POLYPUBLIE

Calcul des paramètres de la machine asynchrone

François Gauthier

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2017
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie **PolyPublie URL**	https://publications.polymtl.ca/2940/
Conditions d'utilisation **Terms of use**	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence **Citation**	Gauthier, F. (2017). Calcul des paramètres de la machine asynchrone [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2940/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche **Advisors**	Jean Mahseredjian, & Mircea Fratila
Programme **Program**	génie électrique

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CALCUL DES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

FRANÇOIS GAUTHIER

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

DÉCEMBRE 2017

© François Gauthier, 2017.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

CALCUL DES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

présenté par : GAUTHIER François

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. KARIMI Houshang, Ph. D, président

M. MAHSEREDJIAN Jean, Ph. D, membre et directeur de recherche

M. FRATILA Mircea, Ph. D, membre et codirecteur de recherche

M. SHESHYEKANI Keyhan, Ph. D, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé pour ce projet.

Premièrement, mon directeur de recherche, Mr Jean Mahseredjian pour avoir rendu ce projet possible dans le cadre de la Chaire industrielle de recherche CRSNG/Hydro-Québec/RTE/EDF/OPAL-RT en simulation multi-échelle de temps des transitoires dans les réseaux électriques de grandes dimensions et aussi d'avoir cru en moi du début à la fin.

Je voudrais également remercier Mr Ali El Akoum et Mr Mircea Fratila pour leur soutient ainsi que pour les données qu'ils ont partagées pour ce projet.

Je voudrais finalement remercier Omar Saad pour son aide ainsi que pour les données qu'il a partagées.

RÉSUMÉ

Le calcul des paramètres de la machine asynchrone se fait actuellement à partir d'information à tension nominal. Ceci fait en sorte que les paramètres calculés permettent de bien représenter une machine asynchrone à tension nominale, mais ils ont de la difficulté à bien représenter la machine à différents niveaux de tension. De plus, les calculateurs ne fonctionnent qu'avec un seul modèle équivalent de machine asynchrone. Souvent, il s'agit d'un modèle à cage simple et la saturation des inductances de fuite n'est même pas prise en compte. Ceci fait en sorte que les machines asynchrones à rotor complexes ne peuvent pas être utilisées avec ces calculateurs. Finalement, rares sont les calculateurs qui permettent d'utiliser des courbes du couple, courant ou facteur de puissance en fonction de la vitesse pour calculer les paramètres. Ces informations sont parfois disponibles pour certaines machines asynchrones et fournissent d'importantes informations sur les performances de celles-ci.

L'objectif de ce projet de maîtrise est de développer un calculateur de paramètres permettant de bien représenter les machines asynchrones à différent niveaux de tension. Le calculateur doit également être capable de prendre des courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse en entrée. De plus, il faut que le calculateur de paramètres puisse fonctionner avec différents modèles équivalents de machines asynchrones.

Après avoir rappelé les concepts théoriques de la machine asynchrone, différents modèles équivalents sont présentés. Les formules du courant au stator et du couple sont expliquées en détails pour chacun des modèles.

Les différentes parties du calculateur de paramètres sont décrites. La création du système d'équations non-linéaires est expliquée de façon à pouvoir inclure différents modèles de machines asynchrones. Une façon de créer le système d'équations en fonction d'un nombre arbitraire de fonctions est expliquée. Ceci permet de calculer des paramètres à partir de courbes fournies en entrée. Le calcul des paramètres initiaux est présenté de façon général afin de pouvoir l'adapter à différents modèles. La méthode de Levenberg-Marquardt est introduite pour pouvoir trouver les racines du système d'équations non-linéaires.

Le calculateur est premièrement utilisé avec une banque de 115 moteurs asynchrones. Une solution est trouvée pour 58% des moteurs. Les cas où une solution n'a pas été trouvée sont des moteurs de faible puissance. Des courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en

fonction de la vitesse sont ensuite fournies au calculateur. Les paramètres calculés permettent de bien représenter ces courbes. Finalement, des courbes à différents niveaux de tension pour trois moteurs de différentes puissances sont utilisées avec le calculateur de paramètres. Il s'agit de courbes du courant à vide, du couple à rotor bloqué et du courant à rotor bloqué en fonction de la tension. Pour les trois moteurs, les paramètres calculés permettent de bien représenter leur comportement à différents niveaux de tension.

Les principales contributions de ce calculateur de paramètres sont : pouvoir utiliser différents modèles équivalents avec le calculateur, pouvoir fournir des courbes de spécifications en entrées et permettre de calculer des paramètres pouvant représenter la machine asynchrone à différents niveaux de tension.

ABSTRACT

Parameter calculations for asynchronous machines are normally done from data that are provided at nominal voltage. Equivalent models with parameters calculated from these methods can accurately simulate an asynchronous machine at nominal voltage, but they lack precision when the voltage level is below nominal. Also, most parameter calculators only work for one type of equivalent model. It is often a single cage model and the leakage inductance saturation included in the model. This means that parameters from machines with complex rotor cannot be calculated with these calculators. Few calculators allow curves (torque, current or power factor as a function of speed) to be used as information to calculate parameters. These curves are sometimes provided for an asynchronous machine and provide important information on its performance.

The objective of this thesis project is to develop a parameter calculator that can accurately represent asynchronous machine at different voltage level. The calculator must be able to take curves as input. Also, the calculator must be able to be adapted for different equivalent model of asynchronous machines.

The basics theory of the asynchronous machine is first explained. Then, a few equivalent models are presented. The formulas for the torque, current and power factor are explained for every model.

The different parts of the calculator are described. The creation of the non-linear equation system for different models of asynchronous machine is explained. A way to create the equation system for an arbitrary number of equation is presented. This allow curves to be used with the calculator. The initial parameters calculation is detailed in a general way to allow different models to be used. The Levenberg-Marquardt method is then introduced to find a solution for the non-linear equation system and thus calculate the parameters.

A database of 115 induction motors is used to test the calculator. A solution is found for 58% of the motor. The motors for which a solution wasn't found are low power motors. Then, curves of torque, current and power factor as a function of speed are used to calculate the parameters of an asynchronous machine. The curves are accurately represented by the models with the calculated parameters. Finally, information from different level of voltage are fed to the calculator to calculate parameters from three motors of different power. This information come

from no-load test and locked rotor test. For all three motors, the parameter calculated can accurately represent the motor at different voltage level.

The main contribution of this thesis is an asynchronous machine parameter calculator that can be used with different equivalent models. Also, torque, current and power factor curves can be used as input for the calculator. The calculator can also accurately represent the performance of an asynchronous machine at different voltage level if no-load and locked rotor curves are used.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VIII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES ANNEXES XIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE 6

2.1 La machine asynchrone 6

2.2 Modèle équivalent 7

2.3 Calcul du couple de la machine asynchrone 10

2.4 Rotor complexe 11

2.5 Saturation des inductances de fuite 15

CHAPITRE 3 CALCUL DES PARAMÈTRES 17

3.1 Création du système d'équations à résoudre 17

3.1.1 Exemple avec cinq spécifications 18

3.1.2 Création du système d'équation à partir de courbes 20

3.1.3 Couple maximum 21

3.1.4 Spécifications à différents niveaux de tension 22

3.1.5 Discussion 23

3.2 Calcul des paramètres initiaux 23

3.2.1 Bornes sur les paramètres 24

3.3 Algorithme de résolution 25
3.3.1 Méthode de Newton-Raphson 25
3.3.2 Méthode de Levenberg-Marquardt 27
3.3.3 Variation du pas d'optimisation 28
3.3.4 Respect des bornes sur les paramètres 28
3.4 Structure du code 29
CHAPITRE 4 RÉSULTATS 33
4.1 Calcul de paramètre à partir d'informations de la plaque signalétique 33
4.1.1 Calcul des paramètres sans couple maximal 33
4.1.2 Calcul des paramètres avec le couple maximal 42
4.2 Calcul des paramètres à partir de courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse 50
4.3 Calcul des paramètres à partir de courbes d'essais à différents niveaux de tension 54
4.3.1 Moteur de 200 kW 55
4.3.2 Moteur de 300 kW 58
4.3.3 Moteur de 400kW 61
4.4 Discussion des résultats 64
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 66
5.1 Contributions 66
5.2 Limites et contraintes 66
5.3 Nouvelles voies de recherche et recommandation 67
BIBLIOGRAPHIE 69
ANNEXE A – LISTE DES MOTEURS DE LA BANQUE DE DONNÉES 71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Paramètre d'une machine asynchrone à cage simple. 11

Tableau 4.1 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #22. 34

Tableau 4.2 : Paramètre calculé pour le moteur #22 du Tableau 4.1. 35

Tableau 4.3 : Erreur sur les spécifications du moteur #22 du Tableau 4.1. 36

Tableau 4.4 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #100. 38

Tableau 4.5 : Paramètre calculé pour le moteur #100 du tableau 4.4. 39

Tableau 4.6 : Erreur sur les spécifications du moteur #100 du tableau 4.4. 40

Tableau 4.7 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #32. 42

Tableau 4.8: Paramètre calculé pour le moteur #32 du tableau 4.7. 43

Tableau 4.9 : Erreur sur les spécifications du moteur #32 du tableau 4.7. 44

Tableau 4.10 : Informations de la plaque signalétique du moteur #88. 46

Tableau 4.11 : paramètre calculé pour le moteur #88 du tableau 4.10. 47

Tableau 4.12 : Erreur sur les spécifications du moteur #88 du tableau 4.10. 48

Tableau 4.13 : Information de la plaque signalétique du moteur (prise dans [15]). 50

Tableau 4.14 : Informations du fabricant sur le couple, le courant et le facteur de puissance en fonction de la vitesse[15]. 51

Tableau 4.15 : Paramètres calculés pour le moteur du tableau 4.13. 52

Tableau 4.16 : Informations de la plaque signalétique du moteur de 200kW. 55

Tableau 4.17 : Paramètres calculés pour le moteur de 200 kW. 56

Tableau 4.18 : Information de la plaque signalétique du moteur de 300 kW. 58

Tableau 4.19 : Paramètres calculés pour le moteur de 300 kW. 59

Tableau 4.20 : Information de la plaque signalétique du moteur de 400 kW. 61

Tableau 4.21 : Paramètres calculés pour le moteur de 400 kW. 62

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Couple en fonction du glissement. 3

Figure 1.2 : Couple en fonction du glissement (zoom sur la discontinuité) 3

Figure 1.3 : Erreur entre le couple maximum réel et celui calculé par le calculateur. 4

Figure 2.1 : Modèle équivalent unifilaire d'une machine asynchrone à cage simple. 7

Figure 2.2 : Écoulement de puissance dans une machine asynchrone (image tirée de [16]). 9

Figure 2.3 : Couple en fonction de la vitesse pour une machine asynchrone à cage simple. 11

Figure 2.4 : Couple en fonction de la vitesse pour deux valeurs de résistance au rotor. 12

Figure 2.5 : Modèle équivalent d'une machine asynchrone à cage double. 13

Figure 2.6 : Modèle équivalent d'une machine asynchrone à rotor complexe. 13

Figure 3.1 : Modèle de machine asynchrone à cage double selon les paramètres du vecteur X. .. 18

Figure 3.2 : Diagramme du code du calculateur de paramètres. 31

Figure 4.1 : Couple en fonction de la vitesse 36

Figure 4.2 : Courant en fonction de la vitesse 37

Figure 4.3 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse. 37

Figure 4.4 : Couple en fonction de la vitesse. 40

Figure 4.5 : Courant en fonction de la vitesse. 41

Figure 4.6 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse. 41

Figure 4.7 : Couple en fonction de la vitesse. 44

Figure 4.8 : Courant en fonction de la vitesse. 45

Figure 4.9 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse. 45

Figure 4.10 : Couple en fonction de la vitesse. 48

Figure 4.11 : Courant en fonction de la vitesse. 49

Figure 4.12 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse. 49

Figure 4.13 : Couple en fonction de la vitesse. 53

Figure 4.14 : Courant en fonction de la vitesse. 53

Figure 4.15 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse. 54

Figure 4.16 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 200 kW.....57

Figure 4.17 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 200kW. 57

Figure 4.18 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 200kW.....58

Figure 4.19 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 300 kW.....60

Figure 4.20 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 300kW. 60

Figure 4.21 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 300kW.....61

Figure 4.22 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 400 kW.....63

Figure 4.23 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 400kW. 63

Figure 4.24 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 400kW.....64

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – LISTE DES MOTEURS DE LA BANQUE DE DONNÉES.....71

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les machines asynchrones sont des machines électriques à courant alternatif. Ce sont des machines permettant de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (dans le cas d'un fonctionnement « moteur ») ou de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique (en fonctionnement « générateur »). Le terme asynchrone vient du fait que la vitesse de rotation du rotor n'est pas fixée par la fréquence des courants qui traverse le stator.

Les moteurs consomment 60 à 70% de l'énergie produite sur un réseau électrique [1]. La majorité des moteurs utilisés dans les secteurs industriel, commercial et domestique sont des moteurs asynchrones. Il est donc important, lors d'études de stabilité de réseaux électriques, d'avoir des modèles précis représentant les machines asynchrones.

Les logiciels de simulation utilisent différents modèles électriques équivalents pour représenter les machines asynchrones. Pour simuler un modèle, il faut d'abord entrer les valeurs des paramètres de ce modèle. Ces valeurs pour une machine sont rarement connues. Les informations disponibles concernant la machine proviennent souvent de la plaque signalétique.

Ces informations sont, entre autres, la tension nominale, la puissance nominale de la machine, le courant nominal, le couple nominal, le courant au démarrage, le couple au démarrage, la fréquence d'opération, la vitesse nominale, la vitesse de synchronisme et le nombre de pôles magnétiques de la machine.

Dans d'autre cas, des courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse de la machine sont disponibles. Ces courbes fournissent plus d'informations sur les performances de la machine à tension nominale. Lorsque des courbes d'essais (à vide ou à rotor bloqué) sont disponibles, cela permet d'avoir des informations sur les performances de la machine à différents niveaux de tension.

Il est donc utile d'avoir une façon de calculer les paramètres électriques du modèle équivalent de la machine asynchrone à partir d'informations connues sur les performances de la machine.

Il existe différents calculateurs de paramètres pour les machines asynchrones dans la littérature. Certains calculateurs utilisent des méthodes non-itératives pour calculer les paramètres [2]-[4]. Ces méthodes utilisent des formules à partir des informations de la machine (puissance, couple nominal, courant nominal, etc.) pour faire un calcul simple des paramètres. Il existe des erreurs entre les

spécifications du fabricant (puissance, couple nominal, courant nominal, etc.) et les spécifications du modèle de la machine asynchrone dont les paramètres ont été calculés par ces méthodes. Ceci est dû à la non-linéarité des équations du courant et du couple de la machine asynchrone.

En ce qui a trait aux méthodes itératives, il existe différentes méthodes avec leurs forces et leurs faiblesses. Certaines méthodes utilisent le modèle de machine asynchrone à cage simple [5]-[8]. Ce modèle n'est pas assez complexe pour bien représenter les machines à rotor complexe.

D'autres calculateurs utilisent un modèle avec des paramètres variables au rotor [9]-[10]. Par contre, il existe une erreur au niveau du couple maximum dû au calculateur et au modèle. Les paramètres au rotor du modèle utilisé dans les références [9]-[10] varient de la façon suivante. Lorsque $s > s_{max}$:

$$R_2(s) = \left(0.5 + 0.5\sqrt{\frac{s}{s_{max}}}\right) R_{20} \qquad (1\text{-}1)$$

$$X_2(s) = \left(0.4 + 0.6\sqrt{\frac{s_{max}}{s}}\right) X_{20} \qquad (1\text{-}2)$$

Lorsque $s \leq s_{max}$

$$R_2(s) = R_{20}$$

$$X_2(s) = X_{20}$$

Les paramètres R_{20} et X_{20} sont respectivement la résistance et la réactance au rotor lorsque la fréquence des courants au rotor est basse, s est le glissement et s_{max} est le glissement au couple maximum. La valeur du glissement au couple maximal est calculée analytiquement selon un modèle à cage simple.

Le modèle en [9]-[10] utilise des paramètres constants (comme un modèle à cage simple) pour une valeur du glissement entre 0 et le glissement maximal. Pour un glissement plus grand que le glissement maximal calculé, les paramètres varient selon le glissement (pour simuler un rotor complexe). Ceci entraine une discontinuité dans la courbe du couple en fonction du glissement (voir figure 1.1 et 1.2).

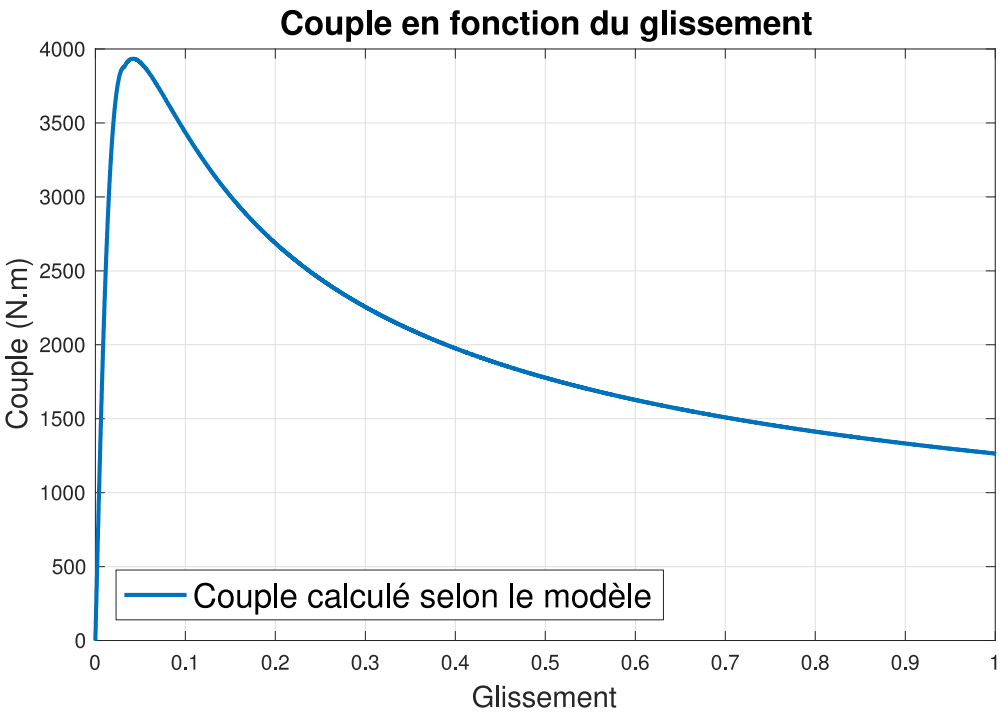


Figure 1.1 : Couple en fonction du glissement.

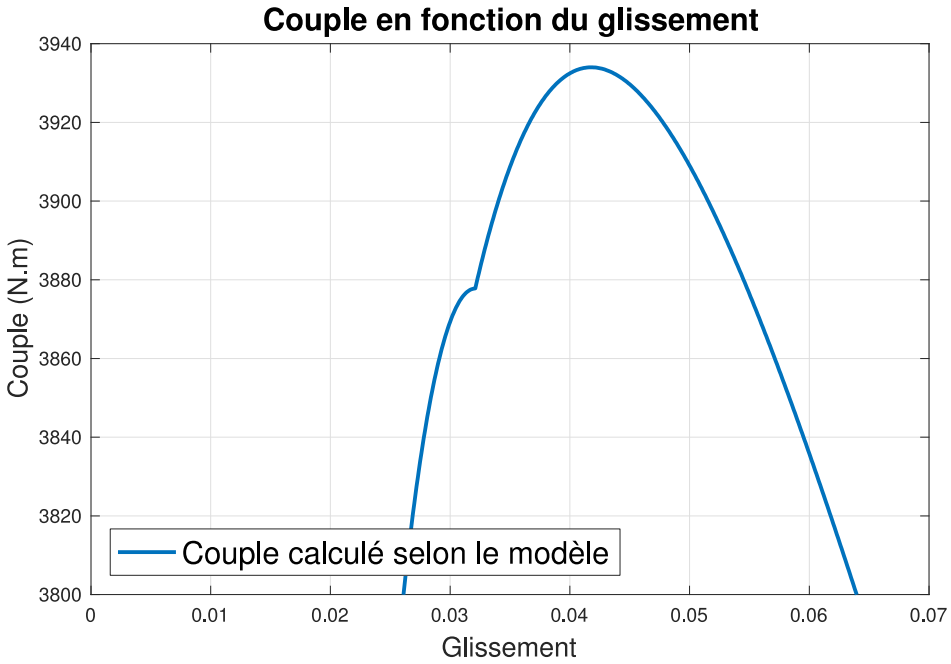


Figure 1.2 : Couple en fonction du glissement (zoom sur la discontinuité)

Le modèle avec les paramètres calculés par le calculateur est supposé représenté le couple maximal fournit en entrée. Par contre, le couple maximal est calculé selon un modèle à cage simple et ne représente pas le couple maximal du modèle (voir figure 1.3). Il existe donc toujours une erreur entre la valeur du couple maximal fournie en entrée et le couple maximal selon les paramètres calculés.

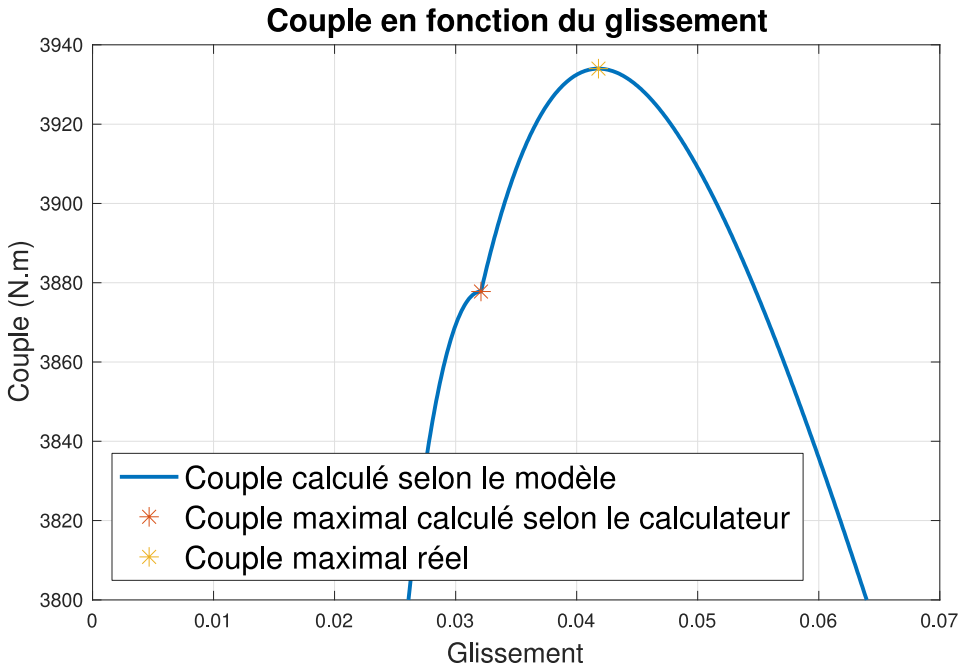


Figure 1.3 : Erreur entre le couple maximum réel et celui calculé par le calculateur.

Différents modèles non conventionnels sont parfois utilisés [11], mais le calculateur n'est pas précis et des erreurs existent au niveau des spécifications.

