POLYPUBLIE

Contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique

Jérome Ndayizamba

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1996
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Thèse de doctorat/Ph.D. thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/8933/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Ndayizamba, J. (1996). Contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8933/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Xuan-Dai Do, & Serge Lefebvre
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

UNIVERSITE DE MONTREAL

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA COMPENSATION SERIE AVANCEE DANS LES RESEAUX DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE

JEROME NDAYIZAMBA

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

ET DE GENIE INFORMATIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL

THESE PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)

(GENIE ELECTRIQUE)

DECEMBRE 1996

© Jérôme Ndayizamba, 1996.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
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.

0-612-26430-0

Canada

UNIVERSITE DE MONTREAL

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL

Cette thèse intitulée:

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA COMPENSATION SERIE AVANCEE DANS LES RESEAUX DE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE

présentée par: NDAYIZAMBA Jérôme

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

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

M. OLIVIER Guy, Ph.D., Président

M. DO Xuan-Dai, Ph.D., Directeur de recherche

M. LEFEBVRE Serge, Ph.D., Co-Directeur de recherche

M. GABA Georges, Ph.D., Membre

M. LAGACE Pierre Jean, Ph.D.,Membre externe

A mon épouse Béatrice

A mon fils Marcel

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur X.D. Do, pour l'aide matérielle et morale qu'il m'a fournie tout au long de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à mon Co-Directeur de recherche, Monsieur Serge Lefebvre, pour son appui scientifique, financier et moral qu'il m'a fourni très généreusement. Je le prie de trouver ici, le témoignage de ma gratitude.

Je remercie également les Professeurs Guy Olivier, Georges Gaba, Pierre Jean Lagacé et Guy Faucher d'avoir accepté d'honorer de leur présence le jury de cette thèse.

Je ne saurais passer sous silence ma gratitude pour Feu le Professeur Dinkar Mukhedkar, dont je garde un respecteux souvenir.

Pour leur apport technique et surtout moral, je voudrais remercier ceux qui ont partagé avec moi, plusieurs heures dans le laboratoire d'électrotechnique: MM Amadou O. Ba, Mohand Ourouche, Mohamed El Kahel ainsi que tous les techniciens et le personnel de la section électrotechnique.

SOMMAIRE

Le compensateur série avancée (commandé par thyristors) est un nouvel outil de compensation conçu pour rendre le réseau plus flexible. L'appareil est un dispositif FACTS (Flexible AC Transmission Systems), qui sert à mieux répartir des transits de puissance entre lignes parallèles, à améliorer la stabilité transitoire et dynamique du réseau. Il permet de réaliser un asservissement de la réactance de la ligne où il est connecté à une consigne de courant ou de puissance.

Cette thèse présente les résultats obtenus sur la modélisation détaillée d'un compensateur série avancée (Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC) et le phénomène d'interaction de la commande d'un TCSC avec les modes mécaniques des machines synchrones à proximité. La thèse est subdivisée en 4 chapitres.

Le premier chapitre est une présentation générale de la technologie FACTS et de la compensation série avancée, en rapport avec les problèmes actuels de transport d'énergie électrique. En particulier, on sait qu'on doit craindre les risques de résonance sous-synchrones, lorsqu'il est question de la compensation série. Le chapitre présente donc les avantages offerts par le TCSC et termine par la présentation du problème sur lequel porte la thèse, à

savoir la mise au point d'un modèle de simulation efficace et flexible d'un TCSC et l'interaction du régulateur principal du TCSC avec les modes mécaniques des machines à proximité.

Le chapitre 2 est une description générale du compensateur série avancée et sa modélisation dans EMTP-TACS, dont la première partie met l'accent sur les caractéristiques de fonctionnement. La deuxième partie met l'accent sur la commande du TCSC, elle même, sa modélisation par EMTP-TACS (Electromagnetic Transients Program (EMTP) - Transients Analysis Control Systems (TACS)). Ce dernier a été choisi pour sa capacité de représentation des modes sous-synchrones, contrairement aux autres programmes comme ST600. A cet effet, le chapitre présente les résultats obtenus en comparant la méthode classique de modélisation et une nouvelle approche qui utilise un interface usager.

Le chapitre 3 porte sur l'interaction de la commande du TCSC avec les modes mécaniques de la machine synchrone la plus proche. La méthode d'analyse utilisée y est présentée et les modèles linéarisés de la machine synchrone, du TCSC et du réseau sont résumés.

Le chapitre 4 porte sur l'analyse des valeurs propres des modes mécaniques en regard avec les paramètres du régulateur principal du TCSC. Il présente

une synthèse des résultats obtenus sur le phénomène d'interaction de torsion. La validation dans le domaine temporel via EMTP-TACS et l'extraction des modes par la méthode de Prony termine le chapitre.

Enfin, la conclusion met en évidence les principales contributions de la thèse, à savoir:

1. La démonstration de la faisabilité de modélisation de la commande du TCSC via un interface usager en Fortran et son utilité: une solution dix fois plus rapide qu' avec une commande TACS standard.

2. L'existence d'une interaction entre le régulateur principal du TCSC et les modes sous-synchrones d'un groupe turbine-alternateur à proximité.

3. Les risques de résonance sous-synchrones liés à cette interaction.

Les annexes contiennent deux articles que nous avons publiés: le premier au PSCC'96 et le deuxième à ELECTRIMACS'96, suivis d'un listing du code EMTP-TACS dans sa version standard optimisé.

ABSTRACT

Fixed series compensation is an established economical technic for increasing the power transfer capability of transmission systems. Series capacitor compensation decreases the effective reactance of the compensated line which means a change in power flow pattern among parallel transmission corridors. Advanced Controlled series capacitor (ACSC) compensation adds to this possibility the ability to schedule power flows along desired lines and to modulate the effective impedance in response to power system dynamics.

Two forms of ACSC have emerged. The thyristor controlled series capacitor (TCSC) has vernier control capability (continuous control) while the thyristor switched series capacitor (TSSC) provides discrete levels of series compensation only. This thesis uses TCSC equipment for demonstrating an innovative EMTP modeling approach and to study the subsynchronous interaction between the TCSC regulator with the turbine-generator system.

The first part shows how significant reduction in EMTP cpu time can be achieved in an EMTP investigation of Thyristor Controlled Series Capacitors, without impacting modeling flexibility. The changes are associated with algorithmic and modeling issues. The TCSC model has been

built solely from published information in the technical literature and results have been validated.

In the second part, small-signal stability analysis was used to study the subsynchronous interaction of a TCSC current regulator and a nearby turbine - generator system. Emphasis was put on the gain of the TCSC current regulator to demonstrate its importance in torsional interaction. Time based simulations with EMTP were used to validate the results.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE iv

REMERCIEMENTS v

SOMMAIRE vi

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIERES xi

LISTE DES FIGURES xiv

LISTE DES TABLEAUX xviii

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES xix

LISTE DES ANNEXES xxi

CHAPITRE I

COMPENSATION SERIE AVANCEE ET RESEAUX 1

1.1 TECHNOLOGIE FACTS ET COMPENSATION DES RESEAUX 2

1.1.1 EVOLUTION DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 5

1.1.2 COMPENSATION SERIE FIXE 6

1.1.3 COMPENSATION SERIE AVANCEE 9

1.2. LA COMPENSATION SERIE AVANCEE ET LES RESEAUX 12

1.2.1 AMELIORATION DE LA REPARTITION DE PUISSANCE 13

1.2.2 AMELIORATION DE LA STABILITE 14

1.2.3 COMPETITIVITE FINANCIERE DU TCSC 17

1.3 PROBLEME DE RESONANCE 19

1.3.1 PHENOMENES D'INTERACTION SOUS SYNCHRONES 20

1.3.2 COMPENSATION SERIE ET RESONANCE SOUS-SYNCHRONE 22

1.4. DEFINITION DU PROBLEME ET CONTRIBUTION 25

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA COMPENSATION SERIE AVANCEE 27

2.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU TCSC 27

2.1.1 LIMITES DE FONCTIONNEMENT DU TCSC 28

2.1.2 ALLURE DES GRANDEURS ELECTRIQUES DANS UN TCSC 31

2.1.4 DESCRIPTION DE LA COMMANDE DU TCSC 33

2.2 MODELISATION DU TCSC PAR EMTP 36

2.2.1 STRUCTURE DE EMTP-TACS STANDARD 36

2.2.2 STRUCTURE DE L'INTERFACE USAGER FORTRAN 38

2.3 RESULTATS DE SIMULATION 40

2.3.1 RESEAU TEST 40

2.3.2 PERFORMANCE EN CPU DU MODE TACS STANDARD. 41

2.3.3. PERFORMANCE EN CPU AVEC L'INTERFACE FORTRAN 43

2.3.4. RESULTATS TACS STANDARD vs INTERFACE USAGER 44

2.3.5. PERFORMANCE DYNAMIQUE DE LA COMMANDE DU TCSC. 47

2.4 CONCLUSION 50

CHAPITRE III

RESONANCE SOUS-SYNCHRONE ET LE TCSC 53

3.1 METHODES D'ANALYSE 54

3.2 METHODE DE CONNEXION PAR COMPOSANTES 56

3.3 MODELES DES COMPOSANTES 61

3.3.1 MACHINE SYNCHRONE : PARTIE ELECTRIQUE 61

3.3.2 MACHINE SYNCHRONE : PARTIE MECANIQUE 64

3.3.3 INTERFACE ELECTRIQUE - MECANIQUE 67

3.3.4 MODELE D'ETAT D'UNE LIGNE COMPENSEE SERIE FIXE 68

3.3.5 INTERFACE MACHINE SYNCHRONE - RESEAU 70

3.3.6 MODELE LINEAIRE RESEAU COMPENSEE SERIE VARIABLE 73

CHAPITRE IV

ANALYSE DES VALEURS PROPRES 78

4.1 ANALYSE DES VALEURS PROPRES SANS LE TCSC 79

4.2 ANALYSE DES VALEURS PROPRES AVEC LE TCSC 81

4.3 EFFET DU REGULATEUR DU TCSC SUR LES MODES MECANIQUES 82

4.4 VALIDATION PAR SIMULATION TEMPORELLE 84

4. 5 VALIDATION PAR EXTRACTION DES MODES 92

4. 5. 1 METHODE DE PRONY 93

4. 5. 2 APPLICATION DE LA METHODE DE PRONY 94

4.6 CONCLUSION 97

CONCLUSION GENERALE 99

BIBLIOGRAPHIE 103

ANNEXES 110

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1: Possibilités de contrôle offertes par les divers compensateurs 3

Figure 1.2: Possibilités de contrôle offertes par les divers FACTS 4

Figure 1.3: Evolution des dispositifs électroniques de coupure . 6

Figure 1.4: Réseau simplifié à 2 machines compensé série fixe .. 7

Figure 1.5: Caractéristique P(δ) d'un réseau compensé série fixe 8

Figure 1.6: Schéma d'un réseau à 2 machines compensé série avancé 10

Figure 1.7: Caractéristique d'impédance (en Ω) d'un module du TCSC en fonction de l'angle d'allumage α (en degre) 11

Figure 1.8: Schéma de contrôle des transits de puissance 13

Figure 1.9: Un modèle de stabilité avec un TCSC 16

Figure 1.10: Amortissement des oscillations par capacité variable en fonction du temps (s) 16

Figure 1.11: Réseau Equivalent d'Hydro-Québec 21

Figure 1.12: Amplitude et phase de l'impédance vue à Lavérendrye 21

CHAPITRE II

Figure 2.1: Schéma d'un bloc de TCSC comportant 3 modules 28

Figure 2.2: Caractéristique de fonctionnement d'un module de TCSC (X en fonction de I) 29

Figure 2.3: Caractéristique de fonctionnement de 2 modules de TCSC

(X en fonction de I) 30

Figure 2.4: Formes d'ondes du courant de ligne(a) et des valves(b).32

Figure 2.5: Formes d'ondes du courant (a) et de la

tension (b) du TCSC 32

Figure 2.6: Schéma bloc de la commande d'un TCSC 34

Figure 2.7: Structure du programme EMTP-TACS 37

Figure 2.8: Structure de l'interface Fortran 39

Figure 2.9: Réseau test (Kayenta en Arizona) 41

Figure 2.10: Angle d'allumage α (o) vs Temps(s) 45

Figure 2.11: Allure de la tension du TCSC (V) vs Temps (s) :

TACS standard 46

Figure 2.12: Allure de la tension du TCSC (V) vs Temps (s):

Interface usager en fortran 46

Figure 2.13: Variation du courant (A) vs temps (s) 48

Figure 2.14: Tension aux bornes (V) du TCSC vs temps (s) 49

Figure 2.15: Variation de la réactance capacitive du TCSC 49

Figure 2.16: Variation de l'angle d'allumage (o) vs temps (s) .. 50

CHAPITRE III

Figure 3.1: Décomposition d'un système en composantes 57

Figure 3.2: Schéma du réseau test pour le problème de SSR 60

Figure 3.3: Schéma de la machine synchrone : Partie électrique . 61

Figure 3.4: Modèle linéaire de la machine : Partie électrique .. 63

Figure 3.5: Modèle des masses mécaniques de la machine synchrone 65

Figure 3.6: Modèle linéaire de la machine: Partie mécanique 66

Figure 3.7: Fonction de transfert de la machine linéarisée 69

Figure 3.8: Modèle de réseau compensé série fixe 70

Figure 3.9: Changement de réferentiel machine & réseau 71

Figure 3.10: Modèle de ligne compensée série variable 74

Figure 3.11: Modèle linéarisé de la commande du TCSC 75

CHAPITRE IV

Figure 4.1: Partie réelle des modes mécaniques en fonction du % de compensation 80

Figure 4.2: Partie réelle des modes mécaniques en fonction du % de compensation avec TCSC 82

Figure 4.3: Partie réelle du mode à 15.7 hz en fonction du gain du régulateur principal du TCSC 83

Figure 4.4: Partie réelle des modes 2, 3 et 4 en fonction du gain du régulateur principal du TCSC 84

Figure 4.5: Variations de l'angle d'allumage (degré) du TCSC ... 85

Figure 4.6: Modèle petits signaux du courant (A) du TCSC 86

Figure 4.7: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_1 en fonction du temps Kr=0.05. 87

Figure 4.8: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S1 en fonction du temps Kr=0.08 87

Figure 4.9: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_2 en fonction du temps Kr=0.05. 88

Figure 4.10: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion (Nm) en S2 en fonction du temps (s) Kr=0.08 88

Figure 4.11: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_3 en fonction du temps: Kr=0.05 89

Figure 4.12: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_3 en fonction du temps Kr=0.08 89

Figure 4.13: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_4 en fonction du temps: Kr=0.05 90

Figure 4.14: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_4 en fonction du temps: Kr=0.08 90

Figure 4.15: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_5 en fonction du temps: Kr=0.05 91

Figure 4.16: Modèle petits signaux du couple (Nm) de torsion en S_5 en fonction du temps: Kr=0.08 91

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau 2.1: Statistiques de simulation du réseau sans commande 42

Tableau 2.2: Satistiques de simulation par EMTP-TACS standard avec la commande du TCSC 42

Tableau 2.3: Statistiques de simulation avec Interface Fortran . 44

CHAPITRE III

Tableau 3.1: Matrices de connection de la partie mécanique et électrique de la machine synchrone 68

Tableau 3.2: Matrices de connexion du réseau et de la machine 73

CHAPITRE IV

Tableau 4.1: Aperçu des modes mécaniques 79

Tableau 4.2: Résultats obtenus par la méthode de Prony à partir du couple de torsion en S_3 95

Tableau 4.3: Comparaison des résultats obtenus par la méthode MCC et par la méthode de Prony 95

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Δ	opérateur variationnel
s	opérateur de Laplace
f_s	fréquence industrielle (60 Hz)
f_n	fréquence naturelle du système compensé (Hz)
ω_i	vitesse angulaire de l'élément i (rad/s)
ω_b	vitesse angulaire correspondant à la fréquence industrielle: base du système (rad/s)
ω_o	vitesse angulaire correspondant à la fréquence industrielle en variable réduite (pu)
δ_i	angle de l'élément i (degré)
τ''_{fo}	constante de temps transitoire d'inducteur(sec)
τ''_{do}	constante de temps subtransitoire d'axe d(sec)
τ'_{do}	constante de temps transitoire d'axe d(sec)
τ'_{qo}	constante de temps transitoire d'axe q(sec)
τ''_{qo}	constante de temps subtransitoire d'axe q(sec)
H_i	coefficient d'inertie de la masse i (sec)
D_i	coefficient d'amortissement propre de i (pu)
D_{ij}	coefficient d'amortissement entre i et j (pu)
K_{ij}	coefficient d'élasticité entre i et j (pu)
EMTP	Electromagnetic Transient Program

TACS	Transient Analysis Control System
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCPST	Thyristor Controlled Phase Shifter Transformer
UPFC	Unified Power Flow Controller
GTO	Gate Turn On
MCT	Metal-Oxyde-Semiconductor Controlled Thyristor

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Article présenté au PSCC'96 à Dresden, Allemagne 110

ANNEXE 2: Article présenté à ELECTRIMACS'96 à St Nazaire, France 120

ANNEXE 3: Listing du code EMTP - TACS version standard 129

CHAPITRE I

COMPENSATION SERIE AVANCEE ET RESEAUX

Au cours des dernières années, l'augmentation croissante de la demande d'énergie, les contraintes également croissantes de la préservation de l'environnement, les difficultés d'obtention des droits de bâtir ainsi que les coûts relatifs à la construction de nouvelles lignes et centrales posent de nouveaux défis aux exploitants des réseaux.

Cette situation a entraîné des recherches intensives, pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, et tenter d'atteindre les limites thermiques des lignes.

En 1988, Hingorani[12] présente, lors d'une conférence d'IEEE, un nouveau concept: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", qui met en relief les nouvelles possibilités de l' électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif(AC).

Selon IEEE, le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, en courant alternatif, qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer leur flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport[33].

1.1 TECHNOLOGIE FACTS ET COMPENSATION DES RESEAUX

Le terme flexible fait référence à la capacité du réseau de s'ajuster automatiquement en fonction des conditions d'exploitation pour garder une bonne marge de sécurité statique et dynamique. La figure 1 montre deux systèmes reliés par une ligne de transport. La puissance active qui transite le long de la ligne est une fonction de l'écart angulaire entre les tensions aux extrémitées ($\delta_1-\delta_2$), de l'amplitude des tensions (V_1 et V_2) et de la valeur de la réactance X de la ligne.

La compensation shunt agit sur le profil de la tension, la compensation série quant à elle modifie la réactance de la ligne et le déphaseur modifie l'écart angulaire entre les tensions. Leurs performances respectives peuvent être illustrées par la figure 1.1, sur laquelle on montre le profil de la puissance transmissible sur la ligne pour les différents types de compensation: shunt, série et déphaseur.

La plupart des dispositifs de commande actuels de ces compensateurs, hormis les compensateurs statiques, sont mécaniques ou électromécaniques. Leur inconvénient majeur est leur faible vitesse de réaction, ainsi que leur faible fréquence de manoeuvre pouvant être initiée sans risque de vieillissement accéléré. L'idée des FACTS

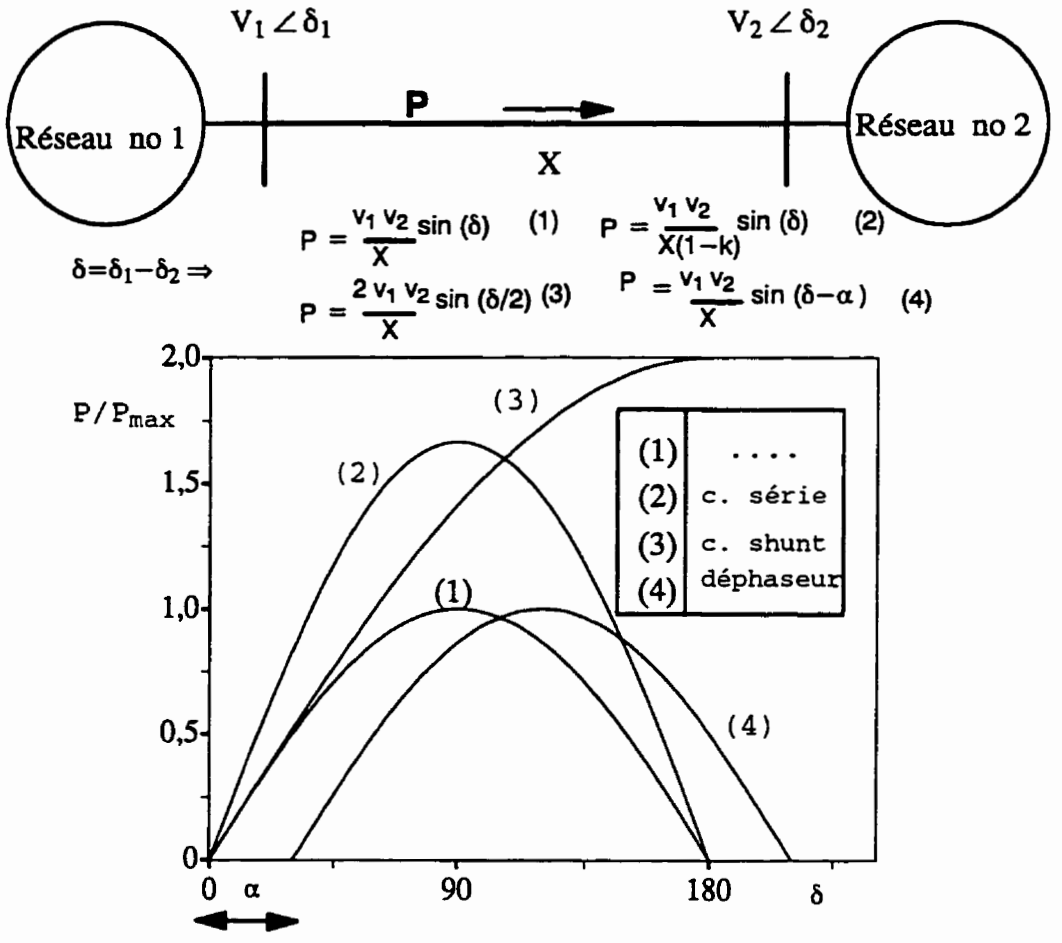


Fig.1.1:Possibilités de contrôle offertes par les divers compensateurs

vient pour combler cette lacune. La figure 1.2 montre les principales schéma de FACTS et les paramètres sur lesquelles ils agissent pour améliorer les performances du réseau.

Les compensateurs statiques contrôlés par thyristors[14],[17],[20] (Static Var Compensator: SVC) ont fait déjà leurs preuves. Les nouveaux équipements en étude sont les compensateurs séries commandés par

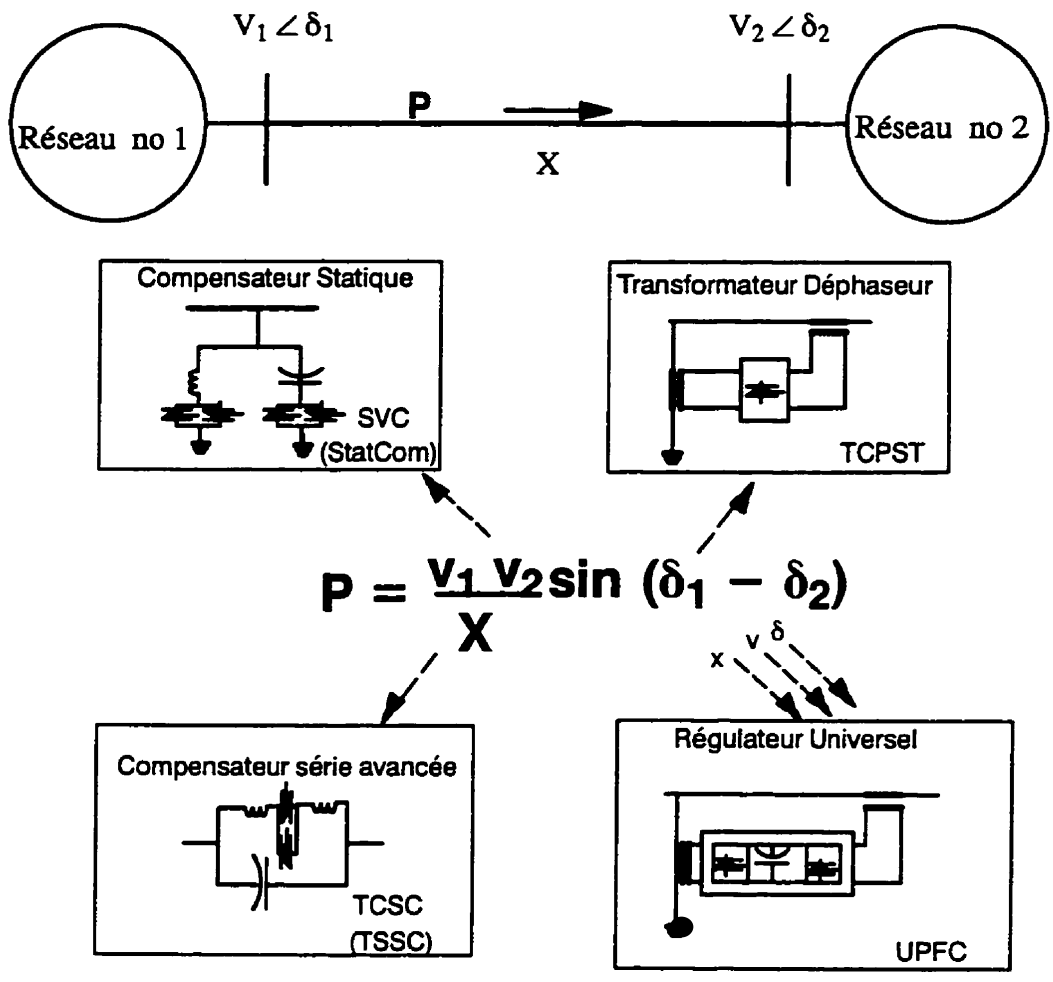


Fig.1.2:Possibilités de contrôle offertes par les divers FACTS

thyristors (Thyristor Controlled Series Capacitors: TCSC) [8][10][13][33] les compensateurs séries manoeuvrables par thyristors (Thyristor Switched Series Capacitor: TSSC), les compensateurs statiques synchrones [17][33] (Static Synchronous Compensator: STATCOM), les transformateurs déphaseurs à commutation électronique [13][14][18] (Thyristor Controlled Phase Shifter Transformer: TCPST), les régulateurs inter-phases (Inter-Phase Controller: IPC)[]

les régulateurs universels [13][14][33](Universel Power Flow Controller: UPFC) etc...

Parmi tous ces nouveaux équipements, nous avons choisi de faire l'étude du compensateur série avancée parce qu'il semble, pour le moment, le plus prometteur. Des prototypes experimentaux existent et peuvent nous permettre de valider nos résultats. Le déphaseur électronique n'a jamais été construit. Le régulateur universel existe, mais pour de faibles puissances.

1.1.1 EVOLUTION DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE [11]

Le principal obstacle qui a limité l'application de ces éléments de coupure à base de semiconducteurs dans les réseaux à grande puissance a été toujours leur faible puissance de coupure ($V_{max}*I_{max}$). La figure 1.3 illustre l'évolution de la puissance de coupure des principaux éléments utilisés en grande puissance. L'historique des semiconducteurs commence avec la diode et le transistor en faible puissance et évolue avec le thyristor en grande puissance. En même temps que le thyristor évolue, apparaît le GTO (Gate Turn Off) et le IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour pouvoir disposer librement des instants d'allumage et d'extinction des thyristors.

Le GTO et l'IGBT présentent encore des limitations sur les pertes au moment de l'extinction(GTO) ou de l'allumage(IGBT), de même que leur fréquence de coupure

limitée. Le MCT (Metal-Oxyde-Semiconductor Controlled Thyristor) semble plus prometteur que le GTO, surtout dans le sens de réduire le courant nécessaire à son extinction, sa fréquence de coupure plus élevée et sa plus grande flexibilité. Par contre, il présente encore une plus faible puissance de coupure.

Dans la suite du travail, nous utiliserons essentiellement du thyristor comme élément de coupure et son application dans la compensation série avancée (TCSC).

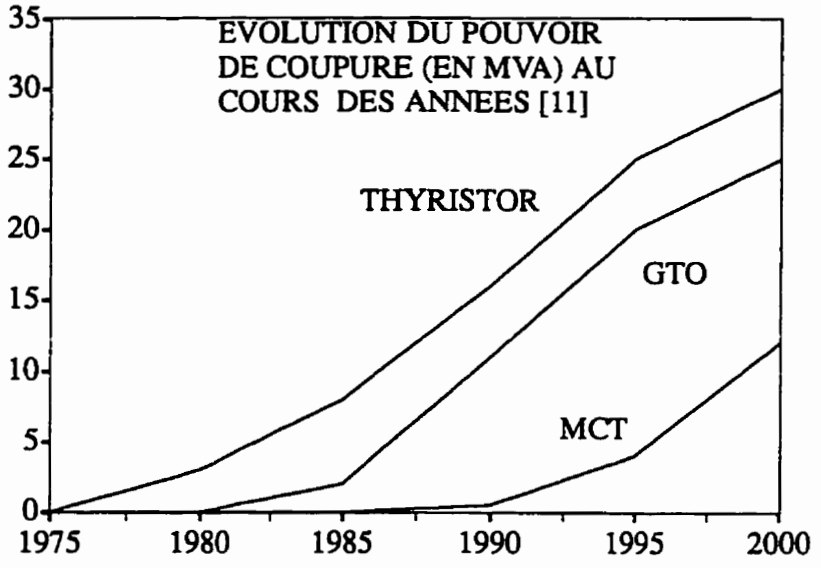


Fig.1.3: Evolution des dispositifs électroniques de coupure

1.1.2 COMPENSATION SERIE FIXE

La compensation série des longues lignes de transport a été proposée pour la première fois, il y a une trentaine d'années pour augmenter les transits de

puissance sur une ligne. En 1966, Kimbark [1] montre l'effet bénéfique de la compensation série sur la stabilité dynamique du réseau. Dans les années 70, on découvre que la compensation série fixe présente un problème de risque de résonance sous-synchrone[21]. Nous définirons plus en détails ce problème dans la section 1.3.

L'importance de la compensation série, dans le but d'améliorer la capacité de transport des lignes, a été reconnue et n'a fait que croître au cours des dernières années. Hydro-Québec[47] a récemment procédé à l'installation des bancs de condensateurs séries sur son réseau de transport pour ainsi augmenter la capacité de transport et la fiabilité de son réseau.

La figure 1.4 montre un réseau simple à deux machines compensé série fixe.

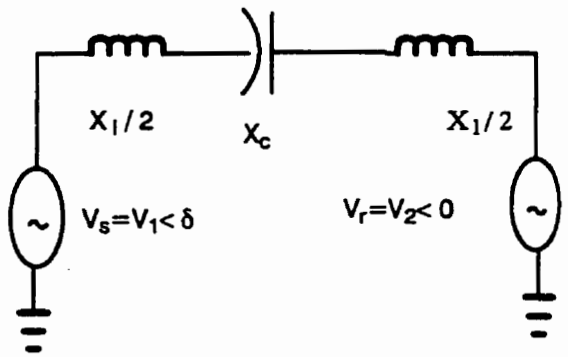


Fig. 1.4: Réseau simplifié à 2 machines compensé série fixe

L'impédance totale de la ligne, tenant compte de la compensation série, diminue avec le degré de compensation k ($k=X_c/X_l$). A un angle δ donné, la puissance transmissible le long de la ligne augmente avec k. En plus, la puissance synchronisante des machines, définie comme étant la capacité des machines de retrouver leur point d'équilibre après une perturbation, augmente. Cet effet est dû à l'augmentation de la pente au point de fonctionnement.

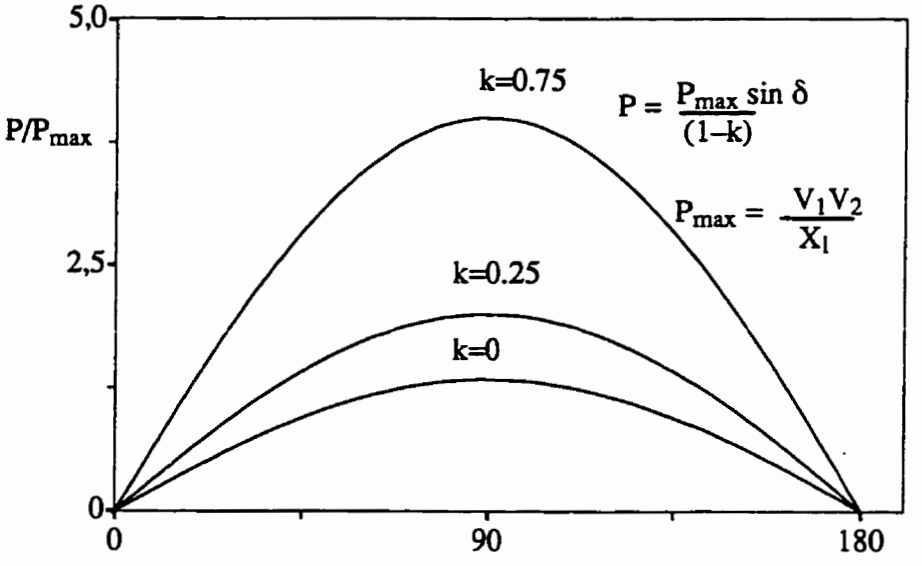


Fig.1.5: Caractéristique P(δ) d'un réseau compensé série fixe

La figure 1.5 montre la courbe de la puissance active le long de la ligne en fonction de l'angle δ pour 3 valeurs différentes du degré de compensation k. Plus la valeur de k augmente, plus P/P_{max} augmente, permettant ainsi un transit de puissance de plus en plus grand. Même si

théoriquement, on peut réaliser une compensation de 100%, la pratique limite la compensation fixe aux alentours de 40 à 60 % pour se mettre à l'abri des risques de résonance sous synchrone.

Le phénomène de résonance est défini comme étant une réponse particulièrement élévée d'un système suite à une excitation, périodique dont la fréquence correspond à la fréquence propre du système excité.

1.1.3 COMPENSATION SERIE AVANCEE

Jusqu'ici, la compensation série avancée, basée sur le compensateur série à thyristors, n'a été utilisée que de façon expérimentale. Par contre, elle connaît les développements les plus importants au niveau de la recherche. Depuis 1991, quelques prototypes sont en fonctionnement aux Etats-Unis.

Comme installations pilotes, on peut citer une installation de TSSC, construite par ABB sur le réseau AEP et une autre construite par Siemens sur le réseau Western Area Power Administration (WAPA). Enfin, celle du réseau Bonneville Power Administration (BPA) a été construite par General Electric (GE).

Le principe du TSSC est basé sur un banc de condensateurs, agencés en gradins de poids identiques ou différents et qui sont mis hors ou en service par un commutateur à thyristors connecté en parallèle. Le TCSC

quant à lui possède une petite inductance commandée par thyristors en parallèle avec un condensateur, de façon à obtenir une plus grande plage de variation d'impédance (capacitive et inductive) et surtout, un contrôle plus fin de cette dernière. La figure 1.6 montre un réseau simple à 2 machines avec un compensateur série avancé. On peut combiner plusieurs modules commandés avec des modules non commandés. Chaque module est protégé par des éclateurs à oxyde de métal.

