الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالى و البحث العلمى Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

> جامعة سعد دحلب البليدة Université SAAD DAHLAB de BLIDA

> > كلية التكنولوجيا Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك Département d'Électronique

Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Yahiaoui Adel

Tales Antar

pour l'obtention du diplôme Master2 en Génie électrique option Signaux en Ingénierie des Systèmes et Informatique Industrielle

Thème

Optimisation du démarrage d'une machine asynchrone entraînant une charge

Proposé par : Dr. N. Cheggaga

Année Universitaire 2012-2013



&

ملخص:

اختيار نظام إقلاع محرك غير متزامن يعتمد على العديد من المعايير (قوة المحرك، العطالة ، قوة الشبكة ، وانخفاض الجهد الخ) لإقلاع محرك غير متزامن ، وهناك عدة إجراءات للإقلاع .

العمل المقدم في هذه المذكرة يتعلق بدراسة إقلاع محرك غير متزامن ، ويتم تطبيق تقنية التحسين الخوارزمية الجينية على الإقلاع الترددي ، يعقبه تطبيق نظام تغذية يتكون من عاكس التوتر ثلاثي الطور

كلمات مفاتيح

المحرك اللاتزامني , إقلاع ترددي , الخوارزمية الجينية , تحسين, حمولة .

Résumé:

Le choix du système de démarrage de la MAS dépend de plusieurs paramètres (puissance du moteur, inertie de la machine entraînée, puissance du réseau, chute de tension, etc.).Pour démarrer un moteur asynchrone, il existe plusieurs procédures de démarrages.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de démarrage de la machine asynchrone, un technique d'optimisation à base des algorithmes génétiques est applique au démarrage a tension et fréquence variables a cette machine, suivi d'une application d'une alimentation constituée d'un onduleur de tension triphasé.

Mots clés :

Machine asynchrone, algorithme génétique, démarrage fréquentiel, optimisation, charge.

Abstract:

The choice of Starting system the MAS depends on several parameters (engine power, Inertia of the driven machine, Power network, Voltage drop, etc...). To start an asynchronous motor there are several procedures for starting.

The work presented in this thesis the study start the asynchronous machine, an optimization technique based on genetic algorithms is applied to start a variable voltage and frequency to this machine, followed by application of a power supply comprising a three-phase voltage inverter

Keywords:

Asynchronous machine, genetic algorithm, starting frequency, optimization, load.



Organigramme général de l'algorithme génétique pour la solution de démarrage a tension et fréquence variables de la MAS



Organigramme de la simulation du démarrage direct de la MAS



Organigramme de la simulation des démarrages progressif de la MAS.



Organigramme de la simulation de démarrage fréquentiel de la MAS.

Principal Notation :

Ω_s	La vitesse statoique
Ω _r	La vitesse rotorique
ω _s	La pulsation de courant statorique
ω _r	La pulsation de courant rotorique
ω _m	La pulsation mécanique
Р	Nombre pairs de pole
Ω's	La vitesse relative du champ tournant statorique par rapport au rotor
Ώr	La vitesse relative du champ tournant rotorique par rapport au stator.
θ	L'angle électrique représente la position de rotor par rapport au stator.
ν	La tension.
R	La résistance.
i	Le courant.
arphi	Le flux.
t	Le temps.
s, r	indice relatif au stator et au rotor.
$[v_{abcs}] [v_{abcr}]$	Vecteur tension appliquées aux phases statoriques et rotoriques.
$[I_{abcs}] [I_{abcr}]$	Vecteur courants appliquées aux phases statoriques et rotoriques.
$[\varphi_{abcs}] [\varphi_{abcr}]$	Vecteur flux statoriques et rotoriques.
R_s ; R_r	Résistance d'une phase statorique et rotorique.

[*L*_{SS}] Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

- [*L_{rr}*] Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.
- [*M*_{sr}] Matrice des inductances mutuelles entre phase statoriques et rotoriques.
- **M**_{sr} Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et rotorique.
- *dq* Axes correspondants au référentiel de Park.
- $[P(\theta)]$ La matrice de transformation de Park.
- θ_s L'angle entre stator et l'axe d.
- θ_r L'angle entre rotor et l'axe d.
- *θ* L'angle entre stator et rotor.
- V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} , V_{qr} tension de park.
- I_{ds} , I_{as} , I_{dr} , I_{ar} courants de park.
- $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ flux de park.
- ω_s Pulsation statorique.
- ω_r Pulsation rotorique.
- *ω* Pulsation mécanique.
- *L_s* Inductance cyclique statorique.
- *L_r* Inductance cyclique rotorique.
- *M* Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
- *J* L'inertie de toutes les masses tournantes ramenées à l'arbre de la machine.
- T_r Le couple de charge.
- f_v Coefficient de frottement visqueux.
- *T_e* Couple électromagnétique.

- σ Coefficient de dispersion de blondel.
- **C**_r Couple résistant.
- **W** Vitesse angulaire.
- *Is* Courant statorique.
- *t*_d Temps de démarrage.
- *T* La chaleur spécifique du matériau constituant la cage.
- *m* La masse de la cage.
- Id Courant de démarrage.
- *In* Courant nominale.
- *Td* Couple de démarrage.
- *Tn* Couple nominale.
- *n* Nombre de temps de démarrage rotorique ou de crans.
- *Cp* Couple de pointe.
- gn Glissement nominal.
- *G*_{*f*} L'accélération de la variation de la fréquence.
- *G_u* L'accélération de la variation de la tension.
- AG Algorithme Génétique.
- *U_d* La tension redressée.
- MLI modulation de largeur d'impulsion.
- MAS Machine Asynchrone.

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail

Nous remercions également tous les membres du jury, pour avoir accepté de juger notre modeste travail.

Nous aimons spécialement remercier notre promotrice madame N.CHEGGAGA qui nous a proposé ce sujet, pour sa disponibilité et pour son grand aide tout au long de ce travail.

Nous remercions également tous les enseignements de la filière Génie Électrique. A tous ce qui ont contribuée de prés ou de loin à notre formation. Enfin, nous tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.



Table des matières

Notion principales	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : problématique

I.1 Introduction
I.2 Présentation de la machine asynchrone3
I.2.1.1 Constitution de la machine
I.2.1.1 le stator5
I.2.1.1 L'entrefer
II.2.1.1 Le rotor
I.2.2 Différentes types de la MAS
I.2.2.1 Machine asynchrone à cage7
I.2.2.1 Machine asynchrone à rotor bobiné
I.2.3 Principe de fonctionnement de la MAS
I.2.4 Démarrage de la MAS12
I.3 Modélisation de la machine asynchrone triphasée13
I.3.1 Introduction13
I.3.2 Hypothèses simplificatrices13
I.3.3 Équations électriques en triphasée14
I.3.4 Transformation de repère triphasé-diphasé16
I.3.5 Transformation de Park17
I.3.6 Choix de référentiel19
I.3.6.1 Dans un référentiel lié au stator19
I.3.6.2 Dans un référentiel lié au rotor19
I.3.6.3 Dans un référentiel lié au champ tournant

I.3.7 Modèle d'état de la MAS triphasé	21
I.4 Simulation	
I.4.1 Démarrage direct de la MAS avec d'une charge à t=0.5s	23
I.4.2 Démarrage direct de la MAS avec charge	26
I.5 Conclusion	28

Chapitre II : État de l'art

II.1 Introduction
II.2 Problème du démarrage de la MAS30
II.2.1 Échauffement des bobines dans le rotor34
II.2.2 Énergie mis en jeu pendant le démarrage35
II.3 État de l'art sur les solutions de démarrage des MAS
II.3.1 Démarrage étoile-triangle37
II.3.2 Démarrage par des résistances statorique
II.3.3 Démarrage par des résistances rotorique41
II.3.4 Démarrage par autotransformateur44
II.3.5 Démarrage par gradateur de tension47
II.3.6 Démarrage a tension et fréquence variable de la MAS49
II.4 Les avantages et les inconvénients des principaux modes de démarrage51
II.5 Simulation et discussion des différents modes de démarrage52
II.5.1 Application de démarrage a tension et fréquence variable sur les moteurs à
grand puissance60
II.5.2 Application de démarrage a tension et fréquence variable sur différentes
types de charges63
II.6 Conclusion

Chapitre III : Optimisation a base des algorithmes génétiques de démarrage fréquentiel de la MAS

III.1 Introduction67
III.2 Classification des méthodes d'optimisation68
III.2.1 Méthodes déterministes68
III.2.1.1 Méthodes mathématiques68
III.2.1.2 Méthodes d'apprentissage automatique68
III.2.2 Méthode stochastiques69
III.2.2.1 Mente-Carlo69
III.2.2.2 Méthodes évolutionnistes69
III.3 Les algorithmes génétiques71
III.3.1 Présentation71
III.3.2 Optimisation par les algorithmes génétiques72
III.4 Mécanisme de fonctionnement d'un algorithme génétique72
III.4.1 La population initiale74
III.4.2 Codage et décodage des paramètres75
III.4.3 La fonction d'adaptation77
III.4.4 La sélection des parents78
III.4.5 La recombinaison génétique81
III.4.6 La sélection finale84
III.5 Application des algorithmes génétiques sur le démarrage a tension et fréquence
variables de la MAS85
III.5.1 Les paramètres optimisés par les AG _s 85
III.5.2 Codage des paramètres87
III.5.3 La fonction d'évaluation88
III.5.4 Les paramètres de l'algorithme génétique88
III.5.5 Optimisation de courant et de temps pour un démarrage a tension et
fréquence variables de la MAS89
III.6 Conclusion

Chapitre IV : alimentation a tension et fréquence variable d'une machine asynchrone

IV.1 Introduction	.93
IV.2 Modélisation de l'alimentation de la MAS	.93
IV.2.1 Modélisation du redresseur	.94
IV.2.2 Modélisation du filtre	.96
IV.2.3 Modélisation de l'onduleur de tension	.97
IV.3 La stratégie de commande MLI	98
IV.4 Résultats de simulation	.99
IV.5 Application de démarrage a tension et fréquence variables avec l'utilisation d'un	
onduleur triphasé MLI sinus-triangulaire1	102
IV.6 Conclusion1	105
Conclusion générale1	.06

Annexes

Bibliographie



ANNEXE C



Simulation des autres paramètres de démarrage direct à vide d'une MAS asynchrone

ANNEXE D



Simulation des autres paramètres de démarrage a tension et fréquence variables avec l'utilisation d'un onduleur triphasé a MLI sinus-triangle

ANNEXE C



Simulation des autres paramètres de démarrage par autotransformateur d'une MAS



Bibliographie

[1] Francis Misant : 'Electrotechnique, TOME 3, Machine Electrique', livre, 1991.

[2] A. Bouguerne : 'Diagnostique automatique des défauts des moteurs asynchrone', mémoire de magister, université de Mantouri-Constantine, 2009.

[3] Ounissi Oussama : 'implémentation sur un circuit FPGA du filtre de KALMAN pour la machine asynchrone triphasée ', mémoire de Magister, Saad dahlab blida, 2012.

[4] René Ledoeulff et Mohamed El-Hazaim : 'machines electriques tournantes de la modélisation matricielle à la mise en œuvre ', livre, avril 2009.

[5] R.miludi :'élaboration d'un logiciel simulateur de la machine asynchrone triphasé', mémoire de Master, Saad dahlab blida, 2012.

[6] L.baghli: 'modélisation et commande da la machine asynchrone IUFM de laurraine', article, 2005.

[7] Guide technique : 'démarrage des moteurs asynchrones', guide technique à l'usage des professeurs d'électrotechnique de l'académie de Poitiers.

[8] N. Cheggaga : 'étude et modélisation d'un complexe propulseur naval pour l'augmentation de l'efficacité de transmission d'énergie ', thèse de magister, université yahia fares de medea, 2006.

[9] P. Boye A.Biancciotto: 'le schéma en électrotechnique', livre, 1990.

[10] Chikaui Walid, Bentegri Mouhamed Amine : 'démarrage a tension et fréquence variables d'une machine asynchrone', université yahya fares de medea, 2006.

[11] j.y.Blanc : 'contrôle-commande et protection des moteurs HT', CT 165 édition, schneider électrique décembre 1992.

[12] FOIN FABRICE :'démarragr des moteurs asynchrones', document, capet génie électrique 2001.

[13] Roizot Sébastien : 'Démarreur progressif (Gradateur à angle de phase) ', <u>http://www.courselec.free.fr</u>.

[14] G.S.Fishman 'Monte Carlo, concepts Algorithms and Application' Springer-Verlag, new yourk, 1997.

[15] D.Beasley et R. Martin: 'An Overview of Genetic Algorithms': Part 2, department of Computing Mathematics, University of Wales College of Cardiff, CF2 4YN, 1993.

[16] A. Nabonne : "Algorithmes évolutionnaires et problèmes inverses", chapitre 8, juin 2004.

[17] N.Benahmed : "Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: sélection et pondération des primitives par algorithme génétique". Université du Québec ,2002.

[18] J.PhilippeRennard : "Genetic Algorithm Viewer: Démonstration d'un algorithme génétique", <u>www.rennad.org/alif</u>, Avril 2000.

[19] A.Mezache : 'optimisation de la détection centralisée CFAR dans un clutter weibull utilisant les algorithmes génétiques et les réseaux de neuronnes flous', thèse doctorat, université de constantine.

[20] S.Viver : "stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis", thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 2002.

[21] T.Vallé et M.Yıldızoğlu :"Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie", Université de Nantes et Université Montesquieu Bordeaux IV 2001.

[22] R.T. Sheniev:" La commande fréquentielle optimal des actionneurs électriques

Asynchrone", Leningrad : Soudastraina, 1982.

[23] A.Chabane : "Commande vectorielle par réseaux de neurones de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux",

Mémoire ENP.99-2000.

[24] K.P. Cotricov A.F. Bourdinko: "L'influence des variation de la fréquence dans le démarrage fréquentiel des moteurs asynchrones des complexes propulseurs », Moscou, Mortekhinfomare-Clama, 1994.

I.1 Introduction

On appelle « machines asynchrones » des convertisseurs d'énergie électromécanique caractérisés par le fait que la vitesse de rotation de leur rotor est différente de la vitesse synchrone.

Où $\boldsymbol{\omega}$ est la pulsation des courants statoriques, et p le nombre de paires de pôles.

Ces machines sont également souvent appelées « machines à induction » car Leurs courants rotorique sont induit par les courants circulant dans les bobinages statoriques.