Certains calculateurs [12]-[13] utilisent un modèle à cage double et permettent d'avoir le couple maximum en entrée. Tous les calculateurs précédents [2]-[13] n'incluent pas la saturation des inductances de fuite dans le calcul des paramètres. La saturation ajoute une composante non linéaire au calcul des paramètres, mais permet d'avoir un meilleur modèle pour représenter les performances des machines asynchrones. Dans certains cas, l'ajout de la saturation de certaines composantes dans le modèle est nécessaire (voir Chapitre 4).

Le code utilisé par EMTP [14] permet de calculer les paramètres pour les modèles de machines asynchrones à rotor à cage simple, double et à encoches profondes. Le code prend en compte la

saturation des inductances de fuite. Le code utilise un calcul des paramètres initiaux restrictifs. Certains moteurs seront rejetés si leurs spécifications dépassent certaines limites (courant au démarrage trop élevé par exemple) parce que les paramètres initiaux calculés seront négatifs. Ceci fait en sorte que le code ne peut pas calculer les paramètres de n'importe quel moteur.

Finalement, un des calculateurs [15] utilise un modèle à cage double qui tient compte de la saturation des inductances de fuites et qui permet d'avoir des courbes (du courant, du couple et du facteur de puissance) en entrée.

Les calculateurs de paramètres mentionnés ci-haut ont tous un point en commun. Ils calculent les paramètres selon des spécifications à tension nominale. Ceci donne un modèle équivalent qui représente bien le comportement de la machine à tension nominal, mais qui a de la difficulté à bien représenter le comportement de la machine à tension réduite. Des tensions réduites surviennent lorsque les machines doivent être opérées sur un réseau isolé (lors d'une de panne du réseau électrique principal par exemple). Les essais à rotor bloqué et à vide permettent d'obtenir des informations sur les performances d'une machine à différents niveaux de tension.

Un des buts du calculateur développé lors de ce projet de maîtrise est de calculer les paramètres d'un modèle équivalent de la machine asynchrone pour que ce modèle représente bien le fonctionnement à différents niveaux de tension. De plus, le calculateur doit pouvoir prendre en entrée différents types de données (des données de plaque signalétique, des courbes à tension nominale ou encore des courbes d'essais). Le code doit également pouvoir calculer les paramètres pour différents modèles équivalents. Ceci pourrait permettre de comparer différents modèles, ainsi que de pouvoir utiliser le calculateur avec un nouveau modèle, si un meilleur modèle est développé.

Un rappel théorique sur les machines asynchrones sera fait dans le chapitre 2. Bien connaitre le fonctionnement des machines ainsi que leur modèle électrique équivalent est crucial pour comprendre le calcul des paramètres. Le chapitre 3 porte sur le calcul de paramètres. Il porte plus précisément sur les méthodes utilisées par le calculateur développé durant ce projet de maîtrise. Le calcul du point de départ ainsi que la méthode utilisée pour résoudre les équations non-linéaires seront décrites en détail. Finalement, le chapitre 4 présentera les résultats du calculateur pour différents cas de machines asynchrones.

CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE

Le calcul des paramètres de la machine asynchrone se fait à partir de formules utilisant les paramètres d'un modèle de machine asynchrone. Il est donc important d'avoir une bonne compréhension des machines asynchrones et de leurs modèles pour bien comprendre le calcul des paramètres de celles-ci. Les concepts théoriques présentés dans les sous sections qui suivent sont tirées des livres de Kundur [1] et Chapman [16].

2.1 La machine asynchrone

Les machines asynchrones sont composées d'un stator et d'un rotor. Le stator est composé d'enroulements de fils connectés à une source triphasée équilibrée. Le rotor est normalement composé d'un circuit de barres court-circuitées sur elles-mêmes. La machine asynchrone porte des courants alternatifs au niveau du stator et du rotor. La particularité de la machine asynchrone est que les courants au rotor sont causés par induction électromagnétique due aux courants circulants dans le circuit du stator.

Les courants circulant dans le stator produisent un champ magnétique tournant. Des courants au stator de fréquence f_s produisent un champ tournant dont la vitesse est

$$n_s = \frac{60 f_s}{p} \qquad (2\text{-}1)$$

où n_s est le nombre de tours par minute et p le nombre de pair de pôles de la machine. Cette vitesse est appelée la vitesse de synchronisme. La différence de mouvement entre le rotor et le champ magnétique produit par le stator produit des différences de tension dans les barres du rotor, créant ainsi des courants alternatifs dans le circuit rotorique. Les courants produits au rotor créent un champ magnétique qui réagis avec celui du stator pour créer un couple électromagnétique. Ceci fait accélérer le rotor dans la direction du champ magnétique statorique. Le rotor de la machine asynchrone ne tourne pas nécessairement à la même vitesse que le champ magnétique créé par les courant au stator (d'où le terme asynchrone). Un rotor tournant à une vitesse n_r tours/min a donc une vitesse relative de n_s - n_r tours/min en direction inverse par rapport au champ magnétique tournant du stator. Cette vitesse relative fait partie d'un concept important de la machine asynchrone appelé glissement. Le glissement est défini par

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2\text{-}2)$$

La fréquence des courants circulants au rotor peut être facilement calculée à partir du glissement. Cette fréquence est

$$f_r = sf_s \quad (2\text{-}3)$$

Lorsque le glissement est petit, la vitesse de rotation du rotor approche celle du champ magnétique produit par le stator et les différences de tension induites dans le circuit du rotor (et donc le couple électromagnétique produit) tendent vers zéro. Lorsque qu'une charge mécanique est appliqué au rotor, la vitesse de celui-ci diminuera (le glissement augmentera) ce qui augmentera les différences de tension induites au rotor et créera un couple pour résister à la charge. Dans ce cas-ci, la machine est en fonctionnement moteur. Si la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme (dû à un couple mécanique extérieur appliqué au rotor), les pôles des différences de tension au rotor sont inversés et le couple produit sera en direction opposé au mouvement du rotor. La machine fonctionne donc en génératrice.

2.2 Modèle équivalent

La figure 2.1 représente le modèle unifilaire équivalent d'une machine asynchrone à cage simple. La résistance R_s et l'inductance X_s représentent respectivement la résistance et l'inductance au niveau du stator. La résistance R_m (parfois dénoté R_c) représente les pertes fer et l'inductance X_m est l'inductance de magnétisation). La résistance R_r et l'inductance X_r représentent respectivement la résistance et l'inductance au niveau du rotor.

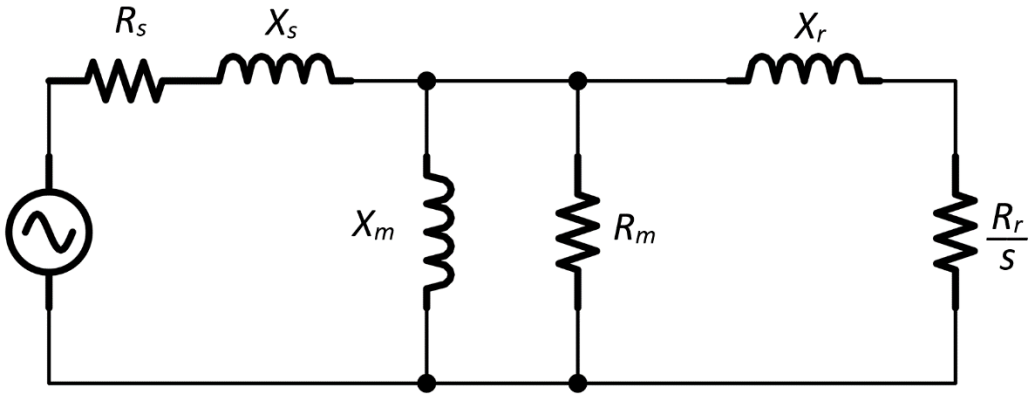


Figure 2.1 : Modèle équivalent unifilaire d'une machine asynchrone à cage simple.

Le courant entrant dans le circuit équivalent peut être calculé en divisant la tension au stator par l'impédance totale équivalente :

$$I_s = \frac{V_{in}}{Z_{eq}} \quad (2\text{-}4)$$

$$Z_{eq} = R_s + jX_s + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_r}{s} + jX_r}} \quad (2\text{-}5)$$

où I_s est le courant entrant dans la machine, V_{in} est la tension phase-neutre efficace aux bornes de la machine et Z_{eq} est l'impédance totale équivalente de la machine asynchrone. Le courant au stator est un nombre complexe. Sa valeur absolue permet d'avoir le courant en ampères consommé par la machine asynchrone et l'angle de ce nombre complexe permet de déterminer le facteur de puissance de la machine.

La figure 2.2 démontre l'écoulement de puissance dans une machine asynchrone. La tension V_{in} est dénotée V_T sur cette figure. La puissance fournie à l'entrée (P_{in} sur la figure) dépend du courant et de la tension à l'entrée de la machine. La première perte de puissance provient de l'effet joule dans les enroulements du stator (P_{SCL}). Ces pertes se calculent de la façon suivante :

$$P_{SCL} = R_s {I_s}^2 \quad (2\text{-}6)$$

Ensuite, d'autres pertes surviennent par hystérésis et par des courants de Foucault (P_{core}). Ces pertes sont représentées par la résistance R_m dans le circuit équivalent. La puissance fournie à l'entrée moins ces deux pertes est transférée à travers l'entrefer de la machine (P_{AG}). Au niveau du rotor, des pertes dues à l'effet joule se produisent (P_{RCL}) et se soustraient à la puissance fournie à travers l'entrefer. La puissance restante (P_{conv}) est transférée de la forme électrique à la forme mécanique sous forme de couple. Finalement, La puissance fournie par la machine est obtenue en soustrayant les pertes mécaniques ($P_{F\&W}$) ainsi que différentes pertes ne pouvant être représentées dans le modèle appelées « Stray losses » en anglais (P_{misc}).

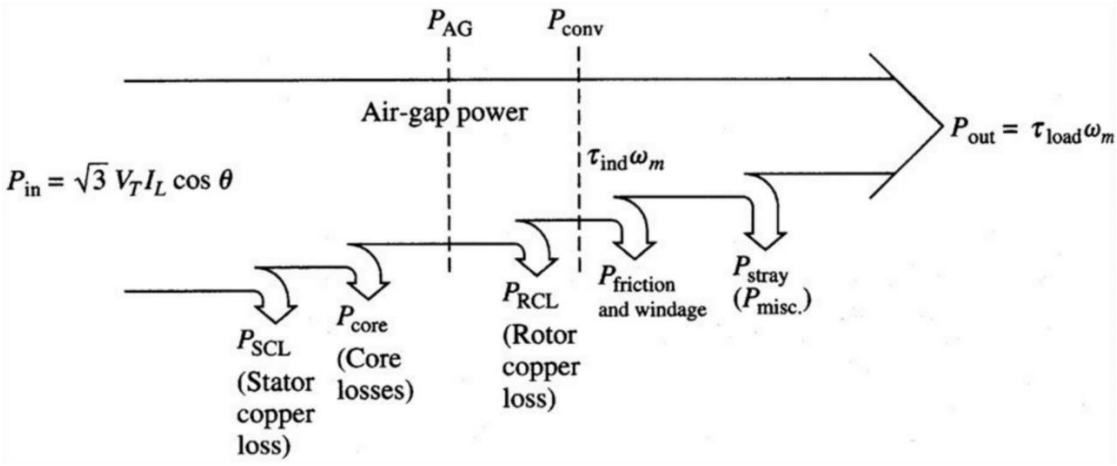


Figure 2.2 : Écoulement de puissance dans une machine asynchrone (image tirée de [16]).

En observant le modèle équivalent de la machine asynchrone, il est possible de voir que le seul élément consommant la puissance transférée à travers l'entrefer (P_{AG}) est la résistance R_r/s. La relation suivante est donc déduite :

$$P_{AG} = \frac{R_r}{s} {I_r}^2 \qquad (2\text{-}7)$$

En regardant la Figure 2.2, il est possible de remarquer la relation suivante :

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

$$P_{conv} = \frac{R_r}{s} {I_r}^2 - R_r {I_r}^2$$

$$P_{conv} = \frac{1-s}{s} R_r {I_r}^2 \qquad (2\text{-}8)$$

Le couple électromagnétique induit est défini comme étant le couple produit par le transfert de puissance électrique à mécanique de la machine. Il est obtenu par la formule suivante :

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \qquad (2\text{-}9)$$

Où τ_{ind} représente le couple électromagnétique induit (en Nm) et ω_m représente la vitesse de rotation du moteur (en rad/s).

Or,

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s \qquad (2\text{-}10)$$

Où ω_s est la vitesse de rotation du champ magnétique au rotor (en rad/s).

Donc le couple induit peut être représenté de la façon suivante :

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{(1-s)\omega_s} = \frac{1-s}{1-s}\frac{P_{AG}}{\omega_s} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (2\text{-}11)$$

Le couple réellement fournit par la machine est obtenu en soustrayant les pertes mécaniques au couple électromagnétique induit. Lors du calcul de paramètres, c'est le couple induit du modèle qui est utilisé.

2.3 Calcul du couple de la machine asynchrone

Les impédances Z_s, Z_m et Z_r sont définies comme suit :

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2\text{-}12)$$

$$Z_m = \frac{jR_mX_m}{R_m+jX_m} \quad (2\text{-}13)$$

$$Z_r = R_r + jX_r \quad (2\text{-}14)$$

Le courant au stator est calculé de la façon suivante :

$$I_s = \frac{V_{in}}{Z_s+\frac{Z_mZ_r}{Z_m+Z_r}} = \frac{V_{in}}{Z_{eq}} \quad (2\text{-}15)$$

En utilisant la loi de Kirchhoff, le courant su rotor est obtenu :

$$I_r = \frac{-Z_m}{Z_m+Z_r}I_s \quad (2\text{-}16)$$

Ensuite, le couple induit peut être calculé de la façon suivante :

$$\tau_{ind} = \frac{3|I_r|^2\frac{R_r}{s}}{\omega_s} = \frac{3p|I_r|^2\frac{R_r}{s}}{2\pi f_s} \quad (2\text{-}17)$$

La figure 2.3 montre la relation entre le couple induit et la vitesse de la machine asynchrone selon les paramètres du tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Paramètre d'une machine asynchrone à cage simple.

Paramètre	Valeur
Résistance au stator (R_s)	0.7 Ω
Inductance su stator (X_s)	8.5 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	3 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	5 Ω
Résistance au rotor (R_r)	2600 Ω
Inductance au rotor (X_r)	2450 Ω

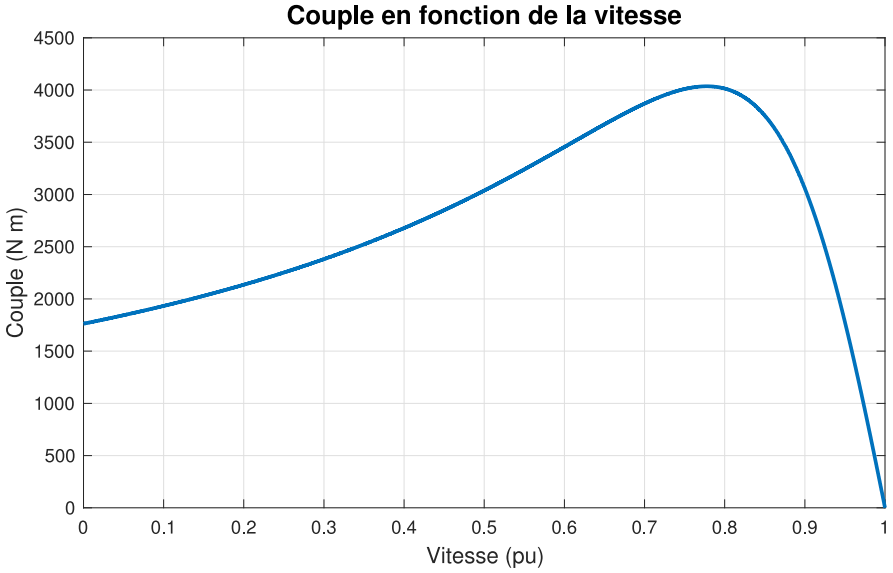


Figure 2.3 : Couple en fonction de la vitesse pour une machine asynchrone à cage simple.

2.4 Rotor complexe

La résistance au rotor influence beaucoup la forme de la courbe du couple en fonction de la vitesse. Une plus grande résistance permet d'avoir un couple au démarrage plus élevé alors qu'une plus petite résistance permet d'avoir une pente plus abrupte près de la vitesse de synchronisme et donc une meilleure efficacité en fonctionnement nominal (figure 2.4). Les paramètres des machines de la figure 2.4 sont fournis au tableau 2.1 (sauf pour la résistance au rotor).

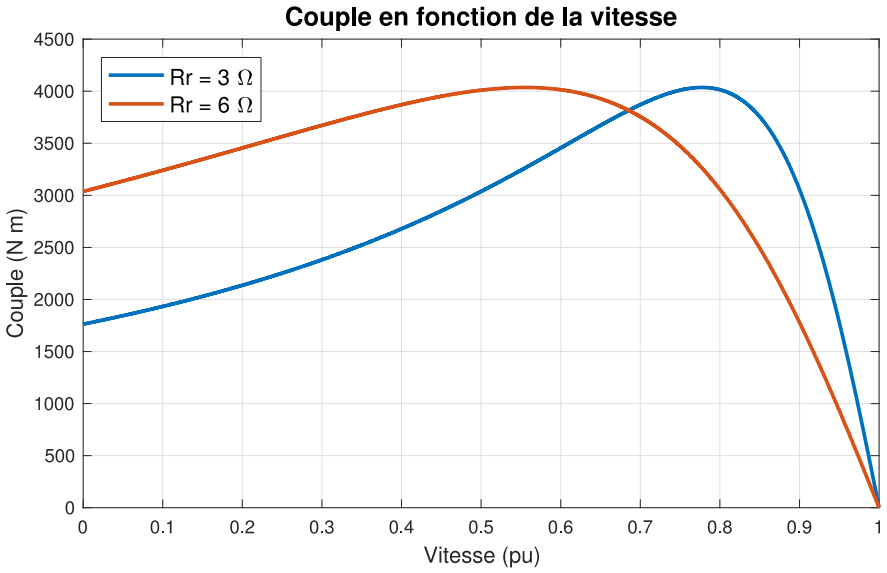


Figure 2.4 : Couple en fonction de la vitesse pour deux valeurs de résistance au rotor.

La majorité des machines asynchrones ont donc un type de rotor qui prend avantage de ce phénomène. En ayant une certaine configuration de rotor, il est possible d'avoir une résistance au rotor élevée à faible vitesse et qui diminue lorsque la vitesse augmente.

Le premier type de rotor complexe est le rotor à cage double. Ce type de rotor est composé d'une première cage ayant une résistance faible, mais une inductance élevée et d'une deuxième cage ayant une résistance élevée, mais une inductance faible. Au démarrage de la machine électrique, les courants au rotor ont une fréquence élevée. La première cage aura donc une impédance plus élevé que la deuxième cage dû à l'inductance plus élevée. Ceci fait en sorte que la majorité des courants au rotor circuleront dans la deuxième cage. La résistance équivalente de ce circuit sera donc élevée. Lorsque le rotor tourne à une vitesse se rapprochant de la vitesse de synchronisme, la fréquence des courants au rotor diminue. Ceci fait en sorte que la majorité des courants au rotor circuleront dans la première cage et que la résistance équivalente de ce circuit aura une résistance faible.

Un modèle (il en existe plusieurs) est montré à la figure 2.5. C'est le modèle utilisé par le programme EMTP-RV [17]. La résistance représentant les pertes fer a été négligé.

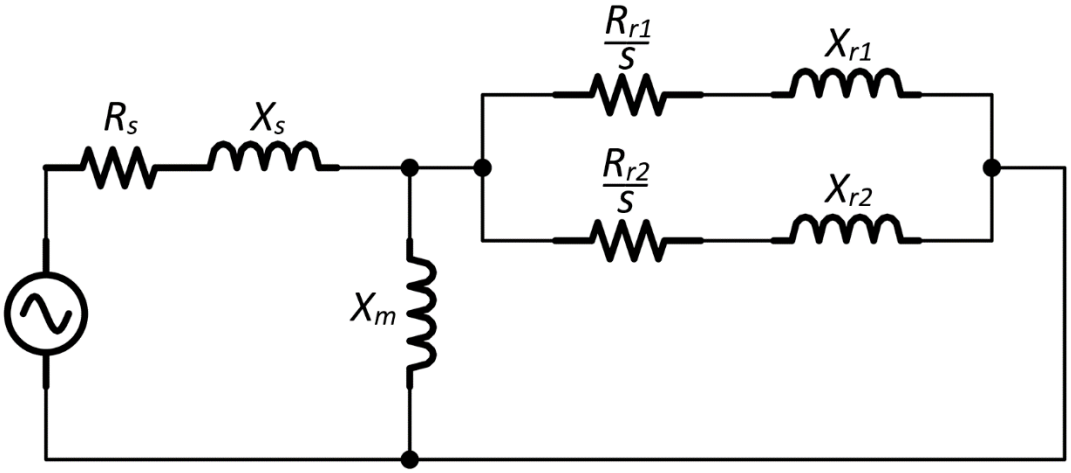


Figure 2.5 : Modèle équivalent d'une machine asynchrone à cage double.

L'impédance au rotor est donnée par la formule suivante :

$$Z_r(s) = jX_{r_1} + \frac{\frac{R_{r_1}}{s}\left(\frac{R_{r_2}}{s} + jX_{r_2}\right)}{\frac{R_{r_1}}{s} + \frac{R_{r_2}}{s} + X_{r_2}} \quad (2\text{-}18)$$

$$R_r(s) = Re\left(Z_r(s)\right) s \quad (2\text{-}19)$$

$$X_r(s) = Im\left(Z_r(s)\right) \quad (2\text{-}20)$$

Un autre type de modèle à cage double est présenté à la figure 2.6. Dans ce modèle l'inductance au stator a été négligée et la résistance représentant les pertes fer est présente.

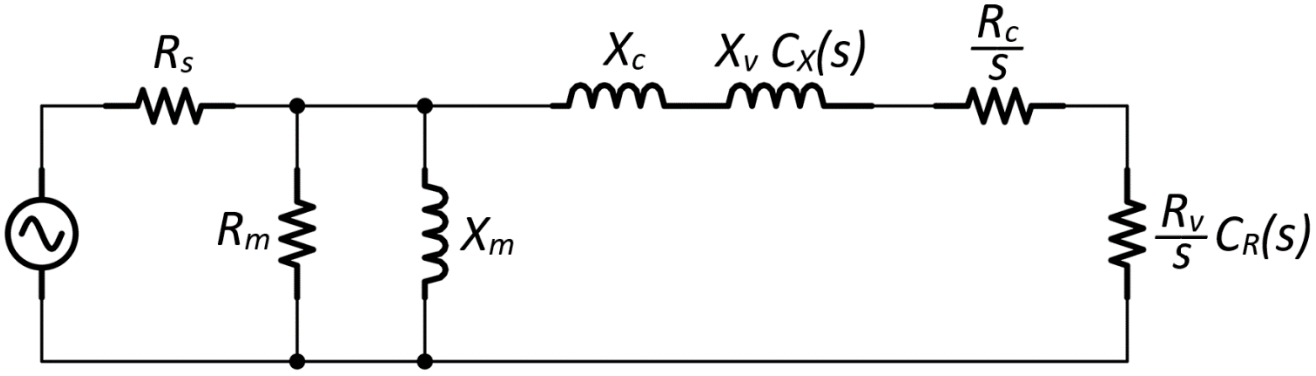


Figure 2.6 : Modèle équivalent d'une machine asynchrone à rotor complexe.

