{\left|\frac{V_{Ra}}{\bar{I}'_{L2}}\right|^2}
\qquad \text{((A.47))}
$$

En posant :

$$
\begin{aligned}
re &= \Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right) \\
im &= \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right) \\
k &= \left|\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right| = \sqrt{re^2 + im^2}
\end{aligned}
\tag{A.48}
$$

on obtient les parties réelle et imaginaire du rapport du courant de séquence négative sur la tension de phase :

$$
\begin{aligned}
\Re e\left(\frac{\overline{I}'_{L2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) &= \frac{\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right)}{\left|\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right|^2} = \frac{re}{k^2} \\
\Im m\left(\frac{\overline{I}'_{L2}}{\overline{V}_{Ra}}\right) &= -\frac{\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right)}{\left|\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right|^2} = -\frac{im}{k^2}
\end{aligned}
\tag{A.49}
$$

On peut donc réécrire les susceptances du compensateur de séquence inverse en fonction des parties réelle et réactive d'une impédance comme suit:

$$
\begin{aligned}
B_{abd} &= -\frac{\sqrt{3}\,re + im}{3k^2} \\
B_{bcd} &= \frac{2}{3}\frac{im}{k^2} \\
B_{cad} &= \frac{\sqrt{3}\,re - im}{3k^2}
\end{aligned}
\tag{A.50}
$$

Les réactances montées en triangle et correspondant respectivement aux susceptances ci-dessus sont obtenues de (A.50) en utilisant la relation liant l'admittance et l'impédance d'un même élément par :

$$
\begin{aligned}
X_{abd} &= \frac{3k^2}{\sqrt{3}\,re + im} \\
X_{bcd} &= -\frac{3}{2}\frac{k^2}{im} \\
X_{cad} &= -\frac{3k^2}{\sqrt{3}\,re - im}
\end{aligned}
\tag{A.51}
$$

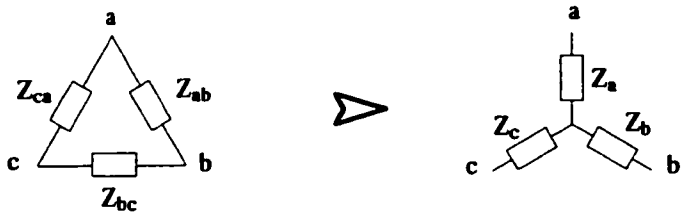


Figure A.2 Transformation triangle-étoile des impédances

La transformation d'impédance d'une charge triphasée en triangle en celle d'une charge triphasée équivalente en étoile (Figure A.2) se fait en utilisant les relations données dans l'équation (A.52) suivante :

$$\begin{aligned}
\overline{Z}_a &= \frac{\overline{Z}_{ab}\overline{Z}_{ca}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{ca} + \overline{Z}_{bc}} \\
\overline{Z}_b &= \frac{\overline{Z}_{ab}\overline{Z}_{ca}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{ca} + \overline{Z}_{bc}} \\
\overline{Z}_c &= \frac{\overline{Z}_{bc}\overline{Z}_{ca}}{\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{ca} + \overline{Z}_{bc}}
\end{aligned} \tag{A.52}$$

En appliquant la transformation triangle-étoile aux impédances résultant des réactances données dans l'équation (A.51) on obtient dans une étape intermédiaire :

$$\begin{aligned}
\overline{Z}_{ab} + \overline{Z}_{bc} + \overline{Z}_{ca} &= \frac{j9k^4}{2im(3re^2 - im^2)} \\
\overline{Z}_{ca}\overline{Z}_{ab} &= \frac{9k^4}{3re^2 - im^2} \\
\overline{Z}_{ab}\overline{Z}_{bc} &= \frac{9k^4}{2\sqrt{3}\,re\,im + 2im^2} \\
\overline{Z}_{bc}\overline{Z}_{ca} &= \frac{-9k^4}{2\sqrt{3}\,re\,im - 2im^2}
\end{aligned} \tag{A.53}$$

et de là on déduit les impédances du compensateur de séquence inverse monté en étoile.