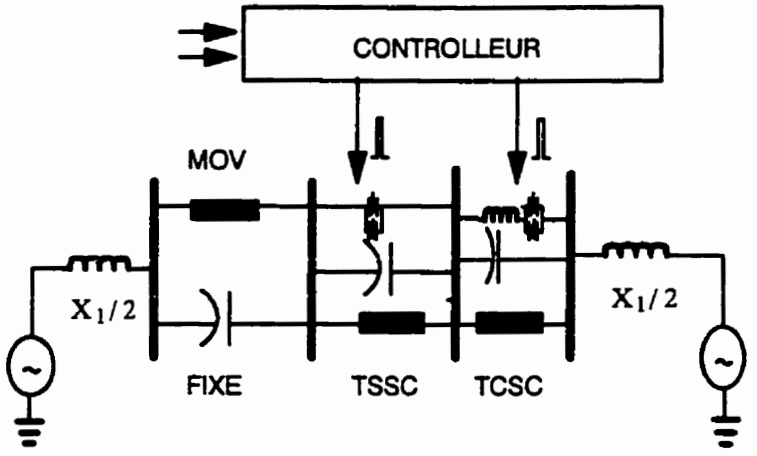


Fig. 1.6: Schéma d'un réseau à 2 machines compensé série avancé

Le compensateur comprend un module commandable (TCSC), un module manoeuvrable électroniquement (TSSC) et un module fixe. Pour activer chaque capacité d'un TSSC, les thyristors sont éteints en agissant sur la gâchette, ce qui permet le transfert du courant. Pour déconnecter

le banc de TSSC, les thyristors sont allumés au moment où la tension passe par zéro. Pour le TCSC, l'impédance varie dans une plage capacitive et inductive de façon continue, contrairement au TSSC, qui ne prend que des valeurs discrètes entre 0 ou X_c.

La figure 1.7 montre la caractéristique d'impédance d'un module de TCSC en fonction de l'angle d'allumage[2].

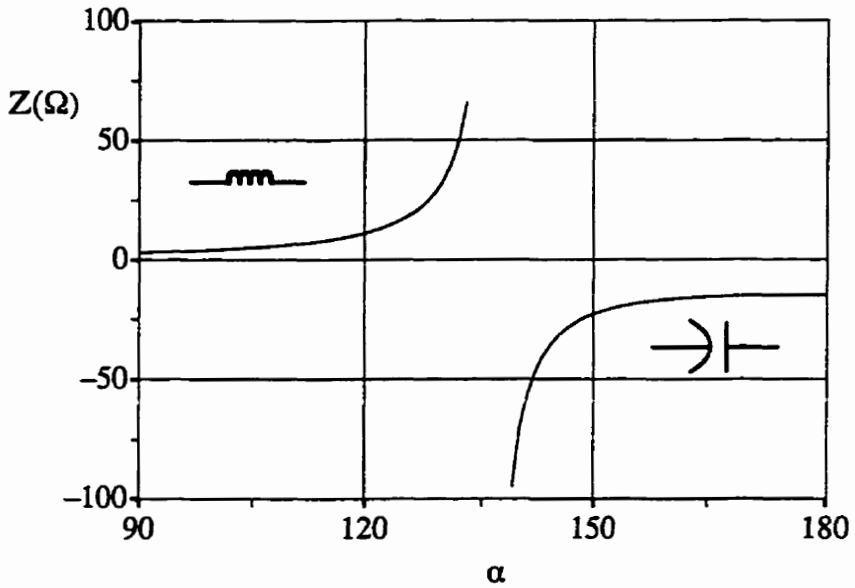


Fig.1.7 : Caractéristique d'impédance (en Ω) d'un module du TCSC en fonction de l'angle d'allumage α (en degre)

Il est ainsi possible de moduler de manière continue le degré de compensation de la ligne, rapidement et aussi souvent que nécessaire. On obtient donc, une plus grande flexibilité de compensation avec un TCSC qu'avec un banc fixe ou avec des TSSC. Nous nous limiterons au cours de

cette section au compensateur série avançée comprenant un TCSC et/ou un TSSC.

L'augmentation des transits de puissance sur une ligne est limitée par des critères liés à la stabilité transitoire et oscillatoire du réseau, à des limites de tension ou à des limites thermiques des lignes[18][19]. La privatisation de l'industrie de l'électricité aux USA a engendré une prolifération d'entreprises multiples qui produisent et vendent de l'énergie à travers un réseau de transport et de distribution conçu au départ par une seule compagnie. Il en a résulté un problème de circulation d'énergie dans des corridors non désirés[18],[19] (Fig.1.8).

Par rapport à ces contraintes, le TCSC et/ou le TSSC apparaît comme un élément qui améliore la stabilité du réseau[10]. Il permet également de résoudre le problème d'écoulement de puissance parasite[33]. Enfin, le TCSC est apparu comme un élément qui diminue considérablement les risques de résonance sous-synchrones[7],[10],[24].

1.2. LA COMPENSATION SERIE AVANCEE ET LES RESEAUX

Un des grands avantages des dispositifs à réglage par thyristors dont le TCSC, est leur grande vitesse de réaction combinée avec un grand nombre de manoeuvres qui peuvent être initiées sans usure accélérée. Cet avantage résulte de l'absence d'organes mobiles dans les

thyristors. Il engendre une plus grande stabilité et ce en liaison avec les temps d'élimination des défauts et une fiabilité accrue du réseau comparativement aux réseaux traditionnels avec des dispositifs de commande mécaniques ou électromécaniques.

1.2.1 AMELIORATION DE LA REPARTITION DE PUISSANCE

Le problème d'écoulement de puissance à travers des corridors non désirés (Fig. 1.8) est abordé suivant deux statégies de régulation[10][18][19]. La première consiste à réaliser un asservissement de l'impédance de la ligne compensée, de sorte que tout le surplus de puissance non désirée passe par cette ligne. Dans ce cas, le reste du réseau n'est pas perturbé.

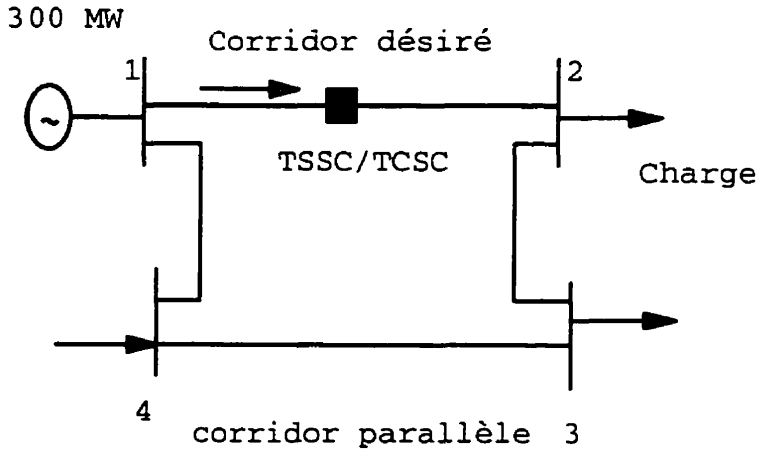


Fig. 1.8: Schéma de contrôle des transits de puissance

Une deuxième stratégie consiste à régulariser le transit de puissance sur la ligne compensée, de sorte que la puissance soit plus ou moins constante sur le tronçon. Dans ce cas, la compensation de la ligne diminue au fur et à mesure que la charge du réseau augmente ou inversément, les lignes non compensées absorbant le surplus de puissance.

Une combinaison de ces deux stratégies constitue une alternative.

1.2.2 AMELIORATION DE LA STABILITE

L'étude de la stabilité d'un réseau suite à des perturbations est subdivisée en deux catégories. La stabité transitoire ou stabilité de première oscillation et la stabilité oscillatoire qui traite de l'amortissement des oscillations subséquentes. Dans les réseaux où la stabilité est un facteur qui limite le transit de puissance, surtout ceux composés de longues lignes, l'addition d'un TCSC permet d'améliorer l'efficacité du réseau [6],[8].

En effet, améliorer la stabilité de première oscillation nécessite l'augmentation de la puissance synchronisante en disposant du maximum de compensation en régime permanent. En pratique, ceci n'est pas toujours possible. A cet égard, il a été[10],[14] démontré qu'un TCSC bien dimensionné permet de travailler avec une

puissance synchronisante plus faible et obtenir d'excellentes performances en termes de stabilité transitoire et oscillatoire.

Au cours de notre investigation, nous avons élaboré un modèle EMTP pour mettre en évidence l'efficacité du TSSC et/ou du TCSC pour amortir les oscillations. Nous avons utilisé les équations simples qui suivent (Eq. 1.1 à Eq. 1.6) et qui représentent la dynamique d'une machine synchrone raccordée à une barre infinie.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \qquad (1.1)$$

$$\frac{M}{\omega_0}\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = -\Delta P \qquad (1.2)$$

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \delta}\Delta\delta + \frac{\partial P}{\partial X}\Delta X \qquad (1.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta = K_1 \qquad (1.4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X} = -\frac{V_1 V_2}{X^2} \sin \delta = K_2 \qquad (1.5)$$

$$\frac{M}{\omega_0}\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = -\Delta P = -K_1\Delta\delta - K_2\Delta X \qquad (1.6)$$

L'idée est de considérer un signal de commande qui serait une fonction de l'écart de vitesse de la machine. La figure 1.9 montre le schéma bloc du modèle proposé pour un système d'une machine synchrone sur un réseau infini. La fonction H(t) (Eq. 1.6 *bis*) utilisée est définie comme suit: H(t) vaut 1 si la machine accélère et vaut 0 ailleurs.

$$\Delta X = K H(t)\ \Delta\delta \quad (1.6)\ bis$$

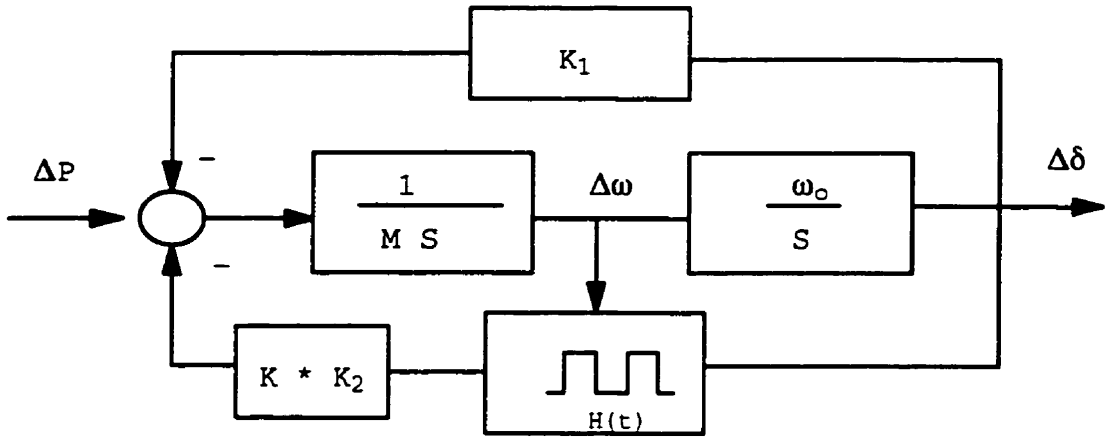


Fig. 1.9: Un modèle de stabilité avec un TCSC

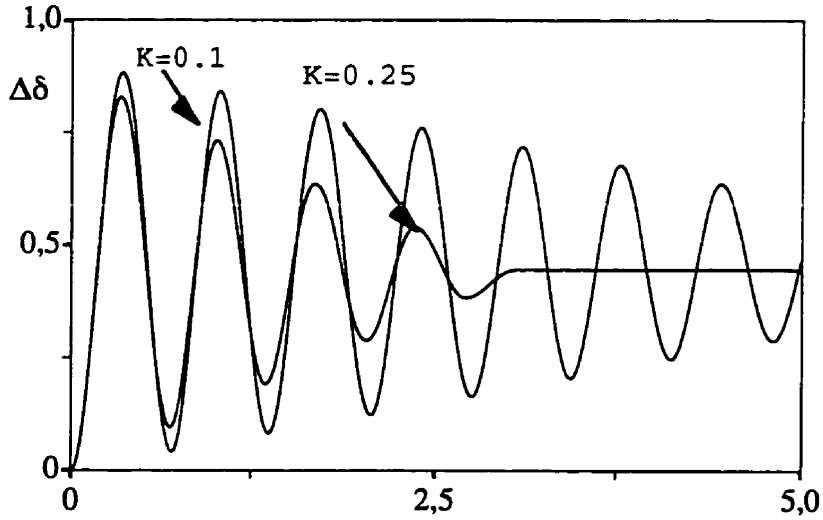


Fig. 1.10 :Amortissement des oscillations par compensation série variable en fonction du temps (s)

Nous avons effectué quelques simulations sur un cas hypothétique d'une machine synchrone sur un réseau infini en utilisant le modèle de la figure 1.9. Les paramètres

du modèle ont été pris arbitrairement: M=1pu, K_1=0.7, K_2=1.0; l'objectif étant de voir si le modèle est valide.

Nous avons appliqué une perturbation de charge sous forme d'un échelon. La sortie du système étant les variations de l'angle δ. La fonction H(t) est générée par mesure de l'écart de vitesse ω. En faisant varier le gain K dans la boucle de régulation, on constate que l'amortissement des oscillation est efficace (Fig. 1.10).

1.2.3 COMPETITIVITE FINANCIERE DU TCSC

La question qui se pose toujours quand on initie une nouvelle technologie est de savoir le coût de l'opération en fonction des performances attendues. Les études réalisées à ce sujet ont démontré la rentabilité[10] de ce type de projet comparativement aux solutions existantes.

Une étude[18],[19] menée par EPRI, a porté sur la possibilité d'augmenter le transit de puissance de 2000 à 3000 MW sur un réseau radial de 2 lignes à 500 kV, compensé série fixe de 35%. La limitation de 2000 MW est due au fait qu'un défaut sur une ligne, suivi de son élimination, engendre un réseau post-perturbation instable. Par ailleurs, la compensation série fixe était limitée par des critères de résonance sous-synchrone. Trois solutions étaient envisagées: la compensation shunt

(SVC), la construction d'une nouvelle ligne et enfin la compensation série avancée.

Une évaluation sommaire a permis de dégager que l'option SVC coûterait $30 millions, une nouvelle ligne $125 millions et que le TCSC équivalent coûterait $16 millions. L'économie qu'on réalise dépend de l'écart des coûts du combustible, de l'utilisation de la centrale et de l'augmentation des pertes dues à l'augmentation du courant de ligne. Moyennant les hypothèses suivantes: l'écart des coûts du combustible est de $0.03/kWh, une moyenne d'utilisation de 10h/jour pendant 200 jours/année et une augmentation des pertes de 150 MW, l'analyse a démontré que la troisième solution était la meilleure et que l'économie réalisable était de $51 millions/année. Ce qui donne lieu à un délai de récupération des investissements inférieur à une année.

Une autre étude portait sur un réseau maillé, dont la contingence limitative était due à l'apparition d'un mode inter-machines instable à 0.6Hz, pour un transit de puissance qui dépasse 5000 MW. Pour ce réseau, l'insertion d'un TCSC a permis de pallier au mode limitatif et a permis d'augmenter le transit de puissance de 5000MW à 6000 MW avec le même amortissement qu'un transit de 5000MW. Sur le plan financier, le coût du TCSC était évalué à $47 millions. Dans les mêmes

hypothèses que dans le premier cas, la durée de récupération de l'investissement est inférieure à une année également.

1.3 PROBLEME DE RESONANCE

Le problème de résonance survenant dans les réseaux compensés série a été abordé depuis 1966[1]. Il a connu un intêret particulier vers les années 1970, suite aux bris d'arbres de turbine survenus en 1970 et 1971 dans une centrale à la station Mohave aux USA. Depuis lors, plusieurs études ont été réalisées et des mesures appropriées ont été prises. C'est ainsi que plusieurs solutions ont été proposées: contrôle sur l'excitation des machines[36],[37], filtres amortisseurs d'oscillations etc....

Plus tard, N.G. Hingorani a breveté un amortisseur d'oscillations qui porte d'ailleurs son nom[38],[39] et qui est basé sur une résistance commandée par thyristors, en parallèle sur les machines. Par la suite, A.A Edris a proposé en 1990, une façon de se mettre à l'abri des résonances sous-synchrones[35] en utilisant une combinaison déséquilibrée de condensateurs en série sur la ligne. Aujourd'hui, le TCSC vient s'ajouter à ces équipements pour réduire les risques de résonances sous-synchrones[7],[10],[24].

1.3.1 PHENOMENES D'INTERACTION SOUS SYNCHRONES

Le phénomène de résonance: Il est défini[4] comme étant une réponse particulièrement élévée d'un système suite à une excitation périodique dont la fréquence correspond à la fréquence propre du système excité.

Le phénomène d'oscillation sous-synchrone: Il est défini comme étant une condition de réseau au cours de laquelle il y a échange significative d'énergie entre le groupe alternateur turbine et le réseau à une ou plusieurs fréquences inférieures à la fréquence fondamentale du réseau, (communément appelé fréquence industrielle (50 ou 60 Hz)) suite à une perturbation et ce à partir d'un état de régime permanent. Les fréquences en question doivent différer des modes mécaniques du groupe turbine alternateur.

Le phénomène de résonance sous synchrone (sub-synchronous resonance (SSR)) est un cas particulier du phénomène général d'oscillations sous-synchrones relatives à l'interaction électromécanique entre le groupe alternateur-turbine et des éléments passifs comme les condensateurs en série dans les lignes de transport ou avec des éléments actifs tels les équipements de contrôle dans les lignes à courant continu, dans les

compensateurs statiques, et en particulier les compensateurs série variable.

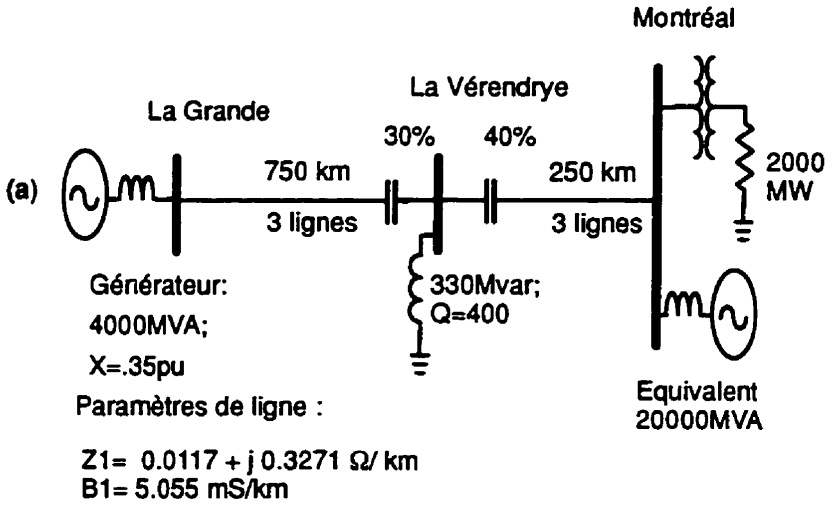


Fig. 1.11: Réseau Equivalent d'Hydro–Québec

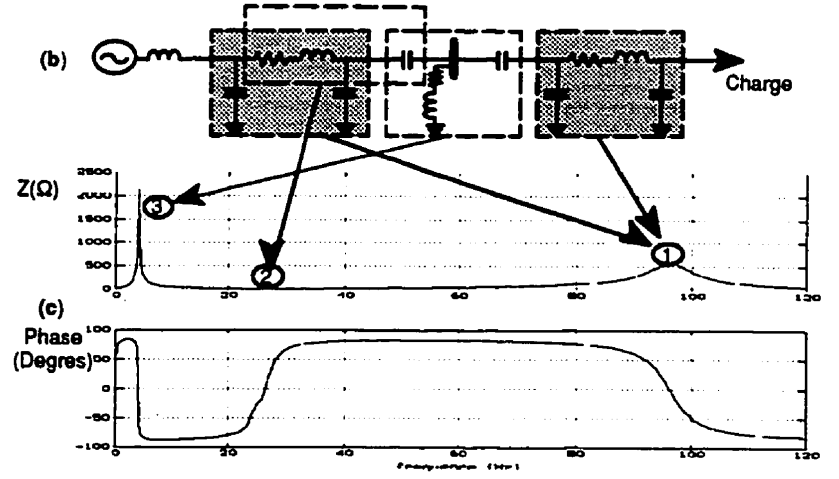


Fig. 1.12: Amplitude et phase de l'impédance vue à La Vérendrye

La figure 1.11 montre le réseau simplifié d'Hydro-Québec en régime faiblement chargé[34]. Si on construit le modèle équivalent et qu'on regarde les modes propres (Fig.1.12), on observe trois types de modes: un mode linéique de type shunt à 96Hz, un mode série résonant à 25Hz et un mode de résonance sous-synchrone à 4Hz. Il a été démontré[34] que ce dernier mode peut se déplacer et interagir avec la commande du compensateur statique et donner lieu à des oscillations faiblement amorties.

En partant de ce constat, peut-on imaginer qu'il y ait interaction entre la commande du compensateur série avancé et le mode réseau ou avec les modes mécaniques de la machine synchrone? La motivation de notre recherche est basée sur cette interrogation.

1.3.2 COMPENSATION SERIE ET RESONANCE SOUS-SYNCHRONE

Le phénomène de résonance sous synchrone résulte d'une interaction entre un réseau compensé série et le système turbo-alternateur dans lequel l'échange d'énergie est faiblement ou pas du tout amortie. La fréquence naturelle d'un réseau radial compensé série est donnée par les équations suivantes:

$$L = \frac{X_l}{\omega_s}; \quad C = \frac{1}{\omega_s X_c} \qquad (1.7)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{(LC)}} = \omega_s \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \qquad (1.8)$$

$$\frac{\omega_n}{\omega_s} = \frac{f_n}{f_s} = \sqrt{k} \qquad (1.9)$$

$$k = X_c/X_l \qquad (1.9)bis$$

$$k \in [0 ; 1] \Rightarrow f_n < f_s \qquad (1.10)$$

k = le degré de compensation du réseau;

fs = la fréquence industrielle (60 Hz);

fn = la fréquence naturelle du système compensé.

Les courants et/ou les tensions produits à la fréquence naturelle du système sont vus au rotor à une fréquence f_r donnée par l'équation 1.11: résultat du passage au réferentiel rotorique dq.

$$f_r = f_s \pm f_n \qquad (1.11)$$

Il en résulte deux fréquences: une fréquence sous-synchrone correspondant à la séquence positive des grandeurs électriques et une fréquence super-synchrone correspondant à la séquence négative. L'apparition des courants, aux fréquences propres, dans le réseau peuvent donner lieu au phénomène d'autoexcitation. L'excitation des courants sous-synchrones dans le réseau induit des

courants et des couples sous-synchrones au rotor, lesquels induisent à leur tour des tensions au stator qui vont renforcer les courants sous-synchrones, dans le réseau, qui les ont créés. Ce phénomène en cascade est appelé le phénomène d'autoexcitation. Celui-ci peut être divisé en deux catégories: le premier ayant trait à la dynamique des grandeurs électriques et mécaniques ensemble, et le deuxième ayant trait à la dynamique des grandeurs électriques seulement.

Pour supprimer ou réduire les risques de résonances sous-synchrones, des moyens existent. Entre autres, limiter la compensation série à un niveau pas trop élevé. En géneral, cette compensation est limitée entre 40 et 70%.Une autre façon consiste à utiliser un amortisseur NGH[38][39]. Le principe du NGH est basé sur le branchement d'une résistance commandée par thyristors en parallèle avec la capacité série. Une installation est en service aux USA.

D'autres types de schéma pour amortir les oscillations sous-synchrones sont couramment utilisés, en particulier, des inductances commandées en parallèle avec les machines synchrones susceptibles d'être affectées par ces phénomènes.

1.4. DEFINITION DU PROBLEME ET CONTRIBUTION

La littérature, sur les risques de résonance sous-synchrone, signale une neutralité du TCSC contrairement aux modules de capacité fixes. Par contre, aucune étude ne fait mention d'interaction possible entre le régulateur, les modes mécaniques des machines les plus proches ou les modes réseaux dans un système compensé série avancé. Une des contributions originales de la thèse s'intéresse à l'interaction du régulateur principal du TCSC avec une machine synchrone à proximité, et les risques de résonance sous-synchrone qui en résultent. La référence[34] montre que le régulateur du compensateur statique déplace les modes réseaux et peut donner lieu à des surtensions sous-synchrones relativement importantes. De façon analogue, la thèse va démontrer[31] que l'interaction entre le TCSC et les modes mécaniques existe et peut donner naissance à des oscillations indésirables.

Pour analyser cette interaction, un modèle "petits signaux" et un modèle EMTP de référence ont été développés. Malgré la flexibilité offerte par EMTP, il s'avère non efficace et lent en mode standard, surtout en présence d'une commande numérique. Pour ce faire, nous avons mis au point[27] une implantation originale et efficace, en recourant à l'algorithmie et à un interface

Fortran pour la commande du TCSC. Nous avons mis en évidence, la rapidité et l'efficacité de la méthode par rapport à la modélisation classique dans EMTP-TACS.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA COMPENSATION SERIE AVANCEE

2.1 CARACTERISTIQUES GENERALES DU TCSC

Au cours de ce chapitre, nous nous occuperons essentiellement du TCSC. Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors. L'impédance totale de compensation vue par la ligne est une combinaison parallèle de la capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors. Le cas particulier du TSSC provient de la suppression de l'inductance parallèle, de sorte que la capacité est mise en service ou hors service par l'allumage ou l'extinction des thyristors.

On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser. En plus des modules contrôlés, on peut ajouter des modules de type TSSC, ou même des modules conventionnels non contrôlés. La figure 2.1 montre un schéma général de compensation série variable avec trois modules commandés et un module conventionnel. Il est d'usage de protéger les bancs de condensateurs contre les surtensions par des varistances à oxyde de métal (MOV).

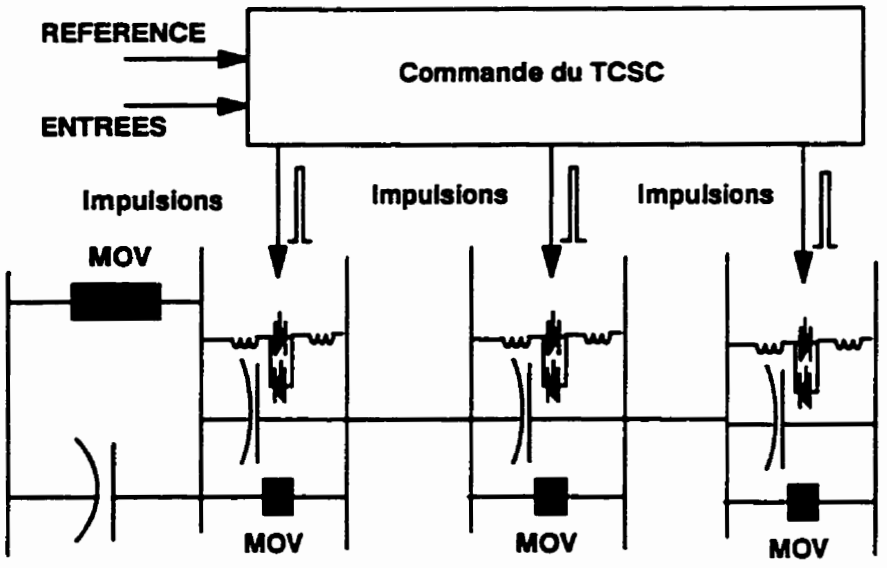


FIG. 2.1 Schéma d'un bloc de TCSC comportant 3 modules

Le changement de la durée de conduction des thyristors provoque une modification de la réactance inductive apparente. Par conséquent, la réactance équivalente des éléments en parallèle change. Quelques cas particuliers sont intéressants à signaler. Lorsque les thyristors sont bloqués, la réactance inductive est infinie, on est alors comme en présence d'une capacité conventionnelle. Lorsque les thyristors sont en pleine conduction, le TCSC se comporte comme une petite inductance. Entre les deux états extrêmes, le circuit peut fonctionner dans une plage capacitive ou inductive.

2.1.1 LIMITES DE FONCTIONNEMENT DU TCSC

Le passage instantané d'un point de fonctionnement inductif à un point de fonctionnement capacitif provoque des oscillations à éviter. Par

conséquent, des protections appropriées sont à prévoir pour éviter ce mode de fonctionnement. Dans le même ordre d'idée, il est exclu de fonctionner dans la zone de résonance et des limiteurs sont à prévoir pour éviter ce mode de fonctionnement.

La combinaison des contraintes sur l'angle d'allumage, des contraintes de nature thermique et des contraintes de surtension aux bornes du condensateur commandé, il en résulte une caractéristique[30] de fonctionnement d'un module de TCSC qui a l'allure de la figure 2.2

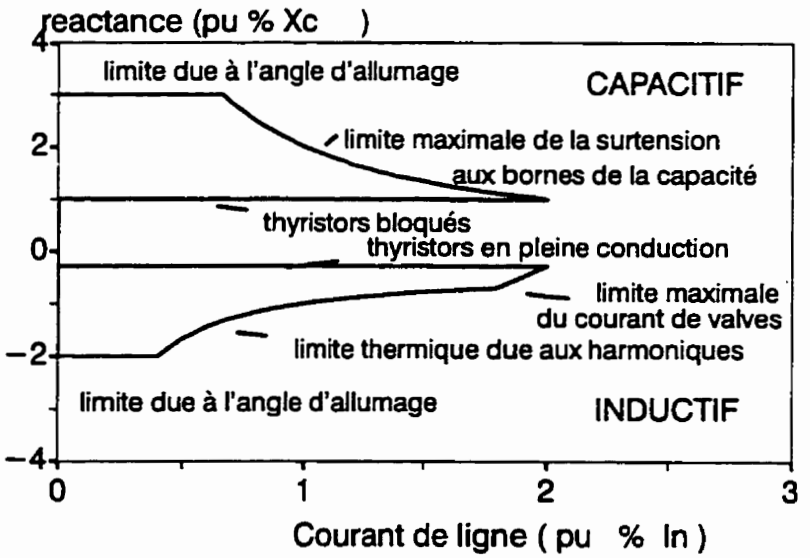


Fig. 2.2 Caractéristique de fonctionnement d'un module de TCSC (Réactance en fonction du courant de ligne)

Dans la partie capacitive, les limitations apparaissent comme suit. A faible courant, la réactance

maximale est limitée par l'angle d'allumage pour éviter la zone de résonance. A plus forte intensité de courant, la limitation provient des surtensions aux bornes du condensateur. Plus le courant augmente, plus on doit diminuer la valeur de la réactance capacitive.

Dans la zone inductive et à plus faible intensité, la réactance maximale est limitée par l'angle d'allumage afin de ne pas être trop proche de la résonance. A plus forte intensité, la génération d'harmoniques provoque beaucoup d'échauffement de sorte que si le courant augmente, la réactance maximale doit être diminuée. Une dernière butée est due à la limitation du courant dans les valves.

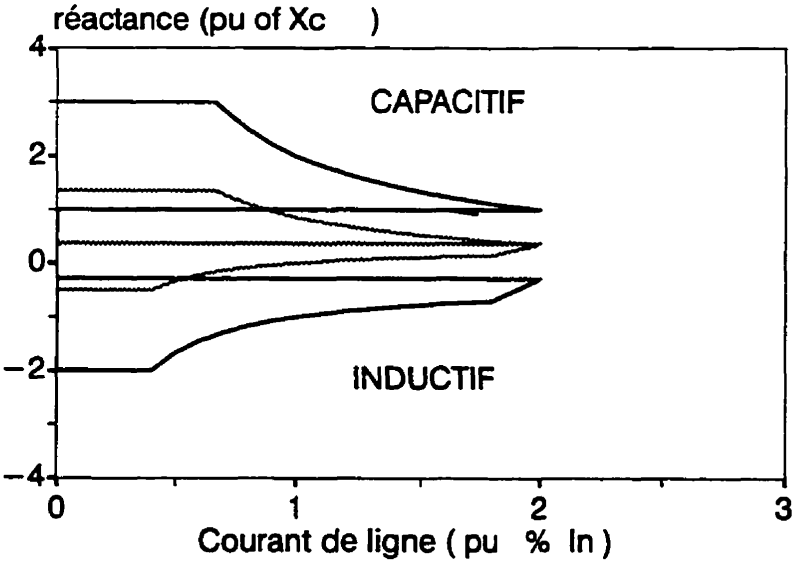


Fig. 2.3:Caractéristique de fonctionnement de 2 modules de TCSC (X en fonction de I)

En pratique, on subdivise le module en plusieurs sous-modules. Ce qui permet de réduire la zone de fonctionnement interdite et un passage de la zone capacitive à la zone inductive moins brutal. On peut même combiner plusieurs modules qui n'ont pas les mêmes dimensions. La figure 2.3 montre la caractéristique de fonctionnement de deux modules identiques d'un même TCSC.

2.1.2 ALLURE DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES DANS UN TCSC

Si on suppose que le TCSC est alimenté par une source de courant idéal, on peut mettre en évidence les caractéristiques suivantes des formes d'ondes des principales grandeurs électriques du TCSC[3].

Les courants et les tensions du TCSC ont la forme indiquée aux figures 2.4 et 2.5. Les figures 2.4 (a) et 2.4 (b) indiquent respectivement le courant de ligne et le courant de valves; tandis que les figures 2.5(a) et 2.5 (b) indiquent respectivement les formes d'ondes du courant capacitif et de la tension capacitive du TCSC.

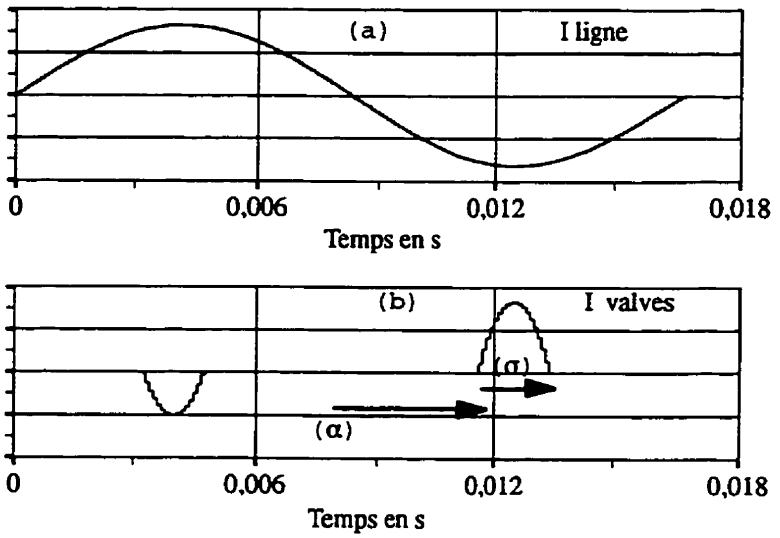


Fig.2.4: Formes d'ondes du courant de ligne(a) et des valves(b)

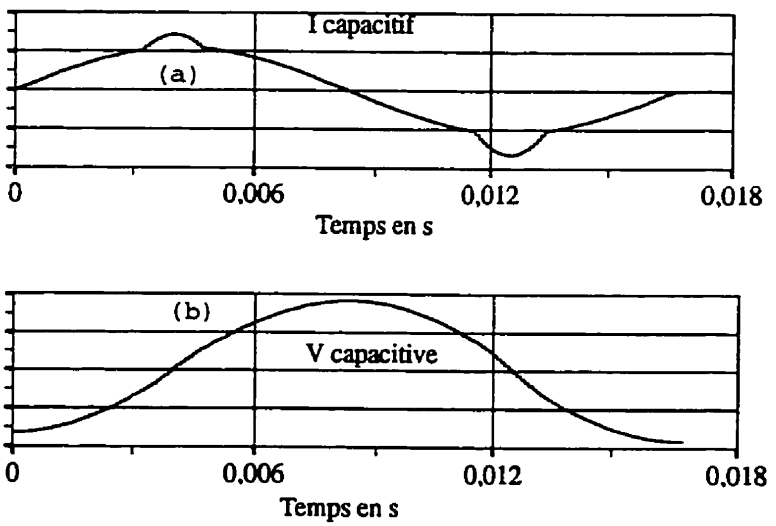


Fig. 2.5: Formes d'ondes du courant (a) et de la tension (b) du TCSC

2.1.4 DESCRIPTION DE LA COMMANDE DU TCSC

Le but de la commande est la création d'impulsions sur chaque demi-cycle à un instant bien précis pour commander l'angle d'allumage α ou la durée de conduction σ. La relation qui lie les 2 grandeurs est la suivante: $\sigma = 2(\pi - \alpha)$. De cette façon, on règle le courant qui passe dans l'inductance et la réactance apparente du TCSC est modifiée. Le commande peut être basée sur un asservissement de courant, de puissance ou d'impédance. Le schéma bloc d'une commande classique basée sur un asservissement de courant est présenté à la figure 2.6[27]. Il nous servira de modèle tout au long de ce travail. En voici une description sommaire.