La résistance et l'inductance au rotor sont donnée par les formules suivantes :

$$R_r(s) = R_c + R_v C_R(s) \quad (2\text{-}21)$$

$$C_R(s) = 1 + \frac{X_{i0}(X_{i0}-1)s^2}{1+(X_{i0}-1)s^2} \quad (2\text{-}22)$$

$$X_r(s) = X_c + X_v C_X(s) \quad (2\text{-}23)$$

$$C_X(s) = \frac{1}{1+(X_{i0}-1)s^2} \quad (2\text{-}24)$$

$$Z_r(s) = \frac{R_r(s)}{s} + jX_r(s) \quad (2\text{-}25)$$

Où R_c, R_v, X_c et X_v sont respectivement la partie constance de la résistance, la partie variable de la résistance, la partie constance de l'inductance et la partie variable de l'inductance. Le paramètre X_{i0} permet de changer la façon dont les parties variables de la résistance et de l'inductance varieront selon le glissement. Il est possible de déduire ces formules en calculant la résistance et l'inductance équivalente au rotor d'un modèle à cage double comme celui de la Figure 2.5.

Une autre conception de rotor complexe est un rotor à encoche profonde. Les barres rectangulaires de la cage de ce type de rotor sont minces et longues. Lorsque la fréquence des courants traversant une de ces barres est élevée (vitesse mécanique du rotor peu élevé), les courant se concentreront dans la partie supérieure de la barre dû à l'effet de peau et la résistance équivalente sera donc plus élevée. Lorsque la fréquence des courants est faible (vitesse du rotor se rapprochant de la vitesse de synchronisme), les courant circuleront dans l'entièreté de la barre et la résistance équivalente sera plus faible.

Le modèle montré à la figure 2.6 peut être utilisé comme modèle de machine asynchrone à rotor à encoches profondes en changeant les formules $C_R(s)$ et $C_X(s)$ pour les formules suivantes :

$$C_R(s) = Xi\,\frac{\sinh(2Xi)+sin(2Xi)}{cosh(2Xi)-cos(2Xi)} \quad (2\text{-}26)$$

$$C_X(s) = \frac{3}{2Xi}\,\frac{\sinh(2Xi)-sin(2Xi)}{cosh(2Xi)-cos(2Xi)} \quad (2\text{-}27)$$

$$Xi = Xi_0\sqrt{s} \quad (2\text{-}28)$$

$$Z_r(s) = \frac{R_r(s)}{s} + jX_r(s) \quad (2\text{-}29)$$

Ces formules sont déduites en étudiant l'effet de peau se produisant dans les encoches profondes du rotor [18].

2.5 Saturation des inductances de fuite

Lorsque le courant circulant dans les inductances de fuite de certaines machines asynchrones devient assez élevé, il arrive que l'inductance sature. Il faut donc inclure ce phénomène non-linéaire dans le modèle pour s'assurer d'avoir un modèle qui représente réellement le comportement de la machine asynchrone. La fonction de saturation définie dans [17] est utilisée dans ce projet pour tous les modèles de machine asynchrone. Le paramètre I_{sat} représente le courant (en pu) à partir duquel l'inductance de fuite sature, le paramètre I_{ind} représente le courant (en pu) circulant dans cette inductance, X_{unsat} représente la valeur de l'inductance sans saturation et X représente la valeur de l'inductance en prenant en compte la saturation.

La fonction représentant la saturation est définie comme suit [17] :

- Lorsque $I_{ind} < I_{sat}$

$$X = X_{unsat} \tag{2-30}$$

- Lorsque $I_{ind} \geq I_{sat}$

$$X = AX_{unsat} + (1 - A)X_{unsat}DF \tag{2-31}$$

$$DF = \frac{2}{\pi}(\alpha + 0.5\sin(2\alpha)) \tag{2-32}$$

$$\alpha = arcsin\left(\frac{I_{sat}}{I_{ind}}\right) \tag{2-33}$$

Où A est un nombre entre 0 et 1. Ce paramètre permet de faire varier la partie de l'inductance qui sature.

Cette fonction de saturation est vérifiée avec des essais électriques dans le Chapitre 4.

Pour conclure, la théorie menant aux différents modèles de machine asynchrone a été introduite dans ce chapitre. Trois modèles pour trois types de machine asynchrone fréquemment utilisée ont été présentés. Il s'agit de la machine asynchrone à cage simple, à cage double ainsi qu'à encoches profondes. Les formules du courant au stator, courant au rotor, facteur de puissance ainsi que du couple ont été présentées pour chaque modèle. Une fonction de saturation a été décrite, permettant

de prendre en compte la saturation des inductances de fuite dans les modèles. Toutes ces informations sont importantes pour bien comprendre le calcul des paramètres de la machine asynchrone.

CHAPITRE 3 CALCUL DES PARAMÈTRES

La méthode utilisée dans ce projet de maîtrise pour calculer les paramètres de la machine asynchrone s'apparente à une résolution d'un système d'équations non linéaires. Indépendamment du modèle équivalent choisi, le calcul des paramètres utilise un algorithme pour résoudre un système d'équation à partir d'un point de départ (paramètres initiaux). Le code se divise donc en différentes parties : la création du système d'équation à résoudre, le calcul des paramètres initiaux et l'algorithme de résolution.

3.1 Création du système d'équations à résoudre

Le but du calcul des paramètres est de trouver un ensemble de paramètres d'un modèle donnant à celui-ci certaines caractéristiques (courant, couple, facteur de puissance, etc). Il est donc possible de reformuler ce problème sous la forme de plusieurs équations non linéaires à résoudre. La fonction suivante est définie :

$$f(\boldsymbol{X}) = \frac{spec_{ref} - spec_{calc}(\boldsymbol{X})}{spec_{ref}} \qquad (3\text{-}1)$$

où $spec_{ref}$ représente une spécification (courant au démarrage, couple nominal, etc) venant de la plaque signalétique de la machine, du catalogue du fabricant ou d'un test électrique et $spec_{calc}$ représente cette même spécification selon les paramètres calculés par le code et $\boldsymbol{X}$ représente le vecteur contenant les paramètres du modèle de la machine asynchrone. Par exemple, si on prend le courant au démarrage comme spécification, cette fonction représente l'erreur entre le courant au démarrage désiré (celui sur la fiche signalétique par exemple) et le courant au démarrage selon les paramètres calculés par le code. Le paramètre $spec_{ref}$ est constant et le paramètre $spec_{calc}$ dépend des paramètres du modèle contenu dans le vecteur $\boldsymbol{X}$. Plus la valeur de $f(\boldsymbol{X})$ est près de 0, plus la valeur de la spécification du modèle se rapproche de la valeur de la spécification voulue.

La fonction vectorielle suivante est définie :

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{X}) \\ f_2(\boldsymbol{X}) \\ f_3(\boldsymbol{X}) \\ \vdots \\ f_n(\boldsymbol{X}) \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}2)$$

où ***X*** est un vecteur contenant les paramètres du modèle de la machine asynchrone.

Chaque fonction représente une spécification différente dans la formule 3-2. Le but du calculateur de paramètres est de trouver un ensemble de paramètres ***X*** faisant en sorte que chaque élément de ***F(X)*** soit le plus près possible de 0. En créant cette fonction ***F(X)***, un algorithme de résolution d'équations non linéaires peut être ensuite utilisé pour trouver un ***X*** tel que chaque élément de ***F(X)*** soit égal à 0.

3.1.1 Exemple avec cinq spécifications

À titre d'exemple, la fonction sera créée pour 5 spécifications (c'est le cas de la majorité des calculateurs référés au Chapitre 1). Ces spécifications sont le courant au démarrage, le courant nominal, le couple au démarrage, le couple nominal et le facteur de puissance nominal. Le modèle à cage double de la figure 2.5 sera utilisé. La figure 3.1 montre ce modèle selon les paramètres du vecteur **X**.

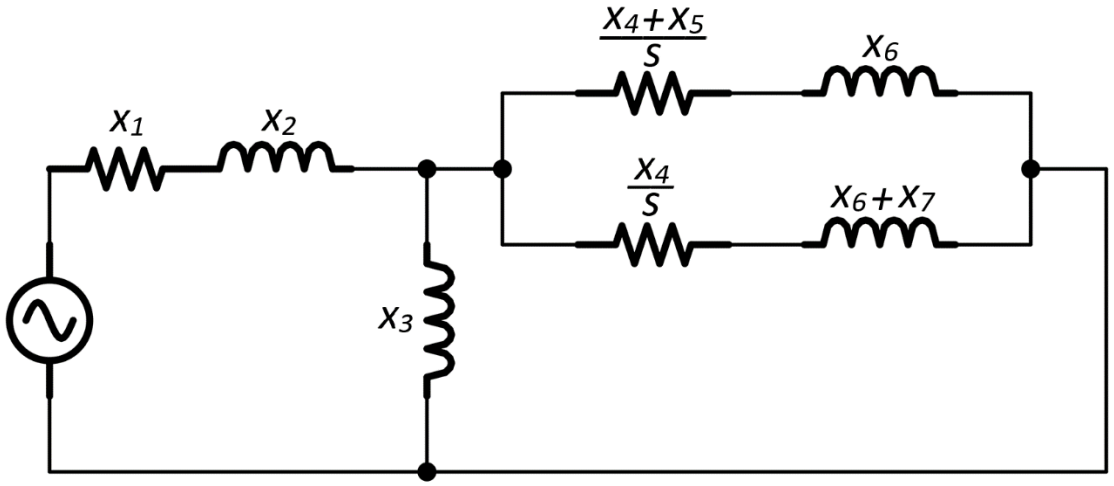


Figure 3.1 : Modèle de machine asynchrone à cage double selon les paramètres du vecteur **X**.

La résistance et l'inductance au stator sont respectivement représentées par les paramètres x_1 et x_2. Le paramètre x_3 représente l'inductance de magnétisation. Le modèle à cage double contient une première branche avec une résistance élevée et une inductance faible ainsi qu'une deuxième branche avec une résistance faible et une inductance élevée. Le paramètre x_4 représente la résistance de la deuxième branche (résistance faible). Les paramètres $x_4 + x_5$ représentent la résistance de la première branche. Étant donné que les paramètres du vecteur **X** sont toujours positifs, la valeur de la résistance de la première branche sera toujours plus élevée que celle de la deuxième branche.

L'inverse est fait avec les inductance. Le paramètre x_6 représente l'inductance faible de la première branche du modèle et les paramètres $x_6 + x_7$ représentent l'inductance plus élevée de la deuxième branche.

Le glissement au démarrage est égal à 1 et le glissement au régime nominal sera défini par s_n. L'impédance équivalente du modèle se calcule de la façon suivante :

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \quad (3\text{-}3)$$

$$Z_{eq}(\boldsymbol{X}, s) = Z_s(\boldsymbol{X}) + \frac{Z_m(\boldsymbol{X}) Z_r(\boldsymbol{X},s)}{Z_m(\boldsymbol{X}) + Z_r(\boldsymbol{X},s)} \quad (3\text{-}4)$$

$$Z_s(\boldsymbol{X}) = x_1 + jx_2 \quad (3\text{-}5)$$

$$Z_m(\boldsymbol{X}) = jx_3 \quad (3\text{-}6)$$

$$Z_r(\boldsymbol{X}, s) = \frac{\left(\frac{x_4 + x_5}{s} + jx_6\right)\left(\frac{x_4}{s} + j(x_6 + x_7)\right)}{2\frac{x_4}{s} + \frac{x_5}{s} + j2x_6 + jx_7} \quad (3\text{-}7)$$

Le courant au stator se calcule de la façon suivante :

$$I_{stator}(\boldsymbol{X}, s) = \frac{V_{in}}{Z_{eq}(\boldsymbol{X},s)} \quad (3\text{-}8)$$

Le courant au rotor se calcule de la façon suivante :

$$I_{rotor}(\boldsymbol{X}, s) = \frac{-Z_m(\boldsymbol{X})}{Z_m(\boldsymbol{X}) + Z_r(\boldsymbol{X},s)} I_{stator}(\boldsymbol{X}, s) \quad (3\text{-}9)$$

Le couple électromagnétique induit est ensuite calculé :

$$T(\boldsymbol{X}, s) = \frac{3p}{2\pi f} |I_r(\boldsymbol{X}, s)|^2 \frac{R_r(\boldsymbol{X},s)}{s} \quad (3\text{-}10)$$

Où $R_r(\boldsymbol{X},s)/s$ est la partie réelle de $Z_r(\boldsymbol{X},s)$.

Soit I_{start}, I_{nom}, T_{start}, T_{nom} et pf_{nom} représentant respectivement le courant au démarrage, le courant nominal, le couple au démarrage, le couple nominal et le facteur de puissance en régime nominal de la machine asynchrone selon les informations du fabricants (ou selon des tests). Les erreurs

entre ces spécifications et celles calculés par les paramètres du vecteur **X** sont données par les formules suivantes :

$$f_1(\boldsymbol{X}) = \frac{I_{start} - |I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=1)|}{I_{start}} \quad (3\text{-}11)$$

$$f_2(\boldsymbol{X}) = \frac{I_{nom} - |I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_n)|}{I_{nom}} \quad (3\text{-}12)$$

$$f_3(\boldsymbol{X}) = \frac{T_{start} - T(\boldsymbol{X}, s=1)}{T_{start}} \quad (3\text{-}13)$$

$$f_4(\boldsymbol{X}) = \frac{T_{nom} - T(\boldsymbol{X}, s=s_n)}{T_{nom}} \quad (3\text{-}14)$$

$$f_5(\boldsymbol{X}) = \frac{pf_{nom} - cos(\angle I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_n))}{pf_{nom}} \quad (3\text{-}15)$$

$$\boldsymbol{F}(X) = \begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{X}) \\ f_2(\boldsymbol{X}) \\ f_3(\boldsymbol{X}) \\ f_4(\boldsymbol{X}) \\ f_5(\boldsymbol{X}) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}16)$$

La fonction ***F(X)*** donne donc les erreurs entre les spécifications désirées et celles calculées par le modèle, en fonction des paramètres du vecteur ***X***.

3.1.2 Création du système d'équation à partir de courbes

Parfois, des courbes du courant, du couple ou du facteur de puissance en fonction du glissement (ou de la vitesse du rotor) sont disponibles. Le nombre de points disponibles pour chaque spécification change à chaque cas. Il faut donc pouvoir créer un système d'équations à partir d'un nombre arbitraire d'équations non linéaires. Le vecteur ***F(X)*** contiendra donc autant d'éléments qu'il y a de points de couple, courant et facteur de puissance de disponible. Soit k, m et n respectivement le nombre de points du courant, couple et du facteur de puissance de la machine fournis par des tests ou par le manufacturier. Le vecteur ***F(X)*** aura donc la forme suivante :

$$\boldsymbol{F(X)} = \begin{bmatrix} \frac{I_1 - \left|I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{I_1})\right|}{I_1} \\ \vdots \\ \frac{I_k - \left|I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{I_k})\right|}{I_k} \\ \frac{T_1 - T(\boldsymbol{X}, s=s_{T_1})}{T_1} \\ \vdots \\ \frac{T_m - T(\boldsymbol{X}, s=s_{T_m})}{T_1} \\ \frac{pf_1 - cos(\angle\, I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{pf_1}))}{pf_1} \\ \vdots \\ \frac{pf_n - cos(\angle\, I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{pf_n}))}{pf_n} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}17)$$

où s_{Ii}, s_{Ti} et s_{pfi} représente respectivement le glissement du ième point du courant, du couple et du facteur de puissance fourni par les tests où le catalogue du manufacturier.

3.1.3 Couple maximum

Le couple maximum est une information importante sur les performances d'une machine asynchrone. En fonctionnement moteur, cette donnée représente la charge maximum que la machine asynchrone peut entrainer. Une charge plus élevée entrainerait un arrêt du moteur. De plus, le couple maximum permet également d'avoir une idée de la tension de décrochage. La tension de décrochage est la tension à partir de laquelle le moteur n'est plus capable de fournir son couple nominal. Plus la tension diminue, plus le couple maximal diminue. À une certaine tension (appelée tension de décrochage), le couple maximal est égal au couple nominal. Cette information est importante pour savoir la tension minimale à respecter sur un réseau pour s'assurer que la machine asynchrone fonctionne à charge nominale.

Cette information pour un moteur donné est parfois connue. Il faut donc être capable de l'inclure dans le système d'équation non linéaire. Il existe des formules analytiques pour calculer le couple maximal [15]. Par contre, lorsque la saturation des inductances de fuites est prise en compte, le modèle devient non linéaire et il devient impossible d'utiliser une formule analytique. La façon de calculer le couple maximal utilisée dans ce projet est de calculer le couple de la machine asynchrone pour un certain nombre de points de glissements (cents points par exemple) et de

trouver la valeur maximale du couple parmi ces points. L'erreur entre le couple maximum voulu et celui calculé selon les paramètres se calcule donc de la façon suivante :

$$f(\boldsymbol{X}) = \frac{T_{max} - max(T(\boldsymbol{X}))}{T_{max}} \quad (3\text{-}18)$$

Où T_{max} est le couple maximal fournit par la plaque signalétique, le catalogue du fabricant ou des tests électriques et $T(\boldsymbol{X})$ est la courbe du couple pour un certain nombre de point de glissement.

3.1.4 Spécifications à différents niveaux de tension

Les tests électriques les plus fréquemment effectués sur les machines asynchrones sont les tests à vide et les tests à rotor bloqués. Ces tests permettent d'avoir des informations sur la performance de la machine asynchrone à différents niveaux de tension. Il est assez simple de les inclure dans le système d'équations non linéaires. Chaque point de spécification sera associé à une valeur de glissement et une valeur de tension phase-terre au niveau du stator. La tension au stator intervient seulement dans l'équation du courant circulant au stator (équation 3-7). Il est possible d'inclure différents niveaux de tension de la façon suivante :

$$I_{stator}(\boldsymbol{X}, s, V) = \frac{V_{I_i}}{Z_{eq}(\boldsymbol{X}, s)} \quad (3\text{-}19)$$

Où V_{Ii} est la tension au stator du ième point du courant.

L'équation 3-16 sera donc changée pour refléter les différents niveaux de tension de la façon suivante :

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} \frac{I_1 - \left|I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{I_1}, V=V_{I_1})\right|}{I_1} \\ \vdots \\ \frac{I_k - \left|I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{I_k}, V=V_{I_k})\right|}{I_k} \\ \frac{T_1 - T(\boldsymbol{X}, s=s_{T_1}, V=V_{T_1})}{T_1} \\ \vdots \\ \frac{T_m - T(\boldsymbol{X}, s=s_{T_m}, V=V_{T_m})}{T_1} \\ \frac{pf_1 - cos(\angle I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{pf_1}, V=V_{pf_1}))}{pf_1} \\ \vdots \\ \frac{pf_n - cos(\angle I_{stator}(\boldsymbol{X}, s=s_{pf_n}, V=V_{pf_n}))}{pf_n} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}20)$$

3.1.5 Discussion

Les sections 3.1.1 à 3.1.4 expliquent comment créer un système d'équation non-linéaire lorsque des informations sur le courant, couple et facteur de puissance à différente tension au stator sont connus. Ces trois spécifications ont été choisies parce qu'elles sont les spécifications les informations les plus fréquemment disponibles sur la fiche signalétique d'une machine ou dans le catalogue du fabricant. Le système peut être adapté pour d'autre spécification (efficacité, puissance active, etc). Tant qu'il est possible de calculer cette spécification selon les paramètres du modèle de la machine asynchrone, l'erreur entre la spécification calculée et celle fournie par la fiche signalétique ou le catalogue du fabricant peut être calculée. Le système d'équation non-linéaire peut donc être créer avec d'autre spécifications.

3.2 Calcul des paramètres initiaux

Pour résoudre le système d'équations non linéaires et ainsi calculer les paramètres du modèle, il faut partir d'un point de départ. L'algorithme de résolution itérera à partir de ces paramètres initiaux pour calculer un meilleur ensemble de paramètre à chaque itération.

Des paramètres initiaux doivent donc être calculés en premier lieu. Il est important de calculer un point de départ qui sera près de la racine (des zéros) de la fonction vectorielle représentant le système d'équation à résoudre. Ceci assurera la convergence de l'algorithme de résolution.

Le calcul des paramètres initiaux diffère selon le modèle de machine synchrone choisi. Ce calcul est souvent fait de façon heuristique. Il y a une multitude de façons de calculer de bons points initiaux pour ce problème. Les références [14]-[15] fournissent des exemples de calcul des paramètres initiaux. Un autre exemple de calcul sera décrit pour le modèle représenté à la figure 2.5. En regardant le circuit, il est possible de remarquer que la puissance réactive dissipée dans le circuit en fonctionnement nominal est calculée par :

$$Q_{nom} = 3V_{in}I_{nom}\sqrt{1 - fp_{nom}{}^2} \qquad (3\text{-}21)$$

À partir de ce calcul, une estimation du paramètre X_m peut être faite :

$$X_m = 0.8\frac{3(V_{in})^2}{Q_{nom}} \qquad (3\text{-}22)$$

On suppose qu'environ 80% de la puissance réactive est consommée par l'inductance de magnétisation. La réactance au stator et la première inductance au rotor sont ensuite calculées :

$$X_s = X_{r_1} = 0.05X_m \quad (3\text{-}23)$$

Il est fréquent d'avoir des valeurs égales pour ces deux inductances [14]. En ce qui a trait à la résistance équivalente au rotor au régime nominal, elle est estimée de la façon suivante :

$$R_{r_n} = s_n \frac{3(V_{in})^2}{P_{nom}} \quad (3\text{-}24)$$

La résistance au stator est ensuite calculée :

$$R_s = R_{r_n} \quad (3\text{-}25)$$

Les autres paramètres sont ensuite calculés de la façon suivante :

$$R_{r_1} = \frac{I_{start}}{I_{nom}} R_{r_n} \quad (3\text{-}26)$$

$$R_{r_2} = R_{r_n} \quad (3\text{-}27)$$

$$X_{r_1} = X_s \quad (3\text{-}28)$$

$$X_{r_2} = \left(\frac{T_{start}}{T_{nom}} - 0.5\right) X_{r_1} \quad (3\text{-}29)$$

Où I_{start}, I_{nom}, T_{start} et T_{nom} sont respectivement le courant au démarrage, le courant nominal, le couple au démarrage et le couple nominal.

À partir de ces calculs, le vecteur de paramètre initiaux $\boldsymbol{X_0}$ peut être formé et utilisé avec un algorithme de résolution pour calculé les paramètres.

3.2.1 Bornes sur les paramètres

Il est important de mettre des bornes sur les différents paramètres qui se retrouveront dans le vecteur $\boldsymbol{X}$. Ceci est fait en ayant deux vecteurs de la même dimension que le vecteur **X** qui représenteront les bornes inférieures et supérieures de chaque paramètre du vecteur **X**.

Les bornes sur les paramètres électriques (résistances et inductances) sont fixées de façon arbitraires. La borne inférieure est choisie pour empêcher d'avoir des valeurs négatives de résistance ou inductance. La borne supérieure est assez grande pour permettre à l'algorithme de calculer des valeurs de paramètre qui pourraient être beaucoup plus élevés que les valeurs initiales.

Pour les paramètres représentant des éléments électriques dans le modèle de la machine asynchrone, les bornes sont donc fixées de la façon suivante :

$$x_{lower} = \frac{x_0}{1000} \quad (3\text{-}30)$$

$$x_{upper} = 1000x_0 \quad (3\text{-}31)$$

Où x_0 est le paramètre initial, x_{lower} est la borne inférieure et x_{upper} la borne supérieure.

Certains autres paramètres peuvent avoir des bornes spécifiques. Par exemple, les bornes sur le courant de saturation du modèle présenté à la figure 2.5 sont les suivantes [17] :

$$x_{lower} = 1.5 \quad (3\text{-}32)$$

$$x_{upper} = 3 \quad (3\text{-}33)$$

Ces bornes seront fournies à l'algorithme de résolution qui s'assurera qu'aucun des paramètres du vecteur **X** calculé ne soit en dehors des bornes. Il faut donc calculer des bornes inférieures et supérieures pour chaque paramètre contenu dans le vecteur ***X***.

3.3 Algorithme de résolution

Une fois le système d'équation formé et le point de départ calculé, un algorithme peut être utilisé pour calculer les paramètres.

3.3.1 Méthode de Newton-Raphson

Le premier algorithme utilisé a été la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode est un algorithme de recherche de zéro (ou recherche de racine) d'une fonction. Elle utilise les premiers termes de la série de Taylor d'une fonction pour estimer l'emplacement du zéro de celle-ci. La série de Taylor d'une fonction $f(x)$ autour du point x_0 est donnée par :

$$f(x_0 + \varepsilon) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}\varepsilon + \frac{f''(x_0)}{2!}\varepsilon^2 + \cdots \quad (3\text{-}34)$$

En prenant les termes de premier ordre, l'équation suivante est obtenue :

$$f(x_0 + \varepsilon) \approx f(x_0) + f'(x_0)\varepsilon \quad (3\text{-}35)$$

En fixant $f(x_0 + \varepsilon) = 0$ et $\varepsilon = \varepsilon_0$, l'équation suivante est déduite :

$$\varepsilon_0 = \frac{-f(x_0)}{f\prime(x_0)} \quad (3\text{-}36)$$

Ce paramètre est appelé le pas de Newton. Il est possible d'arriver à une nouvelle estimation de la racine de la fonction en ajoutant le pas de newton ε_0 au point de départ x_0 :

$$x_1 = x_0 + \varepsilon_0 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f\prime(x_0)} \quad (3\text{-}37)$$

En itérant ce calcul, il est possible de trouver de meilleures estimation de la racine de la fonction. En généralisant, la formule suivante est obtenue :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f\prime(x_n)} \quad (3\text{-}38)$$

Pour le calcul des paramètres de la machine asynchrone, le système d'équations est composé de plusieurs fonctions. De plus, la dérivée de chacune de ses fonctions n'est pas connue à priori. Il faut donc estimer ces dérivées. La différence finie suivante est donc utilisée :

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3\text{-}39)$$

Où Δx est un scalaire. Un petit Δx sera utilisé comme perturbateur pour estimer les dérivées de la fonction vectorielle dans le calculateur de paramètres.

Le vecteur de paramètres $\boldsymbol{X}$ est définit comme :

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3\text{-}40)$$

Le paramètre Δx_k est définit de la façon suivante :

$$\boldsymbol{X} + \Delta x_k = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k + \Delta x \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3\text{-}41)$$

Le système d'équation non-linéaire est défini de la façon suivante :

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} f_1(\boldsymbol{X}) \\ f_2(\boldsymbol{X}) \\ \vdots \\ f_m(\boldsymbol{X}) \end{bmatrix} \quad (3\text{-}42)$$

Pour estimer les dérivées partielles des différentes fonctions du système d'équation, il faudra calculer sa matrice Jacobienne. Cette matrice a la forme suivante :

$$J(\boldsymbol{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\boldsymbol{X})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(\boldsymbol{X})}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(\boldsymbol{X})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_m(\boldsymbol{X})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3\text{-}43)$$

où chaque dérivée partielle sera estimée selon la formule 3-39. Par exemple, la dérivée de la i-ème fonction en fonction du k-ème paramètre se fait de la façon suivante :

$$\frac{\partial f_i(\boldsymbol{X})}{\partial x_k} = \frac{f_i(\boldsymbol{X}+\Delta x_k) - f_i(\boldsymbol{X})}{\Delta x} \quad (3\text{-}44)$$

Une fois la matrice Jacobienne calculée, une meilleure estimation de la racine du système d'équations peut être calculé de la façon suivante :

$$\boldsymbol{X}_{n+1} = \boldsymbol{X}_n - J(\boldsymbol{X}_n)^{-1} F(\boldsymbol{X}_n) \quad (3\text{-}45)$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle est très rapide et qu'elle assure une convergence si le point de départ est près d'une racine ou d'un minimum de la fonction ***F(X)***. Le problème avec cette méthode pour le calcul des paramètres est que la matrice Jacobienne est parfois mal conditionnée. Lors de l'inversion de celle-ci, il y aura des divisions par zéro du au mauvais conditionnement de la matrice. Une façon de régler ce problème est d'utiliser une méthode qui ressemble à celle de Newton-Raphson, la méthode de Levenberg-Marquadt.

3.3.2 Méthode de Levenberg-Marquardt

La méthode de Levenberg-Marquardt [19]-[20] se retrouve sous deux formes. La première forme est la suivante :

$$d\boldsymbol{X}_n = -[J(\boldsymbol{X}_n)^T J(X_n) + \alpha I]^{-1} J(\boldsymbol{X}_n)^T F(\boldsymbol{X}_n) \quad (3\text{-}46)$$

Où $d\boldsymbol{X}_n$ est le pas d'optimisation, I est la matrice identité de la même dimension que la matrice $J(\boldsymbol{X}_n)^T J(\boldsymbol{X}_n)$ et α est un paramètre fixé (que l'on peut faire varier au besoin, selon la convergence).

Plus le paramètre α est petit, plus la méthode se rapproche de la méthode de Newton-Raphson et plus la valeur de α est élevée, plus l'algorithme se comporte comme la méthode du gradient. Le prochain vecteur $\boldsymbol{X}_{n+1}$ est ensuite calculé de la façon suivante :

$$\boldsymbol{X}_{n+1} = \boldsymbol{X}_n + d\boldsymbol{X}_n \quad (3\text{-}47)$$

La matrice identité utilisée permet de faire en sorte que chaque valeur de la diagonale de la matrice Jacobienne est augmentée de la même façon selon le paramètre α. La deuxième forme de la méthode permet d'augmenter chaque valeur de la diagonale de la matrice Jacobienne de façon à mieux représenter le gradient de chaque paramètre. Cette méthode est la suivante :

$$d\boldsymbol{X}_n = -\left[J(\boldsymbol{X}_n)^T J(\boldsymbol{X}_n) + \alpha\, diag\left(J(\boldsymbol{X}_n)^T J(\boldsymbol{X}_n)\right)\right]^{-1} J(\boldsymbol{X}_n)^T F(\boldsymbol{X}_n) \qquad (3\text{-}48)$$

C'est cette méthode qui est utilisée dans le calculateur développé lors de ce projet de maîtrise. Elle est plus lente que la méthode de Newton-Raphson (prend plus d'itérations pour converger), mais elle permet de s'assurer que lors de l'inversion, la matrice Jacobienne ne sera pas singulière.

3.3.3 Variation du pas d'optimisation

Le pas d'optimisation calculé par la méthode décrit au chapitre précédent est parfois trop grand ou trop petit. Ce pas est une estimation. Il faut donc parfois vérifier si un pas plus petit ou plus grand dans la même direction serait mieux. Donc, une fois le pas d'optimisation calculé, une boucle d'itération est effectuée pour vérifier quelle longueur de pas d'optimisation serait optimal. Cette partie agit comme décélérateur ou accélérateur de l'optimisation dans certains cas. La formule dans la boucle est la suivante :

$$\boldsymbol{X}_{n+1} = \boldsymbol{X}_n + \beta\, d\boldsymbol{X}_n \qquad (3\text{-}49)$$

Où β prend des valeurs allant de 0.2 à 2 par incrément de 0.2 (0.2, 0.4, 0.6, etc).

La fonction $\boldsymbol{F(X_{n+1})}$ est ensuite calculée. La valeur du paramètre β donnant la plus petite valeur maximale du vecteur $\boldsymbol{F(X_{n+1})}$ est utilisée comme grandeur de pas d'optimisation. Ceci a permis d'améliorer légèrement la performance du code. En moyenne, l'algorithme d'optimisation a besoin de moins d'itérations pour arriver à une solution lorsque le pas d'optimisation est variable.

3.3.4 Respect des bornes sur les paramètres

Lors du calcul d'un nouveau vecteur $\boldsymbol{X_{n+1}}$, il arrive que les valeurs des paramètres soient à l'extérieur des bornes fixées sur ceux-ci. Lorsque que ceci arrive, la valeur du paramètre en question est ramenée à la valeur de la borne. Par exemple :

$$si\ x_k < x_{lower}\ alors\ x_k = x_{lower}$$

$$si\ x_k > x_{upper}\ alors\ x_k = x_{upper}$$

Ces vérifications et changements sont faits lors de la boucle expliquée au chapitre précédent.

3.4 Structure du code

Le calculateur de paramètre a été implémentées dans un code sur le logiciel MATLAB. Le diagramme représentant les différentes fonctions utilisées à l'intérieur du calculateur est présenté à la figure 3.1. Les noms des fonctions associées aux différentes parties du code sont également présentés.

Le calculateur prend en entrée les spécifications de la machine asynchrone (tension nominale, courant nominal, fréquence nominale, nombre de pôle, etc), le type de modèle équivalent choisi (pour lequel les paramètres seront calculés) et le vecteur de points à optimisés (des points de couple, de courant et de facteur de puissance selon le glissement et la tension).

La première fonction appelée dans le code est *valeur_initiale*. Cette fonction calcul les paramètres initiaux tel qu'expliqué au Chapitre 3.2. De plus, cette fonction fixe les bornes supérieures et inférieures sur les paramètres.

Ensuite, la fonction *sys_equation* est appelée pour créer le système d'équation. Cette fonction utilise une autre fonction du code appelée *X_to_mod*. Cette fonction prend en entrée le vecteur de paramètres $\boldsymbol{X}$, une valeur de glissement, une valeur de tension ainsi que le type de modèle équivalent de la machine asynchrone. Cette fonction calcule le couple, le courant et le facteur de puissance du modèle équivalent selon la tension, le glissement et les paramètres fournis en entrée (voir Chapitre 3.1.1 pour un exemple de calcul). Chaque élément du vecteur de points à optimiser contient une valeur de glissement, une valeur de tension et une valeur d'une spécification (couple, courant ou facteur de puissance). Donc, pour chaque élément du vecteur de points à optimiser, la fonction *sys_equation* va appeler la fonction *X_to_mod* en lui fournissant la tension et le glissement de cet élément. Ensuite, la différence entre la valeur de la spécification calculée par *X_to_mod* et la valeur de la spécification contenue dans le vecteur est calculée. Cette différence est l'erreur entre la spécification voulue, et celle calculé selon les paramètres du vecteur $\boldsymbol{X}$. Ceci est fait pour chaque élément du vecteur de point à optimiser. Le vecteur des erreurs devient la sortie de cette fonction. Ceci crée donc une fonction vectorielle qui prend le vecteur $\boldsymbol{X}$ en entrée et calcul les erreurs sur les spécifications en sortie.

Une fois le système d'équation créé à l'aide d'une fonction vectorielle, l'algorithme d'optimisation peut être utilisé. Le code a été bâti pour pouvoir utiliser pratiquement n'importe quel algorithme d'optimisation ou de recherche de la racine d'une fonction. Le code à calculé des paramètres initiaux (point de départ), a fixé des bornes sur les paramètres et a créé une fonction vectorielle représentant le système d'équations. Ces éléments sont fournis au code *Levenberg_Marquardt_f* qui est l'algorithme décrit au Chapitre 3.3. L'algorithme arrête après 100 itération ou lorsque la plus grande erreur sur les spécifications est inférieure à 2%. Le code fournis en sortie les derniers paramètres calculés ainsi que les erreurs sur les spécifications selon ces paramètres.

Finalement, différents graphiques sont calculés avec la fonction *X_to_mod* en fournissant une certaine tension et un vecteur de glissement. Ceci permet d'avoir des courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse de la machine. Les sorties du code sont les paramètres calculés, les erreurs sur les spécifications selon ces paramètres et les différentes courbes calculées.

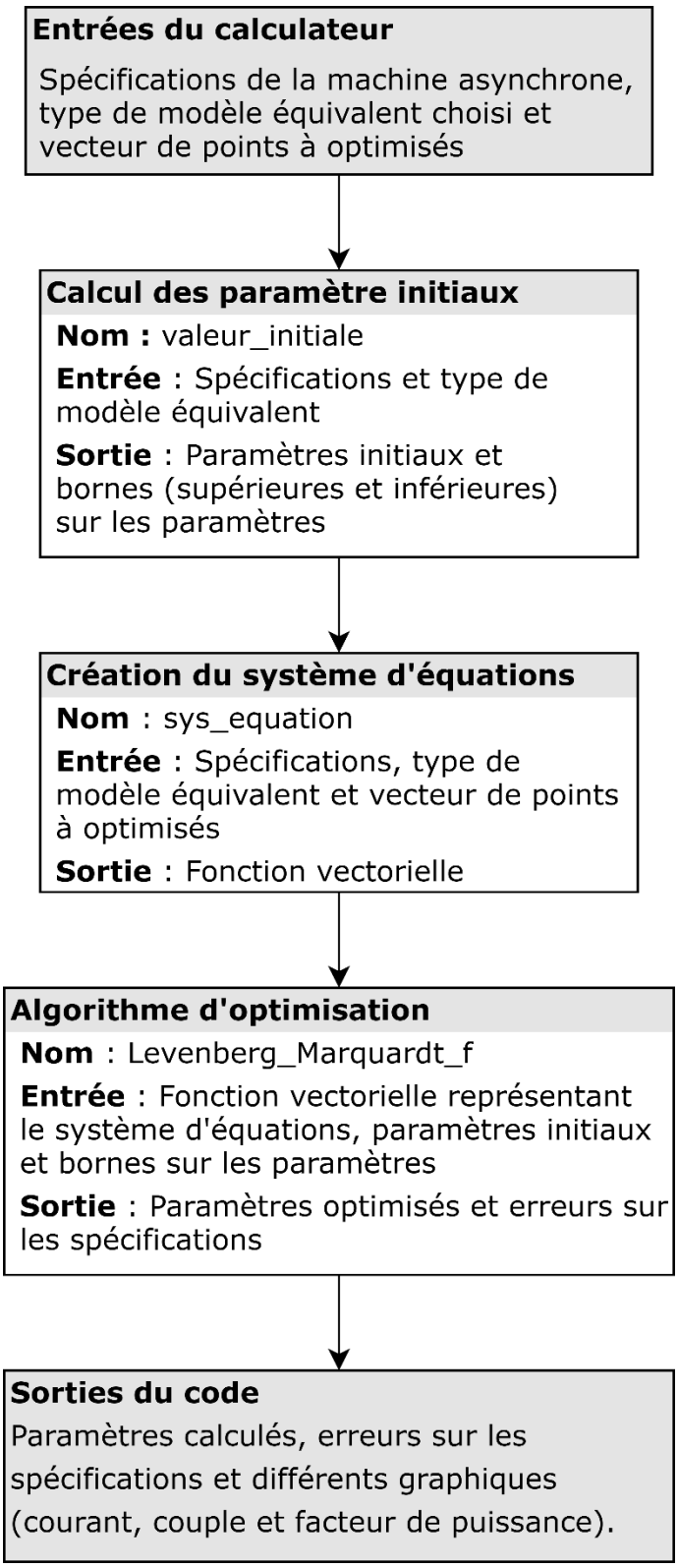


Figure 3.2 : Diagramme du code du calculateur de paramètres.

En conclusion, le problème du calcul des paramètres de la machine asynchrone peut être reformulé sous la forme d'un ensemble d'équations non-linéaires à résoudre. Une façon de former ce système d'équation pour différents types de données fournies (informations de la plaque signalétique, courbes d'essais, etc) est expliqué dans ce chapitre. Une fois les équations formées, il faut calculer un point de départ (des paramètres initiaux). Ensuite, un algorithme de recherche du zéro peut être utilisé pour résoudre les équations et donc calculer les paramètres. La méthode de Newton-Raphson ainsi que la méthode de Levenberg-Marquardt ont été décrites. La méthode de Levenberg-Marquardt est moins rapide, mais permet de converger dans plus de cas et permet d'éviter d'avoir une matrice singulière lors du calcul du pas d'optimisation. Cette méthode a été implémenté dans un calculateur de paramètre sur le logiciel MATLAB. Le calculateur a été utilisé avec différentes machines et les résultats sont présentés au chapitre 4.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

La méthode expliquée au chapitre précédent a été appliquée à différents moteurs asynchrones. Premièrement, la méthode a été appliquée à 115 moteurs faisant parti d'une banque de donnée de plaques signalétiques Ces moteurs sont présentés à l'annexe A. Ensuite, la méthode a été appliquée pour un moteur dont les courbes du courant, couple et facteur de puissance étaient connues. Finalement, la méthode a été testée avec trois moteurs à partir d'informations fournies par des tests électriques (courbes du couple et du courant à rotor bloqué et courbe du courant à vide).

4.1 Calcul de paramètre à partir d'informations de la plaque signalétique

La plaque signalétique d'une machine asynchrone fournie plusieurs informations sur les performances de celle-ci. Lors du calcul des paramètres à partir des informations d'une plaque signalétique, cinq ou six spécifications sont normalement utilisées. Trois de ces spécifications sont en régime nominal : le courant, le couple et le facteur de puissance (parfois le couple est remplacé par l'efficacité). Deux de ces spécifications sont au démarrage : le courant et le couple. Parfois, une sixième spécification est ajoutée : le couple maximal.

4.1.1 Calcul des paramètres sans couple maximal

La méthode décrite au chapitre 3 a été testé sur une banque d'informations venant de la plaque signalétique de 115 moteurs asynchrones (voir annexe A). Le modèle équivalent de la machine asynchrone à cage double montré au chapitre 2 à la figure 2.6 a été utilisé.

En premier lieu, un calcul des paramètres sans tenir compte du couple maximum a été fait. Le critère de convergence était une erreur maximale de moins de 2%, c'est-à-dire que le calcul des paramètres était considéré comme réussi si la plus grande erreur entre les spécifications fournies par la plaque signalétique et les spécifications selon les paramètres calculés était inférieure à 2%. Le calcul des paramètres a trouvé une solution pour 67 cas sur 115 (58% des moteurs).

4.1.1.1 Exemple de convergence sans couple maximal

Les informations de la plaque signalétique d'un des moteurs (#22 dans la banque des 115 moteurs) se retrouve au tableau ci-dessous. Le code a convergé en 4 itérations.

Tableau 4.1 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #22.

Tension nominale phase-phase	400 V
Couple nominal	706 N m
Courant nominal	193 A
Vitesse nominale	1487 tours/min
Courant au démarrage	1389.6 A
Couple au démarrage	1412 N m
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance	0.86
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	109.94 kW
Vitesse de synchronisme	1500 tours/min

Les paramètres calculés par le calculateur sont présentés au tableau suivant.

Tableau 4.2 : Paramètre calculé pour le moteur #22 du Tableau 4.1.

Paramètre	**Valeur**
Résistance au stator (R_s)	1.2611×10^{-5} Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	20.104 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	3.4558 Ω
Résistance constante (R_c)	0.0028 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.0094 Ω
Inductance constante (X_c)	0.1977 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.0667 Ω
Paramètre X_{i0}	4.2047

Les erreurs sur les spécifications sont présentées dans le tableau 4.3. Il est possible de voir que ces erreurs sont toutes sous la barre du 2%. Il aurait été possible d'avoir des erreurs plus petites, mais le code du calculateur arrête d'itérer dès que l'erreur maximale sur les spécifications tombe sous les 2%.

Les courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse sont présentées aux figures 4.1 à 4.3. Ces courbes ainsi que le tableau des erreurs relatives démontrent que les paramètres calculés par le code permettent d'avoir les spécifications demandées en entrée avec des erreurs minimes. Par contre, il existe certains cas où le calculateur n'a pas réussi à calculer des paramètres.

Tableau 4.3 : Erreur sur les spécifications du moteur #22 du Tableau 4.1.

	Spécification de la plaque signalétique	**Spécification du modèle selon les paramètres calculés**	**Erreur relative**
Couple nominal	706 N m	702.61 N m	-0.48 %
Courant nominal	193 A	189.66 A	-1.73%
Couple au démarrage	1412 N m	1405.65 N m	-0.45%
Courant au démarrage	1389.6 A	1388.88 A	-0.052%
Facteur de puissance	0.86	0.8698	1.14%

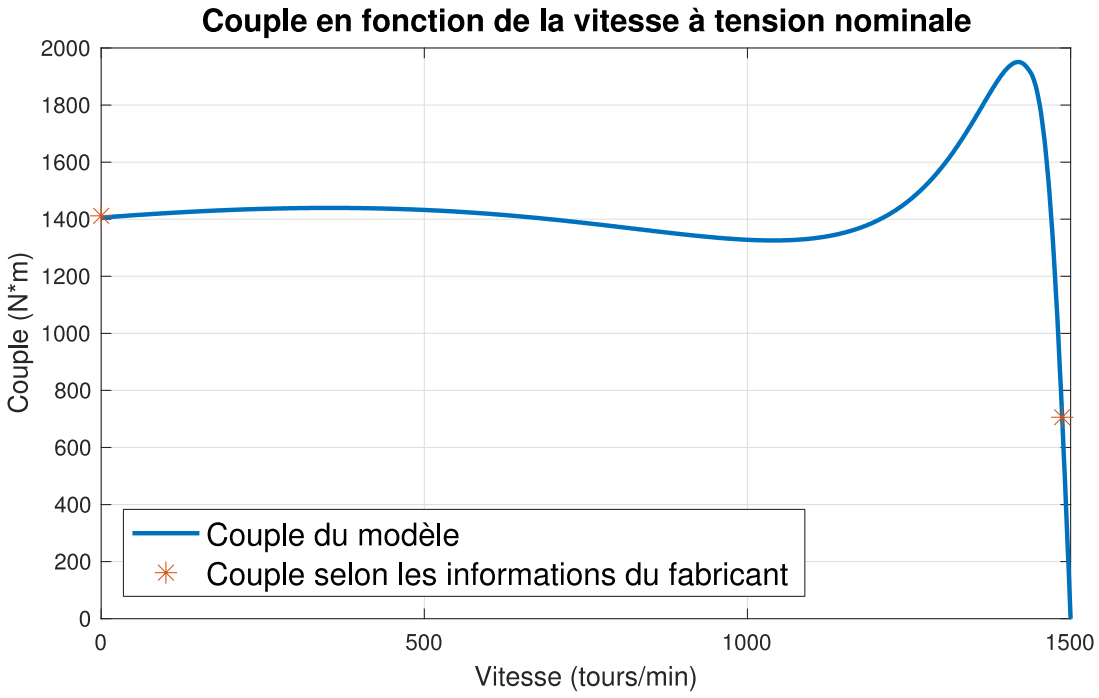


Figure 4.1 : Couple en fonction de la vitesse

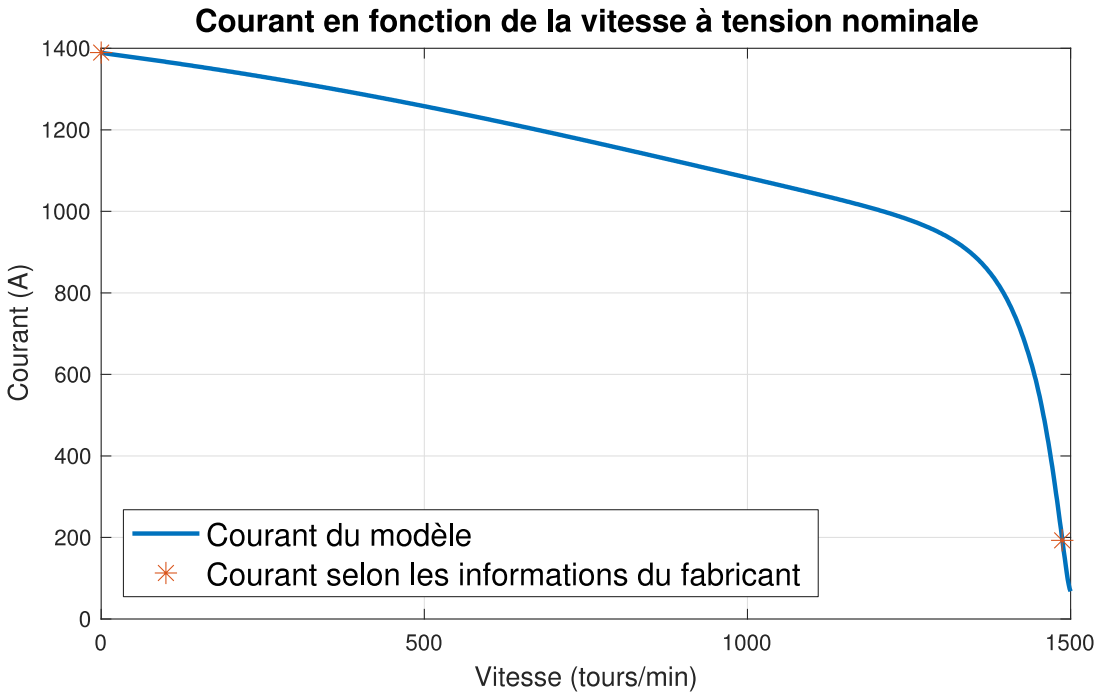


Figure 4.2 : Courant en fonction de la vitesse

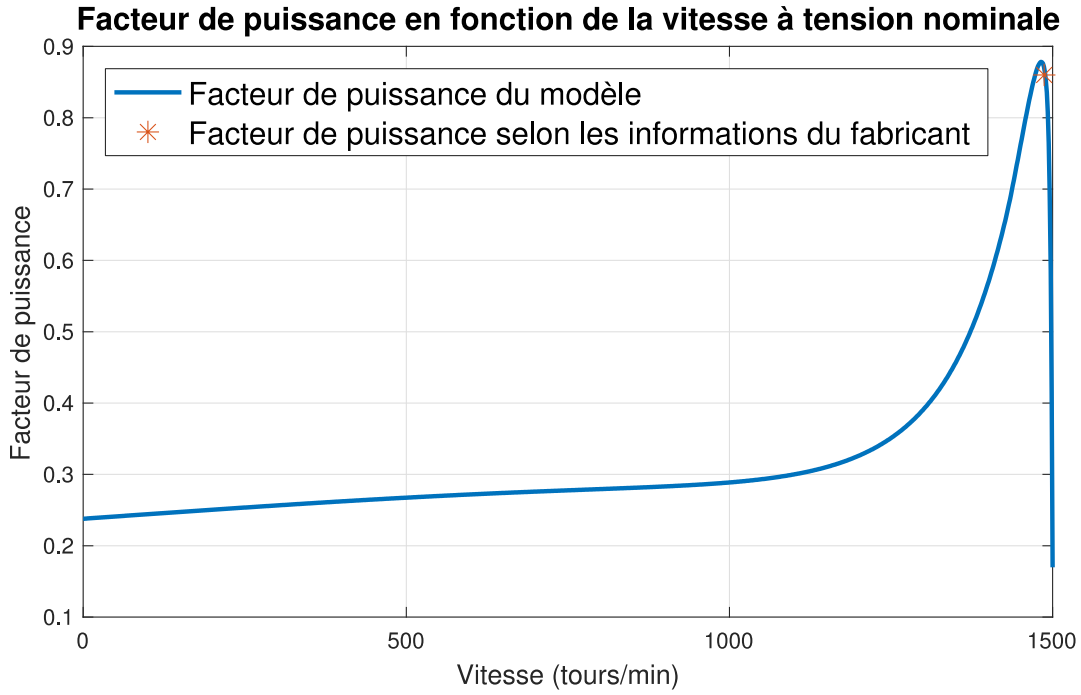


Figure 4.3 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse.

4.1.1.2 Exemple de non convergence sans couple maximal

Dans 48 cas, le code ne trouve pas de solution ou bien les paramètres trouvés ne sont pas satisfaisants (erreurs sur les spécifications trop grandes). Ceci survient avec les moteurs de la banque de données qui ont une faible puissance et une mauvaise efficacité (sous les 70% d'efficacité). Un de ces cas est présenté ci-dessous. Les informations du moteur #100 (de la banque de données de 115 moteurs) se retrouvent au tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #100.

Tension nominale phase-phase	380 V
Couple nominal	14 N m
Courant nominal	5 A
Vitesse nominale	1430 tours/min
Courant au démarrage	35 A
Couple au démarrage	30.8 N m
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance	0.82
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	2.097 kW
Vitesse de synchronisme	1500 tours/min

Après 100 itérations, le code n'a pas pu trouver de solution pour ce moteur. Les paramètres calculés sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.5 : Paramètre calculé pour le moteur #100 du tableau 4.4.

Paramètre	**Valeur**
Résistance au stator (R_s)	2.9952 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	570.66 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	68.961 Ω
Résistance constante (R_c)	0.7224 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	2.0319 Ω
Inductance constante (X_c)	6.6712 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.0679 Ω
Paramètre X_{i0}	1

Les erreurs sur les spécifications sont présentées au tableau 4.6. La plus grande erreur se situe au niveau du courant au démarrage. C'est sur cette spécification que la plus grande erreur survient pour chaque cas qui ne converge pas dans la banque de moteur. Il est possible de voir que les autres spécifications sont bien respectées (erreur près ou sous le 2%). Les graphiques du couple, courant et facteur de puissance du modèle selon les paramètres calculés sont montrés ci-dessous.

Tableau 4.6 : Erreur sur les spécifications du moteur #100 du tableau 4.4.

	Spécification de la plaque signalétique	**Spécification du modèle selon les paramètres calculés**	**Erreur relative**
Couple nominal	14 N m	13.775 N m	-1.61 %
Courant nominal	5 A	5.132 A	2.64%
Couple au démarrage	30.8 N m	31.2712 N m	1.53%
Courant au démarrage	35 A	26.891A	-23.17%
Facteur de puissance	0.82	0.778	-5.15%

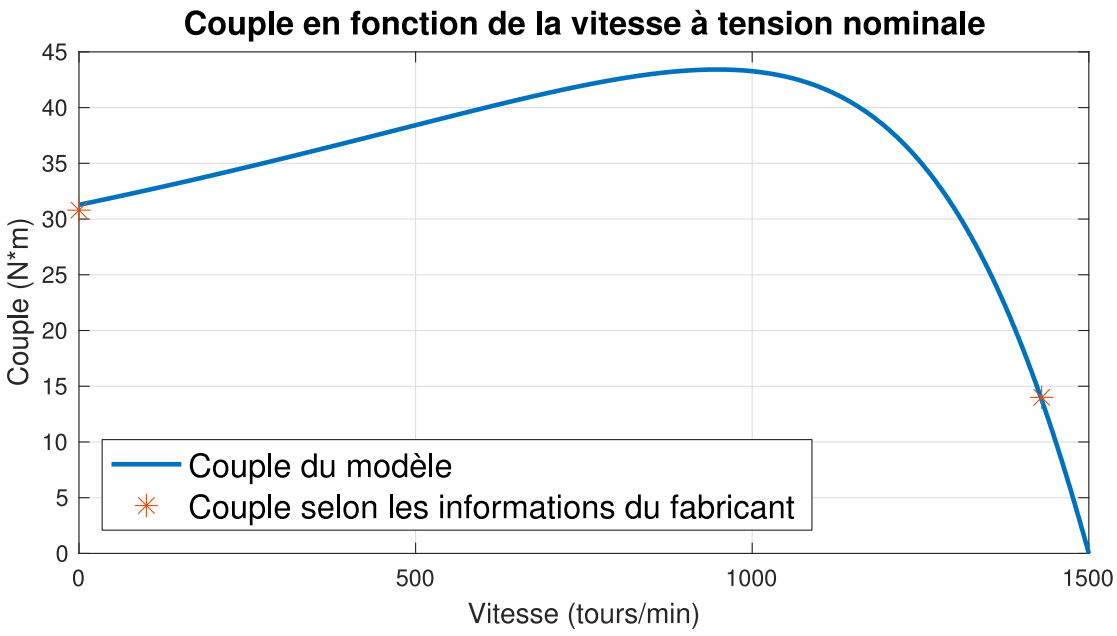


Figure 4.4 : Couple en fonction de la vitesse.

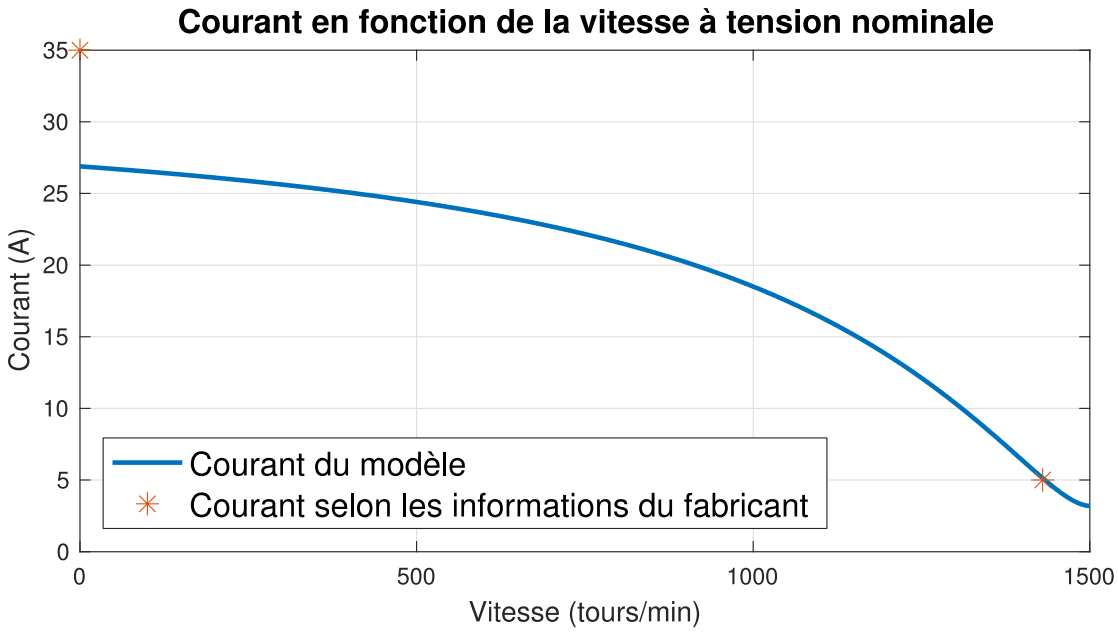


Figure 4.5 : Courant en fonction de la vitesse.

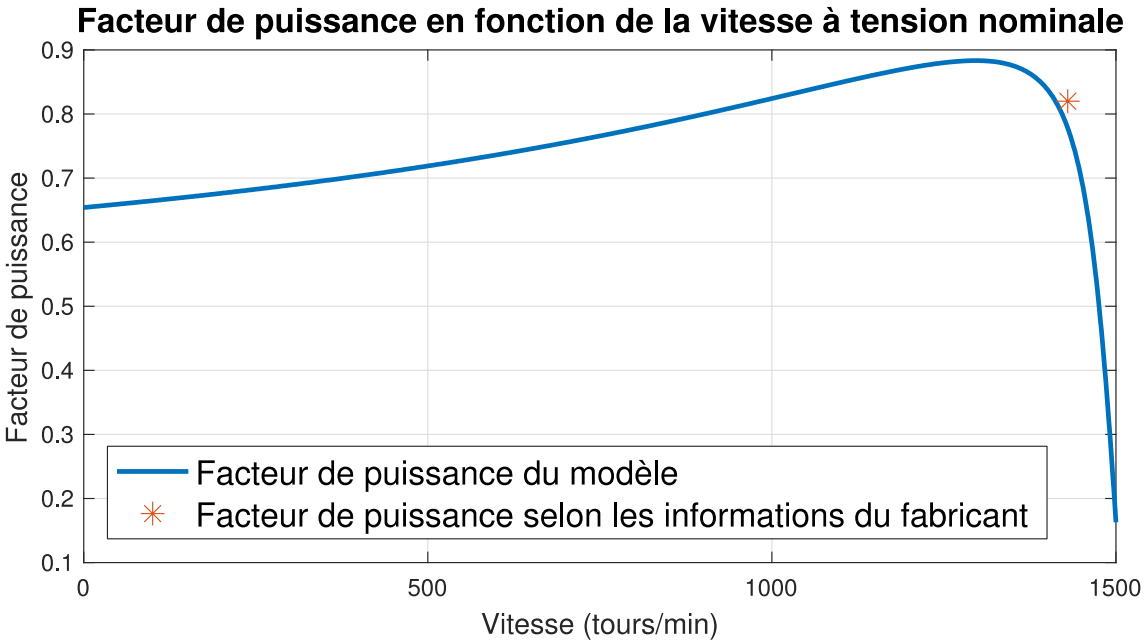


Figure 4.6 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse.

4.1.2 Calcul des paramètres avec le couple maximal

L'ajout du couple maximal dans le calcul des paramètres permet de mieux représenter la machine asynchrone. Par contre, ceci ajoute une spécification supplémentaire à respecter. Le modèle de la figure 2.6 a été utilisé et la saturation des inductances de fuite a été prise en compte.

4.1.2.1 Exemple de convergence avec couple maximal

Le calcul des paramètres en prenant en compte le couple maximal a été effectué avec les 115 moteurs de la banque de donnée. Une solution a été trouvée dans 66 cas (57%). Un exemple de moteur (#32 dans la banque de données de 115 moteurs) est présenté au tableau suivant.

Tableau 4.7 : Information de la plaque signalétique du moteur asynchrone #32.

Tension nominale phase-phase	400 V
Couple nominal	1444 N m
Courant nominal	730 A
Vitesse nominale	2977 tours/min
Courant au démarrage	5694 A
Couple au démarrage	1732.8 N m
Couple maximal	4620.8 N m
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance	0.92
Nombre de paire de pôle	1
Puissance nominale	450.17 kW
Vitesse de synchronisme	3000 tours/min

Les paramètres calculés se retrouvent au tableau ci-dessous.

Tableau 4.8: Paramètre calculé pour le moteur #32 du tableau 4.7.

Paramètre	**Valeur**
Résistance au stator (R_s)	0.0017 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	9.6718 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	1.4086 Ω
Résistance constante (R_c)	7.3499×10^{-4} Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.0019 Ω
Inductance constante (X_c)	0.0595 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.0037 Ω
Paramètre X_{i0}	2.8031
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	2.6423
Partie saturable de l'inductance X_c	0.5881

Les erreurs sur les spécifications sont présentées au tableau 4.9. Les graphiques du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse sont présentés aux figures 4.7 à 4.9. Il est possible de voir que les erreurs sur les spécifications sont minimes et que les paramètres calculés représentent bien la machine asynchrone.

Tableau 4.9 : Erreur sur les spécifications du moteur #32 du tableau 4.7.

	Spécification de la plaque signalétique	**Spécification du modèle selon les paramètres calculés**	**Erreur relative**
Couple nominal	1444 N m	1441 N m	-0.21 %
Courant nominal	730 A	738.1 A	1.11%
Couple au démarrage	1732.8 N m	1730 N m	-0.16%
Courant au démarrage	5694 A	5688 A	-0.10%
Facteur de puissance	0.92	0.923	0.29%
Couple maximal	4620.8 N m	4618 N m	-0.056%

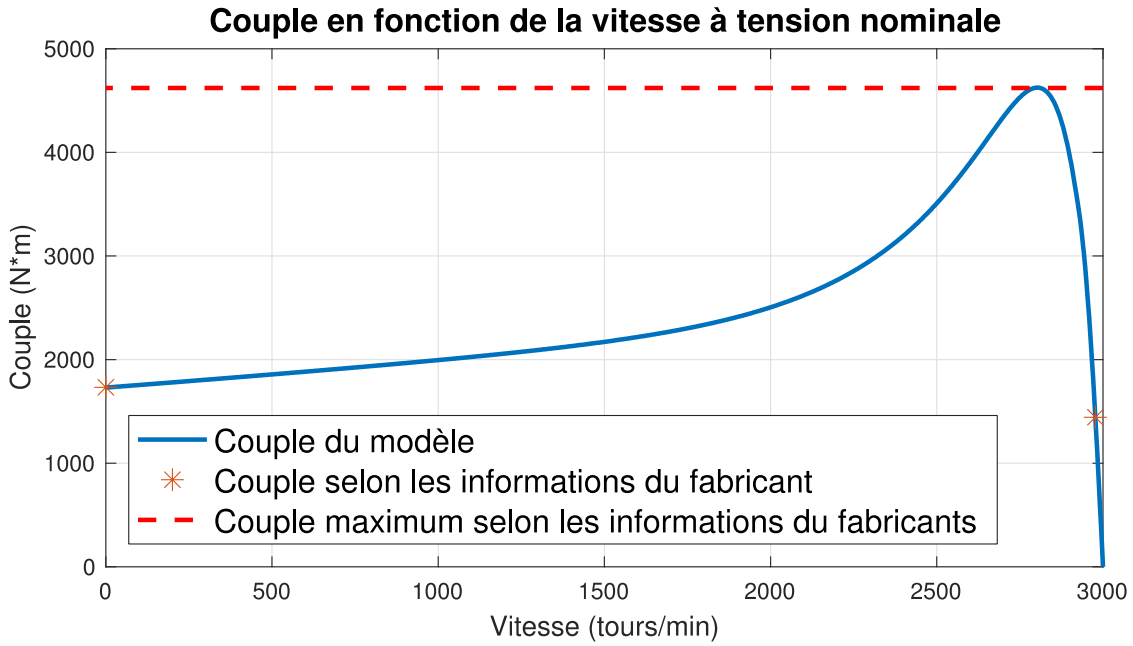


Figure 4.7 : Couple en fonction de la vitesse.

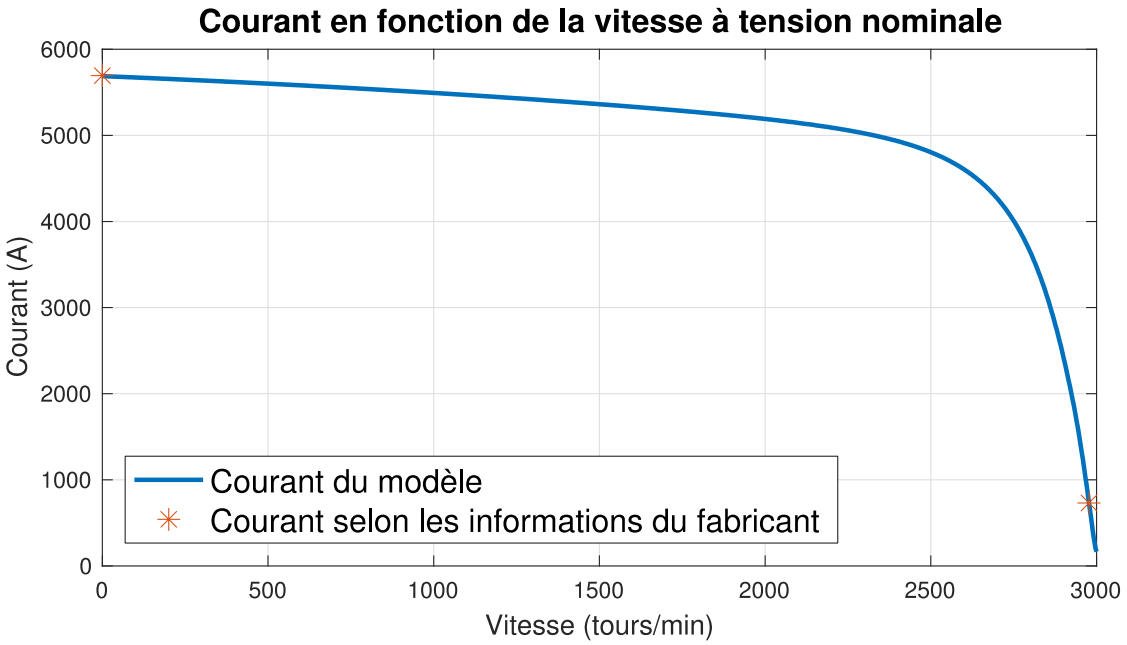


Figure 4.8 : Courant en fonction de la vitesse.

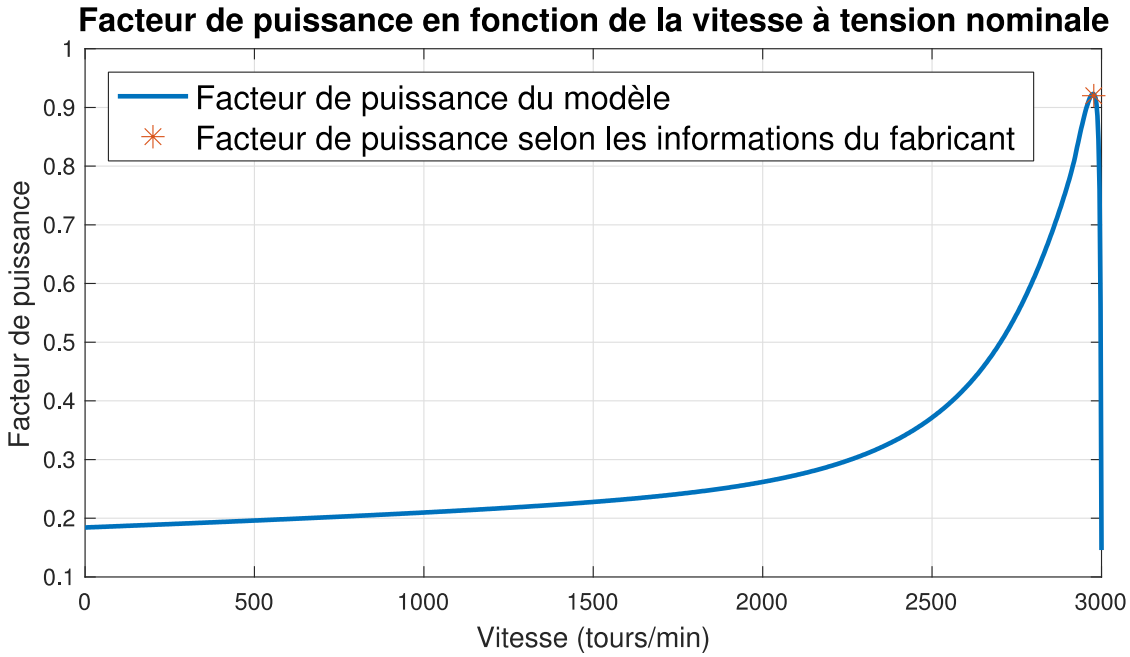


Figure 4.9 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse.

4.1.2.2 Exemple de non convergence avec couple maximal

L'ajout d'une spécification supplémentaire ajoute un degré de difficulté au calcul des paramètres. Dans 49 cas, le calculateur de paramètre n'est pas arrivé à une solution. Un exemple de moteur (#88 dans la banque de données de 115 moteurs) est présenté au tableau ci-dessous.

Tableau 4.10 : Informations de la plaque signalétique du moteur #88.

Tension nominale phase-phase	380 V
Couple nominal	35.01 N m
Courant nominal	21.8 A
Vitesse nominale	2930 tours/min
Courant au démarrage	152.6 A
Couple au démarrage	70.02 N m
Couple maximal	80.523 N m
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance	0.88
Nombre de paire de pôle	1
Puissance nominale	10.742 kW
Vitesse de synchronisme	3000 tours/min

Après 100 itérations, le calculateur n'a pas trouvé de paramètres permettant de satisfaire les spécifications demandées. Les paramètres calculés après 100 itérations sont situés au tableau 4.11.

Tableau 4.11 : paramètre calculé pour le moteur #88 du tableau 4.10.

Paramètre	**Valeur**
Résistance au stator (R_s)	0.5085 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	159.78 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	29.892 Ω
Résistance constante (R_c)	0.1511 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.1129 Ω
Inductance constante (X_c)	2.0442 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.5680 Ω
Paramètre X_{i0}	1.9815
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	2.0151
Partie saturable de l'inductance X_c	0.8000

Le tableau des erreurs sur les spécifications est présenté dans le tableau ci-dessous. Les graphiques du couple. Du courant et du facteur de puissance sont présenté aux figure 4.10 à 4.12. Il est possible de voir que les plus grandes erreurs se situe au niveau du couple et du courant au démarrage.

Tableau 4.12 : Erreur sur les spécifications du moteur #88 du tableau 4.10.

	Spécification de la plaque signalétique	**Spécification du modèle selon les paramètres calculés**	**Erreur relative**
Couple nominal	35.01 N m	35.22 N m	0.61 %
Courant nominal	21.8 A	21.9 A	0.49%
Couple au démarrage	70.02 N m	64.16 N m	-8.37%
Courant au démarrage	152.6 A	140.33 A	-8.04%
Facteur de puissance	0.88	0.876	-0.51%
Couple maximal	80.523 N m	80.298 N m	-0.28%

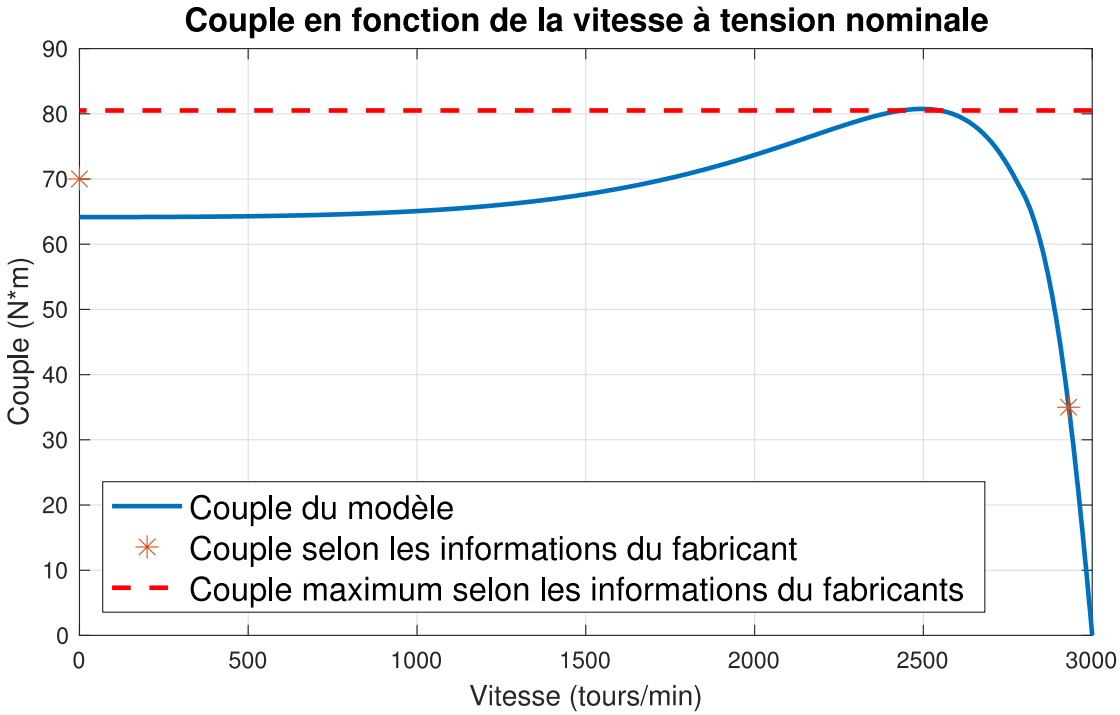


Figure 4.10 : Couple en fonction de la vitesse.

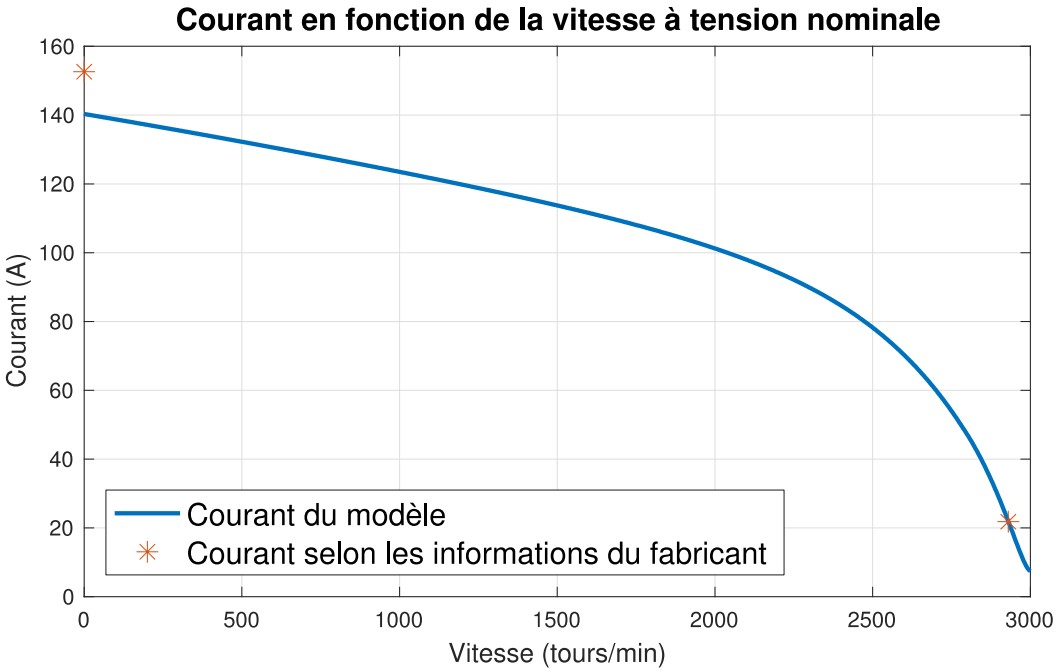


Figure 4.11 : Courant en fonction de la vitesse.

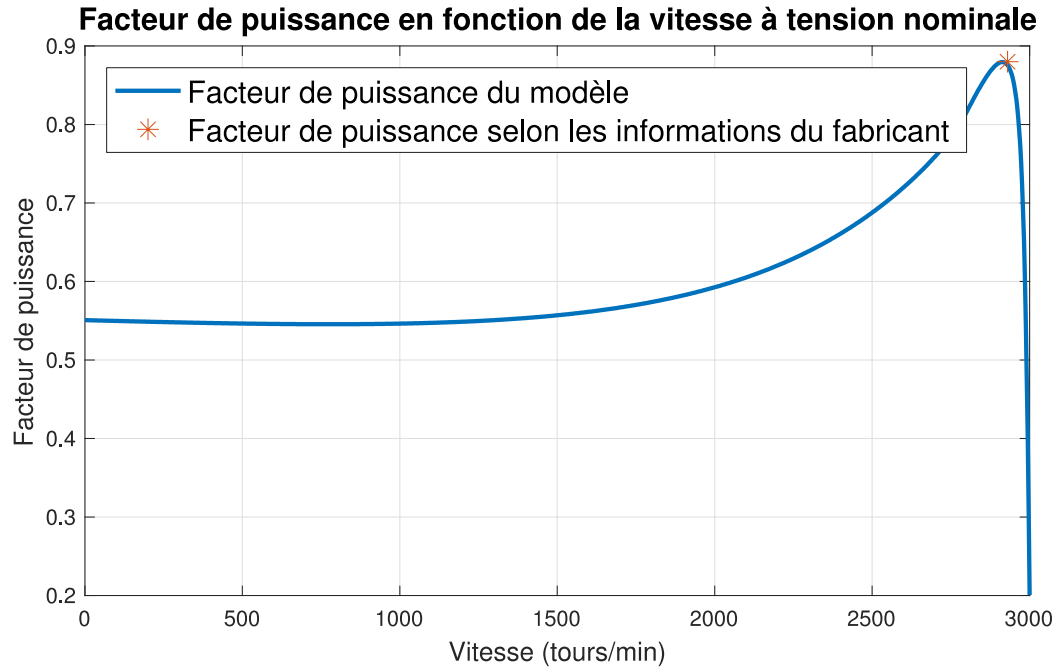


Figure 4.12 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse.

4.2 Calcul des paramètres à partir de courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse

En deuxième temps, un calcul des paramètres selon des informations fournies par des courbes du courant, du couple et du facteur de puissance a été fait. Les informations du moteur ont été prises dans [15]. Les informations du moteur sont présentées au tableau suivant. Le modèle de la figure 2.6 a été utilisé et la saturation des inductances de fuite a été prise en compte.

Tableau 4.13 : Information de la plaque signalétique du moteur (prise dans [15]).

Tension nominale phase-phase	4000 V
Couple nominal	4812 N m
Courant nominal	75.5 A
Vitesse nominale	888 tr/min
Couple au démarrage	4861 N m
Courant au démarrage	480.8 A
Couple maximal	13810 N m
Fréquence nominale	60 Hz
Facteur de puissance nominal	0,914
Facteur de puissance au démarrage	0,29
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	447.47 kW
Vitesse de synchronisme	900 tr/min

Les points du couple, du courant et du facteur de puissance selon la vitesse sont fournis au tableau ci-dessous.

Tableau 4.14 : Informations du fabricant sur le couple, le courant et le facteur de puissance en fonction de la vitesse[15].

Vitesse (tr/min)	Courant (A)	Facteur de puissance	Couple (N m)
0	480,8	0,29	4861,0
150	-	-	5288,0
180	-	0,306	-
400	-	-	6454,0
405	-	0,339	-
600	-	-	8243,0
630	-	0,416	-
750	-	-	12202,0
765	-	0,57	-
850	-	0,813	12609,0
888	75,5	0,914	4812,0

Le calcul des paramètres a été fait avec le modèle de la figure 2.6. La saturation des inductances de fuite a été prise en compte. Les paramètres calculés sont présentés au tableau 4.15.

Tableau 4.15 : Paramètres calculés pour le moteur du tableau 4.13.

Paramètre	**Valeur**
Résistance au stator (R_s)	0.7179 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	1238.9 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	118.0452 Ω
Résistance constante (R_c)	0.1417 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.2938 Ω
Inductance constante (X_c)	5.5048 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.3094 Ω
Paramètre X_{i0}	1,9819
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	2,3974
Partie saturable de l'inductance X_c	0.3029

Les courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse sont montrées aux figure 4.13 à 4.15. Dû au nombre élevé de spécification (16 spécifications), il n'est pas pratique de montrer toutes les erreurs sur les spécifications dans un tableau. Il est possible de calculer l'erreur maximale et l'erreur moyenne pour avoir une idée des erreurs sur les spécifications. Pour ce moteur, l'erreur maximal est de 1.93% et l'erreur moyenne est de 0.49%. Il est possible de voir que le modèle et les paramètres calculés représentent bien les performances du moteur asynchrone.

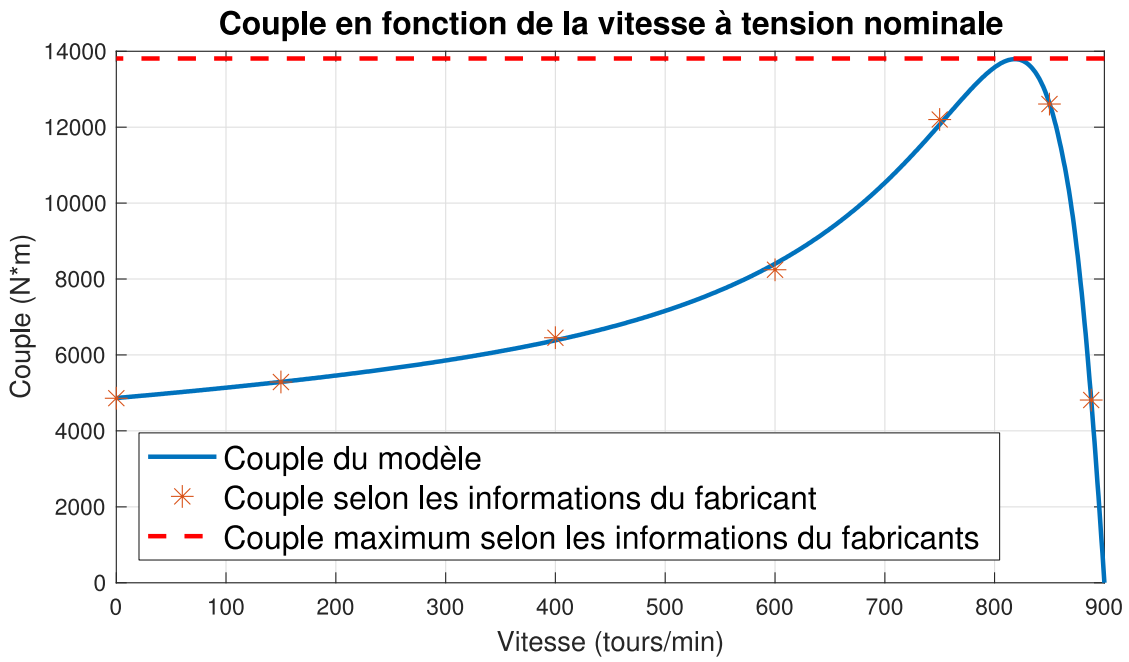


Figure 4.13 : Couple en fonction de la vitesse.

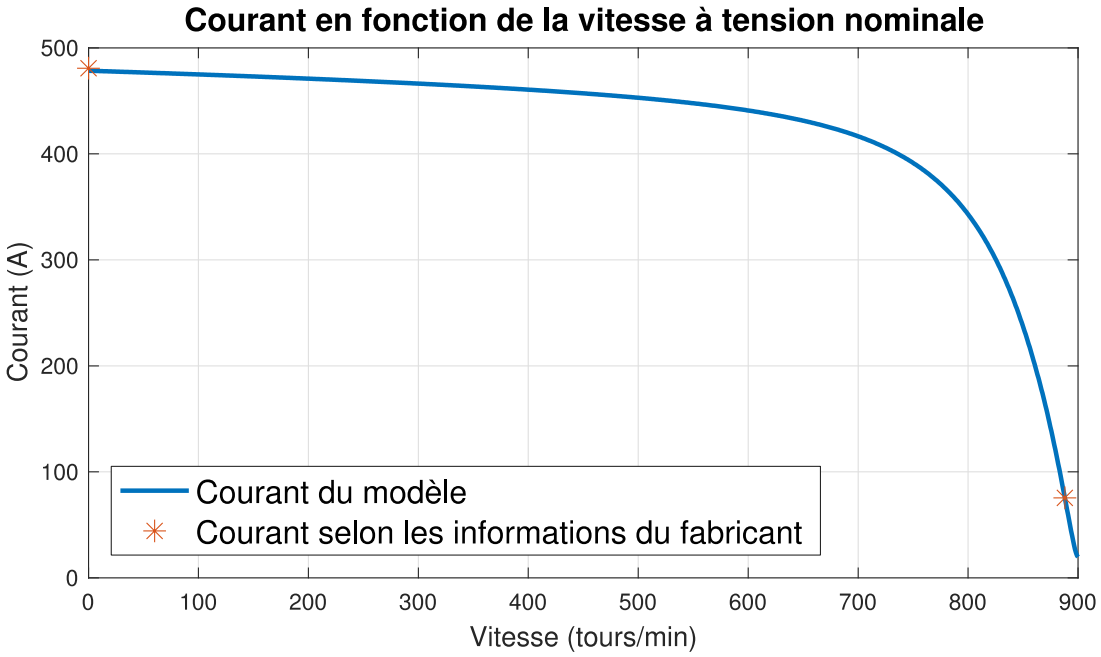


Figure 4.14 : Courant en fonction de la vitesse.

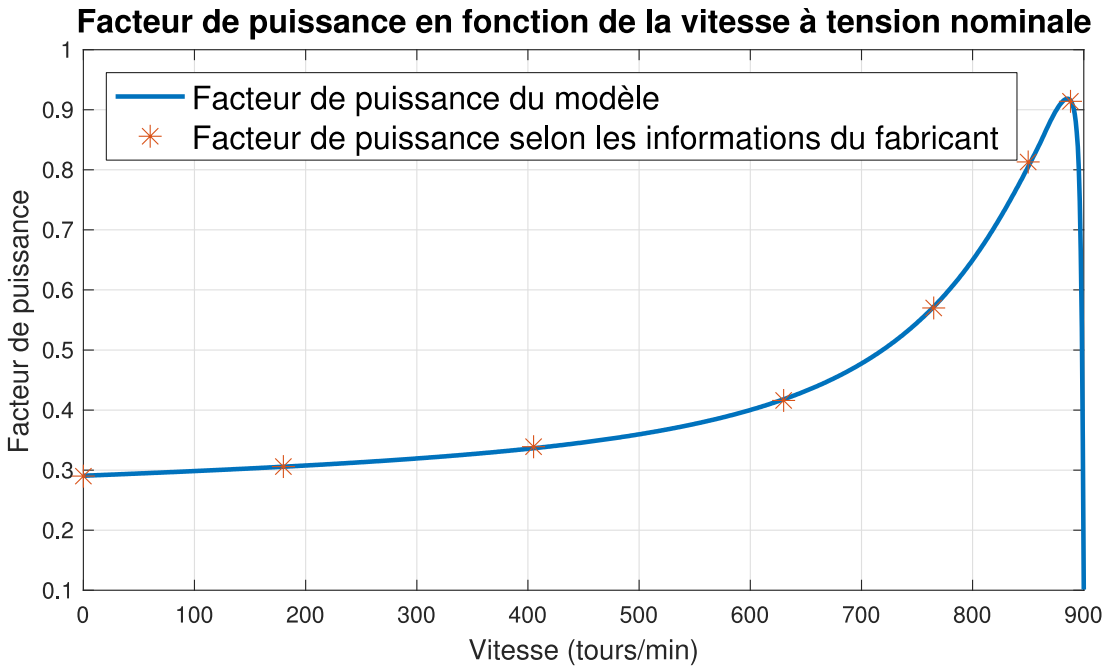


Figure 4.15 : Facteur de puissance en fonction de la vitesse.

4.3 Calcul des paramètres à partir de courbes d'essais à différents niveaux de tension

Les calculs des paramètres effectués aux section 4.1 et 4.2 ont été effectués à partir d'informations (de spécifications) à tension nominale. Les paramètres calculés vont donc bien représenter le fonctionnement de la machine asynchrone à tension nominale. Parfois, il est important de pouvoir représenter le comportement de la machine à différents niveaux de tension plus petits que la tension nominale. Ceci peut être utile pour simuler un démarrage d'un moteur sur un réseau d'urgence ou encore observer la performance d'une machine asynchrone lorsque la tension du réseau se situe sous la tension nominale. Plusieurs tests électriques peuvent être faits pour observer le comportement de la machine asynchrone à différents niveaux de tension. Les plus fréquents sont les tests à vide et les tests à rotor bloqué.

Le test à vide consiste à alimenter la machine asynchrone sans qu'elle n'entraine de charge. Le rotor tournera donc à une vitesse près de la vitesse de synchronisme. Ceci sera fait à différents niveaux de tension. À une vitesse très près de la vitesse de synchronisme, la majorité des courants circuleront au niveau du stator (peu de courant au niveau du rotor). Le courant consommé par la

machine est mesuré lors de ce test. Ce test permet donc d'observer la saturation de l'inductance de magnétisation.

Un autre test fréquemment utilisé est le test à rotor bloqué. Le rotor est bloqué de façon à l'empêcher de tourner et la machine est alimenter à différent niveau de tension. Ceci permet d'observer le comportement de la machine au démarrage (vitesse du rotor nulle) à différent niveaux de tension.

Dans les sections suivantes, le calcul des paramètres a été effectué à partir des courbes du courant à vide ainsi que du couple et du courant à rotor bloqué pour trois moteurs asynchrones de différentes puissances (200 kW, 300 kW et 400 kW). Les informations sur ces moteurs nous ont été fournies par EDF. Le modèle à cage double de la figure 2.6 a été utilisé. La saturation de l'inductance de fuite a été prise en compte. La saturation de l'inductance de magnétisation a également dû être prise en compte, spécialement pour ces trois moteurs.

4.3.1 Moteur de 200 kW

Les spécifications du moteur asynchrones se retrouvent au tableau ci-dessous.

Tableau 4.16 : Informations de la plaque signalétique du moteur de 200kW.

Tension nominale phase-phase	690 V
Couple nominal	1285 N m
Courant nominal	202.3 A
Vitesse nominale	1491.9 tr/min
Couple au démarrage	1709.1 N m
Courant au démarrage	1561.8 A
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance nominal	0,862
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	200.76 kW
Vitesse de synchronisme	1500 tr/min

Le calculateur de paramètre a fait 100 itérations. Les paramètres calculés sont présentés au tableau suivant.

Tableau 4.17 : Paramètres calculés pour le moteur de 200 kW.

Résistance au stator (R_s)	0.1241 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	3820.4 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	7.5267 Ω
Résistance constante (R_c)	1.2262 x 10-4 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.0105 Ω
Inductance constante (X_c)	0.2723 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.2003 Ω
Paramètre X_{i0}	3,5306
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	2,5174
Partie saturable de l'inductance X_c	0,7982
Courant de saturation de l'inductance X_m (I_{sat_xm})	0,2088
Partie saturable de l'inductance X_m	0,8208

Le graphique du courant à vide en fonction de la tension est présenté à la figure 4.16. Les figure 4.17 et 4.18 représente les courbes du couple et du courant à rotor bloqué en fonction de la tension. L'erreur maximale sur les spécifications est de 8.45% et l'erreur moyenne est de 1.94%. Il est donc possible de voir que les paramètres calculés représentent bien le comportement cette machine asynchrone et ce à différent niveau de tension.

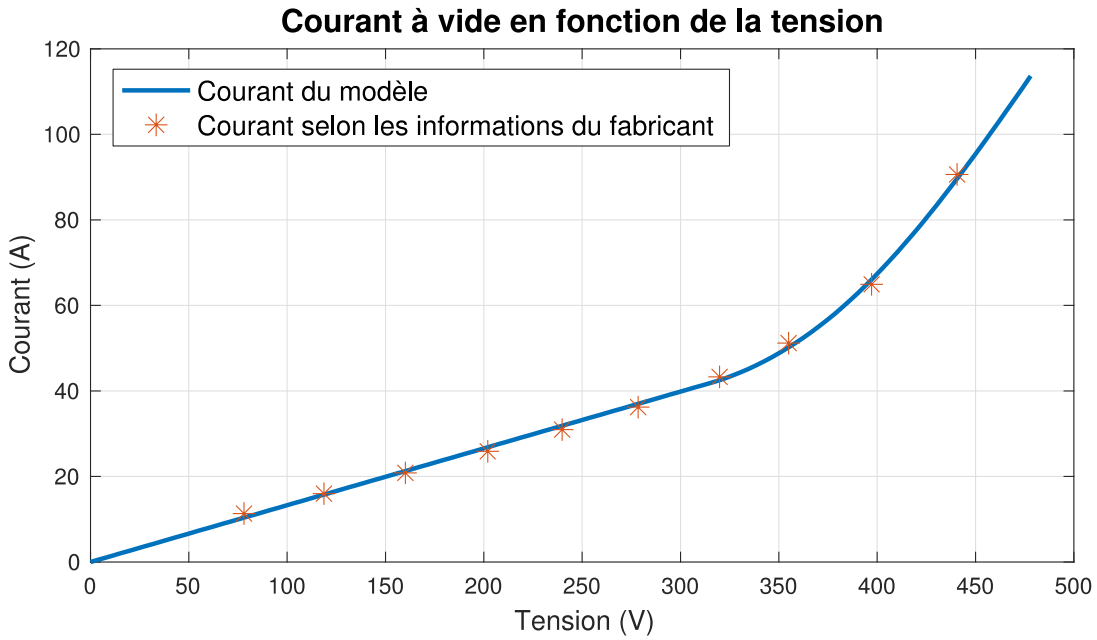


Figure 4.16 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 200 kW.

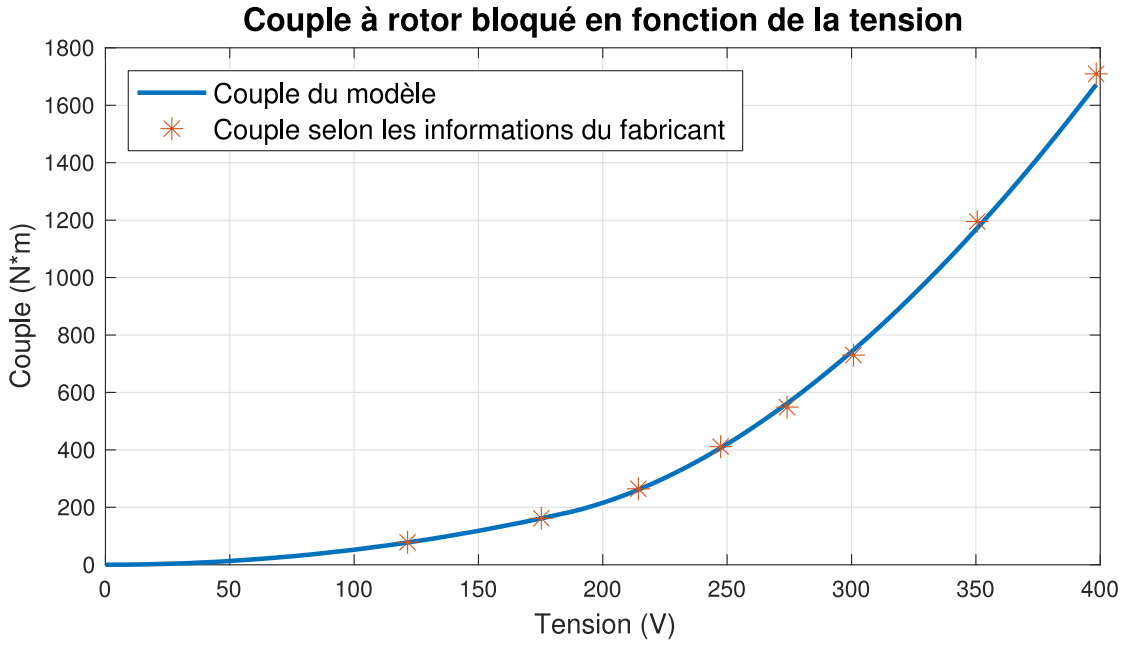


Figure 4.17 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 200kW.

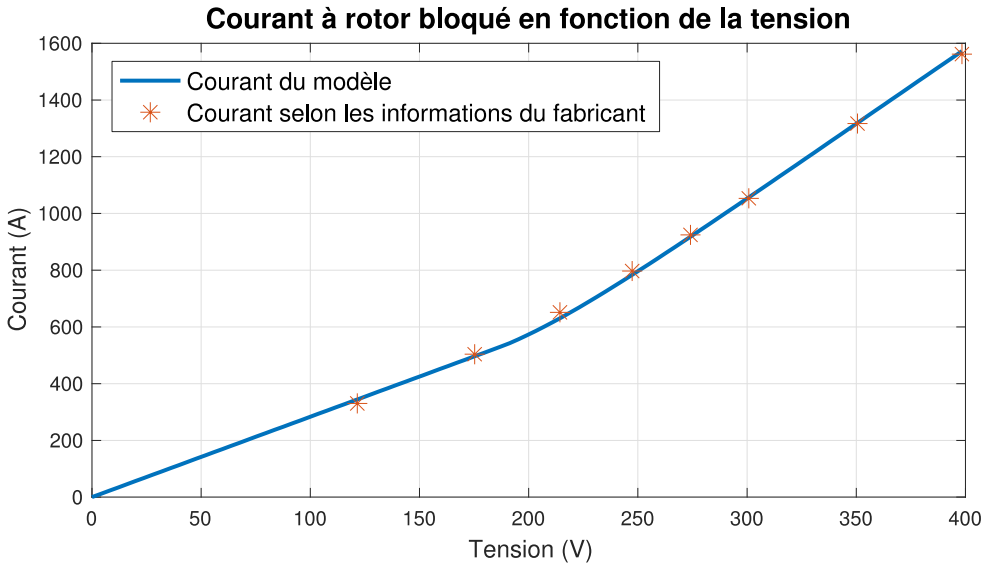


Figure 4.18 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 200kW.

4.3.2 Moteur de 300 kW

Les informations de la plaque signalétique du moteur de 300 kW sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 4.18 : Information de la plaque signalétique du moteur de 300 kW.

Tension nominale phase-phase	690 V
Couple nominal	1922.9 N m
Courant nominal	297 A
Vitesse nominale	1491.9 tr/min
Couple au démarrage	4172.6 N m
Courant au démarrage	2447.3 A
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance nominal	0,879
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	299.83 kW
Vitesse de synchronisme	1500 tr/min

Les paramètres calculés après 100 itérations se retrouvent au tableau 4.19.

Tableau 4.19 : Paramètres calculés pour le moteur de 300 kW.

Résistance au stator (R_s)	0.0793 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	3487 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	4.2964 Ω
Résistance constante (R_c)	4.2335 x 10-4 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.0096 Ω
Inductance constante (X_c)	0.1255 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.0940 Ω
Paramètre X_{i0}	3,7384
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	1,7296
Partie saturable de l'inductance X_c	0,3922
Courant de saturation de l'inductance X_m (I_{sat_xm})	0,2994
Partie saturable de l'inductance X_m	0,8128

Le courant à vide en fonction de la tension se retrouve à la figure 4.19. Le couple et le coulant à rotor bloqué en fonction de la tension sont présentés respectivement aux figures 4.20 et 4.21. L'erreur maximale sur les spécifications est de 18.4% et l'erreur moyenne est de 2.32%. Les points fournis par les essais de ce moteur sont dispersés, ce qui pourrait expliquer les erreurs un peu plus élevées. Il est possible de voir que les courbes du courant et du couple selon les paramètres calculés semblent être en bonne concordance avec les points des essais malgré cela.

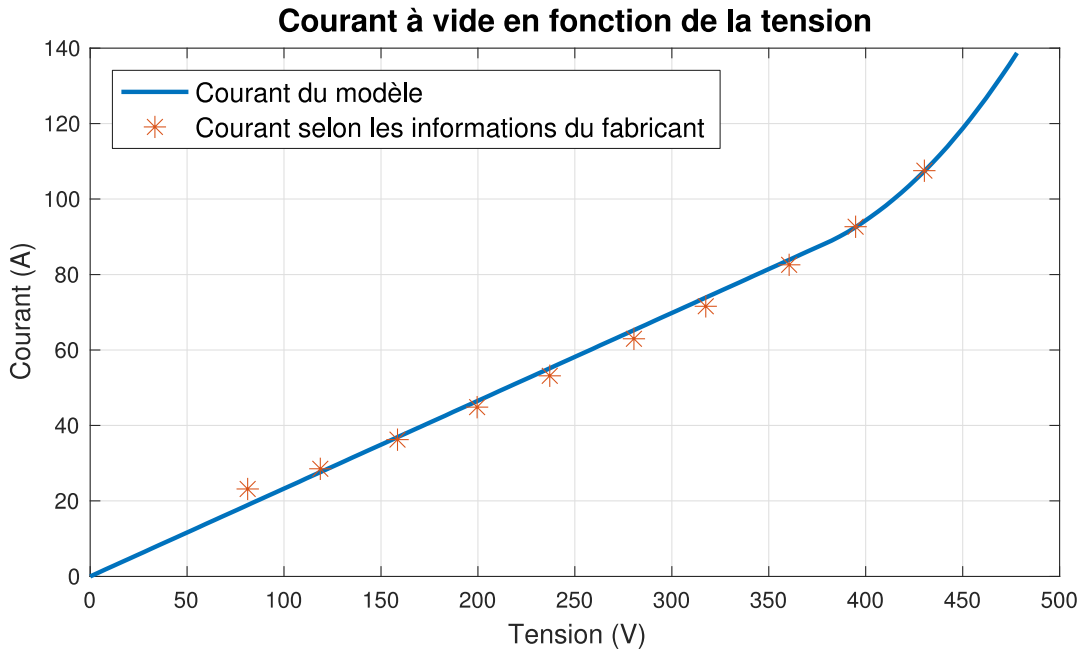


Figure 4.19 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 300 kW.

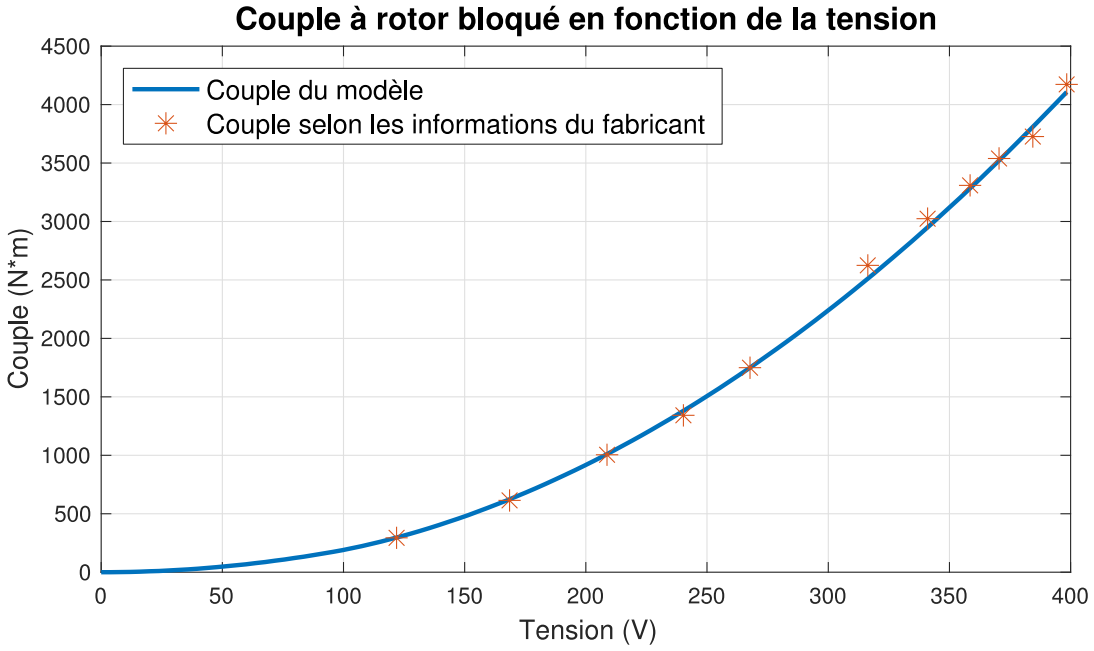


Figure 4.20 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 300kW.

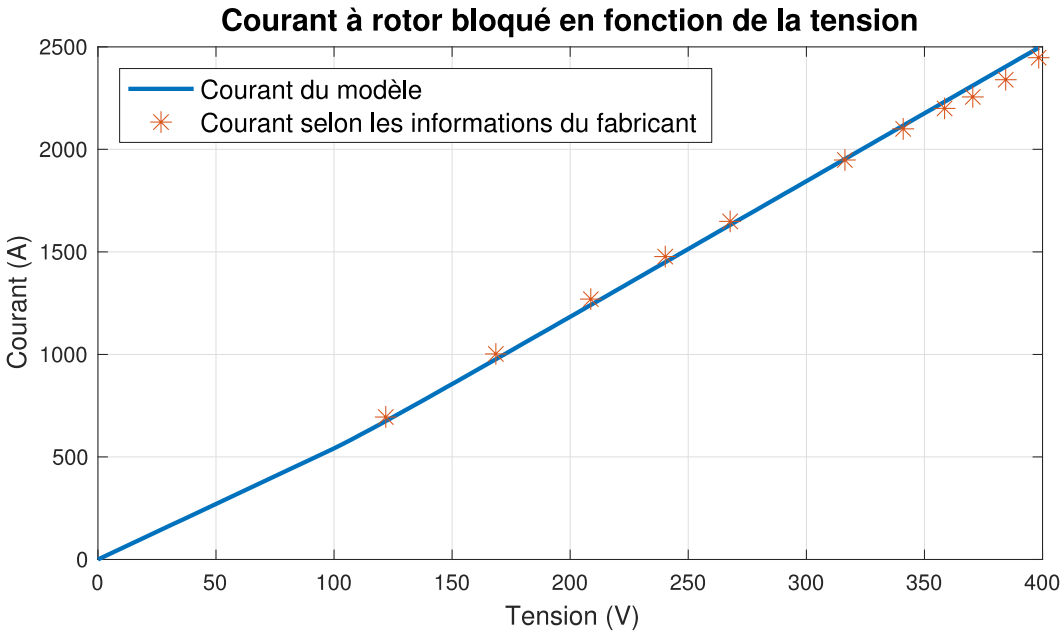


Figure 4.21 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 300kW.

4.3.3 Moteur de 400kW

Le tableau suivant présente les informations de la plaque signalétique du moteur de 400 kW.

Tableau 4.20 : Information de la plaque signalétique du moteur de 400 kW.

Tension nominale phase-phase	690 V
Couple nominal	2564 N m
Courant nominal	400 A
Vitesse nominale	1489 tr/min
Couple au démarrage	6307.4 N m
Courant au démarrage	3016 A
Fréquence nominale	50 Hz
Facteur de puissance nominal	0,89
Nombre de paire de pôle	2
Puissance nominale	399.8 kW
Vitesse de synchronisme	1500 tr/min

Les paramètres calculés par le calculateur sont présentés au tableau ci-dessous.

Tableau 4.21 : Paramètres calculés pour le moteur de 400 kW.

Résistance au stator (R_s)	0.0597 Ω
Résistance représentant les pertes fer (R_m)	2619.9 Ω
Inductance de magnétisation (X_m)	3.665 Ω
Résistance constante (R_c)	1.9317 x 10-6 Ω
Résistance variant selon le glissement (R_v)	0.0076 Ω
Inductance constante (X_c)	0.1154 Ω
Inductance variant selon le glissement (X_v)	0.1232 Ω
Paramètre X_{i0}	4,6465
Courant de saturation de l'inductance X_c (I_{sat})	1,7724
Partie saturable de l'inductance X_c	0,6262
Courant de saturation de l'inductance X_m (I_{sat_xm})	0,233
Partie saturable de l'inductance X_m	0,8477

Les différents graphiques sont présentés aux figure 4.22 à 4.24. L'erreur maximal est de 11.4% et l'Erreur moyenne est de 1.77%. Les paramètres calculés semblent bien représenté le comportement du moteur de 400 kW à différent niveau de tension.

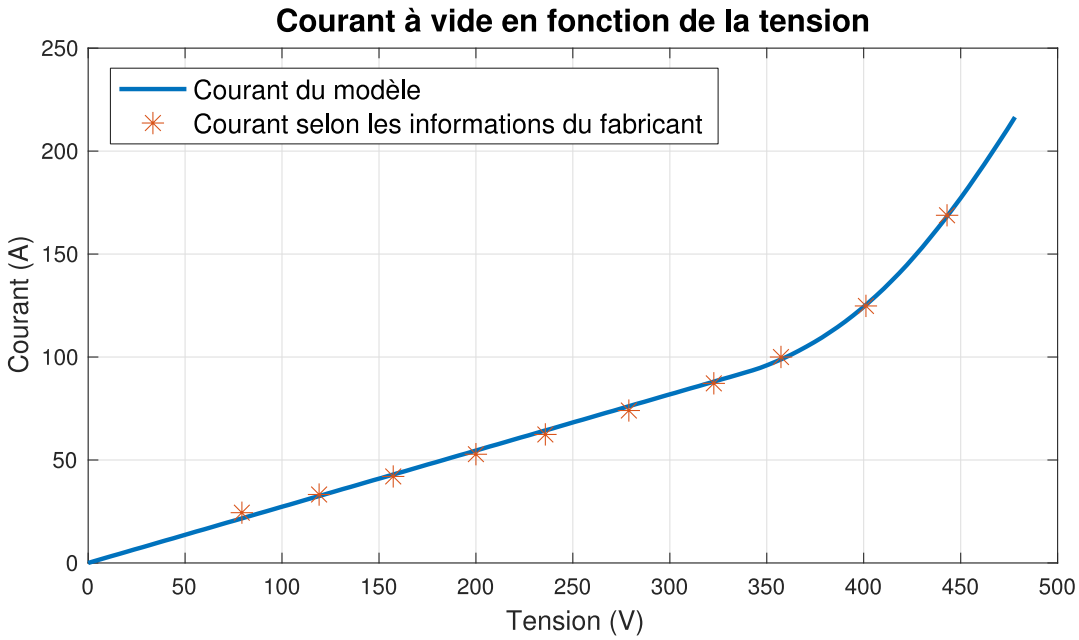


Figure 4.22 : Courant à vide en fonction de la tension du moteur de 400 kW.

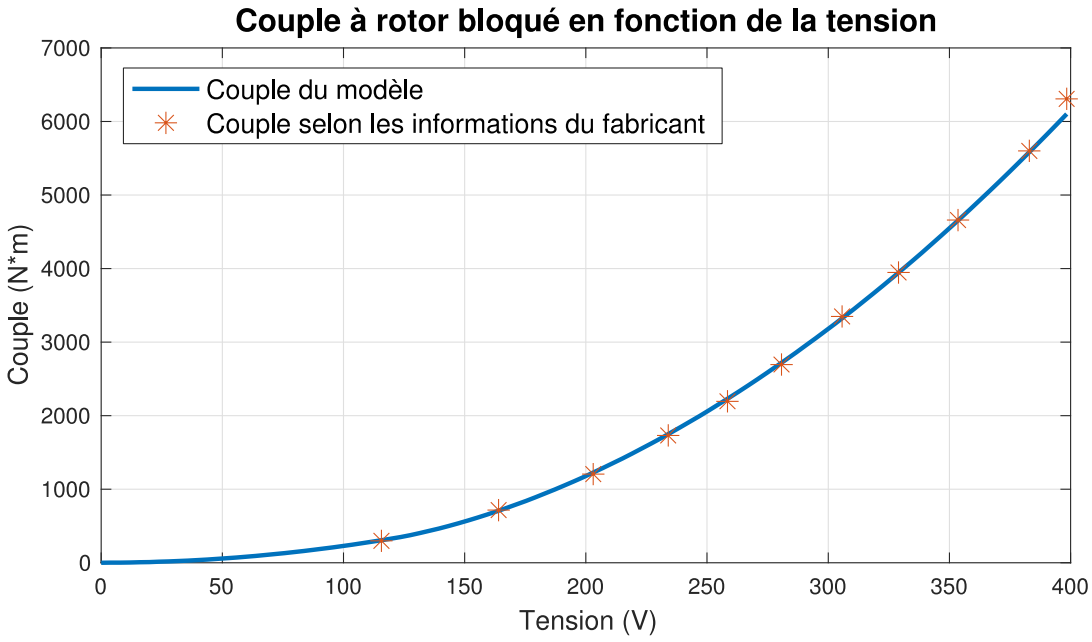


Figure 4.23 : Couple à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 400kW.

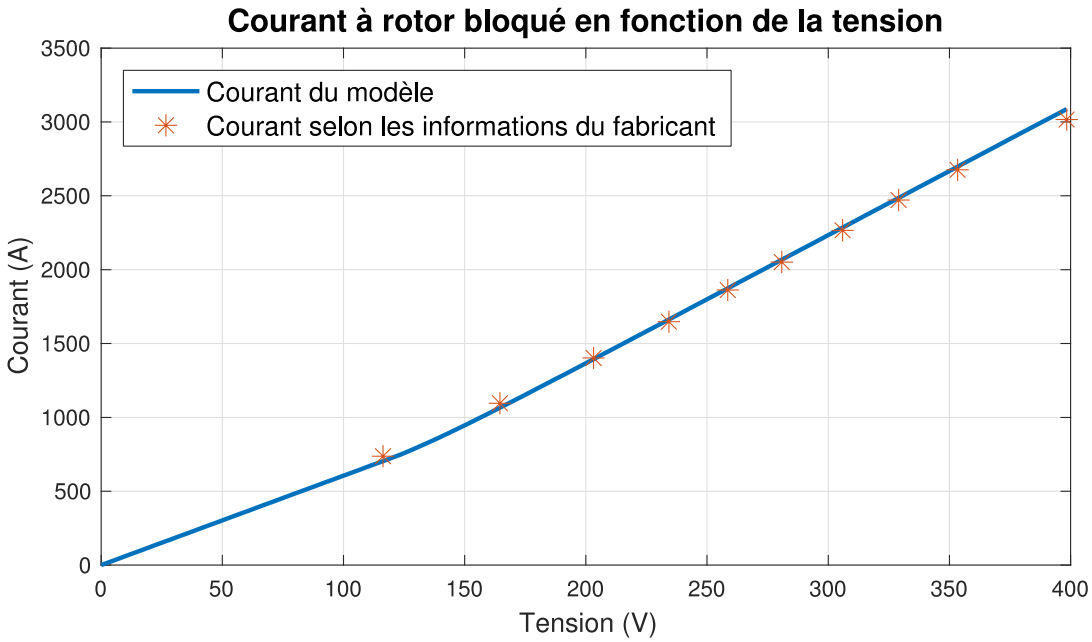


Figure 4.24 : Courant à rotor bloqué en fonction de la tension du moteur de 400kW.

4.4 Discussion des résultats

Le même code a été utilisé pour calculer les paramètres des différents cas présentés dans ce chapitre. Seules les informations fournies en entrée au calculateur changeaient selon le cas. Le code est donc versatile et permet de calculer les paramètres selon la quantité d'information fournie en entrée. Le modèle à cage double de la figure 2.6 a été utilisé pour tous les cas. Le code a été testé avec les autres modèles présentés au chapitre 2. Les résultats étaient semblables et n'ont pas été présenté pour alléger la lecture.

En premier lieu, le calcul des paramètres a été effectuer pour 115 moteurs venant d'une banque de donnée. Une solution a été trouvé dans 67 cas. La majorité des cas n'ayant pas convergé sont des moteurs de faible puissance et de faible efficacité. L'algorithme de résolution semble converger vers des paramètres qui ne sont pas optimaux. Le courant au démarrage était souvent la spécification sur laquelle l'erreur était la plus élevée. Les différents modèles présentés au chapitre 2 ont été testés avec ces moteurs, mais aucune solution n'a été trouvé. Différents algorithmes de résolution ont été testés avec le logiciel MATLAB, mais des résultats semblables ont été trouvés. L'auteur croit donc qu'il existe certains phénomènes (électriques ou magnétiques) qui ne sont pas

représentés dans les modèles utilisés couramment dans la littérature qu'il faudrait inclure pour mieux représenter ces moteurs de faible puissance et faible efficacité.

Ensuite, le calcul des paramètres a été fait à partir d'informations provenant de courbes du couple, courant et facteur de puissance en fonction de la vitesse. Le modèle utilisé et les paramètres calculés représentent bien les spécifications fournies en entrée. Il a donc été possible de vérifier que le calculateur peut calculer des paramètres à partir de courbes.

Finalement, le calcul des paramètres a été fait à partir d'informations sur les machines asynchrones à différents niveaux de tension. Ces informations étaient des courbes du courant à vide, du couple à rotor bloquée et du courant à rotor bloqué en fonction de la tension. Elles provenaient de trois moteurs de puissances différentes : 200 kW, 300 kW et 400 kW. Les paramètres calculés ont permis d'avoir un modèle représentant bien les performances de ces moteurs à différents niveaux de tension. La saturation de l'inductance de magnétisation a dû être prise en compte pour bien représenté le courant à vide en fonction de la tension de ces moteurs. La fonction de saturation de [17] a été utilisée. Il a été possible de vérifier par le fait même que cette fonction de saturation représente bien la saturation observer par des essais électriques.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Pour conclure, la liste des contributions apportées par le travail développé dans ce mémoire sera dressée. Ensuite, les limites et contraintes du calculateur développé seront expliquées. Finalement, des nouvelles voies de recherche et des recommandations seront fournies

5.1 Contributions

Un des buts de ce travail de maîtrise était de développé un calculateur de paramètres pour les machines asynchrones permettant de représenter le comportement de la machine asynchrone à différents niveaux de tension. Ceci a été fait à partir de courbes du courant à vide, du couple à rotor bloqué et du courant à rotor bloqué en fonction de la tension. Le calculateur a pu calculer les paramètres de trois moteurs de puissances différentes à partir de ces courbes. Dans les trois cas, les paramètres calculés permettaient de bien représenter le comportement du moteur à différents niveaux de tension.

Le calculateur devait également pouvoir s'adapter à la quantité d'information fournie en entrée. Ceci a été démontré en utilisant le calculateur pour calculer les paramètres à partir de cinq ou six spécifications, à partir de courbes du couple, du courant et du facteur de puissance en fonction de la vitesse et à partir de courbes du courant à vide, du couple à rotor bloqué et du courant à rotor bloqué en fonction de la tension. Le même code a été utilisé pour ces différents cas.

Différents modèles équivalents de machines asynchrones devaient pouvoir être utiliser avec le calculateur. La façon de faire cela a été expliqué dans ce travail. Ceci permet de pouvoir comparer différents modèles facilement ainsi que de pouvoir utiliser de nouveaux modèles.

5.2 Limites et contraintes

La plus grande limite du calculateur concerne les cas qui ne convergents pas. Le calculateur ne peut pas garantir qu'il trouvera des paramètres respectant les spécifications données. Il faudra toujours effectuer un calcul des paramètres pour voir si une solution est trouvée ou non. De plus, lorsque le calculateur ne converge pas, cela ne veut pas dire qu'une solution n'existe pas. Un cas qui ne converge pas peut être dû à des mauvaises spécifications en entrée (spécifications irréalistes), ou encore à un mauvais modèle ou encore des mauvais points de départ. Bref, le

calculateur ne peut pas garantir une solution à un problème donné, et lorsqu'il ne converge pas, cela ne garantit pas qu'il n'existe pas de solution à ce problème.

5.3 Nouvelles voies de recherche et recommandation

Le calculateur a été spécialement conçu pour être modulaire. Chaque partie du code (calcul des points de départ, système d'équations à résoudre, algorithme de résolution) est séparée des autres et peut être changée facilement. Cela veut dire que le calcul des points de départ pourrait être améliorer éventuellement si jamais un meilleur calcul est trouvé. Si des nouveaux modèles équivalents de la machine asynchrone sont développés, ils pourront être incorporés au calculateur en changeant les fonctions dans le système d'équations à résoudre. Finalement, si un meilleur algorithme de recherche de la racine d'une fonction est développé, il peut être inclus dans le calculateur.

En ce qui a trait au cas qui ne convergeaient pas dans la section 4.1, l'hypothèse avancée est que les modèles de machines asynchrones utilisés présentement dans la littérature ne représentent pas bien les moteurs à basse puissance. Cette hypothèse est énoncée car l'écrasante majorité des cas qui ne convergeaient pas était des moteurs de faibles puissances et que la plus grande erreur se situaient sur une spécification au démarrage (courant au démarrage ou couple au démarrage). Il faudrait donc étudier ces cas pour vérifier s'il existe un phénomène électrique ou magnétique au démarrage de moteurs de faible puissance qui n'est pas pris en compte dans les modèles équivalents des machines asynchrones.

Les paramètres calculés par les calculateurs de paramètres sont généralement utilisés dans des programmes de simulation de réseaux électriques. Les formules utilisées dans les logiciels de simulation diffèrent de celles utilisés par les calculateurs. Les formules utilisées dans les calculateurs (incluant celui développé dans ce mémoire) sont des formules dîtes « statiques » par opposition aux formules utilisées dans les logiciels de simulation qui sont de type « dynamiques ». Il serait possible d'interfacer le calculateur avec un logiciel de simulation. Par exemple, une fois les paramètres de départ calculés, ceux-ci seraient utiliser par le logiciel pour simuler un démarrage de machine asynchrone. Ensuite, les erreurs entre les différents points de la simulation (couple et courant) et les points fournis au calculateur seraient calculées. L'algorithme calculerait ensuite de nouveaux paramètres qui seraient utiliser par le logiciel de simulation. Le calcul des paramètres de

cette façon serait plus long (il faudrait faire une simulation pour chaque itération du code), mais les paramètres calculés ainsi assurerait le comportement désiré de la machine asynchrone en simulation. Ceci permettrait également d'utiliser des courbes « dynamiques » comme un démarrage dynamique d'un moteur asynchrone avec le calculateur de paramètres.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Kundur, Power system stability and control. New York: McGraw Hill, 1994.

[2] J. M. C. Guimaraes, J. V. Bernardes, A. E. Hermeto, and E. C. Bortoni, “Determination of three-phase induction motors model parameters from catalog information,” 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014.

[3] J. M. C. Guimaraes, J. V. Bernardes, A. E. Hermeto, and E. D. C. Bortoni, “Parameter Determination of Asynchronous Machines From Manufacturer Data Sheet,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 3, pp. 689–697, 2014.

[4] J. Zheng, Y. Wang, X. Qin, and X. Zhang, “An offline parameter identification method of induction motor,” 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008.

[5] K. Kampisios, P. Zanchetta, C. Gerada, and A. Trentin, “Identification of Induction Machine Electrical Parameters Using Genetic Algorithms Optimization,” 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.

[6] A. S. Ramya and P. Raja, “Estimation and performance evaluation of an induction machine using optimization techniques,” 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012.

[7] V. P. Sakthivel, R. Bhuvaneswari, and S. Subramanian, “Bacterial Foraging Technique Based Parameter Estimation of Induction Motor from Manufacturer Data,” Electric Power Components and Systems, vol. 38, no. 6, pp. 657–674, 2010.

[8] K. Lee, S. Frank, P. K. Sen, L. G. Polese, M. Alahmad, and C. Waters, “Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data,” 2012 North American Power Symposium (NAPS), 2012.

[9] M. H. Haque, “Determination of NEMA Design Induction Motor Parameters From Manufacturer Data,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 4, pp. 997–1004, 2008.

[10] M. M. A. Abdelaziz and E. F. El-Saadany, “Estimation of induction motor single-cage model parameters from manufacturer data,” 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013.

[11] M. Torrent, “Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses,” European Transactions on Electrical Power, vol. 22, no. 7, pp. 989–1015, 2011.

[12] J. Pedra and F. Corcoles, “Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters From Manufacturer Data,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp. 310–317, 2004.

[13] J. Pedra, “On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 4, pp. 1709–1718, 2008.

[14] G. Rogers, J. Di Manno and R. Alden, "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants", IEEE Power Engineering Review, vol. 4, no. 4, pp. 22-23, 1984.

[15] D. Lindenmeyer, H. Dommel, A. Moshref, and P. Kundur, “An induction motor parameter estimation method,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 23, no. 4, pp. 251–262, 2001.

[16] S. Chapman, Electric machinery fundamentals. New York : McGraw-Hill, 2012.

[17] Rogers, G. and Shirmohammadi, D. Induction Machine Modelling for Electromagnetic Transient Program. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-2(4), pp.622-628, 1987.

[18] Rogers, G. and Benaragama, D. (1978). An induction motor model with deep-bar effect and leakage inductance saturation. Archiv für Elektrotechnik, 60(4), pp.193-201.

[19] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", Quarterly of Applied Mathematics, vol. 2, no. 2, pp. 164-168, 1944.

[20] D. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 11, no. 2, pp. 431-441, 1963.

ANNEXE A – LISTE DES MOTEURS DE LA BANQUE DE DONNÉES

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
1	ABB 110 kW	400	352	194	2982	1474,4	704	1056	50	0,86
2	ABB 110 kW High Output	400	352,73	185	2978	1461,5	846,552	1058,19	50	0,9
3	ABB 110 kW M3BP 315 SMA	400	352	336	2980	2452,8	704	1056	50	0,86
4	ABB 11 kW M3BP 160 MA	400	39	20	2930	126	74,1	97,5	50	0,88
5	ABB 132 kW M3BP 315 SMB	400	423	336	2980	2486,4	930,6	1269	50	0,88
6	ABB 15 kW M3BP 160 M	400	49	26,5	2920	174,9	112,7	122,5	50	0,9
7	ABB 160 kW M3BP 315 SMC	400	513	336	2980	2520	1179,9	1539	50	0,89
8	ABB 160 kw 400 V	400	1028	287	1487	2066,4	2467,2	2981,2	50	0,85

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
9	ABB 18.5 kW M3BP 160 L	400	60	32	2920	233,6	156	162	50	0,91
10	ABB 1.1 kW M2BA 80 M2 B	400	3,69	2,33	2850	16,31	8,118	8,118	50	0,85
11	ABB 1.5 kW M2BA 90 S2 A	400	5,03	3,13	2850	21,91	11,066	12,575	50	0,85
12	ABB 200 kW M3BP 315 MLA	400	641	336	2980	2587,2	1666,6	1923	50	0,9
13	ABB 22 kW M3BP 180 M	400	71	38,5	2930	277,2	177,5	191,7	50	0,89
14	ABB 250 kW M2BA 355 S	400	801	410	2980	2706	1041,3	2403	50	0,92
15	ABB 2.2 kW M2BA 90 L2 A	400	7,37	4,49	2850	31,43	16,214	25,795	50	0,85
16	ABB 30 kW M3BP 200 MLA	400	97	53	2955	386,9	232,8	300,7	50	0,88
17	ABB 315 kW M2BA 355 SMA	400	1010	510	2978	3927	1313	3333	50	0,92

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
18	ABB 355 kW M2BA 355 SMB	400	1140	580	2975	4118	1368	3648	50	0,92
19	ABB 0.37 kW M2BA 71 M2 A	400	1,26	0,94	2810	5,734	2,772	3,78	50	0,8
20	ABB 37 kW M3BP 200 MLB	400	120	64	2950	467,2	300	384	50	0,89
21	ABB 3 kW M2BA 100 L2 A	400	9,98	5,92	2870	41,44	21,956	29,94	50	0,86
22	ABB 400 V 1500 rpm 110 kw	400	706	193	1487	1389,6	1412	1765	50	0,86
23	ABB 400 V 1500 rpm 0.25 kw	400	1,72	0,75	1390	3,9	3,612	4,644	50	0,73
24	ABB 400 V 1500 rpm 37 kw	400	239	68	1480	448,8	573,6	597,5	50	0,84
25	ABB 400 V 1500 rpm 4 kw	400	26,71	8,24	1430	53,56	61,433	74,788	50	0,81
26	ABB 400 V 1500 rpm 500 kw	400	3207	845	1489	6422	4169,1	9300,3	50	0,88

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
27	ABB 400 V 1500 rpm 710 kw	400	4556	1220	1489	8296	5467,2	12301,2	50	0,87
28	ABB 400 V 1500 rpm 75 kw	400	483	135	1484	931,5	1207,5	1352,4	50	0,85
29	ABB 400 V 1500 rpm 7.5 kw	400	49,74	14,34	1440	93,21	114,402	134,298	50	0,85
30	ABB 400 kW M2BA 355 MLA	400	1281	655	2982	5043,5	2049,6	4227,3	50	0,92
31	ABB 400 kW M2BA 400 M	400	1281	655	2982	5043,5	2049,6	4227,3	50	0,92
32	ABB 450 kW M2BA 355 MLC	400	1444	730	2977	5694	1732,8	4620,8	50	0,92
33	ABB 450 kW M2BA 400 MA	400	1444	730	2977	5694	1732,8	4620,8	50	0,92
34	ABB 45 kW M3BP 225 SMB	400	145	79	2960	576,7	362,5	406	50	0,89
35	ABB 4 kW M2BA 112 M2 A	400	13,17	7,52	2900	52,64	28,974	42,144	50	0,89

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
36	ABB 500 kW M2BA 400 LKA	400	1602	795	2980	5565	1281,6	4485,6	50	0,93
37	ABB 0.55 kW M2BA 71 M2 B	400	1,88	1,31	2800	7,991	4,136	5,076	50	0,82
38	ABB 55 kW M3BP 250 SMA	400	177	95	2970	712,5	354	531	50	0,89
39	ABB 560 kW M2BA 400 LKB	400	1793	910	2983	6643	1255,1	6096,2	50	0,92
40	ABB 5.5 kW M2BA 132 S2 A	400	17,99	10,19	2920	71,33	39,578	53,97	50	0,88
41	ABB 0.75 kW M2BA 80 M2 A	400	2,51	1,63	2850	9,943	5,522	7,53	50	0,82
42	ABB 75 kW	400	483	135	1484	931,5	1207,5	1352,4	50	0,85
43	ABB 75 kW M3BP 280 SMA	400	240	131	2978	995,6	504	720	50	0,98
44	ABB 7.5 kW M2BA 132 S2 B	400	24,53	13,54	2920	94,78	53,966	83,402	50	0,89

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
45	ABB 90 kW M3BP 280 SMB	400	289	152	2976	1124,8	606,9	838,1	50	0,9
46	ABB AMA 500L2L; 1.8MW	10000	5758,37	120	2985	660	2879,185	12668,414	50	0,9
47	ABB HXR 450LD8; 400kW	3000	5140,94	96	743	508,8	4626,846	10281,88	50	0,83
48	Baldor 2.2 kW 208V	208	12,27	8,3	1729	66,483	43,3131	47,7303	60	0,87
49	Baldor 2.2 kw 208 V	208	12,27	8,3	1729	66,483	43,3131	47,7303	60	0,87
50	Baldor 2.2 kw 460 V	460	12,2	4,1	1741	38,581	57,584	60,634	60	0,78
51	Baldor 40 hp	575	160	37,4	1775	249,832	276,8	507,2	60	0,86
52	Baldor CEM3581T-5; 1 HP	575	4,068	1,1	1750	11,198	13,558644	19,660644	60	0,78
53	Baldor ECP3661T-5; 3 HP	575	12,2	3,2	1760	26	29,8168	42,0168	60	0,8
54	Baldor M2334T-5; 20 HP	575	80,95	20	1760	142	169,5093	282,0298	60	0,83

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
55	Baldor M50502S-4; 500 HP	460	996,65	530	3575	3388,82	1029,53945	2350,1007	60	0,92
56	LEROY SOMER 110Kw LS 315 SN	400	711	201	1477	1527,6	2133	2275,2	50	0,84
57	LEROY SOMER 11Kw LS 160 MP	400	72,2	21	1454	161,7	166,06	231,04	50	0,86
58	LEROY SOMER 0.12Kw LS 63 M	400	0,8	0,44	1380	1,408	1,92	1,84	50	0,7
59	LEROY SOMER 132Kw LS 315 MP	400	849	236	1484	1793,6	2462,1	2547	50	0,85
60	LEROY SOMER 15Kw LS 160 LR	400	98,6	28,8	1456	216	285,94	354,96	50	0,84
61	LEROY SOMER 160Kw LS 315 MR	400	1030	286	1484	2202,2	2987	3090	50	0,85
62	LEROY SOMER 0.18Kw LS 63 M	400	1,2	0,64	1390	2,368	3,12	3,12	50	0,65
63	LEROY SOMER 18.5Kw LS 180 MT	400	121	35,2	1456	267,52	326,7	387,2	50	0,84

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
64	LEROY SOMER 1.1Kw LS 90 S	400	7,4	2,5	1429	12	11,84	14,8	50	0,84
65	LEROY SOMER 1.5Kw LS 90 L	400	10	3,4	1428	18,02	18	23	50	0,82
66	LEROY SOMER 1.8Kw LS 90 L	400	12	4	1438	24	25,2	38,4	50	0,82
67	LEROY SOMER 22Kw LS 180 LR	400	144	41,7	1456	329,43	432	475,2	50	0,84
68	LEROY SOMER 0.25Kw LS 71 M	400	1,7	0,8	1425	3,68	4,59	4,93	50	0,65
69	LEROY SOMER 2.2Kw LS 100 L	400	14,6	4,8	1436	28,32	30,66	36,5	50	0,81
70	LEROY SOMER 30Kw LS 200 LT	400	196	56,3	1460	371,58	568,4	568,4	50	0,84
71	LEROY SOMER 0.37Kw LS 71 L	400	2,5	1,06	1420	5,194	6	7	50	0,7
72	LEROY SOMER 37Kw LS 225 ST	400	241	68,7	1468	432,81	650,7	626,6	50	0,84

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
73	LEROY SOMER 3Kw LS 100 L	400	19,9	6,5	1437	39	49,75	55,72	50	0,81
74	LEROY SOMER 45Kw LS 225 MR	400	293	83,3	1468	524,79	791,1	761,8	50	0,84
75	LEROY SOMER 4Kw LS 112 M	400	26,6	8,3	1438	58,93	66,5	79,8	50	0,83
76	LEROY SOMER 0.55Kw LS 71 L	400	3,8	1,62	1400	7,776	8,74	9,5	50	0,7
77	LEROY SOMER 0.55Kw LS 80 L	400	3,7	1,42	1410	6,39	7,4	8,51	50	0,76
78	LEROY SOMER 55Kw LS 250 ME	400	355	101	1478	707	958,5	994	50	0,84
79	LEROY SOMER 5.5Kw LS 132 S	400	36,7	11,1	1447	69,93	88,08	102,76	50	0,83
80	LEROY SOMER 0.06Kw LS 56 M	400	0,4	0,3	1360	0,9	1,12	1,12	50	0,6
81	LEROY SOMER 0.75Kw LS 80 L	400	5,1	2,01	1400	9,045	10,2	11,22	50	0,77

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
82	LEROY SOMER 75Kw LS 280 SC	400	485	137	1478	986,4	1358	1406,5	50	0,84
83	LEROY SOMER 7.5Kw LS 132 M	400	49,4	15,2	1451	106,4	118,56	143,26	50	0,82
84	LEROY SOMER 0.9Kw LS 80 L	400	6	2,44	1425	14,152	18	18	50	0,73
85	LEROY SOMER 90Kw LS 280 MD	400	582	164	1478	1246,4	1746	1746	50	0,84
86	LEROY SOMER 0.09Kw LS 56 M	400	0,6	0,39	1400	1,248	1,68	1,68	50	0,6
87	LEROY SOMER 9Kw LS 132 M	400	59,1	18,1	1455	124,89	130,02	183,21	50	0,82
88	RMP 11Kw Y160M1-2	380	35,01	21,8	2930	152,6	70,02	80,523	50	0,88
89	RMP 11Kw Y160M-4	380	70	22,6	1460	158,2	154	161	50	0,84
90	RMP 15Kw Y160M2-2	380	47,75	29,4	2930	205,8	95,5	109,825	50	0,88

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
91	RMP 15Kw Y160M-4	380	95,5	30,3	1460	212,1	210,1	219,65	50	0,85
92	RMP 18.5Kw Y160L-2	380	58,89	35,5	2930	248,5	117,78	129,558	50	0,89
93	RMP 18.5Kw Y180M-4	380	117,77	35,9	1470	251,3	235,54	259,094	50	0,86
94	RMP 1.1Kw Y80M2-2	380	3,5	2,5	2830	17,5	7,7	8,05	50	0,86
95	RMP 1.1Kw Y90S-4	380	7	2,8	1400	18,2	16,1	16,1	50	0,78
96	RMP 1.5Kw Y90L-4	380	9,55	3,7	1400	24,05	21,965	21,965	50	0,79
97	RMP 1.5Kw Y90S-2	380	4,77	3,4	2840	23,8	10,494	10,971	50	0,85
98	RMP 22Kw Y180M-2	380	70	42,2	2940	295,4	140	154	50	0,89
99	RMP 22Kw Y2180L-4	380	140,1	42,5	1470	297,5	280,2	308,22	50	0,86
100	RMP 2.2Kw Y100L1-4	380	14	5	1430	35	30,8	32,2	50	0,82
101	RMP 2.2Kw Y90L-2	380	7	4,8	2840	33,6	15,4	16,1	50	0,86

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
102	RMP 30Kw Y200L1-2	380	95,5	56,9	2950	398,3	191	210,1	50	0,89
103	RMP 30Kw Y200L-4	380	191	56,8	1470	397,6	382	420,2	50	0,87
104	RMP 37Kw Y200L2-2	380	117,77	69,8	2950	488,6	235,54	259,094	50	0,89
105	RMP 3Kw Y100L-2	380	9,55	6,4	2870	44,8	21,01	21,965	50	0,87
106	RMP 3Kw Y100L2-4	380	19,1	6,8	1430	47,6	42,02	43,93	50	0,81
107	RMP 4Kw Y112M-2	380	12,73	8,2	2890	57,4	28,006	29,279	50	0,87
108	RMP 4Kw Y112M-4	380	25,46	8,8	1440	61,6	56,012	58,558	50	0,82
109	RMP 0.55Kw Y80M1-4	380	3,5	1,5	1390	9	8,4	8,05	50	0,76
110	RMP 5.5Kw Y132S1-2	380	17,5	11,1	2900	77,7	35	40,25	50	0,88
111	RMP 5.5Kw Y132S-4	380	35,01	11,7	1440	81,9	77,022	80,523	50	0,84
112	RMP 0.75Kw Y80M1-2	380	2,39	1,8	2830	11,7	5,258	5,497	50	0,84

# du moteur	Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
113	RMP 0.75Kw Y80M2-4	380	4,7	2	1390	12	10,81	10,81	50	0,76
114	RMP 7.5Kw Y132M-4	380	47,75	15,4	1440	107,8	105,05	109,825	50	0,85
115	RMP 7.5Kw Y132S2-2	380	23,87	15	2900	105	47,74	54,901	50	0,88