الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique
et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : Automatique des Systèmes

THEME

Identification paramétrique de la machine asynchrone à double alimentation par les algorithmes génétiques

Proposé et dirigé par,

Dr. BOUDANA Djamel
Dr. BOULKHRACHEF Salah

Préparé et présenté Par,

Mr. Benserradj Oussama
Mr. SKENDER Noureddine

Année Universitaire 2015-2016

Remerciments

*En Premier lieu, Je remercie **ALLAH**, le Tout Puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser de travail.*

Je remercie infiniment Docteur : BOUDANA Djamel et BOULKHRACHEF Salah qui avoir assuré la co-direction de ce mémoire, pour ces conseils précieux le long de mon travail de mémoire. Je ne saurais trop le remercie pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour les longues heures de discussion qu'il m'a réservé avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Electrique.

Je remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certain de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certain problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.

Il est difficile, dans un petit espace, de remercier toutes les personnes qui ont eu une influence sur ma vie de tous les jours pendant la durée de réalisation de mon mémoire de fin d'études. Ces personnes se reconnaitront facilement et sauront combien ma tendresse et mon amitié sont grandes pour eux

Dédicaces

Avant tout, je remercie le bon Dieu, qui m'a élaboré ce modeste travail.

J'ai l'immense honneur de dédier ce modeste travail :
A mes très chers parents qui étaient présents pour moi durant toute ma vie.

A mes sœurs.
Maroua, Fareh, Delal.

A toute la famille Skender sans exception.
A mes Amis Lhadi, Hamza, Amine, Abdelrazek, Hamza.

A mon binôme Noureddine et leur famille.

A tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

A tous les professeurs et enseignants qui m'ont participe à ma collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de mes études universitaires.

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire
A toute la promotion Automatique 2016.




caiza

Dédicaces

Avant tout, je remercie le bon Dieu, qui m'a élaboré ce modeste travail.

J'ai l'immense honneur de dédier ce modeste travail :
A mes très chers parents qui étaient présents pour moi durant toute ma vie.

A mes frères et mes sœurs.
Abdelkrim, Manel, et Lamia.

A toute la famille Skender sans exception.
A mes Amis Walid, Mahmoud, Khireddine, Youcef, Samy.

A mon binôme Oussama et leur famille.

A tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

A tous les professeurs et enseignants qui m'ont participe à ma collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de mes études universitaires.

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire
A toute la promotion Automatique 2016.




caiza

تحديد المكانة اللامتزامنة مضاعفة التغذية من خلال الخوارزميات الجينية.

ملخص:

هذه المذكرة تقدم تحديد و تحكم في الاستطاعات الفعالة وغير الفعالة للآلة اللامتزامنة ذات التغذية المضاعفة .

بعد تقديم تصميم للآلة و نموذج بارك ، تم تحديد المعايير المثلى للآلة اللامتزامنة ذات التغذية المضاعفة بواسطة الخوارزميات الجينية. المدخلات / المخرجات المستخدمة لتحديد الآلة اللامتزامنة ذات التغذية المضاعفة تم الحصول عليها من خلال اختبارات أجريت داخل المختبر للأبحاث في مجال الكهروتقنية و الآليات في جامعة المدية . ثم سنقوم بتقديم اختبارات تجريبية سنتناول التحكم ألشعاعي للآلة اللامتزامنة مضاعفة التغذية من خلال اتجاه التدفق ألدوراني. وأخيرا التحكم ألشعاعي يسمح بمراقبة مستقلة و تطبيق للاستطاعات الفعالة و غير الفعالة للآلة اللامتزامنة مضاعفة التغذية.

كلمات مفتاحية : المكانة اللامتزامنة مضاعفة التغذية , التحكم ألشعاعي, الخوارزميات الجينية .

Identification de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les algorithmes génétiques.

Résumé :

Cette thèse présente l'identification et la commande des puissances actives et réactives de la machine à double alimentation (MADA). Après avoir présenté la modélisation de la machine et le modèle dans le repère de Park, on a déterminé les paramètres optimaux de la MADA par les algorithmes génétiques. Les entrées/sorties utilisées pour l'identification de la MADA ont été obtenu par un banc d'essai réalisé au sein du laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique de l'université de Médéa. , ensuite on va faire la présentation du banc d'essai expérimental, nous abordons la commande vectorielle de la MADA par orientation du flux rotorique.Enfin, une commande vectorielle permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive de la MADA est appliquée.

Mots Clés : Machine asynchrone à double alimentation (MADA), Commande Vectorielle, Algorithme Génétique.

Identification of the asynchronous doubly fed (DFAM) by genetic algorithms

Abstract:

This thesis memory the identification and control of active and reactive power of the double machine (DFAM). After presenting the model of the machine and model in the reference Park, the optimal parameters of the DFAM by genetic algorithms were determined. The inputs / outputs used for identification of the DFAM were obtained by a test bench realized in the Electrical Research Laboratory and Control from the University of Medea. Then we will do the presentation of the experimental test bench, we discuss the vector control by the DFAM flow direction rotorique. Finally, vector control allows independent control of active and reactive power is applied to the DFAM.

Key words: Doubly fed asynchronous machine (DFAM), Field oriented control, Genetic Algorithm.

SOMMAIRE

Introduction générale.....01

CHAPITRE I : Modélisation de la MADA

I.1. Introduction.....03

I.2. Structure de la Machine……04

I.3. Principe de fonctionnement de la MADA……05

I.4. avantages et inconvénients de la MADA……..06

I.4.1. Avantages de la MADA…….06

I.4.2. Inconvénients de la MADA……..07

I.5. modélisation de la machine a double alimentation……07

I.5.1 Hypothèses simplificatrices…… 08

I.5.2 Modèle de la MADA dans le repère abc……08

I.5.3 Changement de repère ……..11

I.5.3.1 La transformation de Park…….11

I.5.3.2 Equation électrique et magnétiques dans le système.....13
D'axes (d, q)

I.5.4 Choix de référentiel……14

I.5.4.1 Référentiel lié au stator……14

I.5.4.2 Référentiel lié au rotor……14

I.5.4.3 Référentiel lié au champ tournant…….15

I.5.5 Equation du couple électromagnétique……15

I.5.6 Mise sous forme d'équation d'état……..16

I.6. CONCLUSION…….. 17

CHAPITRE II : Technique d'identification

II.1. introduction……18

II.2. modèles du système……18

II.3. méthodes d'identification paramétrique……..19

II.3.1 Méthode basées sur l'erreur de prédiction……19

II.3.1.1 Méthode des moindres carrées simple……...21

II.3.2 Méthode basées sur l'erreur de sortie……22

II.4. CONCLUSION……..24

CHAPITRE III : Algorithme Génétique

III.1. introduction……25

III.2. principe de l'algorithme génétique……26

III.3. codage……28

III.3.1 Codage binaire……29

III.4. population initiale……...29

III.5. évaluation…….. 30

III.6. la sélection…….....30

III.7. le croisement……...32

III.7.1 Opérateurs de croisement……... …32

III.8. la mutation…….. ...33

III.9. critère d'arrêt…….. ...34

III.10. avantages et inconvénients des algorithmes génétiques……...34

III.10.1 Les avantages des algorithmes génétiques……34

III.10.2 Les inconvénients des Algorithmes Génétiques…….....34

III.11. application de l'algorithme génétique a l'identification de la MADA…35

III.12. présentation du banc d'essai…….36

III.13. résultat de simulation……39

III.14. conclusion…….....41

CHAPITRE IV : Commande Vectorielle de la MADA

IV.1. introduction……....42

IV.2. principe de la commande vectorielle……..43

IV.3. commande vectorielle par orientation du flux statoriqe…….43

IV.3.1 Expression des puissances active et réactive statoriques……...46

IV.3.2. Expression des tensions rotoriques……...47

IV.3.3 Synthèse du régulateur PI……...49

IV.3.3.1 Dimensionnement du correcteur……...49

IV.3.3.2 Résultats de simulations…….51

IV.4. CONCLUSION…….53

Conclusion générale……..54

CHAPITRE I : Modélisation de la MADA

Fig. I.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA. 04

Fig. I.2 Déférentes modes de Fonctionnement de la MADA. 06

Fig. I.3 Représentation schématique du modèle d'une MADA-à rotor bobiné. 08

Fig. I.4 Représentation de la MADA dans le repère de Park. 12

CHAPITRE II : Technique d'identification

Fig. II.1 méthode d'identification des processus. 18

Fig. II.2 Schéma de principe du l'erreur de prédiction. 19

Fig. II.3 Schéma de principe du l'erreur de sortie. 22

CHAPITRE III : Algorithme Génétique

Fig. III.1 Organigramme d'un génétique algorithme. 27

Fig. III.2 Les quatre niveaux de codage d'organisation des AG. 28

Fig. III.3 Illustration du chromosome Des variables d'optimisation. 28

Fig. III.4 Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de 31
. Maximisation Chaque individu représente une solution possible.

Fig. III.5 Représentation d'un croisement en un point de deux chaines. 32

Fig. III.6 Représentation d'un croisement en deux points. 32

Fig. III.7 Représentation d'un croisement uniforme. 33

Fig. III.8 Représentation d'une mutation de bits dans une chaine. 33

Fig. III.9 Banc d'essai d'identification pour la MADA. 37

Fig. III.10 Montage générale de la machine asynchrone MADA. 37

Fig. III.11 Machine asynchrone a double alimentation MADA. 38

Fig. III.12.a Capteurs de mesure. 38

Fig. III.12.b Capteurs de position. 39

Fig. III.13 Courants i_a simulé et réel avec zoom. 40

Fig. III.14 Tension v_a réel avec zoom. 40

Fig. III.15 La vitesse simulée et réel avec zoom. 41

CHAPITRE IV : Commande Vectorielle de la MADA

Fig. IV.1 Principe de la commande vectorielle. 43

Fig. IV.2 Orientation de l'axe d sur le flux statoriqe. 44

Fig. IV.3 Schéma bloc du système à réguler. 47

Fig. IV.4 Schéma bloc de la commande directe. 48

Fig. IV.5 Schéma bloc de la commande indirecte. 49

Fig. IV.6 Schéma bloc de régulation du courant i_{dr} . 49

Fig. IV.7 Position des pôles dans le plan de phase. 50

Fig. IV.8 Puissances active statoriques en commande indirecte. 52

Fig. IV.9 Puissances réactive statoriques en commande indirecte. 52

Fig. IV.10 Le courant rotorique Iqr en commande indirecte. 52

Fig. IV.11 Le courant rotorique Idr en commande indirecte. 52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Paramètres de la MADA identifiés par la méthode Classique et la méthode de l'Algorithme génétique. 39

Tableau IV.1 : Paramètres des régulateurs PI des courants rotoriques. 51

CHAPITRE 1
MODÉLISATION DE LA MADA

CHAPITRE 2
TECHNIQUE D'IDENTIFICATION

CHAPITRE 3
ALGORITHME GÉNÉTIQUE

CHAPITRE 4
COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

NOTATIONS ET SYMBOLE

Notations et Abréviations

ωs : La pulsation statoriqe (rd/s).

ωr : La pulsation rotorique (rd/s).

ω : La pulsation de glissement (rd/s).

P : Le nombre de paires de pôles.

Ω : vitesse de rotation de la machine (tr/min).

g: glissement de la machine.

Rs : La résistance statoriqe par phase (Ω).

Rr : La résistance rotorique par phase (Ω).

Vs : La tension simple statoriqe (v).

Vr : La tension simple rotorique (v).

$v_{abc\ s}$: tensions des trois phases de l'enroulement statoriqe (v).

$v_{abc\ r}$: tensions des trois phases de l'enroulement rotorique (v).

$i_{abc\ s}$: courants des trois phases de l'enroulement statoriqe(A).

$i_{abc\ r}$: courants des trois phases de l'enroulement rotorique(A).

Ls : L'inductance propre d'une phase statoriqe (H).

Lr : L'inductance propre d'une phase rotorique (H).

Mss : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H).

Mrr : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H).

Msr : L'inductance mutuelles maximale entre une phase statoriqe et une phase Rotorique(H).

Mrs : L'inductance mutuelles maximale entre une phase rotorique et une phase Statoriqe(H).

M : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (H).

W_{mag} : L'énergie magnétique.

C_{em} : Couple électromagnétique(N.m).

J_m : Moment d'inertie de la machine(Kg.m^2).

Ω_r : vitesse de rotation de la machine.

C_r : Couple résistant(N.m).

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statoriqe et l'axe du rotor.

V_{dqs} : Tension de l'enroulement statoriqe dans l'axe d,q(V).

V_{dqr} : Tension de l'enroulement rotorique dans l'axe d,q(V).

ω_c : La vitesse angulaire du repère biphasé.

ω_g : La vitesse angulaire du glissement.

Φ_{ds}, Φ_{qs} : Composantes du flux statorique dans le référentiel (d,q).

Φ_{dr}, Φ_{qr} : Composantes du flux rotorique dans le référentiel (d,q).

I_{dqs} : courants de l'enroulement statoriqe dan l'axe d,q(A).

I_{dqr} : courants de l'enroulement rotorique dan l'axe d,q(A).

P_e : La puissance instantanée (W).

Pj : Les pertes joule (W).

Pem : La puissance électromagnétique (W).

Pmec : Les pertes mécaniques (W).

σ: Le coefficient de dispersion entre les enroulements.

Tr : Constante de temps rotorique.

Ts : Constante de temps statoriqe.

θ_s : Angle entre l'axe de la premier phase de l'enroulement statoriqe et l'axe d(rad).

θ_r : Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d (rad).

P_s : Puissance active transitant par le stator(W).

Q_s : Puissance réactive transitant par le stator(VAR).

ABREVIATIONS

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MAS : Machine asynchrone.

MCC : Machine à courant contenue.

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaine de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes.

Les algorithmes génétiques reposent sur l'analogie entre la théorie de l'évolution naturelle de Darwin et l'optimisation. Selon la théorie de Darwin, Les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre est de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés. Comme dans les mécanismes naturels de la reproduction, les principaux opérateurs qui affectent la constitution d'un chromosome, qui code les caractéristiques des individus, sont le croisement et la mutation [OME 03].

Les Algorithmes Génétiques ont été proposées par Holland en 1975**,** puis développés par d'autres chercheurs tels que De Jong, Goldberg, et Michalewicz. C'est actuellement une des méthodes les plus diffusées et les plus utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'application [OME 03].