Module de régulation: Le module de régulation constitue l'élément de base de la commande. Il est constitué d'un élément de filtrage de la grandeur à asservir, suivi d'un comparateur. Une fonction de transfert pour un régulateur de type PI ou PID vient assurer l'élément principal d'asservissement.

Le régulateur permet au TCSC de fonctionner suivant plusieurs modes: mode à impédance constante, mode à courant constant, mode inductif, mode capacitif etc...

Le mode à impédance constante est quasiment un mode en boucle ouverte si on se réfère à la figure 2.6.

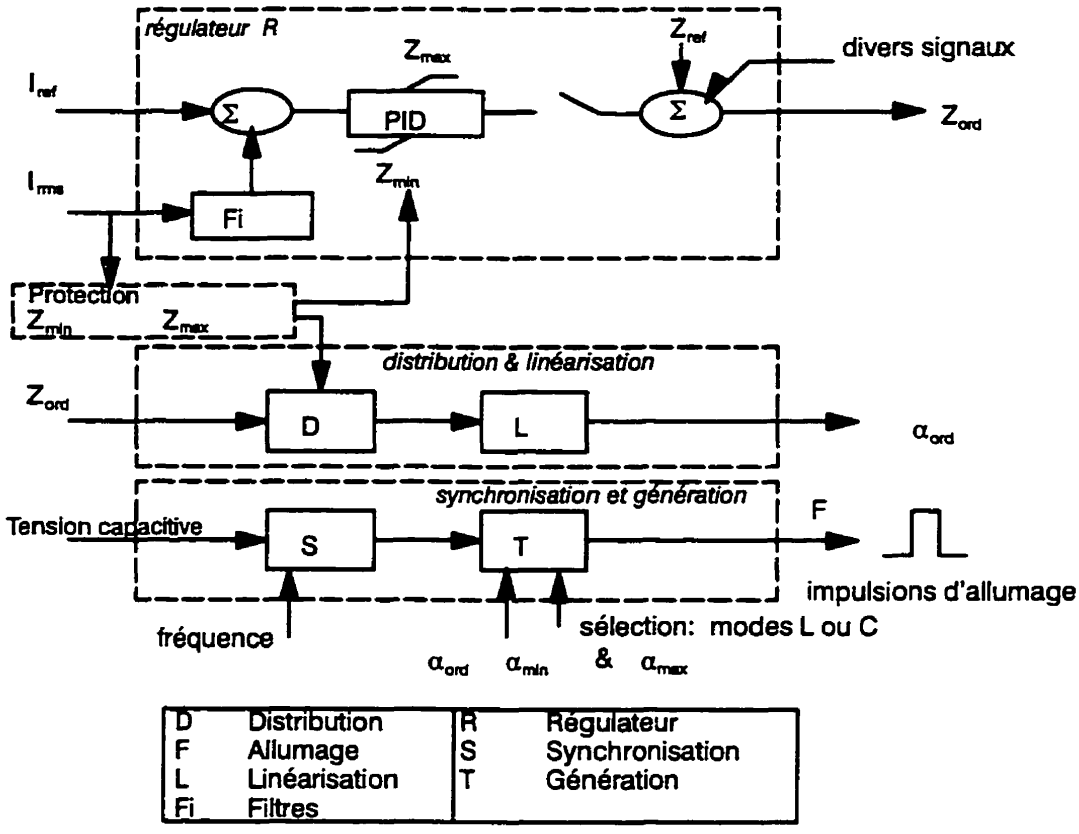


Fig. 2.6: Schéma bloc de la commande d'un TCSC

Le TCSC ajuste l'angle α, dans les limites Z_{max} et Z_{min}, pour maintenir une impédance constante.

Le mode à courant constant permet de maintenir une ligne à une charge constante, en utilisant une boucle de rétroaction sur le courant, en comparaison avec un courant de consigne. Il nécessite un régulateur de type PI ou PID.

Le mode normal de fonctionnement est le mode capacitif avec α variant entre α_{max} et α_{min}. Les cas où les thyristors sont continuellement en pleine conduction

($\sigma = 180°$; $\alpha = 90°$) ou continuellement bloqués ($\sigma = 0°$; $\alpha = 180°$) constituent des cas limites.

Module de distribution et linéarisation: La sortie du régulateur est une variation d'impédance d'ajustement. Le module détermine sur quelle partie du TCSC agir pour obtenir l'incrément désiré, tenant compte du nombre de modules et des limitations d'impédance. La correspondance entre la valeur d'impédance et l'angle d'allumage à travers le module de linéarisation permet d'avoir une réponse quasi linéaire.

Module de synchronisation: Il permet la synchronisation des signaux en modes TCR (Thyristor Controlled reactor) ou en mode TSR (Thyristors Switch Reactor). Le module comprend une série de 3 filtres du signal de synchronisation: les 2 premiers enlèvent les traces de la fréquence d'échantillonage, tandis que le filtre à 51 Hz sert de compensation du délai. Le module comprend ensuite un détecteur de phase combiné avec les fonctions d'un oscillateur, pour réaliser un asservissement de phase (Phase Lock Loop : PLL). Le module compare la phase d'un signal connecté à l'entrée à une phase d'un signal de référence. Une compensation d'amplitude est ajoutée au cas où l'amplitude serait supérieure à une certaine valeur.

Générateur d'impulsion: Le module fournit les impulsions d'allumage des thyristors dans les 2 directions. L'angle d'allumage est défini comme étant l'angle électrique entre le passage par zéro du signal de synchronisation et l'instant où l'impulsion doit être envoyée.

2.2 MODELISATION DU TCSC PAR EMTP

Les ingénieurs et exploitants de réseaux ont besoin d'outils d'analyse et de simulation pour faire des études de faisabilité et déterminer les solutions attrayantes. Plusieurs outils existent et dépendent du problème abordé. Pour des études de stabilité, des modèles de TCSC existent et pourraient être implantés dans des programmes comme ST600[47]. Pour analyser des phénomènes de résonance et d'interaction du TCSC avec le réseau, on a besoin d'un modèle EMTP[45], qu'il faut développer et implanter de manière efficace. L'implantation du modèle de TCSC constitue notre première contribution. Il servira entre autre de modèle de référence pour des études futures.

2.2.1 STRUCTURE DE EMTP-TACS STANDARD

Le programme EMTP-TACS permet de modéliser et de simuler les transitoires électromagnétiques dans les réseaux. Il constitue un outil essentiel et complet pour

les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine des réseaux. Le module TACS est un module qui permet de simuler les systèmes de commande dans les réseaux. Le programme va nous permettre de modéliser et de simuler le comportement de la commande du TCSC à partir d'un réseau test. Nous mettrons en évidence une des limitations du module et une façon d'y remédier avec des performances très appréciables.

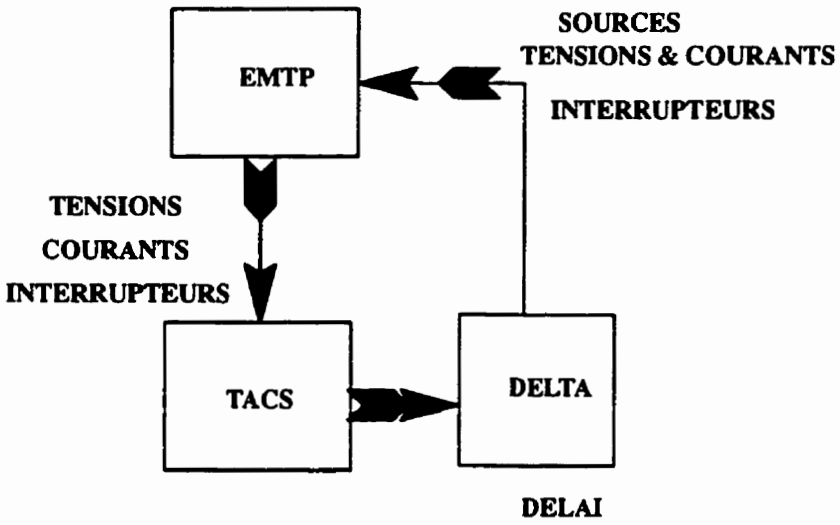


Fig.2.7: Structure du programme EMTP–TACS

Initialement, cette partie du programme était conçue pour la simulation des systèmes de commande linéaires. Hormis les problèmes d'initialisation et de décalage dans l'exécution entre EMTP et TACS, le programme s'est avéré être un outil flexible et efficace.

La figure 2.7 montre la structure du programme dans sa version standard. La partie TACS, qui simule la partie commande, va chercher les tensions et courants, de même que l'état des interrupteurs dans le réseau (EMTP).

Il les utilise dans le module et injecte dans le réseau, des tensions et courants sous forme de sources et ordonne la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs du réseau. Ce processus est répété à chaque pas de calcul et il est séquentiel.

Par contre la modélisation des éléments non linéaires comme les circuits d'électronique de puissance ou le contrôle numérique, s'est avérée fastidieuse en termes de temps de calcul. Même si les instructions de type Fortran et pseudo-Fortran permettent de modéliser les éléments de commande non-linéaires ou/et numériques, les limitations deviennent très restrictives en termes de vitesse de calcul. Étant donné que le module de commande que nous avons développé est de nature numérique, du moins sa partie régulatrice, pour des raisons de flexibilité, nous étions dans la classe de problèmes difficiles à traiter avec TACS standard.

2.2.2 STRUCTURE DE L'INTERFACE USAGER FORTRAN

Pour remédier à cette situation, nous avons eu recours à une version bêta de EMTP-TACS, qui dispose d'un interface usager en Fortran, ce qui permet à chaque

utilisateur de programmer en Fortran sa propre version de la commande. De cette façon, on sauvegarde la flexibilité de EMTP - TACS pour la simulation du réseau, avec des possibilités de modéliser et de simuler les circuits de commande numérique. La structure du nouveau programme, est représentée à la figure 2.8. L'usager compile d'avance ses modules et le lien se fait dynamiquement à travers l'interface, au moment de l'exécution de EMTP.

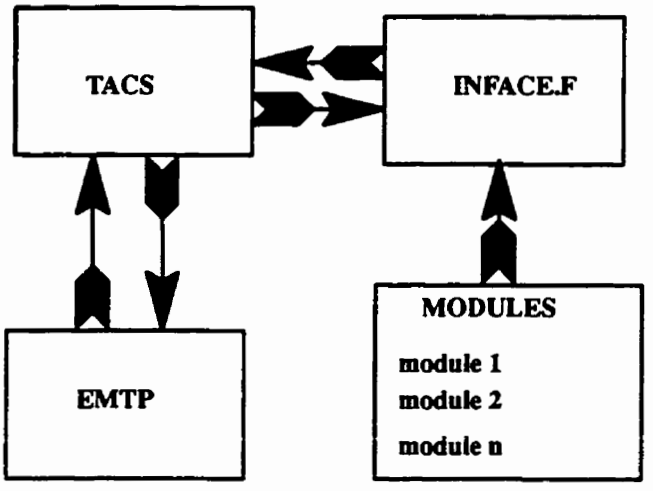


Fig. 2.8: Structure de l'interface Fortran

Le premier avantage obtenu est la vitesse d'exécution par rapport à la version standard. L'avantage supplémentaire obtenu avec l'interface usager est le contrôle de la séquence des instructions, par opposition à la séquence imposée par EMTP-TACS standard auquel l'usager n'a pas accès normalement. Cet ordonnancement

affecte les résultats de calcul comme on le verra par la suite.

2.3 RESULTATS DE SIMULATION

La structure de la commande implantée est celle schématisée à la figure 2.6. Pour bâtir le modèle TACS, nous avons utilisé des données tirées de la littérature[3][7]. En premier lieu, un code EMTP-TACS standard a été généré et utilisé pour fins de vérification de la fonctionalité du modèle. Nous avons en même temps relevé les statistiques au niveau des temps d'éxecution pour un temps de simulation donné.

2.3.1 RESEAU TEST

Les données proviennent d'une partie du réseau américain, entre les stations Navajo et Shiprok en Arizona, où un premier prototype de TCSC est installé en mode expérimental et pour lequel les résultats sont disponibles dans la littérature. Le réseau est constitué d'une ligne triphasée de 320 km de long à un niveau de tension de 230 kV. Le TCSC lui même est installé à la station Kayenta presqu'au milieu de la ligne. La figure 2.9 présente le schéma unifilaire du réseau et les valeurs des réactances en jeu. Le TCSC lui même composé d'un condensateur de 15Ω et d'une petite inductance commandée de 2.6Ω.

La ligne comporte en outre deux bancs de condensateurs fixes respectivement de 40 et 55Ω. Nous avons procédé à des essais en utilisant la commande en boucle ouverte, pour évaluer les performances en temps de simulation et en boucle fermée pour évaluer les performances dynamiques du TCSC.

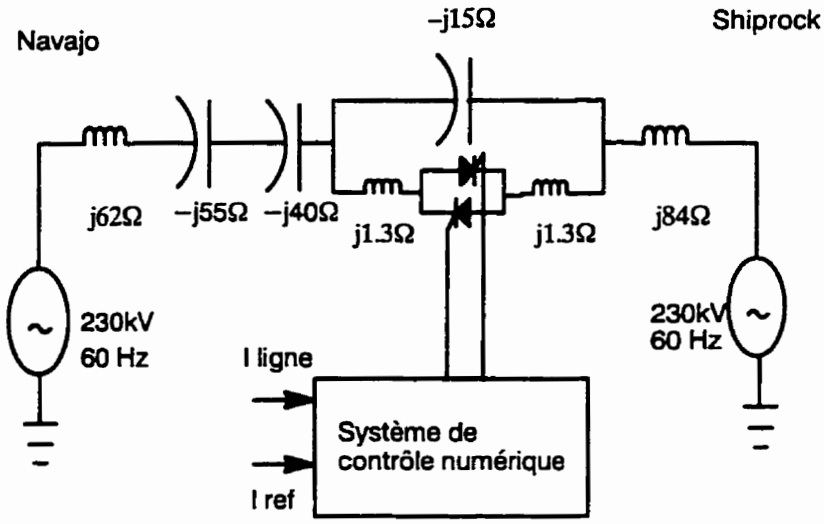


Fig. 2.9: Réseau test (Kayenta en Arizona)

Le mode de contrôle du TCSC est un mode de contrôle par le courant de ligne.

2.3.2 PERFORMANCE EN CPU DU MODE TACS STANDARD.

Afin de mettre en évidence les écarts au niveau des temps de simulation, nous avons considéré le réseau électrique seul sans la commande du TCSC. Un générateur d'impulsions non commandé permet l'allumage des valves. L'essai de simulation dure une seconde avec un pas de

calcul de 9.98 µs. Le tableau 2.1 reproduit les statistiques de simulation obtenues à l'aide d'une station de travail de type sun, modèle IPC.

DUREE DE SIMULATION (IPC)	CPU	I/O	Σ
CALCUL PRINCIPAL	549	33	582
DIVERS	3	2.0	5.0
TOTAL	552	35	587

Tableau 2.1 : Statistiques de simulation du réseau sans commande en seconde.

DUREE DE SIMULATION (IPC)	CPU	I/O	Σ
CALCUL PRINCIPAL	4527	37.0	4564
DIVERS	10	1.4	11.4
TOTAL	4537	38.4	4575

Tableau 2.2 : Satistiques de simulation par EMTP–TACS standard avec la commande du TCSC en seconde.

On constate que la simulation prend 582s. Ensuite, nous avons procédé à l'évaluation des performances de la commande en mode TACS standard. Le modèle du système de contrôle comprend plusieurs instructions TACS de type pseudo-Fortran en format fixe. La partie régulateur est numérique et comprend une série de filtres numériques à l'entrée.

Par conséquent, le nombre d'instructions pseudo-Fortran est relativement élevé. Il en résulte un temps d'éxecution prohibitif. Le tableau 2.2 donne les statiques de simulations obtenues. La simulation sur une seconde dure plus d'une heure de temps. De ce total de temps, les instructions TACS occupent 87% du temps.

2.3.3. PERFORMANCE EN CPU AVEC L'INTERFACE FORTRAN

La reformulation des instructions TACS en une sous-routine fortran s'est faite graduellement en commençant par les cartes 88 de type pseudo-fortran. Ensuite, nous avons remis en fortran tous les blocs de type fonction de transfert, type 56 etc..., qui apparaissaient dans la commande. Une fois mis sous forme de sous-routines à appeler chaque fois que nécessaire, nous en avons fait un seul bloc.

DUREE DE SIMULATION (IPC)	CPU	I/O	Σ
CALCUL PRINCIPAL	936	13.0	949
DIVERS	2	1.0	3
TOTAL	938	14	952

Tableau 2.3 : Statistiques de simulation avec Interface Fortran en seconde

Le tableau 2.3 reproduit les statistiques de simulation obtenues, dans les mêmes conditions que précédemment. La première constatation est que la durée de simulation totale a été réduite dans un facteur de 1 à 5. En réalité, le temps de simulation pour la commande seule est passé de 3988s à 365s; soit une réduction dans un facteur de 1 à 11. En d'autres termes, la vitesse de calcul de la partie commande a été multipliée par 11.

2.3.4. RESULTATS TACS STANDARD vs INTERFACE USAGER

La validation des résultats de simulation a été réalisée sur la base d'un essai simple à savoir une perturbation sur l'angle d'allumage et ce, en boucle ouverte. Nous avons relevé la tension résultante aux bornes du condensateur commandé pour les cas avec TACS

standard et le cas avec l'interface usager. Les courbes sont reproduites respectivement aux figures 2.10 à 2.12.

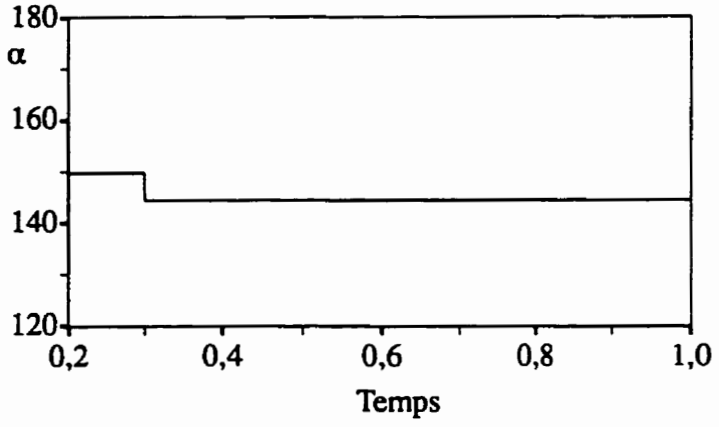


Fig. 2.10: Angle d'allumage α (o) vs Temps(s)

La figure 2.10 montre la perturbation d'impédance traduite en perturbation d'angle d'allumage α. Il s'en suit une augmentation du courant et de la tension au niveau du TCSC. La figure 2.11 présente l'allure de la variation de la tension aux bornes du TCSC obtenue à l'aide du module TACS standard.La figure 2.12 présente l'allure de la tension aux bornes du TCSC obtenue à l'aide du module fortran que nous avons mis au point. La comparaison des courbes 2.11 et 2.12 révèle une différence en amplitude de l'ordre de 14%, malgré que l'allure soit la même.

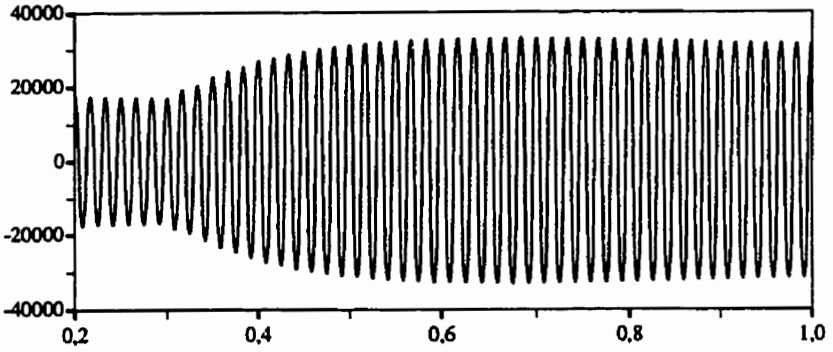


Fig. 2.11: Allure de la tension du TCSC (V) vs Temps (s)
TACS standard

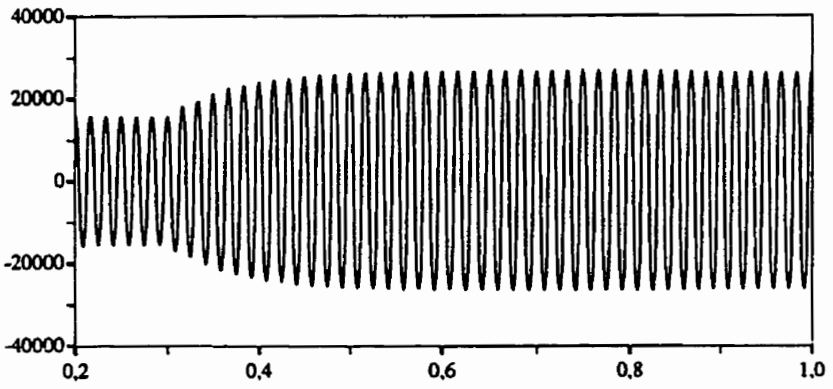


Fig. 2.12: Allure de la tension du TCSC (V) vs Temps (s)
Interface usager en fortran

La différence provient essentiellement de la différence d'ordonnancement dans le module TACS par rapport à la sous-routine. La routine tient compte de la vraie séquence d'instructions, tandis que TACS standard utilise une procédure qui essaie de minimiser les retards dans la séquence d'exécution. Une des conséquences est que les impulsions d'allumage sont envoyées à des moments différents malgré une même consigne de l'angle

d'allumage. Le résultat est une différence dans les courants de valves et une différence sur la tension aux bornes du TCSC.

L'interface lui-même, depuis qu'il avait été initié en 1992[50] n'avait été testé que sur des modules de commande à courant continu. Les résultats obtenus et présentés dans l'article[50] mentionnent une réduction en temps d'exécution de 10%. Ceci pour dire que la programmation simple des instructions TACS en Fortran ne donne pas nécessairement des résultats comme ceux que nous avons obtenu dans notre travail, à savoir une réduction de plus de 90%. Notre contribution réside dans l'approche d'une programmation structurée et optimisée, tenant compte de la complexité de la commande et des améliorations récentes faites au niveau de cet interface[32].

2.3.5. PERFORMANCE DYNAMIQUE DE LA COMMANDE DU TCSC.

Comme application du TCSC développée, nous avons analysé ses performances pour garder le courant constant sur une ligne de transport. A cet effet, nous avons simulé le comportement de la commande du TCSC en boucle fermée, en faisant une perturbation sur le courant de consigne du régulateur. Nous avons ensuite relevé les formes d'ondes du courant, de la tension aux bornes du TCSC, de la réactance capacitive du TCSC et la variation

de l'angle d'allumage qui en résultent. Les formes d'onde obtenues sont reproduites aux figures 2.13 à 2.16.

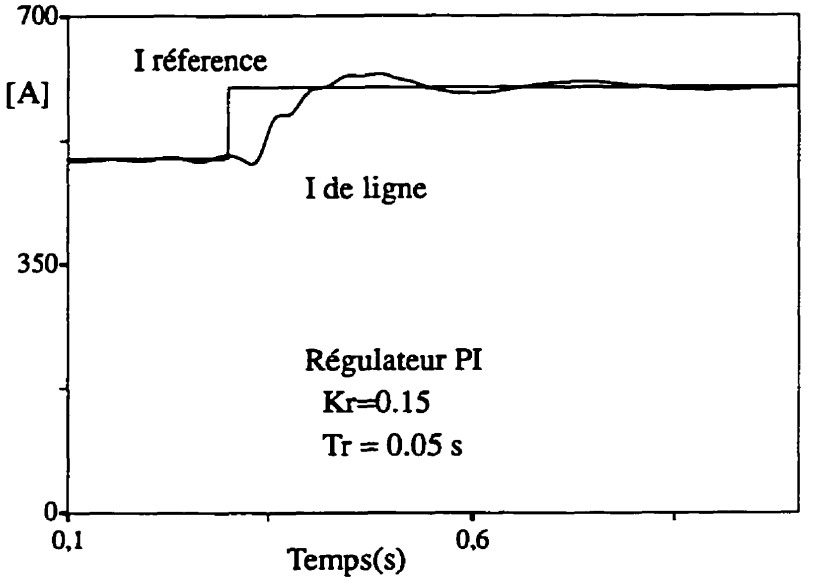


Fig.2.13 : Variation du courant (A_{eff}) vs temps (s)

La figure 2.13 présente l'allure du courant dans la ligne par rapport au courant de consigne. En ajustant le gain du régulateur, on peut obtenir diverses formes du courant. Plus le gain est élevé, plus on aura une allure oscillante autour du courant de consigne. On remarque que le TCSC répond correctement à cette perturbation et permet de suivre la consigne.

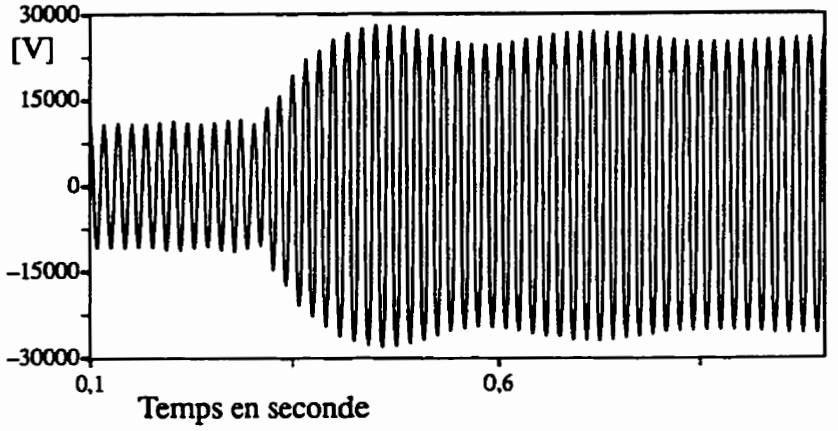


Fig.2.14 : Tension aux bornes (V) du TCSC vs temps (s)

Les figures 2.14 et 2.15 représentent respectivement la tension aux bornes de la capacité variable et l'impédance capacitive ajustée par la commande du TCSC.

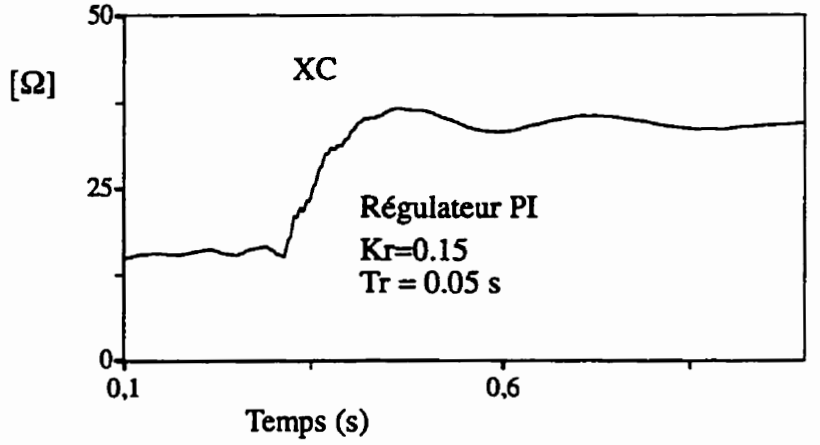


Fig.2.15 : Variation de la réactance capacitive (Ω) du TCSC

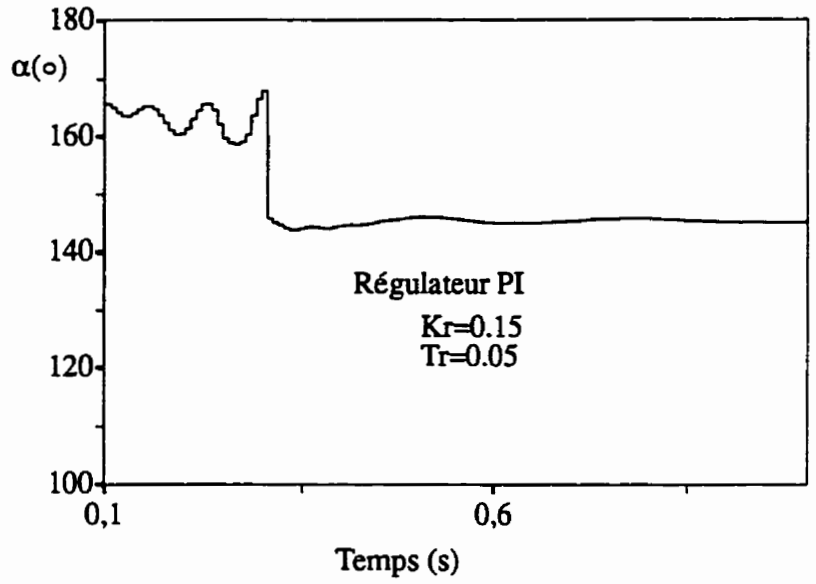


Fig.2.16 : Variation de l'angle d'allumage α (o) vs temps (s)

La figure 2.16 présente l'allure de l'angle d'allumage en fonction du temps.

2.4 CONCLUSION

La conclusion la plus intéressante, qui se dégage est la faisabilité de modélisation des éléments non linéaires, en particulier des commandes numériques, via un interface usager en fortran avec des temps de calcul fortement réduits qui étaient jusqu'ici difficiles à obtenir.

Le remplacement des codes pseudo-fortran qui nécessitaient une interprétation à chaque pas de calcul par des sous routines améliore de loin les temps de

calcul. L'ordonnancement des instructions par TACS est une procédure complexe servant à minimiser les délais dans la séquence d'exécution des instructions TACS. L'approche par interface usager permet l'utilisation de la vraie séquence d'instructions, puisque TACS n'a plus à réordonner les instructions. Ceci est d'autant plus intéressant que le contrôle numérique doit utiliser la vraie séquence, en particulier lors du filtrage.

La deuxième conclusion est la mise au point d'un algorithme fortran pour la commande du TCSC, testée avec succès et qui a donné d'excellents résultats en terme de temps de calcul. Une accélération du temps de calcul de plus de dix fois a été obtenue sur cette commande comparativement au mode TACS standard. De telles performances sont requises si on veut faire des études pratiques de FACTS dans l'industrie.

L'augmentation de la vitesse de calcul peut être encore améliorée, si on tient compte du fait que l'interface permet d'utiliser un pas de calcul différent entre EMTP et la commande. Cette dernière pouvant utiliser un pas de calcul conforme à la fréquence d'échantillonnage et non le temps de calcul de EMTP.

Les performances dynamiques du régulateur ont démontré la capacité du TCSC de maintenir un courant constant le long d'une ligne de transport. Les

performances dynamiques peuvent être améliorées en utilisant un régulateur du type PID au lieu du type PI. L'optimisation des paramètres du régulateur peuvent se faire en fonction des performances désirées. Ces dernières s'exprimant généralement en termes de dépassement, d'amortissement etc...

Les chapitres qui suivent vont aborder la deuxième contribution de la thèse, relative au phénomène d'interaction de la commande du TCSC avec les modes propres de la machine synchrone.

CHAPITRE III

RESONANCE SOUS-SYNCHRONE ET LE TCSC

Le phénomène d'interaction de torsion est relatif à la combinaison de la dynamique des grandeurs électriques et des grandeurs mécaniques. Les oscillations rotoriques à une fréquence correspondant à un mode propre mécanique de la turbine entraînent des tensions statoriques à deux fréquences, l'une sous-synchrone et l'autre super-synchrone. Si la fréquence sous-synchrone de la tension est proche de la fréquence propre du réseau, les courants statoriques induits à cette fréquence vont à leur tour provoquer un couple qui tend à renforcer les oscillations rotoriques. Tout se passe comme si l'amortissement des oscillations se détériorait. De la même manière, partant d'une perturbation du réseau à une fréquence sous-synchrone, elle va induire un couple rotorique à deux fréquences, l'une sous-synchrone et l'autre super-synchrone. Si la fréquence sous-synchrone est proche d'une fréquence propre mécanique du groupe turboalternateur, le couple rotorique va induire des tensions statoriques qui tendront à renforcer les courants sous-synchrones dans le réseau.

L'interaction de torsion fait partie de la catégorie de problèmes classés dans la stabilité "petits signaux". La stabilité petits signaux suppose une petite

perturbation autour d'un point de fonctionnement provoquée exterieurement ou spontanée. L'analyse vérifie si le système va retrouver ou non un point d'équilibre suite à cette petite perturbation. On suppose un comportement quasi linéaire du système dû à cette dernière, autour du point de fonctionnement et l'analyse de la stabilité "petits signaux" se fait principalement à l'aide de deux types de méthodes: la méthode directe par analyse de sa réponse indicielle ou impulsionnelle et par des méthodes indirectes comme l'analyse des valeurs propres etc...

3.1 METHODES D'ANALYSE

La méthode qualitative la plus directe pour évaluer la stabilité d'un système est de lui appliquer un échelon et d'observer sa réponse. Si le système est décrit par des équations différentielles, la réponse est obtenue par résolution de celles-ci à l'aide des méthodes classiques d'intégration. Si le système est représenté par des fonctions de transfert, la réponse est obtenue par transformation inverse de Laplace.

Souvent, on est intéressé de savoir si le système est stable ou non, d'avoir une information quantitative et une analyse des causes, sans devoir passer par la réponse temporelle. En particulier, si le système est complexe et que la transformée inverse de Laplace est

trop compliquée ou si l'intégration numérique des équations différentielles est difficile à faire. Dans ces cas, on peut tout de même analyser la stabilité du système de manière indirecte. Plusieurs méthodes existent dont le critère de Routh Hurwitz, de Nyquist etc.....

Parmi les méthodes indirectes, une des plus attrayantes est la méthode des valeurs propres. Elle consiste à calculer les valeurs propres de la matrice d'état du système et à interpréter physiquement la stabilité de ce dernier. Selon le signe de la partie réelle des valeurs propres, on pourra savoir si oui ou non le système est stable. En utilisant, cette dernière approche, la question est de savoir comment obtenir la matrice d'état du système et enfin comment calculer les valeurs propres.

Une méthode intéressante pour obtenir la représentation d'état d'un système, simple d'application est la méthode de connexion des composantes[40]. Elle consiste à considérer le réseau comme une interconnexion de plusieurs sous-systèmes plutôt que comme une seule entité. Cette approche a l'avantage d'allier la simplicité des équations prises sur une base de chaque composante et la facilité de manipulation de l'algèbre matricielle linéaire des matrices résultantes. La seule contrainte est le respect des lois de conservation comme

les lois de Kirchoff dans le domaine des réseaux. Nous retiendrons cette méthode pour analyser l'interaction de la commande du TCSC avec la machine synchrone la plus proche.

La dernière étape, une fois la matrice d'état calculée, est le calcul des valeurs propres. Le calcul des valeurs propres est un problème d'une grande importance dans les réseaux. Quoique la solution soit bien connue, pour des matrices pleines et de petite taille, le problème reste ouvert pour les matrices creuses et de grandes dimensions. Dans le problème qui nous occupe, le réseau test n'étant pas trop grand, nous nous contenterons de la méthode HQR utilisée par le programme MATLAB et qui est réputée pour sa stabilité numérique. Nous allons donc utiliser la méthode de connexion des composantes pour obtenir la matrice d'état du réseau, que nous traiterons par le logiciel MATLAB pour en déduire les valeurs propres du réseau.

3.2 METHODE DE CONNEXION PAR COMPOSANTES[40]

La méthode de connexion de composantes se base sur le calcul des matrices d'état des divers composants du système, pour ensuite les connecter ensemble, grâce aux matrices de connexion. Le but ultime étant la détermination de la représentation d'état de tout le

réseau et le calcul des valeurs propres du système entier.