Ce sont des machines rustiques, robustes et peu onéreuses. Autrefois cantonnées à des utilisations simples et peu performantes lorsqu'elles étaient couplées à un réseau à fréquence et tension constantes. Les machines asynchrones se sont répondues dans tous les domaines de la motorisation industrielle, y compris pour des applications de haute technologie, depuis que les progrès récents de l'électronique de puissance et de la commande numérique permettent de les commander avec de bonnes performances dynamiques.

L'intérêt de l'utilisation des machines électriques à courant alternatif est d'éliminer les inconvénients des machines à courant continue (maintenance couteuse, prix élevé, lieu d'installation approprié) tout en gardant les avantages (grande plage de variation de vitesse, la stabilité de fonctionnement et facilité de la commande).

I.2 Présentation de la machine asynchrone

I.2.1 Constitutions de la machine

Les machines asynchrones, encore appelés moteurs a inductions, sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entrainement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant. Ils comportent deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (c'est le stator) l'autre est mobile

3

(c'est le rotor) [1], constitues de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor et monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil, toutefois nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la (figure I.1).



Figure I.1. Élément de constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

donc Les machines asynchrones se composes de trois parties distincts :

- Le stator, partie fixe.
- L'entrefer, amagnétique.
- Le rotor, partie tournante.

I.2.1.1 Le stator :

Un stator est constitué de trois enroulements identique décalés de $\frac{2\pi}{3}$ radians les uns par rapport aux autres. L'ensemble de ces enroulements constituent le bobinage statorique. Les conducteurs de ces enroulements sont logés dans les encoches à la périphérie du stator. Lorsqu'ils sont alimenté par un réseau triphasé, ces enroulements créent un champ tournent multipolaire. Le stator constitue l'inducteur du moteur et a pour rôle de constituer un champ tournent dont l'entrefer de la machine.

Bien évidemment le stator fixe doit être feuilleté puisque elle se trouve placé dans un champ variable. D'ailleurs sa carcasse comporte des ailettes pour augmenter la ventilation des tôles dans les quelles apparaissent des courant de Foucault (figure I.2).



Figure I.2. Stator de la Machine asynchrone [3]

5

I.2.1.2 L'entrefer :

L'entrefer est la partie d'air entre le stator et le rotor (Figure I.3).il doit être aussi étroit que possible pour éviter les pertes de flux.



Figure I.3. Entrefer d'une Machine asynchrone [3]

I.2.1.3 Le rotor :

Un rotor cylindrique formé par l'empilage sur l'arbre de disques ferromagnétiques. Dans ses encoches tourner vers l'entrefer est logé un bobinage polyphasé mis en court-circuit.

Remarque : les bobinages du stator et du rotor doivent avoir le même nombre de pôles (2p) mais leurs nombre de phases peuvent être différents.

I.2.2 Différentes types de la MAS

Les différents types de la machine asynchrone ne se distinguent que par le rotor, dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Un classement de deux familles peut être fait :

- Machine asynchrone à cage.
- Machine asynchrone à rotor bobiné.

2013

Ils se différencient entre autres, par:

- Les valeurs de couples et des courants de démarrage
- La variation de vitesse en marche normale
- Les valeurs de facteur de puissance et de rendement en fonction de la charge.

I.2.2.1 Machine Asynchrone à cage :

Les machines asynchrones à cage sont des machines très robustes, susceptibles de supporter un courant sensiblement supérieur à leur courant nominal pendant les quelques secondes nécessaires à leur démarrage. Il est possible de réduire cet appel de courant en alimentant le stator sous tension réduite (couplage étoile-triangle, utilisation d'un autotransformateur ou d'un gradateur) [4].

Ces machines sont de deux types principaux suivant la constitution du rotor qui peut être à simple cage ou à double cage ceci permet de choisir les caractéristiques de couple et d'intensité de démarrage.

a/ Les rotors à simple cage :

Le circuit rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques forment les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil.les barres sont faits en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristique mécaniques et électriques rechercher par le constructeur, ces moteurs sont utilisées principalement en forte puissance pour améliorer le rendement des installations sur des pompes et ventilateurs. Ils sont également associés à des convertisseurs de fréquence en vitesse variable, qui contribuent à la résolution des problèmes du couple et du courant au démarrage.

b/ Les rotors à double cage ou les rotors à encoches profondes :

Le rotor comporte deux cages coaxiales, externes et internes.

- la cage externe fréquemment réalisée en laiton ou en bronze, à résistance relativement élevées, est placé près de l'entrefer, il présente peu de fuites magnétiques par rapport au stator
- La cage interne profondément noyée dans le fer (circuit magnétique) du rotor, fabriquée en cuivre de plus faible résistance mais a une grande dispersion



Structure d'un Rotor en d'écureuil Rotor en cage Coupe d'un rotor à d'écureuil cage à encoches Profondes Figure I.4. Structure du rotor Tôle utilisée pour la réalisation d'une cage à double encoche

I.2.2.2 Machine asynchrone à rotor bobiné :

Dans ce cas, on a affaire à une armature triphasée à 2p pôles lisses, connectée en étoile et dont chacune des phases est reliée à une bague sur laquelle frotte un balai fixe. Ce dispositif permet de relier le bobinage rotorique soit à un rhéostat de démarrage triphasé, soit à un convertisseur statique pour certains dispositifs particuliers. En fonctionnement normal, les trois phases sont court-circuitées et parcourues par des courants triphasés induits par les courants statoriques. Cette configuration se rencontre principalement pour des machines de forte puissance.



Figure I.5. Rotor bobiné de machine asynchrone [5]

I.2.3 principe de fonctionnement de la MAS

Le principe des moteur à courant alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournent produit par des tensions alternatives.

La circulation d'un courant dans une bobine, Crée un champ magnétique \vec{B} . Ce champ est dans l'axe de la Bobine, sa direction et son intensité sont fonction du Courant *I*. C'est une grandeur vectorielle (*Figure I. 6*).



Figure I. 6 Circulation du courant dans un bobine

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant (**Figure I.7**).



Figure I.7 Courant dans la bobine

9

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre le champ magnétique résultant est la Somme vectorielle des deux autres (Figure I.8).



Figure I.8 Circulation du courant dans deux bobines

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés. Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé les trois champs sont diphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit 50 tr/s (**Figure I.9**).



Figure I.9 Circulation du courant dans trois bobines

Les trois enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre elle va tourner à cette vitesse de synchronisme. L'enroulement statorique, alimenté par un système de courant symétrique, génère une onde de tension magnétique tournant à Ω_s par rapport au stator.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \tag{1.1}$$

Les enroulements rotoriques sont fermés en court-circuit sur eux-mêmes et tournent à la vitesse Ω_m du rotor.

La vitesse relative du champ tournant statorique par rapport au rotor vaut :

$$\Omega'_{s} = \Omega_{s} - \Omega_{m} \tag{1.2}$$

Les conducteurs rotoriques balayés par cette onde tournante sont les sièges d'une tension induit de pulsation :

$$\omega_r = p\Omega'_s = \omega_s - \omega_m \tag{1.3}$$

 $ω_s$ et $ω_r$ désignent respectivement les pulsations des courants statorique et rotorique. $ω_m$ Correspond à la pulsation mécanique $pΩ_m$.

Les enroulements rotoriques, étant en court-circuit, sont parcourus par des courants induits de pulsation ω_r qui gènèrent une onde de tension magnétique tournant par rapport au rotor à :

$$\Omega_{\rm r} = \frac{\omega_{\rm r}}{\rm P} \tag{1.4}$$

La vitesse relative de l'onde rotorique par rapport au stator est donne par :

$$\Omega'_r = \Omega_r + \Omega_m = \Omega_s \tag{1.5}$$

La (figure 1.10) illustre la composition des vitesses angulaires définie par cette relation.



Figure I.10 Illustre la composition des vitesses angulaires

Les ondes statorique étant synchrone, la machine asynchrone est susceptible de délivrer un couple à n'importe qu'elle vitesse de rotation, sauf pour $\Omega_m = \Omega_s$ pour laquelle le phénomène d'induction au rotor disparait.

Dans la machine asynchrone, la condition (1.6) reste constamment satisfaite :

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \tag{1.6}$$

I.2.4 Démarrage de la machine asynchrone

Lors du démarrage d'une MAS, le courant absorbé au démarrage peut attendre jusqu'à 8 fois plus importantes que le courant nominal et ils développent donc un couple de démarrage élevé.

Les courants de démarrage élevé ont souvent comme conséquence une chute de tension désagréable, et le couple de démarrage élevé nécessite des éléments mécaniques résistant aux surcharges. Si la raison pour laquelle les distributeurs d'électricité fixent les valeurs limite pour les courants de démarrage des moteurs, par rapport aux courants de fonctionnement nominaux.

D'autre part, le temps de démarrage dépend de l'inertie de la masse en mouvement, de la vitesse de rotation finale et du couple d'accélération du moteur.

I.3 Modélisation de la machine asynchrone

I.3.1 Introduction

L'une des parties les plus importantes est la modélisation du système en équation. En effet, la machine asynchrone n'est pas un système simple car, de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement comme la saturation, les courants de Foucault...

Cependant, nous n'allons pas tenir en compte ces phénomènes car, d'une part, leur formulation mathématique est difficile, voire même impossible, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable, ou, au moins dans certain conditions. Ceci permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

Nous commençons donc, dans un première temps, par cité les hypothèses simplificatrices, puis nous donnerons les équations qui traduisent le modèle de la machine, nous présenterons ensuite, le modèle général de PARK, duquel, nous déduirons après un choix judicieux du repère d'observation, le modèle de la machine alimenté en tension.

Le modèle complet de la machine asynchrone sera simulé en utilisant le logiciel «MATLAB ».

I.3.2 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifiés la modélisation de la machine asynchrone triphasée en doit adaptés les hypothèses suivants :

- Le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale.
- Nous supposerons que nous travaillons en régime non saturé, donc nous négligeons le phénomène d'hystérésis.
• Les courants de Foucault (courant induit dans le circuit magnétique) sont négligeables.

2013

• La saturation est négligée les flux sont proportionnels aux courants.

I.3.3 Equation électrique en triphasée

Les enroulements des trois phases statorique est séparés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$ de même pour les trois enroulent des phases rotorique, elles peuvent être représenté comme indiqué en (figure *I.11*), θ représente la position de rotor par rapport au stator.



Figure I.11 illustration de la disposition des enroulements statoriques et rotoriques

La loi de faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \tag{1.7}$$

Pour trois phases statoriques et rotoriques en résume cette écriture par l'écriture condensé :

Au niveau du stator

$$[v_{abcs}] = [R_s][I_{abcs}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abcs}]$$
(1.8)

Au niveau du rotor

$$[v_{abcr}] = 0 = [R_r][I_{abcr}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abcr}]$$
(1.9)

Les flux sont données par :

$$[\varphi_{abcs}] = [L_{SS}][I_{abcs}] + [M_{sr}][I_{abcr}]$$
(1.10)

$$[\varphi_{abcr}] = [L_{rr}][I_{abcr}] + [M_{rs}][I_{abcs}]$$
(1.11)

Avec
$$[v_{abcs}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}$$
 $[I_{abcs}] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}$ $[\varphi_{abcs}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$

Εt

$$\begin{bmatrix} v_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} I_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \varphi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

Avec les matrices d'inductance

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix}$$
(1.12)

 $[L_{SS}]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

 $[L_{rr}]$: Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.

 $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre phase statoriques et rotoriques.

 M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et rotorique.

I.3.4 Transformation de repère triphasé-diphasé

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé **abc** vers un système diphasé $\alpha \beta$ (*Figure I.12*). Il existe principalement deux transformation : Clarke et Concordia, la transformation de Clark conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient $\frac{3}{2}$). Tandis que celle de concordia qui est normé, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes [6].



Figure I.12 La transformation triphasé-diphasé

Transformation de Concordia	Transformation de Clarke			
passer d'un système triphasé <i>abc</i> vers un système diphasé $\alpha\beta$				
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c-à-d } [x_{\alpha\beta}] = T_{23}[x_{abc}]$	$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \text{ c-à-d } [x_{\alpha\beta}] = C_{23}[x_{abc}]$			
avec $T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	avec $C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$			

passer d'un système diphasé $\alpha\beta$ vers un système triphasé <i>abc</i>				
$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{32}} \begin{bmatrix} x_{a} \\ x_{b} \\ x_{c} \end{bmatrix} \text{ c-à-d } [x_{abc}] = T_{32} [x_{\alpha\beta}]$	$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_{a} \\ x_{b} \\ x_{c} \end{bmatrix} \mathbf{c} \cdot \mathbf{\dot{a}} \cdot \mathbf{d} [x_{abc}] = C_{32} [x_{\alpha\beta}]$			
avec $T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	avec $C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$			

Le choix de la matrice de passage non normé (Clark) est bien pratique en commande ou l'on traites des grandeurs (I_{ds} , I_{qs}). En effet cela nous permet par exemple d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur, le choix d'une matrice normé (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse

I.3.5 Transformation de PARK

La transformation de PARK est constitué d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère **abc** vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repèredq. Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère **abc** (figure 1.13). Par contre le repère dq est mobile.il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park [6].

Le choix des angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statorique et rotorique). Si l'on not θ_s (respectivement par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp rotoriques).

Il apparaît clairement ensuit que les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncides pour simplifier les équations. Ceci sa fait liant les angles θ_s et θ_r par la relation [6] :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \tag{1.13}$$



Figure I.13 Transformation de Park

La transformation de Park elle rend les équations de la MAS plus simples ce que facilite leur étude et leur analyse .est définie comme suit :

 $\left[X_{dq0}\right] = \left[P_{\theta}\right]\left[X_{abc}\right]$

Où X peut être un courant, une tension ou un flux. Les termes X_d , X_q représentent les composants longitudinales et transversales des variables statoriques tensions, courants, flux et inductance. θ Représente la position du rotor par rapport au stator.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation inverse :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Les équations de la MAS dans le repère de Park.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases}$$
(1.14)

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases}$$
(1.15)

Les relations entre flux et courants sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds=L_{s}I_{ds}+MI_{dr}} \\ \varphi_{qs=L_{s}I_{qs}+MI_{qr}} \\ \varphi_{dr=L_{r}I_{dr}+MI_{ds}} \\ \varphi_{qr=L_{s}I_{qr}+MI_{qs}} \end{cases}$$
(1.16)

I.3.6 Choix du référentiel

I.3.6.1 Dans un référentiel lié au stator :

Dans ce cas les repères ($\alpha_s \beta_s$) et (d, q) sont confondus

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}_s = \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\theta}_r = -\boldsymbol{\theta} \end{cases}$$

Nous pouvons alors écrire

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases}$$
(1.17)

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases}$$
(1.18)

I.3.6.2 Dans un référentiel lié au rotor :

Dans un référentiel liée au rotor $\pmb{\theta}_s = \pmb{\theta}, \pmb{\theta}_r = 0$, dou :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \end{cases}$$
(1.19)

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases}$$
(1.20)

I.3.6.3 Dans un référentiel lié au champ tournant :

Le champ tournant est le champ créé par le bobinage statorique et qui tourne en régime permanent, à la vitesse de synchronisme, si on fixe le repère dq au champ tournant alors on a : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Longrightarrow \theta_s = \omega_s t$

Dans un repère lie au champ tournant les grandeurs de Park sont constantes. Nous avons $\theta_s = \theta + \theta_r \Longrightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Longrightarrow \omega_s = \omega + \omega_r$

Ou : ω_s : est la pulsation statorique.