Dans une machine à courant alternatif, la principale difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrées (tension, fréquence), de sorties (vitesse, couple) et les paramètres internes (courant rotoriques et flux). Pour obtenir une situation équivalente à celle d'un moteur à courant continu. Blaschke et Hass ont proposé une méthode permettant de maitriser ces difficultés en introduisant les coordonnées de champs, ou le vecteur courant statoriques sera décomposé en deux composantes, une qui produit le flux et l'autre le couple. La dynamique d'une machine à courant alternatif sera ramenée à celle d'une machine à courant continu [SAR 00].

Le l'objectif de notre travail est l'identification et la commande des puissances de la machine asynchrone à double alimentation. Pour atteindre cet objectif ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous commençons par rappeler les équations classiques régissant le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation et nous proposerons une modélisation classique de la MADA en utilisant la transformation de Park.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons certaines méthodes d'identification basée sur des Algorithme d'optimisation non-linéaire. Dans ces méthodes, il s'agit de minimise un critère de qualité qui caractérise l'écart entre le comportement du processus et celui de son modèle.

Dans le troisième chapitre, nous développons un algorithme génétique pour les identifications des paramètres de la MADA. Ensuit un banc d'essai à base d'une MADA et d'une carte dSPACE 1103 est réalisé. Enfin, des résultats de simulation et pratique du comportement de la MADA sont comparés.

Dans le quatrième chapitre nous traitons la commande vectorielle d'une MADA alimentée via l'enroulement rotorique. Nous étudions d'abords le principe d'orientation du flux statoriques. Nous effectuerons par la suite, la régulation de la puissance active et la puissance réactive en utilisant la technique de la commande vectorielle indirecte. Cette technique est utilisée pour la régulation de la puissance active et de la puissance réactive. Enfin est-on aux résultats des simulations de ce chapitre.

I.1. INTRODUCTION

La modélisation d'une machine asynchrone est basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. Les méthode matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande [MER 07].

Différentes méthodes de modélisation peuvent être envisagées. Certaines d'entre elles Sont plus appropriées pour décrire tel ou tel phénomène avec le meilleur compromis précision/temps de calcul. Nous trouvons dans la littérature principalement trois approches de modélisation de la machine électrique :

- **La modélisation par éléments finis**

  Ce type de modélisation est le plus précis. Ces méthodes particulièrement bien Adaptées à des géométries complexes renseignent sur l'évolution des champs en tout point du circuit magnétique. Cependant, le temps de calculs requis par cette approche est important.

- **La modélisation par réseaux de perméances**

  La modélisation par réseaux de perméances est basée sur le découplage d'un circuit magnétique en perméances. Cette technique offre de nombreux avantages : le temps de calcul est inférieur aux modèles basés sur la méthode par élément finis, le couplage avec les équations de circuit électrique est facile. La principale difficulté de cette méthode se situe au niveau de la représentation de l'entrefer de la machine. L'erreur de modélisation est très sensible au modèle utilisé pour la perméance d'entrefer.

- **La modélisation par les circuits électriques**

  La modélisation par les circuits électriques est construite à partir des équations électriques de la machine. Cette méthode de la modélisation, très simple à formuler, offre un bon compromis temps de calcul/précision. Ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande. Seule cette dernière méthode de modélisation sera utilisée dans le présent travail. Elle est aussi appelé "théorie des deux axes". Elle est principalement basée sur un changement de référentiel dit «transformation triphasé-biphasé".

L'objectif de ce chapitre, est de traiter la modélisation et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables.

I.2. STRUCTURE DE LA MACHINE

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classique. Constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Le rotor de cette machines est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

La structure de la machine asynchrone à double alimentation permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence prés que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Pour cela elle est aussi appelée machine généralisée. On n'a pas besoin d'une alimentation externe pour produire le champ magnétique d'excitation. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme "Machine synchrone à excitation alternative". [MAN 11].
La figure(I.1), montre la structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

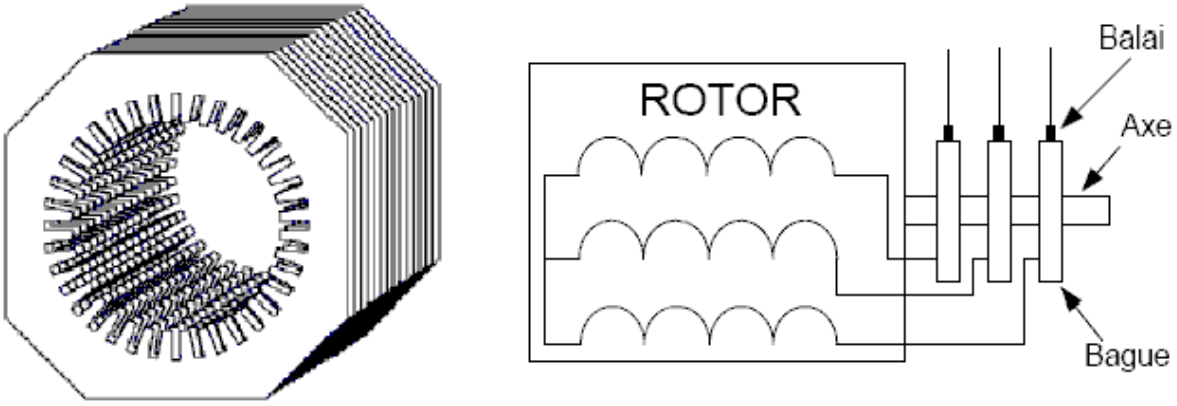


Fig. I.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Pour le fonctionnement de la MADA, elle est excitée simultanément au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentation. Une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée pour garantir une certaine stabilité de la machine. Le caractère synchrone de ce type de machine demeure dans la mesure où la vitesse du rotor ne sera ni synchronisée avec la vitesse du champ du stator ni avec celui du rotor, mais elle sera donnée par leur combinaison linéaire, telle que [BEN 10] :

$$\omega = P\Omega = \omega_s - \omega_r \qquad (I.1)$$

Le signe (-) pour le fonctionnement hypersynchrone et le signe (+) pour fonctionnement hyposynchrone.

$$\mathrm{g} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \qquad (I.2)$$

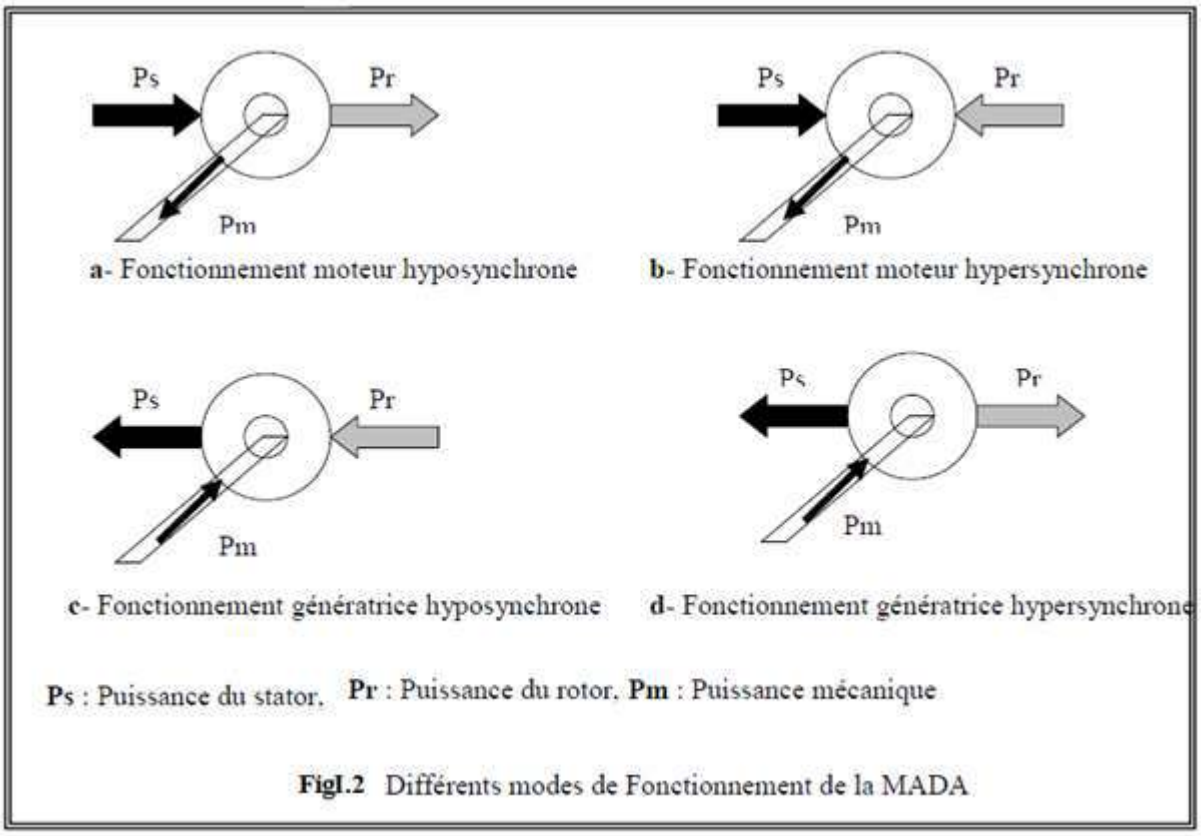
Où : g est le glissement.

Dans les deux modes de fonctionnement et par l'imposition des fréquences, la vitesse en régime permanent est constante pour n'importe quelle charge.

Comme la MADA peut fonctionner en moteur et en générateur aux vitesses hyposynchrone et hypersynchrone, on peut distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine comme il est illustré par la figure(I.2).

La figure(I.2.a) montre le fonctionnement en moteur hyposynchrone, dont la puissance P_r est fournie par le rotor, ce régime est généralement connu comme un mode récupération d'énergie de glissement. Dans le cas ou la vitesse augmente de sorte que le moteur fonctionne en hypersynchrone, dans ce cas la puissance P_r devient absorbée par le rotor comme illustre la figure(I.2.b).

Dans le cas ou la machine fonctionne en mode génératrice hyposynchrone comme nous montre la figure(I.2.c), la puissance P_r est absorbée par le rotor et si la vitesse augmente de sorte que la génératrice fonctionne en hypersynchrone dans ce cas la, la puissance P_r est fournie par le rotor comme illustré la figure(I.2.c).



FigI.2 Différents modes de Fonctionnement de la MADA

I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

Les avantages et les quelques inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable sont :

I.4.1 Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmenter son rendement.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnent ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [BEN 10].

I.4.2 Inconvénients de la MADA

Les inconvénients apportés par cette machine sont :

- La machine à bague, dans un milieu corrosif, les bagues peuvent s'oxyder et cela nécessite un entretien particulier. Cependant pour un même fonctionnement, les moteurs à bagues demandent un entretien moindre que les moteurs à courant continu.
- La machine à double alimentation requiert un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce moteur est un peu plus long et à peine plus lourd que le moteur asynchrone à cage équivalent.
- Le rotor et le stator doivent être relies à l'armoire d'alimentation. Cependant le stator sera généralement connecté par des câbles HT de faible section. L'appareillage est plus important et nécessite un entretien.
- L'aspect multi-convertisseur, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent Le prix [SAR 00].

I.5. MODELISATION DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone est représentée sur la figure (I.3) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotoriques (*OAR*) par rapport à l'axe fixe de la phase statoriques (*OAS*) [AZZ 13].

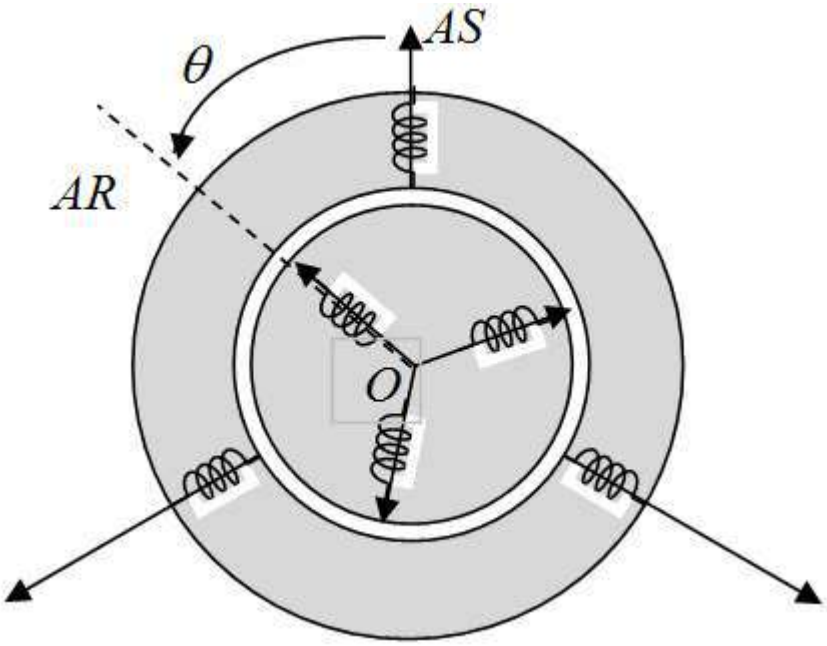


Fig. I.3 Représentation schématique du modèle d'une MADA-à rotor bobiné

I.5.1 Hypothèses simplificatrices

On adopte les hypothèses simplificatrices qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plus part des applications ; ces hypothèses sont les suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet que la f.m.m par chacune des phases des armatures est à répartition sinusoïdale [BEN 10].

I.5.2 Modèle de la MADA dans le repère abc

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases}[V_s]=[R_s].[I_s]+\dfrac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r]=[R_r].[I_r]+\dfrac{d}{dt}[\Phi_r]\end{cases} \qquad (I.3)$$

Avec :

Grandeurs statoriques : $$\begin{cases}[V_s]=[V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \\ [I_s]=[I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T \\ [\Phi_s]=[\Phi_{as} \quad \Phi_{bs} \quad \Phi_{cs}]^T\end{cases} \qquad (I.4)$$

Grandeurs rotoriques : $$\begin{cases}[V_r]=[V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T \\ [I_r]=[I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^T \\ [\Phi_r]=[\Phi_{ar} \quad \Phi_{br} \quad \Phi_{cr}]^T\end{cases} \qquad (I.5)$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases}[\Phi_s]=[L_s].[I_s]+[M_{ss}].[I_s]+[M_{sr}].[I_r] \\ [\Phi_r]=[L_r].[I_r]+[M_{rr}].[I_r]+[M_{rs}].[I_s]\end{cases} \qquad (I.6)$$

$[R_s],[R_r]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$[L_s],[L_r]$: sont les matrices des inductances propres statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}],[M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_{ss}],[M_{rr}]$: sont les matrices des inductances mutuelles statoriques-statoriques et Rotoriques -rotoriques.