Considérons la ième composante ayant a_i comme vecteur d'entrée, b_i comme vecteur de sortie et x_i comme variable d'état (Fig. 3.1). Le système d'équations linéaires propre à chaque composante s'écrit comme suit:

$$\frac{d}{dt}x_i = A_i x_i(t) + B_i a_i(t) \quad (3.1)$$

$$b_i(t) = C_i x_i(t) + D_i a_i(t) \quad (3.2)$$

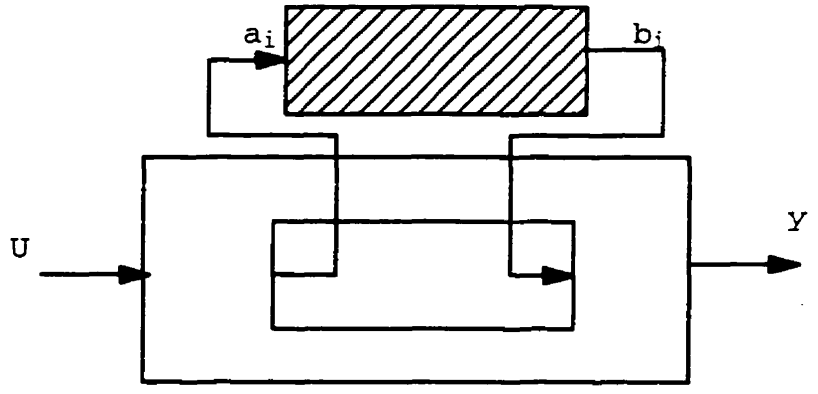


Fig.3.1: Décomposition d'un système en composantes

Pour former le système d'équations linéaires du système complet, composé de N sous-systèmes, on regroupe les équations des N composantes du réseau. Lorsque toutes les composantes du système sont considérées, mais sans interconnexion, les matrices $\{A_j, B_j, C_j, D_j\}$ sont

empilées pour faire de grandes matrices bloc-diagonales de la forme des équations 3.3 à 3.7.

Les équations générales d'interconnexion du système prennent la forme des équations 3.8 à 3.9: u étant le vecteur d'entrée du système.

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Ba(t) \quad (3.3)$$

$$b = Cx(t) + Da(t) \quad (3.4)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & A_n \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & B_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & C_n \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & D_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La combinaison des matrices du système découplé (Eq.3.6 à Eq.3.7) et des matrices de connexion (Eq.3.8 et Eq.3.9) donne lieu à la forme finale des équations: Eq.3.10 à Eq.3.15.

$$a(t) = L_{11}b(t) + L_{12}u(t) \qquad (3.8)$$

$$b(t) = L_{21}b(t) + L_{22}u(t) \qquad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt}x(t) = Fx(t) + Gu(t) \qquad (3.10)$$

$$y(t) = Hx(t) + Ju(t) \qquad (3.11)$$

$$F = [A + B(I-DL_{11})^{-1}C] \qquad (3.12)$$

$$G = [B(I-DL_{11})^{-1}DL_{12} + BL_{12}] \qquad (3.13)$$

$$H = [L_{21}(I-DL_{11})^{-1}DL_{12} + L_{22}] \qquad (3.14)$$

$$J = [L_{21}(I-DL_{11})^{-1}C + L_{22}] \qquad (3.15)$$

Hormis les entrées et les sorties du système global, les sorties de certaines composantes constituent les entrées pour d'autres, d'où la nécessité de prêter une attention particulière aux diverses entrées et sorties de chaque composante.

Il est à noter que toutes ces dernières matrices ne seront valables que si $(I-DL_{11})$ n'est pas une matrice singulière. La stabilité du système linéarisé dépend des valeurs propres de la matrice F.

Si on regarde bien la matrice F, elle est composée de 2 termes, l'un est la matrice A correspondant aux divers éléments découplés du système et l'autre est la

partie correspondant à l'interaction entre les composantes. Cette matrice demeure inchangée tant qu'on ne modifie pas la topologie du réseau en termes d'entrées sorties, ni le point de fonctionnement.

Les valeurs propres de la matrice F constituent les valeurs propres (ou modes d'oscillation) du réseau. En particulier, nous pouvons en tirer les modes propres mécaniques et électriques des machines synchrones, des TCSC et de tous les équipements du réseau.

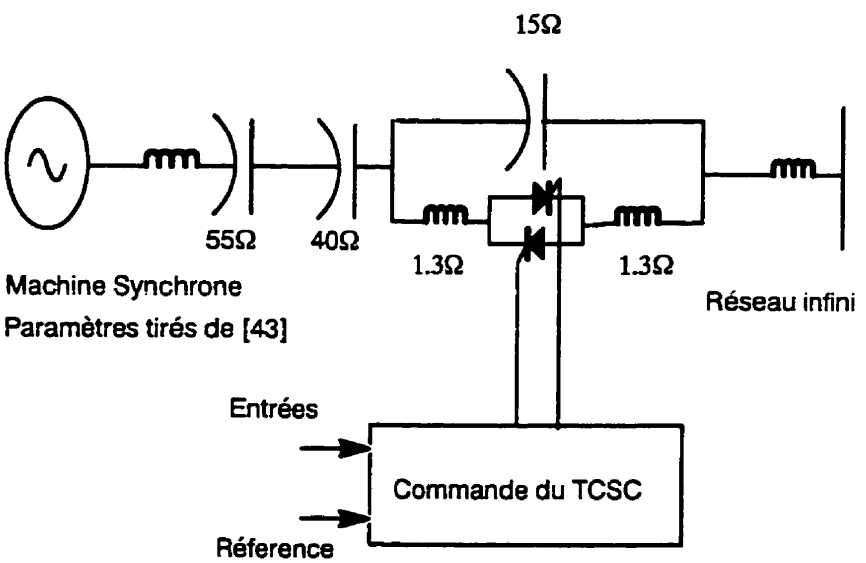


Fig. 3.2: Schéma du réseau test pour le problème de SSR

L'analyse de l'interaction entre le régulateur principal d'un TCSC et les masses mécaniques des machines synchrones se traduira par une étude paramétrique des modes propres mécaniques en fonction des paramètres du

régulateur principal du TCSC. Cette analyse sera donc basée sur la linéarisation de la machine synchrone, du TCSC et de la ligne de transport qui sont les éléments qui constituent le réseau test décrit à la figure 3.2.

3.3 MODELES DES COMPOSANTES

3.3.1 MACHINE SYNCHRONE : PARTIE ELECTRIQUE

La machine synchrone que nous considérons comporte trois bobinages statoriques symbolisés par les phases a, b et c; ainsi que trois bobinages rotoriques: un inducteur f et 2 amortisseurs dans les axes d et q (Fig. 3.3). Les six bobinages sont couplés magnétiquement. Le couplage magnétique varie dans le temps avec la rotation du rotor par rapport au stator. Selon l'axe de référence choisi, la machine peut être représentée par des équations à paramètres variables ou invariants dans le temps.

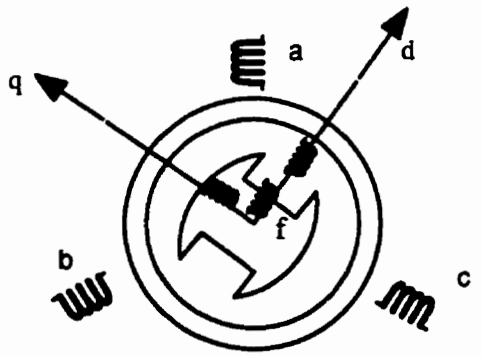


Figure 3.3: Schéma de la machine synchrone : Partie électrique

Tous les modèles mathématiques représentant les diverses parties de la machine (stator, rotor) sont des dérivées des développements des équations de Park[48]. Le lecteur pourra consulter avec intérêt les références[2],[48],[49]. La linéarisation des équations de Park, écrites dans le plan de Laplace, donne lieu aux équations de base suivantes (Eq.3.16 à Eq.3.24), et qui sont données dans la référence[2]. Le schéma bloc qui en résulte est donné à la figure 3.4.

$$\frac{s\Psi_d}{\omega_b} = -v_d - r_a\, i_d - \omega_o\, \psi_q - \psi_{qo}\, \omega_o \qquad (3.16)$$

$$\frac{s\Psi_q}{\omega_b} = -v_q - r_a\, i_q + \omega_o\, \psi_d - \psi_{do}\, \omega_o \qquad (3.17)$$

$$\psi_d(s) = L_d(s)\, i_d(s) + G_d(s)\, V_f(s) \qquad (3.18)$$

$$\psi_q(s) = L_q(s)\, i_q(s) \qquad (3.19)$$

$$L_d(s) = \frac{L_d\,(1+\tau'_d\, s)\,(1+\tau''_d\, s)}{(1+\tau'_{do}\, s)\,(1+\tau''_{do}\, s)} \qquad (3.20)$$

$$L_q(s) = \frac{L_q\,(1+\tau'_q\, s)\,(1+\tau''_q\, s)}{(1+\tau'_{qo}\, s)\,(1+\tau''_{qo}\, s)} \qquad (3.21)$$

$$G_d(s) = \frac{K_d\,(1+\tau'_{Fo}\, s)}{(1+\tau'_{do}\, s)\,(1+\tau''_{do}\, s)} \qquad (3.22)$$

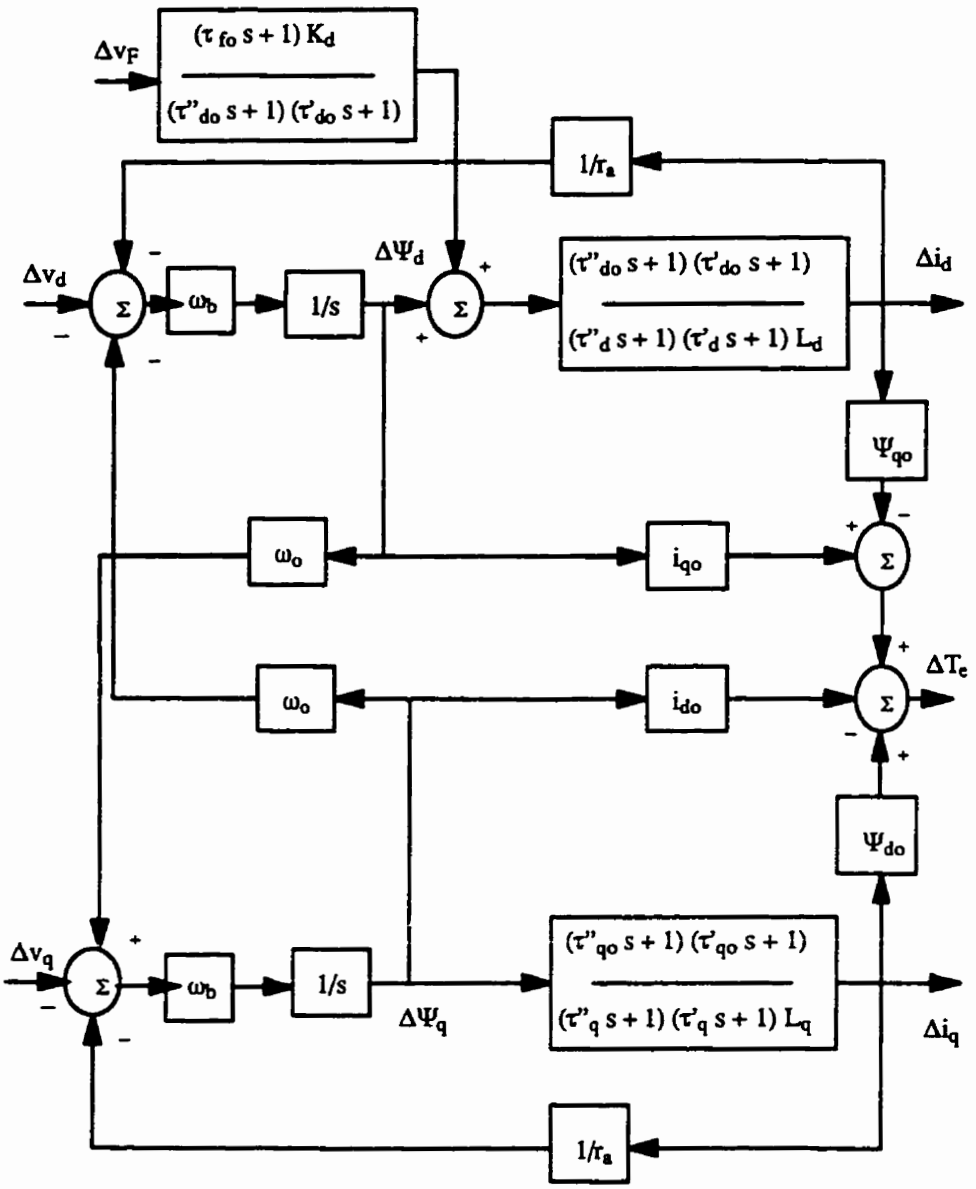


Fig.3.4: Modèle linéaire de la machine: Partie électrique

Les équations 3.16 à 3.19 expriment le lien entre les variations de flux Ψ d'axe d et q en fonction des courants i_d, i_q, et des tensions v_d, v_q. Ces équations

sont complétées par les expressions d'inductances opérationnelles L_d et L_q données par les équations 3.20 à 3.22.

Cette forme a l'avantage de mettre en oeuvre des paramètres fournis par le manufacturier, à savoir les constantes de temps transitoires et sous-transitoires, les inductances et les résistances des enroulements de la machine.

De ce schéma bloc (Fig. 3.4), on peut en déduire les matrices d'état, utilisables par la méthode de connexion de composantes. Nous profiterons des possibilités offertes par MATLAB-SIMULINK[42] pour convertir ce schéma et en déduire les matrices d'état.

3.3.2 MACHINE SYNCHRONE : PARTIE MECANIQUE

Nous considérons un modèle de machine synchrone thermique avec 6 masses: une excitatrice, une génératrice, tandis que la turbine est supposée être représentée par 4 masses localisées. Ces dernières représentent respectivement un étage haute pression, un étage intermédiaire et deux étages basse pression. Chaque masse est caractérisée par son inertie H_i, sa vitesse de rotation ω_i, son amortissement propre et mutuel D_i et D_{ij} et son coefficient de frottement K_{ij}. Le modèle de la

partie mécanique de la machine ainsi décrite est représenté à la figure 3.5.

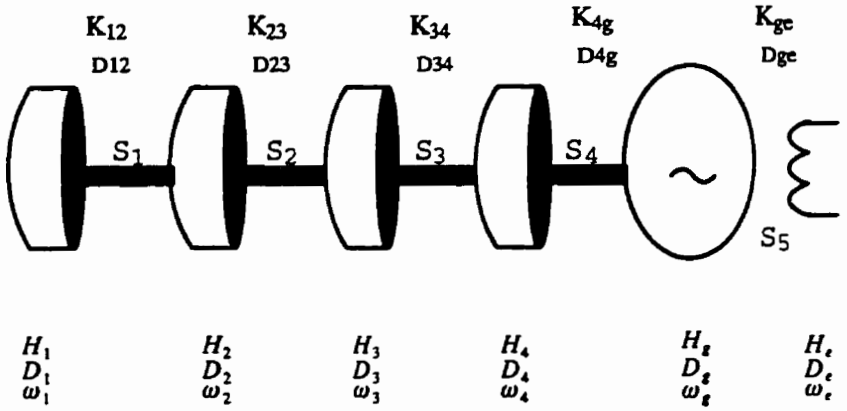


Fig 3.5: Modèle des masses mécaniques de la machine synchrone

$$(2H_j s+D_j)\Delta\omega_j = \Delta P_{mj} + (D_{ij}+K_{ij}/s)(\Delta\omega_i-\Delta\omega_j) - (D_{jk}+K_{jk}/s)(\Delta\omega_j-\Delta\omega_k) \quad (3.23)$$

Le comportement de chaque masse est décrit par l'équation dérivant de la 2ème loi de Newton. Exprimée en fonctions des masse adjacentes, l'équation mécanique de la masse j, entourée des masses i et k prend la forme de l'équation 3.23. L'ensemble de la turbine peut être décrit et représenté par le schéma bloc de la figure 3.6[2].

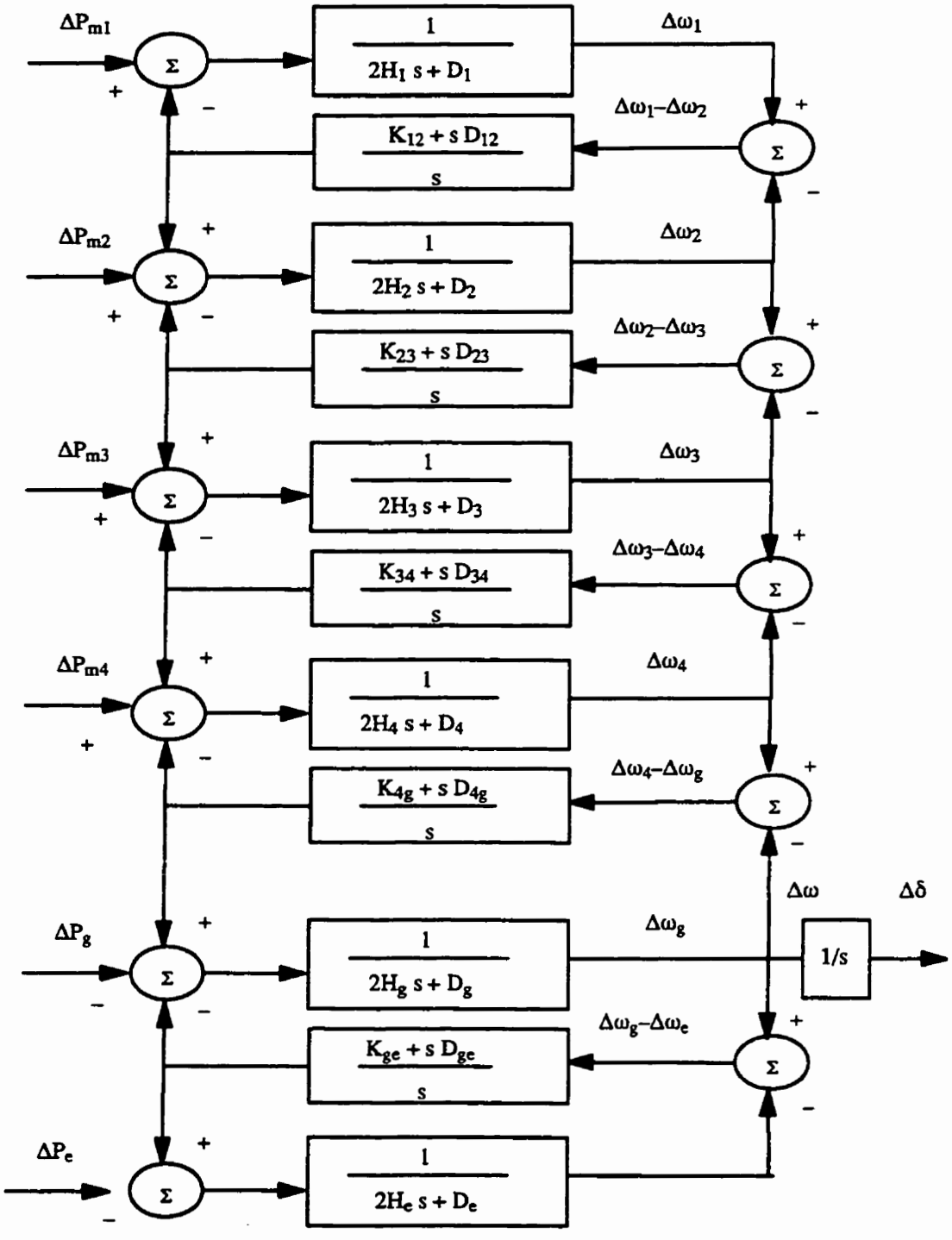


Fig. 3.6 : Modèle linéaire de la machine synchrone: Partie mécanique

Les entrées sont constituées des variations de puissance mécanique ΔP_{mj} développées au niveau de chaque étage de la turbine, et des variations de puissance électrique que developpent la génératrice et l'excitatrice ΔP_g et ΔP_e. Par la suite, nous considérerons uniquement une variation de puissance au niveau de la génératrice, ce qui nous permettra de réaliser l'interface électrique et mécanique de la machine synchrone.

Le schéma bloc correspondant à l'équation 3.23 est donné à la figure 3.6, pour un ensemble turbine alternateur décrit par la figure 3.5. De ce schéma bloc, on peut en déduire de nouveau les matrices d'état.

3.3.3 INTERFACE ELECTRIQUE - MECANIQUE

L'interface des parties électrique et mécanique se fait à partir de l'équation du couple électromagnétique développé au niveau de la génératrice. Le tableau 3.1 donne les matrices de connexion, en tenant compte des entrées et des sorties du système. La machine sera donc caractérisée par 2 entrées: les tensions d'axes d et q; et 3 sorties: Id,Iq et l'angle δ.

	L11					L12	
	I_d	I_q	Te	ω	δ	V_d	V_q
V_d	0	0	0	$-\Psi_{qo}$	0	1	0
V_q	0	0	0	Ψ_{do}	0	0	1
Pe	0	0	ω_o	0	0	0	0
I_d	1	0	0	0	0	0	0
I_q	0	1	0	0	0	0	0
δ	0	0	0	0	1	0	0
	L21					L22	

Tableau 3.1: Matrices de connection de la partie mécanique et électrique de la machine synchrone

Une autre façon d'obtenir le modèle de la machine synchrone, utilisable pour les études de résonance sous-synchrone, serait de combiner les 2 schémas blocs, pour en faire un seul à travers Simulink et en déduire les matrices d'état au complet.

3.3.4 MODELE D'ETAT D'UNE LIGNE COMPENSEE SERIE FIXE

Afin de mettre en évidence les problèmes de risque de résonance sous-synchrone, nous utiliserons une ligne compensée série fixe pour commencer (Fig.3.6). Le modèle de la ligne est un modèle en pi reliant la machine synchrone au réseau infini. On aurait pu utiliser un circuit RLC série mais, pour des raisons de connectivité des composantes, nous avons opté pour un modèle en pi

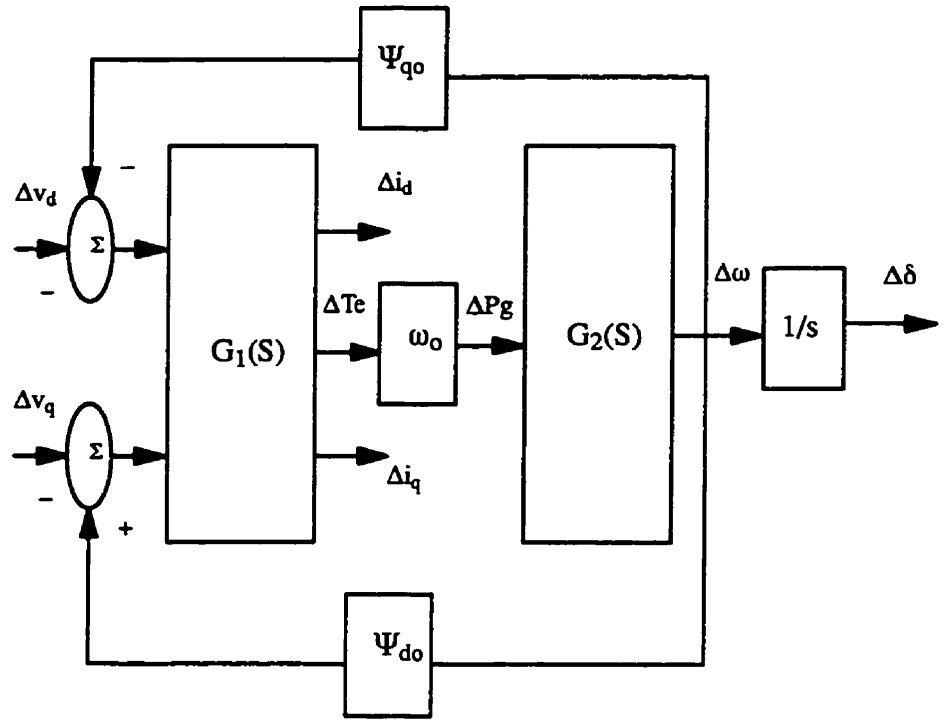


Fig. 3.7: Fonction de transfert de la machine synchrone linéarisée

avec des résistances shunt très élevées. La dynamique série de la ligne doit être sauvegardée telle quelle pour analyser l'effet du mode LC série sur les modes mécaniques.

Le modèle d'état d'un tronçon d'une ligne en pi compensée série peut être déterminé directement. En utilisant comme variables d'état le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur, on peut écrire les équations d'état de la ligne compensée série (Eq.3.24 à 3.25). Les variables d'entrée sont le courant I_a et la tension V_b; tandis que les variables de sortie sont V_a et I_b.

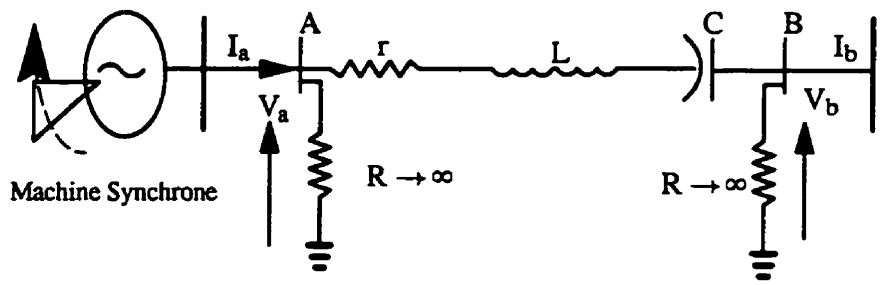


Fig 3.8: Modèle de réseau compensé série fixe

$$A = \begin{bmatrix} -(R+r)/L & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix} \quad ; \; B = \begin{bmatrix} R/L & -1/L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.24)$$

$$C = \begin{bmatrix} -R & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad ; \qquad D = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.25)$$

Les équations ci-avant doivent être transformées dans les axes dq synchrones avant d'être interfacées avec celles de la machine synchrone, lesquelles doivent être translatées de la vitesse du rotor à la vitesse synchrone.

3.3.5 INTERFACE MACHINE SYNCHRONE - RESEAU

Pour pouvoir interconnecter la machine synchrone au réseau, il faut que le courant qui rentre dans le réseau via la machine synchrone soit transformé dans le référentiel statorique. De même pour la tension du réseau à appliquer à la machine synchrone, il faut qu'elle soit transformée dans le référentiel rotorique de la machine synchrone.

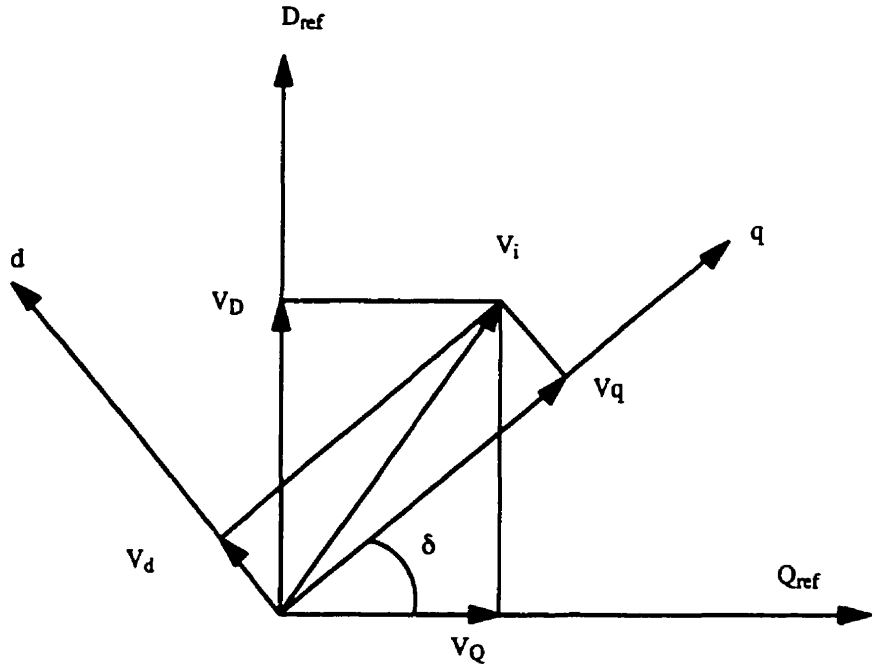


Fig. 3.9: Changement de référentiel machine & réseau

En utilisant les axes {D_{ref} Q_{ref}} pour le stator (ou le réseau) et les axes {d q} pour le rotor; on peut montrer que tout vecteur V_i peut s'exprimer dans l'un ou l'autre référentiel (Fig.3.9). On suppose ici que la séquence homopolaire n'existe pas. La transformation qui permet de passer d'un référentiel à l'autre est une transformation orthogonale, donnée par les équations 3.26 et 3.27.

$$\begin{bmatrix} Vdi \\ Vqi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VDi \\ VQi \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} VDi \\ VQi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vdi \\ Vqi \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

La linéarisation de cette transformation, appliquée aux tensions et courants permet d'avoir les relations ci-après (Eq. 28 et Eq. 3.29):

$$\begin{bmatrix} \Delta Vdi \\ \Delta Vqi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta o) & -\sin(\delta o) \\ \sin(\delta o) & \cos(\delta o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta VDi \\ \Delta VQi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sin(\delta o) & \cos(\delta o) \\ -\cos(\delta o) & \sin(\delta o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VDoi \\ VQoi \end{bmatrix} \Delta\delta \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta IDi \\ \Delta IDi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta o) & \sin(\delta o) \\ -\sin(\delta o) & \cos(\delta o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Idi \\ \Delta Iqi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sin(\delta o) & -\cos(\delta o) \\ \cos(\delta o) & \sin(\delta o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Idoi \\ Iqoi \end{bmatrix} \Delta\delta \quad (3.29)$$

Les matrices de connection de la machine synchrone et du réseau sont reproduites dans le tableau 3.2.

L11 **L12**

	I_d	$I_q^{(M)}$	δ	V_d^A	$I_d^{B\,(R)}$	V_q^A	I_q^B	V_d	V_q
V_d	0	0	TV1	AA	0	BB	0	0	0
$V_q^{(M)}$	0	0	TV2	-BB	0	AA	0	0	0
I_d^A	-AA	BB	TI1	0	0	0	0	0	0
V_d^B	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$I_q^{(R)A}$	-BB	-AA	TI2	0	0	0	0	0	0
V_q^B	0	0	0	0	0	0	0	0	1

L21 **L22**

	I_d	I_q	δ	V_d^A	I_d^B	V_q^A	I_q^B	V_d	V_q
I_d^B	0	0	0	0	1	0	0	0	0
I_q^B	0	0	0	0	0	0	1	0	0

AA = cos(δO) ; BB = sin(δO)

TV1 = -Vdo BB + Vqo AA ; TI1 = Ido BB + Iqo AA

TV2 = -Vdo AA - Vqo BB ; TI2 = -Ido AA + Iqo BB

Tableau 3.2: Matrices de connexion du réseau et de la machine synchrone.

Les tensions du côté réseau sont appliquées à la machine et cette dernière fournit les courants au réseau.

3.3.6 MODELE LINEAIRE DU RESEAU COMPENSE SERIE VARIABLE

Pour faire une étude de l'interaction de la commande du TCSC avec les modes mécaniques de la machine synchrone, il s'avère nécessaire de linéariser la

commande décrite à la figure 2.6. Le modèle linéaire du TCSC est composé de deux parties: la partie commande et la partie équipement réseau. Cette dernière comprend une inductance contrôlée en parallèle avec une capacité. La figure 3.10 donne le modèle du réseau compensée série variable, tel que nous l'avons modélisé. La présence des résistances shunt permettent de respecter les lois de connectivité. Les matrices d'état seront donc évaluées successivement pour la commande et le réseau.

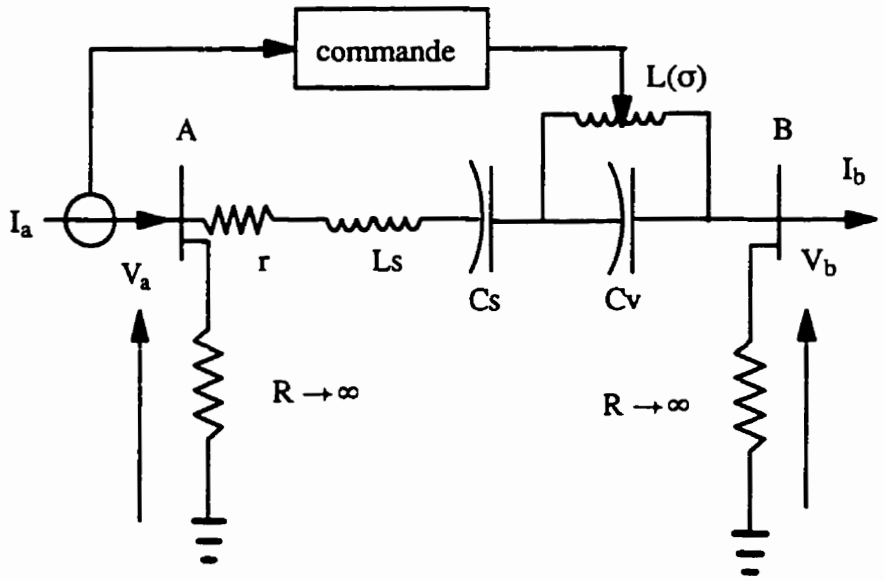


Fig 3.10: Modèle de ligne compensée série variable

Le modèle linéaire de la partie commande en boucle de régulation de courant peut être représenté par le schéma bloc de la figure 3.11. Il comprend d'abord un détecteur de la valeur efficace du courant. La linéarisation du détecteur de la valeur efficace du

signal et sa décomposition dans les axes dq reviennent simplement à multiplier Δi_d et Δi_q par des facteurs K_d et K_q, obtenus respectivement par les relations suivantes: $K_d=I_{do}/I_o$; $K_{qo}=I_{qo}/I_o$. Il est suivi du régulateur du type PI, représenté sous forme de fonction de transfert dans le plan de Laplace.

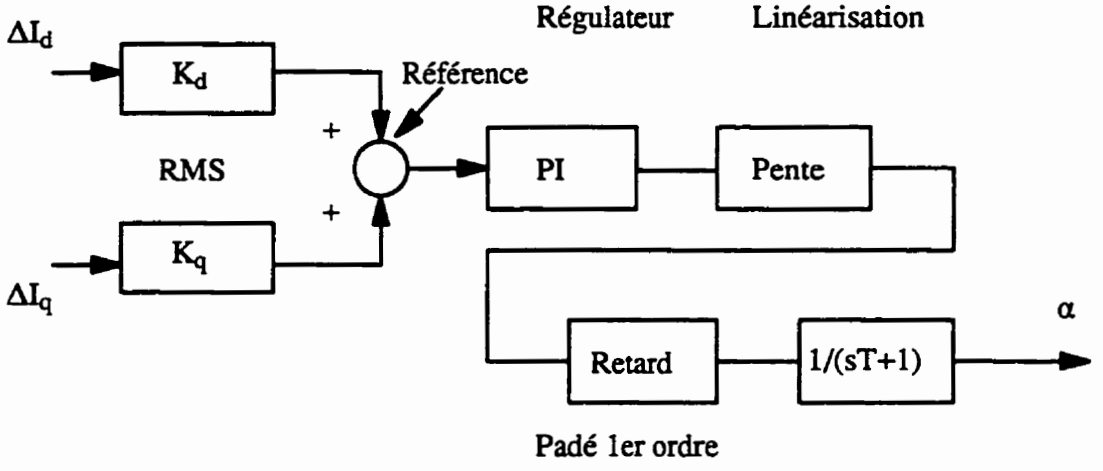


Fig. 3.11: Modèle linéarisé de la commande du TCSC

A la sortie du PI, l'impédance est transformée en un angle σ correspondant à travers un module de linéarisation. Ce module est donc représenté par une constante correspondant à la pente au point de fonctionnement. Pour le TCSC à 6 impulsions (2 thyristors en tête bêche par phase), le temps moyen d'attente pour qu'une impulsion soit envoyée est de 1/6 de cycle. La linéarisation du délai sera donc approchée par une approximation de Padé du premier ordre. Une fois l'impulsion donnée, une constante de temps

caractéristique des thyristors, approximée à plus ou moins 1/4 de cycle vient compléter le modèle linéaire de la commande.

Ce modèle de la commande a été, pour des raisons de souplesse, implanté dans MATLAB SIMULINK, sous forme de schéma bloc dans le plan de Laplace avec 2 entrées (le courant d'axe d et q) et une sortie (l'angle d'allumage).