$$X_a = 2im = 2\Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right)$$

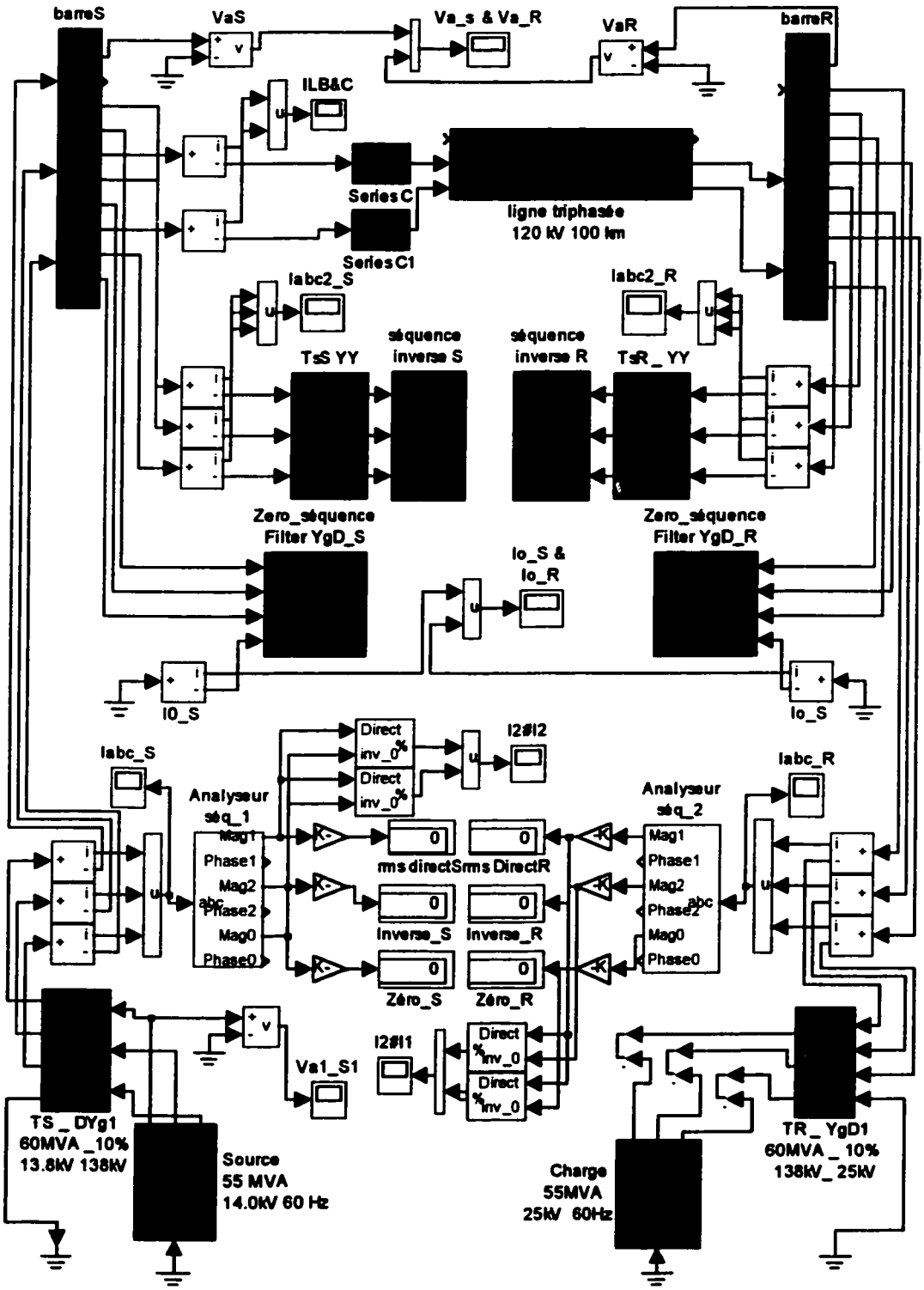
$$X_b = \sqrt{3}re - im = \sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right) \qquad \text{(A.54)}$$

$$X_c = -\sqrt{3}re - im = -\sqrt{3}\Re e\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right) - \Im m\left(\frac{\overline{V}_{Ra}}{\overline{I}'_{L2}}\right)$$

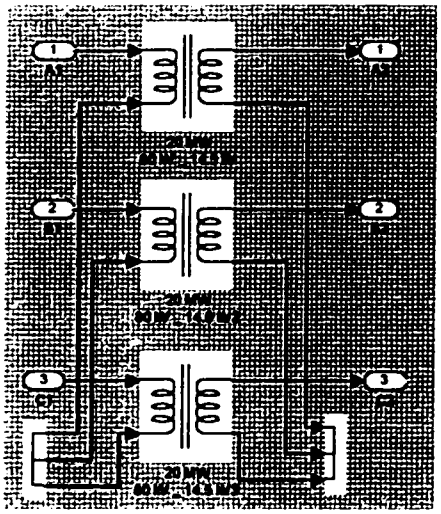
Cette dernière équation donne les relations recherchées.

Le passage de la relation (A.46) à la relation (A.45) se fait par la même procédure. Ceci permet donc de conclure à l'équivalence entre les compensateurs de séquence inverse montés en triangle et en étoile.

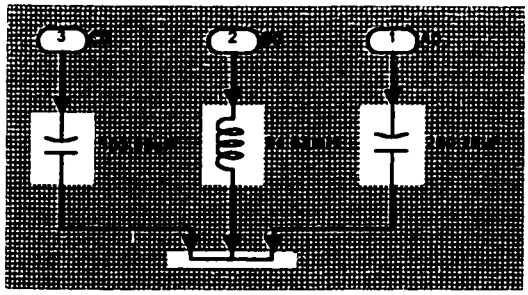
ANNEXE F DÉTAIL DES MODÈLES UTILISÉS POUR LA SIMULATION



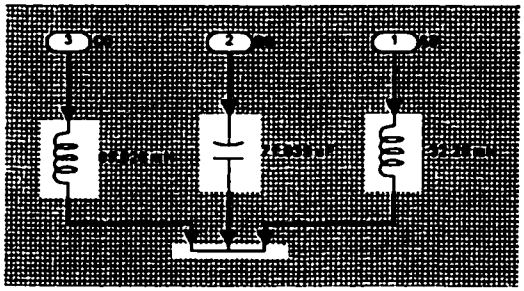
Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs conventionnels: modèle général