 $\omega = p\Omega$: est la pulsation mécanique.

 ω_r : est la pulsation rotorique .

Les équations électriques de la MAS dans un repère lié au champ tournant sont

Au stator
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases}$$
(1.21)

Au rotor
$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - p\Omega)\varphi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - p\Omega)\varphi_{dr} \end{cases}$$
(1.22)

Pour les flux on a

Au stator
$$\begin{cases} \varphi_{ds=L_s I_{ds}+M I_{dr}} \\ \varphi_{qs=L_s I_{qs}+M I_{qr}} \end{cases}$$
(1.23)

Au rotor
$$\begin{cases} \varphi_{dr=L_r I_{dr}+M I_{ds}} \\ \varphi_{qr=L_s I_{qr}+M I_{qs}} \end{cases}$$
(1.24)

 L_s : Inductance cyclique statorique.

 L_r : Inductance cyclique rotorique.

 $M = \frac{3}{2}M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

La vitesse de rotation mécanique se déduit de la loi fondamentale de la mécanique générale (la somme des couples à l'arbre est équivalent au couple inertiel) ; elle s'écrit donc sous la forme :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_r - f_v \Omega \tag{1.25}$$

J: est l'inertie de toute les masses tournantes ramenées à l'arbre de la machine.

 T_r : Le couple de charge.

- f_v : Coefficient de frottement visqueux.
- T_e : Couple électromagnétique.

Le couple électromagnétique peut s'écrit sous la forme :

$$T_e = \frac{3}{2}p(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})$$

p : Le nombre de pair de pole.

I.3.7 Modèle d'état de la MAS triphasé

Maintenant on va réécrire les équations de la machine en modèle d'état, de façon à faire apparaitre comme vecteur d'état $\begin{bmatrix} I_{ds} & I_{qs} & \varphi_{dr} & \varphi_{ar} & \Omega \end{bmatrix}$.

Nous avons aussi d'après (1.23) et (1.24)

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - M I_{ds}) \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{qr} - M I_{qs}) \end{cases}$$
(1.26)

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \left(L_{s} - \frac{M^{2}}{L_{r}}\right) I_{ds} + \frac{M}{L_{r}} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qs} = \left(L_{s} - \frac{M^{2}}{L_{r}}\right) I_{qs} + \frac{M}{L_{r}} \varphi_{qr} \end{cases}$$
(1.27)

En rapportant ces dernières équations dans (1.21), (1.22) on aboutira au système d'équations d'états suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + \frac{R_r M^2}{L_r^2} \right) I_{ds} + \omega_s I_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{R_r M}{L_r^2} \right) \varphi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{M}{L_r} \right) \omega \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + \frac{R_r M^2}{L_r^2} \right) I_{qs} - \omega_s I_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{R_r M}{L_r^2} \right) \varphi_{qr} - \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{M}{L_r} \right) \omega \varphi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \frac{R_r M}{L_r} I_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{dr} + \omega_r \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \frac{R_r M}{L_r} I_{qs} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{qr} - \omega_r \varphi_{dr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{I} (T_e - T_r - f_v \Omega) \end{cases}$$
(1.28)

 $\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$: Coefficient de dispersion de blondel

I.4 Simulation

Le modèle de la MAS traduit par (1.28) est programmé puis simuler sur logiciel MATLAB, alimenté de trois tensions sinusoïdales de valeur efficace 220 volts et de fréquence 50hertz.

Les données initiales du programme, sont les paramètres de la machine asynchrone, le couple résistant du mécanisme, ainsi que le comportement du démarrage. Les résultats présentés concernent les graphes qui correspondent au démarrage de la MAS à vide et avec charge, ainsi que des tableaux de calcul.

Note : l'organigramme de simulation de démarrage direct de la MAS est présenté en annexe (B). Et les paramètres des MAS utilisées dans notre travail (MAS à petite puissance, et MAS à grand puissance) sont présentés dans l'annexe (A). Les grandeurs sont représentés en pu (par unit).

I.4.1 Démarrage direct de la MAS avec application d'une charge à t=0.5s:

2013

Dans un premiere temps la MAS démarre à vide, lorsque t=0.5s on applique une charge constante à un couple résistant de 5 N.m.Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivants :



Figure I.14 variation de la vitesse angulaire W en fonction de temps pour un démarrage direct d'une MAS avec ($C_r = 5N.m$ à t = 0.5s)



Figure I.15 variation de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage direct d'une

MAS avec ($C_r = 5N.m$ à t = 0.5s)



Figure I.16 variation du couple électromagnétique C_{em} en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec $(C_r = 5N.m \text{ à } t = 0.5s)$.

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage direct d'une MAS à vide.

$T_d(s)$	I _{moy} (pu)	I _{max} (pu)	$C_{moy}(pu)$	$C_{max}(pu)$
0.2016	1.1516	3.8946	0.8314	4.2664

Tableau I.1 valeurs des caractéristiques principales d'un démarrage direct à vide d'une machine asynchrone à faible puissance.

 T_d : représente le temps de démarrage en seconde(s).

 I_{moy} : représente la valeur moyenne du courant en (pu).

 I_{max} : représente le courant maximale (courant de pique) en (pu).

 C_{max} : représente le couple maximale en (pu).

 C_{moy} : représente le couple moyen en (pu).

La figure (*I*.14) montre le résultat de la simulation du processus de démarrage direct à vide du moteur asynchrone suivi de l'application d'une charge de couple résistant 5 N.m à l'instant t=0.5s. Les figures (*I*.15), (*I*.16) représentent respectivement le courant statorique et le couple électromagnétique.

La première figure(*I.14*) représente l'évolution de la vitesse de rotation, on remarque que la vitesse augmente à l'instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, au cours de ces accroissements il se produit la transformation de l'énergie cinétique du rotor tournant en énergie électromagnétique ou inversement ; la vitesse s'établit à un valeur proche de la vitesse de synchronisme, lorsque la machine atteint le régime permanent, on applique un couple résistant Cr=5 N.m à t=0.5s la vitesse de rotation chute de 1491tr/min à 1427tr/min.

Pour le courant figure (*I.15*), on remarque que le courant devient important en régime transitoire (au cours de démarrage) qui peut atteindre jusqu'à 3.89 fois le courant nominale, puis il diminuer dans le régime permanent, temps au but duquel on applique un couple résistant, cela provoque une augmentation de courant en fonction de la charge entrainée.

Pour le couple électromagnétique figure (*I.16*), on remarque au démarrage des battements importants ce qui explique le bruit engendré par la partie mécanique, dès que la vitesse s'établit le couple électromagnétique sera stabiliser à une faible valeur (proche de zéro), lorsqu'on applique un couple résistant le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple de charge et les pertes de frottements.

Dans le cas d'un démarrage direct à vide de la machine asynchrone le régime permanant est atteint au bout de 0. 2016s.

<u>Note</u>: la simulation numérique des autres paramètres (I_{ds} ; I_{qs} ; φ_{ds} ; φ_{qs} ; I_{as}) est présentée en annexe (C).

I.4.2 Démarrage direct de la MAS avec charge :

On applique à la machine asynchrone une charge de couple résistant $(C_r = 5N.m)$ et on la démarre avec cette charge, on obtient les résultats suivants :



Figure I.17 variation de la vitesse angulaire W en fonction de temps pour un démarrage direct d'une MAS avec couple de charge ($C_r = 5N.m$).



Figure I.18 variation de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec couple de charge ($C_r = 5N.m$).



Figure I.19 variation du couple électromagnétique C_{em} en fonction du temps pour un démarrage direct d'une MAS avec couple de charge $(C_r = 5N.m)$.

27

Le tableau suivant présente des résultats numériques pour un démarrage direct d'une MAS avec couple de charge.

$T_d(s)$	$I_{moy}(pu)$	$I_{max}(pu)$	$C_{moy}(pu)$	$C_{max}(pu)$
0.2587	1.3454	3.8966	1.1179	4.2799

Tableau I.2 valeurs des caractéristiques principales d'un démarrage direct avec charge d'une machine asynchrone à faible puissance.

Après l'application de la charge à t=0s, on remarque que :

Une augmentation du temps de démarrage de 78% par rapport à un démarrage à vide.

D'autre part, on remarque aussi que le courant de démarrage augmente par rapport au courant de démarrage à vide, cela permet d'augmenter le couple électromagnétique.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a commencé par une présentation générale da la machine asynchrone triphasée, qui montre la construction simple de cette machine. Puis nous avons passé en revue les différents types de la MAS, et le principe de fonctionnement. En suit, on a présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone triphasé. On a procédé à la transformation dans le repère de Park lié au champ tournant ce qui aboutit au modèle simplifié.

Finalement nous nous somme intéressé lors des simulations du modèle de la machine asynchrone. D'abord on démarre la machine à vide jusqu'à attendre le régime permanent à ce moment-là nous appliquons une charge avec un couple résistant constant, ensuite nous avons appliqué une charge dés t=0s, il apparait clairement que le démarrage direct de la machine asynchrone présente des avantages :

- ✓ Couple de démarrage élevé.
- ✓ Démarrage rapide.

Malgré ces avantages le démarrage direct ne peut convenir que dans le cas où :

- ✓ La puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limité les perturbations dues à l'appel de courant.
- Le couple de démarrage peut être élève sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entrainée.

C'est pour cela le but du deuxième chapitre est d'étudié les déférentes techniques de démarrage pour limité au maximum ces inconvénients.

II.1 Introduction

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important, provoque une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. En fonction des caractéristiques du moteur et de la charge, plusieurs méthodes de démarrages sont utilisées. Le choix sera dicté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques.

La nature de la charge entraînée aura également une grande incidence sur le mode de démarrage à retenir. L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents problèmes dus au démarrage de la MAS. Puis nous présenterons quelques modes de démarrage d'un moteur asynchrone pour résoudre ces problèmes.

II.2 Problèmes de démarrage de la MAS

Comme le montre le schéma ci-dessous, un entrainement électromécanique est constitué :

- D'un moteur électrique alimenté par un démarreur via un réseau base tension.
- D'un accouplement.
- D'une machine (la charge).



Figure II.1 Entraînement électromécanique de la MAS

La vitesse angulaire Ω de l'arbre moteur est régie par l'équation :

$$C_{moteur} - C_{résistant} = J \frac{d\Omega}{dt}$$
(2.1)

Avec :

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

C_{moteur} : Couple délivré par le moteur.

Crésistant : Couple résistant de la charge.

Le terme $\frac{d\Omega}{dt}$ représente la variation de la vitesse ($\frac{d\Omega}{dt} > 0$: accélération, $\frac{d\Omega}{dt} < 0$: décélération). On appelle souvent le terme $C_{moteur} - C_{résistant}$ couple d'accélération que l'on note :

$$\boldsymbol{C}_{acc} = \boldsymbol{C}_{moteur} - \boldsymbol{C}_{r\acute{e}sistant}$$
(2.2)

- En régime permanent le moteur doit entraîner en rotation la machine à son point de fonctionnement nominal : $C_{moteur} = C_{résistant}$, il n'ya pas donc une accélération : $\frac{d\Omega}{dt} = 0$.
- Au démarrage pour pouvoir démarrer le moteur doit délivrer un couple supérieur au couple résistant opposé par la machine entrainée :

 $\mathcal{C}_{moteur} > \mathcal{C}_{résistant}$, il faut donc une accélération $rac{d\Omega}{dt} > \mathbf{0}$.

Un couple d'accélération important correspond à un démarrage de courte durée. Cependant ce couple ne doit pas être trop grand pour que l'ensemble mécanique entraîné ne subisse pas un «à-coup » préjudiciable.



Figure II.2 condition de démarrage d'une MAS

Pendant la phase de démarrage une machine asynchrone nécessite un appel de courant important à la mise sous tension. Cet appel de courant entraîne :

Des chutes de tensions supplémentaires par rapport au régime permanent en deux endroits (points) (figure *II.1*).

- En amont du départ moteur (tronçon AB). Celle-ci perçue par le moteur mais aussi par les récepteurs voisins. Par exemple, si un circuit d'éclairage est connecté au point D, le démarrage d'un moteur au point C peut entraîner une baisse de l'intensité lumineuse sur ce circuit d'éclairage.
- ✓ Dans le linge du moteur (tronçon BC) ; celle-ci est perçue uniquement par le moteur. Une chute de tension entraîne une perte de couple, ce qui peut entraîner un blocage du rotor ($C_{moteur} < C_{résistant}$) ou un temps de démarrage trop long ($C_{moteur} > C_{résistant}$ mais C_{acc} trop faible).

Des contraintes thermiques pour le moteur. Les machines sont dimensionnées pour un échauffement normal correspond à un point de fonctionnement nominal. Il convient de s'assurer que le temps de démarrage ne soit pas trop long (compte-tenu de la valeur du courant de démarrage) pour que l'échauffement imposé au moteur ne le détériore pas. Des contraintes thermiques pour l'installation. On doit s'assurer que le rapport entre le courant de démarrage et le courant nominal n'est pas préjudiciable à l'installation car celle-ci est prévue pour fonctionner sous le courant nominal.



Figure II.3 temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport ID/IN pour démarrage en partant pour l'état froid

I_D : le courant de démarrage.

I_N : le courant nominal.

A la mise sous tension le moteur doit délivrer un couple supérieur à celui opposé par la machine entraînée. D'une part, le couple délivrée par le moteur doit être suffisamment grand pour que le temps de démarrage ne soit pas trop long ; d'autre part, le couple délivré par le moteur ne doit pas être trop grand pour que l'à-coup de couple n'endommage pas l'ensemble mécanique entraîné [7].