La partie réseau du TCSC a été directement modélisée par des équations d'état dont la forme est celle des équations 3.35 et 3.36. La linéarisation de l'inductance contrôlée requiert une certaine attention. La tension aux bornes de l'inductance variable prend la forme v=d(Li)/dt.

$$\frac{d(LI)}{dt} = \frac{dL}{d\sigma}\bigg|_{\sigma_o} \frac{d\sigma}{dt} I + L\frac{dI}{dt} \qquad (3.30)$$

$$L(\sigma) = L_v \pi \sigma / (\sigma - \sin(\sigma)) \qquad (3.31)$$

$$\frac{dL}{d\sigma}\bigg|_{\sigma_o} = L(\sigma_o) \frac{1-\cos(\sigma o)}{\sigma_o - \sin(\sigma_o)} \qquad (3.32)$$

$$L_t = L_v \pi \sigma_o / (\sigma_o - \sin(\sigma_o)) \qquad (3.33)$$

$$a_t = I_{1o} \frac{1-\cos(\sigma_o)}{\sigma_o - \sin(\sigma_o)} \qquad (3.34)$$

En utilisant les équations 3.30 à 3.32, on arrive à déterminer les paramètres a_t et L_t (Eq.3.33 et Eq.3.34), de façon à obtenir les matrices d'état de la partie réseau du FACTS.

$$A=\begin{bmatrix} -(R+r)/L_s & -1/L_s & 0 & -1/L_s \\ 1/C_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_t \\ 1/C_v & 0 & -1/C_v & 0 \end{bmatrix}; \quad B=\begin{bmatrix} R/L_s & -1/L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (32)$$

$$C=\begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \qquad D=\begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (33)$$

Les matrices d'état ainsi obtenues doivent être transformées dans les axes dq pour être connectées au réseau.

A partir des matrices d'état de la machine synchrone, de la ligne de transport et du TCSC (partie commande et partie réseau), nous avons pu obtenir la forme finale des équations du système, du type Eq.3.12 à 3.15. A partir de ces matrices, nous allons, au cours du chapitre suivant, calculer les valeurs propres de la matrice F pour différentes valeurs du gain du régulateur du TCSC.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES VALEURS PROPRES

Les modèles développés ci-avant permettent d'assembler les matrices d'état suivant la forme finale que nous rappelons ici pour mémoire.

$$F = [A + B(I-DL_{11})^{-1}C]$$

$$G = [B(I-DL_{11})^{-1}DL_{12} + BL_{12}]$$

$$H = [L_{21}(I-DL_{11})^{-1}DL_{12} + L_{22}]$$

$$J = [L_{21}(I-DL_{11})^{-1}C + L_{22}]$$

Le problème qui se pose est la détermination des valeurs propres de la matrice F et d'en extraire celles qui correspondent aux modes mécaniques de la machine synchrone. En particulier, il s'agit de voir si le gain du régulateur principal du TCSC a un impact favorable ou défavorable sur la stabilité de ces modes: plus précisement comment se déplacent la partie réelle des modes mécaniques lorsque la valeur du gain augmente ou diminue.

La méthode utilisée pour calculer les valeurs propres de F à travers Matlab-Simulink est l'algorithme HQR dont le principe se trouve documenté dans plusieurs manuels et notes de cours[41]. Avant de faire l'analyse paramétrique avec le TCSC, il est toujours bon de savoir

si les modèles proposés de la machine synchrone et du réseau donnent les résultats connus.

4.1 ANALYSE DES VALEURS PROPRES SANS LE TCSC

Les paramètres de la machine synchrone ont été tirés de la référence[43]. Ces paramètres donnent lieu aux fréquences propres mécaniques de la machine qui sont données dans le tableau 4.1. Ces valeurs propres correspondent bien à celles de la référence ci-haut mentionnée.

Modes	Fréquences
mode 1	15.7 Hz
mode 2	20.2 Hz
mode 3	25.5 Hz
mode 4	32.2 Hz
mode 5	47.4 Hz

Tableau 4.1: Aperçu des modes mécaniques

Pour mettre en évidence l'interaction du réseau compensé série avec les modes mécaniques de la machine synchrone, on trace les courbes de la variation de la partie réelle des différents modes en fonction du degré de compensation. Les courbes caractéristiques de l'évolution de la partie réelle des 4 premiers modes en fonction du degré de compensation sont montrés à la figure 4.1.

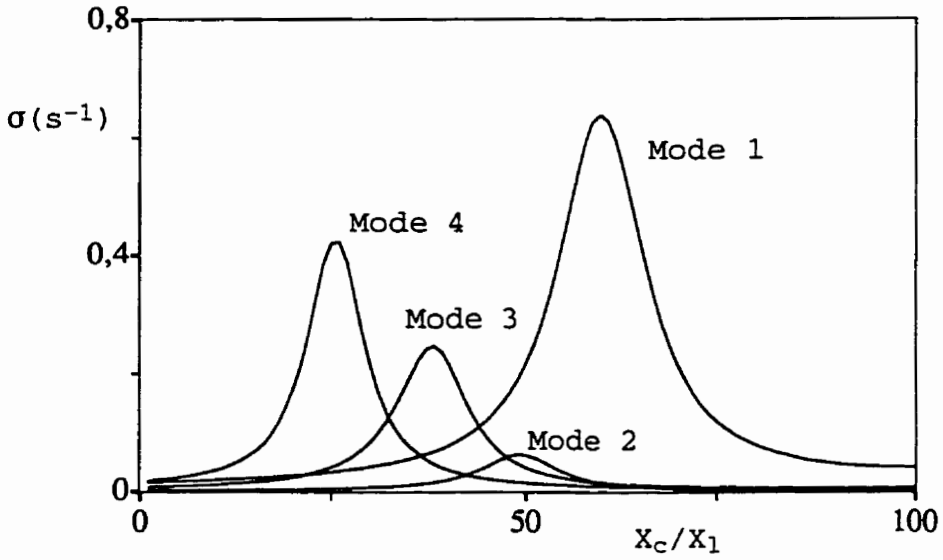


Fig.4.1: Partie réelle des modes mécaniques en fonction du % de compensation série fixe

Le mode 5 n'a pas été reproduit du fait que l'amplitude de sa partie réelle reste relativement trop faible pour apparaître sur cette courbe. Néanmoins, il présente la même forme que les autres courbes.

Ces courbes sont caractéristiques du phénomène de résonance sous-synchrone. On les retrouve dans plusieurs réferences[43][44]. Elles présentent des maximas à certaines valeurs du degré de compensation. La position du maximum de chaque courbe et son amplitude dépendent des conditions de charge du réseau. L'entrelacement des courbes montre qu'une perturbation peut exciter plusieurs modes à la fois.

A ce niveau, on peut en conclure que la méthode de connexion des composantes a été validée de même que les modèles de la machine synchrone et du réseau.

4.2 ANALYSE DES VALEURS PROPRES AVEC LE TCSC

Le TCSC étant une combinaison d'une inductance commandée avec un condensateur, l'impédance apparente aux fréquences sous-synchrones diffère du compensateur série fixe, même si la réactance équivalente à 60 Hz est la même. La réference [7] présente le TCSC comme neutre vis-à-vis des risques de résonance sous-synchrone. Afin de mettre en évidence cet aspect du TCSC, nous avons évalué, par la méthode MCC, la variation des valeurs propres des masses mécaniques en fonction de X_c/X_l (TCSC et réseau) équivalente à 60Hz comme précédemment. Les courbes obtenues sont représentées à la figure 4.2. On observe un écrasement des courbes comparativement aux courbes de la figure 4.1, avec un mode 4 complètement stabilisé. L'effet du TCSC sur les modes machines est donc un effet bénéfique. Reste maintenant à faire une étude paramétrique pour voir l'effet du gain du régulateur principal sur les divers modes.

La figure 4.2 correspond à un certain point de fonctionnement du réseau et du TCSC. Dans le paragraphe qui suit, nous allons nous pencher sur l'interaction du régulateur principal du TCSC avec les modes machines.

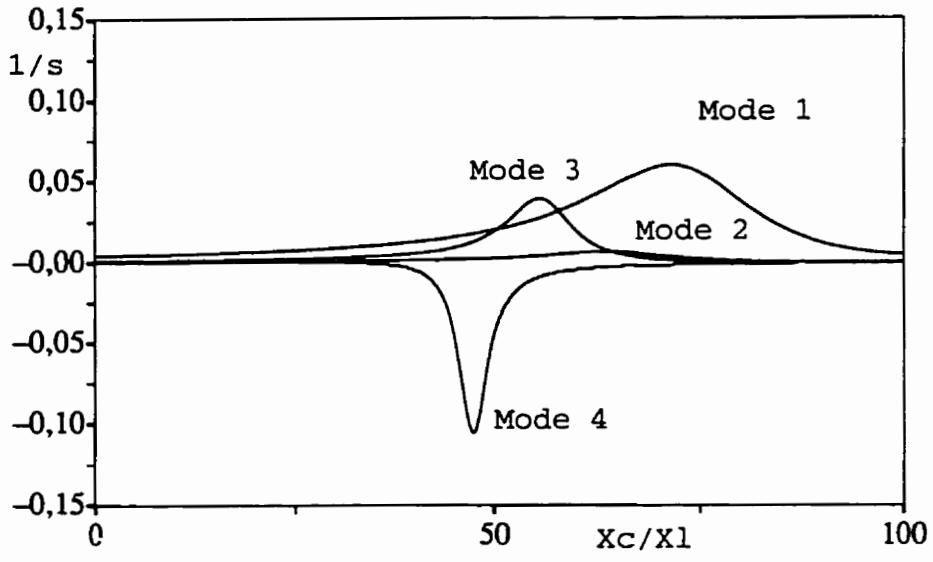


Fig.4.2: Partie réelle des modes mécaniques en fonction du % de compensation avec TCSC

4.3 EFFET DU REGULATEUR DU TCSC SUR LES MODES MECANIQUES

Pour faire l'analyse de l'interaction du régulateur principal du TCSC avec la machine synchrone, nous avons choisi le gain du PI comme paramètre (Fig.3.11). Au lieu de faire une étude paramétrique sur le niveau de compensation comme précédemment, nous utilisons le gain Kr du régulateur. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 4.3 et 4.4.

La figure 4.3 montre le déplacement de la partie réelle du mode à 15.7 Hz en fonction du gain Kr. Il apparaît clairement qu'il existe une interaction du régulateur principal avec le mode 15.7 Hz et qu'il peut en résulter des oscillations sous-synchrone pour une certaine plage du gain Kr.

Par contre, la figure 4.4 montre bien que les modes à 20.2, 25.5 et 32.2 Hz subissent l'effet positif du TCSC: à savoir la disparition du risque de résonance sous-synchrone liée à ces modes.

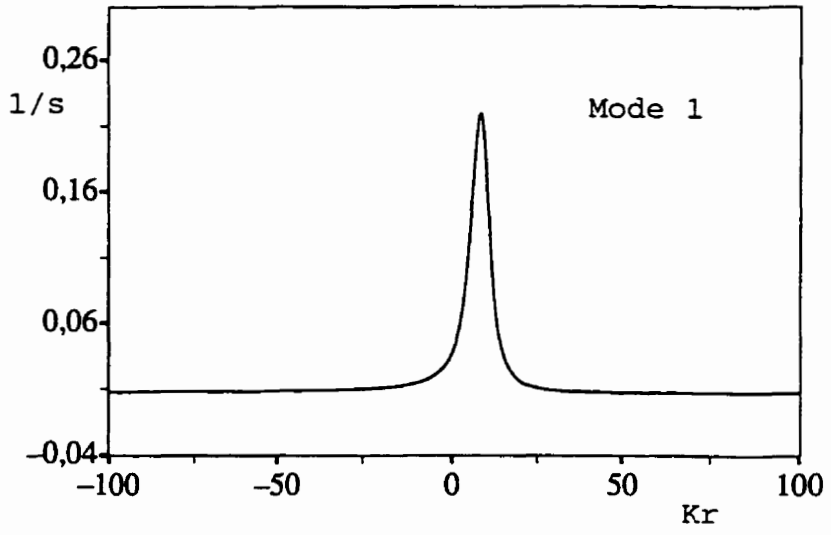


Fig.4.3: Partie réelle du mode à 15.7 Hz en fonction du gain du régulateur principal du TCSC

Cette figure met clairement en évidence l'intérêt du TCSC vis à vis des risques de résonance sous-synchrone. Il reste maintenant à valider ces résultats par des simulations temporelles avec possibilité d'extraction des modes propres qui auraient pu être excités.

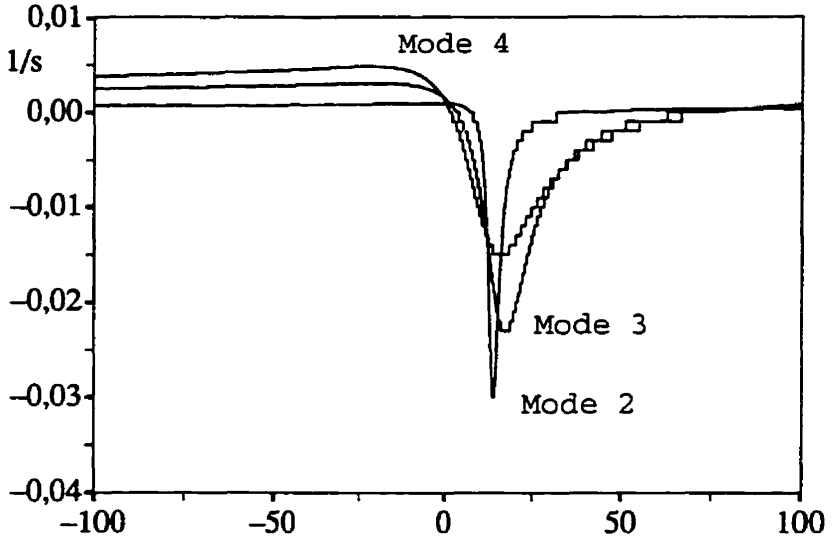


Fig.4.4: Partie réelle des modes 2, 3 et 4 en fonction du gain du régulateur principal du TCSC

4.4 VALIDATION PAR SIMULATION TEMPORELLE

Au chapitre deux, nous avons mis au point un modèle EMTP-TACS performant pour justement faire des simulations dans le temps et ce, très rapidement. La difficulté première est l'obtention d'un comportement linéaire, autour d'un point de fonctionnement initial en régime permanent, suite à une perturbation.

La simulation se fera en deux étapes, d'abord obtenir un régime permanent, ensuite provoquer une petite perturbation et en déduire le comportement "petit signal" autour du point de fonctionnement. L'évaluation de l'interaction de torsion sera basée sur le modèle "petit signal" obtenu à partir du couple de torsion aux divers endroits de l'arbre de la turbine. Nous présentons

ci-après les courbes caractéristiques obtenues en faisant varier le gain du régulateur.

Nous considérons une petite perturbation de 7A sur le courant de consigne du régulateur de courant (PI). La perturbation du courant de consigne provoque une perturbation sur l'angle d'allumage via le régulateur PI du courant, qui modifie l'impédance de ligne et par conséquent le courant de ligne.

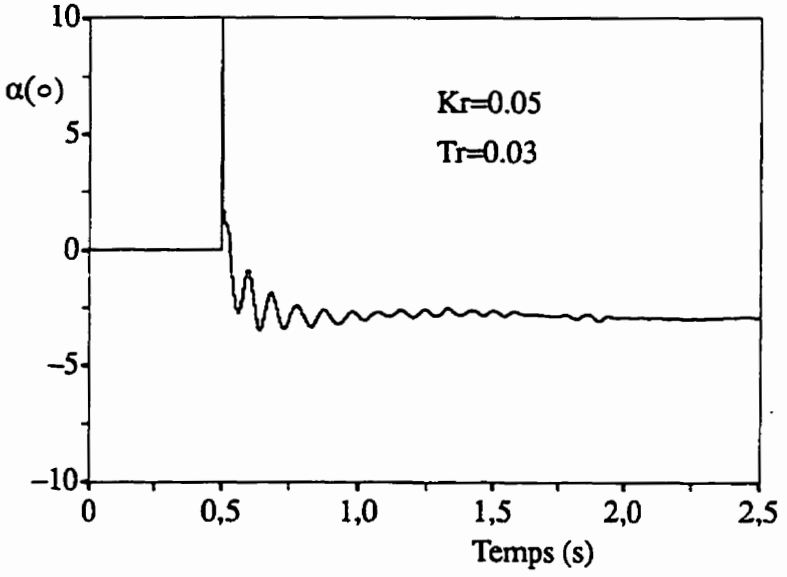


Fig.4.5: Variations de l'angle d'allumage (degré) du TCSC

La figure 4.5 montre les oscillations subséquentes de l'angle d'allumage. Le pic qui apparaît au moment de la perturbation est dû au retard dans la réponse du système. Nous avons gardé ce point pour

illustrer la difficulté d'obtenir un modèle petit signal parfaitement linéaire.

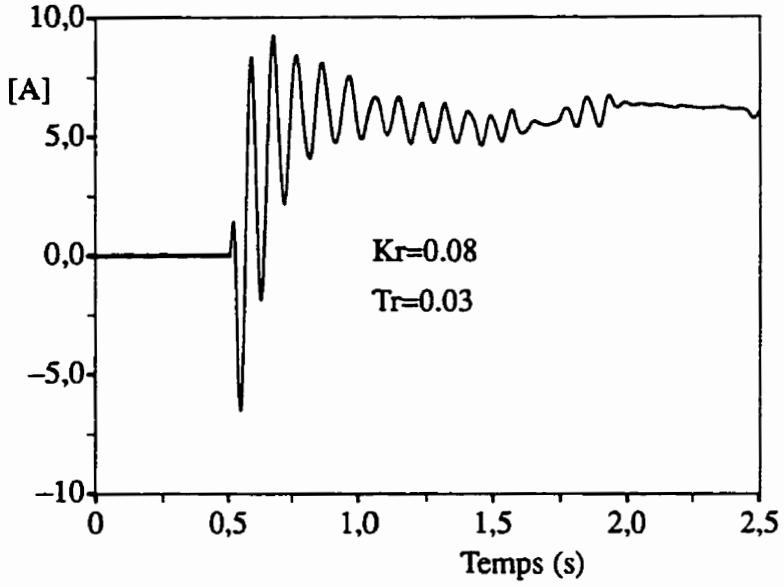


Fig.4.6 Modèle petits signaux du courant (A) du TCSC

La figure 4.6 présente les variations du courant de ligne suite à la perturbation. Nous avons choisi le gain du régulateur de manière à obtenir un signal oscillant amorti. Sur la même figure, on relève une petite perturbation parasite sur le courant vers le temps t=1.75 seconde.

Afin d'analyser l'interaction dans le domaine temporel, nous avons reproduit les courbes du couple de torsion aux points dénotés S_1 à S_5 (Figure 3.5) correspondant respectivement aux liens entre les différentes masses de la machine. Le comportement "petit signal" obtenu est reproduit aux figures 4.7 à 4.16.

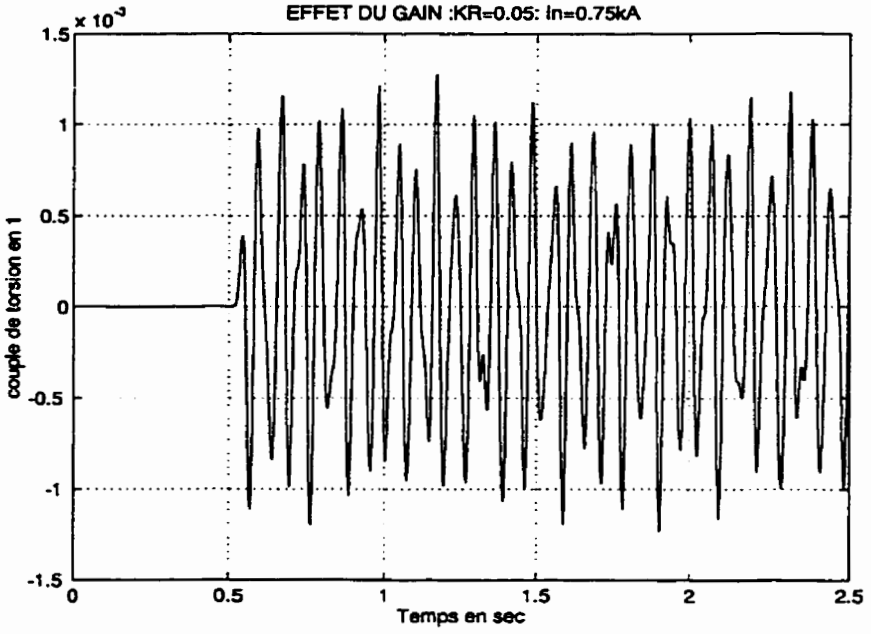


Fig. 4.7: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_1 vs Temps (s)

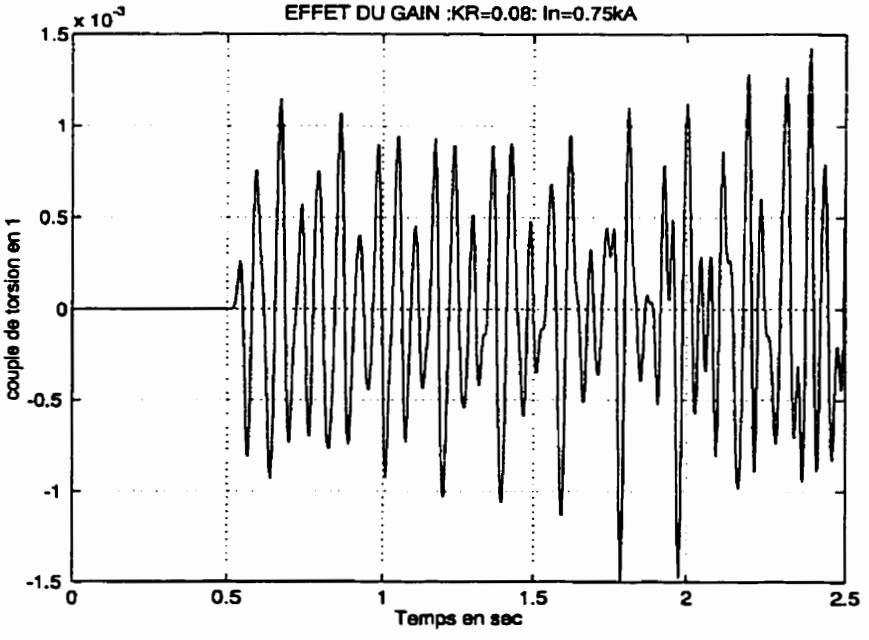


Fig. 4.8: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_1 vs Temps (s)

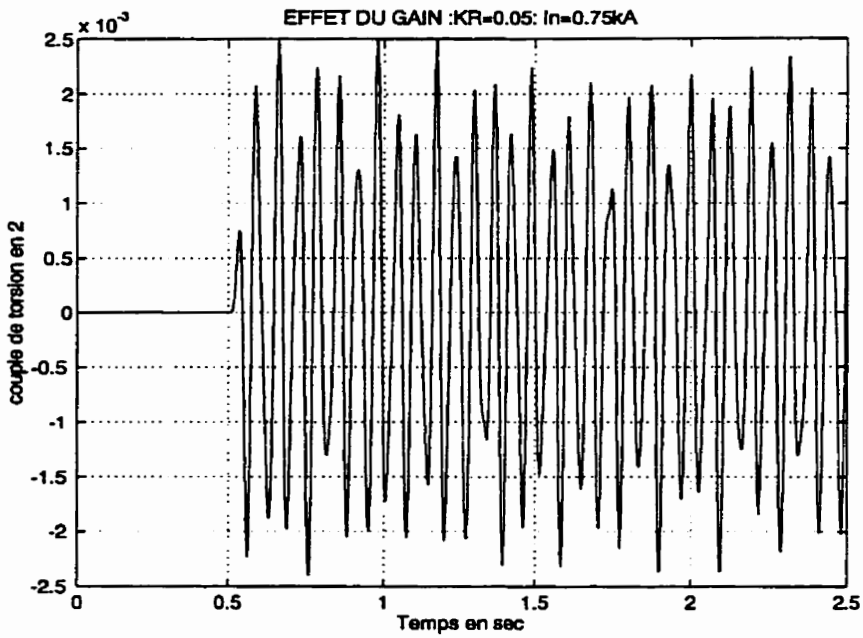


Fig. 4.9: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_2 vs Temps (s)

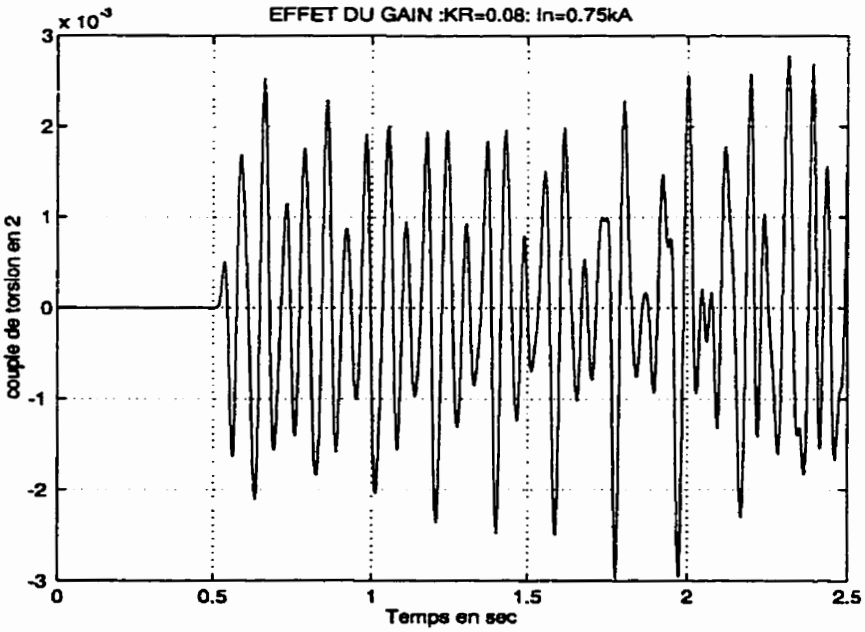


Fig. 4.10: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_2 vs Temps (s)

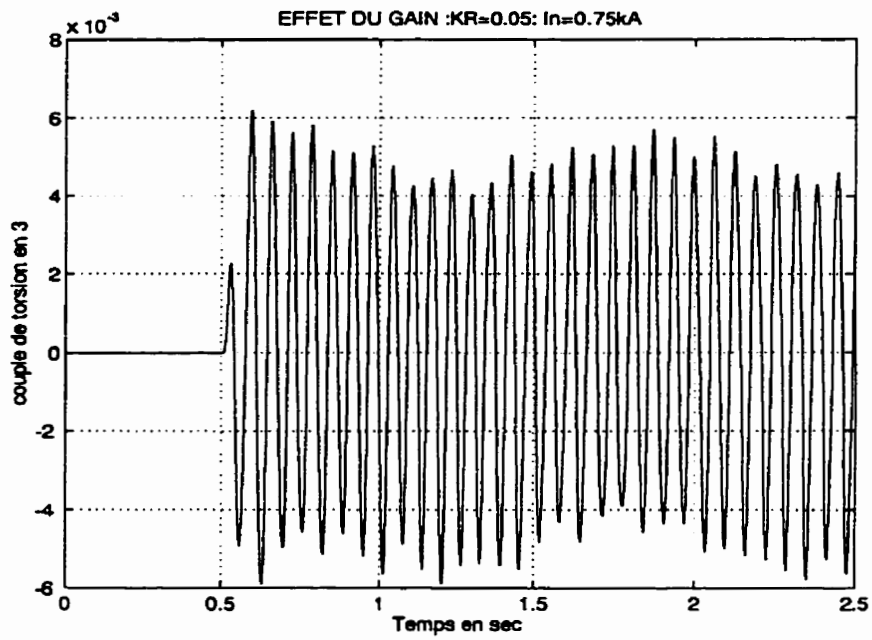


Fig. 4.11: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_3 vs Temps (s)

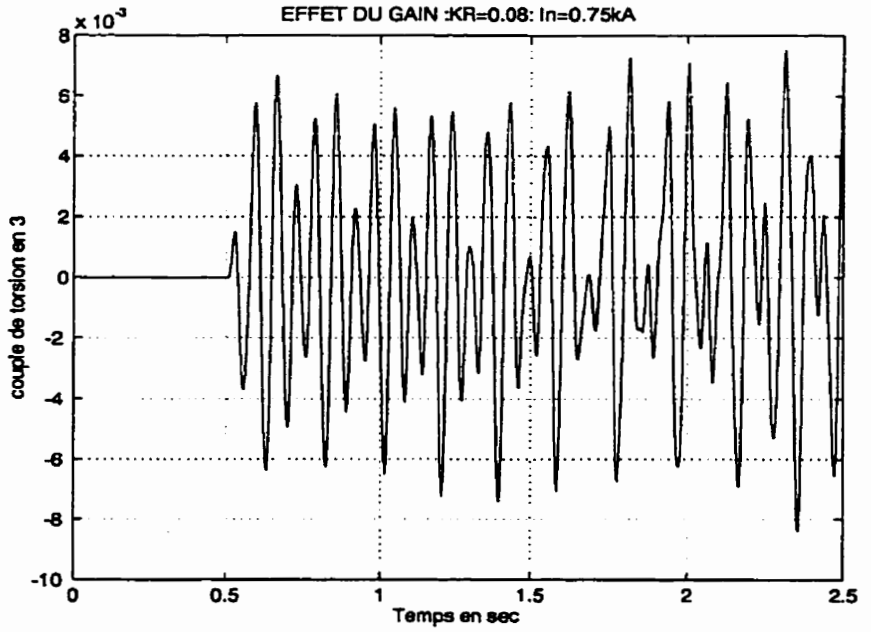


Fig. 4.12: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_3 vs Temps (s)

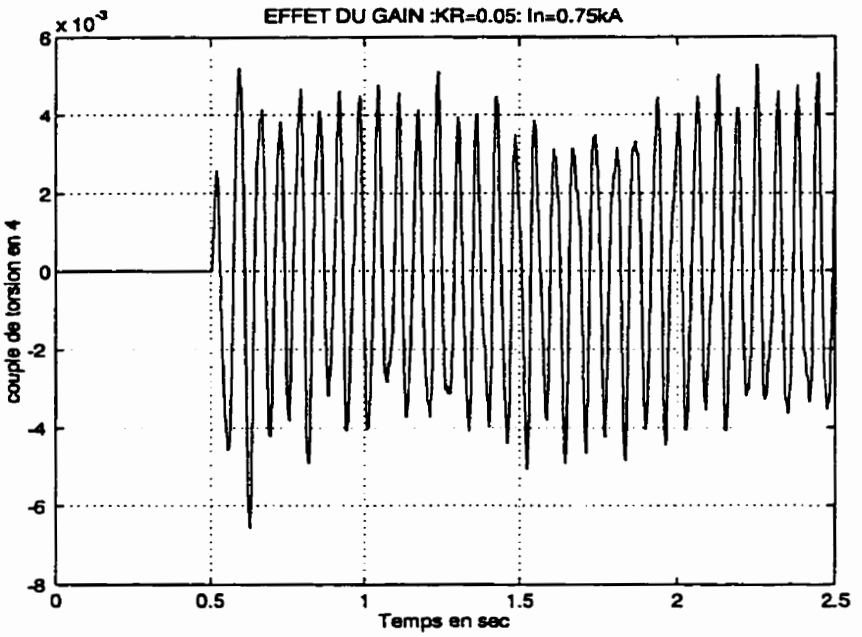


Fig. 4.13: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_4 vs Temps (s)

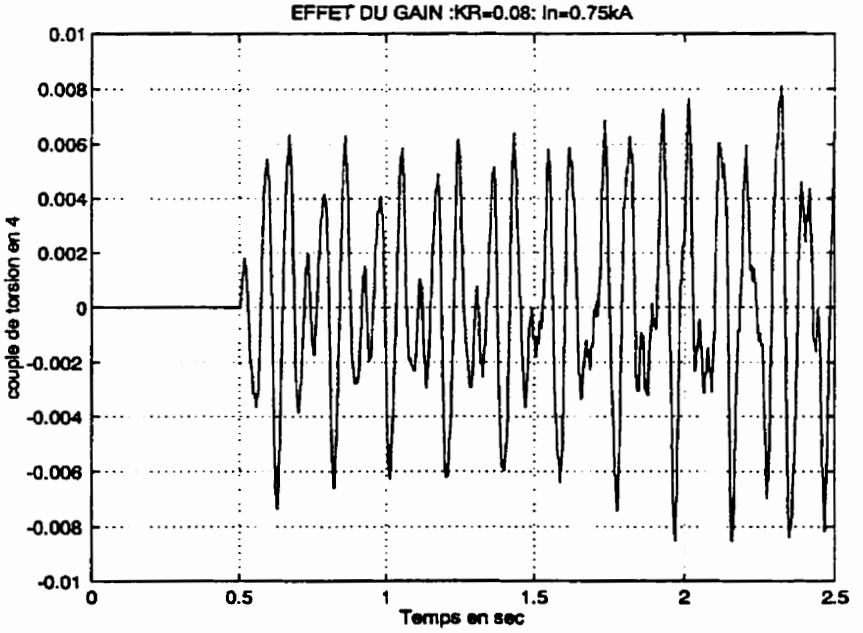


Fig. 4.14: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_4 vs Temps (s)

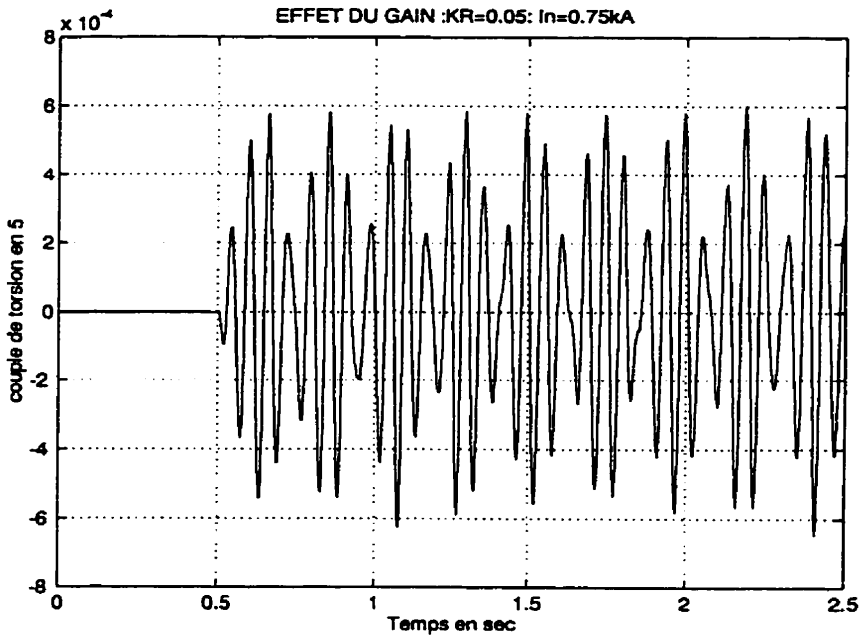


Fig. 4.15: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_5 vs Temps (s)

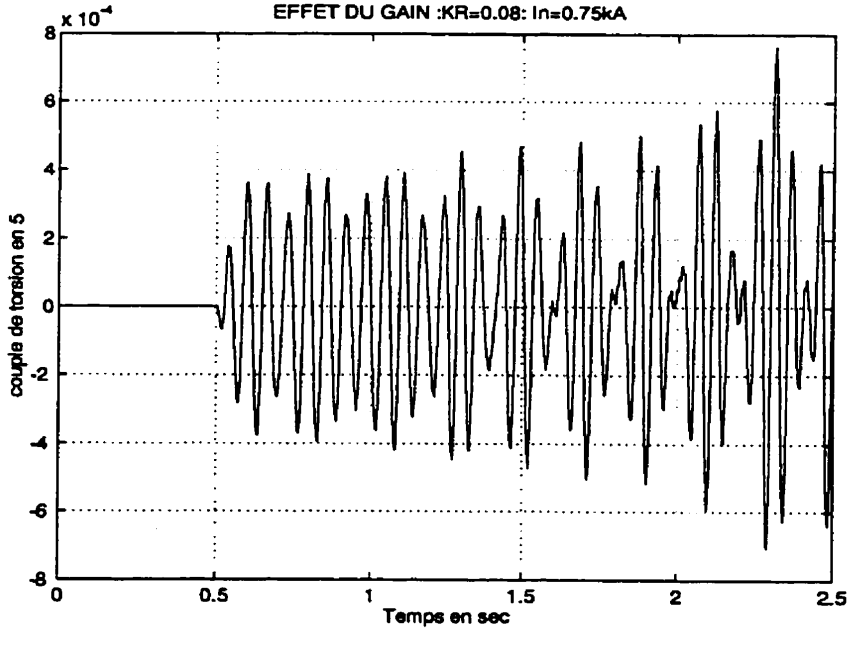


Fig. 4.16: Couple de torsion (E–6 Nm) en S_5 vs Temps (s)

La figure 4.7 montre les variations du couple de torsion au point S_1 entre les 2 premières masses. La figure 4.8 montre le même couple, mais avec un gain K_r plus élévé. Il apparaît, sur les 2 figures, que le gain a un effet qui tend à rendre le couple plus instable. Nous verrons plus loin que la partie réelle du mode à 15.7Hz s'est déteriorée conformément à la figure 4.8.