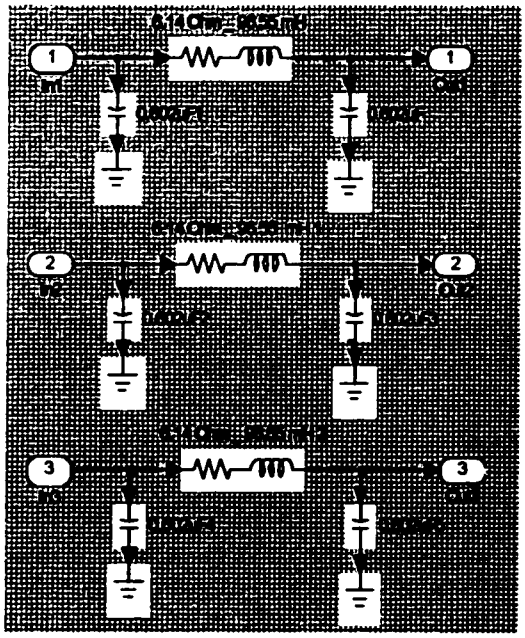
Transformateur Y-Y 3*20MVA,
(séquence inverse)



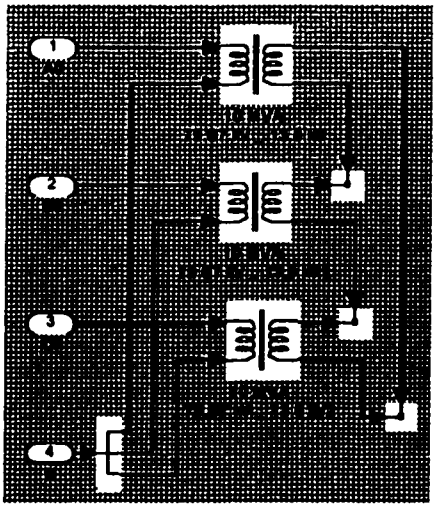
Compensateur de séquence inverse côté source



Compensateur de séquence inverse côté charge

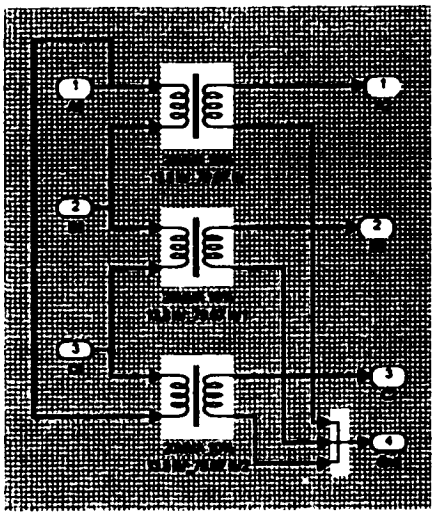


Ligne triphasée 120 kV 100 km

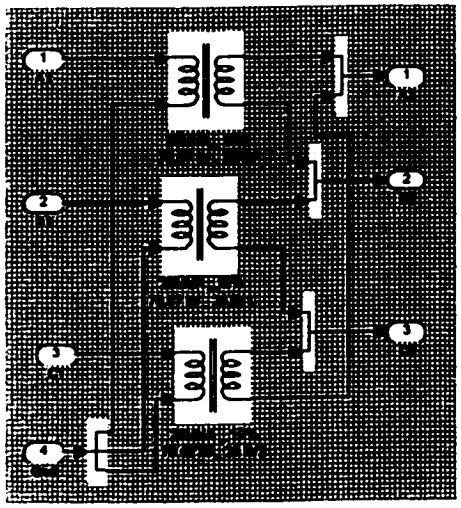


Filtre de squence homopolaire:
transformateur Y-D

Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs conventionnels : détail de la ligne et des filtres de séquences inverse et homopolaire