II.2.1 Échauffement des bobines rotoriques au démarrage

Du fait des densités de courant choisies généralement plus élevées au rotor et à l'effet pelliculaire dont les conducteurs rotoriques sont affectés. L'échauffement critique est le souvent celui du rotor. Dans le cas du démarrage dit 'lourds' (couple résistant et inertie élevés), il convient de vérifier soigneusement la capacité thermique et les conditions de refroidissement du rotor, afin d'éviter des échauffements dangereux pour tenue diélectrique ou mécanique de la machine.

Dans le cas d'un moteur à bague à démarrage rhéostatique, la majeure partie de l'énergie thermique de démarrage est dissipée dans la résistance extérieure. Dans le cas de moteur à cage, l'énergie de démarrage apparaît par contre dans l'enroulement du rotor [8-9].

Pour des démarrages 'légers' (couple résistant et inertie réduits), le temps de démarrage est trop court (<10s) pour qu'un échange thermique appréciable avec l'extérieure puisse se développer. Une bobine estimation de l'échauffement à la fin du démarrage est fournie par un calcul d'échauffement adiabatique :

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = \frac{\omega_{thr}}{mT} \cong \frac{j\Omega_s^2}{2mT} = \frac{(2\pi n_s)^2 j}{2mT}$$
(2.3)

T : représente la chaleur spécifique du matériau constituant la cage en j/kgc° .

m : représente la masse de la cage en *kg*.

Dans le cas de démarrage « lourds » conduisant à des temps de démarrage de l'ordre de 60 à 100s, il est nécessaire d'étudier le régime thermique transitoire complet, tenu de la conduction et de la convection. Dans ce cas, l'échauffement maximal atteint au cours du démarrage est de l'ordre de 50% de l'échauffement adiabatique [10].

II.2.2 Énergie mise en jeu pendant le démarrage :

Le démarrage d'un moteur asynchrone s'accompagne d'une dissipation d'énergie sous forme de chaleur dans les enroulements statorique et rotorique susceptible de provoquer des échauffements dangereux pour la donne tenue du matériel.

On a:
$$p_{tr} = c_{em}\Omega_s$$
 (2.4)

$$p_{jr} = gp_{tr} \tag{2.5}$$

dans le cas d'un démarrage à vide $(c_r = 0)$, le moteur initialement à l'arrête (g=1), atteint pratiquement sa vitesse synchrone à la fin du démarrage $(g \cong 0)$, l'énergie dissipée dans l'enroulement rotorique se calcule à partir des relation précédentes :

$$c_{em} = j \frac{d\Omega}{dt} = -j \Omega_{\rm s} \frac{dg}{dt}$$
(2.6)

$$\omega_{thr} = \int_0^t p_{tr} dt = \int_0^t g p_{tr} dt = J \Omega_s^2 \int_0^1 g dg = \frac{J \Omega_s^2}{2}$$
(2.7)

 ω_{thr} : L'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le rotor.

Le démarrage provoque ainsi dans l'enroulement rotorique une dissipation d'énergie thermique au moins égale à l'énergie cinétique du groupe (cas favorable d'un démarrage à vide).

En l'absence de pertes statorique, le réseau fournirait une énergie correspondant à :

$$\boldsymbol{\omega} = \int_0^t \boldsymbol{p}_{tr} dt = J \Omega_s^2 \int_0^1 d\boldsymbol{g} = J \Omega_s^2$$
(2.8)

Soit une énergie correspondante à l'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le rotor et à l'énergie cinétique communiquée aux masses tournantes.

La quantité de chaleur dissipée dans l'enroulement statorique vaut approximativement, en supposant I_s et I'_t du même ordre de grandeur :

$$\omega_{ths} = \omega_{thr} \frac{R_s}{R_r'} \tag{2.9}$$

 R'_r : Résistance rotorique ramené au stator.

Ainsi l'énergie thermique dissipée dans les enroulements statorique et rotorique au cours d'un démarrage à vide vaut :

$$\boldsymbol{\omega}_{ths+r} \cong \frac{J\Omega_s}{2} \left(1 + \frac{R_s}{R_r'}\right) \tag{2.10}$$

Et l'énergie totale fournie par le réseau, en supposant les pertes fer négligeables [7].

$$\omega_{r\acute{e}seau} \cong \frac{J\Omega_s^2}{2} \left(2 + \frac{R_s}{R_r'}\right) \tag{2.11}$$

II.3 État de l'art sur les solutions de démarrage des MAS

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage , les principaux procédés de démarrage des moteurs asynchrone sont les suivants :

- Démarrage statorique .
- Démarrage par couplage étoile-triangle.
- Démarrage par réactance ou par autotransformateur.
- Démarrage rotorique.
- Démarrage par gradateur de tension.
- Démarrage fréquentiel.

II.3.1 Démarrage étoile-triangle

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont réparties sur la plaque à bornes .et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau (par exemple, pour un réseau triphasé 380v. il faut un moteur bobiné en 380v triangle et 660v étoile), le démarrage s'effectue en 2 temps.

1^{er} Temps : mis sous tension et couplage étoile des enroulements. Le moteur démarre à tension réduite.

 2^{eme} Temps : suppression du couplage étoile, et mis en couplage triangle le moteur est alimenté sous pleine tension



Figure II.4 couplage étoile-triangle

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$, l'appel de courant de démarrage est divisé par 3 de l'appel au démarrage direct Id = 1.5 à 2.6 In .



Figure II.5 Variation de l'intensité de courant I en fonction de la vitesse N pour un démarrage étoile-triangle [12]

Le couple de démarrage étant proportionnel au carré da la tension d'alimentation, il est lui aussi divisé par 3.

 $Td = 0.2 \ge 0.5 Tn$



Figure II.6 Variation du couple *T* en fonction de la vitesse *N* pour un démarrage étoile-triangle [12]

> Observation :

- Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct
- Faible complexité d'appareillage
- Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- Coupure entre les positons étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires.

II.3.2 Démarrage par des résistances statorique :

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en sérié avec les enroulements statorique. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par une temporisation. Le démarrage s'effectue en deux temps.

1^{er} Temps : accélération avec les résistances, la tension appliquée aux bornes du moteur n'est pas constante. Cette tension égale à la tension du réseau diminuée de la chute de tension dans la résistance de démarrage. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage.

2^{eme} Temps : élimination des résistances en fin de démarrage et le moteur alimenté sous pleine tension.



Figure II.7 principe de démarrage statorique [12]

La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par le moteur, donc l'intensité de courant est maximale lors de la mise sous tension, puis elle diminue.

Id = 4,5 In



Figure II.8 Variation de l'intensité de courant *I* en fonction de la vitesse *N* pour un démarrage statorique [12]

Le couple initial est relativement faible pour une pointe de courant assez important.

Td = 0,75 Tn



Figure II.9 Variation du couple *T* en fonction de la vitesse *N* puor un démarrage statorique[12]

> Observation :

- La tension d'alimentation est très fortement réduite au moment de démarrage, car l'appel de courant reste important.
- Couple croissant pendant le démarrage et démarrage plus progressif.
- Appel de courant plus important qu'en étoile-triangle 4 à 5 fois *In*.
- Le couple de démarrage est diminué par rapport au démarrage direct 0,75 Tn.

II.3.3 Démarrage par des résistances rotorique [11]

Pour ce démarreur nous avons besoin obligatoirement d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné. Ce démarrage est effectué en N temps :

- Premier temps : alimentation statorique et démarrage sur la totalité des résistances rotorique.
- Deuxième temps : court-circuitage de la premier section de la résistance rotorique.
- Troisième temps : court-circuitage de la deuxième section de la résistance rotorique.
- Nième temps : court-circuitage de la n-1 section de la résistance rotorique.

Le nombre de temps ou de crans n est toujours supérieur de « 1 » au nombre de sections ou contacteurs. Ce nombre n est déterminé approximativement par la formule :

$$\boldsymbol{n} = \frac{\log g_n}{\log \frac{c_n}{c_p}} \tag{2.12}$$

Avec :

$$\frac{c_n}{c_p} = n \sqrt{g_n} \tag{2.13}$$

Cp = couple de pointe.

gn=le glissement nominal.



Figure II.10 Démarrage rotorique en trois temps

Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou très peu supérieur, par exemple pour un couple de démarrage Td = 1,5 Tn l'intensité sera sensiblement de 1,5 In.

2013





On obtient fréquemment un couple de démarrage minimal à **1**, **5** fois*Tn*, puis il augmente progressivement sans surintensité.



Figure II.12 Variation du couple *T* en fonction de la vitesse *N* pour un démarrage rotorique[12]

Observation :

- L'appel de courant est pour un couple de démarrage donné le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage.
- Possibilité de choisir par construction, couple et nombre de temps de démarrage.
- Nécessité d'un moteur à rotor bobiné équipement plus cher.

II.3.4 Démarrage par autotransformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé. Le démarrage s'effectue en trois temps :

Au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, le moteur est alimenté à tension réduite.

Au deuxième temps, l'ouverture du point étoile, seul la self de la partie supérieur de l'enroulement limite le courant.

Au troisième temps, l'autotransformateur est mis hors circuit et le moteur alimenté sous la pleine tension.



Figure II.13 principe d'un démarrage par autotransformateur

L'autotransformateur est généralement muni de prises permettant de choisir le rapport de transformation, donc la valeur de la tension réduite la mieux adaptée.

Le courant et le couple de démarrage varient dans les mêmes portions. Ils ont divisées par ($U_{r\acute{e}seau}/U_{r\acute{e}duite}$).

Les valeurs obtenues pour le courant de démarrage par autotransformateur sont : Id = 1,7 à 4 *In*.



Figure II.14 Variation de l'intensité de courant *I* en fonction de la vitesse *N* pour un démarrage par autotransformateur [12]

Les valeurs obtenues pour le couple de démarrage par autotransformateur sont : Td = 0.5 à 0.85 Tn.



Figure II.15 Variation du couple *T* en fonction de la vitesse *N* pour un démarrage par autotransformateur [12]

2013

> Observation :

- Possibilité de choisir le couple de décollage.
- Réduction de l'appel du courant.
- Démarrage en trois temps sans coupure.

II.3.5 Démarrage par gradateur de tension

Le gradateur est un convertisseur qui permet de transformer une source de tension sinusoïdale alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable de même fréquence.



Figure II.16 Démarrage par gradateur de tension [13]

Principe :

Le gradateur se comporte comme un interrupteur. Il permet d'établir ou d'interrompre la liaison entre la source de tension et le récepteur. La tension aux bornes des récepteurs évolue en fonction de la commande de l'interrupteur. Le réglage de l'intensité du courant débité par la source permet de moduler l'énergie par le récepteur.



Figure II.17 Principe de gradateur de tension [13]

L'interrupteur qui constitué le gradateur est composé de deux thyristors montés en tête-bêche ou d'un triac. Cet étage de puissance est associé à une électronique de commande qui permet de faire varier l'angle d'amorçage α des thyristors. Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par l'intermédiaire d'un gradateur qui provoque la monté progressive de la tension.

On peut réduire l'intensité de courant de démarrage à une valeur précise en agissant sur l'angle de commande des thyristors .L'intensité au démarrage $I_d = 6I_n$ est limitée à $3I_n$



Figure II.18 Courbes du courant de démarrage en fonction de la vitesse [13]

Pour limiter l'appel de courant au démarrage, on réduit la tension efficace ce qui limite le couple moteur au démarrage. On doit s'assurer donc en permanence que le couple de démarrage soit supérieur au couple résistant du système à entrainer(figure *II.19*).



Figure II.19 Courbes du couple de démarrage en fonction de la vitesse [13].

> Observation :

- Limité de l'intensité de démarrage par l'intermédiaire de gradateurs interne.
- Possibilité de choisir le couple de décollage.

II.3.6 Démarrage a tension et fréquence variable de la machine asynchrone

L'alimentation a tension et fréquence variables se fait à l'aide d'un convertisseur statique. A la sortie du convertisseur on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statorique ainsi que leur fréquence.
La MAS est alimenté par onduleur de tension commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), l'alimentation est fournie par le secteur 220/380 au travers un redresseur à diode et un filtre LC délivrant une tension continue, la figure (*II.20*) illustre la structure générale de l'étage d'alimentation de la machine asynchrone.



Figure II.20 Alimentation de la machine asynchrone

Principe :

La fonction du redresseur est de transformer la tension alternative triphasée du réseau en tension continue pour alimenter l'onduleur. La tension obtenir au sortie du redresseur n'est pas parfaitement continue, ce qui donne en général une tension contenue comportant une ondulation résiduelle, un filtre passe-bas a été introduit afin de filtrer la tension redressée et de réduire les ondulations du courant d'entrée, ce filtre est constitué d'une capacité *C* pour assuré le caractère de source de tension à l'entrée de l'onduleur et une bobine *L* pour lisser le courant à travers la source de tension. L'onduleur est la dernière partie du convertisseur statique située avant le moteur, il fournit des courants ou des tensions variables au moteur.

Observation :

- le moteur tourne avec une vitesse correspondant à son besoin momentané donc l'énergie est économisée.
- la consommation de courant est également moindre pour une vitesse plus faible et un couple plus élevé.

- ✤ la vitesse peut être adaptée de manière optimale à des conditions spéciales.
- Ie convertisseur de fréquence ne nécessite aucun entretien.
- Ie moteur permet de démarrer des charges de forte inertie.

II.4 Les avantages et les inconvénients des principaux modes de démarrage

Le tableau (*II.1*) résume les avantages et les inconvénients des principaux modes de démarrage pour les différentes applications :

Mode de	Démarrage	Démarrage	Démarrage	Démarrage	Démarrage par	
démarrage	direct	étoile triangle	statorique	rotorique	autotransformateur	
Courant de	100%	33%	50%	70%	40/65/80%	
demarrage						
Surcharge en	4 à 7 I _n	1.5 à 2.6 <i>I_n</i>	$4.5I_n$	$< 2.5I_n$	1.7 à 4 <i>I_n</i>	
ligne						
Couple en %	100%	33%	50%	$1.5T_{n}$	40/65/80%	
de C_d						
Couple initiale	0.5 à 1.5 <i>T_n</i>	0.2 à 0.5 <i>T_n</i>	0.6 à 0.85 <i>T_n</i>	0.4 à 0.85 <i>T</i> _n	0.5 à 0.85 <i>T</i> _n	
au démarrage						
Avantages	-Démarreur	-économiques	-possibilité de	-bon rapport	-permet de choisir	
	simple et	-bon rapport	réglages des	couple/courant	le couple en	
	-couple au	couple/courant	valeurs au	-possibilité de	fonction de la	
	démarrage		démarrage	réglage des	machine	
	important			valeurs au	-pas de coupure de	
				démarrage	courant pendant le	
					démarrage	
Inconvénients	-pointe de	-couple de	-faible	-moteur à	-nécessite un	
	important	faible	la nointe de	onéreux	onéreux	
	-démarrage	-coupure	courant au	oncreax	-présente des	
	brutal	d'alimentation	démarrage		risques de réseau	
		au	-nécessite des		perturbé	
		changement	résistances			
		de couplage	volumineuses			

Tableau II.1 Tableau de choix du mode de démarrage

II.5 Simulation et discussion des différents modes de démarrage

2013

La simulation de démarrage de la machine asynchrone entrainé une charge est réalisée par programmation en utilisant le logiciel Matlab, qui présente un système itératif de programmation pour le calcul numérique et la visualisation graphique.



> <u>Démarrage étoile-triangle :</u>

Figure II.21 variation de la vitesse angulaire *w* et la tension *U* en fonction du temps pour un démarrage étoile-triangle



Figure II.22 variation de l'intensité de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage étoile-triangle



Figure II.23 variation du couple C_{em} en fonction du temps pour un démarrage étoile-triangle

D'après la visualisation graphique de démarrage étoile triangle on remarque des piques de courants et du couple qui apparaissent lors du passage au couplage pleine tension (couplage triangle), malgré que ce mode de démarrage limite la valeur du courant de démarrage, il présente l'inconvénient de temps de démarrage qui est de longue durée. Aussi le courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile, puis il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle, cela provoque une pointe de courant transitoire très brèves mais très importante, due à la force contre électromotrice du moteur.

Le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui ont un faible couple résistant ou qui démarre à vide.



Démarrage par autotransformateur :

Figure II.24 variation de la vitesse angulaire *w* et la tension *U* en fonction du temps pour un démarrage par_autotransformateur



Figure II.25 variation de l'intensité de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur



Figure II.26 variation du couple C_{em} en fonction du temps pour un démarrage par autotransformateur

Le démarrage par autotransformateur ressemble beaucoup au démarrage étoile triangle, il est caractérisé par les grands piques de courant au moment du passage d'une tension diminuée à la tension nominale, une grande durée de démarrage, de grande pertes, ainsi que l'échauffement des enroulements.



> <u>Démarrage progressif :</u>

Figure II.27 variation de la vitesse angulaire *w* et la tension *U* en fonction du temps pour un démarrage progressif



Figure II.28 variation de l'intensité de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage progressif



Figure II.29 variation du couple C_{em} en fonction du temps pour un démarrage progressif

57

D'après les figures (II.27, II.28, II.29) on constate que le démarrage progressif est différent par rapport au démarrage étoile-triangle et par autotransformateur.

On constate surtout l'absence des piques de courant dans l'étape de finalisation du démarrage car le passage à la tension nominale dans ce procède se réalise progressivement, cette méthode de démarrage et caractérisée par l'augmentation du temps de démarrage, les pertes, ainsi que l'échauffement des enroulements du moteur électrique.

Démarrage à tension et fréquence variable :

Ce type de démarrage est réalisé par une augmentation linéaire de tension et de fréquence simultanément (voir l'organigramme en annexe **B**)



Figure II.30 variation de la vitesse angulaire w, la tension U et la fréquence f en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variable d'une MAS



Figure II.31 Variation de l'intensité de courant I_s en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variable d'une MAS



Figure II.32 Variation du couple C_{em} en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variable d'une MAS

2013

Note : la simulation des autres paramètres de démarrage à tension et fréquence variable est présentée en annexe (C).

D'après les figures (II.30), (II.31), (II.32) on constate surtout l'absence des piques de courant, court durée de démarrage, couple moyen acceptable. Le démarrage à tension et fréquence variables de la machine asynchrone est une méthode qui appartient au groupe de démarrages fréquentiels qui ont beaucoup d'avantages par rapport aux autres méthodes de démarrage a tension réduite par exemple. On peut réaliser le démarrage des MAS a un courant de démarrage proche du nominale pour une court durée de démarrage (voir le tableau (*II.2*)).

II.5.1 Application de démarrage a tension et fréquence variable sur un moteur a grande puissance

On applique le démarrage a tension et fréquence variables sur un moteur industriel de grande puissance ayant les caractéristiques suivantes :

 $Pn = 396 \ kw.$ $Cn = 3000 \ n.$ $In = 1441 \ A.$ $Nn = 1520 \ tr/min.$ $J = 35 \ kg. \ m^{2}.$

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes :



Figure II.33 variation de la vitesse angulaire *w*, la tension *U* et la fréquence *f* en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables d'un moteur industriel.



Figure II.34 variation de l'intensité de courant *Is* en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables d'un moteur industriel.



Figure II.35 variation du couple *Cem* en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables d'un moteur industriel.

Le démarrage fréquentiel est le meilleur démarrage pour les machines asynchrones, cependant la stratégie du démarrage fréquentiel impose les lois de changement de la fréquence et de la tension.

On propose pour toutes les méthodes du démarrage fréquentiel une loi linéaire pour le changement de la tension et de la fréquence, on considère à l'état initial (t=0) une fréquence et une tension nulle dans ce cas deux variables reste à déterminer :

- L'accélération de la variation de la fréquence G_f en pu/s.
- L'accélération de la variation de la tension G_u en pu/s.

Les tableaux II.2, et II.3 présentes les résultats numériques des différentes modes de démarrage de la MAS. Elle montre bien que le démarrage a tension et fréquence variables donne des meilleurs résultats par rapport aux autres types démarrage. Pour comparer les différentes modes de démarrage nous allons analyser les points suivants :

- Le temps de démarrage T_d en s.
- La valeur moyenne de courant de démarrage I_{moy} en pu.
- Le pique de courant de démarrage *I_{max}* en *pu*.
- La valeur moyenne du couple de démarrage C_{moy} en pu.
- Le pique de couple de démarrage C_{max} en pu.

Type de démarrage	$T_d(s)$	I _{moy} (pu)	I _{max} (pu)	C _{moy} (pu)	C _{max} (pu)
Étoile-triangle	2.074	1.046	2.516	0.567	1.559
autotransformateur	2.828	1.194	2.704	0.552	1.835
progressif	0.645	1.459	1.895	0.713	1.459
Démarrage	0.408	0.9236	1.6722	0.6928	1.8612
fréquentiel pour					
une petite machine					

 Tableau II.2
 les caractéristiques principales des différentes modes de démarrage appliqués

IAS	Μ	la	à
AN	Μ	la	à

Type de	$T_d(s)$	I _{moy} (pu)	I _{max} (pu)	C _{moy} (pu)	C _{max} (pu)
démarrage					
Démarrage	1.303	0.8075	2.1168	1.0184	2.6851
fréquentiel					
pour une					
grande					
machine					

 Tableau II.3
 les caractéristiques principales de démarrage fréquentiel appliqué à une MAS

industrielle de grande puissance.

II.5.2 Application de démarrage a tension et fréquence variables sur différents types de charges

Etant donné que Le régime transitoire (le démarrage) de la machine asynchrone dépend de la charge entrainée, les résultats de simulation suivant

2013

présente le démarrage a tension et fréquence variables pour différentes types de charge.

Pour une charge constante Cr=k :

Pour une charge linéaire Cr=K*n :





1.8 1.6 1.4 1.2 Cem,P.U is, P.U 0.8 0.5 0.6 0.4 0.2 -0.5 L 0 0.4 t,s 0.1 0.4 t,s 0.5 0.6 0.7 0.8 0.1 0.2 0.3 0.5 0.6 0.7 0.8 0.2 0.3 a/ courant b/ couple

Figure II.37 variation de l'intensité de courant *Is* et de couple *Cem* en fonction du temps pour une charge variable Cr=K*n.

1.8 1.6 1.5 1.4 1.2 Cem, P.U is, P.U 0.8 0.5 0.6 0.4 0.2 -0.5 L 0^L 0.1 0.2 0.3 0.4 t.s 0.5 0.6 0.7 0.8 0.1 0.2 0.3 0.4 t.s 0.5 0.6 0.7 0.8 a/ courant b/ couple

Pour une charge de couple résistant proportionnel au carré de la vitesse Cr=K*n*n :

Figure II.38 variation de l'intensité de courant et de couple en fonction du temps pour une charge variable Cr=K*n*n.

Les principaux paramètres de l'application de démarrage à tension et fréquence variables pour différents charge sont présentés dans le tableau suivant :

charge	T _d	I _{moy}	I _{max}	C _{moy}	C _{max}
Cr=k	0.4420	1.6904	2.5766	1.5820	2.8520
Cr=K*n	0.4080	0.9240	1.6724	0.6937	1.8622
Cr=K*n*n	0.4080	0.92326	1.6722	0.6928	1.8612

Tableau II.4 les principaux paramètres de l'application de démarrage a tension et fréquencevariables pour différentes charges.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les problèmes de démarrage des machines asynchrones, nous avons rappelé certaines notions importantes (échauffement des bobines dans le rotor, énergie mis en jeu pendant le démarrage), puis les différentes types de démarrage, et d'après la simulation de certains mode de démarrage, on trouve que :

Le démarrage à une fréquence de rotation variable d'une MAS possède beaucoup d'avantages par rapport aux autres méthodes de démarrage présentés. Si on ne prend pas en considération sa difficulté de mise en pratique.

Dans le cas de démarrages fréquentiels avec des lois linéaires de variation de la fréquence et de la tension, on réalise le démarrage de la machine asynchrone avec un courant proche du nominal, une durée de démarrage minimale et un couple au démarrage acceptable sans -à- coup. D'après la simulation de ce type de démarrage on constate que le rapport entre les points de variations de la tension et la fréquence (G_u, G_f) affecte d'une manière significatif les paramètres de démarrage pour cela nous allons procède à une optimisation du démarrage fréquentiel.

III.1 Introduction

L'optimisation est l'une des branches les plus importantes des mathématiques appliquées, et de nombreuses recherches, à la fois pratiques et théoriques, lui sont consacrées, il existe deux grandes approches d'optimisation. L'une est dite déterministe : les algorithmes de recherche utilisent toujours le même cheminement pour arriver à la solution, et on peut donc déterminer à l'avance les étapes de recherche, L'autre est aléatoire : pour des conditions initiales données, l'algorithme ne suivra pas le même cheminement pour aller vers la solution, et peut même proposer différentes solution. C'est vers cette seconde approche que va s'orienter notre travail, et plus particulièrement vers un type bien précis d'algorithme de recherche aléatoire, les algorithmes évolutionnaires.

Les algorithmes évolutionnaires représentent un outil important pour la résolution des problèmes d'optimisation. D'ailleurs, ils sont de plus en plus utilisés dans de multiples domaines. Ils sont faciles à mettre en œuvre et fournissent d'excellentes performances à de faibles coûts.

Les algorithmes génétiques font partie de cette famille, ils permettent d'explorer des domaines possédant de très nombreuses solutions, et leur efficacité pratique a été prouvée bien avant que les résultats de convergence théoriques soient établis. Toutes fois le choix des nombreux opérateurs génétiques, intervenant dans la mise en place de l'algorithme reste à l'appréciation de l'utilisateur, c'est pour cela qu'un domaine de recherche très actif est consacré à l'étude de ces derniers et à la mise en place de nouvelles techniques. Surtout que l'utilisation de ces algorithmes est souvent coûteuse en temps de calculs et les performances de ces algorithmes dépendent beaucoup des différents opérateurs génétiques.

III.2 Classification des méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisations sont classées, selon le mode de recherche de l'optimum, en deux grands groupes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

III.2.1 méthodes déterministes

Ces méthodes peuvent être subdivisées en plusieurs sous classes, les méthodes mathématiques, et les méthodes d'apprentissage automatique.

III.2.1.1 méthodes mathématiques

Pour déterminer un optimum, les méthodes mathématiques se basent sur la connaissance d'une direction de recherche donnée souvent par le gradient de la fonction objectif par rapport aux paramètres. Elles génèrent une suite de points $(X_k, k \in \mathbb{N})$ qui converge vers un minimum local X^* de la fonction f vérifiant, $\varphi(X^*, r) = 0$ suivant le traitement des contraintes utilisées.

L'inconvénient principal des méthodes à base de gradient est que la dérivée de la fonction f n'est pas toujours connue, dans ce cas, il faut l'estimer par différences

finies.
$$\frac{\Delta f}{\Delta x_i} = \frac{f(x_1, \dots, x_{i+\lambda}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i+\lambda}, \dots, x_n)}{\lambda}$$
(3.1)

Dans ces conditions le choix du pas du gradient λ est très important, il conditionne la bonne détermination de la direction de recherche.

III.2.1.2 Méthodes d'apprentissage automatique

Elles ne sont pas des techniques de résolution proprement dites, mais elles sont parfois couplées aux méthodes mathématiques pour augmenter l'efficacité de la convergence.

III.2.2 Méthodes stochastiques

Les méthodes d'optimisations stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabiliste et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Permis ces méthodes stochastiques, les méthodes Monte-Carlo et les méthodes évolutionnistes seront présentés brièvement.

III.2.2.1 Mente-Carlo

C'est la plus simple des méthodes stochastiques. Elle consiste à tirer une solution au hasard à chaque itération, la fonction objective est évaluée en ce point. Si elle est meilleure que l'optimum courant, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante et le processus continue jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient vérifiées. Il s'agit donc d'un processus d'exploration. [14]

Les méthodes de Mente-Carlo peuvent être utilisées, en première approche, pour avoir des renseignements utiles sur la forme de la fonction, Elles permettent par exemple de choisir de façon plus appropriée le point de départ d'un algorithme de recherche locale. Toutefois, cette association ne garantit pas la localisation de l'optimum global.

III.2.2.2 Méthodes évolutionnistes

Les algorithmes évolutionnistes font partie des méthodes stochastiques. Elles reposent sur une analogie avec la théorie d'évolution naturelle des espèces de Darwin selon laquelle, les individus les mieux adaptés à leur environnement survivant et peuvent se reproduire pour donner des enfants encore mieux adaptés de génération en génération.

Contrairement aux techniques d'optimisation qui explorent l'espace à partir d'un point unique, les méthodes évolutionnistes partent d'un ensemble de configurations, c'est-à-dire d'une population d'individus, et la font évoluer à partir d'opérateur à transition aléatoire, la sélection et l'évolution.

Les algorithmes évolutionnistes remontent à l'introduction des algorithmes génétiques (AG) par Holland 6. Rosenberg et Scheffel, qui ont mis aux point trois méthodes assez similaires : les stratégies d'évolution, la programmation évolutionnistes et la programmation génétique. L'évolution différentielle est apparue plus récemment.

Les différences entre ces méthodes sont liées à la représentation des individus et aux modes d'évolution de la population. Les AG utilisent un codage des paramètres de la fonction à optimiser alors que les autres techniques se servent directement de la valeur des paramètres. Chacune des méthodes est caractérisée par un opérateur d'évolution particulier. Les AG et l'évolution différentielle ont un mécanisme de croisement qui permet la génération de nouvelles configurations par recombinaison de solutions existantes. C'est donc un opérateur d'exploration. L'exploitation est faite par le processus de sélection. La stratégie d'évolution et la programmation évolutionniste sont pour leur part, basées principalement sur un procédé de mutation de la population par perturbation successive de chaque solution.

Les méthodes évolutionnistes s'affirment peu à peu comme les techniques d'optimisation les plus robustes. Elle peuvent être appliquées à des problèmes très divers car elles sont indépendantes du processus à optimiser et n'utilisent pas les dérivées. Parmi les algorithmes évolutionnistes cités précédemment, les algorithmes génétiques occupent une place particulière car ils réunissent les trois opérateurs de sélection, croisement, et mutation.

III.3 les algorithmes génétiques

III.3.1 Présentation

Les algorithmes génétiques (AG), ont été initialement développés par John Holland (1975), ses collègues et ses étudiants, à l'université du Michigan dans deux buts principaux [15] :

 Mettre en évidence et expliquer rigoureusement les processus d'adaptation des systèmes naturels.

 Concevoir des systèmes artificiels qui possèdent les propriétés des systèmes.

Leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'économie ils sont utilisés pour l'optimisation des fonctions numériques difficiles (discontinues, multimodales, bruitées...), traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...), optimisation d'emplois du temps, optimisation de design, contrôle de systèmes industriels, apprentissage des réseaux de neurones...etc. La raison de ce grand nombre d'application est claire c'est la simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes, Les (AG) peuvent être utilisés pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaine de production, centrale nucléaire....) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes [15].

De plus, les (AG) utilisent deux stratégies importantes pour trouver une solution ou un ensemble de solution. Ces stratégies sont : l'exploration et l'exploitation. Elles permettent de trouver le maximum global (solution du problème) du fait qu'elles sont complémentaires. Si l'exploration investigue l'ensemble des solutions de l'espace de recherche, la phase d'exploitation quand à elle se sert de la connaissance des solutions pour aider à trouver de meilleures solutions. La combinaison de ces deux stratégies peut être tout à fait efficace [16].

III.3.2 Optimisation par les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique, cependant, les processus auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. En imitant ce principe, les algorithmes génétiques appliqués à un problème d'optimisation font évoluer un ensemble de solutions utilisent un mécanisme de sélection naturelle. Ainsi, les AG ne se basent pas sur un individu, mais sur une population d'individu qui vont évoluer de génération en génération pour obtenir un résultat se rapprochant de la solution optimale.

Pour un problème d'optimisation donnée, un individu représente un point de l'espace d'état ou une solution possible du problème donné il est composé d'un ou plusieurs chromosomes. Les chromosomes sont eux-mêmes constitués de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. A chaque individu est attribué un *«fitness »* qui mesure la qualité de la solution qu'il représente, souvent c'est la valeur de la fonction à optimiser. Ensuite, une nouvelle population des solutions possibles est produite en sélectionnent les parents parmi les meilleurs de la

« génération » pour effectuer des croisements et des mutations [17].

La sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population, tandis que le croisement et la mutation assurent une exploration efficace de l'espace d'état. Les meilleurs individus d'une génération vont créer une nouvelle génération plus adaptée au problème dont la nouvelle population contient une plus grande proportion de caractéristiques des meilleurs individus de la génération précédente.

III.4 Mécanisme de fonctionnement d'un algorithme génétique

Les différentes étapes de fonctionnement des (AG) se résument comme suit :

- Initialisation : une population initiale de N individus est générée aléatoirement.
- > Évaluation : chaque individu est décodé, puis évalué.

- Sélection : création d'une nouvelle population par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.
- **Recombinaison :** croisement et mutation au sein de la nouvelle population.
- Retour à la phase d'évaluation jusqu'à la vérification du critère d'arrêt de l'algorithme.

La mise en œuvre des algorithmes génétiques nécessite donc plusieurs étapes.

L'idée fondamentale est que : la population choisie contient potentiellement la solution, ou plutôt la meilleure solution, à un problème donné. Cette solution n'est pas exprimée car la combinaison génétique sur laquelle elle repose est dispersée chez plusieurs individus. Ce n'est que par l'association de ces combinaisons génétiques au cours de la reproduction que la solution pourra s'exprimer. Lors de la reproduction et de la recombinaison génétique associée, un individu hérite, par hasard, d'un des gènes de chacun de ses parents.

L'originalité des mécanismes repose en particulier sur le fait qu'il n'a pas considéré les seules mutations comme source d'évolution mais aussi et surtout les phénomènes de croisement. C'est en croisant les solutions potentielles existant que l'on peut se rapprocher de l'optimum [18].

L'organigramme fonctionnel présenté dans la figure III.1 illustre la structure générale de l'algorithme génétique. Nous détaillerons dans la suite les diverses phases qui la constituent et les mécanismes associés à chacune d'être elle.



Figure III.1 Organigramme général d'un algorithme génétique.

III.4.1 La population initiale

Comme dans tous les problèmes d'optimisation, une connaissance de bon point de départ conditionne la rapidité de la convergence vers l'optimum. si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état, en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes[18].

La génération de la population initiale peut se faire en prenant des individus régulièrement répartis dans l'espace. Néanmoins, une initialisation aléatoire est plus simple à réaliser. Les valeurs $N(X_i)$ des gènes sont alors tirées au hasard selon une distribution uniforme.

Le choix de la population initiale peut conditionner fortement la rapidité de l'algorithme. Il doit être capable de produire une population d'individus non

homogène qui servira de base pour les générations futures, et capable de rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas ou l'on ne connait rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit assez bien répartie sur tout le domaine de recherche. Une population trop petite évaluera probablement vers un optimum local intéressent alors qu'une population trop grande sera inutile car le temps de convergence sera excessif taille de la population doit être choisie de façon à réaliser un bon compromis entre temps de calcul et qualité du résultat.

III.4.2 Codage et décodage des paramètres

Le codage est une partie très important des algorithmes génétiques. Il permet de représenter l'individu sous forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué de gènes qui prennent des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Certains auteurs n'hésitent pas à faire le parallèle avec la biologie et parlent de génotype en ce qui concerne la représentation binaire, et de phénotype pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante de l'espace de recherche [18].

Le choix du codage est délicat. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs type de codages sont utilisés, on citera à titre d'exemple : le codage réel, et le codage binaire.

Codage binaire :

Goldberg et Holland ont démontré qu'il est idéal de représenter le chromosome en une chaine binaire. C'est pourquoi les AG utilise généralement cette représentation les individus sont représentés sous forme de chaines de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace. Ce type de codage a pour intérêt de permettre la création d'opérateur de croisement et de mutation simple [18].

A chaque variable d'optimisation x_i correspond un gène. Un chromosome sera donc un ensemble de gènes. Chaque point est représenté par un individu doté d'un génotype constitué d'un ou plusieurs chromosomes. La population est un ensemble de N individu qui vont évoluer de génération à une autre. de point de vue informatique, un gène est un entier de long *K* bits. Un chromosome est un tableau de gènes. Un individu est un tableau de chromosomes. La population est un tableau d'individus [18].

Le principe des AG_s à codage binaire est de coder la solution selon une chaine de bits (qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1). Dans ce type de codage les variables (les gènes) dans le chromosome sont en binaire (chaine composée des 0 et des 1) ce qui nécessite à chaque fois de décoder ces chaines pour calculer leurs valeurs en réel avant de calculer la fonction du coût, et ceci se fait pour chaque individu et à chaque itération [19].



Chromosome B

Codage réel :

Exemples

Davis, Janikow et Michalewicz ont effectué une comparaison entre la représentation binaire et la représentation réelle. Ces auteurs ont trouvé que la représentation réelle donne de meilleurs résultats d'après le problème à résoudre dans ce codage le génome est un vecteur réel et l'espace de recherche est un sous ensemble de *IR*. Cette représentation est aujourd'hui très utilisée dans les problèmes d'optimisation car dans nombreuses application du monde réel, ces problèmes sont

naturellement sous forme paramétriques. Les premiers travaux qui ont utilisé ce type de représentation ont été ceux de Rechenberg et de Schweffel quand ils ont introduit les stratégies d'évolution [17-20]. Le codage réel peut-être utile notamment dans le cas où on recherche le maximum d'une fonction réelle.



Figure III.2 Le codage réel

III.4.3 La fonction d'adaptation

Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une fonction d'évaluation ou d'adaptation (**F**). L'évaluation d'un individu ne d'épand pas de celle des autres individus, le résultat fournit par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : C'est le rôle de la fonction **F**. cette procédure permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés [21].

La fonction d'adaptation, associe une valeur pour chaque individu. Cette valeur a pour but d'évaluer le degré d'adaptation d'un individu à son environnement. Les individus peuvent être aussi comparés entre eux. Cette fonction propre au problème,

est souvent simple à formuler lorsqu'il y a peu de paramètres. Contrairement, lorsqu'il y a beaucoup de paramètres, ou lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir. Dans ce cas, la fonction devient une somme pondérée de plusieurs fonctions.

La fonction d'adaptation doit exprimer le plus fidèlement possible, la problématique posée sous forme mathématique, sa définition peut être simplement analytique, ou elle peut éventuellement faire appel au jugement de l'utilisateur. En raison de l'analogie avec la théorie de l'évolution (survie des individus les mieux adaptés à leur environnement), les algorithmes génétiques sont naturellement formuler en terme de maximisation. Ils servent donc à déterminer le maximum d'une fonction **F** réelle à une ou plusieurs variables. Le problème d'optimisation sur l'espace de recherche est formulé comme suit [21]:

Max F(x) $x \in E$

Si le problème à résoudre est un problème de minimisation d'une fonction J.

$$MIN J(x) \qquad x \in E$$

Ceci équivalent au problème de maximisation de F(x), que l'on définit comme suit :

$$F(X) = \frac{1}{1+j(X)}$$

Le choix de F n'est pas unique, mais cette transformation est la plus utilisée dans la littérature.

III.4.4 La sélection des parents

La sélection des parents a pour but de deviner les individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire (les "parents"). La sélection est fondée sur la qualité des individus, estimée à l'aide de fonction d'adaptation. Cette opération est peut- être la plus importante puisqu'elle permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population. Il existe plusieurs méthodes pour la reproduction., on citera à titre d'exemple:

- La sélection par roulette ou proportionnelle.

- La sélection par tournoi.

Parmi ces différents types de sélection la méthode la plus connue et la plus utilisée reste la roulette biaisée, proposée par Goldberg(1989).

La sélection par roulette :

La phase de sélection spécifie les individus de la population qui doivent survivre.

La méthode de base, appelée roue de loterie attribue à chaque individu une probabilité de survie proportionnelle à son adaptation dans la population. Lors de la phase de sélection, les individus sont sélectionnés aléatoirement en respectant les probabilités p_i associées pour former la population de la nouvelle génération.

Cette méthode consiste à dupliquer chaque individu de la population proportionnellement à son milieu. Ainsi, les individus ayant la plus grande valeur de fitness auront plus de chance d'être choisis. Dans une population de *N* individus, la fonction de sélection est la suivante [12]:

$$P_{S}(X_{i}) = \frac{F(X_{i})}{\sum_{j=1}^{N} F(X_{i})}$$
(3.2)

En utilisant cette probabilité de reproduction, on peut créer une roue de loterie biaisée. Chaque individu de la population occupe une section de la roue proportionnellement à son adaptation et qui indique aléatoirement quel individu peut se reproduire.



Figure III.3 Exemple de sélection par roulette

La Sélection par tournoi :

C'est la méthode la plus facile à mettre en œuvre. Cette technique ressemble plus à ce qui passe dans la réalité. Comme son nom l'indique, elle fait s'affronter deux ou plusieurs individus afin que le meilleur gagne. Plusieurs variantes existent. On peut par exemple faire varier le nombre d'individu qui doivent s'affronter au départ, ou encore permettre ou non que le même individu soit éligible plusieurs fois lors d'un même tournoi. Ceci est schématisé par la figure (*III.4*).



Figure III.4 Exemple de sélection par tournoi entre deux individus

III.4.5 La recombinaison génétique

Pour créer un nouvel individu à partir des meilleures solutions précédemment sélectionnées, il est nécessaire de procéder à la combinaison des gènes des parents pris de manière aléatoire et d'après la théorie de l'évolution, pour que la génération suivante soit plus adaptée au problème et plus performante on doit combiner les meilleurs individus de la population actuelle. Une étape d'identification et de sélection de ces meilleurs individus est donc nécessaire pour que chaque individu ait une chance proportionnelle à son adaptation de devenir parent [18].

On distingue deux opérateurs principaux : Le croisement et La mutation qui permette d'explorer l'ensemble des solutions possibles. Ces opérations sont appliquées aléatoirement, à l'aide de deux paramètres, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation. Ces probabilités sont des paramètres très importants, qui influent de façon considérable sur la convergence.

Le Croisement

Le phénomène de croisement est une propriété naturelle de l'ADN. C'est par analogie qu'ont été conçus les opérateurs de croisement dans les (**AG**). Le croisement combine les gènes des deux individus parents pour donner deux nouveaux chromosomes d'individus enfants (descendants) possédant des caractéristiques issues des deux parents.

La zone de croisement est généralement choisie aléatoirement dans les chromosomes. Les méthodes de croisement sont liées au codage mais leur principe est identique. Il a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes, il favorise l'exploration de l'espace de recherche et permet d'explorer l'ensemble des solutions possibles. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Dans un groupe de parents arbitrairement choisis dans la population chaque paire dans la population formée va subir le croisement [18].

De nombreux types de croisement existent dans la littérature. Ils préservent plus ou moins l'identité génétique des parents et permettent un déplacement dans tout l'espace des solutions le type de croisement le plus simple est le croisement à un site.

<u>Croisement à un site</u>

Il consiste à échanger les gènes de chacun des parents de longueur / en vérifiant la probabilité *Pc*. Le site de croisement S doit être choisi entre 1 et (I - 1). Le changement va se faire entre le site sélectionné et la position finale *I* des deux chaînes comme le montre la figure *III.5*.



Figure III.5 Croissement à un site

La mutation

La mutation prend une place de plus en plus importante dans les algorithmes génétiques, alors qu'il y a encore quelques années son rôle était encore considéré comme accessoire. Comme les individus les mieux adaptés sont les plus susceptibles d'être choisis lors de la sélection, la perte de certains gènes est inévitable avec le temps. La mutation est l'opérateur qui permet d'éviter la dégénérescence de la population. Cette dégénérescence peut se traduire par une convergence des individus vers un optimum local, d'où l'importance de la mutation. Ce phénomène génétique d'apparition de "mutants" est rare mais permet d'expliquer les changements dans la morphologie des espèces, toujours dans le sens d'une meilleure adaptation au milieu naturel. Classiquement, la mutation modifie aléatoirement, un petit nombre de gènes, avec un faible taux de probabilité, ceci revient à modifier aléatoirement la valeur d'un paramètre du dispositif. Les individus de la population issus du croisement vont ensuite subir un processus de mutation qui est exécuté bit à bit.

Comme pour le croisement, la mutation dépend du problème posé, la principale différence se situe dans le taux de mutation qui est généralement faible et se situe entre 0.5% et 1% de la population totale. Ce taux faible permet d'éviter une dispersion aléatoire de la population et n'entraîne que quelques modifications sur un nombre limité d'individus [21].

La mutation a pour rôle de maintenir une certaine diversité dans la population et protège les individus contre une perte des informations essentielle contenues dans leurs gènes. Elles permettent d'assurer une recherche aussi bien globale que locale et garantit la convergence vers l'optimum.

Comme pour les croisements, de nombreuses méthodes de mutation ont été développées dans la littérature mais l'une des plus efficaces est celle qui consiste à muter chaque paramètre de la fonction à optimiser avec une probabilité dépendant des informations contenues dans les gènes des individus. Dans le cas du codage binaire, chaque bit est remplacé par son inverse. C'est ce qu'illustre la figure *III.6*.



Figure III.6 la mutation avec le codage binaire

Le principe de la mutation avec le codage par valeurs réelles est le même que précédemment, plusieurs gènes sont choisis aléatoirement et permutés (figure *III.7*).



Figure III.7 la mutation avec le codage réel

III.4.6 La sélection finale

Cette étape consiste à garder seulement les solutions les plus intéressantes, tout en maintenant une population assez grande et assez diversifiée. C'est pourquoi la taille de la population doit rester la même d'une génération à l'autre.

La sélection revient à choisir les meilleurs individus pour former la nouvelle génération, c'est à dire éliminer N individu parmi les 2N individus (N parents et N enfants) pour cela plusieurs méthodes sont proposées [21].

La sélection par descendance

Dans cette méthode, on garde toujours les enfants, quelque soit leur adaptation la population de la nouvelle génération est obtenue par descendance ; les enfants remplaçant automatiquement leurs parents.

L'inconvénient de cette sélection est que l'on risque de voir disparaître les caractéristiques génétiques des parents les mieux adaptés si elles n'ont pas été totalement transmises lors de la recombinaison génétique.

> La sélection de procréation sélective

On garde les N meilleurs individus parmi la population intermédiaire de parents et d'enfants.

III.5 Application des algorithmes génétiques sur le démarrage a tension et fréquence variables de la MAS

Cette partie est consacrée à l'étape la plus importante dans notre travail, elle consiste à tester les performances de la méthode d'optimisation par les algorithmes génétiques d'un démarrage a tension et fréquence variables : recherche dans un espace de solution réduit, mais incluant les meilleurs solutions, cette partie constitué en réalité un travail de préparation à l'utilisation des méthodes d'optimisation d'un démarreur fréquentiel.

III.5.1 Les paramètres optimisés par les AG_s

Les variables du démarrage a tension et fréquence variables sont :

- la variation de la fréquence G_f .
- la variation de la tension G_u .

Les paramètres du démarrage a tension et fréquence variables à optimiser par les AG_s pour chaque variable G_f et G_u sont :

- le courant max de démarrage I_d .
- le temps de démarrage t_{d.}

Les tableaux suivants présentes les variations du courant de démarrage et de temps de démarrage pour un démarrage a tension et fréquence variables d'une MAS à industrielle (les paramètres de la machine sont présentés en annexe A).
Chapitre III : optimisation à base des algorithmes 2013 génétiques de démarrage fréquentiel de la MAS

G _u	G_f											
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
	-			•	•	t	d	•	•			
0.75	3.664	1.842	1.239	0.962	1.101	1.241	1.301	1.331	1.347	1.355	1.36	1.363
1	3.664	1.842	1.235	0.936	0.777	0.905	1.012	1.066	1.097	1.116	1.127	1.133
1.25	3.664	1.842	1.235	0.931	0.755	0.66	0.787	0.873	0.925	0.956	0.977	0.989
1.5	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.635	0.592	0.71	0.785	0.832	0.862	0.883
1.75	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.629	0.549	0.561	0.66	0.724	0.767	0.797
2	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.629	0.543	0.488	0.54	0.625	0.682	0.72
2.25	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.628	0.542	0.479	0.449	0.528	0.601	0.65
2.5	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.629	0.542	0.478	0.43	0.438	0.521	0.583
2.75	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.629	0.542	0.477	0.428	0.395	0.441	0.515
3	3.664	1.842	1.235	0.931	0.75	0.629	0.542	0.478	0.427	0.389	0.378	0.448

Tableau III.1	variations du temps de démarrage t_d en démarrage fréquentiel pour
	différentes valeurs de G_u et G_f .

Chapitre III : optimisation à base des algorithmes 2013 génétiques de démarrage fréquentiel de la MAS

G _u	G_f											
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3
						1	d					
0.75	3.503	2.709	2.312	3.854	5.713	6.784	7.235	7.461	7.579	7.64	7.675	7.697
1	4.723	3.751	2.471	3.213	4.581	6.222	7.315	7.824	8.103	8.265	8.336	8.371
1.25	5.925	3.779	3.006	2.736	4.018	5.263	6.786	7.815	8.321	8.527	8.596	8.674
1.5	7.122	4.654	3.934	3.188	3.186	4.705	6.006	7.362	8.256	8.552	8.736	8.892
1.75	8.315	5.516	4.159	3.645	3.396	4.215	5.37	6.673	7.928	8.496	8.715	9.031
2	9.507	6.356	4.799	4.117	3.797	3.609	5.118	6.301	7.257	8.301	8.665	8.906
2.25	10.69 7	7.184	5.477	4.962	4.202	3.974	4.366	5.851	7.049	7.869	8.469	8.788
2.5	11.88 7	8.005	6.171	5.094	4.61	4.338	4.157	5.402	6.433	7.635	8.322	8.673
2.75	18.20 3	8.833	6.87	5.749	5.03	4.708	4.497	4.578	6.269	7.268	8.194	8.448
3	22.81	9.649	7.554	6.175	6.330	5.071	4.833	4.659	5.685	6.961	8.08	8.696

Tableau III.2	variations du courant de démarrage I_d en démarrage fréquentiel pour
	différentes valeurs de G_u et G_{f}

III.5.2 Codage des paramètres

Premièrement, il faut représenté les différentes états possibles de la variable dont on cherche la valeur optimale sous une forme utilisable par AG :c'est le codage, cela permet d'établir une connexion entre les valeurs de la variable et les individus de la population, permis les types de codage cités précedament, nous avons utilisées dans notre travail le codage binaire des paramètres de l'AG, cela nécessite une affectation d'un intervalle de variation pour chaque paramètre ainsi que leur nombre de bits pour le codage. Dans notre cas on a codé chaque variable de la population initiale sur 8 bits.

III.5.3 La fonction d'évaluation (fitness)

L'évaluation des paramètres de démarrage fréquentiel est basée sur les résultats de la simulation de son application au système commandé.

La fonction fitness implémente la fonction d'évaluation des paramètres de démarrage a tension et fréquence variables appliqué au machine asynchrone comprend les étapes suivants :

- décodage du chromosome binaire pour donner les paramètres du démarreur fréquentiel.
- calcule du fitness du démarreur fréquentiel à partir de la fonction objectif.

Cet index choisi exprime les critères de performance tel que la rapidité, la précision et la stabilité de la réponse du notre système.

III.5.4 Les paramètres de l'algorithme génétique

La technique de l'algorithme génétique implémentée est soumise à plusieurs paramètres :

- Population initiale (pop_Int) : choisie aléatoirement.
- Méthode de sélection : (select).
- Méthode de croisement (crois).

Nous adoptons dans ce qui suit les techniques utilisées dans notre travail.

- Population initiale: choisie aléatoirement.
- Méthode de sélection : la roue de loterie.
- Méthode de croisement : croisement à «un point ».

III.5.5 Optimisation du courant et du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables de la MAS

Durant l'optimisation de démarrage a tension et fréquence variables de la MAS on a trouvé que cette algorithme impose des problèmes complexes surtout pour la mise en équation de la fonction fitness, un bon choix de cette fonction est utile pour une évaluation adéquate des individus aux problèmes spécifique. Dans notre cas nous avons développé un programme qui donne initialement un ensemble de valeurs de tension G_u et de fréquence G_f, et à chaque valeur de G_u et G_f nous avons généré une valeur du courant ou bien du temps de démarrage, comme montre les tableaux (III.2) et (III.1) l'ensemble de ces valeurs représentent la fonction fitness, donc l'algorithme est recherché entre ces valeurs pour trouver la valeur optimal.

<u>NOTE</u>: l'organigramme général de l'algorithme génétique pour la solution de démarrage a tension et fréquence variables de la MAS est présenté en ANNEXE B.

> pour une MAS a grand puissance

La valeur optimale du courant max de démarrage à tension et fréquence variables d'une machine asynchrone ainsi que les valeurs du couple max et le temps de démarrage correspondant à cette valeur optimale sont présentes dans le tableau suivant :

G _u	G _f	I _d	t_d	C _{max}
0.302	0.000974	2.473	0.976	2.494

Tableau III.3La valeur optimale du courant I_d de démarrage a tension et fréquencevariables d'une MAS à grand puissance.

Dans le tableau (III.3) on constate que pour une valeur de G_f il existe une valeur G_u avec $G_u > G_f$ pour laquelle le courant de démarrage I_d est optimal.

La valeur optimale du temps de démarrage t_d du démarrage a tension et fréquence variables d'une machine asynchrone, ainsi que les valeurs du courant max et du couple

max de démarrage correspondant à cette valeur optimale sont présenté dans le tableau suivant :

G _u	G _f	t _d	I _d	C _{max}
0.945	0.0024	0.435	7.345	5.5712

Tableau III.4 La valeur optimale du temps t_d de démarrage a tension et fréquencevariables d'une MAS à grand puissance.

> pour une MAS a petite puissance

La valeur optimale du courant max de démarrage à tension et fréquence variables d'une machine asynchrone a petite puissance entrainant une charge de couple égale (5 N.m) ainsi que les valeurs du couple max et le temps de démarrage correspondant à cette valeur optimale sont présentes dans le tableau suivant :

G _u	G _f	I _d	t _d	C _{max}
0.165	0.000825	1.614	1.163	1.198

Tableau III.5 La valeur optimale du courant I_d de démarrage a tension et fréquencevariables d'une MAS à petite puissance.

La valeur optimale du temps de démarrage t_d de démarrage a tension et fréquence variables d'une machine asynchrone à petite puissance entrainée une charge de couple égale (5 N.m) ainsi que les valeurs du courant max et du couple max de démarrage correspondant à cette valeur optimale sont présenté dans le tableau suivant :

G _u	G _f	t_d	I _d	C _{max}
0.77	0.0038	0.398	3.997	2.708

Tableau III.6 La valeur optimale du temps t_d de démarrage a tension et fréquencevariables d'une MAS à petite puissance.

Chapitre III : optimisation à base des algorithmes 2013 génétiques de démarrage fréquentiel de la MAS

Le démarrage appliqué à la machine asynchrone de type démarrage a tension et fréquence variable est représenté dans le chapitre précédant.

A travers les résultats de simulation effectuée sur la machine asynchrone, nous pouvons constater que la variation de la tension et de la fréquence pour démarrer un moteur asynchrone a permis de donner une efficacité désirable du courant et du temps de démarrage, de plus, malgré les perturbations appliqué (si on diminue le courant du démarrage cela provoque une augmentation du temps de démarrage et ceci nécessite une machine contient une inertie suffisante pour éviter un ralentissement trop important pendant la durée de démarrage, ou contrairement si on diminue le temps de démarrage cela conduit une augmentation du courant de démarrage qui peut endommager la machine ou la charge entrainée) grâce au capacité d'optimisation des AG_s on peut trouver une valeur de courant optimal qui est proche du nominal, et un temps de démarrage minimale pour démarrer la machine asynchrone.

On dit que après l'optimisation de démarrage fréquentiel de la MAS, il ya une possibilité de contrôler les paramètres de la machine pour quelle démarre avec des valeurs proches du nominale.

on peut améliorer notre travail par l'étude d'optimisation de temps de démarrage et de courant de démarrage simultanément en procédant à des hybridations avec d'autre approche d'optimisation.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donne des généralités sur l'optimisation par des algorithmes génétiques, en premier lieu nous avons introduit un rappel sur les méthodes d'optimisation, ainsi que des définitions fondamentales, principe de base et différentes opérations régissant le développement et l'exécution des AG autant que méthode d'optimisation globale stochastique ce qui a permis de passé a une application de cette méthode pour optimiser le courant et le temps de démarrage de

Chapitre III : optimisation à base des algorithmes 2013 génétiques de démarrage fréquentiel de la MAS

la machine asynchrone. Lors de démarrage nous avons remarqué la faisabilité de l'approche.

La recherche dans le secteur des métaheuristiques a rendu le développement possible des méthodes d'optimisation qui ont le but de fournir des solutions de haute qualité aux systèmes industriels dans leurs régimes les plus critiques tel que le démarrage qui est un régime transitoire.

2013

IV.1 Introduction

Pour des fins de commande la machine asynchrone est actuellement souvent alimentée à travers un onduleur à fréquence variable. Ce travail peut être utilisé pour réaliser le démarreur à fréquence et tension variables de notre approche. Ce chapitre renferme les simulations du comportement de la MAS lors d'un démarrage a tension et fréquence variables optimisé via onduleur.

IV.2 Modélisation de l'alimentation de la MAS

Nous présentons la modélisation de l'étage d'alimentation (figure *IV.1*) de la MAS qui est composée d'un :

- Onduleur de tension.
- redresseur à diode alimenté cet onduleur.
- un filtre passe-bas a été introduit afin de filtrer la tension redressée et de réduire les ondulations du courant d'entrée.



Figure IV.1 Association redresseur - filtre - onduleur de tension - MAS

IV.2.1 Modélisation du redresseur

Le redresseur peut être schématisé par la figure suivant :



Figure IV.2 redresseur à diode

$$\begin{cases} D_i \text{ conduit si } V_i = \max(V_j); j = 1,2,3; i = 1,2,3; \\ D'_i \text{ conduit si } V_i = \min(V_j); j = 1,2,3; i = 1,2,3; \end{cases}$$

Pendant chaque séquence de conduction la tension de sortie du redresseur U_d s'écrit comme suit :

$$U_d = V_i - V_k \tag{4.1}$$

Avec :

$$V_{i} = \max(V_{1}max(V_{2}, V_{3}))$$

$$V_{k} = \min(V_{1}'min(V_{2}', V_{3}'))$$
(4.2)

Par conséquent :

$$U_d = \max(V_j) - \min(V_j); j=1, 2, 3$$
(4.3)



Figure IV.3 La tension redressée

- U_d : La tension redressée.
- $D_i et D'_i$: Les diodes en conduction.
- V_i : la tension à l'anode de D_i .
- V_k : la tension à la cathode de D'_i .

IV.2.2 Modélisation du filtre

Le filtre LC est schématisé par la figure suivante :



Figure IV.4 Filtre (LC)

Ce filtre est modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{cases} U_d = L_f \frac{dI_d}{dt} + U_f \\ \frac{dU_f}{dt} = \frac{1}{c_f} (I_d - i_s) \end{cases}$$

$$\tag{4.4}$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante :

$$F = \frac{U_f}{U_d} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L_f C_f s})^2}$$
(4.5)

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \tag{4.6}$$

Le choix des valeurs de l'inductance et de la capacité, peut être obtenu en posant la condition simple qui consiste à éliminer les harmoniques d'ordre supérieur à deux, ceci étant vérifié par le fait qu'elles ont une fréquence égale ou supérieure à deux fois celle du fondamental.

IV.2.3 Modélisation de l'onduleur de tension [22]

L'onduleur utilisé est un onduleur à trois bras, dont chaque bras est constitué de deux interrupteurs bidirectionnel. Un interrupteur est composé par un thyristor et d'une diode pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit

de la source, d'où on peut remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme indiqué sur la figure (*IV.5*).



Figure IV.5 Représentation des thyristors par des interrupteurs

Chaque bras de l'onduleur, est associé une fonction logique de connexion (i = 1, 2, 3) définie comme suit :

$$S_{i} = \begin{cases} 0 & si \ T_{i} \ est \ fermé \ et \ T'_{i} \ est \ ouvert \\ 1 & si \ T_{i} \ est \ ouvert \ et \ T'_{i} \ est \ fermé \end{cases}$$
(4.7)

Les tensions de sorties de l'onduleur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = U_f(S_1 - S_2) \\ V_{bc} = U_f(S_2 - S_3) \\ V_{ca} = U_f(S_3 - S_1) \end{cases}$$
(4.8)

Par conséquent, les tensions simples sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases}
V_a = \frac{U_f}{3} (2S_1 - S_2 - S_3) \\
V_b = \frac{U_f}{3} (-S_1 + 2S_2 - S_3) \\
V_c = \frac{U_f}{3} (-S_1 - S_2 + 2S_3)
\end{cases}$$
(4.9)

Le courant i_s à l'entrée de l'onduleur sera donné par la relation suivante :

 $i_s = (S_1 i_a + S_2 i_b + S_3 i_c)$

(4.10)

IV.3 La stratégie de commande (MLI)

La stratégie (MLI), permet l'obtention des alternances de la tension de sortie qui est formée de plusieurs créneaux. Ceci peut être fait en adoptant des techniques de commande des interrupteurs, il en existe plusieurs méthodes (la stratégie triangulosinusoïdale, la stratégie hystérésis). Dans ce travail, nous somme intéressé à la stratégie triangulo-sinusoïdale.

Le principe de cette stratégie est basé sur la variation de l'amplitude de la référence, et la fixation de celle de la porteuse qui est représentée par un signal triangulaire.

L'onde de sortie est alors obtenue par simple comparaison entre les deux ondes, donnant ainsi l'ordre d'allumage ou distinction aux composants constituant l'onduleur [22-23-24].

Dans cette technique, il faut définir deux paramètres qui sont :

- l'indice de modulation *m* qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse *f*_p et la fréquence de la référence *f* désirée.
- le coefficient de réglage de tension *r* qui représente le rapport entre l'amplitude de l'onde de référence à la valeur crête de l'onde de porteuse

Le schéma structurel de la figure (*IV.6*) illustre le principe de la commande de l'onduleur MLI. Les tensions de référence sont sinusoïdales.



Figure IV.6 Application de la stratégie MLI

IV.4 Résultats de simulation

Les paramètres choisis sont : r=0.8 ; m=21 ; f=50HZ ; Vs=220V ;







Figure IV.8 Les trois tensions de référence Varef, Vbref, Vcref comparé avec le signal de porteuse



Figure IV.9 Le signal de commande de bras de l'onduleur en fonction de temps



Figure IV.10 variation des tensions simples (vas, vbs, vcs) entre la charge en fonction du temps



Figure IV.11 Variation de vecteur tension V (vas, vbs, vcs) en fonction du temps

IV.5 Application de démarrage a tension et fréquence variables avec l'utilisation d'un onduleur triphasé a MLI sinus-triangulaire

Le principe de démarrage à tension et fréquence variables, avec l'utilisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI est présenté dans les figures suivant :



Figure IV.12 stratégie de commande onduleur triphasé à MLI sinus-triangle avec une tension et fréquence variables



Figure IV.13 allures des tensions de sortie de l'onduleur MLI triphasé avec une tension et fréquence variables

103



Figure IV.14 Variation de la vitesse angulaire *w* en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables avec onduleur triphasé a MLI sinus-triangulaire



Figure IV.15 Variation du courant *is* en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables avec onduleur triphasé a MLI sinus-triangulaire



Figure IV.16 Variation du couple électromagnétique C_{em} en fonction du temps pour un démarrage a tension et fréquence variables avec onduleur triphasé a MLI sinus-triangulaire

<u>Note :</u>

Les autres paramètres de démarrage a tension et fréquence variable avec l'application d'un onduleur de tension a **MLI** est présenté dans l'annexe **D**.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'alimentation à tension et fréquence variables de la machine, asynchrone qui est constituée d'un redresseur triphasé à diodes, d'un filtre (LC) et d'un onduleur de tension commandé par la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Et en terminant par des simulations numériques.

L'association de la MAS à un système d'alimentation (redresseur-filtreonduleur) n'a pas une grande influence sur les résultats d'optimisation déjà présentés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'optimisation de démarrage de la machine asynchrone en utilisant les différentes techniques de démarrage telles que :

- Démarrage étoile-triangle.
- Démarrage par autotransformateur.
- Démarrage statorique.
- Démarrage rotorique
- Démarrage progressive.
- démarrage fréquentiel

Le choix du type de démarrage de la MAS est guidé par des critères économiques et techniques tel que : la nature de la charge, la puissance de la MAS, souplesse au démarrage, type d'utilisation, la puissance de la ligne(ou l'installation) électrique.

Ces différentes points ont été discuté grâce à des paramètres traditionnellement analysées lors de démarrage de la MAS tel que : le temps de démarrage, le pique de courant au démarrage, l'échauffement des enroulements et le couple électromagnétique.

Pour palier à tous ces inconvénient, on propose le démarrage a tension et fréquence variables.

Les différentes paramètres de ce type de démarrage (temps de démarrage, et courant de démarrage) ont été optimisés on basant sur des techniques issues de l'intelligence artificielle, à savoir la méthode d'optimisation par les algorithmes génétiques pour trouvés des meilleurs valeurs des paramètres de la MAS pour quelle démarre a de faible perte.

Les résultats de la simulation des différentes modes de démarrage de la MAS ont montre :

 Les démarrages étoile – triangle, et par autotransformateur ne sont pas efficaces dans notre cas, car on remarque de grandes valeurs du courant instantané et du couple électromagnétique, des pertes élevées, ainsi que l'échauffement dans les enroulements. Dans le cas de démarrages fréquentiels avec des lois linéaires de changement de la fréquence et de la tension, en un éventuel rapport optimal entre leurs deux accélérations, et avec l'application de différentes charges on réalise le démarrage de la machine asynchrone avec un courant proche du nominal, une durée de démarrage minimale, et un couple au démarrage acceptable sans à-coup.

Le démarrage a tension et fréquence variables optimisé par les algorithmes génétiques, a parfaitement réussi à maintenir la machine asynchrone en bonne fonctionnement. Ce travail ne saurait s'arrêter à ce stade et gagnerait énormément à être enrichi par d'éventuelles extensions dont nous proposons pour une meilleure efficacité de recherche de solutions optimales par l'étude d'optimisation du temps et du courant de démarrage simultanément en procédant à des hybridations des capacités des algorithmes génétiques à vaste domaine d'exploration avec d'autre méthode d'optimisation local.

Je dédie ce modeste travail

🥻 ma très chère mère

A mon très cher père.

A mes très chères sœurs, et mes frères. A tout (es) mes amis (es) Mounes, Bachir, Rabah.et surtout mon binôme qui partager avec moi les bon moment.

A tous ceux qui m'ont aimé et respecté d'une manière ou d'une autre

-TALES ANTAR

A moi-même je dédie ce travail.

Je dédie ce modeste travail

🥻 ma très chère mère

A mon très cher père.

A mes très chères sœurs, et mes frères.

A tout (es) mes amis (es) surtout mon binôme qui partager avec moi les bon moment.

A tous ceux qui m'ont aimé et respecté d'une manière ou d'une autre

YAHIAOULADEL

A moi-même je dédie ce travail.

ANNEXE C



Simulation des autres paramètres de démarrage a tension et fréquence variables d'une MAS

ANNEXE C



Simulation des autres paramètres de démarrage progressive d'une MAS

ANNEXE C



Simulation des autres paramètres de démarrage étoile- triangle d'une MAS

Introduction générale

Le moteur asynchrone est devenu le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Mais Les caractéristiques de courant absorbé et du couple de la machine triphasée utilisée en moteur, sont bien connues. Elles font apparaître très clairement une pointe d'intensité 5 à 10 fois le courant nominal ainsi qu'un à-coup de couple au démarrage. La pointe d'intensité est nuisible au réseau d'alimentation il serait assez souvent nécessaire de la réduire. L'à-coup de couple est gênant pour la mécanique entraînée il peut même avoir des conséquences destructives.

Pour ces raisons entre autres, il faut souvent effectuer un démarrage différent du démarrage direct, il est donc logique de limiter le courant pendant le démarrage à une valeur acceptable. Mais si on limite le courant on limite aussi le couple et on augmente le temps de démarrage, les pertes dans les enroulements, ainsi que l'échauffement.

Le choix d'un démarrage (démarreur) est guidé par des critères économiques et techniques, II est lié à plusieurs paramètres. Mais quand le moteur possède une puissance proche de celle de l'installation électrique le choix devient serré. Le grand appel de puissance d'un moteur asynchrone que l'on raccorde à l'installation électrique, forcera temporairement une baisse de tension non négligeable entravant ainsi le fonctionnement des autres consommateurs, et l'ensemble du système sera indûment perturbé. En effet, un appel de puissance de cette nature peut désynchroniser les génératrices et diminuer la durée de vie du moteur principal.

Mentionnent tout d'abord pour mémoire les solutions mises en œuvre antérieurement à l'avènement de l'électronique de puissance. Trois solutions principalement étaient employées :

- le passage étoile-triangle.
- le rhéostat statorique.
- le rhéostat rotorique.

1

Malgré la différence qui existe entre ces méthodes de démarrage; elles présentent toutes beaucoup d'inconvénients qui sont à l'origine de la longue durée de démarrage. Actuellement un nouvel procéder de démarrage est envisageable : le démarrage à tension et fréquence réduites, cette procédure est réalisable au moyen de convertisseur de tension. Donc actuellement le démarrage fréquentiel est la meilleure méthode de démarrage pour un moteur asynchrone. Cependant la stratégie du démarrage fréquentiel (à tension et fréquence variables) impose les lois de changement de la variation de la fréquence et celle de la tension.

Dans ce travail de Master, nous avons tenté de traiter les problèmes de démarrage de la machine asynchrone afin d'optimiser se dernier. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres suivis par une conclusion générale :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la machine asynchrone, son principe de fonctionnement, ainsi qu'une modélisation de la machine simple et facile à programmer dans Matlab, puis nous avons simulé ce modèle pour reproduire le démarrage de la MAS.

Dans le second chapitre, nous avons exposés tout d'abord les différents problèmes dus au démarrage de la machine asynchrone, puis un état de l'art sur les solutions pour éviter ces problèmes, suivi d'une simulation numérique des différentes modes de démarrage de la machine asynchrone.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation d'une méthode d'optimisation à base des approches de l'intelligence artificielle, par la suite, nous avons étudierons l'apport des techniques basées sur les algorithmes génétiques, par un test de validation de cette algorithme sur le démarrage a tension et fréquence variables de la machine asynchrone.

Dans le dernier chapitre nous avons mise en œuvre le démarrage a tension et fréquence variables par une cascade redresseur, filtre et onduleur.

2

Les paramètres des machines asynchrone triphasée utilisées :

Les paramètres	Machine I	Machine II
La puissance nominale	$P_n=3 \text{ KW}$	P _n =396 KW
La tension nominale	$U_n = 220v$	$U_n = 380v$
Le courant nominal	$I_n = 8.5 A$	I _n = 1441 A
Le couple nominal	$C_n = 10 \text{ N.m}$	$C_n = 3000 \text{ N.m}$
La vitesse de rotation nominale	$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$	$N_n = 1520 \text{ tr/mn}$
La résistance statorique	$rs = 4.850 \Omega$	$rs = 0.01539\Omega$
La résistance rotorique	$rr = 3.805 \Omega$	$rr = 0.01152 \ \Omega$
L'inductance statorique	$L_s = 0.274 \ H$	$L_{\rm s} = 0.008115 \; {\rm H}$
L'inductance rotorique	$L_r = 0.274 \text{ H}$	$L_r = 0.008085 \text{ H}$
L'inductance mutuelle	M = 0.258 H	M = 0.008 H
Moment d'inertie	$J = 0.031 \text{Kg m}^2$	$J = 35 \text{ Kg m}^2$
Nombre de pair de pôles	P=2	P=2