La figure 4.15 et 4.16 montrent également les variations du couple de torsion au point S_5, entre les masses 5 et 6 pour les valeurs de gain de 0.05 et 0.08 respectivement. Nous verrons, de nouveau, plus tard par extraction des modes que la partie réelle du mode à 15.7Hz s'est déteriorée conformément à la figure 4.3.

Toutes ces figures (Fig 4.7 à 4.16) montrent une nette déterioration de l'amortissement par augmentation du gain dans la plage des gains considérée. Par contre, l'inspection visuelle de ces courbes ne permet pas de dire si réellement cette déterioration est attribuable au mode à 15.7 Hz ou non. De là, la nécessité de faire une validation quantitative par une procédure d'identification des modes.

4. 5 VALIDATION PAR EXTRACTION DES MODES

Dans ce sens, nous avons essayé plusieurs méthodes d'identification, en particulier, les méthodes disponibles dans le programme MATLAB, tels AR, ARMAX

etc... Mais toutes ces méthodes ont donné lieu à des résultats très disparates, ne pouvant pas donner lieu à une interprétation concluante. La difficulté vient du fait que les modes à identifier sont relativement proches les unes des autres.

Aujourd'hui, on s'accorde sur la supériorité de la méthode de Prony par rapport aux autres méthodes pour séparer les raies d'un spectre donné. La méthode a connu un développement rapide ces dernières années sous l'impulsion d'applications en biomédical notamment.

4. 5. 1 METHODE DE PRONY [41]

Le principe peut être résumé comme suit. On suppose de prime abord que le signal d'intérêt peut être décrit comme une superposition de sinusoïdes amorties:

$$s(t)=\sum_k A_k \exp(\sigma_k t)\cos(2\Pi f_k t+\Phi_k) = \sum_i B_i \exp(\lambda_i t)$$

L'analyse modale du signal se ramène donc à déterminer les coefficients B_i et λ_i qui définissent totalement s(t). Lorsque le signal s(t) est échantillonné uniformément à la cadence T, on obtient le k-ième échantillon:

$$s(k)= \sum_i B_i \exp(\lambda_i kT)$$

Lorsqu'on dispose de N observations de la réponse, l'objectif consiste à déterminer les paramètres B_i et λ_i de manière à minimiser l'erreur quadratique entre le signal et le modèle $\bar{s}(k)$ qui est l'estimé du signal:

$$\varepsilon = 1/N \sum (s(k)-\bar{s}(k))^2$$

L'analyse de Prony a fait ses preuves autant sur des signaux issus de logiciels que sur des signaux mesurés en chantier. Cependant, la méthode possède un certain nombre d'inconvénients, notamment en présence de bruit et surtout en présence d'une combinaison de modes lents et de modes rapides.

4. 5. 2 APPLICATION DE LA METHODE DE PRONY

La méthode de Prony appliquée aux courbes 4.10 et 4.11 représentant le couple de torsion en S_3 ont donné les résultats du tableau 4.2. L'extraction des modes révèle la présence de 2 modes significatifs: le mode à 15.7Hz et le mode 25.5Hz. Les autres modes n'ont pas été excités ou présentaient des amplitudes trop faibles. Ces résultats confirment que la déterioration de l'amortissement était atribuable au mode 15.7 Hz comme la méthode MCC l'avait bien prédit. Les autres modes ayant tendance à voir leur amortissement s'améliorer.

Partie réelle des modes	KR=0.05	KR=0.08
Mode 15.7Hz	0.057	0.2
Mode 25.5Hz	0.01	−0.6

Tableau 4.2: Résultats par la méthode de Prony obtenu à partir du couple de torsion en S_3

Par contre, le tableau 4.3 met en évidence la difficulté liée à la détermination de l'amortissement en comparant les résultats de la méthode MCC et ceux obtenus par la méthode de Prony à partir du couple de torsion en S_4. Ce tableau est obtenu à partir des figures 4.13 et 4.14 comparativement aux résultats des figures 4.3 et 4.4.

Partie réelle des modes	KR=0.05		KR=0.08	
	MCC	Prony	MCC	Prony
Mode 1	0.06	0.03	0.097	0.115
Mode 3	0.006	0.02	−0.002	−0.34

Tableau 4.3: Comparaison des résultats par la méthode MCC et par l'extraction des modes par la méthode de Prony

Plusieurs interprétations de l'écart entre les résultats sont possibles. D'abord le modèle de la machine synchrone utilisé dans EMTP diffère du modèle linéaire utilisé, dans le sens où le modèle EMTP contient des amortisseurs numériques, artificiels qui affectent l'amortissement des modes électriques et mécaniques de la machine. A titre d'exemple, le changement du pas de calcul, dans EMTP, modifie les résultats obtenus par la méthode de Prony.

Le modèle du TCSC obtenu par la méthode MCC a utilisé des approximations de type linéaire sur des fonctions fortement non linéaires; en particulier, la partie régulateur est numérique et introduit un retard, les modules de synchronisation et d'allumage introduisent également des retards dont l'approximation par des fonctions du premier ordre, de type Padé engendre des écarts dans les matrices d'état.

Malgré l'écart entre les résultats obtenus par identification et ceux obtenus par la méthode MCC, nous pouvons affirmer que le régulateur principal du Compensateur série avancé interagit avec les modes mécaniques de la machine synchrone à proximité. Cet interaction apparait très bien avec les simulations EMTP. Cet interaction donne lieu à des oscillations sous-synchrones de type résonance. La procédure

d'identification vient confirmer la tendance prévue par la méthode MCC.

4.6 CONCLUSION

Le problème de l'interaction de torsion de la commande du Compensateur série avancé avec le réseau, en particulier l'interaction avec les modes mécaniques des machines synchrones à proximité, était ignoré jusqu'à date.

Le modèle petit signal développé à l'aide de la méthode de connexion des composantes (MCC) a permis de mettre en évidence les phénomènes de risques de résonance sous-synchrone, associés aux réseaux compensés série en général et série avancé en particulier.

Dans un premier temps, nous avons montré que la méthode donne de bons résultats avec la compensation série fixe. Dans un deuxième temps, nous avons montré que la compensation série avancée permettait de réduire les risques de résonance sous-synchrone si on ne tient pas compte de l'interaction du régulateur principal du TCSC.

En analysant plus en profondeur l'interaction du régulateur du TCSC avec la machine synchrone, on a pu mettre en évidence que des risques de résonance sous-synchrone subsistent. Cette interaction a été validée à l'aide de simulations temporelles grâce au modèle EMTP-TACS du TCSC développé dans le chapitre 2.

Ces simulations nous ont permis d'extraire le modèle petit signal à partir de modèles non linéaires du TCSC et de la machine synchrone. Les courbes obtenues confirment qu'il y a effectivement interaction entre le régulateur et les modes mécaniques. En particulier, certaines fréquences peuvent voir leur amortissement se détériorer dans une certaine plage du gain du régulateur, alors que d'autres sont mieux amorties.

Nous avons enfin, grâce à la méthode d'extraction de Prony, confirmé l'interaction, même si les résultats obtenus n'ont pas accusé une concordance parfaite. La différence pouvant résulter de plusieurs facteurs liés aux différences dans les modèles et surtout, la très forte non linéarité des modèles EMTP-TACS.

CONCLUSION GENERALE

L'industrie de l'électricité évolue très rapidement avec de nouveaux défis à relever. Les FACTS, dont le TCSC est un exemple, ont pour but l'amélioration des performances du réseau et la qualité du service. L'étude sur le compensateur série avancé, présentée dans ce travail, est constituée de deux parties, à savoir:

- **la modélisation du TCSC dans EMTP-TACS;**

- **la résonance sous-synchrone et le TCSC**

1. Modélisation du TCSC dans EMTP-TACS

Les concepteurs et exploitants ont besoin de modèles pour étudier et prévoir le comportement du réseau, avant et pendant leur fonctionnement, en régime perturbé ou en régime permanent. La modélisation des équipements à forte intégration d'électronique de puissance et à commande numérique est un problème qui se pose de plus en plus avec beaucoup d'acuité.

EMTP-TACS, est un des outils les plus populaires dans l'étude des phénomènes électromagnétiques sur le réseau. Par contre, il présente des limitations en termes de temps de calcul en présence justement des nouveaux produits comme le TCSC à commande numérique. Les temps de calculs deviennent prohibitifs.

Pour remédier à cette situation, nous avons eu recours à un interface usager en Fortran, qui permet à chaque utilisateur de modéliser sa propre version de la commande, tout en gardant la flexibilité de EMTP-TACS. A cet égard, nous pensons avoir apporté les contributions suivantes:

En premier lieu, un code EMTP-TACS standard a été bâti à partir des schémas disponibles dans la littérature et utilisé pour fins de vérification de la fonctionalité du modèle

En deuxième lieu, nous avons démontré la faisabilité de modélisation des éléments non linéaires, en particulier des commandes numériques, via un interface usager en fortran.

En troisième lieu, la mise au point d'un module fortran pour la commande du TCSC est, à notre humble avis, une première. Ce module pourra être utilisé comme "benchmark". Une accélération du temps de calcul de plus de dix fois obtenue avec ce module, permet d'envisager des études pratiques sur un réseau réel. Ce qui constitue une contribution pratique pour l'industrie.

2. Résonance sous-synchrone et le TCSC

L'intégration de la compensation série dans les réseaux est devenue une pratique courante et qui a fait

ses preuves dans le sens d'améliorer la fiabilité du réseau. Par contre, depuis les pannes des années 70, on ne peut plus envisager la compensation série sans penser aux problèmes de résonance sous-synchrone.

A cet effet, nous avons développé un modèle "petits signaux" du compensateur série avancé permettant de montrer que les risques de résonance sous-synchrone sont réduits par le TCSC. L'application de la méthode de connexion des composantes à l'ensemble TCSC, machine synchrone et réseau est une première en soi dans la gamme de fréquence considérée.

La contribution théorique de ce travail réside dans l'étude de l'interaction du régulateur principal du TCSC avec les modes mécaniques de la machine synchrone. Cette interaction a été validée à l'aide de simulations temporelles grâce au modèle EMTP-TACS développé précédemment.

Enfin, la méthode d'extraction de Prony est venu confirmer cette interaction, même si les résultats obtenus n'ont pas accusé la concordance souhaitée.

Activité de recherche complémentaire envisageable

Sur le plan des modèles, nous pensons que beaucoup de recherches peuvent être initiées dans le domaine des FACTS et du TCSC en particulier, pour

approfondir les phénomènes d'interaction entre le réseau et les contrôles de ces FACTS. En particulier, on peut penser à l'interaction des contrôles du TCSC avec les modes réseau, tout comme on peut analyser l'effet combiné des contrôles d'un compensateur statique et d'un TCSC sur les modes réseaux et les modes mécaniques.

Dans l'industrie du transport en courant continu (CCHT), il y a une forte intégration d'électronique de puissance avec commande numérique. Nous pensons que les résultats obtenus en termes de temps de simulation sur le module du TCSC permettent d'envisager d'étendre le principe aux HVDC et à plusieurs équipements FACTS.

BIBLIOGRAPHIE

[1] KIMBARK E. W., "Improvement of system stability by switched series capacitors". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, no 2, pp. 180-190, February 1966.

[2] ANDERSON P.M, AGRAWAL B.K. AND VAN NESS J.E., "Subsynchronous resonance in Power Systems", IEEE Press, New York 1990.

[3] CHRISTL N. et Al., "Advanced Series Compensation (ASC) With Thyristor Controlled Impedance", CIGRÉ, Paper 14/37/38-05, 1992.

[4] IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE WORKING GROUP, ''Terms, Definitions, and Symbols for Subsynchronous Oscillations'' IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-104, No.6 pp. 1326-1334, June 1985.

[5] URBANEK J., and Al " Thyristor controlled series compensation prototype installation at the Slatt 500 kv substation " IEEE paper, 92SM 467-1 PWRD.

[6] ANGQUIST L., LUNDIN B., SAMUELSSON J., "Power oscillation damping using controlled reactive power compensation- A comparison between series and shunt approaches" IEEE paper, 92SM 539-7 PWRD.

[7] HEDIN R.A., WEISS S., MAH D., COPE L. "Thyristor controlled series compensation to avoid SSR" EPRI FACTS 3 Conference, Baltimore, October, 1995.

[7] HEDIN R.A., WEISS S., MAH D., COPE L. "Thyristor controlled series compensation to avoid SSR" EPRI FACTS 3 Conference, Baltimore, October, 1995.

[8] AGRAWAL B. L., HEDIN R. A. , JOHNSON R. K., MONTAYA A. H., VOSSLER B. A., "Advanced Series Compensation (ASC) Steady-State, Transient Stability And Subsynchronous Resonance Studies", EPRI FACTS 2 Conference, Boston, May 1992).

[9] GAMA C. A. et Al., "Application prospective de la compensation série avancée pour améliorer les performances des réseaux", CIGRÉ, Paper 14/204, 1994.

[10] LARSEN E. et Al., "Avantages de condensateurs série à réglage par thyristors", CIGRÉ, Paper no 14/37/38-04, 1992.

[11] HINGORANI, N. C. "Power Electronic Equipment: HVDC and FACTS". CIGRE Conference, August-September 1994.

[12] HINGORANI, N. C. "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems". Proceedings of the IEEE, vol 76 no 4 April 1988.

[13] GYUGYI, L. "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems". IEE Proceedings-C vol 139, no 4 July 1992.

[14]GYUGYI L. "Solid-state control of AC power transmission". EPRI FACTS 1 Conference, Cincinnati, November, 1990.

[15]LE DU, A. "Pour un réseau électrique plus performant: Le projet FACTS". RGE no 6/92 Juin 1992.

[16]LE DU A., TONTINI, G. WINFIELD, M. " Which FACTS for which need ? : Identification of the technology developments to meet the needs of Electricite de France (EDF), Ente Nazionale per l'Energia Electrica (ENEL) and National Grid Company (NGC)". CIGRE August - September 1992.

[17]MEHTA H., CEASE T. W., GYUGYI L., SCHAUDER C. D. "Static condenser for flexible AC transmission systems". EPRI FACTS 2 Conference, Boston 18-22 May 1992.

[18]POWER TECHNOLOGY INC. " Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Scoping Study, Vol. 1, Part 1: Analytical Studies". EPRI Report EL-6943, August 1991.

[19]GE. "Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Scoping Study, Vol. 2, Part 1: Analytical Studies". EPRI Report EL-6943, September 1991.

[20]GYUGYI L. "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits". IEEE Transactions On Industry Applications, Vol.IA-15, No 5, Sept/October 1979.

[21]KIMBARK E. W. "How to improve system stability without risking subsynchronous resonance". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, pp. 1608-1619, no 5 Sept/Oct. 1977.

[22]D'ANGELO H. "Linear time varying systems: Analysis and Synthesis". Allyn and Bacon, Boston, c 1970.

[23]KARADY G. G., ORTMEYER T.H., PILVELAIT B. R., MARATUKULAM D. "Continuously Regulated Series Capacitor". IEEE Transactions on Power Systems, 92 SM 492-9 PWRD.

[24]BOWER C. E. J., BAKER D.H., GRANDE-MORAN C. "FACTS and SSR-Focus on TCSC Application and Mitigation of SSR Problems". EPRI FACTS 2 Conference, Boston 18-22 May 1992.

[25]JALALI S. G. , LASSETER R.H. "Harmonic Instabilities in advanced series compensators". EPRI FACTS 2 Conference, Boston, May 1992.

[26]URBANEK J. et Al "Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation At The Slatt 500kv Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1460-1469, July 1993.

[27]NDAYIZAMBA J. et Al "Efficient and Flexible Thyristor Controlled Series Capacitor simulation in EMTP - TACS", PSCC 12 Conference, Dresden, vol 2 pp. 1122-1127, August, 1996.

[30]PASERBA J. J. et Al "A Thyristor Controlled Series Compensation Model For Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 10, no 3 pp. 1471-1478. July 1995.

[31]NDAYIZAMBA J. et Al "Torsional Interaction in Flexible AC Transmission Systems with a thyristor Controlled series Capacitor" ELECTRIMACS Conference, Nantes, vol 3, pp. 1187-1192, September 1996.

[32]LEFEBVRE S., RANGEL R. D. "Modeling of Power Electronics Devices in EMTP-TACS" International Conference on Power System Transients, Lisbon, Portugal, Sept 1995.

[33]CIGRE TASK FORCE 38.01.06 "Load Flow control in high voltage power systems using FACTS controllers" CIGRE, January 1996.

[34]LEFEBVRE S., GERIN-LAJOIE L., BEAULIEU G. "Description and typical EMTP applications of static compensator models" IMACS TC'1, vol 1, pp. 213-219, Montréal, July 1993.

[35]EDRIS A. A. "Series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5 no 1, pp. 219-226, February 1990.

[36]SERAFI E. S., SHALTOUT A. M. "Damping of SSR Oscillations by excitation Control" IEEE PES, Summer Meeting, Vancouver 1979.

[35]EDRIS A. A. "Series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5 no 1, pp. 219-226, February 1990.

[36]SERAFI E. S., SHALTOUT A. M. "Damping of SSR Oscillations by excitation Control" IEEE PES, Summer Meeting, Vancouver 1979.

[37]YAN A. et Al "Excitation Control of torsional Oscillations" IEEE PES, Summer Meeting, Vancouver 1979.

[38]HINGORANI N. G. et Al "Prototype NGH Subsynchronous Resonance Damping Scheme Part I- Field Installation and Operating Experience" IEEE PES, Winter Meeting, New Orleans 1987.

[39]HINGORANI N. G. "A new Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque Part I" IEEE PES, Summer Meeting, Minneapolis 1980.

[40]SAECKS R., DE CARLO R. "Interconnected Dynamics Engineering" Marcel Decker, 1981.

[41]KAMWA I. "Notes pour un Cours d'analyse modale des réseaux de transport " Hydro Québec, Rapport Interne IREQ-93-292, Novembre 1993.

[42]THE MATH WORKS INC. "MATLAB SIMULINK: user's guide" , August 1992.

[43] IEEE COMMITTEE REPORT "First Benchmark model for Computer Simulation of subsynchronous resonance", IEEE Transactions on PAS, vol 96, pp.1565-1572, 1977.

[44] WANG L., HSU Y. Y. "Damping of subsynchronous resonance using excitation controllers and static var compensator: A comparative study", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol 3, no 1, March, 1988.

[45] EMTP DEVELOPMENT COORDINATION GROUP (DCG) "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Revised Rule Book", Version 2.0, June 1989.

[46] GINGRAS J. P., LAURIN D., POTVIN J. "Une fiabilité acrue chez Hydro-Québec", CIGRE Symposium, Montréal, CIGRE 3B-07 539-91

[47] VALETTE A. et al. "Programme de stabilité: ST 600", Manuel d'usager, IREQ, Janvier 1987

[48] PARK R. H. "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines-Generalized Method of Analysis: Part I", AIEE Transactions, Vol. 48, July 1929, pp. 716-727.

[49] P. C. KRAUSE et Al. "Analysis of Electric Machinery", IEEE Press, 1995

[50] BUI L. X. , CASORIA S., MORIN G., REEVE J. "EMTP TACS Fortran Interface Development for Digital Controls Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 7, No 1, pp. 314-319, February 1992.

ANNEXE 1

Power Systems Computation Conference, Dresden, 19–23 August 1996

EFFICIENT AND FLEXIBLE THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR SIMULATION IN EMTP – TACS

Jérôme NDAYIZAMBA*, Serge LEFEBVRE, Xuan Dai DO***
***Ecole Polytechnique de Montréal** ****Hydro–Québec(IREQ)**
Montreal, Qc, Canada **Varennes, Qc, Canada**

KEY WORDS

Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Electromagnetic Transients Program (EMTP), Transient Analysis of Control Systems (TACS)

ABSTRACT

This paper describes an innovative implementation of Thyristor Controlled Series Capacitors (TCSC) models in the EMTP. The TCSC model has been built solely from published information in the technical literature and results have been duplicated. The model can thus be used with confidence as benchmark for validation of less detailed models suitable for planning applications.

1. INTRODUCTION

Fixed series compensation is an established economical technique for increasing the power transfer capability of transmission systems. Series capacitor compensation decreases the effective reactance of the compensated line which means a change in power flow pattern among parallel transmission corridors. Controlled series capacitor (CSC) compensation adds to this possibility the ability to schedule power flows along desired lines and to modulate the effective impedance in response to power system dynamics.

Two forms of CSC have emerged. The thyristor controlled series capacitor (TCSC) [51] [52] has vernier control capability (continuous control) while the thyristor switched series capacitor (TSSC) [53] provides discrete levels of series compensation only. This paper uses TCSC equipment for demonstrating the EMTP modeling approach.

Engineers need analysis tools in order to investigate CSC and evaluate the potential benefits of controlled devices in their power system: transient stability, small signal stability, power flow and short–circuit models for CSC devices are needed. The problem of validating these models is acute. An EMTP model is certainly very useful in coming up with validated simplified model for transient stability programs. An EMTP model is also a requirement for the investigations of subsynchronous resonance problems normally feared when dealing with fixed series compensation.

The paper starts with describing the TCSC equipment and its controls, then model implementation is discussed. Difficulties to model digital controls such as those found in TCSC are presented and it is shown how to reduce the TCSC computation time used by the EMTP –TACS simulation.

2. OVERVIEW OF TCSC EQUIPMENT

A TCSC module consists of a series capacitor in parallel with a thyristor switch and reactor. The net series compensation seen by the transmission line is the parallel combination of the thyristor controlled reactor (TCR) and fixed capacitor. A TCSC system can be made up of one or several such modules in series. The TCSC may also be connected to some fixed or conventional series capacitors as part of the overall compensation scheme. Figure 1 shows a general schematic diagram of one TCSC module. Metal oxide varistors (MOV) protect the capacitors.

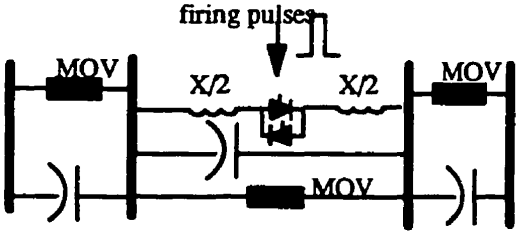


Fig. 1 Single–line diagram of TCSC

Changing the thyristor firing angle (conduction time) changes the fundamental frequency reactance. With the thyristors blocked (zero thyristor conduction time), the TCSC appears as a conventional series capacitor. With the thyristors continuously conducting, the TCSC appears as a small inductance. In principle, the TCSC can operate over a wide range of capacitive and inductive impedances. However the transition from inductive to capacitive is not normally permitted by fast control, due to the L–C oscillations during the transition. Control limits would prevent even temporary operation into the area of resonance.

For a single TCSC module there is a gap in the control range between capacitive and inductive operation, as illustrated in figure 2 [4][5]. In this figure, capacitive and inductive limits are illustrated.

Overall capacitive reactance limits: At low line current, the maximum capacitive reactance is limited to a fixed maximum value due to firing angle limitation. At higher line current, the maximum capacitor voltage rating dominates and the maximum reactance limit is inversely proportional to the line current.

Overall inductive reactance limits: At low line current, the maximum inductive reactance is restrained to a maximum (fixed) value due to firing angle limitation. At higher line current, the harmonic current heating effect dominates and the maximum reactance limit is inversely proportional to the line current.

With multiple modules it is possible to fill in the gaps in the control range between capacitive and inductive operation. The smoothness of the

control range increases with increasing number of modules (combinations of modules of different sizes).

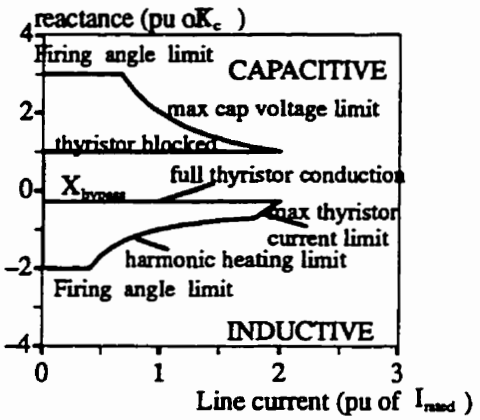


Fig. 2 Typical reactance capability curve of a single TCSC module

3. OVERVIEW OF TCSC CONTROL

The TCSC valves conduct on alternate half–cycles of the supply frequency depending on their firing angle α or conduction angle σ, where $\sigma = 2(\pi - \alpha)$. Then, the control objective is to generate firing pulses controlling α, thus the device impedance. A simplified block–diagram of a typical control system is shown in figure 3 [56]. Below is a brief description of the main elements of figure 3.

Regulator

The regulator module contains basic transfer functions, for example a filter F_i and a PID closed loop regulator.

The control modes include:

Impedance Control mode (ZC): based upon a reference impedance, the TCSC regulates the angle α through its set value α_{ord}, within limits, to maintain a constant impedance. Typically, this is an open loop function.

Current Control mode (CC): based upon a reference current, the TCSC impedance is varied, within limits, to control a constant current on the transmission line. The CC mode is used with regulators feedback, typically PID regulators. Constant power control is also feasible.

Inductive mode (I): full conduction of the thyristors resulting in an inductive impedance of the TCSC.

Capacitive mode (C): blocked thyristors.

The angle α can be controlled to obtain the basic TCSC control modes. Full conduction with $\sigma = 180°$ is obtained with $\alpha = 90°$. Partial conduction is achieved with $90° < \alpha < 180°$. Firing angles between 0° and 90° are not permitted as they produce asymmetrical currents with dc components.

Distribution and linearization

The output from the regulator block is a reactance order Z_{ord} which is the input to the distribution unit D. It determines the actual reactance output taking into account the number of modules and different output limits. A linearization function L may be used to supply the firing angle order as a function of the desired reactance. This permits

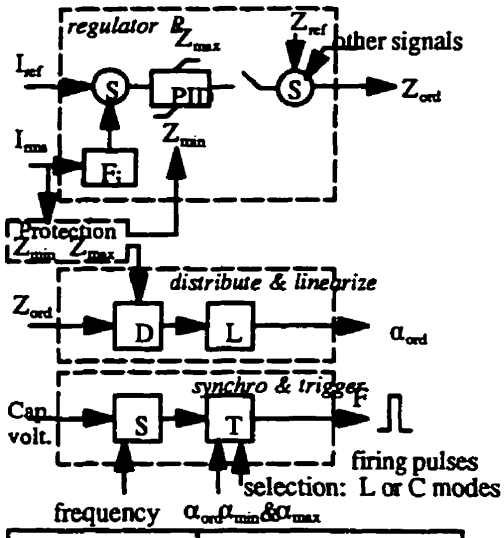


Fig.3: Typical block–diagram of a TCSC current regulator

quasi–linear response of a TCSC impedance to control the voltage.

Synchronizing and triggering

Synchronized trigger signals may be generated independently for each phase, and the synchronization signal may be the capacitor voltage in each phase. Typically, synchronization S uses a phase–locked loop (PLL) oscillator but timing references may use filters to prevent transient and distorted ac system conditions from influencing TCSC operation.

The trigger module T provide pulses for triggering the thyristors in both current directions by comparing the PLL output with α_{ord}, constrained between minimum and maximum limits. The firing angle α is the electrical angle between the zero crossing of the synchronizing signal and the instant when the triggering pulse is generated.

Control limits and protection

Firing angle limits: To avoid operating close to resonance, the control system imposes firing angle limits, both in capacitive and inductive operating regions. Hence the full range $90° < \alpha < 180°$ is not available. Alternatively, the limitation on the firing angle can be expressed as a reactance limit.

Capacitive region, Capacitor voltage limits: The primary protection for the capacitor is the parallel MOV devices. The capacitor voltage is a preferred overload indicator over the TCSC capacitor current because the capacitor current is not sinusoidal and can be larger than the line current depending on the TCR firing angle. There is a time–dependent limit on the maximum operating voltage across the series capacitor. The MOV rating may also impose more severe limitations on capacitor voltages for short duration overvoltages. The maximum voltage limits are translated into maximum reactance limits by dividing the voltage limits with the actual line current. Since the maximum voltage limit is a function of duration and since the line current varies, the calculated reactance limit is dynamic in nature.

Capacitive region, Capacitor current limits: At high currents it is necessary to bypass the TCSC to protect the capacitors. The TCSC, once bypassed, has a time delay on reinsertion after the line current falls back below the maximum line current limit.

Inductive region, Harmonic limits: The heating effect of TCSC harmonic current flow must be considered. The harmonic content depends on the current flow in the thyristors and the relative sizes of the inductive and the capacitive reactances.

Inductive region, Thyristor current limits: When the maximum thyristor current is exceeded, the CSC is bypassed.

4. TCSC MODELING IN EMTP–TACS

Modeling of thyristor valves separate from the main EMTP network (representing the ac system in which the TCSC is embedded) has been demonstrated in [57]. This has proven computational time effective in large networks. This paper addresses control system modeling issues, related to both computation time and modeling flexibility.

EMTP simulation of power electronic systems is often characterized by significantly large computation time and the difficulty to model digital control systems, such as those found in TCSC. The reasons are the following.

Typically, control systems such as in figure 3 are modelled in EMTP through TACS. Since TACS is really designed for analog controls, limitations become apparent when modeling digital controls. Fixed–format and free–format TACS pseudo–fortran provide some flexibility towards digital control, but this is limited in terms of functionality. An alternative is MODELS which in some aspects offers more features than TACS. However, both alternatives are modeling languages which translate the control system information into sparse arrays and linked lists to nonlinearity codes, which in the time–step loop are used by the non–iterative solver. There is enough overhead such that large nonlinear control cases are not solved efficiently.

Also, internal delays in the control system solution are the result of the non iterative control system solution. The ordering mechanism is to limit the number of time delays. This is not compatible with digital controls in which the sequence of solution is built in the controls. It will be shown later how ordering mechanism can affect simulation accuracy.

Finally, not all digital controls may be active at each time step. For example, some functions will be enabled when a discrete event occurs. Some functions are solved with small step sizes, while others use a large step size. Furthermore, the solution step size may be different from the integration step size of that used in EMTP.

All these limitations can be alleviated since the TACS user now has the possibility to dynamically link his (her) own executable subroutines in the data file with the EMTP. Each call to a subroutine is interpreted as usage of a device, and this user–defined subroutine is ordered in the solution process. Ordering of the modules can also be by–passed upon request. This remains a flexible way to describe control

systems, and it has the advantage of computational efficiency since the overhead is small.

4.1 System data

The TCSC implemented in the Kayenta substation, between Navajo and Shiprock, Arizona, has been modelled as shown below. System data and control information have been extracted from [52] and [56]. Figure 4 shows the schematic diagram of Kayenta power substation. The TCSC is located on a 320 kilometer long, 230 kV (60 Hz) transmission line. The ac network itself is small.

Fixed capacitors are divided into sections of 55, and 40 Ohms impedance. The TCSC is 2.6 Ohms inductive and 15 Ohms capacitive. The control system follows the description of figure 3. A step in the TCSC impedance in open loop mode control is the test case in the paper. The final simulation time is 1 sec, and the integration step size is 9,98 μsec.

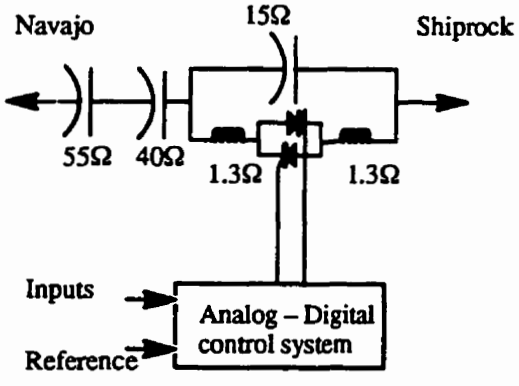


Fig. 4: Schematic diagram of Kayenta sub–station

4.2 Plain TACS simulation results

The control system is first modeled with the standard EMTP–TACS instructions, without any enhancements. The representation includes many free–format pseudo fortran expressions. The TCSC current regulator (regulator block in figure 3) is a digital control and it is modelled to mimic this. All the other blocks are analog devices for which TACS is quite flexible.

In this implementation, each function is executed at each time step. The time–loop simulation time obtained on IPC workstation was of 4575.65 sec. Of this total time, the TACS control systems account for 3988 sec, about 87% of the total time.

4.3 Dynamically linked control model

To take full advantage of the modeling approach, a complete analog digital control system was developed as a "user–supplied device". TACS elements used are limited to the interface variables and some sources, namely types 11, 90, 91 and some supplemental "88" expression. [59]

In the basic implementation of the user–supplied device, the same EMTP step size is used for all TCSC control elements as we are simply replicating the TACS model. This permits a straight comparison with the plain TACS simulation. The total simulation time (for both the network and the control system) was about 953.28 sec, thus approximately 20% of that for the standard simulation. The control system simulation itself has been speed–up by

a factor of about 11. (366 sec vs 3988 sec).

The control system simulation time can be reduced even more by taking advantage of the different bandwidths of the control functions. Due to the time constants involved, the regulator function can clearly be solved with a larger step size than that of EMTP. Like in the real system, between solution steps, the output Z_{ord} is held constant. Similarly, not all loops may be activate at each time step.

Another point of interest is that it is not needed to mimic the digital functions. To illustrate this, we consider a stand–alone filter module (F_i module in Fig.3). The module is a group of 4 successive digital filters, the first is an antialiasing one, the second is a band–pass at 60 Hz, the third and fourth are cut–off band– tuned respectively at 120, and 180 Hz. When simulated as per its digital algorithm, the module is executed at a fixed sampling time step which is much larger than the EMTP solution time step (0.521 msec vs 10.42 µsec). With this implementation, not only the accuracy does not suffer, but the simulation is speed–up by a factor of 6 compared to a user–defined model which is merely a plain TACS translation.

4.4 Comparison

Figure 5 shows the variation of the thyristor firing angle which was used as disturbance. Figure 6 illustrates the corresponding TCSC capacitor voltage, obtained with the plain TACS – EMTP simulation, while figure 7 represents that obtained with the dynamically linked user–supplied device. The capacitor voltage is where the gap between the results is the largest since it is sensitive to the firing angle. The difference between the results is due to the ordering mechanism in TACS and the time–delays. This has been shown simply by modifying the order in TACS. The user–supplied device uses a more representative ordering when dealing with digital control systems.

Even though there is some sensitivity, the results obtained match published and reliable information. The model can thus be used with confidence as benchmark for validation of less detailed models suitable for planning applications. This can be a complex issue as described in [58] .