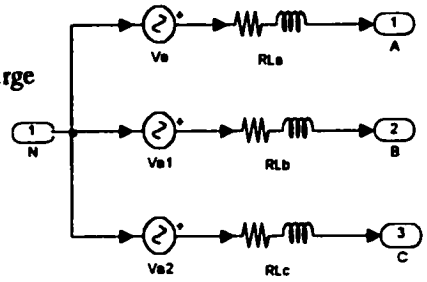


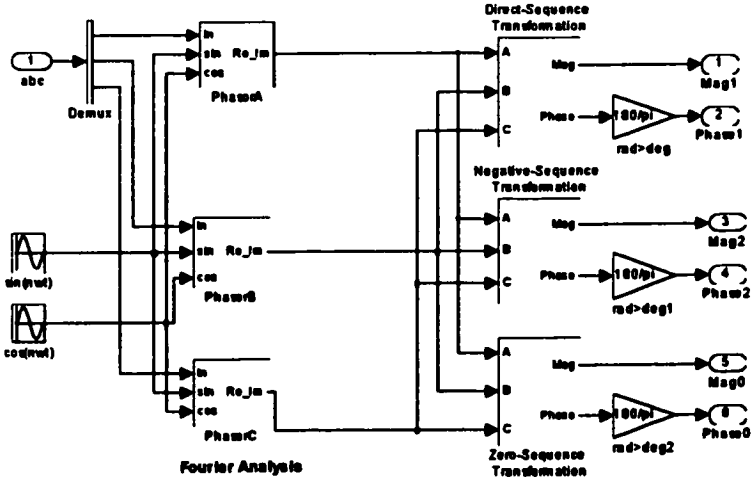
Transformateur à la source D-Yg



Transformateur à la charge Yg-D

Modèle de la source et de la charge

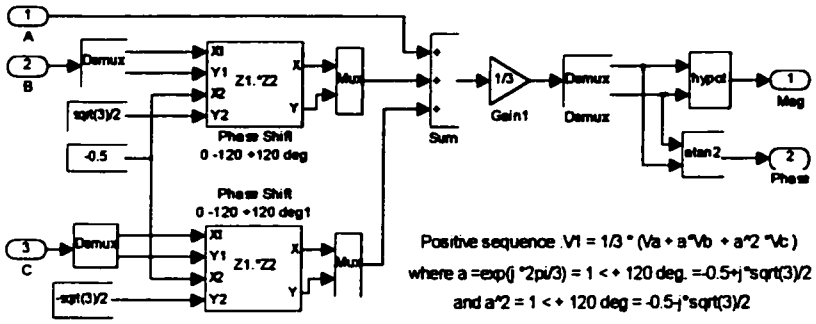




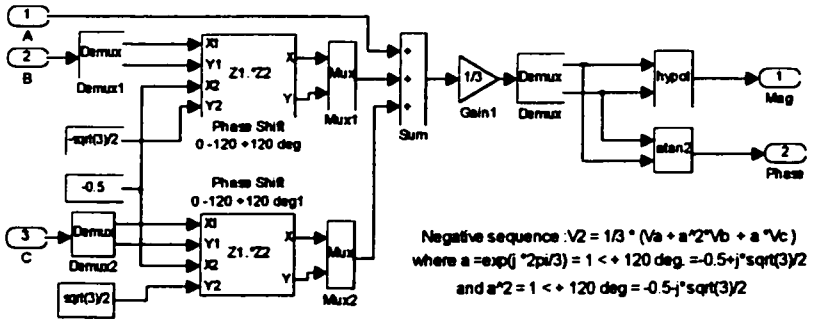
Analyseur de séquence: modèle général

Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs conventionnels : détails de la source, de la charge, et analyseur de séquence

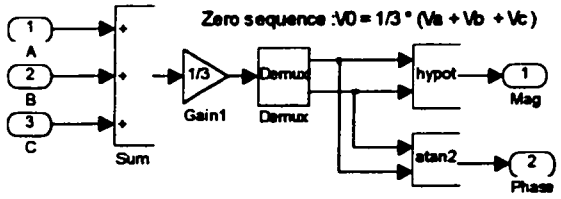
analyseur de séquences: calcul de la séquence directe (pour la séquence directe



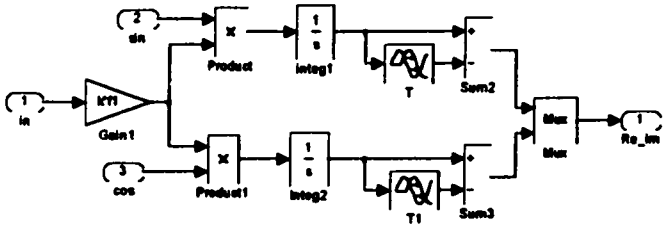
analyseur de séquences: calcul de la séquence directe (pour la séquence inverse



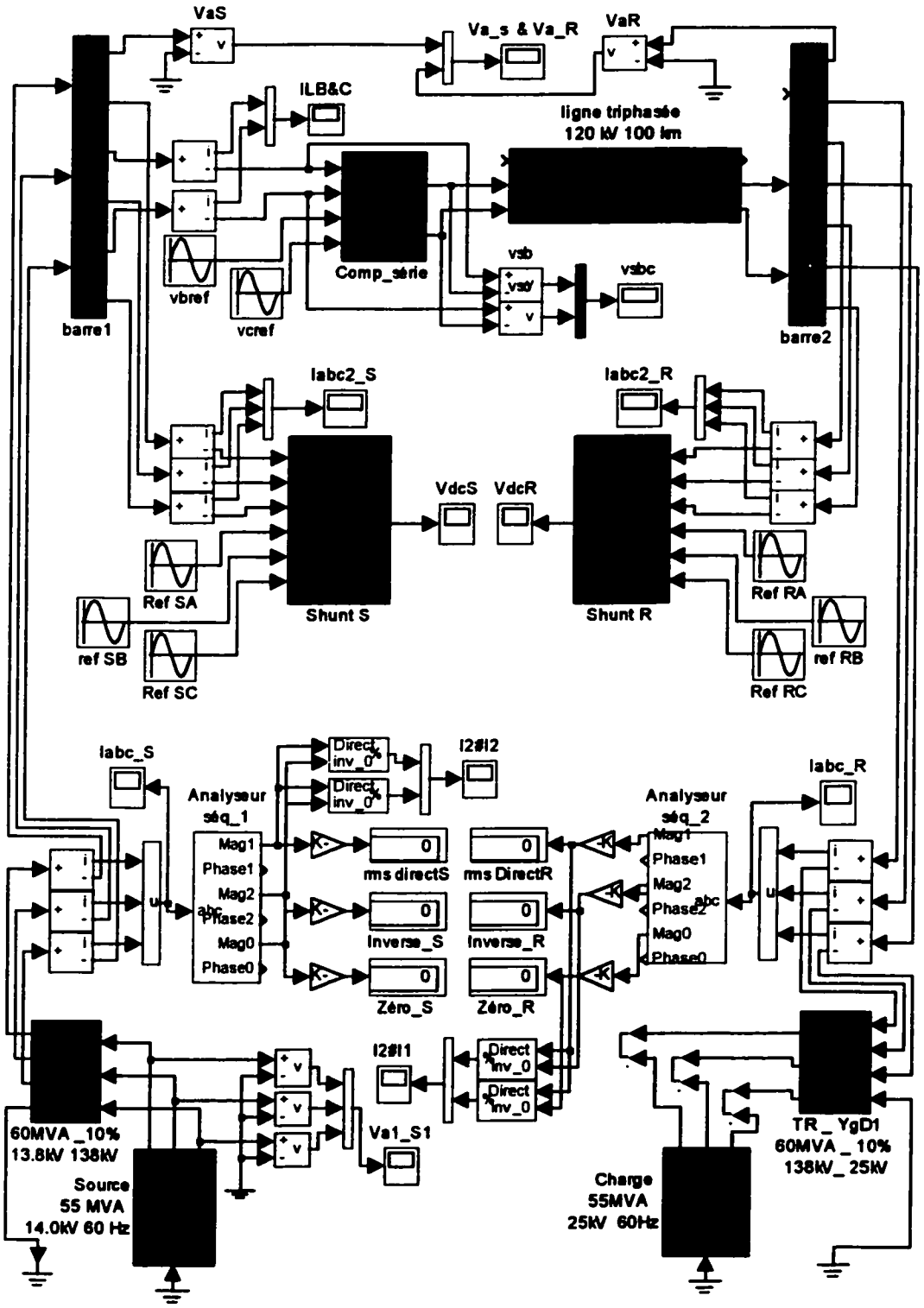
analyseur de séquences: calcul de la séquence homopolaire



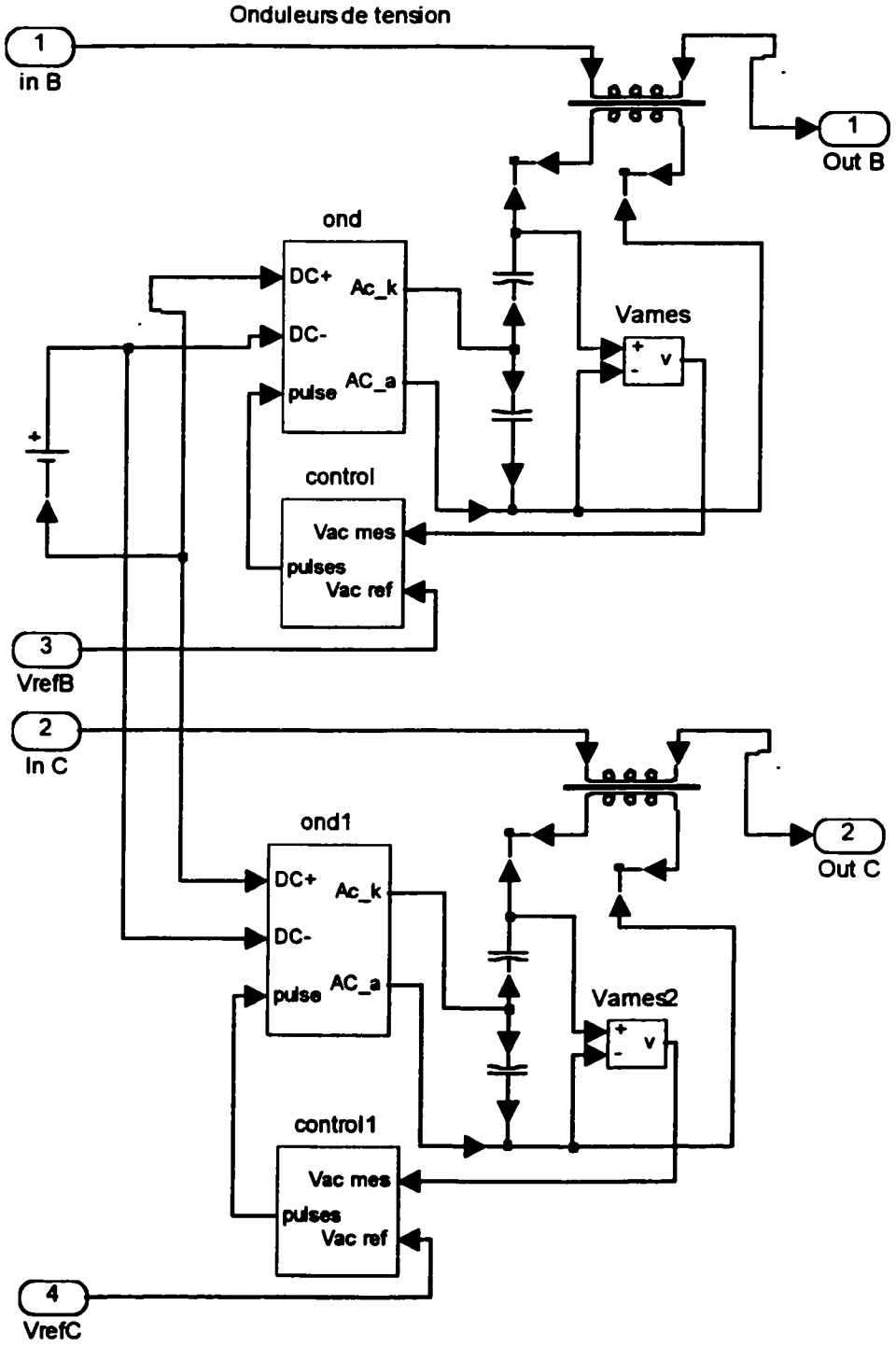
analyseur de séquences: analyse de fourier



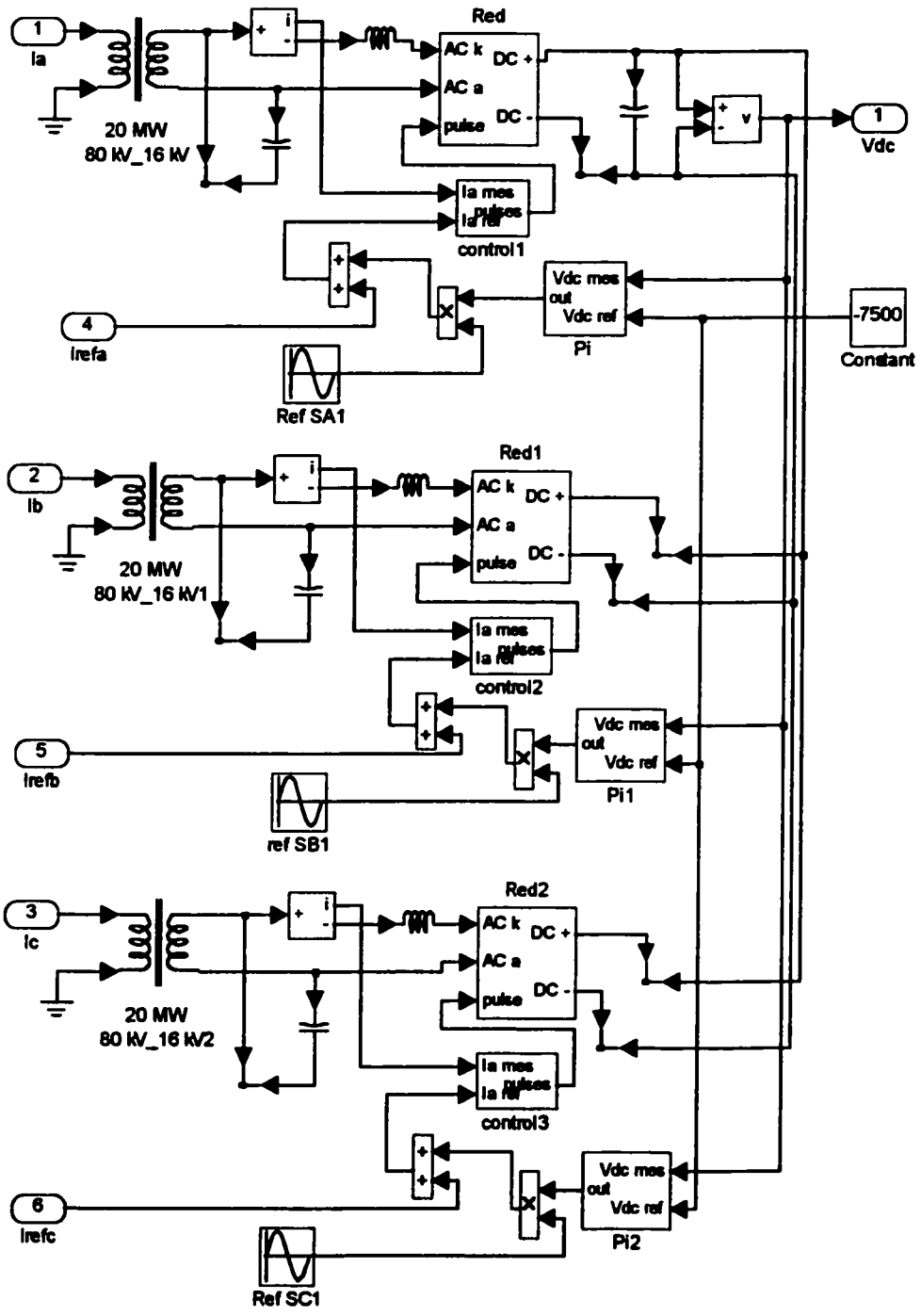
Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs conventionnels : détails de l'analyseur de courants de séquences



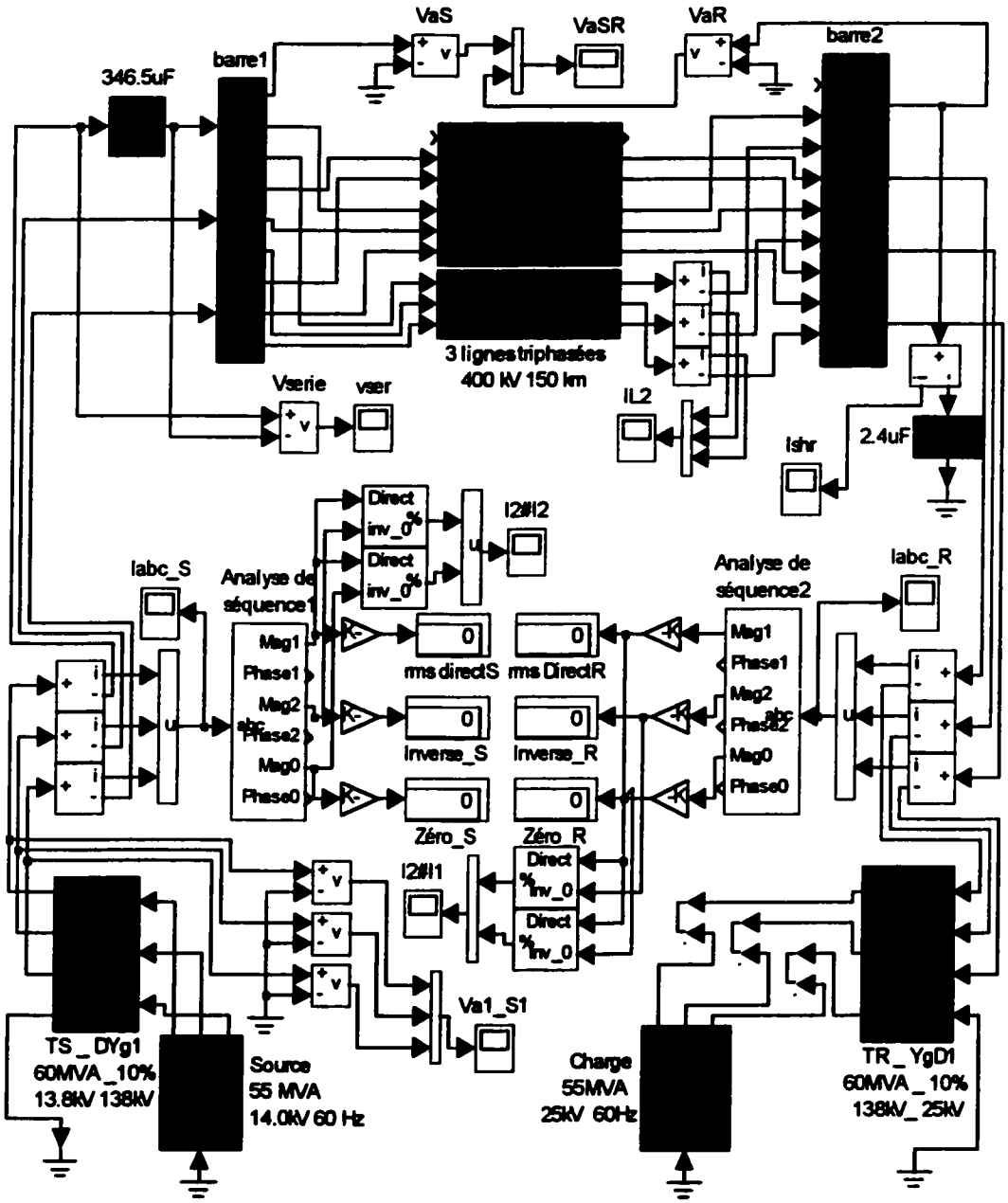
Corridor avec une ligne et compensation par dispositifs modernes: modèle général



Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs modernes:
Modèle des compensateurs séries à l'entrée de la ligne

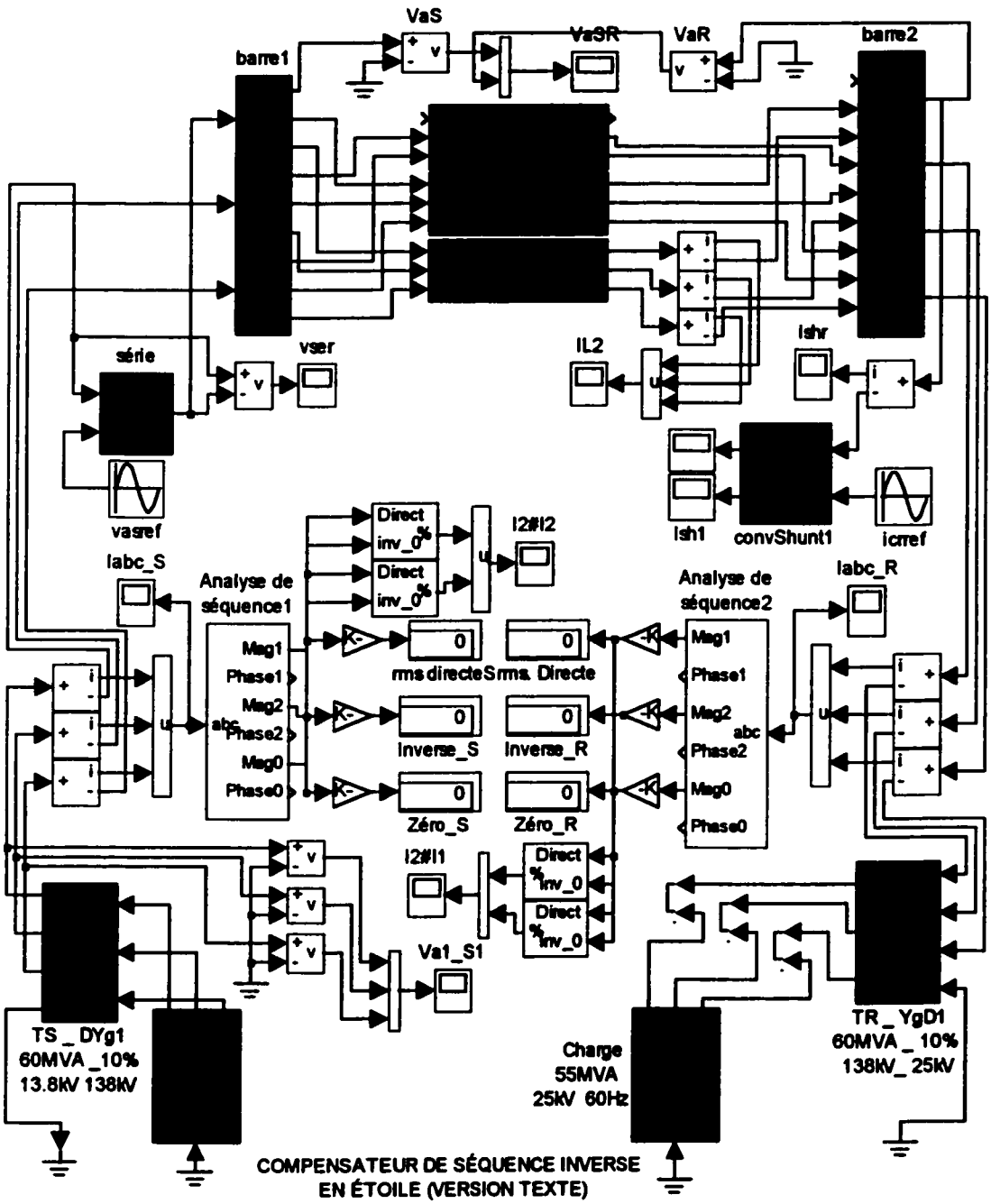


Corridor avec une seule ligne et compensation par dispositifs modernes : modèle du compensateur shunt à l'entrée et à la sortie de la ligne

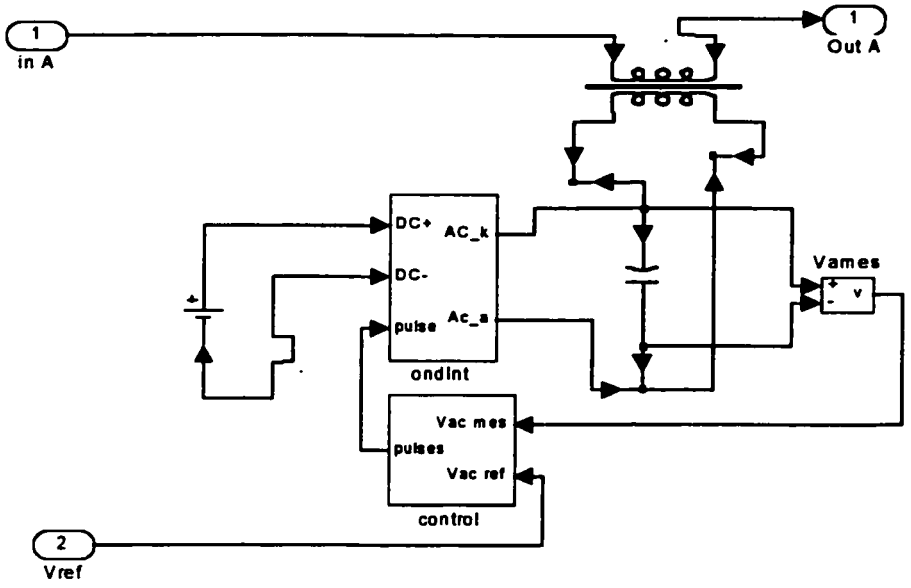


CONDENSATEUR SÉRIE À L'ENTRÉE DE LA LIGNE
3 LIGNES DE 400 kV

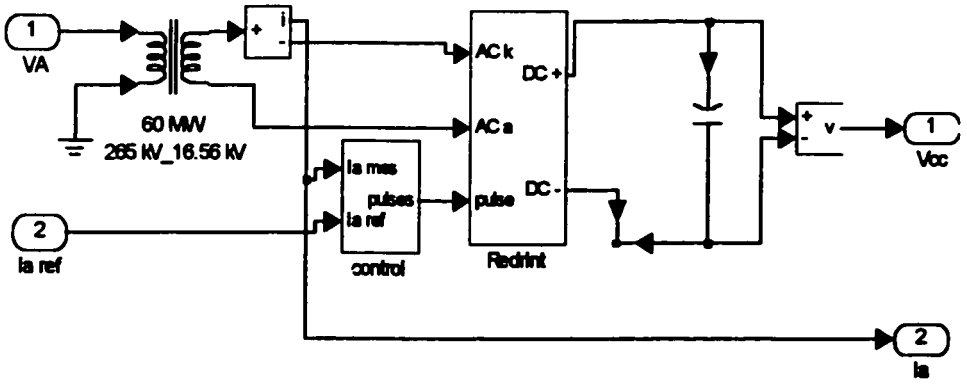
Corridor avec trois lignes et compensation par dispositifs conventionnels: modèle général



Corridor avec trois lignes et compensation par dispositifs modernes : modèle général



Corridor avec trois lignes et compensation par dispositifs modernes : modèle du compensateur série à l'entrée de la ligne



Corridor avec trois lignes et compensation par dispositifs modernes : modèle du compensateur shunt à la sortie de la ligne