Où :

$$\begin{cases}[R_s]=R_s.[I]_{3\times3} \\ [R_r]=R_r.[I]_{3\times3}\end{cases} \qquad (I.7)$$

$$\begin{cases}[L_s] = L_s.[I]_{3\times3} \\ [L_r] = L_r.[I]_{3\times3}\end{cases} \quad (I.8)$$

$$[M_{ss}] = M_{ss}.\begin{bmatrix} 0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

$$[M_{rr}] = M_{rr}..\begin{bmatrix} 0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

$$[M_{sr}] = M.\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-2.\pi/3) & \cos(\theta-4.\pi/3) \\ \cos(\theta-4.\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta-2.\pi/3) \\ \cos(\theta-2.\pi/3) & \cos(\theta-4.\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (I.12)$$

$[I]_{3*3}$: Est la matrice identité d'ordre 3.

M : est le maximum d'inductance mutuelle entre une phase statoriques et une phase Rotoriques pour $\theta = 0$.

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2}\left([I_s]^T[\varphi_s] + [I_r]^T[\varphi_r]\right) \quad (I.13)$$

Le couple électromagnétique s'exprime par le dérivé de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_m \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \qquad (I.14)$$

Avec :

Ω_r : vitesse de rotation de la machine.

J_m : Moment d'inertie de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant.

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statoriques, qui est variable dans le temps [AZZ 13].

I.5.3 Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park [BEN08].

I.5.3.1 La transformation de Park

La transformation de Park implique la transformation des enroulements statoriques et rotoriques de la machine originelle en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon les axes en quadrature d et q comme le montre la figure(I.4).Cette transformation a pour effet de rendre les inductances mutuelles du modèle de la machine indépendante de la rotation, c'est-à-dire de l'angle θ [BOU 04].

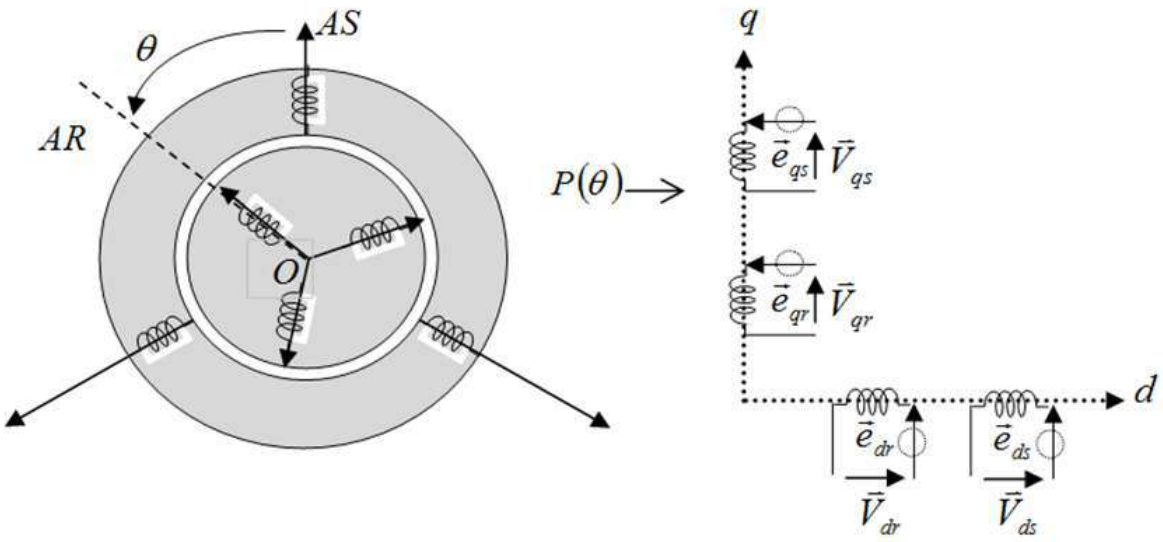


Fig. I.4 Représentation de la MADA dans le repère de Park.

La transformation de Park est donnée par l'expression suivante :

$$\left[P(\theta)\right]=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3})\\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3})\\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix} \qquad (I.15)$$

Le changement de variable relatif aux grandeurs X_i (courants, tension ou flux) est défini par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix}x_d\\ x_q\\ x_o\end{bmatrix}=\left[P(\theta)\right]\begin{bmatrix}x_a\\ x_b\\ x_c\end{bmatrix} \qquad (I.16)$$

X_0 Représente la grandeur homopolaire

La matrice inverse p^{-1} est :

$$\left[P(\theta)\right]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \qquad (I.17)$$

D' où la transformation inverse des variables :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \left[P(\theta)\right]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \qquad (I.18)$$

I.5.3.2 Equation électrique et magnétiques dans le système d'axes (d, q)

- **Equations des tensions**

  Les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_c \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_c \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_c - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_c - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \qquad (I.19)$$

  ω_c : vitesse angulaire du repère biphasé.

  ω_r : vitesse angulaire du rotor.

  $\omega_g = \omega_c - \omega_r$: vitesse angulaire du glissement.

- **Equations des flux**

  Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q)

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \qquad (I.20)$$

I.5.4 Choix de référentiel

L'étude analytique de la machine asynchrone à l'aide de composantes deux démentions nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions vectorielle du flux, de la tension et du courants. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes (d, q) qui se fait en fonction de l'application. Les trois cas souvent rencontrés sont présentes ici. Le choix se fait selon le problème étudie.

I.5.4.1 Référentiel lié au stator

Ce repère est immobile par rapport au stator (ω_c =0) et ($\omega_g = -\omega_r$)

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s I_{\alpha s} + \dfrac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s I_{\beta s} + \dfrac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r I_{\alpha r} + \dfrac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} + \omega_r \Phi_{\beta r} \\ V_{\beta r} = R_r I_{\beta r} + \dfrac{d\Phi_{\beta r}}{dt} - \omega_r \Phi_{\alpha r} \end{cases} \qquad (I.21)$$

Ce référentiel est très intéressant lorsqu'on veut étudier la variation de la fréquence associée ou non avec la variation de vitesse de rotation. Il est aussi très utilisé pour la commande directe du couple et pour l'estimation des grandeurs électromécaniques.

I.5.4.2 Référentiel lié au rotor

Le référentiel lie au rotor est immobile par rapport au rotor. Il est caractérisé par $(\omega_c = \omega_r)$ donc :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_r \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_r \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \qquad (I.22)$$

Ce repère est très intéressent pour l'étude des problèmes de régime transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante.

I.5.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel correspond aux transformations des enroulements rotoriques et statoriques dans un référentiel tournant à la vitesse synchrone ($\omega_c = \omega_s$) et ($\omega_g = \omega_s - \omega_r$) .

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_g \Phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_g \Phi_{dr} = 0 \end{cases} \qquad (I.23)$$

C'est le seul qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine, cependant, les grandeurs sinusoïdales après la transformation de Park, deviennent des grandeurs constantes. Ce modèle est à l'origine de la commande vectorielle.

I.5.5 Equation du couple électromagnétique

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières :

- Par un bilan de puissance instantanée.

- Par la méthode dite " des travaux virtuels " [PAT 03].

Nous allons utiliser la première méthode. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes d q est donnée par l'expression suivante :

$$P_e = V_{ds}.\mathrm{I}_{ds} + V_{qs}.\mathrm{I}_{qs} + V_{dr}.\mathrm{I}_{dr} + V_{qr}.\mathrm{I}_{qr} \qquad (I.24)$$

En développant cette dernière expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_e = P_J + P_{em} + P_{mec} \qquad (I.25)$$

OÙ :

$$P_J = R_s.(I_{ds}^{\ 2} + I_{qs}^{\ 2}) + R_r.(I_{dr}^{\ 2} + I_{qr}^{\ 2}) \qquad (I.26)$$

$$P_{em} = I_{ds}.\frac{d\phi_{ds}}{dt} + I_{qs}.\frac{d\phi_{qs}}{dt} + I_{dr}.\frac{d\phi_{dr}}{dt} + I_{qr}.\frac{d\phi_{qr}}{dt} \qquad (I.27)$$

$$P_{em} = \omega(I_{dr}.\phi_{qr} - I_{qr}.\phi_{dr}) \qquad (I.28)$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{p_{mec}}{\Omega} = p.\frac{p_{mec}}{\omega} \qquad (I.29)$$

La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasé modélisé dans le repère de Park est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = P(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \qquad (I.30)$$

I.5.6 Mise sous forme d'équation d'état

Le choix des variables d'état dépend des objectifs d'étude. Le modèle mathématique de la machine asynchrone en fonction des variables d'état s'écrit :

$$\left[\dot{X}\right] = [A].[x] + [B].[U] \qquad (I.31)$$

$$[Y] = [C].[x]$$

Avec :

$$U = \left[V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}\right]^T, B = [I]_{4*4}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s.M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s.M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma.(\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad : \text{Coefficient de dispersion}$$

I.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et les domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a, b, c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre plus simple et plus adapté à l'identification, à la simulation et à la commande. Les techniques d'identification seront le sujet du chapitre II.

II.1. INTRODUCTION

Le développement des modèles mathématiques est un problème major pour l'application des techniques avancée de l'analyse, la commande, l'optimisation, la surveillance et le diagnostic des processus. Identifier un système dynamique réel (appelé processus) c'est de trouver un modèle qui représente l'information (entrée/sorties) aussi bien que possible dans le sens d'un critère de performance (figure II.1) [POV 75].

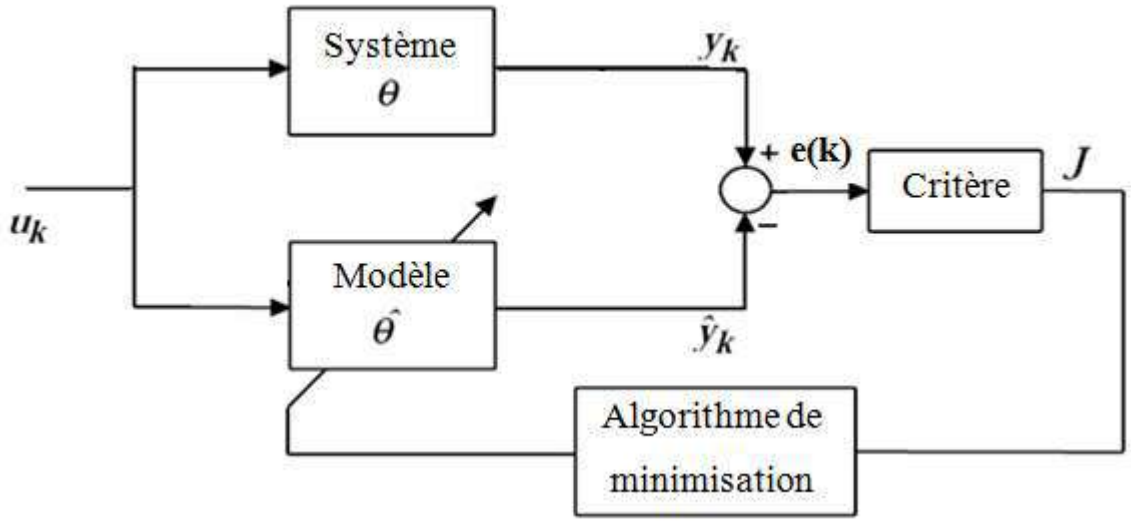


Fig. II.1 méthode d'identification des processus.

II.2. MODELES DU SYSTEME

Les modèles peuvent être rangés en deux classes :

- **Modèles paramétriques :**

Un modèle est dit paramétrique s'il est complètement défini par la connaissance d'un nombre fini de paramètres (représentation d'état, fonction de transfert…).

- **Modèles non paramétriques :**

Un modèle est dit non paramétrique, s'il n'existe pas un nombre fini de paramètres pour pouvoir le définir (réponse fréquentielle, réponse temporelle…) [DJE 15].

II.3. Méthodes d'identification paramétrique

Nombreuses sont les méthodes d'identification. On peut cependant les classer en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

- **Les méthodes déterministes :** ne font aucune hypothèse sur les bruit entachant les mesures, donc elles ne fournissent pas d'information sur la précision des paramètres identifiés. ces méthodes peuvent être subdivisées en plusieurs sous classes, la méthode heuristiques, la méthode statistique, la méthode Branch&Bound, les méthodes mathématiques.
- **Les méthodes stochastiques :** sont une alternative pour palier cet inconvénient. Les trois méthodes stochastiques les plus répandues sont les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la recherche taboue. Elles sont capables de trouve le minimum global d'une fonction même dans des cas très difficiles, mais le temps de calcul peut être élevé [OME 03].

II.3.1 Méthode basées sur l'erreur de prédiction

Dans cette partie, nous supposons que le modèle obtenu est un prédicateur, c'est-à-dire qu'il permet de calculer la sortie à l'instant k en fonction des entrées et des sorties réelles aux instants précédents u (k-1) et y (k-1), (figure II.2) [DEJ 15].

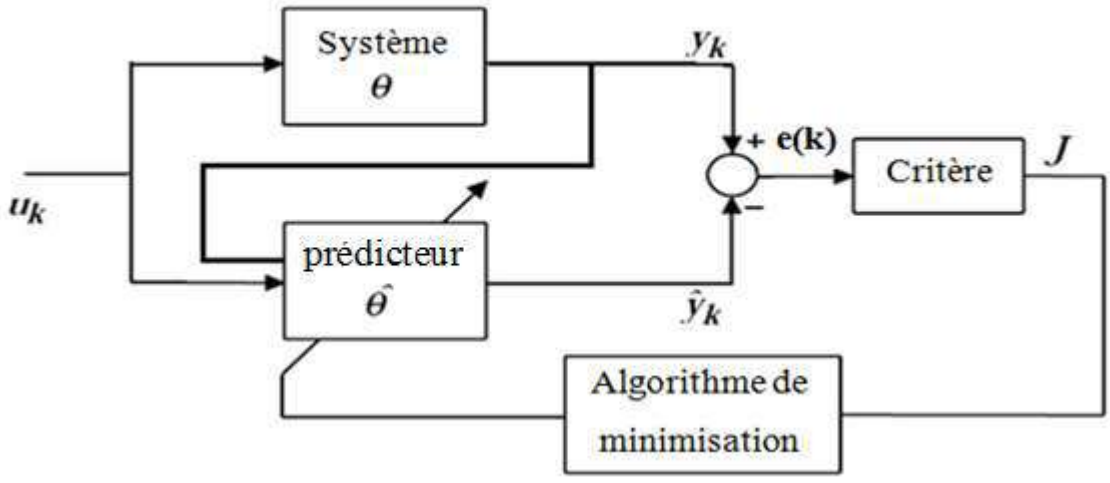


Fig. II.2 Schéma de principe du l'erreur de prédiction.

L'erreur de prédiction notée $e(k)$ entre la sortie réelle du système $y(k)$ et la sortie de prédicteur $\hat{y}(k)$ est définie par :

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \qquad (II.1)$$

Le critère que l'on se propose de minimiser est

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^{k=N} e(k)^2 = \sum_{k=1}^{k=N} (y(k) - \hat{y}(k))^2 \qquad (II.2)$$

Où :

$$\hat{y}(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - ..... - a_n y(k-n) + b_0 u(k) \qquad (II.3)$$

$$+b_1 u(k-1) + ... + b_n u(k-n)$$

En mettant $(II.3)$ dans $(II.1)$, nous obtenons l'expression suivante :

$$e(k) = y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + ... + a_n y(k-n) - b_0 u(k) \qquad (II.4)$$

$$-b_1 u(k-1) - ..... - b_n u(k-n)$$

$$e(k) = y(k) + \varphi(k).\theta \qquad (II.5)$$

Avec:

$$\theta^T = [a_1 \quad a_2 \quad ... \quad a_n \quad b_0 \quad b_1 \quad ... \quad b_n] \qquad (II.6)$$

Et :

$$\varphi^T(k) = [y(k-1) \quad y(k-2) \quad .... \quad y(k-n) \quad u(k) \quad u(k-1) \quad .... \quad u(k-n)] \qquad (II.7)$$

Pour N itérations :

$$E = Y + \phi^T.\theta \qquad (II.8)$$

Avec :

$$E = \begin{bmatrix} e(1) \\ \vdots \\ e(\mathrm{N}) \end{bmatrix}; \mathrm{Y} = \begin{bmatrix} \mathrm{y}(1) \\ \vdots \\ \mathrm{y}(\mathrm{N}) \end{bmatrix}; \phi^T = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(\mathrm{N}) \end{bmatrix} \qquad (II.9)$$

La résolution du système d'équation $(II.8)$ peut se faire par la méthode des moindres carrées simple.

II.3.1.1 Méthode des moindres carrées simple

La méthode des moindres carrés simple, introduite par Gauss au début du $XIX^{éme}$ siècle, peut être utilisée afin de déterminer les paramètres optimaux d'une équation linéaire vis-à-vis de ces paramètres, quant on minimise la somme des carrés entre les valeurs issues d'une mesure et les valeurs obtenues.

Soit le système d'équation linéaire $(II.8)$:

$$E = Y + \phi^T.\theta$$

Considérons le critère de performance suivante :

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^{N} e^2(k) = E^T E = \left[Y - \phi\theta\right]^T \left[Y - \phi\theta\right] \qquad (II.10)$$

$$= Y^T Y - 2Y^T \phi\theta + \theta^T \phi^T \phi\theta$$

Il s'agit de déterminer une estimation du vecteur θ de telle sorte qu'il minimise $J(\theta)$.

La résolution de ce système au sens des moindres carrés donne :

$$\left.\frac{dJ(\theta)}{d\theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} = -2\phi^T Y + 2\phi^T \phi\hat{\theta} = 0 \qquad (II.11)$$

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \qquad (II.12)$$

L'application de cette méthode à la MADA nécessite la mesure des tensions V_a ,V_b , V_c, des coutants statoriques i_{as} ,i_{bs} ,i_{cs} et les courants rotoriques i_{ar},i_{br},i_{cr}.

Remarques :

- La méthode de l'erreur de prédiction donne une solution analytique.
- Dans la machine asynchrone à cage les courants i_{ar}, i_{br}, i_{cr} ne sont pas accessible. Dans ce cas on utilise les méthodes basées sur l'erreur de sortie.

II.3.2 Méthode basées sur l'erreur de sortie

La méthode de l'erreur de sortie (méthode du modèle) est basée sur la comparaison de la sortie du processus et celle du modèle mathématique dont on cherche à évaluer les paramètres. Cette méthode s'avère particulièrement efficace lorsque la fonction à identifier est non linéaire. Son fonctionnement est schématisé succinctement par la figure (II.3) [OUK 12].

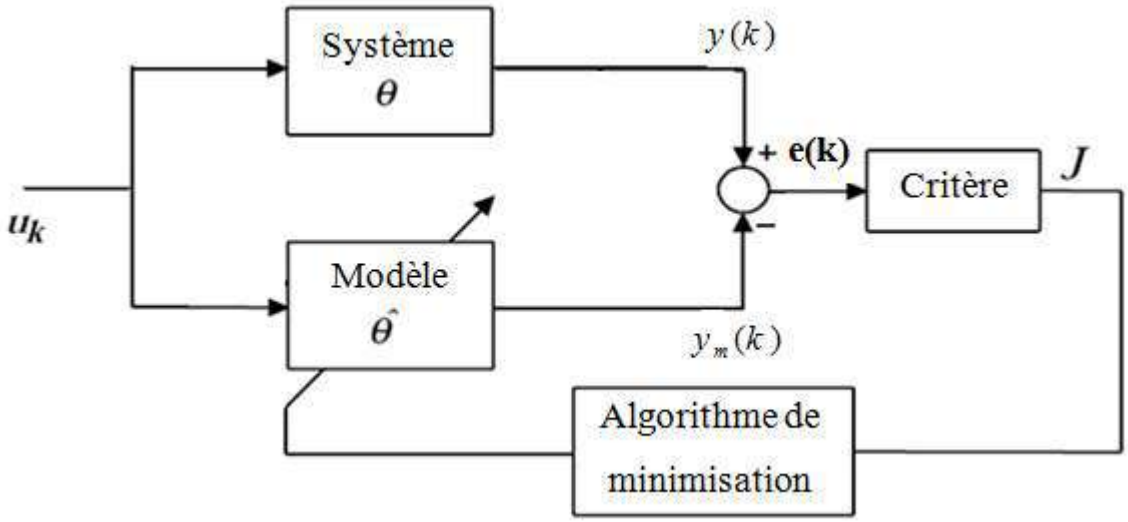


Fig. II.3 Schéma de principe du l'erreur de sortie.

L'erreur entre la sortie mesurée et la sortie du modèle est :

$$e(k) = y(k) - y_m(k) \qquad (II.13)$$

Avec :

$$y_m(k) = -a_1 y_m(k-1) - a_2 y_m(k-2) - .... - a_n y_m(k-n) + b_0 u(k) + ... + b_n u(k-n) \qquad (II.14)$$

Calculons $y_m(k)$ pour différentes valeurs de K :

Pour k=1 :

$$y_m(1) = -a_1 y_m(0) + b_0 u(0) \qquad (II.15)$$

Pour k=2 :

$$y_m(2) = -a_1 y_m(1) - a_2 y_m(0) + b_0 u(0) + ... + b_1 u(1) \qquad (II.16)$$

En mettant l'équation $(II.15)$ dans $(II.16)$, nous obtenons l'expression suivante :

$$y_m(2) = -a_1[-a_1 y_m(0) + b_0 u(0)] - a_0 y_m(0) + b_0 u(0) + \mathrm{b}_1 u(1) \qquad (II.17)$$

$$\begin{aligned} y_m(2) &= a_1^2 y_m(0) - a_1 b_0 u(0) - a_0 y_m(0) + b_0 u(0) + \mathrm{b}_1 u(1) \\ &\vdots \end{aligned} \qquad (II.18)$$

La sortie $y_m(k)$ n'est pas linéaire en θ, la minimisation de critère de performance s'effectue par deux méthodes :

- Linéarisation de la sortie du modèle $y_m(k)$ au tour de $\bar{y}_m(\mathrm{k})$ se qui donne :

$$\mathrm{e(k)} = \mathrm{y(k)} - \bar{y}_m(\mathrm{k}) = \sum_{i=1}^{k} \sigma_{a_i} . \Delta a_i + \sum_{i=1}^{k} \sigma_{b_i} . \Delta \mathrm{b}_i \qquad (II.19)$$

Où les fonctions des sensibilités sont donnes par :

$$\sigma_{a_i}(k) = \left. \frac{\partial y_m(k)}{\partial \sigma_{a_i}} \right|_{y_m = \bar{y}} \qquad (II.20)$$

$$\sigma_{a_i}(k) = \left. \frac{\partial y_m(k)}{\partial \sigma_{b_i}} \right|_{y_m = \bar{y}} \qquad (II.21)$$

Pour N mesure on obtient un système linéaire en θ. La détermination de θ peut se faire par la méthode des moindres carrés simple(MCS).

- Utilisation de la programmation non linéaire. Plusieurs méthodes itératives d'optimisation non linéaire peuvent être utilisées :
  - Gradient.
  - Gauss-Newton.
  - Levenberg-Marquardt.

- *A* lg*orithme* génétique.

II.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exposé quelques méthodes d'identifications des systèmes. Le but des ces techniques est de trouver les paramètres du système. Pour minimiser les erreurs nous avons utilisé les méthodes identifications paramétriques qui sont les suivantes : Méthode basé sur l'erreur de prédiction et Méthode basées sur l'erreur de sortie.

III.1. INTRODUCTION

Les algorithmes génétiques reposent sur l'analogie entre la théorie de l'évolution naturelle de Darwin et l'optimisation. Selon la théorie de Darwin, Les individus d'une population les mieux adaptés à leur environnement ont une plus grande probabilité de survivre est de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés. Comme dans les mécanismes naturels de la reproduction, les principaux opérateurs qui affectent la constitution d'un chromosome, qui code les caractéristiques des individus, sont le croisement et la mutation.

Les AG ont été proposées par Holland en 1975**,** puis développés par d'autres chercheurs tels que De Jong, Goldberg, et Michalewicz. C'est actuellement une des méthodes les plus diffusées et les plus utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'application [OME 03].

Les particularités des algorithmes génétiques sont :

- Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux mêmes.
- Ils travaillent sur une population de points au lieu d'un point unique.
- Ils n'utilisent que la valeur de la fonction étudiée et non sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

J.Holland et D.Goldberg ont proposé les trois fondamentales étapes des algorithmes génétiques :

- Le codage des paramètres sous forme de gène.
- L'opérateur de sélection des individus les mieux adaptés ou les plus performants.
- Les opérateurs de reproduction : croisement et mutation qui agissent sur le gène.

Sachant qu'au niveau de codage binaire, le croisement favorise plus l'exploration ou diversification tandis que la mutation favorise plus l'exploitation ou l'intensification du domaine de conception. Par contre, au niveau de codage réel, le croisement favorise l'exploitation ou l'intensification et la mutation favorise la diversification.

Les applications des AG sont multiples : intelligence artificielle, recherche opérationnelle, optimisation combinatoire, optimisation des fonctions numériques difficiles (discontinues, multimodales,…..), traitement d'image (alignement des photos satellites), optimisation d'emploi du temps, contrôle de systèmes industriels et apprentissage des réseaux de neurones [OME 03].

Dans ce chapitre, nous développons un algorithme génétique pour les identifications des paramètres de la MADA. Ensuit un banc d'essai à base d'une MADA et d'une carte dSPACE 1103 est réalisé. Enfin, des résultats de simulation et pratique du comportement de la MADA sont comparés.

III.2. PRINCIPE DE L'ALGORITHME GENETIQUE

Les AG sont des algorithmes d'optimisation qui s'appuient sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes de sélection naturelle. Pour transposer les processus génétiques observés dans l'évolution des espèces au domaine de l'optimisation, Holland a introduit deux points fondamentaux :

- L'évolution des espèces est un processus qui opère sur des structures appelées chromosomes. Dans les AG, on transforme tout point de l'espace de recherche en un chromosome appelé encore chaine ou individu. Chacune de ces chaines représente, sous forme codée, l'ensemble des valeurs des paramètres, par exemple, pour un problème trois paramètres, une chaine sera formée par la concaténation des trois valeurs réelles x_1, x_2, x_3.
- Dans la nature, l'adaptation d'un individu reflète sa capacité de survivre dans son environnement .En optimisation, la valeur de la fonction objectif mesure l'adaptation de l'individu à l'environnement .Un individu est donc d'autant mieux adapté qu'il satisfait le critère d'optimisation.

A partir de ces deux concepts : codage du paramètre et mesure d'adaptation, on peut décrire le fonctionnement général des algorithmes génétiques [ALL 94].

Les AG débutent par l'initialisation aléatoire d'une population P de N individus. La population évolue sur plusieurs générations. A chaque génération g, les individus de la population p(g) sont évalués et les plus adaptés sont autorisés par l'opérateur sélection à avoir un grand nombre de descendants. Une mise en œuvre de cet opérateur consiste à donner par chaque individu une probabilité d'avoir un descendant dans la génération suivante,

proportionnelle à sa performance. Les mécanismes de mise en œuvre les plus employés sont la roue de loterie, le tournoi ou décimation et ils seront détaillés plus loin.

Ils ont tous en commun de générer une population P'(g) de même nombre N d'individus formés des copies des individus appelés à se produire. Pour former la nouvelle génération, les opérateurs de croisement et de mutation sont alors appliqués sur des individus sélectionnés aléatoirement dans P'(g).

La figure (III.1) représente l'organigramme d'un algorithme génétique simple :

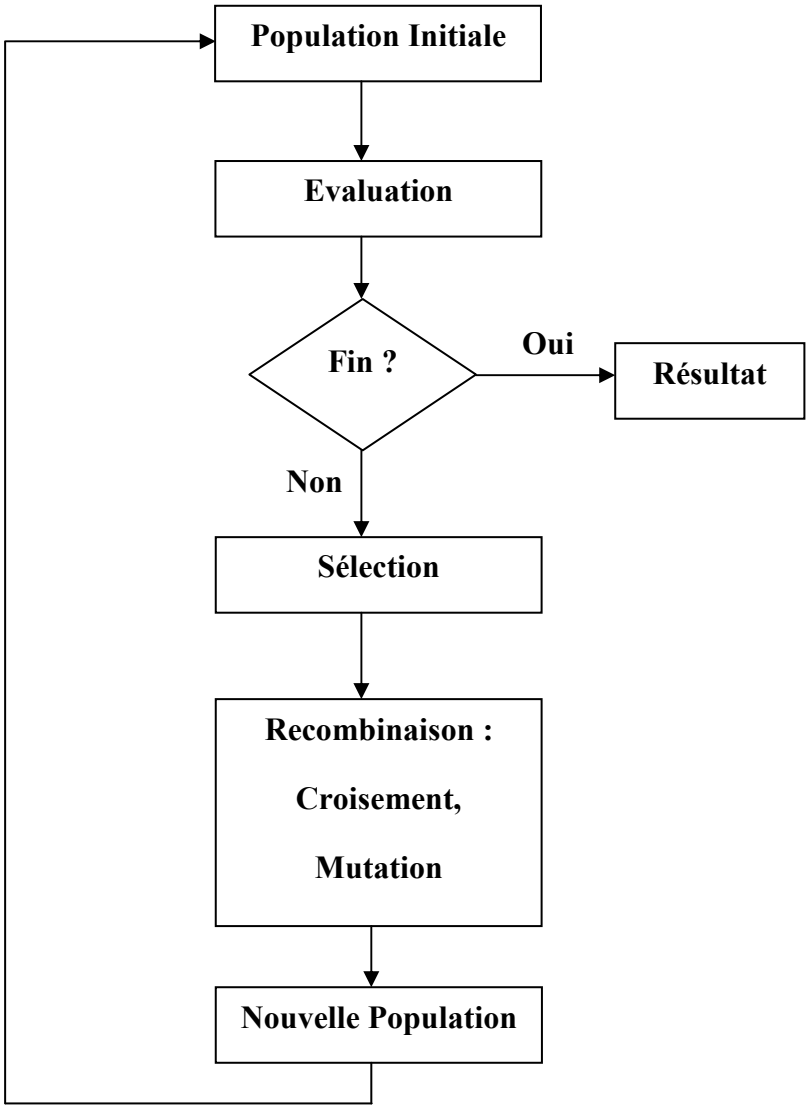


Fig. III.1 Organigramme d'un algorithme génétique.

III.3. CODAGE

Pour utiliser les AG, La première chose à se demander est : « Comment décrire un individu? ». C'est-à-dire, Comment les paramètres peuvent se coder?

La réponse à cette question a une influence forte sur l'implémentation des mécanismes de croisement et de mutation. Un gène correspond de fait à un paramètre et un seul x_i. Un chromosome est constitue par un ensemble de gène et décrit complément un individu. L'ensemble des individus est appelé population. On aboutit ainsi à une structure présentant quatre niveaux d'organisation (figure III.2). Un chromosome est une concaténation du gène. (Figure III.3).

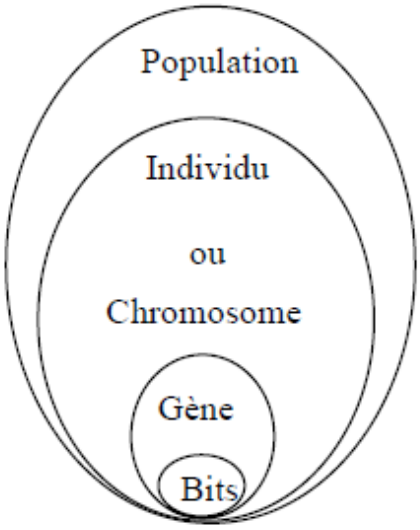


Fig. III.2 Les quatre niveaux de codage d'organisation des AG.

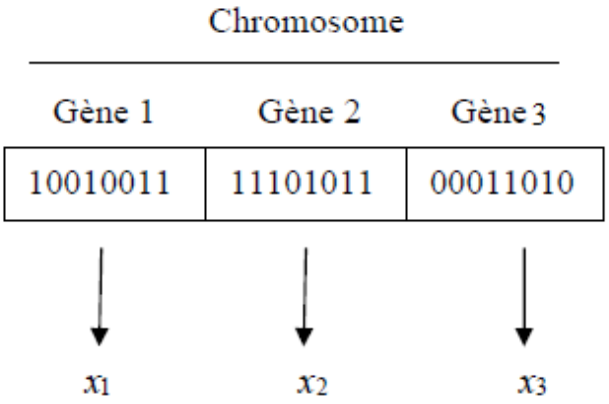


Fig. III.3 Illustration du chromosome Des variables d'optimisation.

Il y a plusieurs types de codage : binaire, réel, codage de Gray et codage dynamique des paramètres. Chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Le plus utilisés est présenté ci-dessous.

.

III.3.1 Codage binaire

Holland et De Jong ont imposé le codage binaire de longueur fixe pour un chromosome qui s'écrit sous la forme d'une chaine de l bits avec : [DEJ 75]

$$l = \sum_{i=1}^{n} l(x_i) \qquad (III.1)$$

Ou $l(x_i)$ est le nombre de bits du gène numéro i correspondant au paramètre x_i .

Un des avantages du codage binaire est que l'on peut ainsi facilement coder toutes sortes de paramètres : réels, entiers, booléens et chaise de caractères. Cela nécessite simplement l'usage de fonctions de codage et décodage pour passer d'une représentation à l'autre. Ce choix le rend virtuellement applicable à tous les problèmes dont les solutions sont numériques, c'est-à-dire calculées par des ordinateurs.

Cette méthode de codage est relativement facile à implanter mais elle présente l'inconvénient de limiter la précision des paramètres à une valeur correspondant à l'écart entre deux configurations réelles adjacentes obtenues, pour une variation du bit le moins significatif. On constate que la précision du codage dépend du nombre de bit de utilisé. Pour un nombre de bits par gène valant 8, 16,32 les précisions relatives valent $3,9.10^{-3}$, $1,5.10^{-5}$ et $2,3.10^{-10}$, respectivement.

A chaque paramètre x_i , on associe un gène g_i, qui est obtenu par :

$$g_i = \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}}.(2^{l(xi)} - l) \qquad (III.2)$$

III.4. POPULATION INITIALE

La première étape de l'algorithme est la genèse de la population initiale. Elle peut être obtenue en générant aléatoirement les individus dans l'espace de recherche suivant une loi de probabilité uniforme.

Pour privilégier une direction de recherche ou lorsque le problème est fortement contraint, les individus peuvent être également initialisés de façon heuristique ou directement

introduits par l'utilisateur. Mais cette méthode peut faire converger trop rapidement la recherche vers un optimum local.

III.5. EVALUATION

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population en utilisant une fonction liée directement à la fonction objectif (fonction à optimiser).cette fonction appelée fonction fitness est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu. Un individu ayant une grand valeur fitness représenté une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur fitness représente une solution médiocre .Ainsi quel que soit le problème traité, l'algorithme génétique tend à maximiser la fonction fitness des individus. Dans le cas d'un problème de minimisation, la fonction fitness peut être obtenue en utilisant une des manières suivantes : [BEN 15]

$(a) Fit(x) = N - F_{obj}(x)$ Si $F_{obj}(x) \geq N$ si non $Fit(x) = 0$ (N : est une constante positive.)

$$(b) Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)}$$

$$(c) Fit(x) = -F_{obj}(x)$$

Dans notre travail nous avons utilisé l'expression (b) donc notre fonction fitness est :

$$(b) Fit(x) = \frac{1}{F_{obj}(x)} \qquad (III.3)$$

III.6. LA SELECTION

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus, mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptes sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés [CAL 87]. La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante. (Figure III.4) .Il existe plusieurs méthode de sélection, les plus connues sont la « roue de la fortune » et la « sélection par tournoi ».

- **La roue de la fortune :** est la plus ancienne, chaque individu, de la population de taille maximale $J_{\max}$, occupe une section de la roue proportionnellement, à sa fonction d'adaptation fitness(j), la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$P_{rob}(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum_{j=1}^{J_{\max}} Fitness(j)} \qquad (III.4)$$

Chaque fois qu'un individu doit être sélectionne, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés.

- **La sélection par tournoi :** consiste, chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, à tirer aléatoirement k individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation ; le choix du meilleur individu est fait parmi les k individus sélectionnés. Le nombre k a une influence sur la pression de sélection : lorsque k=2, la sélection est dite par 'tournoi binaire' (figure III.4).

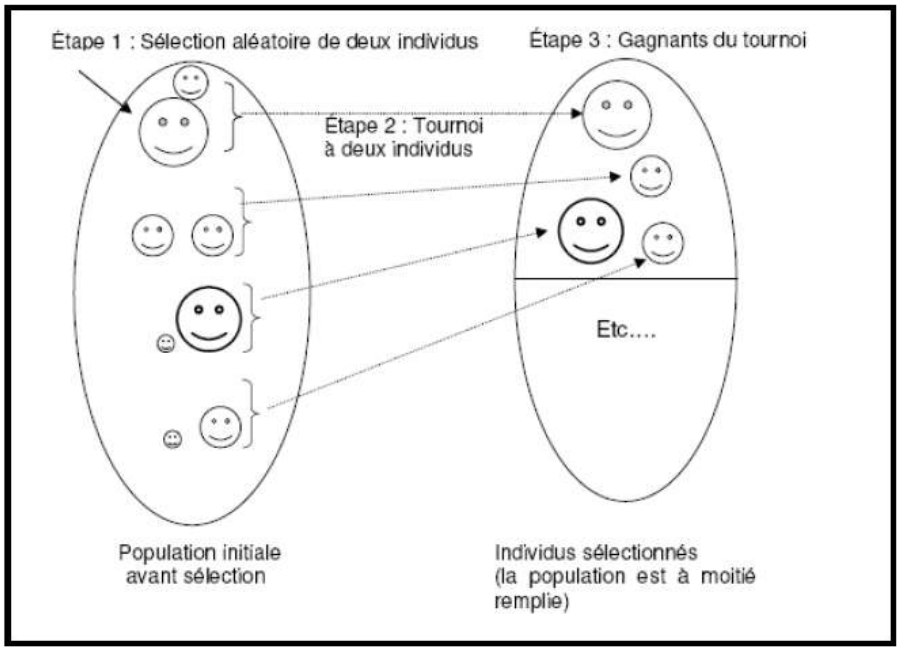


Fig. III.4 Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation. Chaque individu représente une solution possible.

III.7. LE CROISEMENT

Le croisement permet de créer de nouvelles chaines en échangeant de l'information entre deux chaînes figure (III.5). Les nouveaux éléments produits par la reproduction sont apparies. En suite la paire de chaines subit un croisement comme suite : un entier k représentant une position sur la chaine est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaine moins $(l-1)$. Deux nouvelles chaines sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions k+1 et l inclusivement [TAO 10].

L'exemple suivant .figure (III.5) montre le croisement deux chaines A_1 et A_2 de longueur l =5 appartenant à la population initiale (figure III.5). Les deux nouvelles chaines A_3 et A_4 appartenant à la nouvelle population sont obtenues par croisement à la position k=4.

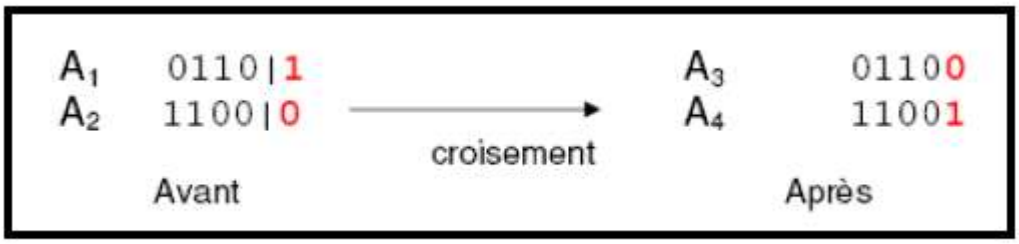


Fig. III.5 Représentation d'un croisement en un point de deux chaines.

III.7.1 Opérateurs de croisement

Il existe d'autres opérateurs de croisement :

- **Croisement en deux points :** on choisit au hasard deux points de croisement et on échange les parties de la chaine situées entre ces deux points .figure (III.6)

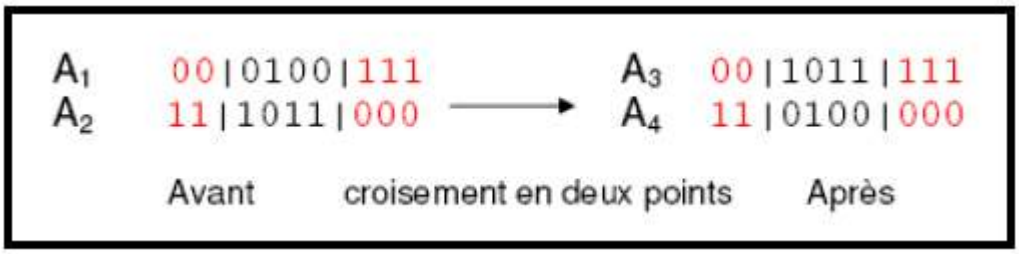


Fig. III.6 Représentation d'un croisement en deux points.

- **Croisement uniforme**

Dans ce type de croisement. On utilise un masque de croisement : il consiste en un vecteur généré aléatoirement de longueur identique aux chaines parents. Et est composé de 0 et 1.Lorsque le bit du masque vaut 0. L'enfant hérite le bit du premier parent. Sinon il hérite celui du second parent. Le second enfant est le complémentaire du premier. Ce croisement peut être considéré comme une génération du croisement multipoint. Sans connaissance préalable du point de croisement (figure III.7).

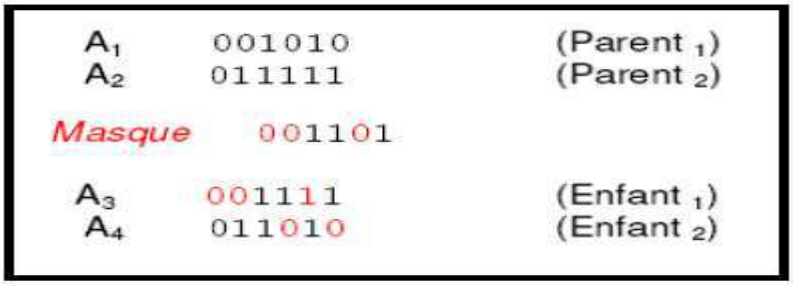


Fig. III.7 Représentation d'un croisement uniforme.

III.8. La MUTATION

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaine. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaine ; pour un codage binaire, cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa figure (III.8).

Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG ne pas stagner dans un optimum local.

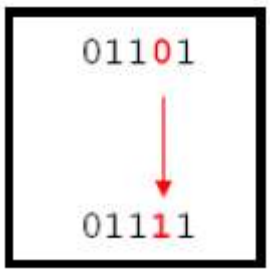


Fig. III.8 Représentation d'une mutation de bits dans une chaine.

III.9. CRITERE D'ARRET

Le critère d'arrêt peut être formulé de différentes façons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de génération.
- Arrêt si un certain nombre de génération est dépasse qui est le critère utilisé dans notre programme.

III.10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ALGORITHMES GENETIQUES

III.10.1 Les avantages des algorithmes génétiques

- Les AG opèrent au niveau du codage des paramètres sans se soucier de leur nature, donc ils s'appliquent à de nombreuses classes de problèmes, qui dépendent éventuellement de plusieurs paramètres de natures différentes (booléens, entiers, rées, fonctions…).
- Pour les mêmes raisons un AG est totalement indépendant de la nature du problème et de la fonctionnelle à optimiser, car il ne se sert que des valeurs d'adaptation, qui peuvent être très différentes des valeurs de la fonction à optimiser, même si elles sont calculés à partir de cette dernière.
- Potentiellement les AG explorent tous l'espace des points en même temps, ce qui limite les risques de tomber dans des optimums locaux.
- Les AG ne se servent que des valeurs de la fonctionnelle pour optimiser cette dernière, il n'ya pas besoin d'effectuer de couteux et parfois très complexes calculs.
- Les AG présentent une grande robustesse c'est-à-dire une grande capacité à trouver les optimums globaux des problèmes d'optimisation [BEN 15].

III.10.2 Les inconvénients des Algorithmes Génétiques

- Les AG ne sont encore actuellement pas très efficaces en cout (ou vitesse de convergence), vis-à-vis de méthode d'optimisation plus classique.

- Parfois les AG convergent très vite vers un individu particulier de la population dont la valeur d'adaptation est très élevée.
- Le respect de la contrainte de domaine par la solution codée sous forme de chaine de bites pose parfois problème .Il faut bien choisir le codage, voir modifier les opérateurs.
- L'utilisation d'un AG ne garantit pas le succès de l'optimisation.
- En pratique l'efficacité d'un AG dépend souvent de la nature du problème d'optimisation. Selon les cas de choix des opérateurs et des paramètres seront souvent critiques. Mais aucune théorie générale ne permet de connaitre avec certitude le bon paramétrage, il faudra plusieurs expériences pour s'en approcher.

III.11. APPLICATION DE L'AG A L'IDENTIFICATION DE LA MADA

Le modèle de la MADA utilisé pour l'identification est :

$$
\begin{cases}
I_{ds}(k+1) = I_{ds}(k) + T_e.\left(\frac{-I_{ds}(k)}{\sigma(i)\,Ts(i)}\right) + \left(\frac{1-\sigma(i)}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{qs}(k) + \left(\frac{1-\sigma(i)}{\sigma(i).Tr(i)}\right).I_{dr}(k) \\
\qquad + \left(\frac{1-\sigma(i))}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{qr}(k) + \left(\frac{v_{ds}(k+1)}{\sigma(i).Ls(i)}\right) \\
I_{qs}(k+1) = I_{qs}(k) + T_e.\left(\frac{-(1-\sigma(i))}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{ds}(k) - \left(\frac{1}{\Omega(i).Ts(i)}\right).I_{qs}(k) - \left(\frac{1-\sigma(i))}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{dr}(k) \\
\qquad + \left(\frac{1-\sigma(i)}{\sigma(i).Tr(i)}\right).I_{qr}(k) + \left(\frac{V_{qs}(k+1)}{\sigma(i).Ls(i)}\right) \\
I_{dr}(k+1) = I_{dr}(k) + T_e.\left(\frac{1}{\sigma(i).Ts(i)}\right).I_{ds}(k) - \left(\frac{1}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{qs}(k) - \left(\frac{1}{\sigma(i).Tr(i)}\right).I_{dr}(k) \\
\qquad - \left(\frac{1}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{qr}(k) - \left(\frac{v_{ds}(k+1)}{\sigma(i).Ls(i)}\right) \\
I_{qr}(k+1) = I_{qr}(k) + T_e.\left(\frac{1}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{ds}(k) + \left(\frac{1}{\sigma(i).Ts(i)}\right).I_{qs}(k) + \left(\frac{1}{\sigma(i)}\right).p_0.\Omega(k).I_{dr}(k) \\
\qquad - \left(\frac{1}{\sigma(i).Tr(i)}\right).I_{qr}(k) - \left(\frac{v_{qs}(k+1)}{\sigma(i).Ls(i)}\right) \\
\Omega(k+1) = \Omega(k) + T_e.\left(\frac{p_0}{J(i)}\right).(1-\sigma(i)).Ls(i).(I_{qs}(k).I_{dr}(k) - I_{ds}(k).I_{qr}(k)) - \left(\frac{fr(i)}{J(i)}\right).\Omega(k)
\end{cases}
\qquad (III.5)
$$

Le vecteur de paramètre à déterminer est :

$$\theta = \begin{bmatrix} \sigma & T_s & L_s & T_r & J & f \end{bmatrix}$$

La fonction de fitness choisi pour l'identification de la MADA est donnée par :

$$Fit(\theta) = \frac{1}{Erreur} \qquad (III.6)$$

$$Erreur = \sum_{K=1}^{N} e_d{}^2 + \sum_{K=1}^{N} e_q{}^2 + \sum_{K=1}^{N} e_\Omega{}^2 \qquad (III.7)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_d(k) = I_{dsm}(k) - I_{ds}(k) \\ e_q(k) = I_{qsm}(k) - I_{qs}\,\mathrm{s}(k) \\ e_\Omega(k) = \Omega_m(k) - \Omega(k) \end{cases} \qquad (III.8)$$

Ou :

T_e : Période d'échantillonnage.

$I_{dsm}(k)$: Courant mesuré dans l'axe d.

$I_{qsm}(k)$: Courant mesuré dans l'axe q.

$I_{ds}(k)$: Courant dans l'axe d du modèle.

$I_{qs}(k)$: Courant dans l'axe q du modèle.

III.12. PRESENTATION DU BANC D'ESSAI

Dans le but de déterminer expérimentalement les paramètres de la MADA par l'algorithme génétique, nous avons mis au point un banc d'essai comprenant une machine asynchrone à rotor bobiné de 1.5KW à deux paires de pôles, des capteurs de mesure et une carte dSPACE 1103. La figure (III.9) représente le système global du banc d'essai.

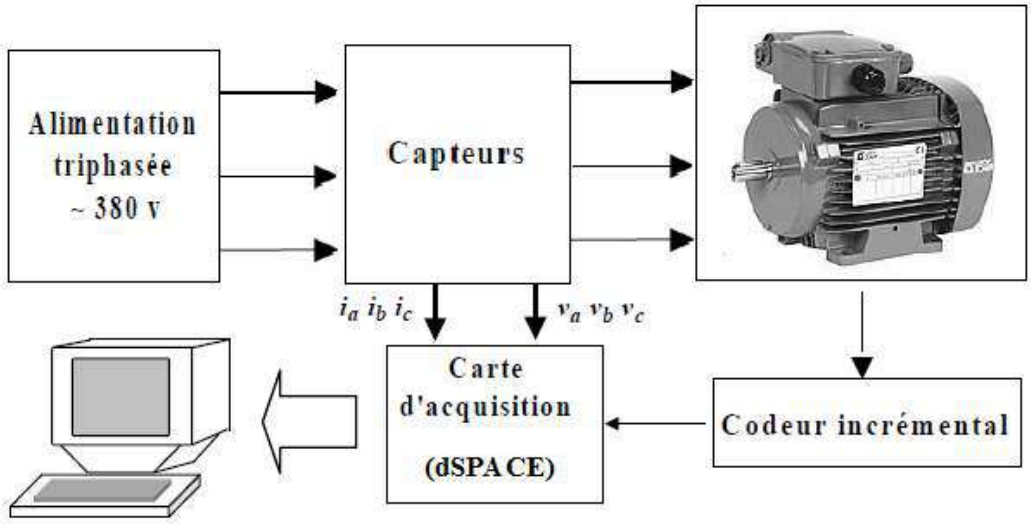


Fig. III.9 Banc d'essai d'identification pour la MADA.

Sur la figure (III.10) est représenté le banc d'essai expérimental réalise aux seins du laboratoire de recherche en électrotechnique et en Automatique (LREA) de l'université de MEDEA Il est constitué de :



Fig. III.10 Montage générale de la machine asynchrone MADA

- Une MADA alimenté directement par le réseau. la tension maximale entre phase est de 380V. Le courant nominal de la machine est 3.7A (figure **III.11)**



Fig. III.11 Machine asynchrone a double alimentation MADA.

- Des capteurs pour mesurer les signaux d'entrée (les tensionsV_a, V_b, V_c) et les signaux de sortie (les courants I_a, I_b, I_c) et la vitesse de rotation (figure III.12).



Fig. III.12.a Capteurs de mesure.



Fig. III.12.b Capteurs de position.

- Une carte de commande dSPACE 1103.

III.13. RESULTAT DE SIMULATION

Les résultats des paramètres de la MADA obtenu après l'application de l'algorithme génétique que nous avons développé sont résumés dans le tableau suivant:

Les paramètres de la MADA utilisé signification	Paramètres de la MADA obtenu par l'Algorithme Génétique	Unité
Résistance statoriqe	Rs=2.3	[Ω]
Résistance rotorique	Rr=0.35	[Ω]
Inductance statoriqe	Ls=0.093263	[H]
Inductance rotorique	Lr=0.0162	[H]
Inductance mutuelle	M=0.0352	[H]
Inertie du moteur	J=0.009510785	[Kg.m²]
Coefficient de frottement	f=0.00178	[N.m.s/rd]
Constante de temps rotorique	Tr=0.01498	S
Constante de temps statoriqe	Ts=0.0077878	S
Coefficient de dispersion	σ =0.17905	M^2/S

Tableau III.1 : Paramètres de la MADA identifiés par l'Algorithme génétique.

Les figures (III.13), (III.14) et (III.15) représentent la comparaison ente le comportement réel et par simulation de la MADA alimentée par une source de tension variable. Nous constations qu'il y a une concordance entre la vitesse et les courants simulés et la vitesse et les courants réels.de la MADA.

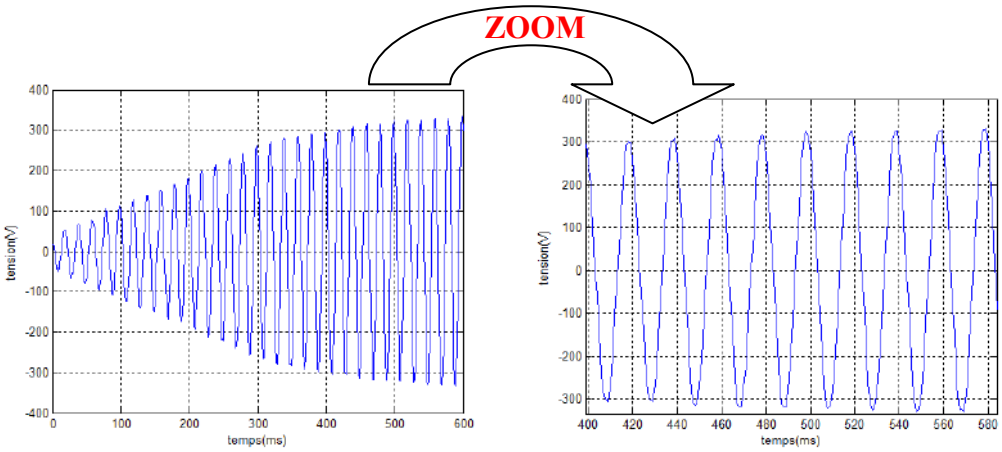


Fig. III.13 Tension d'alimentation v_a.

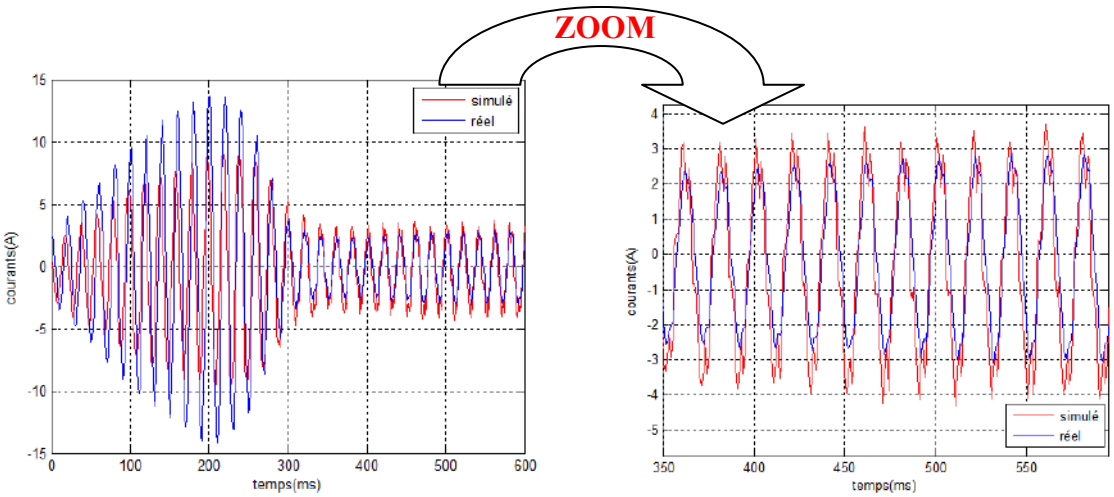


Fig. III.14 Courants i_a simulé et réel de la MADA.

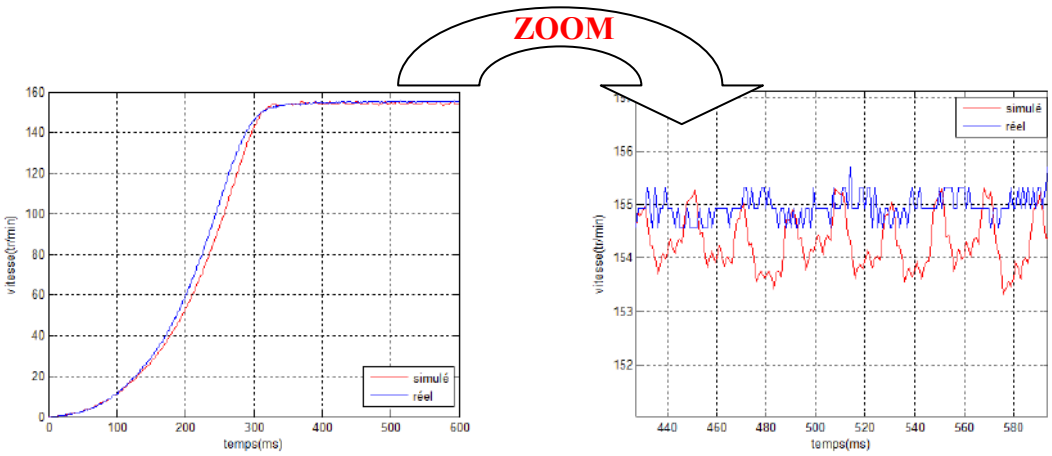


Fig. III.15 Vitesse simulée et réelle de la MADA.

III.14. CONCLUSION

Les algorithmes génétique servent à résoudre les problèmes d'optimisation en représentant les solutions sous forme de chromosomes, définir une fonction fitness pour évaluer la performance d'un chromosome et appliquer les opérateurs de sélection. De croisement et de mutation. Nous avons présenté également un ensemble de technique de base qui permet de réaliser un algorithme génétique.

Dans ce chapitre on a développé un programme pour la détermination du vecteur paramètres de la MADA basé sur les algorithmes génétiques. Ensuite on a réalisé un banc d'essai pour la mise en œuvre de cette technique. Les résultats de simulations et pratique ont montré l'efficacité de la méthode proposée.

IV.1. INTRODUCTION

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facilement commandable. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment et grâce à cette propriété, des hautes performances dynamiques peuvent être atteintes. Cependant la présence du système balais-collecteur limite ses domaines d'utilisation (puissance, vitesse).

L'absence du système balais-collecteur est l'un des avantages décisifs pour remplacer la machine à courant par celle à courant alternatif est précisément la machine asynchrone.

Dans une machine à courant alternatif, la principale difficulté réside dans le fait qu'il existe un couplage complexe entre les variables d'entrées (tension, fréquence), de sorties (vitesse, couple) et les paramètres internes (courant rotoriques et flux). Pour obtenir une situation équivalente à celle d'un moteur à courant continu. Blaschke et Hass ont proposé une méthode permettant de maitriser ces difficultés en introduisant les coordonnées de champs, ou le vecteur courant statoriques sera décomposé en deux composantes, une qui produit le flux et l'autre le couple. La dynamique d'une machine à courant alternatif sera ramenée à celle d'une machine à courant continu [SAR 00].

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales : La méthode directe et méthode indirecte développées par Blaschke et par Hass successivement.

Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

- Suivante la source d'énergie :
  - Commande en tension
  - Commande en courant.
- Et suivant l'orientation du repère (d, q)
  - Le flux rotoriques.
  - Le flux statoriques.
  - Le flux de l'entrefer.

IV.2. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE

La commande par flux orienté est une expression qui apparait de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force est maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ.

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par BLASHKE au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée(MCC) ou le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple.

De sorte que le flux soit aligne sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante [TIR 10].

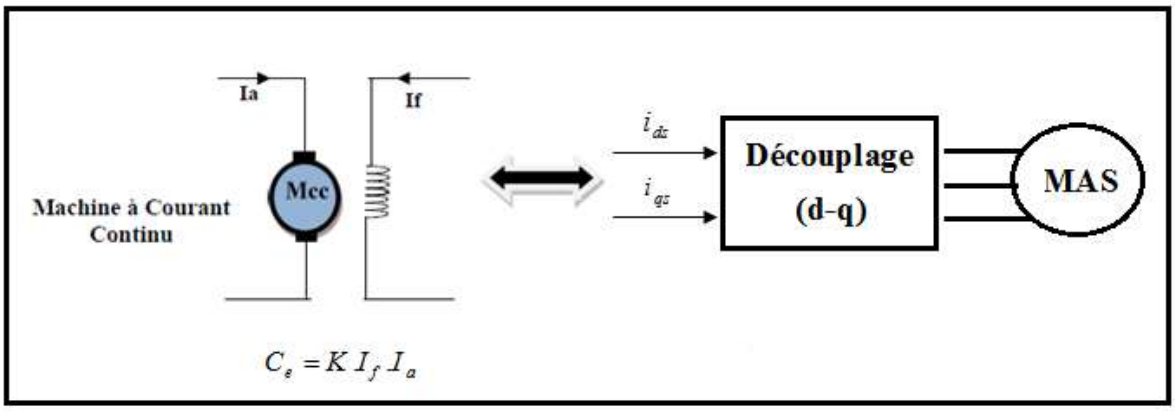


Fig. IV.1 Principe de la commande vectorielle.

IV.3. COMMANDE VECTORIRLLE PAR ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE

La commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statoriqe suivant l'axe d du référentiel tournant. Figure (IV.2).

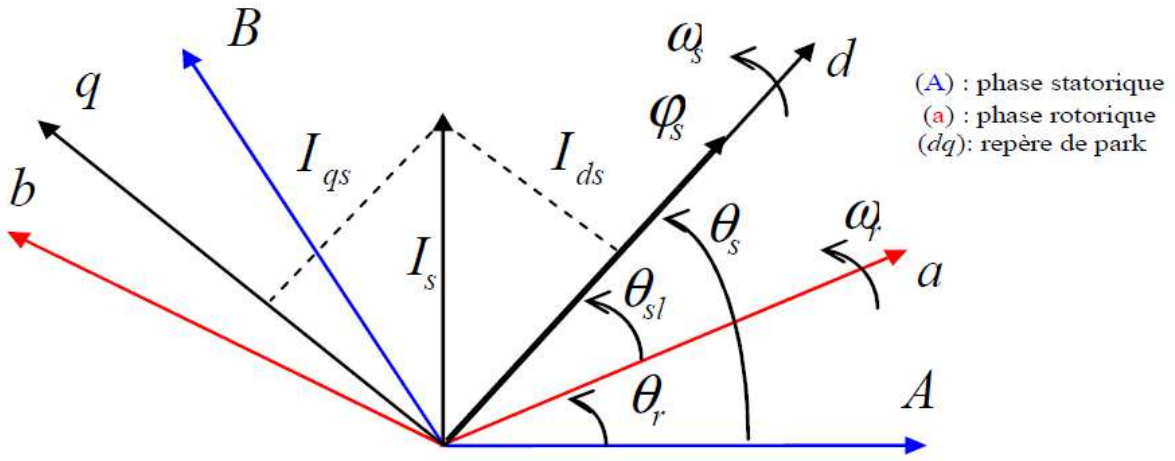


Fig. IV.2 Orientation de l'axe d sur le flux statoriqe.

L'utilisation de la transformation de Park par le changement des repères, sous certaines hypothèses, nous permet de simplifier le système d'équations différentielles de la machine [TEL 12]. Le système d'équations différentielles de la machine dans ce repère de Park est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \qquad (IV.1)$$

Dans ce cas de commande ou le type d'orientation de flux est statoriques, on a comme condition :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \ , \Phi_{qs} = 0 \ .$$

Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \qquad (IV.2)$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\Phi_{dr} \end{cases} \qquad (IV.3)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \qquad (IV.4)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = P \frac{V_s}{\omega_s} i_{qs} \qquad (IV.5)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique.

P : Le nombre de paires de pôles.

IV.3.1 Expression des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactives statoriques s'écrivent [ALL 14] :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (IV.6)$$

On peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = \dfrac{v_{ds}}{\omega_s L_s} - \dfrac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\dfrac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (IV.7)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation des puissances les courants par l'équation $(IV.7)$.

$$\begin{cases} P_s = -\dfrac{v_{qs} M}{L_s} . i_{qr} \\ Q_s = v_{ds} \dfrac{\Phi_s}{L_s} - \dfrac{v_{ds} M}{L_s} . i_{dr} \end{cases} \quad (IV.8)$$

Nous obtenons pour le flux statoriques, l'expression suivante :

$$\Phi_s = \frac{v_s}{\omega_s} \quad (IV.9)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -\dfrac{v_{qs} M}{L_s} . i_{qr} \\ Q_s = \dfrac{v_{ds}^2}{\omega_s L_s} - \dfrac{v_{ds} M}{L_s} . i_{dr} \end{cases} \quad (IV.10)$$

IV.3.2 Expression des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (IV.10). Les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_s - \dfrac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + \dfrac{M v_s}{L_s \omega_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_s - \dfrac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \end{cases} \qquad (IV.11)$$

Pour le contrôle de la génératrice, le système suivant montre la relation entre les courants et les tensions rotoriques.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)\dfrac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)\dfrac{di_{qr}}{dt} - g\omega_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} + g\dfrac{MV_s}{L_s} \end{cases} \qquad (IV.12)$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système éclectique à réguler donné par la figure (IV.3).

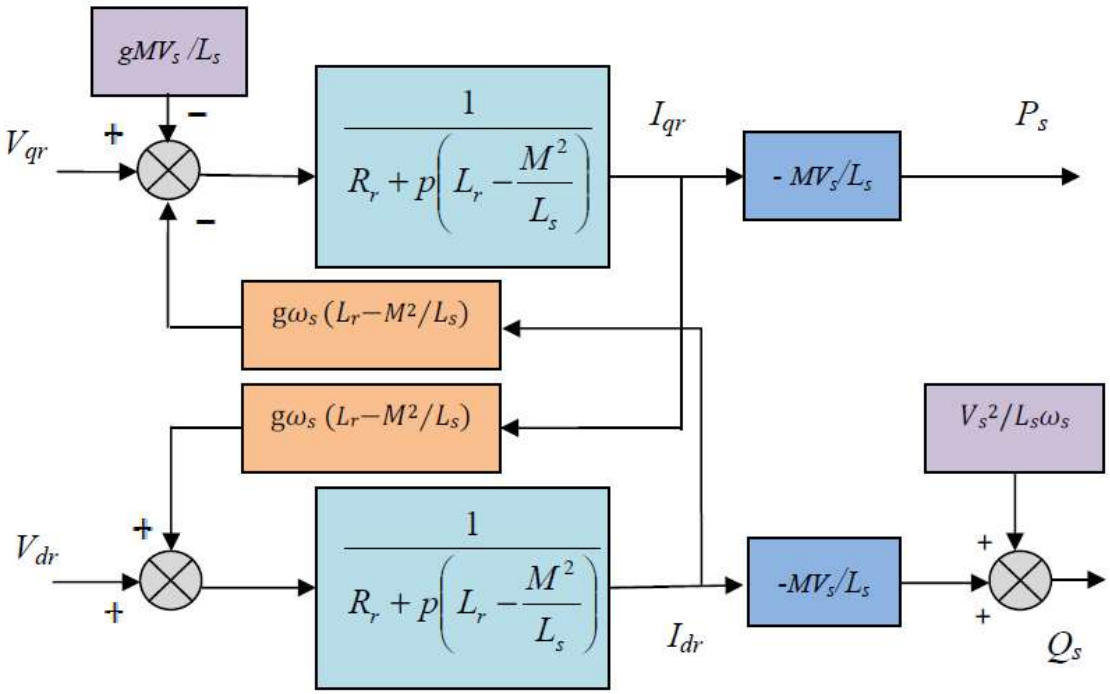


Fig. IV.3 Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q, pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [ALL 14].

Ainsi, il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la Méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateur de puissance contrôlent les tensions rotoriques de la machine (figure IV.4).

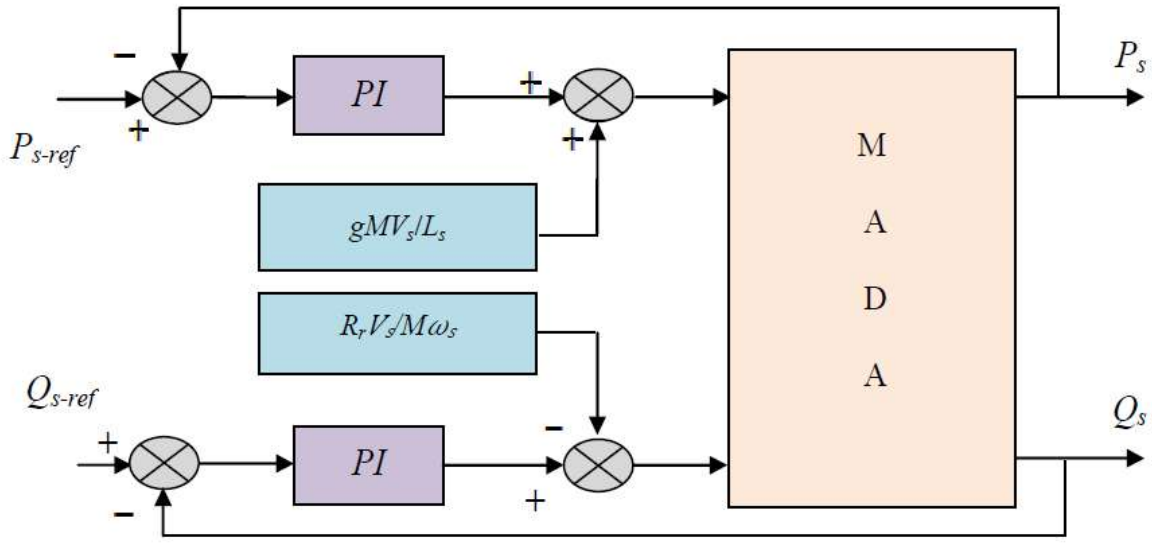


Fig. IV.4 Schéma bloc de la commande directe.

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelé indirecte découle directement des équations $(IV.10)$ et $(IV.12)$ .figure(IV.5).

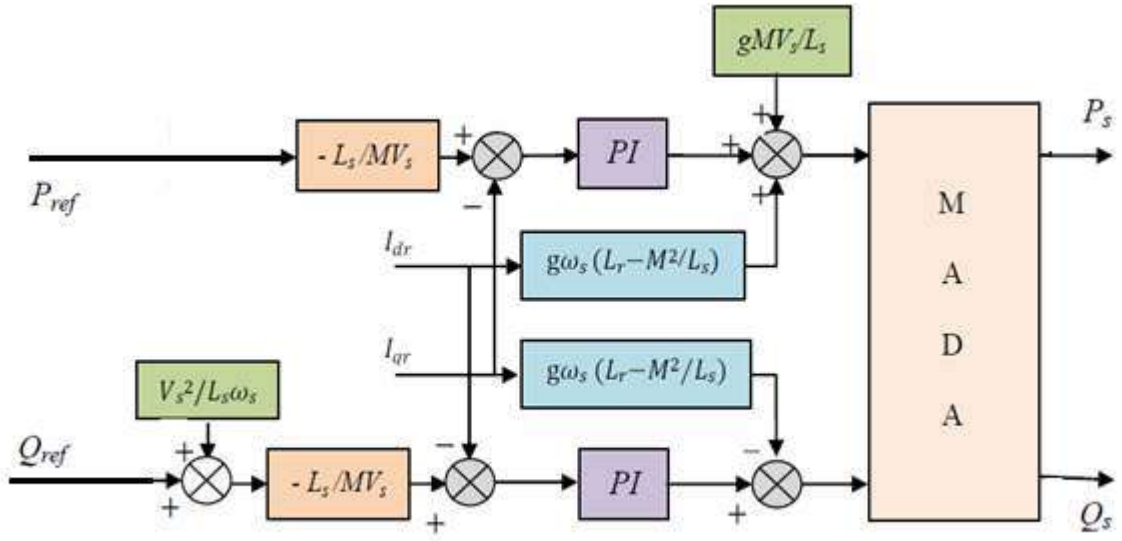


Fig. IV.5 Schéma bloc de la commande indirecte.

IV.3.3 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur proportionnel Intégrale PI, utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [DJE 09]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système.

IV.3.3.1 Dimensionnement du correcteur

Le schéma bloc de la régulation du courant i_{dr} en boucle fermée est représenté par la figure(IV.6). Celui du courant rotorique i_{qr} est le même [KER 12].

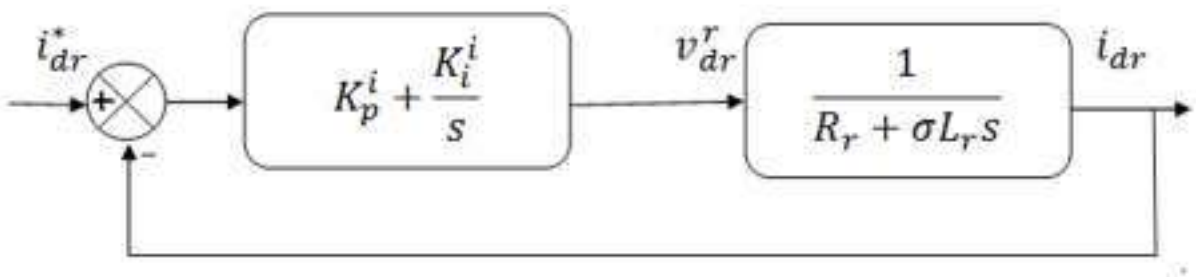


Fig. IV.6 Schéma bloc de régulation du courant i_{dr} .

Sachant que la fonction de transfert du courant rotorique par rapport à la tension est

$\frac{1}{R_r + \sigma L_r s}$ Donc la fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \left(K_p^i + \frac{K_i^i}{s} \right) \frac{1}{R_r + \sigma L_r s} \tag{IV.13}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$FTBF = \frac{i_{dr}}{i_{qr}} = \frac{\frac{1}{R_r + \sigma L_r s}\left(K_p^i + \frac{K_i^i}{s} \right)}{1 + \frac{1}{R_r + \sigma L_r s}\left(K_p^i + \frac{K_i^i}{s} \right)} \tag{IV.14}$$

Après simplification :

$$FTBF = \frac{i_{dr}}{i_{qr}} = \frac{\frac{1}{R_r + \sigma L_r s}\left(K_p^i + \frac{K_i^i}{s} \right)}{1 + \frac{1}{R_r + \sigma L_r s}\left(K_p^i + \frac{K_i^i}{s} \right)} \tag{IV.15}$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe de placement des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles complexes à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimale, les pôles sont choisis complexes conjuguées à partie réelle égale à la partie imaginaire (figure. IV.7) [KER 12].

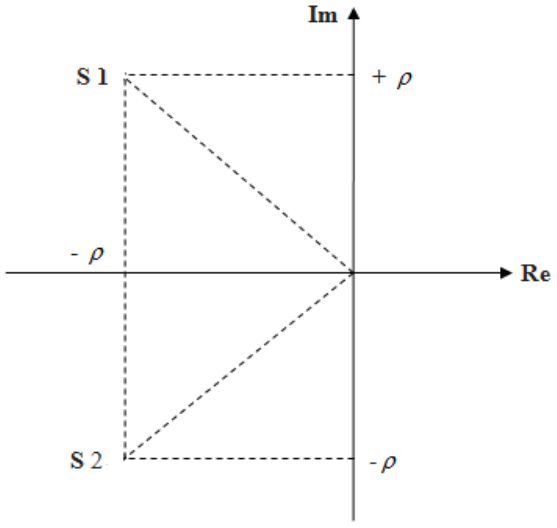


Fig. IV.7 Position des pôles dans le plan de phase.

En imposant les pôles $i_{1,2} = -\rho \pm j\,\rho (j^2 = -1)$, le polynôme caractéristique s'écrit comme suit :

$$s^2 + 2\rho s - 2\rho^2 \qquad \text{(IV.16)}$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_p^i = 2\rho\sigma L_r - R_r \\ K_i^i = 2\rho^2 \sigma L_r \end{cases} \qquad \text{(IV.17)}$$

IV.3.3.2 Résultats de simulations

Les simulations présentées dans ce travail sont effectuées sur une machine asynchrone à double alimentation dont les paramètres. Sont identifies dans le chapitre III. Les paramètres des régulateurs PI utilisés au schéma de principe (Figure IV.7) sont résumés au tableau suivant :

Boucle de régulation	Pôle 1	Pôle 1	$K^i{}_p$	$K^i{}_i$
Courants$(i_{dr}\ et\ i_{qr})$	$s_1 = -800 - j800$	$s_2 = -800 - j800$	4.29	3712.78

Tableau IV.1 : Paramètres des régulateurs PI des courants rotoriques.

Les simulations présentées sur les figures (III.8) et (III.9) montrent le comportement de la machine asynchrone à double alimentation, lors de variation des références des deux puissances active et réactive.

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées des régulateurs un échelon de puissance active et un échelon de puissance réactive.

- Pour la puissance active :
  - De t=0s à t=0.2s : un échelon négatif de -2000 W,
  - De t=0.2s à t=0.5s : un échelon négatif de -500 W,
  - De t=0.5s à t=0.7s : un échelon négatif de -2000 W.
- Pour la puissance réactive :
  - De t=0s à t=0.3s : un échelon négatif de -500VAR,
  - De t=0.3s à t=0.4s : un échelon négatif de 500VAR,

- De t=0.4s à t=0.6s : un échelon négatif de -500VAR,
- De t=0.6s à t=1s : un échelon positif de 500VAR.

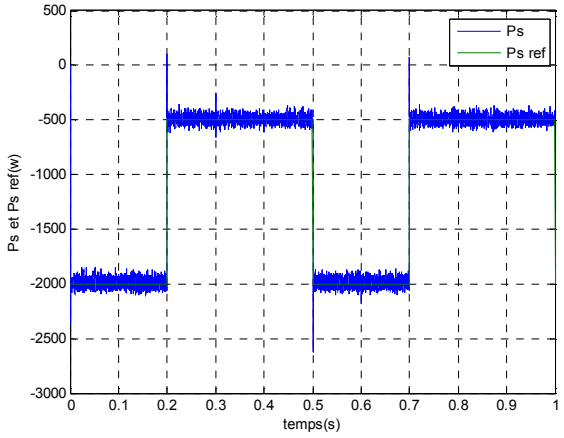


Fig. IV.8 Puissances active statoriques

En commande indirecte.

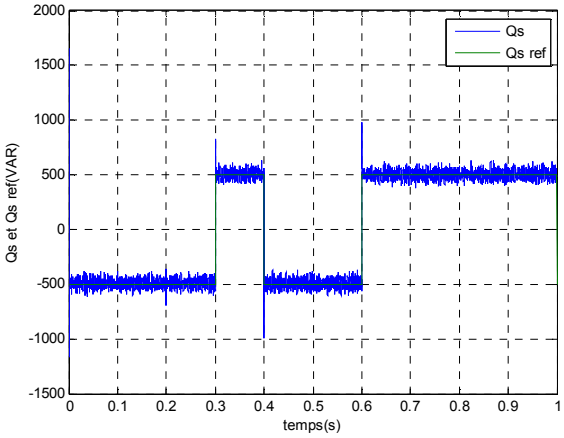


Fig. IV.9 Puissances réactive statoriques

En commande indirecte.

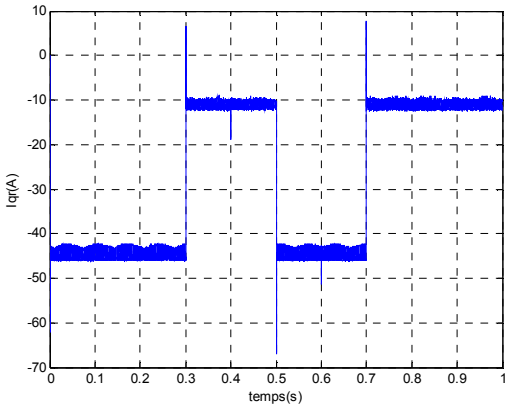


Fig. IV.10 Le courant rotorique Iqr

En commande indirecte.

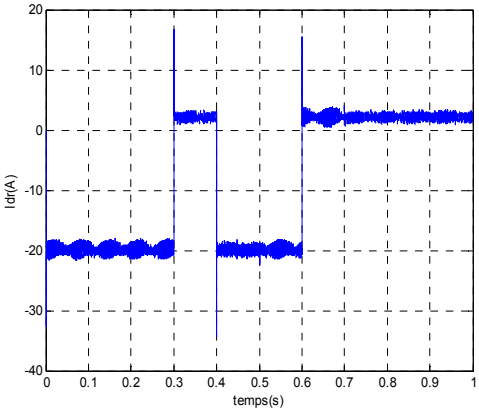


Fig. IV.11 Le courant rotorique Idr

En commande indirecte.

Nous remarquons que :

- La machine de la MADA est parfaitement découplée.
- Les puissances suivent parfaitement leurs références.
- Les courants I_{dr} et I_{qr} sont respectivement les images des puissances active et réactive.

.

IV.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande vectorielle indirecte en puissance active et réactive statoriqe de la machine asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statoriqe selon l'axe d. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statoriqe permet de découpler les puissances. Les résultats de simulation montrent que la MADA est parfaitement découplé. En effet, la puissance active est contrôlée par le courant I_{dr} et la puissance réactive est contrôle par le courant I_{qr}. Ceci ne permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif général de ce mémoire et l'identification par les algorithmes génétiques et la commande des puissances actives et réactives de la MADA.

Au début, nous avons évoqué la modélisation de la MADA en utilisant les flux statoriques et rotoriques comme variables d'état. La variation du vecteur tension rotorique modifie énormément les caractéristiques des puissances actives et réactive échangées avec le réseau. Ceci représente une bonne variable d'entrée pour la commande de ces deux puissances.

Ensuite, nous avons développé un programme pour la détermination du vecteur paramètres de la MADA basé sur les algorithmes génétiques. Ensuite on a réalisé un banc d'essai pour la mise en œuvre de cette technique. Les résultats de simulations et pratique ont montré l'efficacité de la méthode proposée.

Dans le but de découpler et linéarité le comportement de la machine, nous avons utilisé la technique d'orientation du flux statoriqe selon l'axe directe du repère de Park.
Une méthode indirecte est utilisée pour contrôler l'échange de puissances active et réactive de la MADA, dont les paramètres ont été déterminés au chapitre trois.

Comme perspectives nous pouvons citer :

- Réalisation pratique des lois de commande utilisées pour le réglage des puissances.
- Application des commandes intelligentes pour le contrôle des puissances

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

[ALL 14] Allam.M, Dehiba.B,"Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne", Journal of Advanced Research in Science and Technology 2014.

[ALL 94] Alliot. J.M, Schiex.T, "Intelligence artificielle et informatique Théorique", ce padués-édition, Toulouse, pp.441-460. 1994.

[AZZ 13] Azzedine. A, Nouar.T" Commande des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation, en utilisant la Logique Floue type 2", mémoire de master d'université de MEDEA 2013.

[BEN 08] Bencherif.Y, "Modélisation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", mémoire d'ingénieur d'état en génie électrique, école national polytechnique 2008.

[BEN 10] Benalia.L,"Commande en tension Des Moteur à induction double alimentes", thèse de doctorat université de Batna 2010.

[BEN 15] Bensalah.A, Hamioud.A, "Etude de la reconfiguration des réseaux électrique de distribution", école national polytechnique 2015.

[BOU 04] Bounekhla.M,"contribution à l'identification paramétrique de la machine asynchrone", thèse de doctorat d'état ès-science école national polytechnique 2004.

[CAL 87] Calamia.P.H, More, "Projected gradient method for linearly constrained problems mathematical programming", vol.39, pp, 93 -116, 1987.

[DEJ 75] De jong.K.A, "Analysis of the behavior of a class of genetic adaptativ system", PHD thesis, university of Michigan Desseration Abstract 1975.

[DJE 09] Djeriri.Y," Commande vectorielle d'une MADA intégré à un système éolienne", mémoire de Magister université de sidi bel-Abbas 2009.

[DJE 15] Djerrai.F, Saidani.A" Identification de la machine asynchrone", thèse de master université de Médéa 2015.

[KER 12] Kerboua.A "Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique", université de sidi bel-Abbas 2012.

[MAN 11] Mansar.Z "Identification paramétrique de la machine asynchrone à double alimentation ", these de magister, école national polytechnique 2011.

[MER 07] Merrahi.F,"Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application à l'énergie éolienne", mémoire de magister, ENP, Alger, 2007.

[OME 03] Omessaad.H,"contribution au développement de méthode d'optimisation stochastique", thèse de doctorat l'université de Lille 2003.

[OUK 12] Oukasine.S,"identification des systèmes non linéaire", thèse de magister l'université de Tizi Ouzou 2012.

[PAT 03] Patin.N,"Modélisation de la machine asynchrone", Cours de L'ENS de Cachan, non édité France 2003.

[POV 75] Povy L, "Identification des processus", Dound université, OTTS et –Aubin 1975.

[SAR 00] Sarry.S,"Etude et simulation d'une commande directe de couple pour l'entrainement électrique d'une machine asynchrone ", thèse de maitrise en génie de la production automatisé doctorat Montréal 2000.

[TAO 10] Rabah.T,"Prévision de comportement mécanique d'alliages biphasés par algorithme génétique et réseaux de neurones", thèse de master 2010.

[TEL 12] Telli.A, "étude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégré aux réseaux mt", mémoire de magister université des sciences et de la technologie d'Oran 2012.

[TIR 10] Tir.Z,"contribution à l'étude d'un Aérogénérateur asynchrone en cascade", mémoire de magister en électrotechnique, université de Sétif 2010.