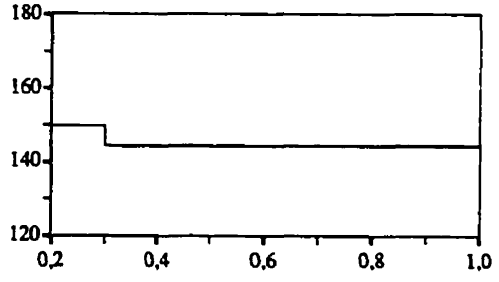


Fig.5: Firing angle (^{0}) vs Time (s)

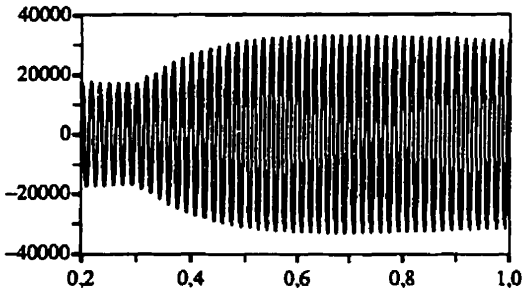


Fig.6: TCSC capacitor voltage (V) vs Time (s); plain TACS simulation

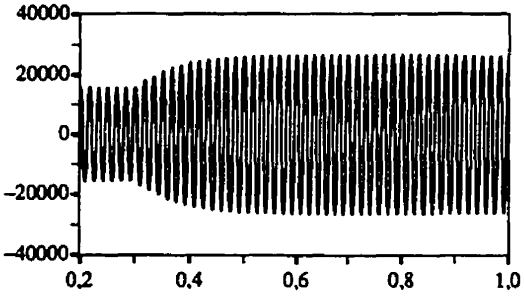


Fig.7: TCSC capacitor voltage (v) vs Time (s); user–supplied model

5. CONCLUSION

The paper has shown how significant reduction in EMTP cpu time have been achieved in an EMTP investigation of Thyristor Controlled Series Capacitors, without impacting modeling flexibility. The changes are associated with algorithmic and modeling issues. The TCSC model has been built solely from published information in the technical literature and results have been duplicated.

REFERENCES

[51] J. Urbanek, R.J. Piwko, E.V. Larsen, B.L. Damsky, B.C. Furumasu, W. Mittlestadt, and J.E. Edan, "Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation At The Slatt 500kv Substation," IEEE Transactions on Power Delivery, pp. 1460–1469, July 1993.

[52] N. Christl et al., "Advanced Series Compensation (ASC) With Thyristor Controlled Impedance," CIGRÉ, Paper 14/37/38–05, 1992.

[53] D.E. Martin, "System Aspects Of AEP's Kanawha river Controlled Series Capacitor Installation," EPRI FACTS 2 Conference, Boston, May 1992.

[54] J.J. Paserba, E.V. Larsen, "A Stability Model For Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC)," EPRI FACTS 2 Conference, Boston, May 1992.

[55] J.J. Paserba, N.W. Miller, E.V. Larsen, R.J. Piwko, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model For Power System Stability Analysis," Paper 94 SM 476–2–PWRD, IEEE PES Summer Meeting, July 1994.

[56] B.L. Agrawal, R.A. Hedin, R.K. Johnson, A.H. Montaya, and B.A. Vossler, "Advanced Series Compensation (ASC) Steady–State, Transient Stability And Subsynchronous Resonance Studies," EPRI FACTS 2 Conference, Boston, May 1992.

[57] S. Lefebvre, R. D. Rangel, "Modeling of Power Electronics Devices in EMTP–TACS," International Conference on Power System Transients, Lisbon, Portugal, Sept 1995.

[58] Mansour Sultan, John Reeve, "Developments in Detailed EMTP Representation of FACTS Devices in a Transient Stability Program," CIGRE HVDC and FACTS Conference, Montreal, September 1995.

[59] Electromagnetic Transients Program (EMTP) Revised Rule Book Version 2.0, June 1989

ANNEXE 2

TORSIONAL INTERACTION IN FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS WITH A THYRISTOR CONTROLLED SERIE CAPACITOR

Jérôme NDAYIZAMBA*, Serge LEFEBVRE, Xuan Dai DO***
***Ecole Polytechnique de Montréal **Hydro-Québec(IREQ)**
Montreal, Qc, Canada Varennes, Qc, Canada

ABSTRACT

This paper presents results obtained in torsional interaction analysis of a flexible ac transmission systems (FACTS) using thyristor controlled series capacitor. The Component Connection Method (CCM) is used to point out the interaction between the current regulator of the thyristor controlled series capacitor (TCSC) and the electromechanical part of the synchronous machine. The results are validated by an electromagnetic transients program (EMTP) study.

KEY WORDS

Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Components Connection Method (CCM), Eigenvalue, Sub Synchronous Resonance (SSR), Electromagnetic Transients Program (EMTP).

1. INTRODUCTION

By providing direct control of transmission line impedance, a TCSC offers many advantages over conventional fixed series capacitor installation. A TCSC module consists of a series capacitor in parallel with a thyristor switch and a reactor. The net series compensation seen by the transmission line is the parallel combination of the thyristor controlled reactor (TCR) and fixed capacitor. A TCSC system can be made up of one or several such modules in series. The TCSC may also be connected to some fixed or conventional series capacitors as part of the overall compensation scheme. Fig. 1 shows a general schematic diagram of one TCSC module. Metal oxide varistors (MOV) protect the capacitors.

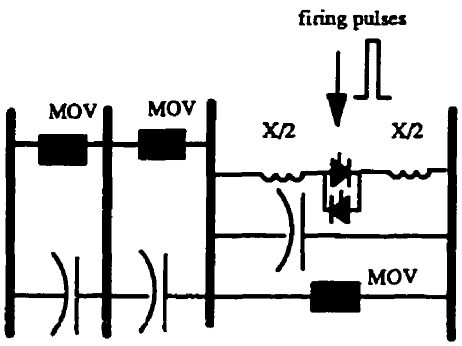


Fig.1 Schematic diagram of a TCSC

Three forms of operation have emerged. The 'vernier control' in which the amount of series capacitor compensation is in continous control through fine adjustement of the thyristor firing angle. The modulation mode of operation , in which, the compensation level is gradually changed 'cycle to cycle'. The last one, called 'bypass' mode involves full conduction of the thyristors. This paper deals with the first form of operation known as vernier control.

By controlling the TCR impedance, in principle, the TCSC can operate over a wide range of capacitive and inductive impedances (Fig.2). However the transition from inductive to capacitive is not normally permitted by fast control, due to the L–C oscillations during the transition. Control limits would prevent even temporary operation into the area of resonance.

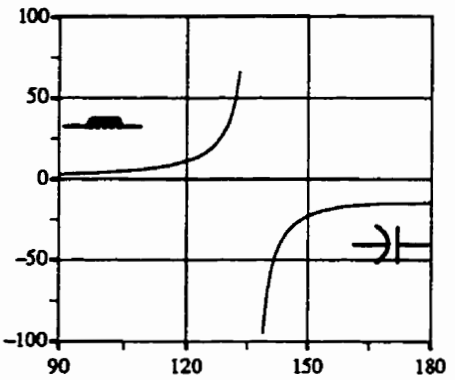


Fig.2: Impedance (Ω) vs Firing angle (o)

The subsynchronous resonance (SSR) phenomenon is a significant concern when planning a conventional series capacitor installation. An important advantage of TCSC is that combining thyristors controlled reactors in parallel with series capacitor segments does not tune the transmission line to a resonant condition at subsynchronous frequencies. Since the thyristor controlled reactor is a non linear phase controlled device in parallell with a capacitor, the impedance combination at subsynchronous frequencies produces an inductive caracteristic. This characteristic of the TCSC avoids the tuned L–C series combination which can result from conventional fixed series capacitor. However, besides the interaction between the mechanical system and fixed series capacitor compensated networks, subsynchronous oscillations can also result from interaction with devices such as TCSC regulators. This paper deals with the destabilizing effect on the subsynchronous modes which can result from adverse interaction with the TCSC current regulator.

2. OVERVIEW OF TCSC CONTROL

The TCSC valves conduct on alternate half–cycles of the supply frequency depending on their firing angle α or conduction angle σ, where $\sigma = 2(\pi - \alpha)$. Then, the control objective is to generate firing pulses controlling α, thus the device impedance. A simplified block–diagram of a typical control system is shown in Fig. 3. Below is a brief description of the main components of Fig. 3.

Regulator

The regulator module contains transfer functions, for example a filter Fi and a PI device, which may be part of a feedback loop.

The control modes include:

Impedance Control mode (ZC): based upon a reference impedance, the TCSC regulates α , within limits, to maintain a constant impedance. Typically, this is an open loop function.

Current Control mode (CC): based upon a reference current, the TCSC impedance is varied, within limits, to control a constant current on the transmission line. The CC mode is used with regulators feedback, typically PID regulators. Constant power control is also feasible.

Distribution and linearization

The output from the regulator block is a reactance order Z_{ord} which is entered to a distribution unit D. It determines the actual reactance output taking into account the

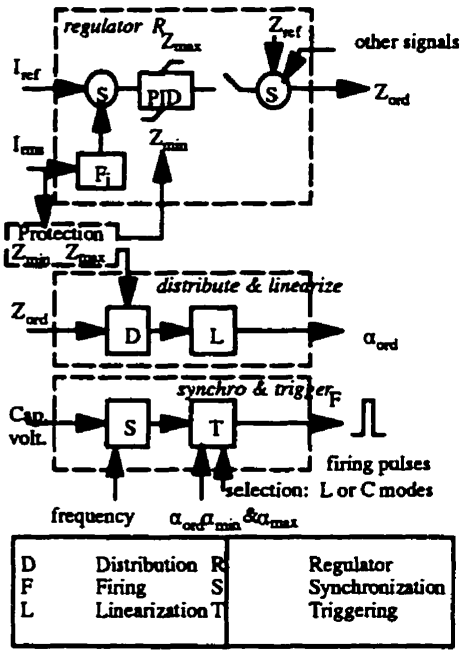


Fig.3: Typical block-diagram of a TCSC current regulator

number of modules and different output limits. A linearization function L may be used to supply the firing angle order as a function of the desired reactance. This permits quasi-linear response of a TCSC impedance to control the voltage.

Synchronizing and triggering

Synchronized trigger signals may be generated independently for each phase, and the synchronization signal may be the capacitor voltage in each phase. Typically, synchronization S uses a phase-locked loop (PLL) oscillator but timing references may use filters to prevent transient and distorted ac system conditions from influencing TCSC operation.

The trigger module T provides pulses for triggering the thyristors in both current directions by comparing the PLL output with α_{ord}, constrained between minimum and maximum limits. The firing angle α is the electrical angle between the zero crossing of the synchronizing signal and the instant when the triggering pulse is generated.

3. TORSIONAL INTERACTION DUE TO TCSC CURRENT REGULATOR

3.1 INTRODUCTION

Subsynchronous torsional interaction involving the current regulator of a TCSC is a rather complicated phenomena. The mechanism of the interaction can be explained as following. The natural torsional vibrations of the mechanical system produce a slight modulation of the generator speed, resulting in variation of the machine terminal voltage. The voltage variation produces a change in ac line current. Sensing a change in line current, the TCSC current regulator acts to adjust the firing angle, to restore the current to its reference value. The action of the current regulator affects the ac line current, which produces a subsequent change in the machine's electrical torque. Hence there is a closed loop control interaction .

Under some circumstances, the TCSC current regulator can reinforce the torsional vibrations in the machine rotor. If not stopped, this amplification effect can cause the torsional oscillations to build up to high levels, possibly damaging the rotor.

3.2 MATHEMATICAL FORMULATION

The power system is subdivided in small components. Each component is represented by its dynamical state space equations. Linear generator equations are derived from the classical non linear Park equations. Turbine-generator shaft model is derived from classical mechanical equations. Transmission lines are represented by pi sections wich can be easily represented in state space domain. The TCSC control

command was represented by transfer functions and transformed into a state space model. Also a transformation to a synchronous reference frame was used to complete the TCSC model.

After modelling each component in the state space domain, the Component Connection Method (CCM) was used to compute the eignvalues of the power system.

In the CCM method, each component is assumed to have a state space model described by Eq.(1)–(2).

$$\frac{d}{dt}x_i = A_i x_i(t) + B_i a_i(t) \quad (1)$$

$$b_i(t) = C_i x_i(t) + D_i a_i(t) \quad (2)$$

Where a, b and x are the vectors of components inputs, outputs, and states respectiveley. For n components, the composite component state model obtained without interaction can described as in Eq.(3)–(4).

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Ba(t) \quad (3)$$

$$b = Cx(t) + Da(t) \quad (4)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & A_n \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & B_n \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & C_n \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & D_n \end{bmatrix}$$

To model component intercation, the system is completed with the connection equations which are explained in Eq.(5)–(6).

$$a(t) = L_{11}b(t) + L_{12}u(t) \quad (5)$$

$$b(t) = L_{21}b(t) + L_{22}u(t) \quad (6)$$

The L_{ij} matrix are real matrices accounting for physical laws governing connection components. Combination of connection equations with the composite equations of the power system, give rise to the composite state model represented by Eq.(7)–(8).

$$\frac{d}{dt}x(t) = Fx(t) + Gu(t) \quad (7)$$

$$y(t) = Hx(t) + Ju(t) \quad (8)$$

In this last equations, the F, G, H and J matrices are obtained as in Eq.(9)–(12).

$$F = [A + B(I - DL_{11})^{-1}C] \quad (9)$$

$$G = [B(I - DL_{11})^{-1}DL_{12} + BL_{12}] \quad (10)$$

$$H = [L_{21}(I - DL_{11})^{-1}DL_{12} + L_{22}] \quad (11)$$

$$J = [L_{21}(I - DL_{11})^{-1}C + L_{22}] \quad (12)$$

The power system modes can be extracted from the F matrix by a standard QR algorithm. In our case, system modelling and eigenvalue analysis was done with the Matlab – Simulink software. The Subsynchronous study focuses on mechanical modes, specifically, our concern is current regulator gain interaction on mechanical modes.

4. SIMULATION RESULTS

4.1 SYSTEM DATA

The TCSC implemented in the Kayenta substation, between Navajo and Shiprock, Arizona, was used as a test model. The Navajo power bus was simulated as an equivalent synchronous machine. The Shiprock power bus was represented by an infinite bus. System data and control information have been extracted from [61] and [65]. The mechanical system of the synchronous machine is shown in Fig.4. Its model is extracted from [60] while the parameters are from the IEEE first benchmark.

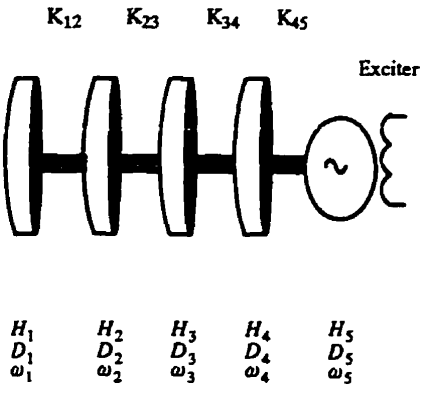


Figure 4: Schematic diagram of a synchronous machine

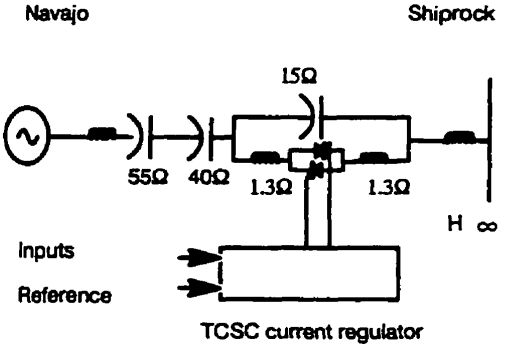


Fig. 5: Schematic diagram of Navajo–Shiprok power system with TCSC at Kayenta station

The TCSC is located on a 320 km long and 230 kV (60 hz) transmission line (Fig.5). Fixed capacitors are divided into sections having impendances of 55, and 40 Ω. The TCSC is 2.6 Ω inductive and 15 Ω capacitive. The current control system is indicated in Fig. 3.

4.2 EIGENVALUE ANALYSIS RESULTS

Computer simulations were run using the mathematical formulation described in section 3.2 and applied on the power system described in section 4.1 for varying controller gain. Linearization of the current control (Fig. 3) uses only the filters (Fi), regulator(R) and the linear (L) blocks, the protection functions do not intervene. Proper modelling of distribution, linearization, synchronization and triggering is important.

The system is charcaterized by five mechanical modes located at 15.7 hz, 20.2 hz, 25.5 hz, 32.2 hz and 47.4 hz. Depending on the operation point and the current controller gain (Kr), some modes are effectiveley damped, but others may become unstable. Fig.6 shows the real part of the 15.7 hz mode versus controller gain. Fig. 7 shows the real part of mode at 25.5 hz.

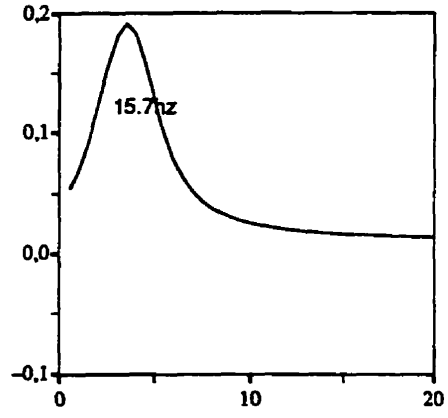


Fig.6: Real part (1/s) vs Gain Kr

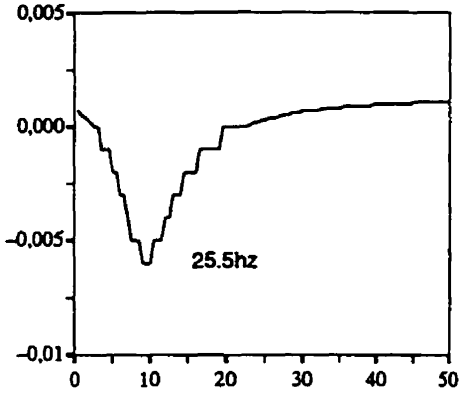


Fig.7: Real part (1/s) vs Gain Kr

Referring to the 15.7 hz mode, the characteristic is typical of subsynchronous resonance with fixed series capacitor. The controller current gain has a destabilizing effect on this mode whereas it has a stabilizing effect on the 25.5 hz mode.

5. VALIDATION BY TIME-DOMAIN SIMULATION

5.1 EMTP SIMULATION RESULTS

A set of EMTP– TACS simulations was carried out to analyse the effect of the TCSC current controller gain. As the current controller gain increases, the firing angle subsequent to the line current oscillations may become undamped (Fig.8). Due to those firing angle oscillations, mechanical torque modes may be excited. Fig. 9 and 10 illustrate the small signals derived from the torsional torque between the 3rd and the 4th turbine stages (Fig.4). The current control gain values for the signals are respectively 0.05 and 0.06.

A simple inspection of Fig. 9 and 10 reveals two modes. A more detailed identification process was performed by Prony'method to extract the mechanical modes. From Fig.9 the mode at 15.5hz presents a real part which is equal to 0.03. From Fig.10, the same mode presents a real part which is equal to 0.115. The eigenvalue analysis gives 0.06 and 0.097 for Kr=0.05 and Kr=0.08 respectively. Given the small damping involved, the difference is quite acceptable, since more importantly the effect on damping the mechanical modes has the same trend in both analysis.

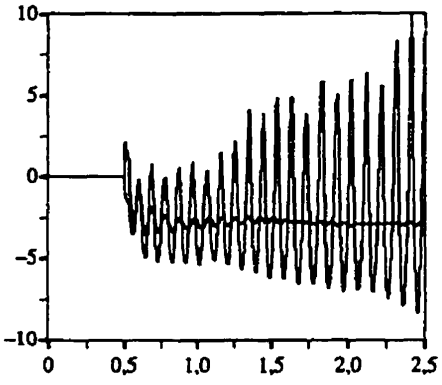


Fig.8 : Firing angle (o) versus Time (s)

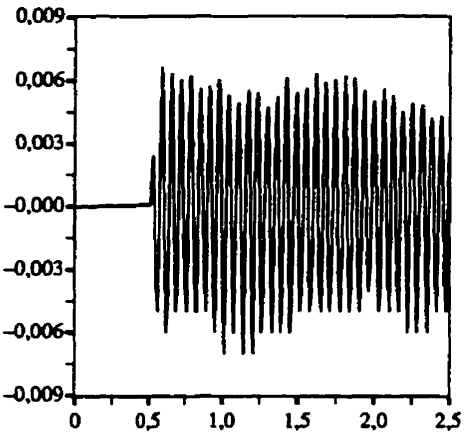


Fig.9: Torque (10E-6 Nm) versus Time(s)

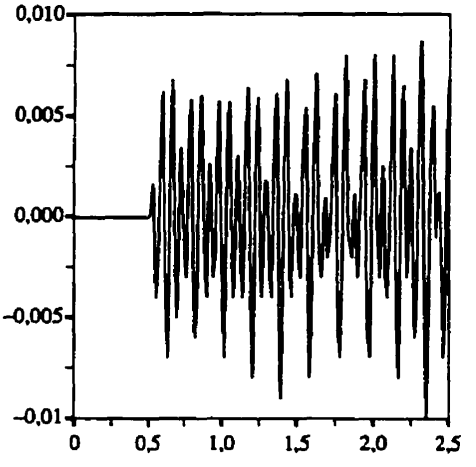


Fig.10 Torque (10E-6 Nm) versus Time(s)

The mode at 20.2hz has such little amplitude that we do not consider it. The next mode considered is the 25.5hz. Fig.7 shows the stabilizing effect of the controller gain on this mode. By applying Prony's method to Fig.9 and Fig.10, the extraction process gives the real part of the mode as 0.02 and –0.34 corresponding to current controller gain of 0.05 and 0.08 respectively. In this case, the model results were 0.0057 and –0.0025 respectively.

5.2 DISCUSSION

The model did not precisely the same results as EMTP, but the results are close and the trend has been shown to be similar to that of the EMTP, which is a time based tool that relies on a Prony analysis to identify modes. In comparative terms, the eigenvalue analysis offers the advantage of direct evaluation of torsional interaction modes.

The EMTP simulation includes artificial dampers like snubbers, Critical Damping Algorithm (CDA), etc..., which affect electrical and mechanical damping modes, particularly when system damping is small. In the eigenvalue analysis, the assumption is made that the current control is linear. In practice, it includes some functions inherent to it's digital nature, such as a sample and hold function which was approximated as a first order device. Synchronization of the gate pulse generator in the three phases of the TCSC introduces time delay, which was modeled as a first order Padé approximation.

These are some of the approximations affecting the model's accuracy and justify the quantitative difference with EMTP.

6. CONCLUSIONS

In this paper, small-signal stability analysis was used to study the subsynchronous interaction of a TCSC current regulator and a nearby turbine - generator system. Emphasis was put on the gain of the TCSC current regulator to demonstrate its importance in torsional interaction. Time based simulations with EMTP were used to validate the results.

REFERENCES

[60] Anderson P.M, Agrawal B.K. and Van Ness J.E., "Subsynchronous

resonance in Power Systems", IEEE Press, New York 1990

[61] N. Christl et al., "Advanced Series Compensation (ASC) With Thyristor Controlled Impedance," CIGRÉ, Paper 14/37/38–05, 1992.

[62] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, "Terms, Definitions, and Symbols for Subsynchronous Oscillations" TPAS Vol. PAS–104, No.6 pp1326–1334, June 1985

[63] J. Urbanek, and Al " Thyristor controlled series compensation prototype installation at the Slatt 500 kv substation " IEEE paper, 92SM 467–1 PWRD

[64] L Angquist, B. Lundin, J. Samuelsson " Power oscillation damping using controlled reactive power compensation– A comparison between series and shunt approaches" IEEE paper, 92SM 539–7 PWRD

[65] R. A. Hedin, S. Weiss, D. Mah, L. Cope " Thyristor controlled series compensation to avoid SSR" Flexible AC Transmission System (FACTS 3) Conference, Baltimore, Maryland, October 5–7, 1995

[66] Electromagnetic Transients Program (EMTP) Revised Rule Book Version 2.0, June 1989

ANNEXE 3

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
C ------------------------------------------------------------
C                                                            |
C MODELE DU TCSC : PERTURBATION D'IMPEDANCE EN BOUCLE OUVERTE |
C                                                            |
C ------------------------------------------------------------
C
C
C DELTAT    TMAX    XOPT    COPT  EPSILN  TOLMAT
C ..5....1....5....2....5....3....5....4....5....5....5....6....5....7....5....8
 9.98E-6     1.0    60.0     0.0
    5000      10       0       1       1       0       0       1       0       0
C
TACS HYBRID
C
C ************************************************************************
C TSR AND TCR SWITCHES
C ************************************************************************
C NINNNN  AAAAAAAAAABBBBBBBBBCCCCCCCCCC                    <-TSTART-><-TSTOP-->
11TSRMAN          1.0                                          1.20      1.4
11TCRMAN          1.0                                          .100       99.
C
C
C CONSIGNE D'IMPEDANCE
C
C ..5....1....5....2....5....3....5....4....5... 5....5 ...6....5....7....5....8
C NINNNN  AAAAAAAAAABBBBBBBBBCCCCCCCCCC                    <-TSTART-><-TSTOP-->
11INPUT1          23.0                                         0.0       99.
11INPUT2          14.0                                       0.300       99.
11INPUT3           0.0                                       0.800       99.
11INPUT4           0.0                                       0.800       99.
11INPUT5           0.0                                       0.800       99.
C
C NINNNN  +111111 +222222 +333333 +444444 +555555 GGGGGGLLLLLLHHHHHHLLLLLLHHHHHH
  XINPUT  +INPUT1 -INPUT2 +INPUT3 +INPUT4 +INPUT5
C
C
C  TENSIONS AUX BORNES DU TCSC
C
C NNNNNN  AAAAAAAAAABBBBBBBBBCCCCCCCCCC                    <-TSTART-><-TSTOP-->
90KE230A                  60.                                   0.    99999.
90KAASCA                  65.                                   0.    99999.
66VCAP1A  +KAASCA-KE230A
90KE230B                  60.                                   0.    99999.
90KAASCB                  60.                                   0.    99999.
66VCAP1B  +KAASCB-KE230B
90KE230C                  60.                                   0.    99999.
90KAASCC                  60.                                   0.    99999.
66VCAP1C  +KAASCC-KE230C
91ASCSWA                  60.                                   0.    99999.
91ASCSWB                  60.                                   0.    99999.
91ASCSWC                  60.                                   0.    99999.
C
C
C
88V66A  66-VCAP1A                          60.
88I66A  66-ASCSWA                          60.
82ZFMS_A  -V66A  /I66A
C
C
88ILINEA  = ASCSWA
88ILINEB  = ASCSWB
88ILINEC  = ASCSWC
C
C
C MISE A L'ECHELLE AU NIVEAU DU DSP
C
88SCALEA  = ILINEA * 5/3000
88SCALEB  = ILINEB * 5/3000
88SCALEC  = ILINEC * 5/3000
C
C GAIN AU NIVEAU DU PLL: PLGAIN
88PLGAIN  = 12.525
C
88FRQCYA  = 60.0
88FRQCYB  = 60.0
88FRQCYC  = 60.0
C
C
CCONTROL EN BOUCLE OUVERTE
C
C
C SAMPLING CLOCK FOR DSP
88FSAMPL  = 1920.0
C
C
88PUB001  = 1 / (DELTAT * FSAMPL)
88PUB004  = PUB002 + PLUS1 - PUB003
  PUB002  -PUB004
C
88PUB00551-PUB004                                                    0.PUB001PUB304
  PUB003  -PUB005
88CLOCKP  = PUB005 .GT. ZERO
C
C
05PUB005  -SCALEA
      1.0
      1.0  1.288E-3  8.294E-7 3.301E-10 8.135E-14 9.967E-18
C
  PUB228  -PUB006
86PUB229462-PUB228                                                          CLOCKP
  PUB230  -PUB229
88PUB23154-CLOCKP                                                          DELTAT
88PUB232  = PUB230  * (    -.0658          )
86PUB233  = PUB230  * (     0.0            )
86PUB234  = PUB230  * (  0.06580           )
88PUB235  = PUB232 - PUB234
88PUB23662-PUB235                                                           PUB231
  PUB237  -PUB235
88PUB23862-PUB237                                                           CLOCKP
85PUB239  = PUB233 * PUB238 - PUB245
88PUB24062-PUB239                                                           PUB231
  PUB241  -PUB240
86PUB24262-PUB241                                                           CLOCKP
88PUB243  = PUB234 * PUB242
86PUB244  = PUB243 * (   .02846             )
88PUB245  = PUB243 * (  -1.7943             )
88PUB007  = PUB243
C
C
```

```
C
  PUB246  +PUB007
##PUB24762+PUB246
  PUB248  +PUB247
##PUB24954+CLOCKP
##PUB250  = PUB248  * (    .96639              )
##PUB251  = PUB248  * (   -1.786               )
##PUB252  = PUB248  * (    .96639              )
##PUB253  = PUB250 - PUB262
##PUB25462+PUB253
  PUB255  +PUB254
##PUB25662+PUB255
##PUB257  = PUB251 + PUB256 - PUB261
##PUB25862+PUB257
  PUB259  +PUB258
##PUB26062+PUB259
##PUB261  = PUB252 + PUB260
##PUB262  = PUB261 * (   .78324              )
##PUB263  = PUB261 * ( -1.64781              )
##PUB008  = PUB261
C
C
C
  PUB264  +PUB008
##PUB26562+PUB264
  PUB266  +PUB265
##PUB26754+CLOCKP
##PUB268  = PUB266  * (    .83089             )
##PUB269  = PUB266  * (  -1.3828              )
##PUB270  = PUB266  * (    .83089             )
##PUB271  = PUB268 - PUB280
##PUB27262+PUB271
  PUB273  +PUB272
##PUB27462+PUB273
##PUB275  = PUB269 + PUB274 - PUB281
##PUB27662+PUB275
  PUB277  +PUB276
##PUB27862+PUB277
##PUB279  = PUB270 + PUB278
##PUB280  = PUB279 * (    .55659             )
##PUB281  = PUB279 * ( -1.29526              )
##SNPOUA  = PUB279
C
C
C
05PUB009  +SCALEB
      1.0
      1.0  1.266E-3  8.294E-7 3.301E-10 8.120E-14 9.987E-18
C
C
  PUB282  +PUB009
##PUB28362+PUB282
  PUB284  +PUB283
##PUB28554+CLOCKP
##PUB286  = PUB284  * (    -.0658             )
##PUB287  = PUB284  * (      0.0              )
##PUB288  = PUB284  * (  0.08580              )
##PUB289  = PUB286 - PUB298
##PUB29062+PUB289
  PUB291  +PUB290
##PUB29262+PUB291
##PUB293  = PUB287 + PUB292 - PUB299
##PUB29462+PUB293                                          PUB285
  PUB295  +PUB294                                          CLOCKP
##PUB29662+PUB295
##PUB297  = PUB288 + PUB296
##PUB298  = PUB297 * (    .82846             )
##PUB299  = PUB297 * (  -1.7943              )
##PUB010  = PUB297
C
C
  PUB300  +PUB010
##PUB30162+PUB300                                          CLOCKP
  PUB302  +PUB301                                          DELTAT
##PUB30354+CLOCKP
##PUB304  = PUB302  * (    .96639             )
##PUB305  = PUB302  * (   -1.786              )
##PUB306  = PUB302  * (    .96639             )
##PUB307  = PUB304 - PUB316
##PUB30862+PUB307                                          PUB303
  PUB309  +PUB308                                          CLOCKP
##PUB31062+PUB309
##PUB311  = PUB305 + PUB310 - PUB317
##PUB31262+PUB311                                          PUB303
  PUB313  +PUB312                                          CLOCKP
##PUB31462+PUB313
##PUB315  = PUB306 + PUB314
##PUB316  = PUB315 * (    .78324             )
##PUB317  = PUB315 * ( -1.64781              )
##PUB011  = PUB315
C
C
C
  PUB318  +PUB011
##PUB31962+PUB318                                          CLOCKP
  PUB320  +PUB319                                          DELTAT
##PUB32154+CLOCKP
##PUB322  = PUB320  * (    .83089             )
##PUB323  = PUB320  * (  -1.3828              )
##PUB324  = PUB320  * (    .83089             )
##PUB335  = PUB322 - PUB334
##PUB32662+PUB325                                          PUB321
  PUB327  +PUB326                                          CLOCKP
##PUB32862+PUB327
##PUB329  = PUB323 + PUB328 - PUB335
##PUB33062+PUB329                                          PUB321
  PUB331  +PUB330                                          CLOCKP
##PUB33262+PUB331
##PUB333  = PUB324 + PUB332
##PUB334  = PUB333 * (    .55659             )
##PUB335  = PUB333 * ( -1.29526              )
##SNPOUB  = PUB333
C
C
C
05PUB012  +SCALEC
      1.0
      1.0  1.266E-3  8.294E-7 3.301E-10 8.120E-14 9.987E-18
C
  PUB336  +PUB012
##PUB33762+PUB336                                          CLOCKP
  PUB338  +PUB337
```

```
##PUB33954=CLOCKP
##PUB340  = PUB338  * (    -.0658          )
##PUB341  = PUB338  * (       0.0          )
##PUB342  = PUB338  * (  0.08560          )
##PUB343  = PUB340 - PUB352
##PUB34462=PUB343
  PUB345  =PUB344
##PUB34662=PUB345
##PUB347  = PUB341 * PUB346 - PUB353
##PUB34862=PUB347
  PUB349  =PUB348
##PUB35062=PUB349
##PUB351  = PUB342 * PUB350
##PUB352  = PUB351 * (    .82946          )
##PUB353  = PUB351 * (  -1.7943           )
##EPUB013 = PUB351
C
C
  PUB354  =PUB013
##PUB35562=PUB354
  PUB356  =PUB355
##PUB35754=CLOCKP
##EPUB358 = PUB356 * (    .96439          )
##PUB359  = PUB356 * (   -1.766           )
##PUB360  = PUB356 * (    .96439          )
##EPUB361 = PUB358 - PUB370
##PUB36262=PUB141
  PUB363  =PUB362
##PUB36462=PUB363
##PUB365  = PUB359 * PUB366 - PUB371
##PUB36662=PUB365
  PUB367  =PUB366
##PUB36862=PUB367
##EPUB369 = PUB360 * PUB368
##EPUB370 = PUB369 * (    .78324          )
##EPUB371 = PUB369 * ( -1.64781           )
##EPUB014 = PUB369
C
C
C
  PUB372  =PUB014
##PUB37362=PUB372
  PUB374  =PUB373
##PUB37554=CLOCKP
##EPUB376 = PUB374 * (    .63089          )
##EPUB377 = PUB374 * (  -1.3828           )
##EPUB378 = PUB374 * (    .63CE9          )
##EPUB379 = PUB376 - PUB388
##EPUB38062=PUB379
  PUB381  =PUB165
##PUB38262=PUB381
##EPUB383 = PUB377 * PUB382 - PUB389
##EPUB38462=PUB383
  PUB385  =PUB384
##EPUB38662=PUB385
##EPUB387 = PUB378 * PUB386
##EPUB388 = PUB387 * (    .55659          )
##EPUB389 = PUB381 * ( -1.29526           )
##SNPOUC  = PUB387
C
C
```

```
DELTAT    C
          ##PUB39054=CLOCKP                                          DELTAT
          ##PUB39162=SNPOUA                                            CLOCKP
            PUB392  =PUB391
          ##PUB393  = PUB392 * PUB399
     PUB339 ##PUB39462=PUB393                                          PUB399
            PUB395  =PUB394
     CLOCKP ##PUB39662=PUB395                                          CLOCKP
          ##PUB397  =PUB392 * .01094
     PUB339 ##PUB015  =-PUB397 * PUB396
            PUB398  =PUB015
     CLOCKP ##PUB399  =PUB398 * .62094
          C
          C
          C
          ##PUB016  = SQRT( SNPOUA  * SNPOUA  + PUB015 * PUB015 )
          C
          C
          C
     CLOCKP   PUB400  =PUB016
          ##PUB40162=PUB400                                            CLOCKP
DELTAT      PUB402  =PUB401                                          DELTAT
          ##PUB40354=CLOCKP
          ##PUB404  = PUB402  * (  0.21930          )
          ##PUB405  = PUB402  * (  -0.4069          )
          ##PUB406  = PUB402  * (    .2193          )
     PUB357 ##PUB407  = PUB404 - PUB416
          ##PUB40662=PUB407
     CLOCKP   PUB409  =PUB408                                          PUB403
          ##PUB41062=PUB409
     PUB357 ##PUB411  = PUB405 * PUB410 - PUB417                       CLOCKP
          ##PUB41262=PUB411
     CLOCKP   PUB413  =PUB412                                          PUB403
          ##PUB41462=PUB413                                           CLOCKP
          ##PUB415  = PUB406 * PUB414
          ##PUB416  = PUB415 * (    .60355          )
          ##PUB417  = PUB415 * ( -1.77186          )
          ##EPUB017 = PUB415
          C
          C
          C
     CLOCKP   PUB418  =PUB017
          ##PUB41962=PUB418                                            CLOCKP
DELTAT      PUB420  =PUB419                                          DELTAT
          ##PUB42154=CLOCKP
          ##PUB422  = PUB420  * (    .07122          )
          ##PUB423  = PUB420  * (   -.10540          )
          ##PUB424  = PUB420  * (    .07122          )
     PUB375 ##PUB425  = PUB422 - PUB434
          ##PUB42662=PUB425                                           PUB421
     CLOCKP   PUB427  =PUB426
          ##PUB42862=PUB427                                           CLOCKP
     PUB375 ##PUB429  = PUB423 * PUB428 - PUB435
          ##PUB43062=PUB429                                           PUB421
     CLOCKP   PUB431  =PUB430                                         CLOCKP
          ##PUB43262=PUB431
          ##PUB433  = PUB424 * PUB432
          ##PUB434  = PUB433 * (    .64523          )
          ##PUB435  = PUB433 * (  -1.8122           )
          ##ILPLVA  = PUB433
          C
```

```
C
C
##PUB43654+CLOCKP
##PUB43762+SNPOUB
  PUB438  +PUB437
##PUB439  = PUB438 + PUB445
##PUB44062+PUB439
  PUB441  +PUB440
##PUB44262+PUB441
##PUB443  =PUB438 * .82094
##PUB018  =-PUB443 + PUB442
  PUB444  +PUB018
##PUB445  =PUB444 * .82094
C
C
C
##PUB019  = SQRT( SNPOUB  * SNPOUB  + PUB018 * PUB018 )
C
C
C
  PUB446  +PUB019
##PUB44762+PUB446
  PUB448  +PUB447
##PUB44954+CLOCKP
##PUB450  = PUB448  * (  0.21930              )
##PUB451  = PUB448  * (  -0.4369              )
##PUB452  = PUB448  * (   .2193               )
##PUB453  = PUB450 - PUB662
##PUB45662+PUB453
  PUB455  +PUB454
##PUB45662+PUB455
##PUB457  = PUB451 + PUB456 - PUB663
##PUB45862+PUB457
  PUB459  +PUB458
##PUB46062+PUB459
##PUB461  = PUB452 + PUB460
##PUB462  = PUB461 * (   .80355               )
##PUB463  = PUB461 * ( -1.77186               )
##PUB020  = PUB461
C
C
C
  PUB464  +PUB020
##PUB46562+PUB464
  PUB466  +PUB465
##PUB66754+CLOCKP
##PUB468  = PUB466  * (   .07122              )
##PUB469  = PUB466  * (  -.10963              )
##PUB470  = PUB466  * (   .07122              )
##PUB471  = PUB468 - PUB469
##PUB47262+PUB471
  PUB473  +PUB472
##PUB47462+PUB473
##PUB475  = PUB469 + PUB474 - PUB451
##PUB47662+PUB475
  PUB477  +PUB476
##PUB47862+PUB477
##PUB479  = PUB470 + PUB478
##PUB480  = PUB479 * (   .84523               )
##PUB481  = PUB479 * (  -1.8122               )
##ILFLVB  = PUB479
```

```
DELTAT
      CLOCKP
      PUB436
      CLOCKP
      CLOCKP
DELTAT
      PUB469
      CLOCKP
      PUB449
      CLOCKP
      CLOCKP
DELTAT
      PUB467
      CLOCKP
```

```
C
C
C
##PUB48254+CLOCKP                                                    DELTAT
##PUB48362+SNPOUC                                                          CLOCKP
  PUB484  +PUB483
##PUB485  = PUB484 + PUB491
##PUB48662+PUB485                                                          PUB482
  PUB487  +PUB486
##PUB48862+PUB487                                                          CLOCKP
##PUB489  =PUB484 * .82094
##PUB021  =-PUB489 + PUB488
  PUB490  +PUB021
##PUB491  =PUB490 * .82094
C
##PUB022  = SQRT( SNPOUC  * SNPOUC  + PUB021 * PUB021 )
C
C
  PUB492  +PUB022
##PUB49362+PUB492                                                          CLOCKP
  PUB494  +PUB493
##PUB49554+CLOCKP                                                    DELTAT
##PUB496  = PUB454  * (  0.21930              )
##PUB497  = PUB454  * (  -0.4369              )
##PUB498  = PUB454  * (   .2193               )
##PUB499  = PUB496 - PUB508
##PUB50062+PUB499                                                          PUB495
  PUB501  +PUB100
##PUB50262+PUB501                                                          CLOCKP
##PUB5C3  = PUB497 + PUB502 - PUB509
##PUB50462+PUB503                                                          PUB495
  PUB505  +PUB504
##PUB50662+PUB505                                                          CLOCKP
##PUB507  = PUB498 + PUB506
##PUB508  = PUB507 * (   .80355               )
##PUB509  = PUB507 * ( -1.77186               )
##PUB023  = PUB507
C
  PUB510  +PUB023
##PUB51162+PUB510                                                          CLOCKP
  PUB512  +PUB511
##PUB51354+CLOCKP                                                    DELTAT
##PUB514  = PUB513  * (   .07122              )
##PUB515  = PUB512  * (  -.10963              )
##PUB516  = PUB512  * (   .07122              )
##PUB517  = PUB514 - PUB526
##PUB51862+PUB517                                                          PUB513
  PUB519  +PUB518
##PUB52062+PUB519                                                          CLOCKP
##PUB521  = PUB515 + PUB520 - PUB527
##PUB52262+PUB521                                                          PUB513
  PUB523  +PUB522
##PUB52662+PUB523                                                          CLOCKP
##PUB525  = PUB516 + PUB524
##PUB526  = PUB525 * (   .84523               )
##PUB527  = PUB525 * (  -1.8122               )
##ILFLVC  = PUB525
C
C
C
02PUB024  +SNPOUA
```

```
       1.0        0.06.87075E-9
       1.0 4.1445E-46.87075E-9
02PUB025  +PUB024
       1.0        0.0        0.0
       1.02.34584E-42.80764E-8
02SNAOUA  +PUB025                                          1.44
       0.0        0.0        1.0
     420.0      588.0        1.0
C
C
C
02PUB026  +SNPOUB
       1.0        0.06.87075E-9
       1.0 4.1445E-46.87075E-9
02PUB027  +PUB026
       1.0        0.0        0.0
       1.02.34584E-42.80764E-8
02SNAOUB  +PUB027                                          1.44
       0.0        0.0        1.0
     420.0      588.0        1.0
C
C
02PUB028  +SNPOUC
       1.0        0.06.87075E-9
       1.0 4.1445E-46.87075E-9
02PUB029  +PUB028
       1.0        0.0        0.0
       1.02.34584E-42.80764E-8
02SNAOUC  +PUB029                                          1.44
       0.0        0.0        1.0
     420.0      588.0        1.0
C
C
C
C
##PUB548  = 0.001326
#2PUB549  = FRQCYA * 2 * PI * PUB548
##PUB550  = PUB549 * PUB549
 1PUB546  =SNAOUA
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB547  = SNAOUA / ( 1 + PUB550  )
##PUB528  = ( PUB546  - PUB547 ) * (1 + PUB550 ) / PUB549
C
C
##PUB030  = SQRT( SNAOUA  * SNAOUA  + PUB528 * PUB528 )
C
C
 1PUB031  =PUB030
       1.0
       1.01.22627E-2
##PUB032  = PUB031 - PUB037 -PUB038
##PUB033  = FRQCYA * PUB032
 1PUB034  =PUB033
       1.0
       0.07.95775E-2
  PUB037  =PUB034
##PUB035  = FRQCYA * PUB034
 1PUB036  =PUB035
       1.0
       0.07.95775E-2
```

```
  PUB038  =PUB036
##PUB039  = PUB036 + PUB032
##PUB040  = 0.7050
##PUB04160=PUB040 +PUB040 +PUB039                                    PUB039PUB040
C
C
C
##PUB531  = 0.001326
##PUB532  = FRQCYA * 2 * PI * PUB531
##PUB533  = PUB532 * PUB532
 1PUB529  =SNAOUA
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB530  = SNAOUA / ( 1 + PUB533  )
##PUB042  = ( PUB529  - PUB530 ) * (1 + PUB533 ) / PUB532
C
C
##PUB046  =  COS (FHREFA )
##PUB047  = -1 * SIN (FHREFA  )
##PUB044  = PUB046 * PUB043
##PUB045  = PUB047 * SNAOUA
##PUB043  = PUB045 + PUB044
##PHAOUA  = PUB043 / PUB041
77PUB046  0.0
77PUB047  -1.0
C
C
##PUB553  = 0.001326
##PUB554  = FRQCYB * 2 * PI * PUB553
##PUB555  = PUB554 * PUB554
 1PUB551  =SNAOUB
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB552  = SNAOUB / ( 1 + PUB555  )
##PUB534  = ( PUB551  - PUB552 ) * (1 + PUB555 ) / PUB554
C
C
##PUB048  = SQRT( SNAOUB  * SNAOUB  + PUB534 * PUB534 )
C
C
 1PUB049  =PUB048
       1.0
       1.01.22627E-2
##PUB050  = PUB049 - PUB055 -PUB056
##PUB051  = FRQCYB * PUB050
 1PUB052  =PUB051
       1.0
       0.07.95775E-2
  PUB055  =PUB052
##PUB053  = FRQCYB * PUB052
 1PUB054  =PUB053
       1.0
       0.07.95775E-2
  PUB056  =PUB054
##PUB057  = PUB054 + PUB050
##PUB058  = 0.7050
##PUB05960=PUB058 +PUB058 +PUB057                                    PUB057PUB058
C
C
C
##PUB537  = 0.001326
```

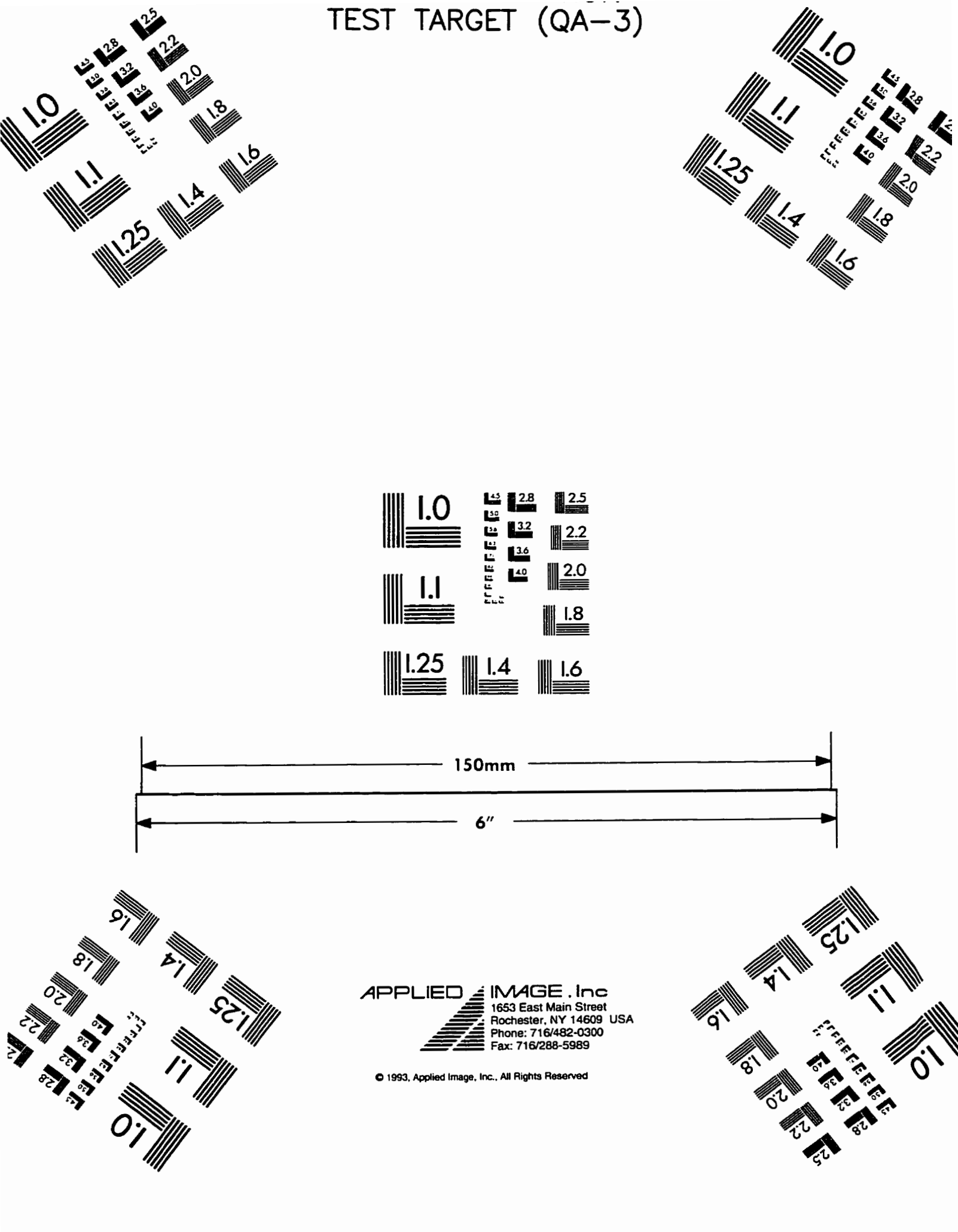
```
##PUB538  = FRQCYB * 2 * PI * PUB537
##PUB539  = PUB538 * PUB538
 1PUB535  +SNAOUB
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB536  = SNAOUB / ( 1 + PUB539  )
##PUB060  = ( PUB535  - PUB536 ) * (1 + PUB539 ) / PUB538
C
C
##PUB064  =  COS (PHREFB )
##PUB065  = -1 * SIN (PHREFB  )
##PUB062  = PUB064 * PUB060
##PUB063  = PUB065 * SNAOUB
##PUB061  = PUB063 + PUB062
##PHAOUB  = PUB061 / PUB059
77PUB064  0.0
77PUB065  -1.0
C
C
C
C
##PUB558  = 0.001326
##PUB559  = FRQCYC * 2 * PI * PUB558
##PUB560  = PUB559 * PUB559
 1PUB556  +SNAOUC
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB557  = SNAOUC / ( 1 + PUB560  )
##PUB540  = ( PUB556  - PUB557 ) * (1 + PUB560 ) / PUB559
C
C
##PUB066  = SQRT( SNAOUC  * SNAOUC  + PUB540 * PUB540 )
C
C
 1PUB067  +PUB066
       1.0
       1.01.22627E-2
##PUB069  = PUB067 - PUB073 -PUB074
##PUB069  = FRQCYC * PUB068
 1PUB070  +PUB069
       1.0
       0.07.95775E-2
  PUBC73  -PUB070
##PUB071  = FRQCYC * PUBC70
 1PUB072  -PUB071
       1.0
       0.07.95775E-2
  PUB074  +PUB072
##PUB075  = PUB072 + PUB068
##PUB076  = 0.7050
##PUB07760+PUB076 +PUB076 +PUB075                                  PUB075PUB076
C
C
C
##PUB543  = 0.001326
##PUB544  = FRQCYC * 2 * PI * PUB543
##PUB545  = PUB544 * PUB544
 1PUB541  +SNAOUC
       1.0
       1.0  0.001326
##PUB542  = SNAOUC / ( 1 + PUB545  )
##PUB078  = ( PUB541  - PUB542 ) * (1 + PUB545 ) / PUB544
C
C End of $INCLUDE.  File name =                    30
##PUB082  =  COS (PHREFC )
##PUB083  = -1 * SIN (PHREFC  )
##PUB080  = PUB082 * PUB078
##PUB081  = PUB083 * SNAOUC
##PUB079  = PUB081 + PUB080
##PHAOUC  = PUB079 / PUB077
77PUB082  0.0
77PUB083  -1.0
C
C
C
C
C
##PUB084  = PHAOUA * PLGAIN
 1PUB067  +PUB084
       1.0
       0.0    0.6513
##PUB085  = 1.0   * PUB084
##PUB086  = 60.000
  FRQOUA  +PUB085 +PUB087 +PUB086
##PUB088  = FRQOUA * 2 * PI
##PUB069960-ZERO   +ZERO   +PUB088                                 PUB088
##PUB090  = PUB092 .GE. ( 2.0 * PI )
##PUB091  = PUB092 * PUB090
##PHREFA  = PUB092 + DELTAT * PUB089 - PUB091
  PUB092  +PHREFA
##PUB093  = PHREFA  -( 55.700 * PI/ 180.)
##PLLOUA  = COS ( PUB093  )
C
C
C
C
##PUB094  = PHAOUB * PLGAIN
 1PUB097  +PUB094
       1.0
       0.0    0.6513
##PUB095  = 1.0   * PUB094
##PUB096  = 60.000
  FRQOUB  +PUB095 +PUB097 +PUB096
##PUB098  = FRQOUB * 2 * PI
##PUB099960-ZERO   +ZERO   +PUB098                                 PUB098
##PUB100  = PUB102 .GE. ( 2.0 * PI )
##PUB101  = PUB102 * PUB100
##PHREFB  = PUB102 + DELTAT * PUB099 - PUB101
  PUB102  +PHREFB
##PUB103  = PHREFB  -( 55.700 * PI/ 180.)
##PLLOUB  = COS ( PUB103  )
C
C
C
C
C
##PUB104  = PHAOUC * PLGAIN
 1PUB107  +PUB104
       1.0
       0.0    0.6513
##PUB105  = 1.0   * PUB104
##PUB106  = 60.000
```

```
  FRQOUC  =PUB105 *PUB107 *PUB106
@@PUB108  = FRQOUC * 2 * PI
@@PUB10960=ZERO    =ZERO    *PUB108                                    PUB108
@@PUB110  = PUB112 .GE. ( 2.0 * PI )
@@PUB111  = PUB112 * PUB110
@@PHREFC  = PUB112 + DELTAT * PUB109 - PUB111
  PUB112  =PHREFC
@@PUB113  = PHREFC  -( 55.700 * PI/ 180.)
@@PLLOUC  = COS ( PUB113  )
C
C
C RMS LINE CURRENT
@@ILRMSA  = ILFLVA * 3000.0 * 0.7071 / 5.
@@ILRMSB  = ILFLVB * 3000.0 * 0.7071 / 5.
@@ILRMSC  = ILFLVC * 3000.0 * 0.7071 / 5.
C
C
C
C
C
C
@@PUB114  = ILRMSA .GE. 1800.0
@@PUB115  = ILRMSA .LE. 1400.0
@@PUB11654=PUB115                                                    17.E-3
@@PUB117  =PUB114 .OR. PUB116
@@TSRAUA  = .NOT. PUB116 .AND. PUB117
  PUB116  =TSRAUA
C
C
C
C
@@PUB119  = ILRMSB .GE. 1800.0
@@PUB120  = ILRMSB .LE. 1400.0
@@PUB12154=PUB120                                                    17.E-3
@@PUB122  =PUB119 .OR. PUB121
@@TSRAUB  = .NOT. PUB121 .AND. PUB122
  PUB123  =TSRAUB
C
C
C
C
C
@@PUB124  = ILRMSA .GE. 1800.0
@@PUB125  = ILRMSA .LE. 1400.0
@@PUB12654=PUB125                                                    17.E-3
@@PUB127  =PUB124 .OR. PUB126
@@TSRAUC  = .NOT. PUB126 .AND. PUB127
  PUB128  =TSRAUC
C
C
C
@@TSRONA  = TSRAUA .OR. TSRMAN
@@TSRONB  = TSRAUB .OR. TSRMAN
@@TSRONC  = TSRAUC .OR. TSRMAN
C
C AFTER TSR OPERATION, BLOCK TCR FOR 1 CYCLE
@@TSRNOA  = .NOT. TSRONA
@@TSRNOB  = .NOT. TSRONB
@@TSRNOC  = .NOT. TSRONC
C
@@TCRDLA54=TSRNOA                                                    17.E-3
@@TCRDLB54=TSRNOB                                                    17.E-3
@@TCRDLC54=TSRNOC                                                    17.E-3
C
@@TCRONA  = TCRMAN .AND. TCRDLA
@@TCRONB  = TCRMAN .AND. TCRDLB
@@TCRONC  = TCRMAN .AND. TCRDLC
C
C
C
C
@@PUB129  = FRQCYA * 2
  PUB145  =ALPHAD                                          1.0140.00180.00
@@PUB146  = ((PUB145/(180.0 * PUB129)-DELTAT) * PUB129)
  PUB130  =-PLLOUA                                                   1.0
@@PUB13158=PUB129                                                    0.0   1.0PLLOUAZERO
@@PUB13258=PUB129                                                    0.0   1.0PUB13CZERO
@@PUB133  = PUB131 .GE. PUB145
@@PUB134  = PUB132 .GE. PUB146
@@PUB13554=PUB133                                                   40.E-5
@@PUB13654=PUB134                                                   40.E-5
@@PUB137  = .NOT. PUB135 .AND. PUB133
@@PUB138  = .NOT. PUB136 .AND. PUB134
@@PUB139  = PUB137 .OR. PUB143
@@PUB140  = PUB138 .OR. PUB144
@@PUB141  = TCRONA .AND. PUB139  .AND. PUB133
@@PUB142  = TCRONA .AND. PUB140  .AND. PUB134
  PUB143  =PUB141
  PUB144  =PUB142
90THYRPA  = PUB141 .OR. THYFIA
90THYRNA  = PUB142 .OR. THYFIA
C
C
C
C
@@PUB147  = FRQCYB * 2
  PUB163  =ALPHAD                                          1.0140.00180.00
@@PUB164  = ((PUB163/(180.0 * PUB147)-DELTAT) * PUB147)
  PUB148  =-PLLOUB                                                   1.0
@@PUB14958=PUB147                                                    0.0   1.0PLLOUBZERO
@@PUB15058=PUB147                                                    0.0   1.0PUB14BZERO
@@PUB151  = PUB149 .GE. PUB164
@@PUB152  = PUB150 .GE. PUB164
@@PUB15354=PUB151                                                   40.E-5
@@PUB15454=PUB152                                                   40.E-5
@@PUB155  = .NOT. PUB153 .AND. PUB151
@@PUB156  = .NOT. PUB154 .AND. PUB152
@@PUB157  = PUB155 .OR. PUB161
@@PUB158  = PUB156 .OR. PUB162
@@PUB159  = TCRONB .AND. PUB157  .AND. PUB151
@@PUB160  = TCRONB .AND. PUB158  .AND. PUB152
  PUB161  =-PUB159
  PUB162  =*PUB160
90THYRFB  = PUB159 .OR. THYFIB
90THYRNB  = PUB160 .OR. THYFIB
C
C
@@PUB165  = FRQCYC * 2
  PUB181  =ALPHAD                                          1.0140.00180.00
@@PUB182  = ((PUB181/(180.0 * PUB165)-DELTAT) * PUB165)
  PUB166  =-PLLOUC                                                   1.0
@@PUB16758=PUB165                                                    0.0   1.0PLLOUCZERO
```

```
##PUB16858-PUB165
##PUB169   = PUB167 .GE. PUB182                                    0.0   1.0PUB166ZERO
##PUB170   = PUB168 .GE. PUB182
##PUB17154-PUB169
##PUB17254-PUB170                                                40.E-5
##PUB173   = .NOT. PUB171 .AND. PUB169                           40.E-5
##PUB174   = .NOT. PUB172 .AND. PUB170
##PUB175   = PUB173 .OR. PUB179
##PUB176   = PUB174 .OR. PUB180
##PUB177   = TCRONC .AND. PUB175  .AND. PUB169
##PUB178   = TCRONC .AND. PUB176  .AND. PUB170
  PUB179  -PUB177
  PUB180  -PUB178
90THYRPC   = PUB177 .OR. THYFIC
90THYRNC   = PUB178 .OR. THYFIC
C
C
C
C
##ALPHAD56-XINPUT
           15.0           180.0
           15.06          170.0
           16.14          160.0
           17.36          156.0
           20.37          152.0
           23.76          149.0
           26.43          147.5
           28.37          146.5
           30.75          145.7
           32.92          145.0
           34.16          144.1
           45.01          143.0
           51.49          142.0
           9999.
C
C
C
  PUB183  -VCAP1A                                                1.0
##PUB18452-PLUS1                                                1.0    0.0          VCAP1A
##PUB18552-PLUS1                                                1.0    0.0          PUB183
##PUB18654-PUB184                                                      50.E-6
##PUB18754-PUB185                                                      50.E-6
##PUB188   = .NOT. PUB186 .AND. PUB184
##PUB189   = .NOT. PUB187 .AND. PUB185
##PUB190   = PUB188 + PUB189
##PUB191   = PUB190 .AND. TSRONA
##PUB192   = PUB191 .OR.  PUB193
  PUB193  -THYFIA
##THYFIA   = PUB192 .AND. TSRONA
C
C
C
C
  PUB194  -VCAP1B                                                 1.0
##PUB19552-PLUS1                                                 1.0    0.0          VCAP1B
##PUB19652-PLUS1                                                 1.0    0.0          PUB194
##PUB19754-PUB195                                                      50.E-6
##PUB19854-PUB196                                                      50.E-6
##PUB199   = .NOT. PUB197 .AND. PUB195
##PUB200   = .NOT. PUB198 .AND. PUB196
##PUB201   = PUB199 + PUB200
##PUB202   = PUB2C1 .AND. TSRONB
##PUB203   = PUB202 .OR.  PUB204
  PUB204  -THYFIB
##THYFIB   = PUB203 .AND. TSRONB
C
C
C
C
C
  PUB205  -VCAP1C                                                 1.0
##PUB20652-PLUS1                                                 1.0    0.0          VCAP1C
##PUB20752-PLUS1                                                 1.0    0.0          PUB205
##PUB20854-PUB206                                                      50.E-6
##PUB20954-PUB207                                                      50.E-6
##PUB210   = .NOT. PUB208 .AND. PUB206
##PUB211   = .NOT. PUB209 .AND. PUB207
##PUB212   = PUB210 + PUB211
##PUB213   = PUB212 .AND. TSRONC
##PUB214   = PUB213 .OR.  PUB215
  PUB215  -THYFIC
##THYFIC   = PUB214 .AND. TSRONC
C
C
C
C
331LFLVA
331LRMSA
33XINPUT
3316EA
332RMS_A
33ALPHAD
33THYFIA
33PLLOUA
33FROOUA
33VCAFIA
33TRIGGP
C
BLANK ENDS TACS DATA
C
C DEBUT DU RESEAU
C
C Navajo to Longhouse Valley, 3 pi section
C
  NALH1ANALH1A                  1.53 15.33
  NALH1BNALH3B                  1.53 15.33
  NALH1CNALH2C                  1.53 15.33
  NALH1ANALH1X                                .13643
  NALH1BNALH1X                                .13643
  NALH1CNALH1X                                .13643
  NALH1XNALH1D                               1.1715
C
  NALH1DNALH2D                  3.27  8.21                                  1
C
  NALH2ANALH1A                  1.53 15.33
  NALH2BNALH3B                  1.53 15.33
  NALH2CNALH1C                  1.53 15.33
  NALH2ANALH2X                                .26173
  NALH2BNALH2X                                .26173
  NALH2CNALH2X                                .26173
  NALH2XNALH2D                               2.7633
C
```

```
  NALH2DNALH3D              3.27  8.21
C
  NALH3ALHKA1A              1.53 15.33
  NALH3BLHKA1B              1.53 15.33
  NALH3CLHKA1C              1.53 15.33
  NALH3ANALH3X                          .26170
  NALH3BNALH3X                          .26170
  NALH3CNALH3X                          .26170
  NALH3XNALH3D                         2.3430
C
  NALH3DLHKA1D              3.27  8.21
C
C
C  LIGNE ENTRE Longhouse Valley et Kayenta, 1 pi section
C
C
  LHKA1AKW230A               1.7 15.90
  LHKA1BKW230B               1.7 15.90
  LHKA1CKW230C               1.7 15.90
  LHKA1ALAKA1X                          .26880
  LHKA1BLAKA1X                          .26880
  LHKA1CLAKA1X                          .26880
  KW230AKW230X                          .13800
  KW230BKW230X                          .13800
  KW230CKW230X                          .13800
  LHKA1XLHKA1D                         2.4135
  KW230XKW230D                         1.2420
C
  LHKA1DKW230D              3.73  8.87
C
C LIGNE ENTRE Kayenta ET Shiprock: 4 pi sections
C
C
  ASCSWAKASH1A             2.12521.175
  ASCSWBKASH1B             2.12521.175
  ASCSWCKASH1C             2.12521.175
  ASCSWAASCSWX                          .18240
  ASCSWBASCSWX                          .18240
  ASCSWCASCSWX                          .18240
  ASCSWXASCSWD                         1.4598
C
  ASCSWDKASH1D            4.432510.858
C
  KASH1AKASH1A             2.12521.175
  KASH1BKASH1B             2.12521.175
  KASH1CKASH1C             2.12521.175
  KASH1AXKASH1X                         .36496
  KASH1BXKASH1X                         .36496
  KASH1CXKASH1X                         .36496
  KASH1XXKASH1D                        2.9196
C
  KASH1DKASH1D            4.432510.858
C
  KASH2AKASH1A             2.12521.175
  KASH2BKASH1B             2.12521.175
  KASH2CKASH1C             2.12521.175
  KASH2AXKASH1X                         .36496
  KASH2BXKASH1X                         .36496
  KASH2CXKASH1X                         .36496
  KASH2XXKASH1D                        2.9196
C
  KASH2DKASH1D            4.432510.858
C
  KASH3AKASH4A             2.12521.175
  KASH3BKASH4B             2.12521.175
  KASH3CKASH4C             2.12521.175
  KASH3AXKASH3X                         .36496
  KASH3BXKASH3X                         .36496
  KASH3CXKASH3X                         .36496
  KASH4AXKASH4X                         .18248
  KASH4BXKASH4X                         .18248
  KASH4CXKASH4X                         .18248
  KASH3XXKASH3D                        2.9196
  KASH4X                               1.4598
C
  KASH3D                  4.432510.858
C
C SOURCE IMPEDANCE       MAX
  NASEQANAS1PA                          46.6
  NASEQBNAS1PB                          46.6
  NASEQCNAS1PC                          46.6
C
  SHSEQAKASH4A                          14.7
  SHSEQBKASH4B                          14.7
  SHSEQCKASH4C                          14.7
C
C
C
C KAYENTA ASC REACTOR IMPEDANCES
C REACTOR Q=50 TO MATCH STRUK G
C REACTOR IMPEDANCE  3.4MH * 377 = 1.282 OHMS
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  KAASCAPUB217                .02564 1.282
  PUB216KE230A                .02564 1.282
C
C SERIES VALVE LOSS RESISTANCE
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB217PUB218                 0.001
  PUB219PUB216                 0.001
C
C SNUBBER -
C
C
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB217PUB216                340.00      59.E-3
C
C
C
C KAYENTA ASC REACTOR IMPEDANCES
C REACTOR Q=50 TO MATCH STRUK G
C REACTOR IMPEDANCE  3.4MH * 377 = 1.282 OHMS
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  KAASCBPUB221                .02564 1.282
  PUB220KE230B                .02564 1.282
C
C SERIES VALVE LOSS RESISTANCE
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB221PUB222                 0.001
  PUB223PUB220                 0.001
C
C SNUBBER -
C
C 1111112222223333344444RRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB221PUB220                340.00      59.E-3
```

```
C
C
C
C
C KAYENTA ASC REACTOR IMPEDANCES
C REACTOR Q=50 TO MATCH STRUK G
C REACTOR IMPEDANCE  3.4MH * 377 = 1.282 OHMS
C 1111111222222333333444444RRRRRRLLLLLLCCCCCC
  KAASCCPUB225              .02564 1.282
  PUB224KE230C              .02564 1.282
C
C SERIES VALVE LOSS RESISTANCE
C 1111111222222333333444444RRRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB225PUB226               0.001
  PUB227PUB224               0.001
C
C SNUBBER -
C
C 1111111222222333333444444RRRRRRLLLLLLCCCCCC
  PUB225PUB224             340.00      59.E-3
C
C
C
C
C
C  BANC DE COMPENSATEUR A KAYENTA
C
C
C
C
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCRRRRRRLLLLLLCCCCCC
  KW230AKECBA                          40.230
  KW230BKECBB                          40.230
  KW230CKECBC                          40.230
C
C  KAYENTA - 60 OHM SECTION
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCRRRRRRLLLLLLCCCCCC
  KECBA KAASCA                         66.315
  KECBB KAASCB                         66.315
  KECBC KAASCC                         66.315
C
C  KAYENTA - 15 OHM SECTION
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCRRRRRRLLLLLLCCCCCC
  KAASCAKE230A                         176.84                              3
  KAASCBKE230B                         176.84
  KAASCCKE230C                         176.84
C
C ***************************************************************C
C END OF CAPACITOR BANK
C ***************************************************************
C
BLANK ENDS BRANCH DATA
C
C
C
C
C        INTERRUPTEURS DU RESAU
C   LIGNE SHIPROCK A  GLEN CANYON.
C
C BUS1->BUS2->T CLOSE-->T OPEN--->NSTEP---->VFLASH--->SPEC REQ->REF1->REF2->   I
C
  KE230AASCSWA      -1.0       99.                                            1
  KE230BASCSWB      -1.0       99.
  KE230CASCSWC      -1.0       99.
C
C
C
C THYRISTOR VALVES
C REMEMBER - THE FIRST NODE IS ALWAYS THE ANODE
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCOOOOOOOOOOIIIIIIIIIIVVVVVVVVVVSSSSSSSSSSAAAAAADDDDDD
11PUB218PUB216                                                THYRPA          3
11PUB219PUB217                                                THYRNA          3
C
C
C THYRISTOR VALVES
C REMEMBER - THE FIRST NODE IS ALWAYS THE ANODE
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCOOOOOOOOOOIIIIIIIIIIVVVVVVVVVVSSSSSSSSSSAAAAAADDDDED
11PUB222PUB220
11PUB223PUB221                                                THYRPB          3
                                                              THYRNB          3
C
C
C THYRISTOR VALVES
C REMEMBER - THE FIRST NODE IS ALWAYS THE ANODE
C BBBBBBDDDDDDCCCCCCCCCCCCOOOOOOOOOOIIIIIIIIIIVVVVVVVVVVSSSSSSSSSSAAAAAADDDDED
11PUB226PUB224
11PUB227PUB225                                                THYRPC          3
                                                              THYRNC          3
C
BLANK ENDS SWITCH DATA
C
C
C  FOR THE SOURCE DATA.
C
14NASEQA     187800.       60.    -113.0                        -1.0
14NASEQB     187800.       60.     128.0                        -1.0
14NASEQC     187800.       60.       8.0                        -1.0
C
C IDEAL TRAFO
14NALH1A      1.0E-20      60.
18NALH1D          1.0NASIFA
14NALH1B      1.0E-20      60.
18NALH1D          1.0NASIFB
14NALH1C      1.0E-20      60.
19NALH1D          1.0NASIFC
C
14SHSEQA     187800.       60      -90.0                        -1.0
14SHSEQB     187800.       60.     150.0                        -1.0
14SHSEQC     187800.       60.      30.0                        -1.0
C
C
BLANK ENDS SOURCE DATA
C
C REQUEST THE DESIRED OUTPUT.
C
C 1111111222222333333444444555555666666777777788888999999000000111111
  NALH1ANASIFA
BLANK ENDS OUTPUT REQUESTS
BLANK
BLANK CARD ENDING
```


TEST TARGET (QA-3)
1.0
1.1
1.25
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.5
2.8
3.2
3.6
4.0
150mm
6"
APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989
© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved