REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté du Science et de La Technologie



Département du Génie Electrique

Projet de fin d'études de Master

Pour L'obtention D'un Diplôme Master En Génie Electrique

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commandes Electriques

Thème

L'utilisation des régulateurs floues pour la commande des puissances d'une MADA

Présenté par :

– RAHMANI Abdennour.

–OUALI Youcef.

Proposé et Dirigé par :

– Mr. KABECHE Nadir.

– Mr. HALLOUZ Mohamed.

Année universitaire 2021

Remerciements

En tout premier lieu, on remercie le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donner la force et l'audace pour dépasser les difficultés.

Je souhaite rendre hommage à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

On tient, avant tout à adresser nos plus vifs remerciements à nos promoteurs Mr. NADIR KABECHE et Mr. HALLOUZ MOHAMED de l'université Yahia farés de Médéa pour l'encadrement sérieux dont ils ont fait preuve ainsi qu'à mes enseignants du département génie électrique de l'université de Médéa à qui nous devons notre formation.

Enfin, on adresse nos remerciements aux membres du jury pour nous avoir honoré en acceptant d'évaluer ce travail.

Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à nos très chers partants, qui ont sacrifié leur vie pour notre réussite et

Nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

Nous dédions aussi ce travail à nos frères, sœurs.

Nos grands-parents.

Les familles Ouali et Rahmani.

Nos cousins et cousines.

Tous nos adorables amis.

ملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة التحكم في الماكنة اللاتزامنية مضاعفة التغذية بواسطة تقنيتين الكلاسيكية وتقنية الذكاء الاصطناعي بعدما قمنا بنمذجة الماكنة اللاتزامنية بإيجاد الصيغ الرياضية لدوار الماكنة وذألك لتسهيل تطبيق التحكم الشعاعي الذي يرتكز على ضابط تناسبي وتكاملي بمبدأ كلاسيكي. وبعدا استعمال هذا الأخير لا حضنا عدم كفائتة في المجال الديناميكي المؤقت.ولذالك لجأنا الى استخدام طريقة أخرى تعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي (المنطق الغامض).هذه التقنية جعلت تحسينات كبيرة ومعتبرة في التحكم في هذه الماكنة وقد عرضنا النتائج المفصلة لكل تقنية.

.كلمات مفتاحية: ماكينة لا تزامنية مضاعفة التغذية، المنطق الغامض، التحكم الشعاعي.

Résume :

Ce mémoire présente la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par deux Techniques, classique et de l'Intelligence Artificielles. Après avoir présenté l'état de l'art des ensembles MADA et l'énergie éolienne, nous avons abordé la commande vectorielle de la MADA par orientation du flux statorique. Nous nous sommes intéressés au régulateur PI pour la commande des puissances active et réactive statorique et à l'impact de son remplacement par un régulateur basé sur la techniques d'intelligence artificielle tels que le régulateur flou, le quel surpasse les limites des techniques classiques et possède des caractéristiques essentielles pour l'amélioration des performances dynamiques de la commande proposée après un test de robustes. Les résultants de simulations ont été obtenus par l'interface du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation, régulateur PI classique, logique floue, commande vectorielle, contrôle des puissances.

Abstract :

This thésis presents the control of the double fed induction machine by two Techniques, classical and Artificial Intelligence. After presenting the state of the art of DFIM and Wind Energy, we have discussed the field oriented control of the DFIM by stator flux orientation. We focused on the PI controller for stator active and reactive power control, and the impact of its replacement by other controller based on artificial intelligence technique such as fuzzy logic controller, which surpass the limitations of classical technique and possess essential features for improving the dynamic performance of the proposed control after a robustness test. The simulation results have been obtained by the Matlab/Simulink interface.

Keywords : double -feed induction machine, classical PI, fuzzy logic, field oriented control, power control.

Table des matières

Introduction Général 1
Chapitre I : État de l'art et généralités sur les systèmes éoliens 3
I.1 Introduction : 3
I.2 Premiers pas dans l'utilisation de l'énergie éolienne : 3
I.3 Conversion vent vers électricité : 5
I.4 Structures des éoliennes : 6
I. 4. 1 Eoliennes à axe vertical : 6
I. 4. 2 Eolienne à axe horizontal : 7
I.5 Développement de la production d'énergie éolienne : 7
I.6 Constitution de base d'un système éolien : 9
I.7 Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) 10
I. 7. 1 Structure de la MADA 11
I. 7. 2 Principe de fonctionnement de la MADA 12
I. 7. 3 Avantage des éoliennes à base de la MADA 13
I.8 Conclusion 13
Chapitre II Modélisation et commande de la machine asynchrone double alimentation (MADA) 14
II.1 Introduction 14
II.2 Modélisation et simulation de la MADA 14
II. 2. 1 Modèle de la MADA dans le repère naturel triphasé 14
II. 2. 2 Modélisation de la MADA dans le repère biphasé 17
II. 2. 3 Simulation du modèle de la MADA 21
II.3 La commande vectorielle de la MADA 28
II. 3. 1 Principe général de la commande vectorielle 28
II. 3. 2 Modélisation de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique 29
II. 3. 3 Principe de Commande indépendant des puissances active et réactive 31
II. 3. 4 Résultats de simulation 33
II.4 Modélisation du convertisseur cote rotor (onduleur de tension à deux niveaux) 35
II.5 Conclusion 37
Chapitre III Commande par Logique Floue de la MADA 38
III.1 Introduction 38
III.2 Historique de la logique floue 38
III.3 Principe et fonctionnement d'un système flou 39

III.4 Structure de base d'un régulateur flou : 39
III. 4. 1 Base de connaissances 40
III. 4. 2 Fuzzification 40
III. 4. 3 Règles d'inférence floue 41
III. 4. 4 Défuzzification 42
III.5 Développement du régulateur flou 42
III. 5. 1 Description du régulateur 42
III. 5. 2 Loi de commande. 44
III. 5. 3 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue 44
III.6 Réglage des courants rotoriques de la MADA 45
III.7 Résultats de simulation et interprétation : 46
III.8 Tests de robustesse et interprétation 48
III.9 Conclusion 51
Conclusion générale 52
Bibliographie 54

Table des figures

Figure I-1Moulin à vent hollandais au toit de chaume. 4
Figure I-2.Les moulins à vent avec des machines en bois. 4
Figure I-3.Moulin à vent de ferme avec des machines en métal. 5
Figure I-4.Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus). 6
Figure I-5.Eoliennes à rotor de Savonius. 7
Figure I-6.Puissance installée cumulée de l'énergie éolienne de 1996à2012. 8
Figure I-7.Répartition de la part mondiale du marché des éoliennes en 2011. 8
Figure I-8.Evolution de la taille des éoliennes et de l'impact au cours des 30 dernières années. 9
Figure I-9.Eléments constituant une éolienne. 10
Figure I-10. Chaine de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une MADA. 11
Figure I-11.Structure de la MADA. 11
Figure I-12. Les modes de fonctionnement de la MADA. 12
Figure II-1. Représentation spatiale des enroulements de la MADA. 15
Figure II-2. Circuit électrique équivalent d'une phase. 16
Figure II-3. Le passage du triphasé au biphasé. 18
Figure II-4. Puissance active statorique. 22
Figure II-5. Puissance réactive statorique. 22
Figure II-6. Puissance active rotorique. 22
Figure II-7. Puissance réactive rotorique. 23
Figure II-8. Couple électromagnétique. 23
Figure II-9. Les flux statoriques axe d, q. 23
Figure II-10. Le flux rotorique axe d, q. 24
Figure II-11. Le courant statorique axe abc. 24
Figure II-12. Le courant rotorique axe abc. 24
Figure II-13. La vitesse rotorique. 25
Figure II-14. Les puissances active et réactive statorique. 25
Figure II-15. Les puissances active et réactive du rotor. 25
Figure II-16. Le couple électromagnétique. 26
Figure II-17.Les flux statoriques axe d, q. 26
Figure II-18. Les flux rotoriques axe d, q. 26
Figure II-19. Le courant statorique axe abc. 27
Figure II-20. Le courant rotorique axe abc. 27
Figure II-21. La vitesse rotorique. 27
Figure II-22. Orientation du repère de Park. 28
Figure II-23. L'équivalence entre la machine à courant continu et la machine asynchrone. 29
Figure II-24. Schéma bloc de la commande indirecte. 32
Figure II-25. Les puissances active et réactive (Ps et Qs). 33
Figure II-26. Les courants rotorique (Irq et Ird). 34
Figure II-27. Les courants rotoriques abc. 34
Figure II-28. Couple électromagnétique. 34
Figure II-29. Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux. 35
Figure II-30. Principe de la MLI. 37
Figure II-31. Tensions de l'onduleur CCM. 37
Figure III-1. Fonctions d'appartenance. 39

Table des figures

Figure III-2. a). Schéma synoptique d'un régulateur flou. b). Configuration d'un régulateur flou. 40
Figure III-3. Exemple de Fuzzification. 41
Figure III-4. Schéma bloc d'un régulateur flou. 43
Figure III-5. Fonctions d'appartenance utilisées par le régulateur. 44
Fig. III-6. Schéma bloc commande indirecte sans boucle de puissance avec des régulateurs flous. 45
Figure III-7. Les puissances active et réactive (Ps,Qs) 46
Figure III-8. Les courants rotorique (Irq et Ird). 47
Figure III-9. Les courant rotoriques (abc). 47
Figure III-10. Couple électromagnétique. 47
Figure III-11. Résultats de puissance (Ps,Qs) du test de robustes obtenue par le régulateur PI. 48
Figure III-12. Résultats de courant (Irq,Ird) du test de robustes obtenue par le régulateur PI. 49
Figure III-13. Résultats de puissance (Ps,Qs) du test de robustes obtenue par le régulateur flou. 50
Figure III-14. Résultats de courant (Irq,Ird) du test de robustes obtenue par le régulateur flou. 50

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

C_{em}	Couple électromagnétique
f	Coefficient des frottements
ω_s, ω_{mec}	Respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine
Fsn	Fréquence statorique en Hz
p	Nombre de pair pole
gn	Glissement nominale
Frn	Fréquence rotorique en Hz
Pn	Puissance nominale en [W]
Sigm	Coefficient de dispersion 'blondel
Ir, Is	Courant rotorique et statorique
g	Glissement
$V_{abc\ s}$, $V_{abc\ r}$	Tension des trois phases statorique et rotorique
$\phi_{abc\ s}$, $\phi_{abc\ r}$,	Flux des trois phases statoriques et rotoriques
ls , lr	Inductance propre statorique, rotorique
M_{sr}	Inductance mutuelle stator- rotor
Ls, Lr	Inductance cyclique statorique et rotorique
M	Mutuelle cyclique entre rotor-stator
s, r	Indice du stator, du rotor
d, q	Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature
θs, θr	Angle électrique statorique, rotorique
Ps	Puissance active statorique
Qs	Puissance réactive statorique
Si (1,0)	Etat des interrupteurs (ferme, ouvert)
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tension composée a la sortie du convertisseur
Va, V b, Vc	Tension simple a la sortie du convertisseur
V_{dc}	Tension du bus continu
α	Angle entre le vecteur de référence et la tension simple l'onduleur
T_K	Temps d'application du vecteur actif K
K	Secteurs
δ	Angle entre le flux statorique et rotorique
Ps	Puissance active statorique
Qs	Puissance réactive statorique
P_{ref}	Puissance active de référence
Q_{ref}	Puissance réactive de référence

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation Largeur d'Impulsion
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation (MLI Vectorielle)

Introduction Général

Au cours des dernières années, on a assisté à une forte pénétration des ressources énergétiques renouvelables dans le réseau d'alimentation électrique. La production d'énergie éolienne a joué et continuera de jouer un rôle très important dans ce domaine au cours des prochaines années.

Les éoliennes à base de machines à induction à double alimentation (MADA) se sont incontestablement imposées comme l'une des technologies de pointe pour les fabricants d'éoliennes, démontrant qu'il s'agit d'une solution rentable et fiable. Cette machine, élément clé de l'éolienne, est également connue dans la littérature comme la machine à induction à rotor bobiné. Elle présente de nombreuses similitudes avec la très utilisée et populaire machine à induction à cage d'écureuil. Cependant, malgré le parallélisme des deux machines, la MADA nécessite sa propre étude spécifique pour une compréhension adéquate.

Par ailleurs la MADA, grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement, elle présente de bonnes performances soit en fonctionnement survitesse, soit en fonctionnement à basse vitesse.

En dépit de ces avantages, le comportement dynamique de la MADA est fortement non linéaire et couplé. A cet effet, la réalisation d'un schéma de commande pour cette machine nécessite de combiner différent théories de commande linéaires et non linéaires. Comme pour le cas d'une machine à induction standard, la première démarche dans l'établissement de la commande consiste à utiliser le principe de l'orientation du flux pour assurer un découplage entre les grandeurs commandée qui sont les puissances active et réactive du côté stator.

Différent techniques linéaires et non linéaires ont été proposés pour commander le comportement dynamique de la MADA. Pour les commandes linéaires utilisant des régulateurs PI standard, on trouve la commande vectorielle et la commande directe de puissance. Pour les commande non linéaires, on trouve la commande par linéarisation entrées/sorties, la commande par mode glissant, la commande par Backstepping. Malgré les performances apportées par ces techniques, ces dernières souffrent de quelques inconvénients tels que la nécessité d'un modèle très précis et la sensibilité aux variations paramétriques du système.

Par conséquent et, afin de surmonter les inconvénients des commandes précédentes, le présent travail propose d'utiliser l'une des techniques de l'intelligence artificiel qui est la logique floue pour améliorer les performances dynamiques de la MADA. Les régulateurs flous sont connus par leur puissance, leur

robustesse et ne nécessitant pas des modèles précis mais seulement quelques connaissances sur le système commandé.

Le travail est structuré comme suivant :

Le premier chapitre est consacré aux concepts de base pour comprendre un système de production d'énergie éolienne, sa structure ainsi que les différents types des machines asynchrones à double alimentation et leurs avantages.

Le second chapitre est composé de trois parties. Dans la première partie, on poursuit la description du modèle du MADA, Les comportements dynamiques et transitoires du MADA doivent être examinés à des fins de modélisation et pour le développement de la commande ultérieure de la machine. la deuxième partie sera consacré à la commande vectorielle des puissances active et réactive du stator à travers des régulateurs PI. Dans la dernière partie, nous présenterons la modélisation des convertisseurs électronique du côté rotor.

Dans le chapitre trois, nous introduisons un régulateur basé sur la logique floue pour contrôler les puissances active et réactive du stator. Ces régulateurs remplacent les régulateurs PI.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus, avec un test de robustesse de chaque régulateur.

Chapitre I : État de l’art et généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction :

Ces dernières années, l'énergie éolienne a connu une croissance rapide car elle joue un rôle important dans la production d’énergie électrique, l'utilisation du vent est discutée donc, elle devient de plus en plus populaire avec le temps.

La capacité mondiale d'énergie éolienne s’est développée et est devenue la technologie d'énergie renouvelable qui a la croissance la plus rapide.

Le concept des turbines éoliennes a été développé et différents générateurs éoliens ont été utilisés dans la recherche et le marketing, afin d'utiliser efficacement l'énergie éolienne.

Le choix du type d'aérogénérateurs est cependant difficile. En effet, le choix du générateur électrique pour l'énergie éolienne dépend principalement de plusieurs critères : structure, topologie du convertisseur, environnement (lieu d'installation de l'éolienne), performances et coût. Par conséquent, la sélection du générateur électrique le plus approprié pour une éolienne est une tâche difficile [1].

I.2 Premiers pas dans l’utilisation de l'énergie éolienne :

L'utilisation du vent comme source d'énergie remonte à l'Antiquité. Le vent était une source d'énergie importante pour le transport (voiliers), la mouture du grain des applications industrielles et le pompage de l'eau. Les moulins à vent, ainsi que les moulins à eau (Figure I-1),étaient courants en Europe et représentent les plus importantes sources d'énergie avant l'invention du moteur à vapeur [2]. Les machines destinées à pomper de grands volumes d'eau à partir d'une faible hauteur de chute pouvaient atteindre 25 m de diamètre et étaient presque entièrement en bois. Même la pompe hélicoïdale, une vis d'Archimède, était en bois. La vitesse de rotation et la puissance étaient régulées par la quantité de voile qui se trouvait sur les pales.

Les moulins à vent agricoles ont été l'un des principaux facteurs de la colonisation des Grandes Plaines des États-Unis (Figure I-2). A partir de 1850, les moulins à vent de pompage d'eau ont été fabriqués par dizaines de milliers. En 1900, presque tous les moulins à vent étaient en métal, toujours avec des pales multiples, et le ventilateur ou les pales avaient un diamètre de 3 à 5 mètres (Figure I-3).

Bien que les moulins à vent agricoles aient atteint leur apogée ans les années 1930 et 1940, lorsque plus de 6 millions d'entre eux étaient en service, ces moulins à vent sont toujours utilisés pour pomper l'eau pour le bétail et les résidences.



Figure I-1Moulin à vent hollandais au toit de chaume.



Figure I-2. Les moulins à vent avec des machines en bois.

Comme les éoliennes de ferme sont assez coûteuses, on a assisté à une recrudescence des modifications de conception pour créer un système moins coûteux. Un autre changement majeur, est le développement et la commercialisation de systèmes autonomes,

Systèmes électriques-électriques pour pomper suffisamment d'eau pour les villages ou l'irrigation, ou les deux [2].



Figure I-3. Moulin à vent de ferme avec des machines en métal.

I.3 Conversion vent vers électricité :

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations

Les mêmes éléments de bases, à savoir :

- Une hélice qui transforme le l’énergie cinétique du vent en énergie mécanique ;
- Une transmission mécanique ;
- Un générateur électromécanique ;
- Un système de liaison électrique ;
- Un régulateur.

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développés. On distingue deux grandes familles d'éoliennes :

- Les éoliennes autonomes.
- Les éoliennes raccordées au réseau.

La conception mécanique peut aussi aboutir à des éoliennes totalement différentes :

- Eolienne à axe (rotor) vertical ;
- Eolienne à axe (rotor) horizontal ;

Il y a donc une éolienne adaptée à chaque utilisation avec un certain niveau de technologie qui peut en dépendre. L'architecture générale des aérogénérateurs peut également dépendre de nombreux facteurs comme le site d'implantation, l'impact sur le paysage, la technologie employée [4].

I.4 Structures des éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [5].

I. 4. 1 Eoliennes à axe vertical :

L'éoliennes à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les éoliennes conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (éoliennes à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924).

Pour l'éolienne à rotor de Darrieus, elle est basée sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Figure I-4). La force résultante génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

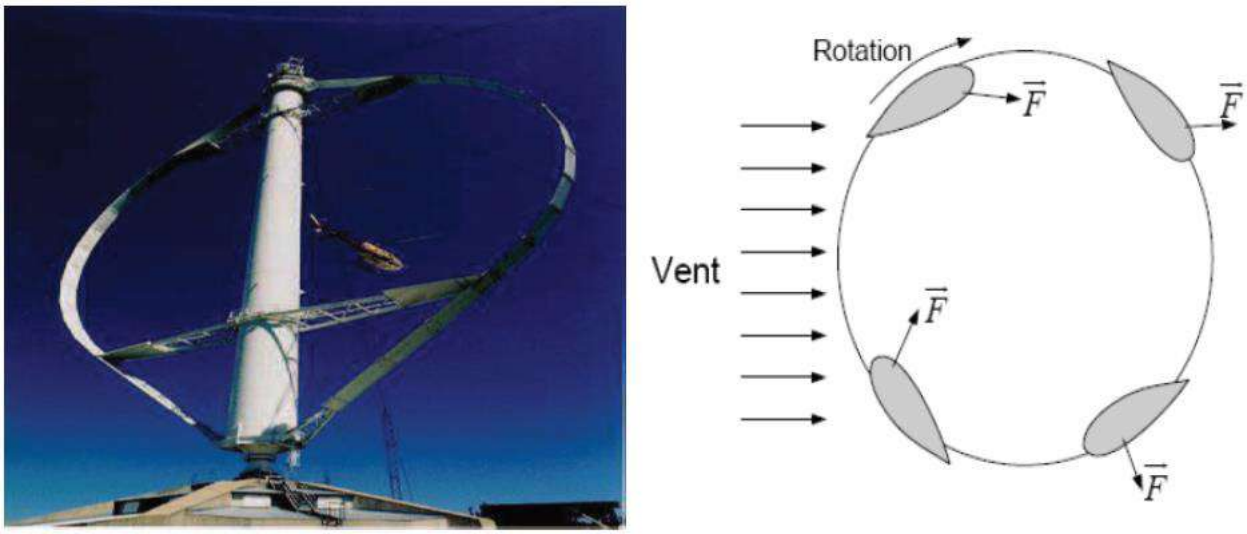


Figure I-4. Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus).

Pour l'éolienne à rotor de Savonius, elle est basée sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure I-5).

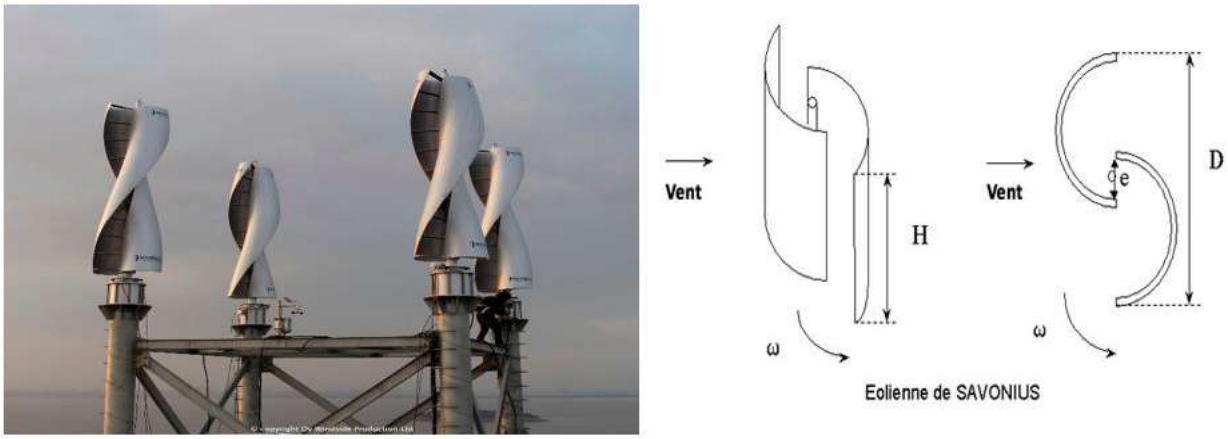


Figure I-5. Eoliennes à rotor de Savonius.

I. 4. 2 Eolienne à axe horizontal :

Jusqu'à présent, l'éolienne à axe horizontal est la plus couramment utilisée. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi pales. Les éoliennes à axe horizontal sont des hélices perpendiculaires au vent et montées sur le mât. La hauteur d'une petite éolienne est généralement de 20 m, et la longueur d'un grand modèle est plus de deux fois la longueur de la pale, plus de détaille et donné le reste de ce chapitre.

I.5 Développement de la production d'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a connu une croissance rapide pour atteindre un niveau cumulé de 282 GW dans le monde, dont plus de 45 GW installés en 2012 seulement [3].

Le marché annuel de la capacité électrique en 2011 était d'environ 208 GW, ce chiffre indique que l'énergie éolienne est réellement un acteur important dans le système moderne d'approvisionnement en énergie électrique. La pénétration mondiale de l'énergie éolienne était de 2,5 % en 2010 et la prévision pour 2019 est de plus de 8 % ou 1TW [3].

La Chine est devenue le marché le plus important en 2011 avec plus de 17,6 GW d'énergie éolienne installée, avec l'ensemble de l'Union européenne (UE) (9,6 GW) et les États-Unis (6,8 GW), se partageant environ 85 % du marché mondial en 2011.

La capacité cumulée de production d'énergie éolienne de 1996 à 2012 est présentée dans la (Figure I-6).

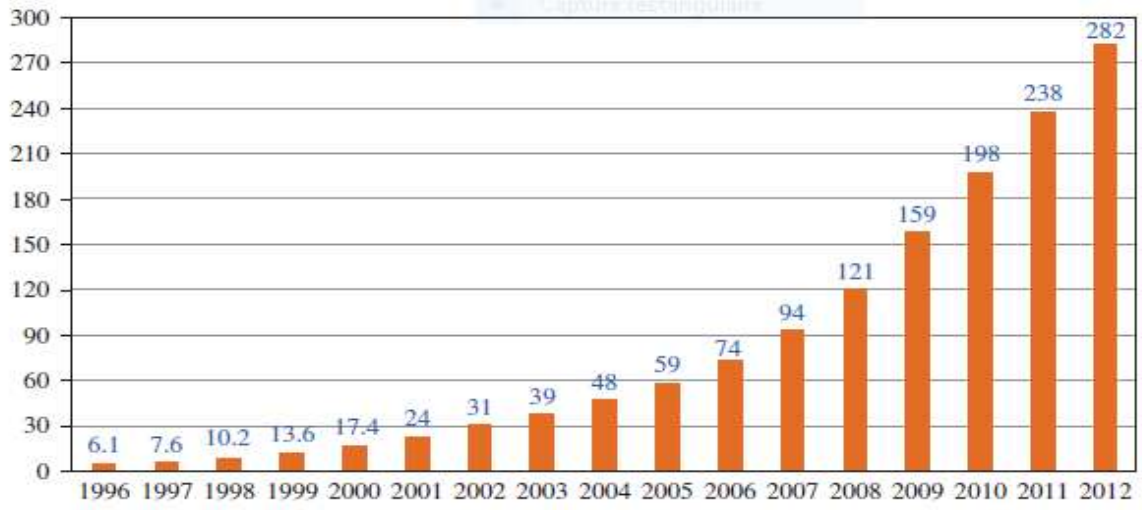


Figure I-6. Puissance installée cumulée de l'énergie éolienne de 1996à2012.

En ce qui concerne les marchés et les fabricants, en 2011, l'entreprise danoise Vestas était toujours en tête du classement des plus grands fabricants d'éoliennes au monde, suivie de près par GE et Goldwind, tous deux se partageant la deuxième position sur le marché. La (Figure I-7) résume les principaux fournisseurs mondiaux d'éoliennes [3].

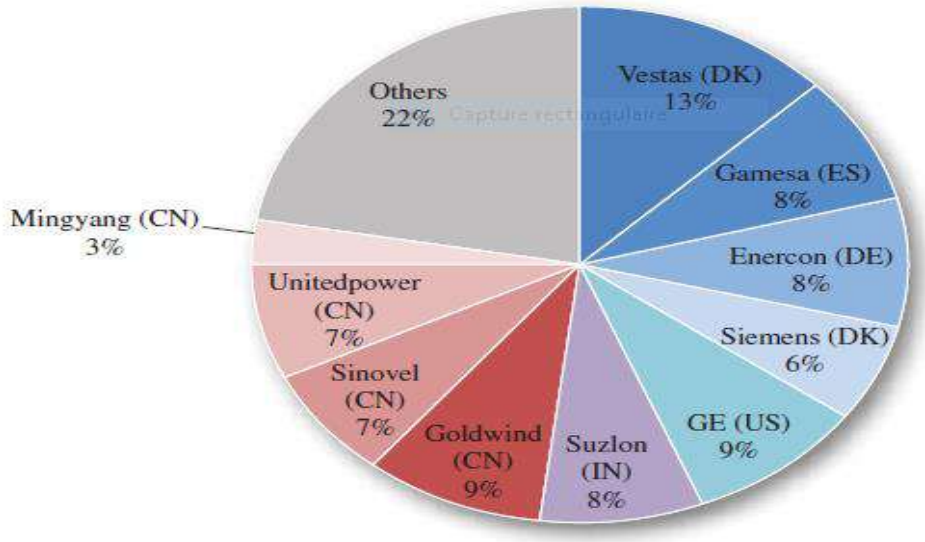


Figure I-7. Répartition de la part mondiale du marché des éoliennes en 2011.

L'évolution de la puissance éolienne installée a été liée à l'évolution qu'a connue la taille des éoliennes installée au cours des années, la (Figure I-8) résume l'évolution de la taille des éoliennes et de l'impact durant les trente dernières années [3].

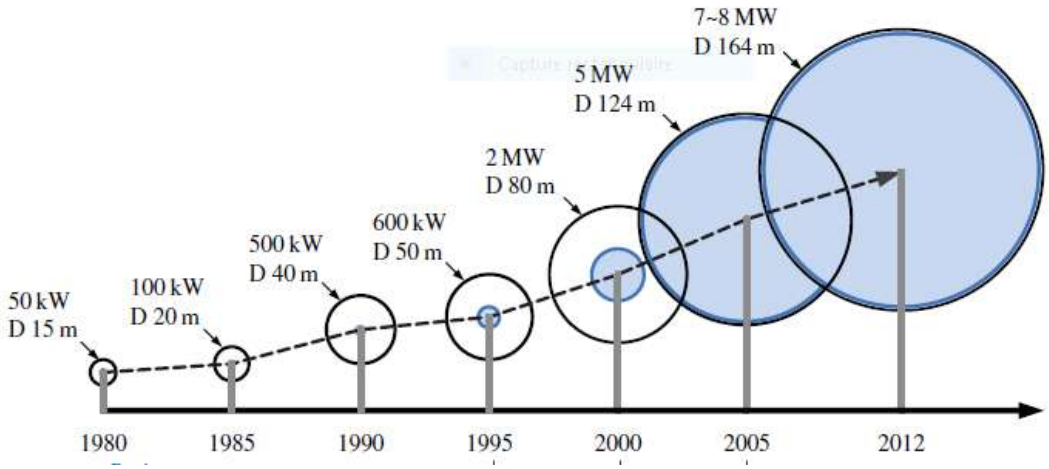


Figure I-8. Evolution de la taille des éoliennes et de l'impact au cours des 30 dernières années.

I.6 Constitution de base d'un système éolien :

Comme indiqué ci-dessus, l'éolienne à axe horizontal est la plus utilisée dans les systèmes éoliens pour la production de l'énergie électrique à partir l'énergie du vent. Les principaux éléments mécaniques et électriques de ce type d'aérogénérateur sont résumés dans la (Figure I-9) et qui sont [6] :

- **Le Tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.
- **Les Pales** : Les pales sont généralement en fibre de verre, leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m). Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les variations.
- **La nacelle** : Regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
- **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à un couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.
- **La génératrice** : La génératrice est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

- **Le système de refroidissement** : Généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre.
- **Le système de commande** : Qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre** : Qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation** : Qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

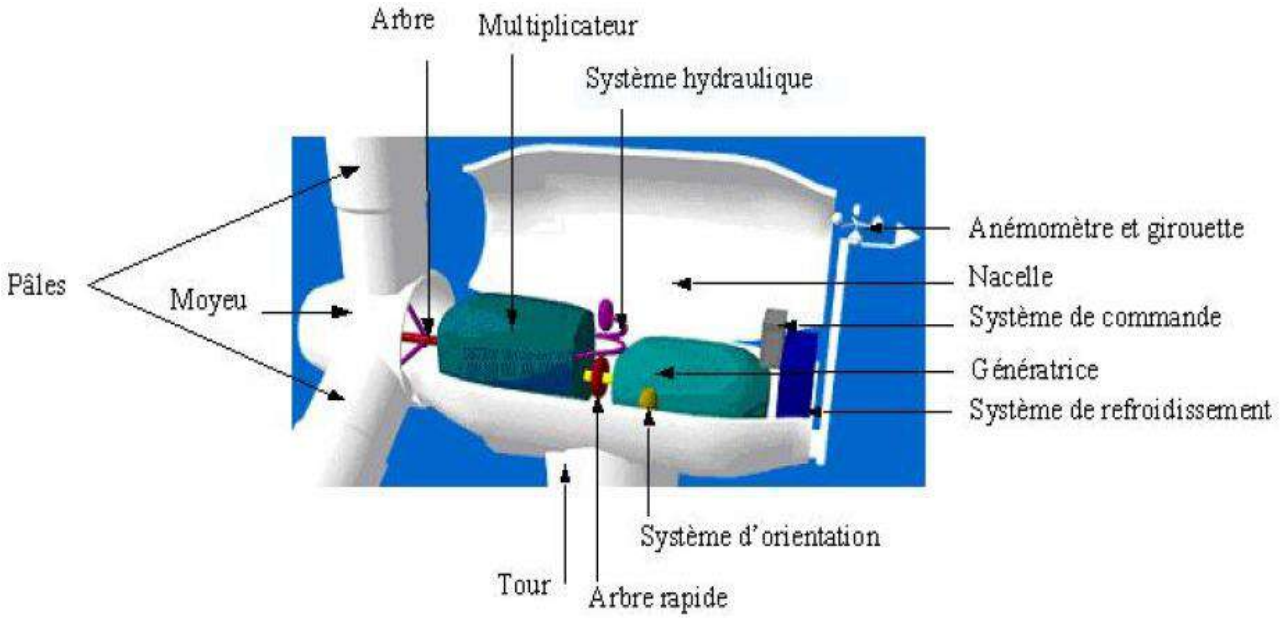


Figure I-9. Eléments constituant une éolienne.

I.7 Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseur statiques (convertisseur coté rotor et convertisseur coté réseau), (Figure I-10).

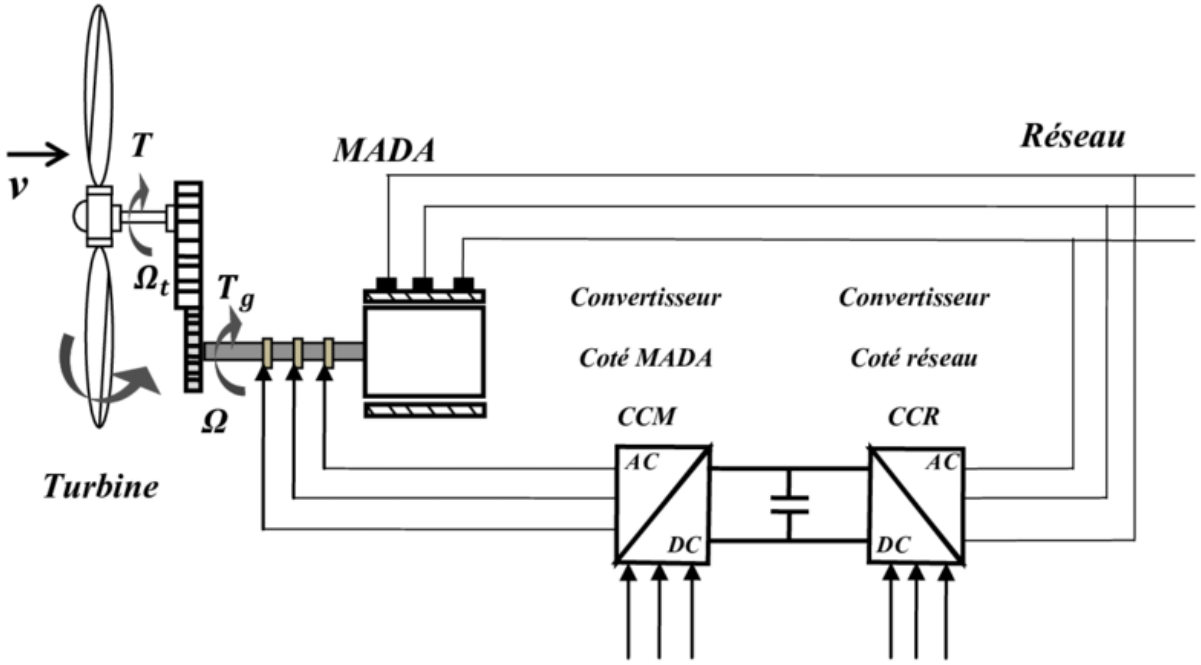


Figure I-10. Chaine de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

I. 7. 1 Structure de la MADA

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des ballais (Figure I-11), ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques [7].

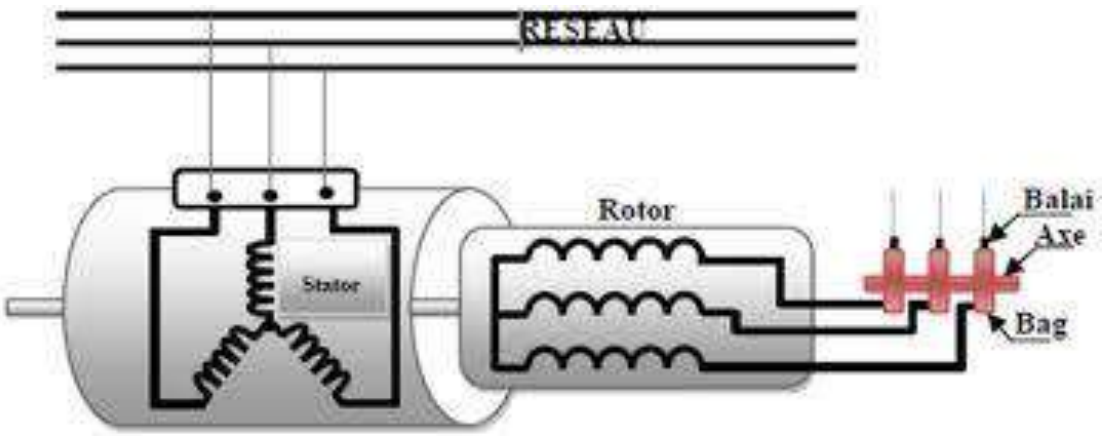


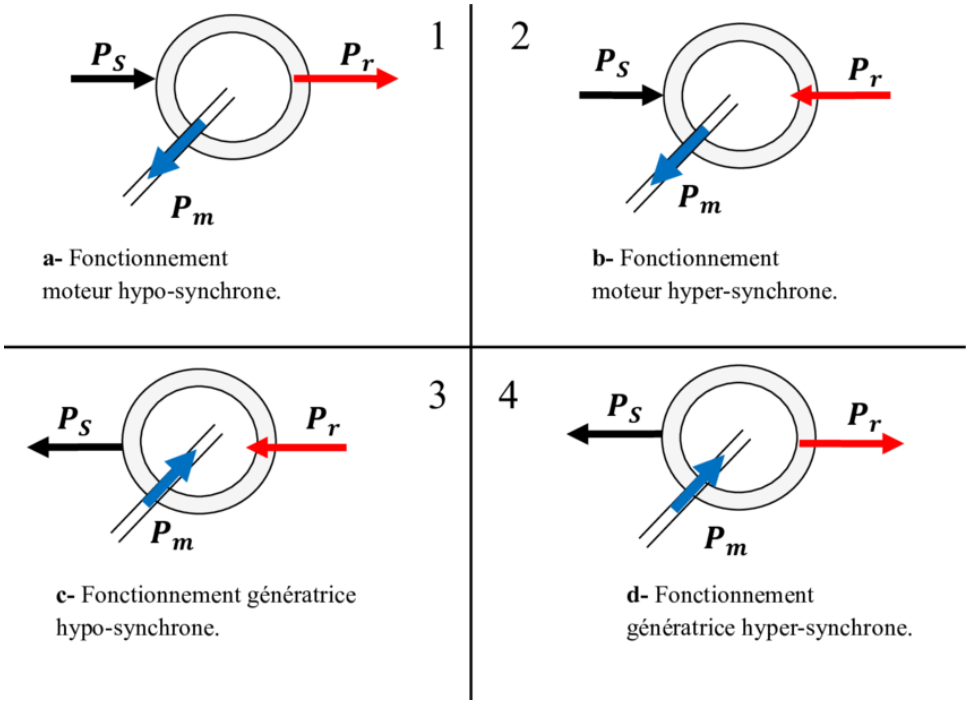
Figure I-11.Structure de la MADA.

I. 7. 2 Principe de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (Figure I-12). C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance du stator (Ps) est fournie par le réseau au stator de cette dernière. Durant le mode hypo-synchrone (Figure I-12-1), où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement (Pr) transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau. Pendant le mode hyper-synchrone (Figure I-12-2), le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entrainant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme et le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator. Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien.

Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique (Pm) à la machine. En mode hypo-synchrone (Figure I-12-3), une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. Par contre, en mode hyper-synchrone (Figure I-12-4), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.



a- Fonctionnement moteur hypo-synchrone.

b- Fonctionnement moteur hyper-synchrone.

c- Fonctionnement génératrice hypo-synchrone.

d- Fonctionnement génératrice hyper-synchrone.

Figure I-12. Les modes de fonctionnement de la MADA.

I. 7. 3 Avantage des éoliennes à base de la MADA

Les points forts et faibles d'une MADA peuvent être résumés comme suivant :

- La variation de la vitesse acceptable pour un fonctionnement stable de la MADA est de +/-30 % (correspondant à la valeur du glissement (s)) autour de la vitesse de synchronisme, ceci va limiter la puissance circulant dans le circuit rotorique à (|s.Ps|) [5].
- De ce fait, les convertisseurs statiques utilisés sont dimensionnés pour faire transiter uniquement la puissance de glissement, c'est à dire au maximum 30% de la puissance nominale de la machine. Par conséquent, les éoliennes à base de la MADA procurent ainsi plusieurs avantages :
- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations contrairement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [8].
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré.
- Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri.
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone [9].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état d'art sur l'énergie éolienne. On a rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, on a cité les différentes structures d'éolienne avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie et le développement de la production d'énergie éolienne. Ce qui nous a amenés à choisir un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation et qui est notre principal sujet d'étude de par ses qualités de fonctionnement et ses avantages.

Chapitre II Modélisation et commande de la machine asynchrone double alimentation (MADA)

II.1 Introduction

En premier lieu, ce chapitre explicite le comportement et les caractéristiques dynamiques de la MADA. Un modèle mathématique est ressorti permettant d'observer et d'analyser l'évolution des différentes variables de la machine, telles que la puissance, le couple, les courants et les flux, dans les régimes transitoires et permanents.

D'autre part, la commande vectorielle, l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques, est exposée. Grace au principe de l'orientation du flux principal de la machine, cette technique de commande permet de commander séparément les puissances active et réactive de la MADA [11].

II.2 Modélisation et simulation de la MADA

Pour mieux analyser ou commander la MADA, il est indispensable d'avoir un modèle ou une représentation mathématique qui permet de traduire fidèlement le comportement réel de la machine. Comme pour toutes les machines électriques triphasées, la modélisation de la machine passe par deux étapes :

- Modélisation de la machine dans le repère naturel triphasé
- Modélisation de la machine dans le repère biphasé

II. 2. 1 Modèle de la MADA dans le repère naturel triphasé

Nous allons modéliser la machine asynchrone à double alimentation pilotée par le rotor liée à un convertisseur statique. La représentation schématique simplifiée de la MADA, dans le repère triphasé, est donnée par la (Figure II-1).

Les trois enroulements (bobinages) du stator sont représentés schématiquement sur leurs axes magnétiques respectifs A, B et C qui sont décalés de 120°, ainsi que les trois enroulements du rotor sur leurs axes magnétiques respectifs a, b et c.

Avec :

- (vas,vbs,vcs), (var,vbr,vcr) : Les tensions instantanées aux bornes des phases statoriques et rotoriques.
- (ias,ibs,ics), (iar,ibr,icr) : Les courants instantanés circulants dans les phases statoriques et rotoriques.
- θm : L'angle électrique entre le repère statorique et le repère rotorique.

La MADA, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté, il en résulte que les pertes fer et les pertes par hystérésis sont négligeable et que seuls les enroulements sont parcourus par les courants.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.

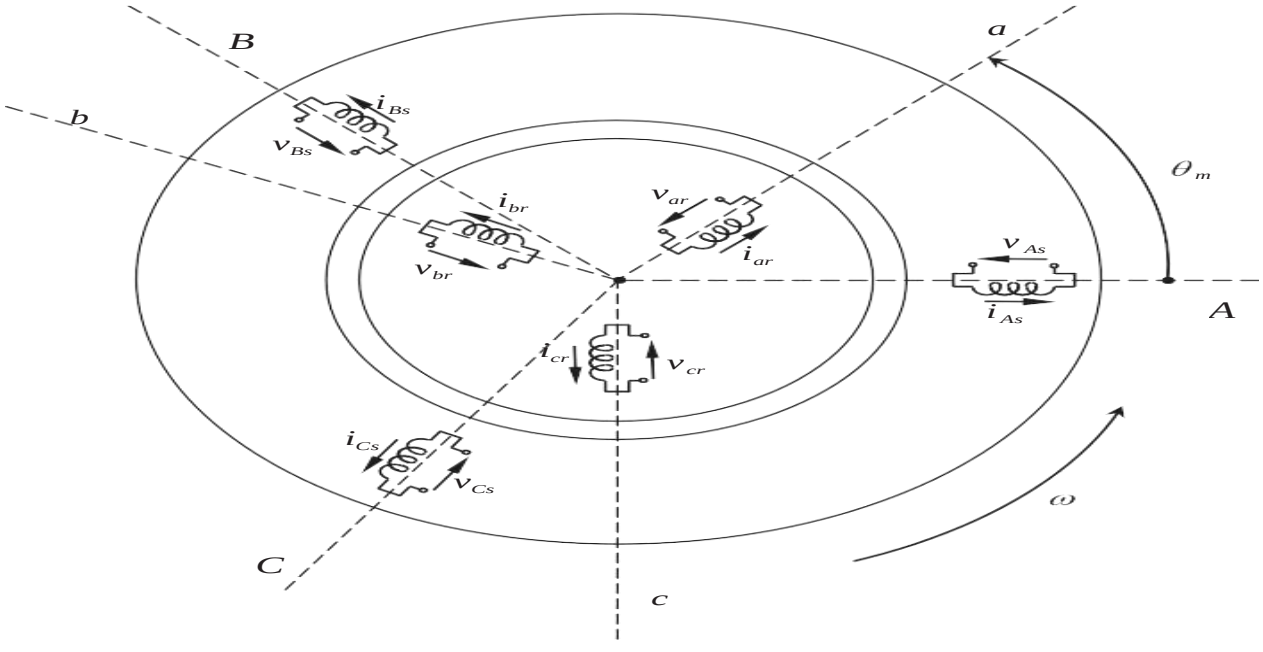


Figure II-1. Représentation spatiale des enroulements de la MADA.

II. 2. 1. 1 Equations électriques

Chaque enroulement de la machine peut être représenté par un circuit électrique équivalent (Figure II-2.).

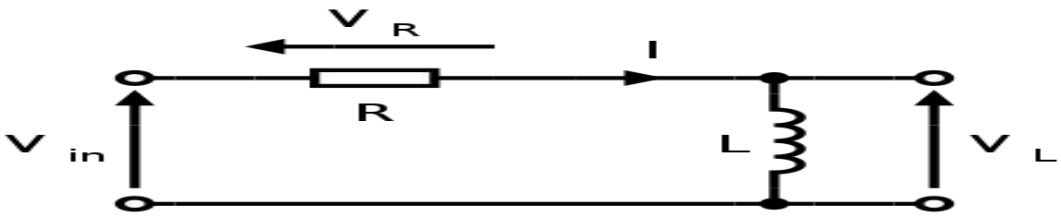


Figure II-2. Circuit électrique équivalent d'une phase.

Les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}[\Phi_S] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad \text{II-1}$$

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

$$\begin{cases} [\Phi_S] = [L_S][I_S] + [M_{Sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad \text{II-2}$$

Avec :

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_S] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{II-3}$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad \text{II-4}$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad \text{II-5}$$

$$[M_{Sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta) & M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr}\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II-6}$$

En remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}([L_S][I_S]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_r][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{Sr}][I_S]) \end{cases} \quad \text{II-7}$$

Les puissances active et réactive du stator peuvent être calculées au moyen des expressions suivantes.

$$P_S = \frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \text{II-8}$$

$$Q_S = -\frac{3}{2} V_S \times I_S \quad \text{II-9}$$

II. 2. 1. 2 Les équations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p \times [I_S]^t \times \frac{d}{d\theta} \times ([M_{sr}] \times [I_r]) \quad \text{II-10}$$

Donc, l'équation de l'arbre mécanique de la machine s'écrit :

$$C_{em} - C_r = J \times \frac{d}{dt} \times \omega + f_r \times \omega \quad \text{II-11}$$

II. 2. 2 Modélisation de la MADA dans le repère biphasé

Il est très difficile même impossible d'analyser le comportement de la MADA dans le repère triphasé vue le nombre important d'équations différentielles ainsi que l'existence des paramètres variables dans le temps (inductances mutuelles). Le passage à un repère biphasé approprié représente une solution adéquate. Ce passage s'effectue à travers la matrice de Park donné par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} cos(\theta) & cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -sin(\theta) & -sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-12}$$

Cette matrice permet le passage des composantes du système triphasé aux composantes du système biphasées comme indiqué sur la (Figure II-3). Ainsi, les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

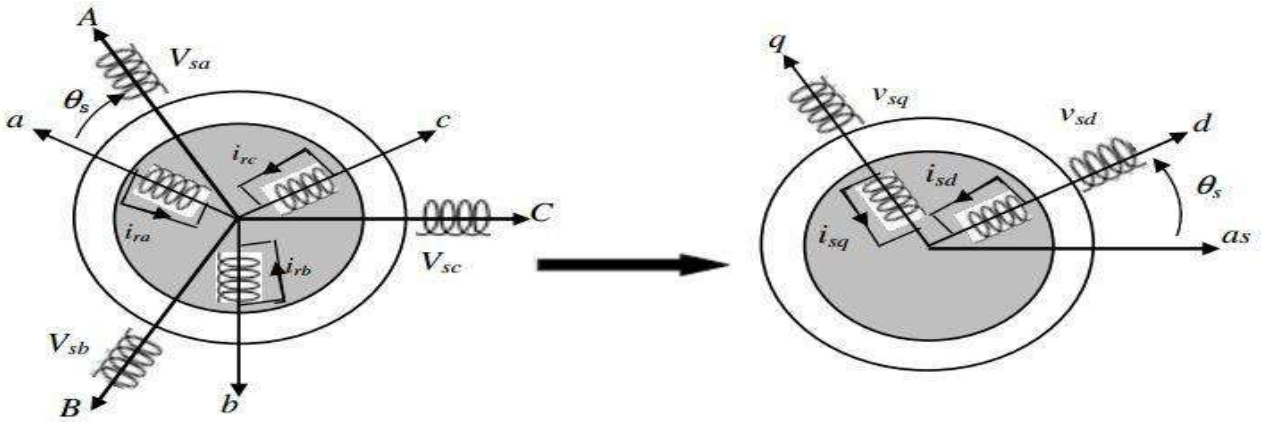


Figure II-3. Le passage du triphasé au biphasé.

- **Tension :**

$$\begin{cases} [V_{S,dq}] = [P(\theta_s)][V_{S,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{II-13}$$

- **Courant :**

$$\begin{cases} [I_{S,dq}] = [P(\theta_s)][I_{S,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{II-14}$$

- **Flux :**

$$\begin{cases} [\Phi_{S,dq}] = [P(\theta_s)][\Phi_{S,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)][\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{II-15}$$

Les relations entre les flux et les courants :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-16}$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \text{II-17}$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations des tensions rotoriques et statoriques, sont données par le système ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad \text{II-18}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \text{II-19}$$

Avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ , et } \quad \theta_s = \theta_r + \theta m$$

Pour les puissances active et réactive, côté stator, elles se donnent par :

$$P_s = \frac{3}{2}\left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}\right) \quad \text{II-20}$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\left(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}\right)$$

Pour les puissances actives et réactives, côté rotor, elles se donnent par :

$$P_r = \frac{3}{2}\left(V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}\right)$$

II-21

$$\mathrm{Q_r} = \frac{3}{2}\left(\mathrm{V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}}\right)$$

On peut distinguer différente représentation mathématique de la MADA suivant la vitesse attribuée au repère biphasé. On distingue trois possibilités :

a. Référentiel lié au stator

$$\theta_s = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot I_{\alpha s} + \frac{d\Phi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot I_{\beta s} + \frac{d\Phi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot I_{\alpha r} - \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\beta r} + \frac{d\Phi_{\alpha r}}{dt} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot I_{\beta r} + \frac{d\theta_r}{dt}\Phi_{\alpha r} + \frac{d\Phi_{\beta r}}{dt} \end{cases}$$

II-22

b. Référentiel lié au rotor

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \implies \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot I_{xs} - \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{ys} + \frac{d\Phi_{xs}}{dt} \\ V_{ys} = R_s \cdot I_{ys} + \frac{d\theta_s}{dt}\Phi_{xs} + \frac{d\Phi_{ys}}{dt} \\ V_{xr} = R_r \cdot I_{xr} + \frac{d\Phi_{xr}}{dt} \\ V_{yr} = R_r \cdot I_{yr} + \frac{d\Phi_{yr}}{dt} \end{cases}$$

II-23

c. Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel $\omega = \omega_s$ Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont continuées en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit [4]:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad \text{II-24}$$

Pour simuler et analyser le comportement de la machine, il est préférable de passer à la représentation d'état de la machine. En utilisant un repère lié au champ tournant et, en considérant le vecteur d'état $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$ et les grandeurs V_{dr} , V_{qr} comme variables de commande, la forme d'état de la MADA s'exprime par :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{ds} + \omega_s.\Phi_{qs} + \alpha_s.M.i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s.\Phi_{qs} - \omega_s.\Phi_{ds} + \alpha_s.M.i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r.i_{dr} + (\omega_s - \omega).i_{qr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{ds} - \beta.p.\omega.\Phi_{qs} - \beta.V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r.i_{qr} - (\omega_s - \omega).i_{dr} + \alpha_s.\beta.\Phi_{qs} + \beta.p.\omega.\Phi_{ds} - \beta.V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r}\right).V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = p.\frac{\mu}{J}\left(\Phi_{qs}.i_{dr} - \Phi_{ds}.i_{qr}\right) - \frac{1}{J}.C_r - \frac{f_r}{J}.\omega \end{cases} \quad \text{II-25}$$

$$\alpha_S = \frac{R_s}{L_s} \;;\; \sigma_r = L_r.\left(1 - \frac{M^2}{L_s.L_r}\right) \;;\; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s.M^2}{{L_s}^2.\sigma_r} \;;\; \beta = \frac{M}{L_s.\sigma_r} \;;\; \mu = \frac{3.M}{2.L_s}$$

II. 2. 3 Simulation du modèle de la MADA

A l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK, la simulation de la MADA est effectuée pour deux modes de fonctionnement : Moteur à vide et en charge. Pour ces deux modes, le stator est alimenté par le réseau de fréquence (50Hz) et d'amplitude (220V) quand au rotor, il est alimenté par une source de tension parfaite d'amplitude (12V) et une fréquence (5.4Hz).

II. 2. 3. 1 Fonctionnement à vide

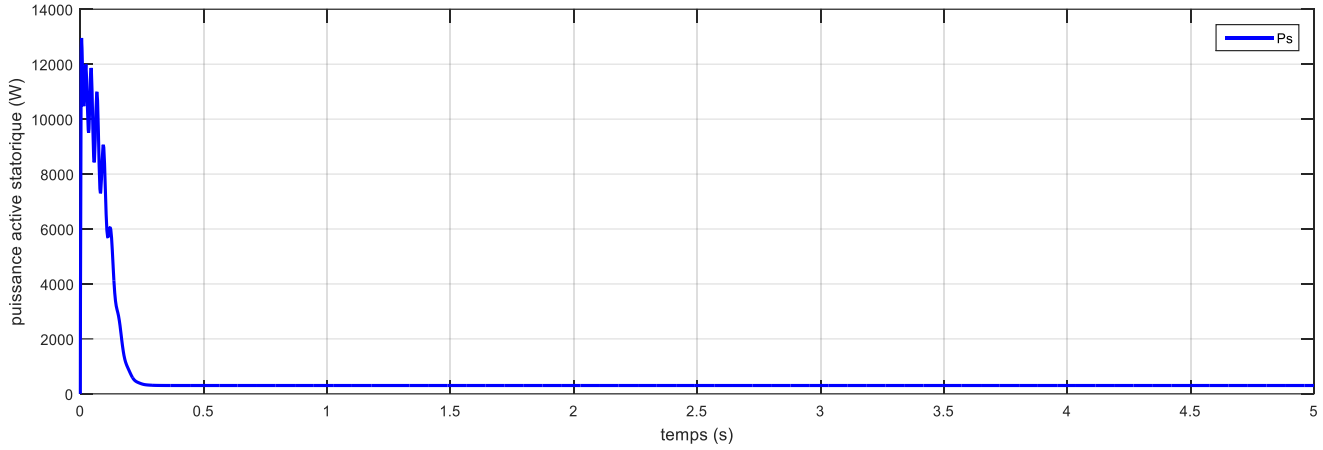


Figure II-4. Puissance active statorique.

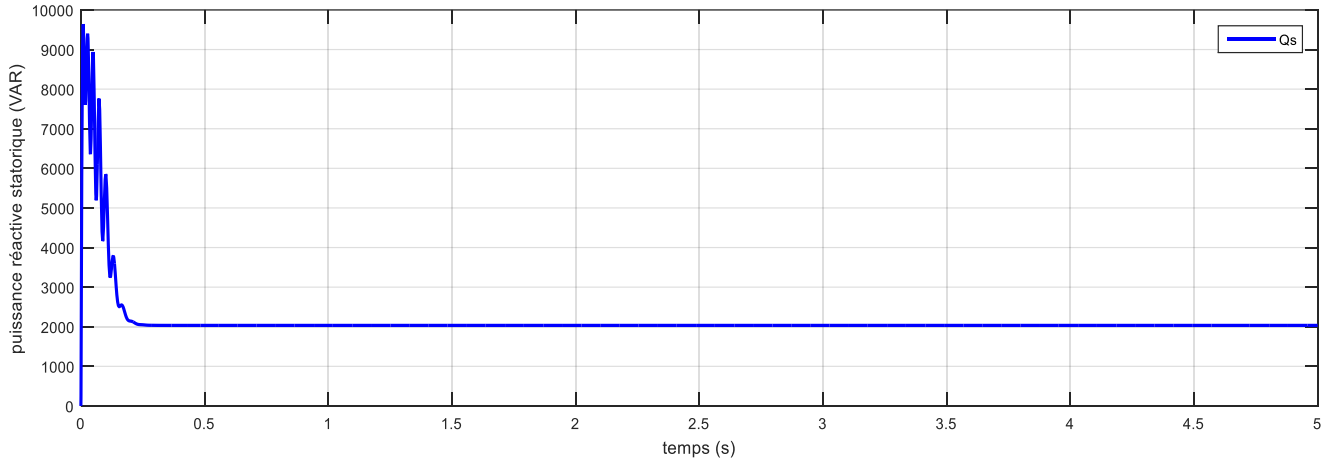


Figure II-5. Puissance réactive statorique.

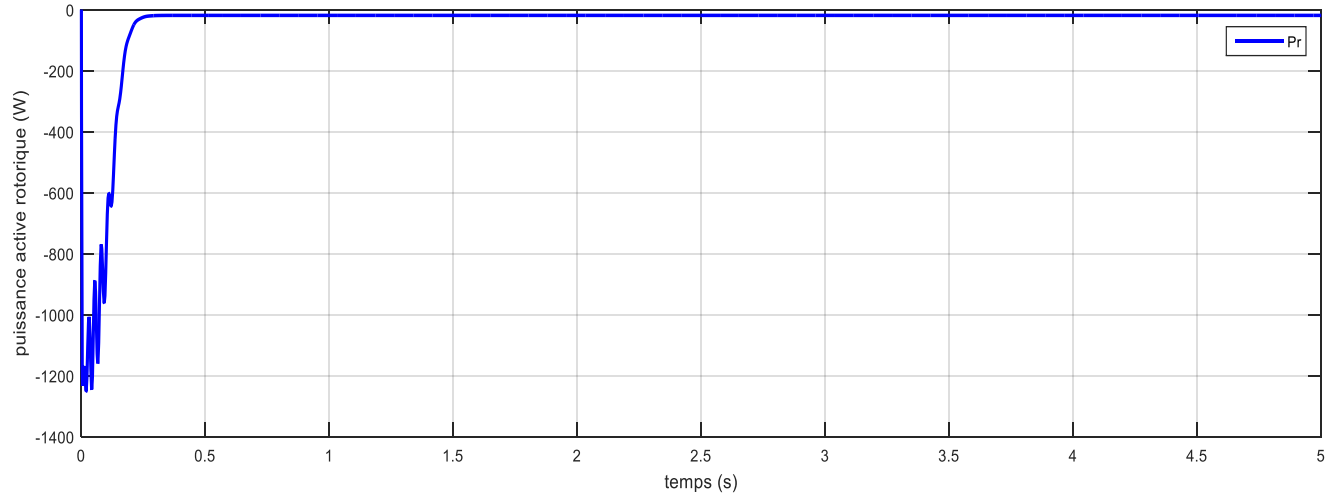


Figure II-6. Puissance active rotorique.

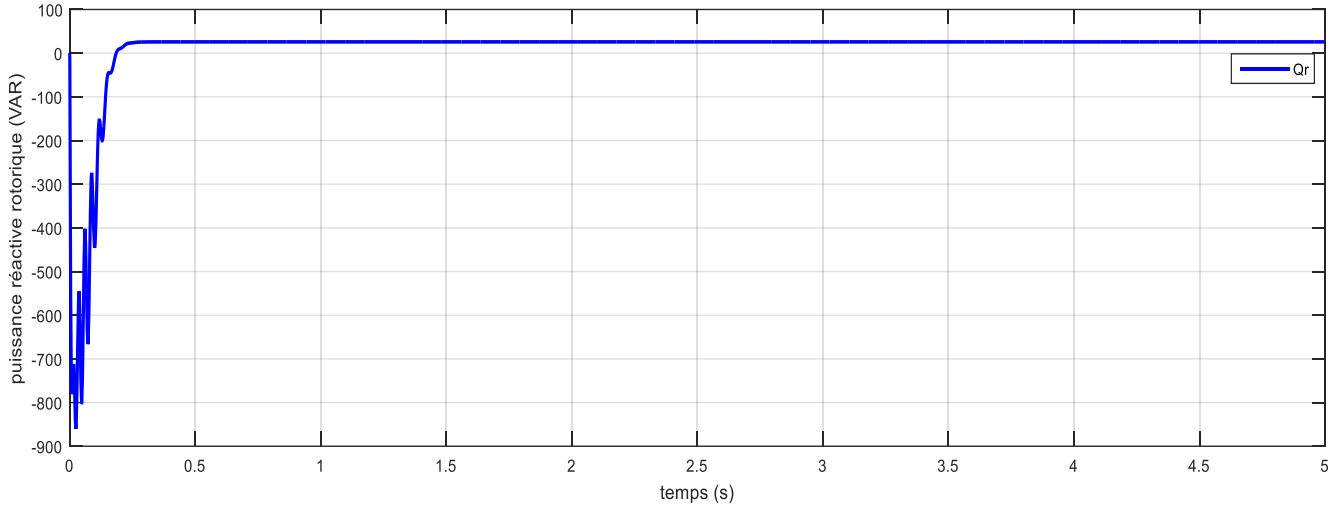


Figure II-7. Puissance réactive rotorique.

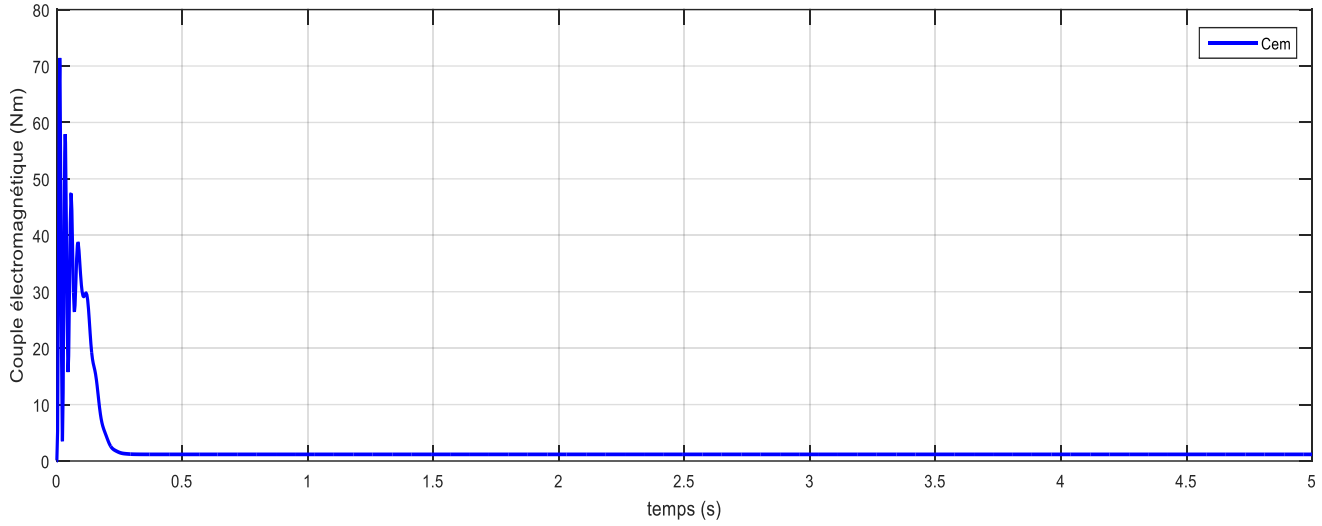


Figure II-8. Couple électromagnétique.

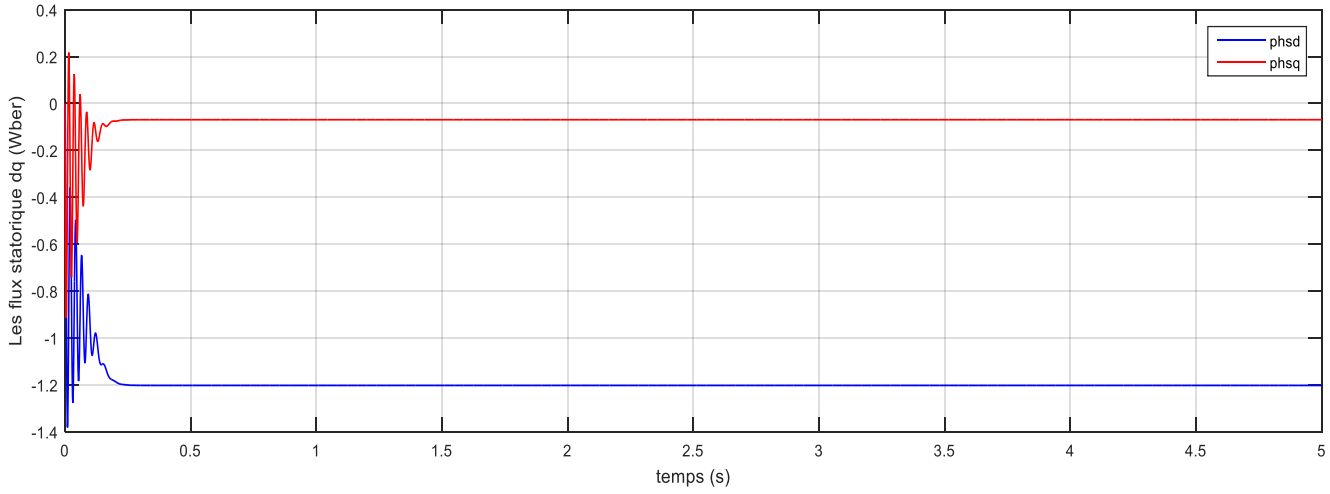


Figure II-9. Les flux statoriques axe d, q.

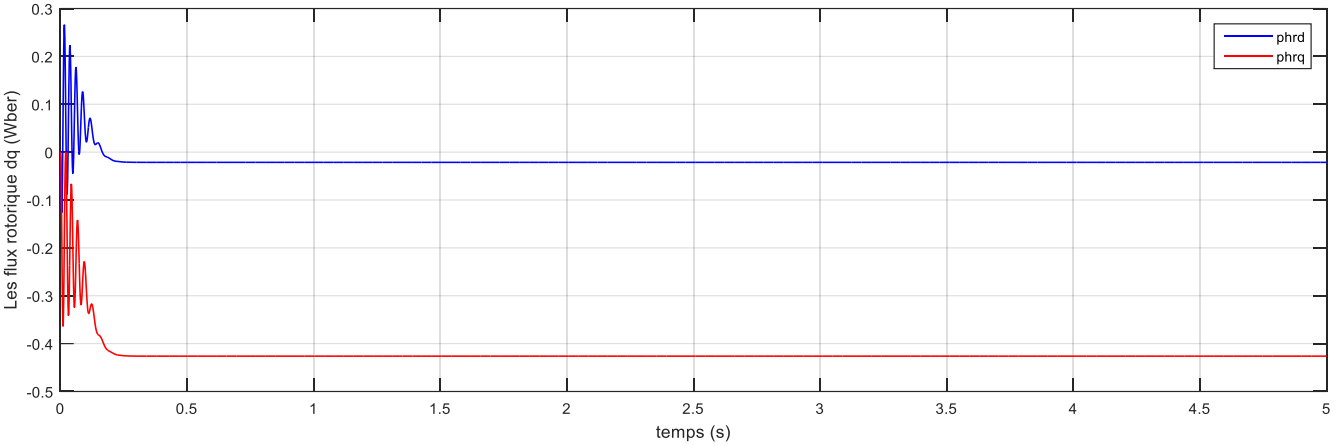


Figure II-10. Le flux rotorique axe d, q.

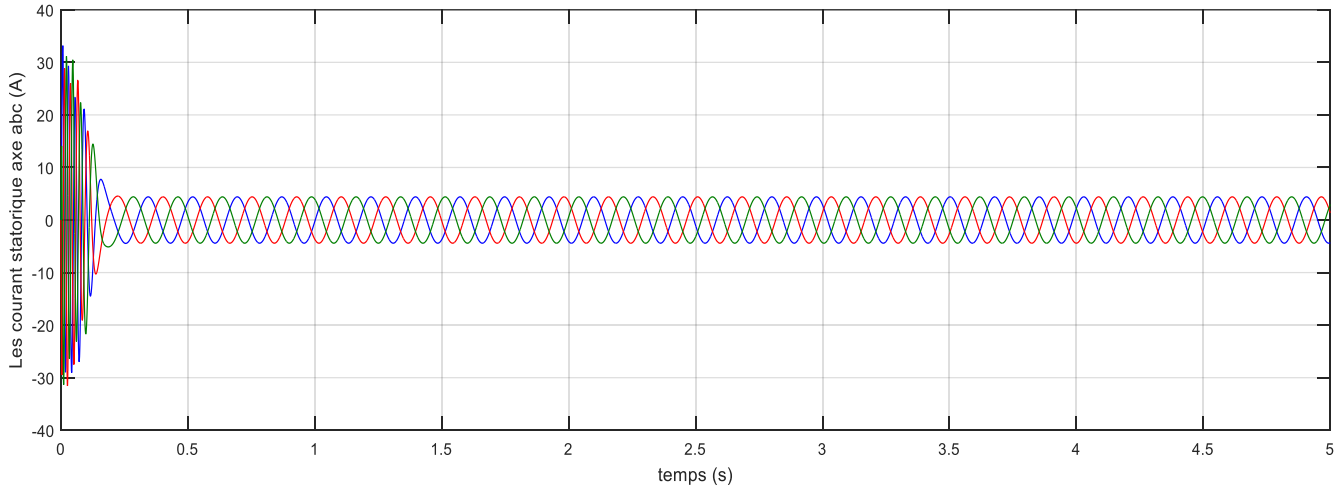


Figure II-11. Le courant statorique axe abc.

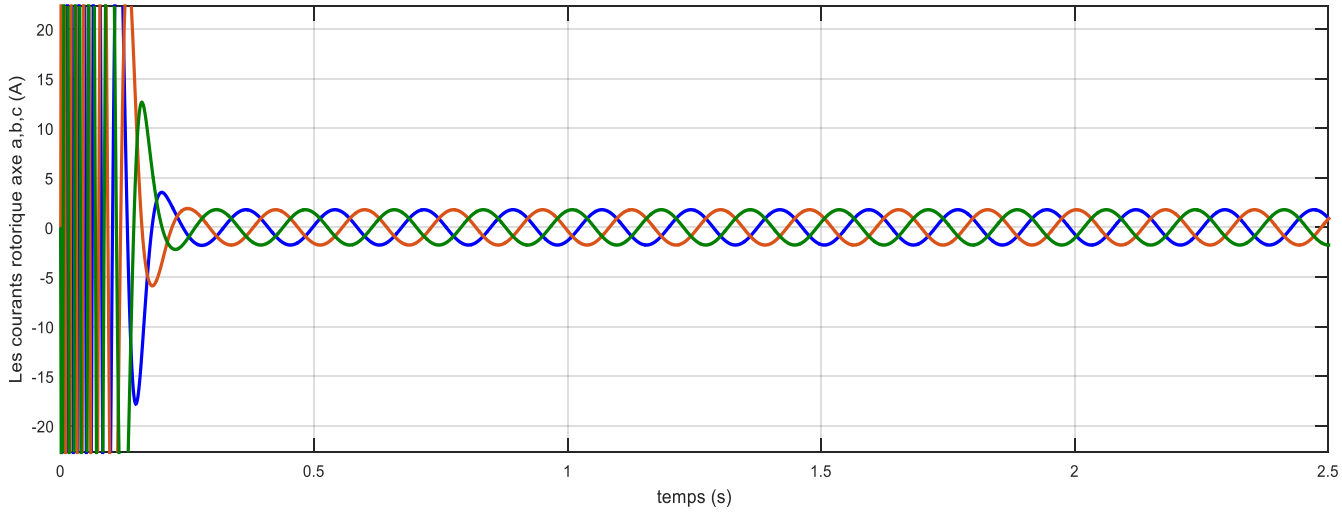


Figure II-12. Le courant rotorique axe abc.

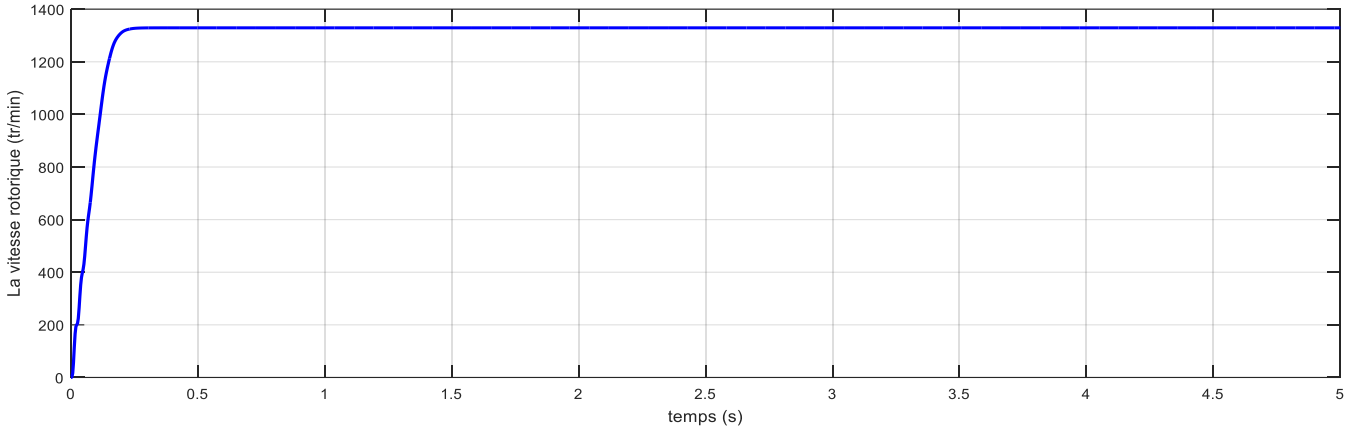


Figure II-13. La vitesse rotorique.

II. 2. 3. 2 Fonctionnement en charge à Couple résistant Cr = 10 N.m

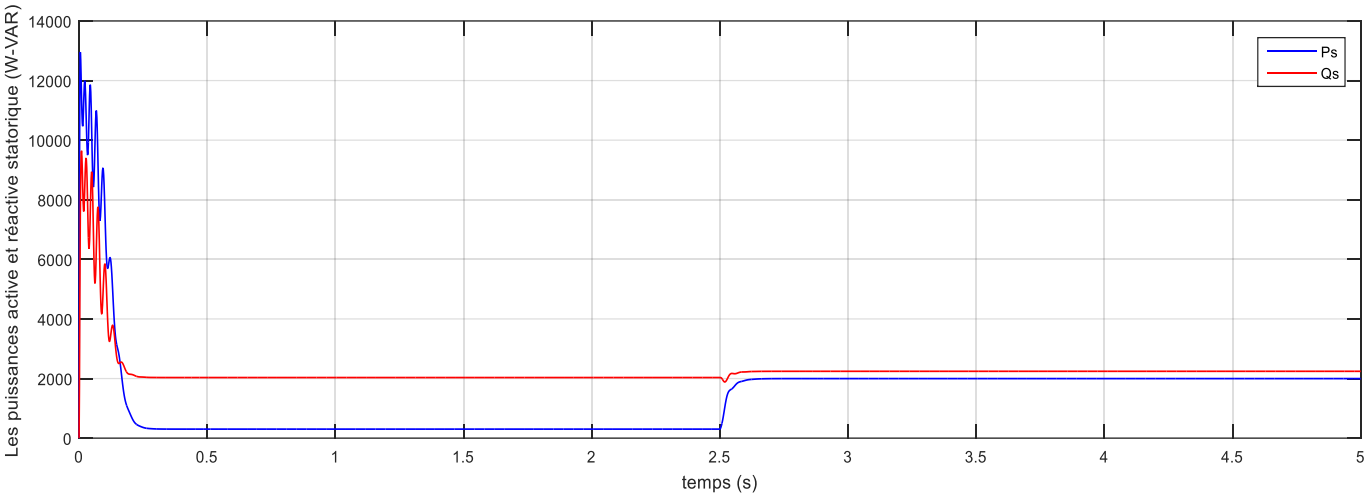


Figure II-14. Les puissances active et réactive statorique.

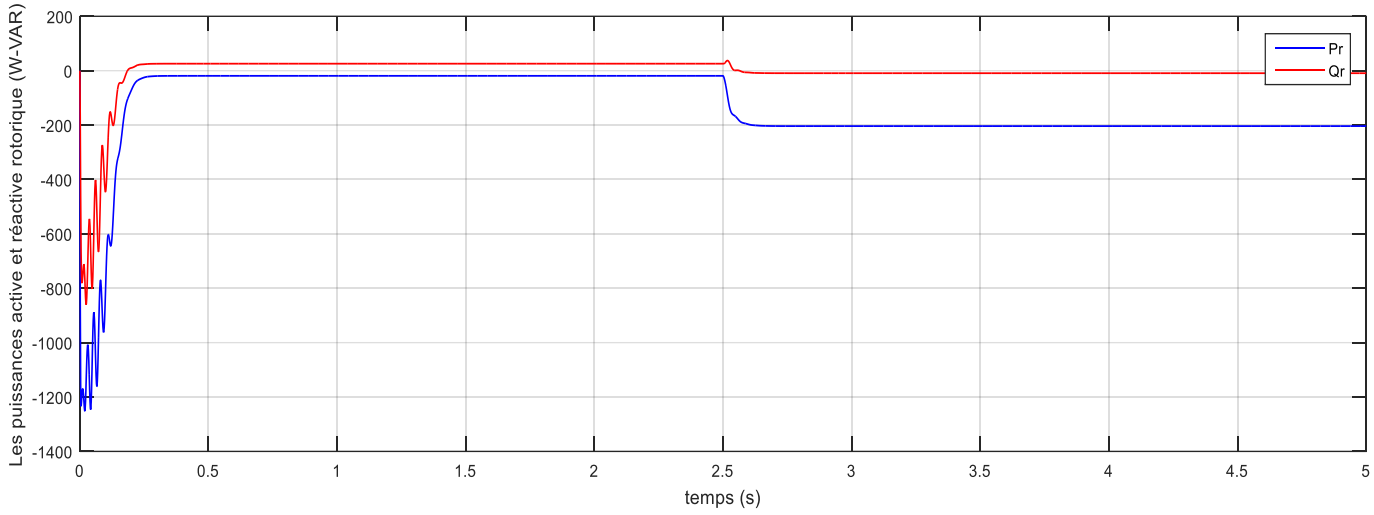


Figure II-15. Les puissances active et réactive du rotor.

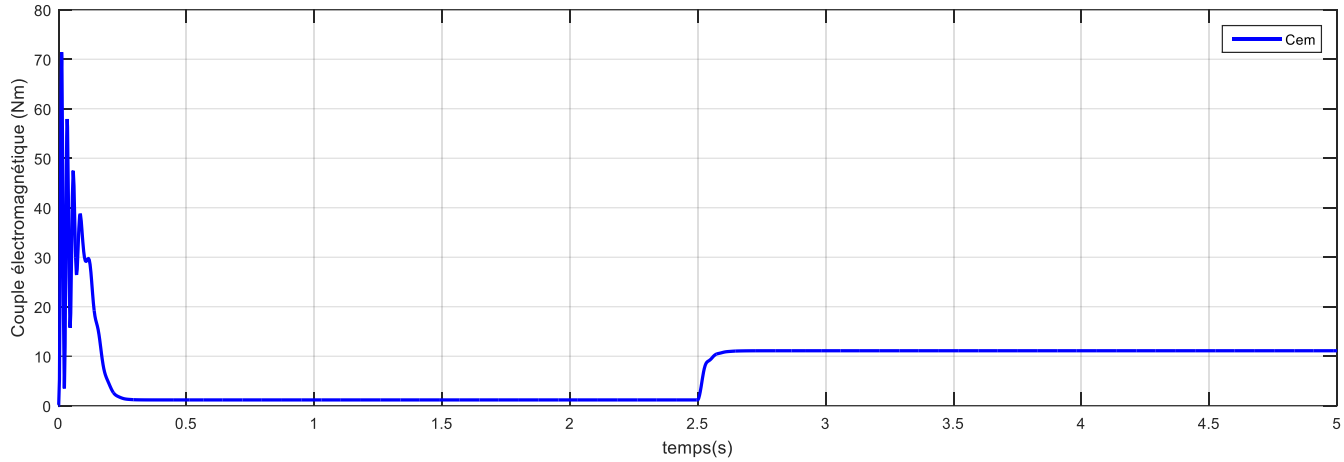


Figure II-16. Le couple électromagnétique.

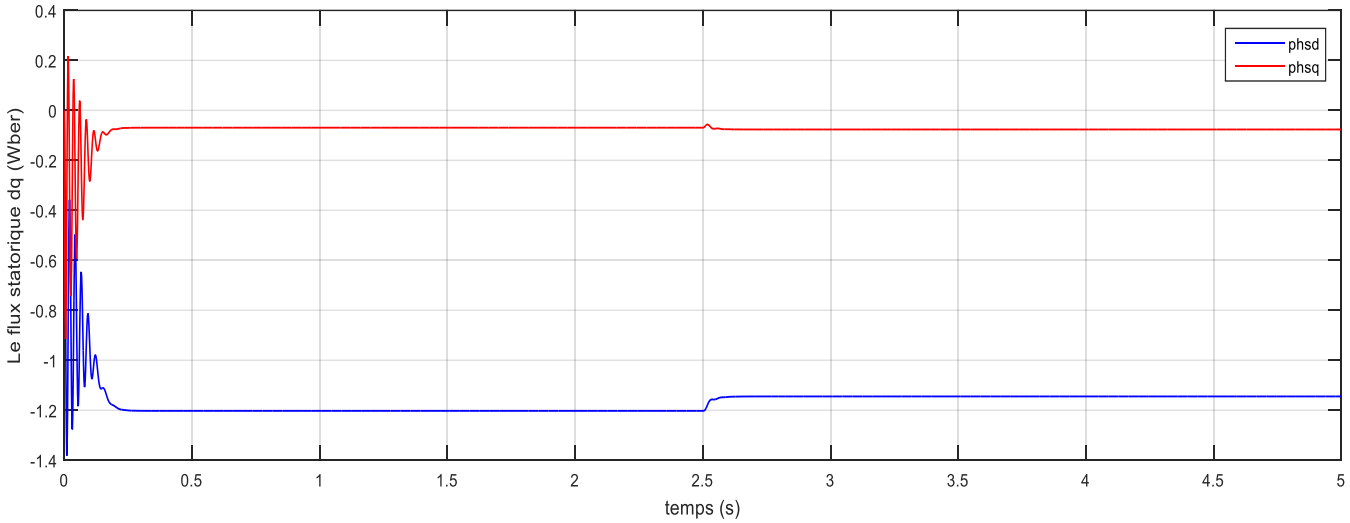


Figure II-17. Les flux statoriques axe d, q.

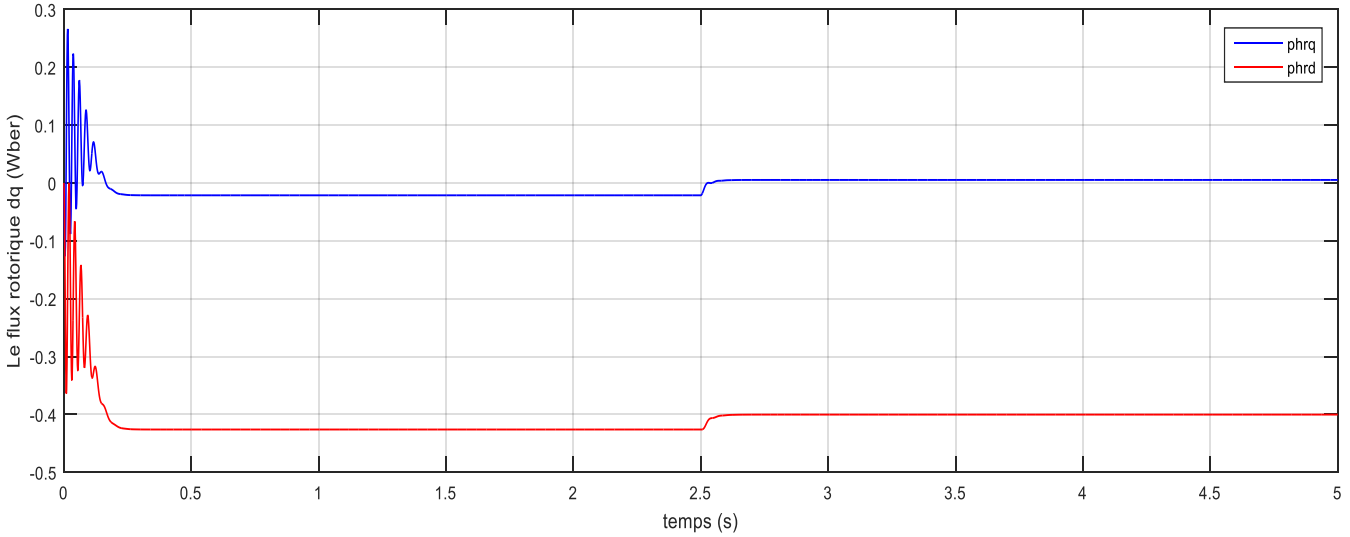


Figure II-18. Les flux rotoriques axe d, q.

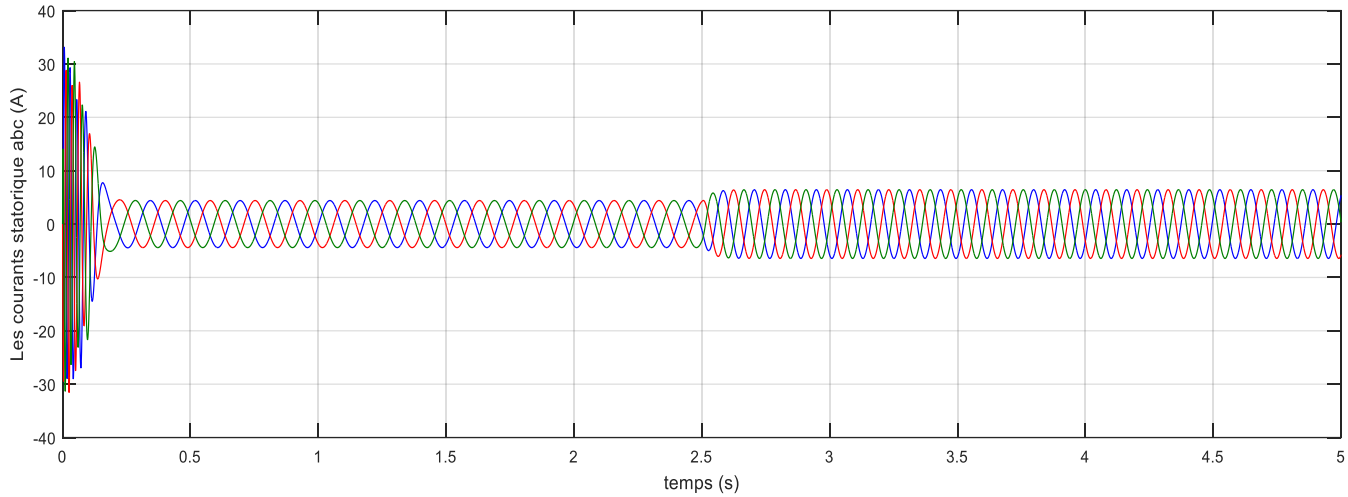


Figure II-19. Le courant statorique axe abc.

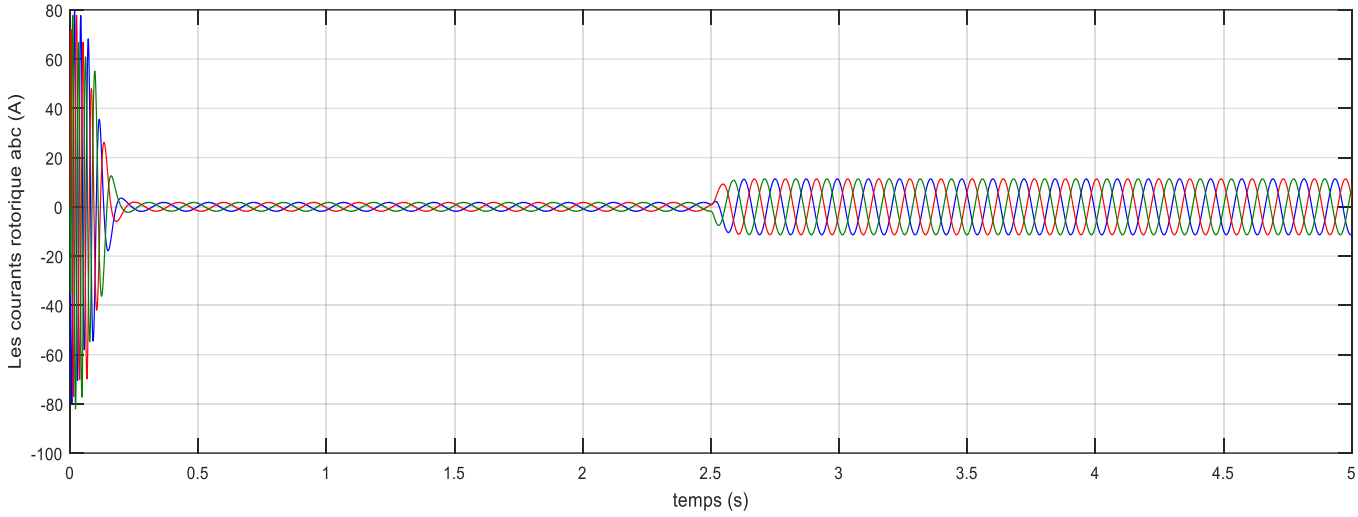


Figure II-20. Le courant rotorique axe abc.

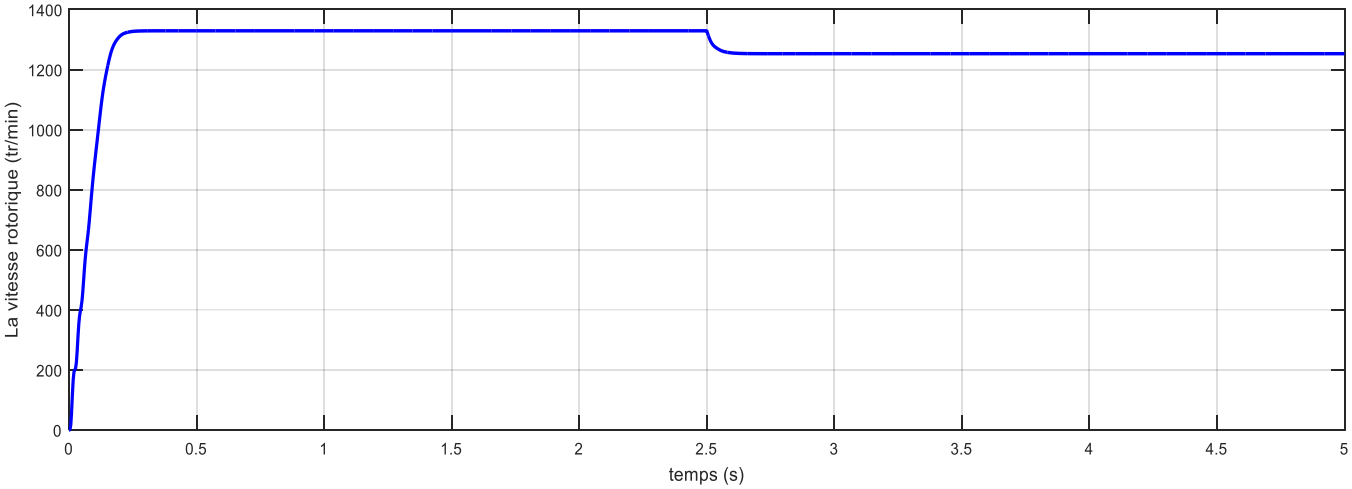


Figure II-21. La vitesse rotorique.

Interprétation

Après un démarrage à vide de [2.5s], une valeur de couple [10N.m] est appliquer à l'arbre de la machine, nous remarquons une variation de la vitesse traduite par un glissement supplémentaire, au moment où on applique un couple de charge, la vitesse diminue avec une variation d'amplitude des courants statoriques et rotorique.

II.3 La commande vectorielle de la MADA

La commande elle-même joue un rôle très important dans les entraînements plus précisément pour la machine asynchrone à double alimentation qui est notre principal sujet d'étude. Cette partie du présent chapitre traite la modélisation et l'application de la commande vectorielle pour contrôler indépendamment les puissances statoriques active et réactive de la MADA.

II. 3. 1 Principe général de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle ou par orientation du flux a été proposé par BLASCHKE au début des années 70 [12] . Il consiste à orienter le vecteur du flux principal de la machine suivant l'un des axes du repère biphasé afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel d.q de sorte que le vecteur flux soit aligné sur l'axe direct d. Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par la composante en quadrature du courant.

Le stator de la MADA est connecté au réseau à travers un transformateur qui impose l'amplitude et la fréquence (50 Hz) des tensions statoriques. Par conséquent, le flux statorique est fixe en régime permanent, l'axe direct du repère dq est aligné sur le flux statorique. D'où, la tension statorique est suivant l'axe q comme illustré sur la (Figure II-22)[13].

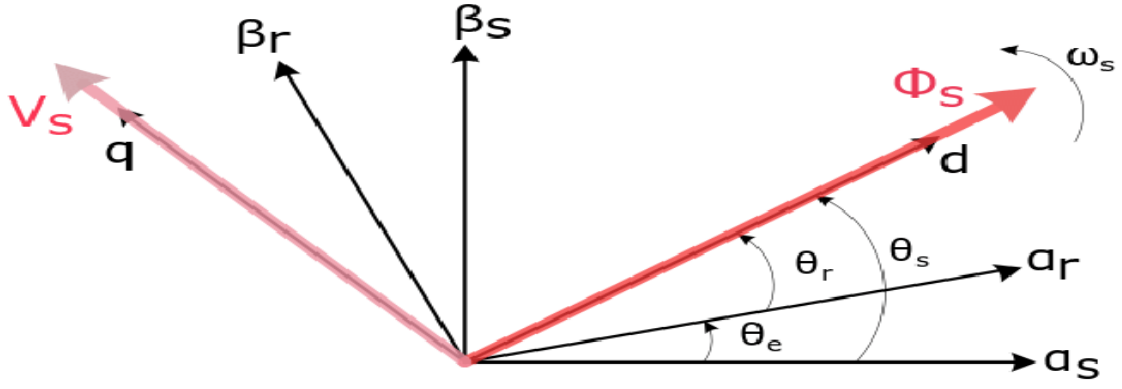


Figure II-22. Orientation du repère de Park.

La (Figure II-23) montre l'égalité et l'équivalence entre la formule du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à C.C et la commande vectorielle d'une génératrice MADA.

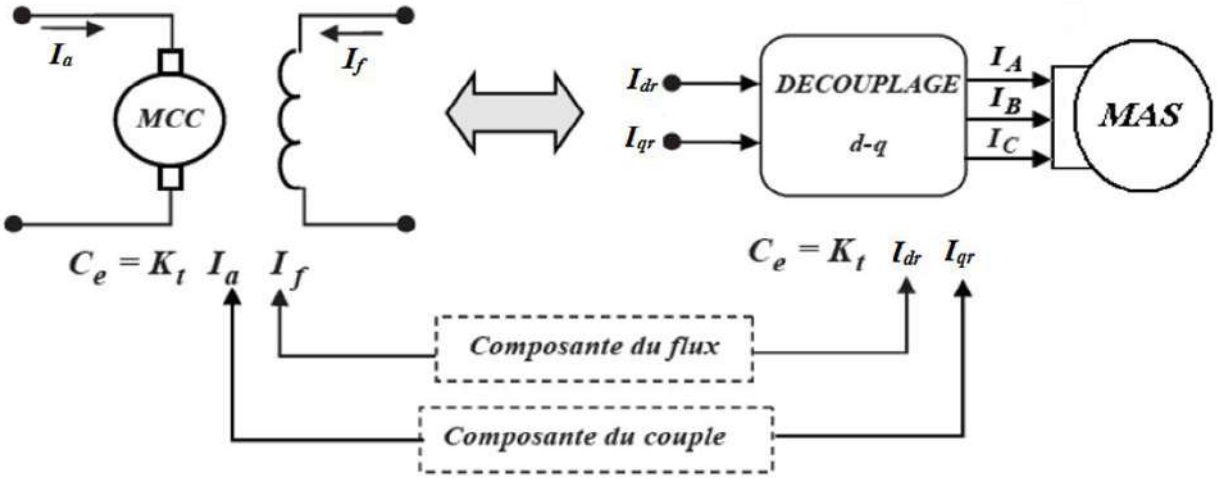


Figure II-23. L'équivalence entre la machine à courant continu et la machine asynchrone.

II. 3. 2 Modélisation de la génératrice MADA avec orientation du flux statorique

Pour commander la génératrice MADA par la méthode d'orientation du flux statorique, il est utile de choisir le repère d-q lié au champ tournant statorique, dont les différentes variables statoriques seront fixes en régime permanent. Ainsi, le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique (Fig. 2.22) On a donc :

$\varphi_{ds} = \varphi_s$ et $\varphi_{qs} = 0$

Le couple électromagnétique de l'équation II 26 devient alors :

$$\Gamma_{em} = p\frac{M}{L_s} I_{qr}\varphi_{ds} \qquad \text{II-25}$$

Et l'équation des flux)II-2) devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + MI_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + MI_{qr} \end{cases} \qquad \text{II-26}$$

Si l'on suppose que le réseau électrique est stable et équilibré, ayant pour tension simple Vs, cela conduit à un flux statorique $\varphi_s$constant. Cette considération associée à l'équation II 26, montre que le couple électromagnétique Γ_{em}est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature I_{qr}.

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad \text{II-27}$$

Avec ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad \text{II-28}$$

A l'aide de l'équation II 27, on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-29}$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II-30}$$

Ou bien encore, d'après l'équation II 29 par :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{II-31}$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation II 30 :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{II-32}$$

A partir des équations II 28 et II 29, nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \text{II-33}$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad \text{II-34}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation) II-35) fait apparaître que la puissance active Ps statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr}. De même, la puissance réactive Q du stator est proportionnelle au courant rotorique direct I_{dr}, à un constant pré $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$. Ces dépendances seront montrées en simulation un peu plus bas.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux II 15, les courants statoriques par l'expression II 30on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-35}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation II 36 par leurs expressions dans l'équation II 13 on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{II-36}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, on établit les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de reproduire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

II. 3. 3 Principe de Commande indépendant des puissances active et réactive

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[10].

- **La méthode 1 :** consiste à rejeter les termes de couplage et à déposer en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette technique est appelée : méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice.
- **La méthode 2 :** 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 appelée méthode indirecte découle directement des équations II 35et II 37.

La méthode indirecte des puissances permet d'établir les lois de commande à partir de l'inversement de la fonction de transfert du système à réguler, pour établir les tensions rotoriques de référence en fonction des puissances active et réactive au niveau du stator.

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la (Figure II-24) ou l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

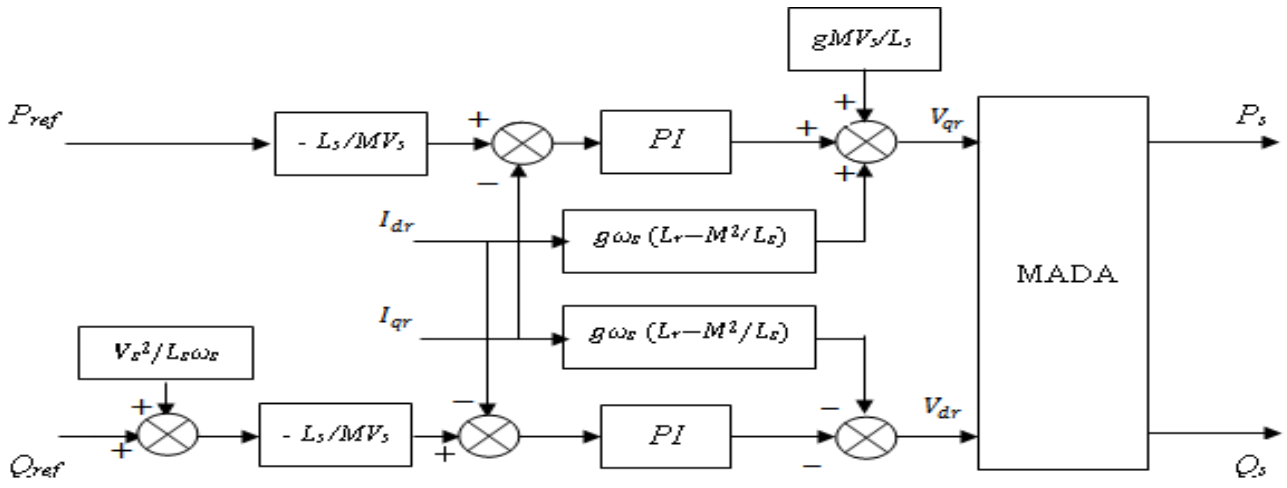


Figure II-24. Schéma bloc de la commande indirecte.

II. 3. 4 Résultats de simulation

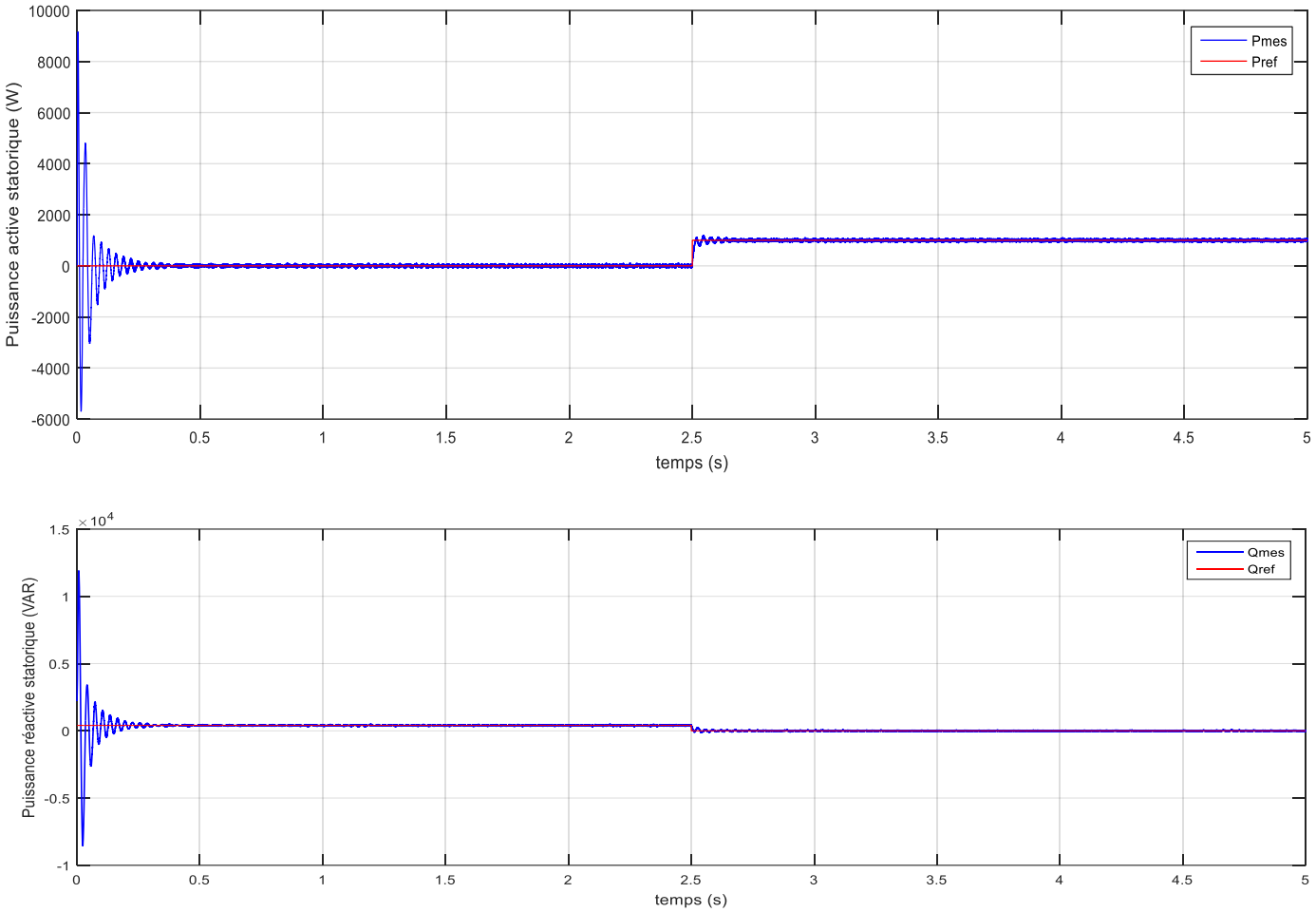
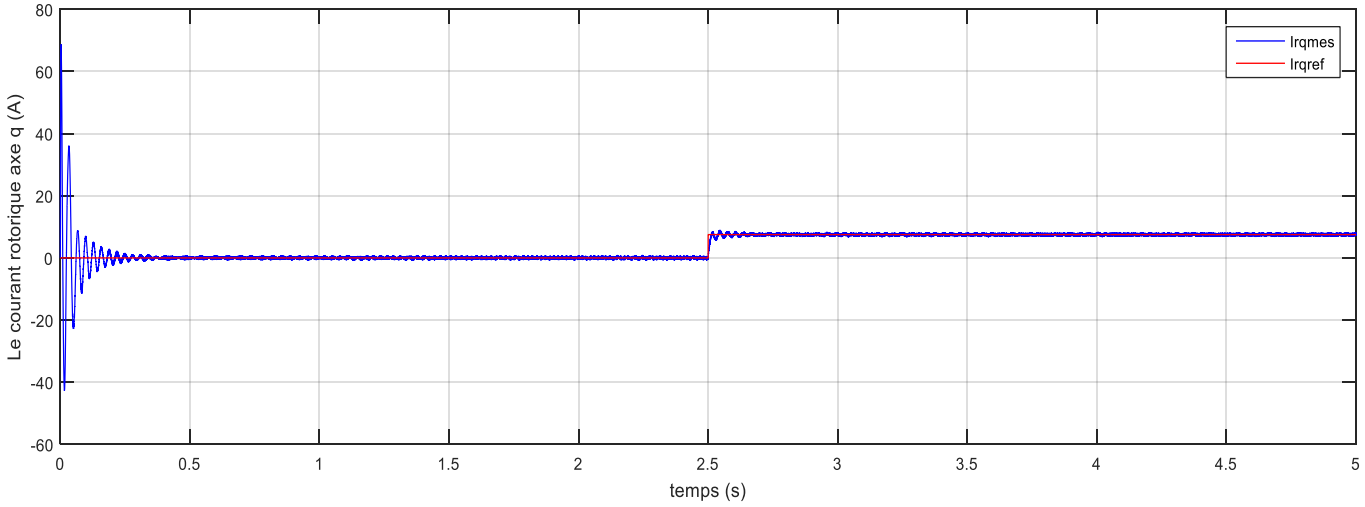


Figure II-25. Les puissances active et réactive (Ps et Qs).



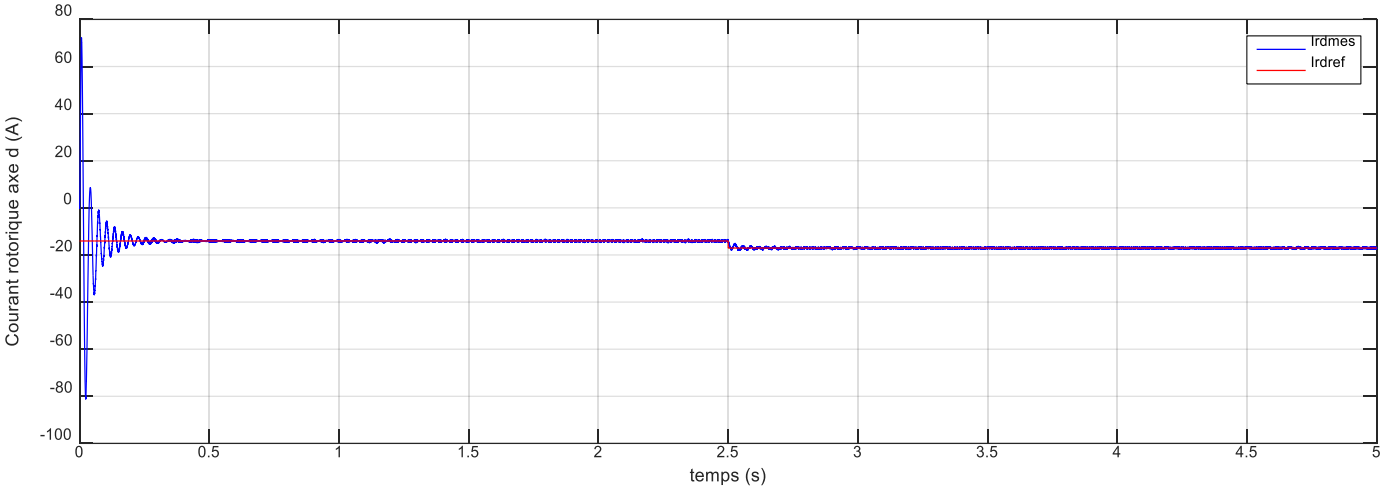


Figure II-26. Les courants rotorique (Irq et Ird).

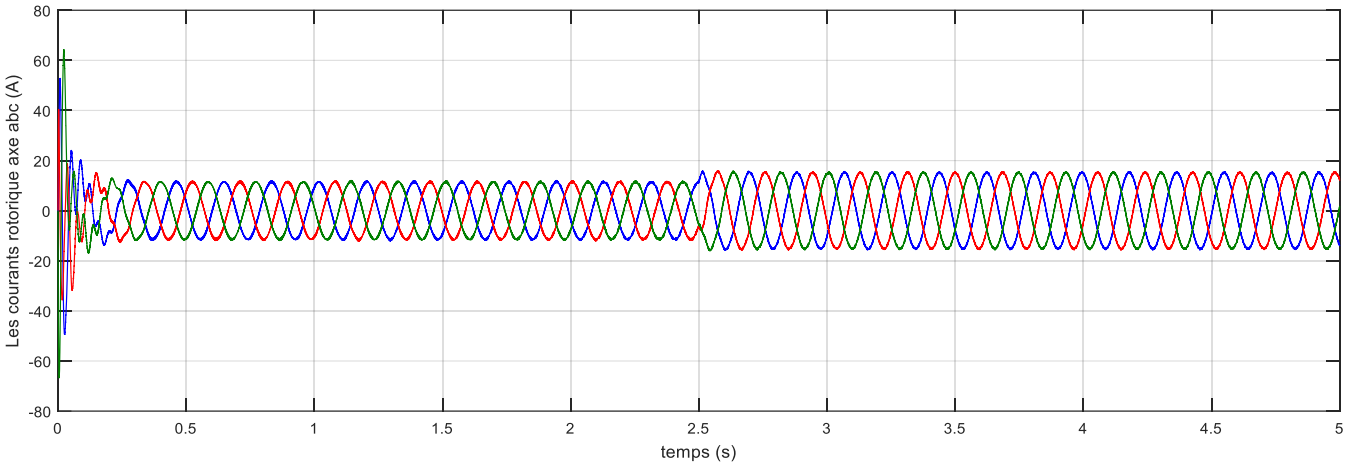


Figure II-27. Les courants rotoriques abc.

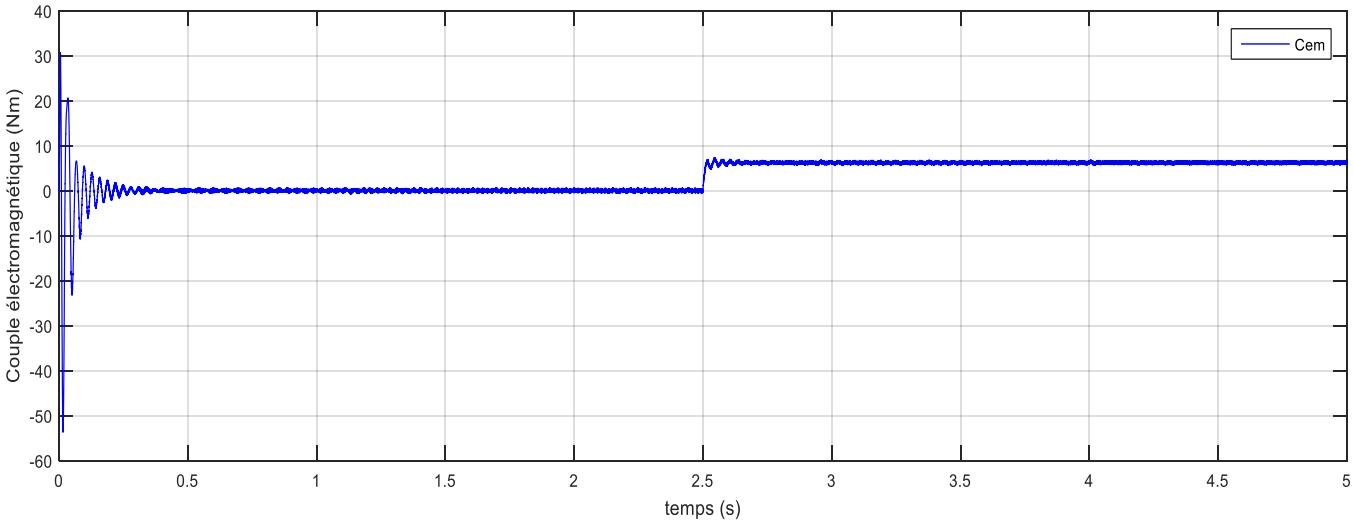


Figure II-28. Couple électromagnétique.

Interprétation :

Apres la simulation sur Matlab/Simulink on remarque que la régulation a donné des bons résultats en termes de performance dynamique et de réponse aux échelons pour les puissances active et réactive et pour les courants rotoriques comme on peut le voir sur les figures (2.25) et (2.26). Comme on peut constater que les courants I_{dr} et I_{qr} prennent des formes similaires que celles des puissances réactive et active successivement.

II.4 Modélisation du convertisseur cote rotor (onduleur de tension à deux niveaux)

Le convertisseur côté machine il fonctionnera comme un onduleur. Sa commande est réalisée par la technique de Modulation de Largeurs d'impulsions (MLI). Le convertisseur côté machine (CCM) est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la BDFM des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables. La (Figure II-2) représente le schéma de principe d'un CCM triphasé qui alimente la machine[14].

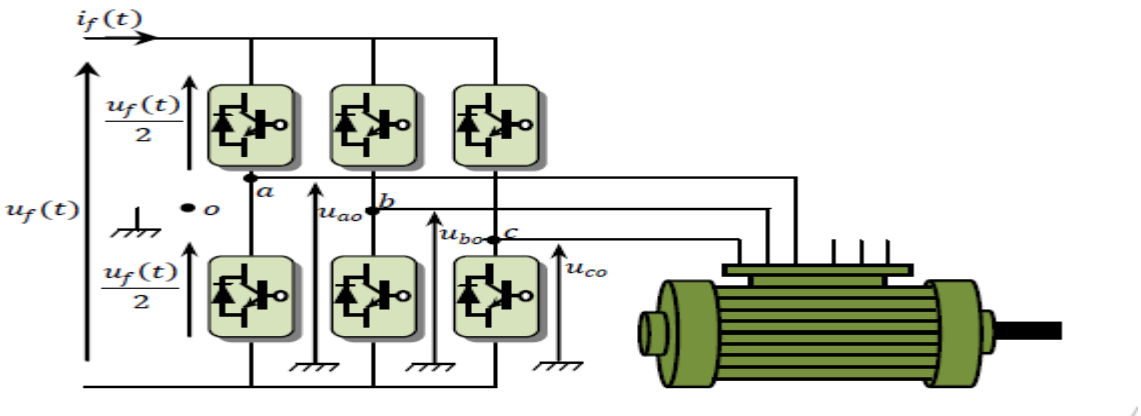


Figure II-29. Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être définit par trois grandeurs booléennes de commande Si (i = a,b,c) tel que :

- **Si** = 1 le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- **Si** = 0 le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}\,(S_a - S_b) \\ U_{BC} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \qquad \text{II-37}$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}\,(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}\,(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}\,(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \qquad \text{II-38}$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \qquad \text{II-39}$$

L'élément de base intervenant dans toute structure d'onduleurs de tension est une cellule (bras) de commutation comprenant une paire d'interrupteurs réversibles en courant.

Pour la mise en œuvre de la conversion continu-alternatif, cette cellule est une structure minimale ne permettant l'obtention que de deux valeurs de tension (0 et Vdc).

Pour réaliser cette conversion, une méthode s'appuis sur l'utilisation directe de la cellule de base et consiste à régler la fréquence et la durée des interconnections de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Les techniques de MLI ou (PWM) ont été l'objet de recherches intensives, un nombre important de méthodes, différentes de par leurs concepts et leurs performances ont été développées.

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions à partir d'une source de tension continue. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement.

Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur[14]. La (Figure II-30) représente un onduleur a deux niveaux de tension commandé par la stratégie MLI.

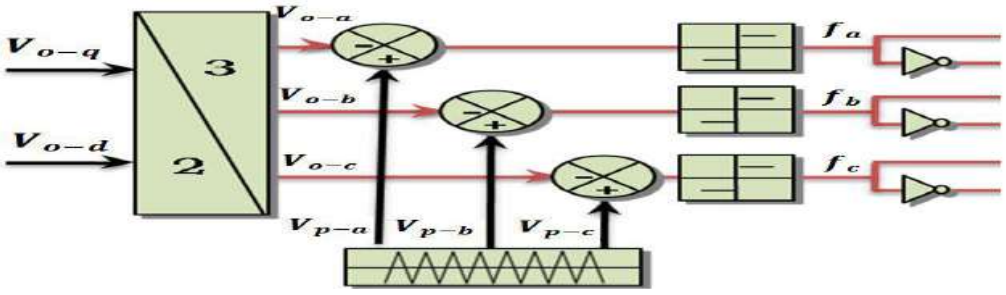


Figure II-30. Principe de la MLI.

Résultats de simulation :

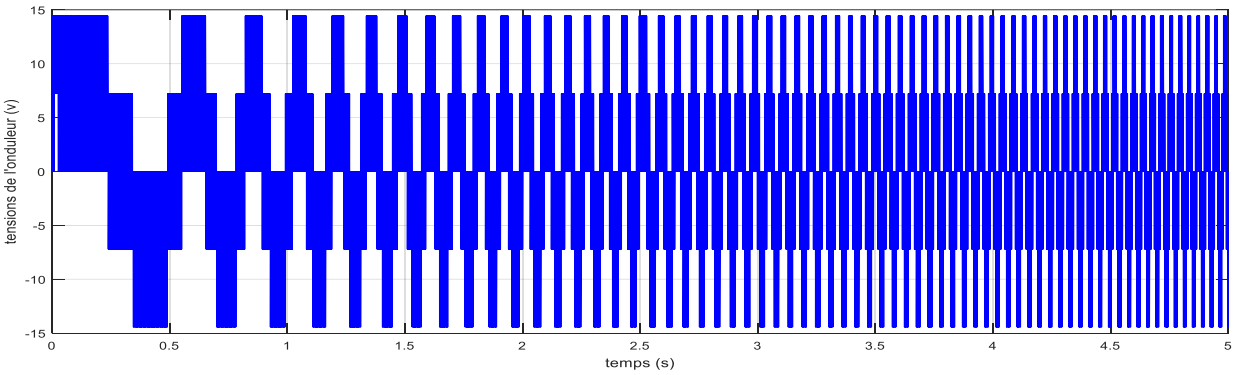


Figure II-31. Tensions de l'onduleur CCM.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons évoqué la modélisation de la MADA dans les différents repères. En plus, le principe de la commande vectorielle a été appliqué pour commande les puissances active et réactive du stator de la machine. Nous avons étudié et simulé cette commande de telle sorte de commande indirectement les puissances active et réactive à travers le réglage des courants rotoriques via le conventionnel régulateur PI.

Dans le chapitre suivant, nous allons exploiter une technique d'intelligence matricielle, qui est la logique floue, pour améliorer de plus les performances de la MADA.

Chapitre III Commande par logique floue de la MADA

III.1 Introduction

Le régulateur flou représente une alternative pratique et efficace pour la commande des systèmes ayant des comportements dynamiques très compliqués ou avec des non-linéarité difficile à modéliser. A travers certaines informations heuristiques, un schéma de commande non-linéaire peut être construit pour maitriser le comportement d'un système non-linéaire sans le besoin d'un modèle précis ou détaillé de ce système [15].

Le présent chapitre sera consacré à la présentation des différents concepts ainsi que les étapes de conception d'un régulateur flou. A rappeler que, dans le chapitre 2, nous avons effectué la synthèse et l'application d'un régulateur PI pour la commande des puissances active et réactive d'une MADA. Malgré sa simplicité et les performances obtenues, ce type de régulateur souffre de quelques lacunes telles que la sensibilité aux variations des paramètres de la machine, le caractère linéaire de son comportement, etc. Afin d'améliorer de plus les performances de la MADA, des régulateurs flous sans utilisés pour substituer les régulateurs PI classiques.

La partie de simulation est réalisée pour comparer les performances entre les deux régulateurs, et la sensibilité aux perturbations et robustesse vis à vis des variations de paramètres.

III.2 Historique de la logique floue

La logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité actuellement. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par Lofti Zadeh [15]. A cette époque. La théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), ont commencé à se répandre sur une grande échelle. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non-techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision.

En 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. A partir de 1985 environ, ce sont les Japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits Industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande. Actuellement, la logique flue trouve son application dans diverses disciplines technologiques et industriels

III.3 Principe et fonctionnement d'un système flou

Par principe, une variable x varie dans un domaine appelé univers de discours, ce dernier est partagé en sous-ensembles flous de façon que dans chaque zone il y ait une situation dominante. Ces zones sont décrites par des fonctions convexes, généralement, sous forme triangulaire ou trapézoïdale, elles admettent comme argument la position de la variable x dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction, notée :

u_E: Degré d'appartenance de x au sous ensemble E.

Le choix de la répartition des fonctions d'appartenance, leurs chevauchements ainsi que leurs formes doit être judicieux, la (Figure III-1) illustre les formes les plus utilisées pour la fonction d'appartenance.

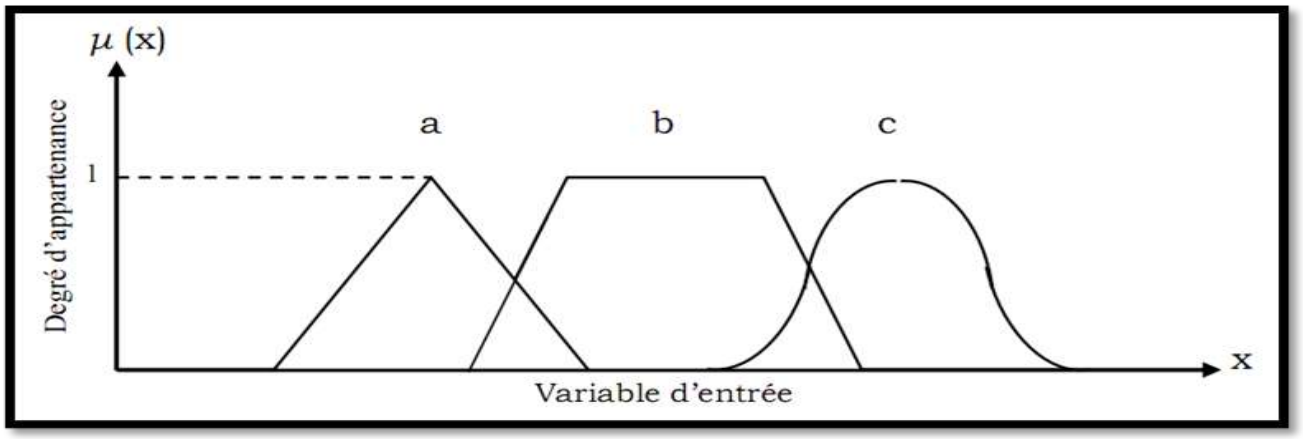


Figure III-1. Fonctions d'appartenance.

a) Fonction triangulaire.
b) Fonction trapézoïdale.
c) Fonction gaussienne.

III.4 Structure de base d'un régulateur flou :

Cette section rappelle les notions nécessaires pour la compréhension de la structure et des éléments essentiels pour la mise en œuvre d'un régulateur flou et qui seront exploitées dans le cadre de ce projet. Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté sur la (Figure III-2)

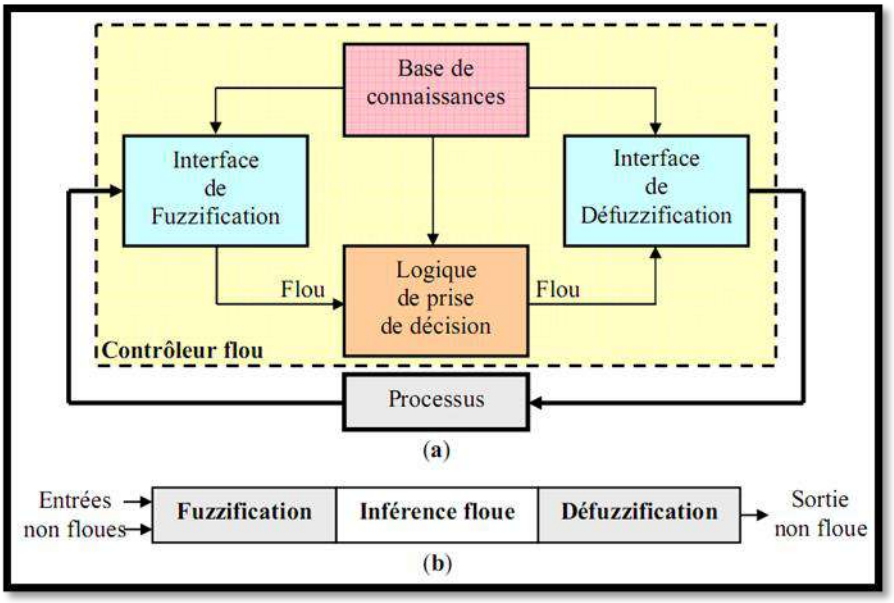


Figure III-2. a). Schéma synoptique d'un régulateur flou. b). Configuration d'un régulateur flou.

III. 4. 1 Base de connaissances

La base de connaissance comprend une connaissance du domaine d'application et les buts du contrôle prévu. Elle est composée :

1. D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation.
2. La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles : Si < condition > Alors < conséquence >.

III. 4. 2 Fuzzification

La Fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues).

Pour illustrer le mécanisme de la Fuzzification, nous allons donner un exemple en fixant comme valeur d'entrée e_k = 0.45. Le résultat de la Fuzzification est présenté sur la (Figure III-3). On remarque que pour cette erreur correspond les ensembles flous PP et PM avec les degrés d'appartenances $u_{pp}(e_k)$= 0.75 et $u_{pM}(e_k)$ = 0.25.

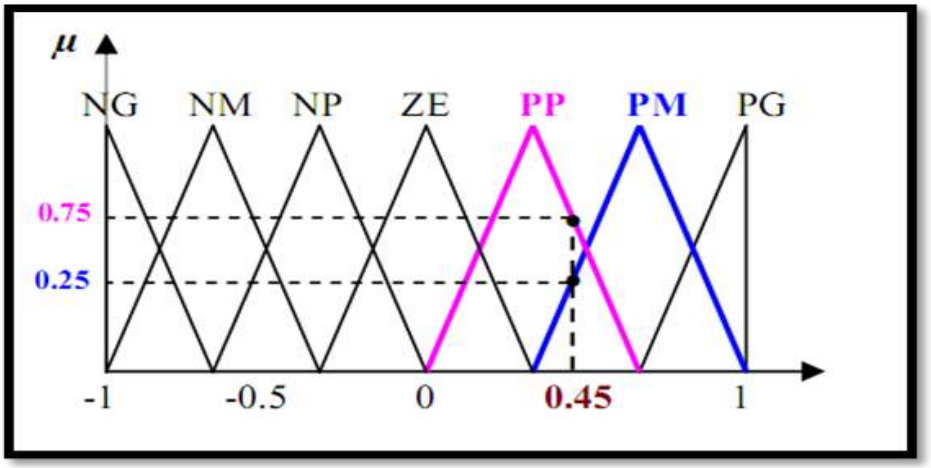


Figure III-3. Exemple de Fuzzification.

III. 4. 3 Règles d'inférence floue

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence, dans ce dernier cas, une matrice dite d'inférence rassemble toutes les règles d'inférence sous forme d'un tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle, le (Tableau III-1) présente la matrice d'inférence à sept règles [16].

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont : Max-Produit, Somme-Produit et Max-Min (Implication de Mamdani), cette dernière méthode est la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur "ET « par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction « Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "OU") par la fonction Max, [17].

Δe \ e	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau III-1. La matrice d'inférence à sept règles.

III. 4. 4 Défuzzification

Le bloc défuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables de sortie (non-floues).
- Effectue une défuzzification qui fournit un signal d'activation de commande non-floue à partir du signal flou déduit.

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour faire cette opération. La méthode de défuzzification choisie est souvent liée à la puissance de calcul du système flou [18]. Parmi les méthodes plus utilisées, on trouve :

a. Méthode du maximum :

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale. La méthode du maximum est simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité dans la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

b. Méthode de la moyenne des maximums

Cette méthode génère un signal de commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale [18].

c. Méthode du centre de gravité

Cette méthode est la plus utilisé dans les contrôleurs flous. Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité Δu_n peut être déterminé à l'aide de la relation générale suivante :

$$\Delta u_n = \frac{\int x.u(x)dx}{\int u(x)dx} \qquad \text{III-1}$$

III.5 Développement du régulateur flou

III. 5. 1 Description du régulateur

Notre but est de contrôler les courants rotoriques d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) afin de commander les puissances active et réactive de la MADA. Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani. Ce schéma est représenté sur la (Figure III-7), il comporte :

- Des facteurs de normalisation associent à l'erreur e, à sa variation Δe et à la variation de la commande (Δu) ;
- D'un bloc de Fuzzification de l'erreur et sa variation ;
- Des règles de contrôle flou ;
- La stratégie de commande est présentée par une matrice d'inférence du même type que celle présentée dans le (Tableau III-1) ;
- D'un bloc de Défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique ;
- D'un intégrateur.

La sortie du régulateur est donnée par :

$$v_{rd}{}^{r} = v_{rd}{}^{r}(k) + d\mu(k) \qquad \text{III-2}$$

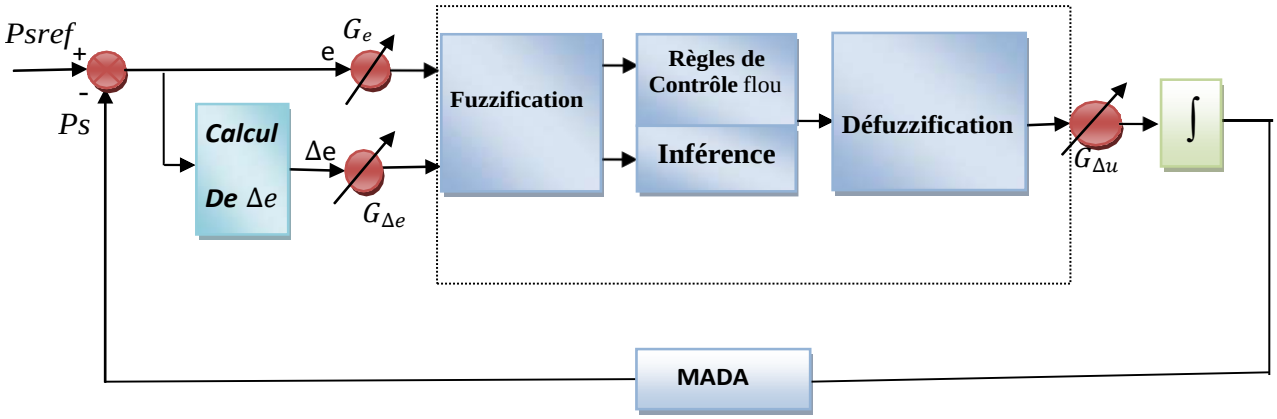


Figure III-4. Schéma bloc d'un régulateur flou.

Le contrôleur flou considéré utilise :

- Les fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales, ce choix est dû à la simplicité de la mise en œuvre ;
- Un univers de discours normalisé ;
- L'univers de discours est découpé en sept (réglage fin) pour les variables d'entrées et de sortie. Une subdivision très fine de l'univers de discours sur plus de sept ensembles flous n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système à réguler [18].
- L'implication de Mamdani pour l'inférence ;
- La méthode du centre de gravité pour la Défuzzification ;

(Figure III-5) représente les fonctions d'appartenance utilisées par le régulateur.

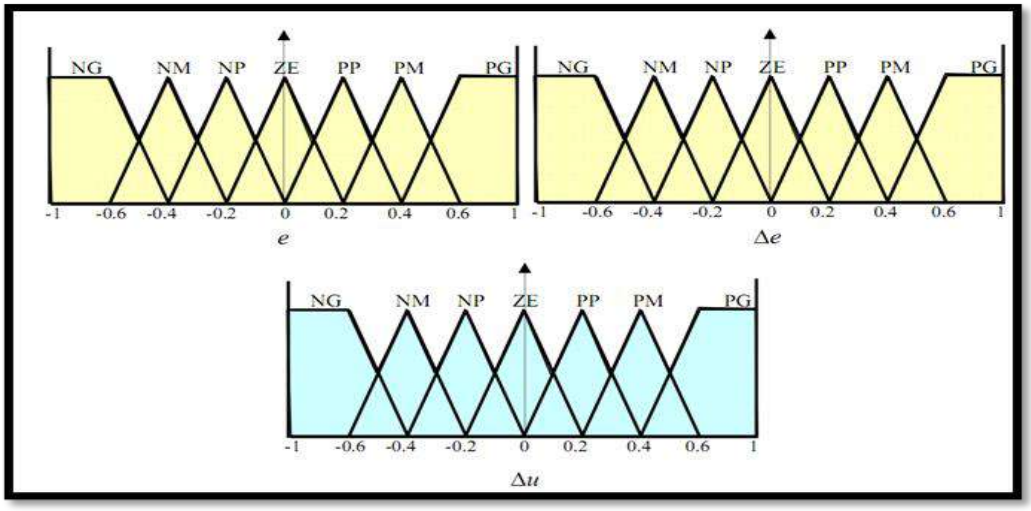


Figure III-5. Fonctions d'appartenance utilisées par le régulateur.

III. 5. 2 Loi de commande.

Cette loi est fonction de l'erreur et sa variation (μ=f(e,Δu)). Elle est donnée par :

$$u_{k+1}=u_k+G_{\Delta\mu}.\Delta\mu_{k+1} \qquad \text{III-3}$$

Avec :

$G_{\Delta\mu}$ Le gain associé à la commande μ_{k+1}.

$\Delta\mu_{k+1}$: La variation de la commande.

L'erreur e et la variation de l'erreur Δe sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} x_e = G_e.e \\ x_{\Delta e} = G_{\Delta e}.\Delta_e \end{cases} \qquad \text{III-4}$$

Avec :

G_e Et $G_{\Delta e}$ sont les facteurs d'échelle (normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce qu'on puisse avoir un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

III. 5. 3 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

Avantages :

- Le modèle mathématique non requis ;
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;

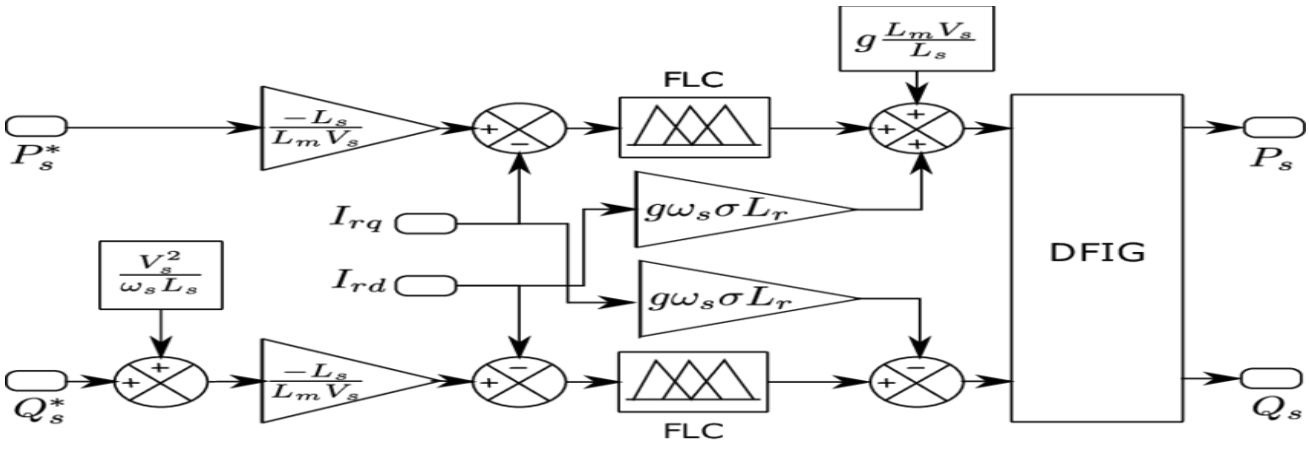
- La maîtrise de systèmes à régler avec un comportement complexe ;
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire) ;
- L'emploi possible aussi pour des processus rapides (grâce à des processus dédicacés) ;
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces ; La disponibilité des systèmes de développement efficaces, soit pour micro-processeur ou PC (solution logiciel), soit pour les circuits intégrés (processeurs dédicacés, fuzzy processors, solution matérielle)[15].

Inconvénients :

- Les règles doivent être disponibles ;
- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage ;
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable) ;
- Aucune méthode formelle pour l'ajustement ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférences contradictoires possible) [15].

III.6 Réglage des courants rotoriques de la MADA

Nous allons maintenant reprendre le même schéma de la commande vectorielle, du chapitre précédent, sauf que cette fois-ci les courants rotoriques sont régulés par des régulateurs flous (FigureIII-6).



FigureIII-6. Schéma bloc commande indirecte sans boucle de puissance avec des régulateurs flous.

Les deux régulateurs de courant sont identiques (régulateur de type Mamdani à sept classes), et possèdent les mêmes fonctions d'appartenance.

III.7 Résultats de simulation et interprétation :

Le test est effectué en appliquant des échelons différents avec un changement d'état à 2.5s (0 -1200w et 400- 0 VAR) successivement au niveau des puissances active et réactive pour assurer qu'un contrôle indépendant a bien été réalisé. L'expérience est réalisée via le logiciel MATLAB/SIMULINK.

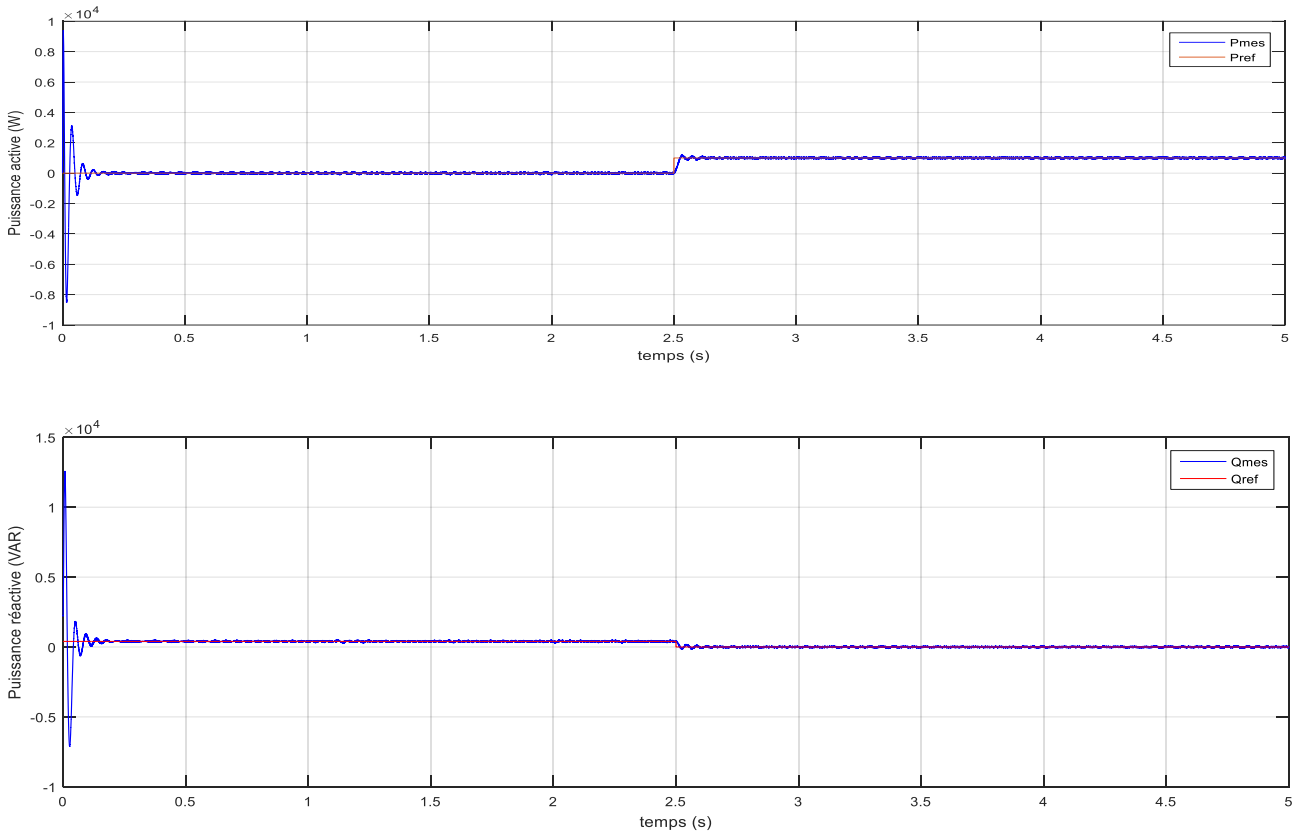
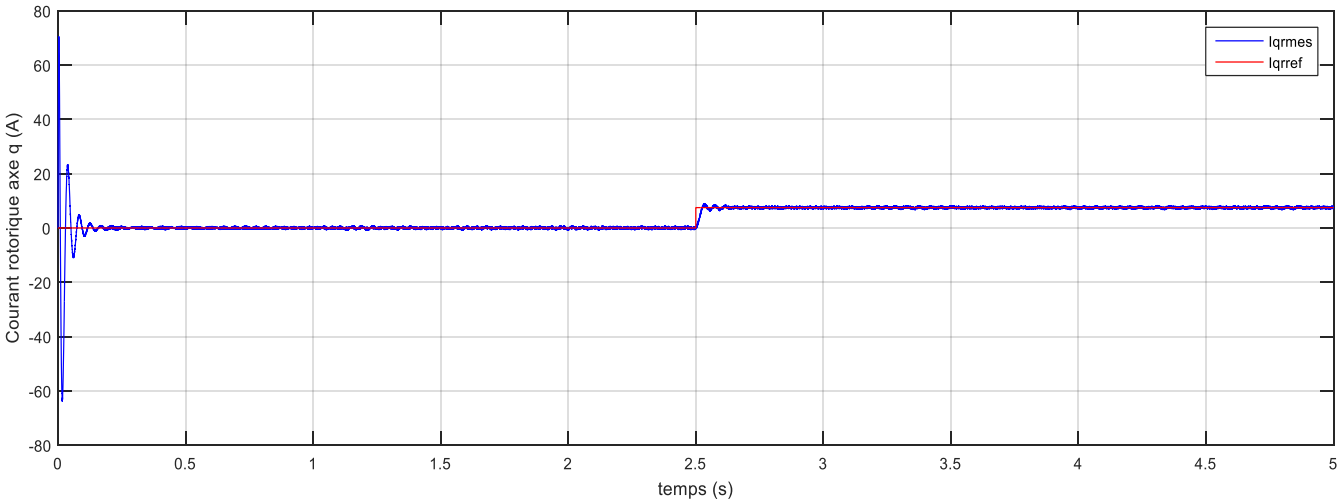


Figure III-7. Les puissances active et réactive (Ps,Qs)



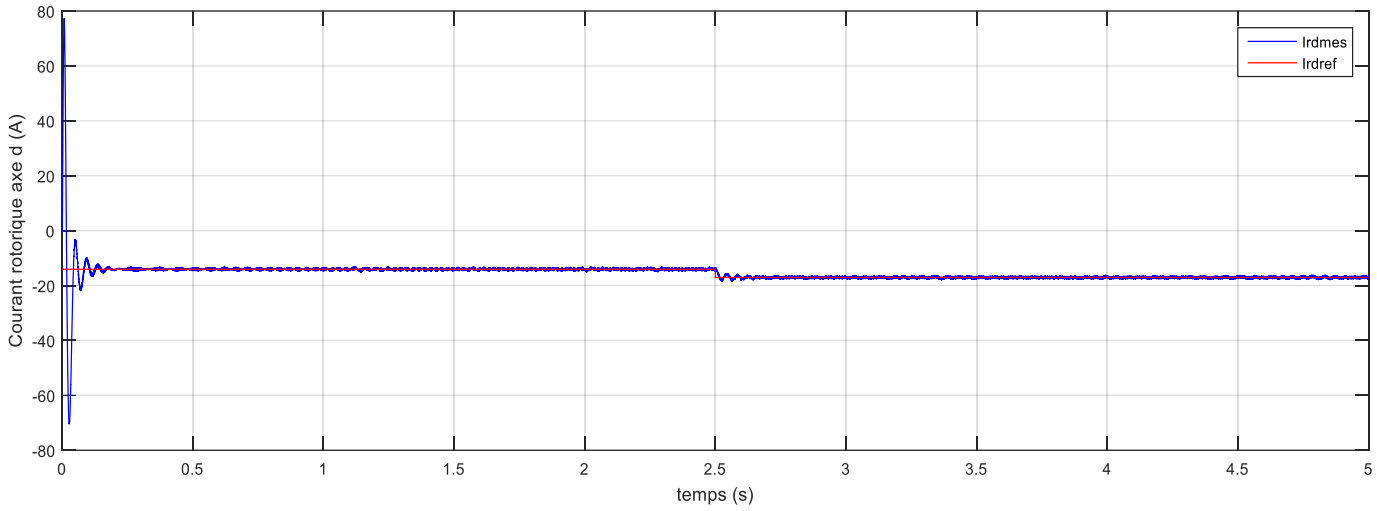


Figure III-8. Les courants rotorique (Irq et Ird).

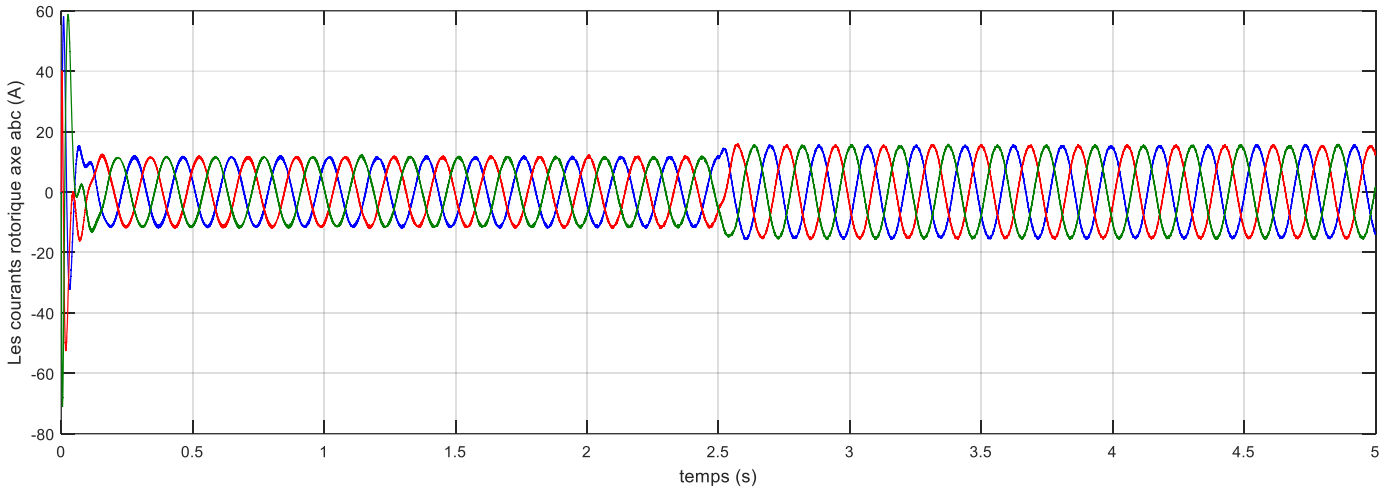


Figure III-9. Les courant rotoriques (abc).

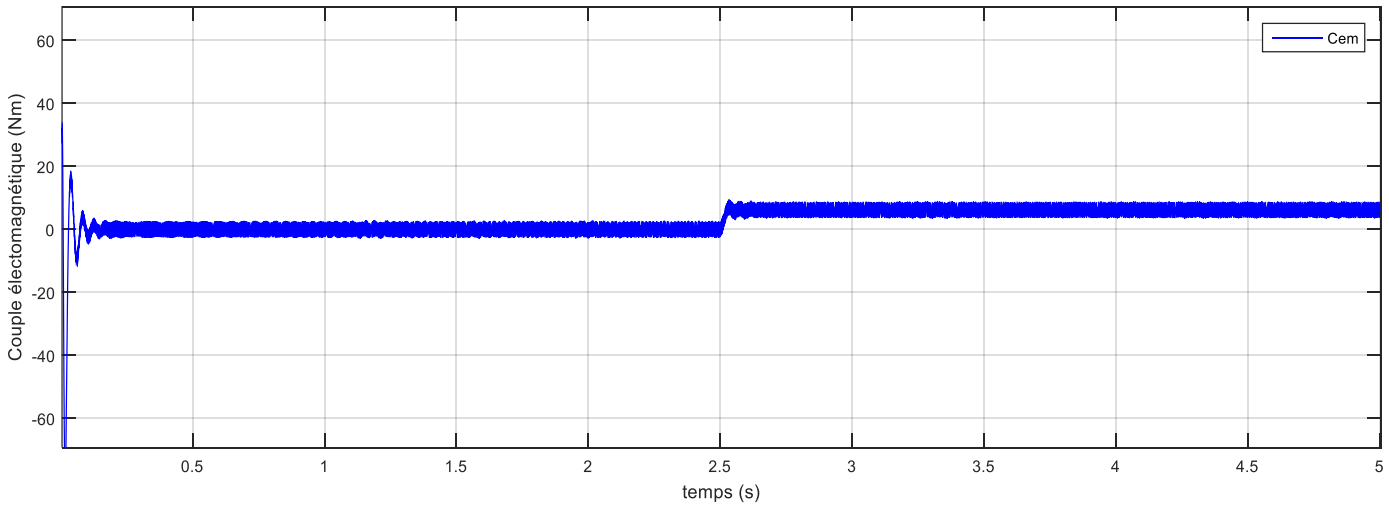


Figure III-10. Couple électromagnétique.

Nous remarquons que les valeurs mesurées des puissances active et réactive suivent parfaitement leurs références, au vu de ces résultats, une meilleure poursuite du régulateur flou par rapport à celle du régulateur PI présentée au chapitre II.

III.8 Tests de robustesse et interprétation

L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la MADA. En effet, dans un système réel, les paramètres de la MADA sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances, court-circuit …).

Pour le test de robustesse de la commande par les régulateurs flou et PI, nous avons étudié l'influence de la variation paramétrique de la résistance statorique (Rs) sur les performances de la commande.

Nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance statorique (Rs) à un certain temps de (T=4s). Les figures (III-11, III-12 III-13, III-14) illustrent les résultats du test de simulation.

D'après les résultats obtenus on remarque que, il Ya des perturbations au niveau de la régulation avec le PI, par contre dans la régulation avec régulateur flou il est plus robuste et donne des bons résultats.

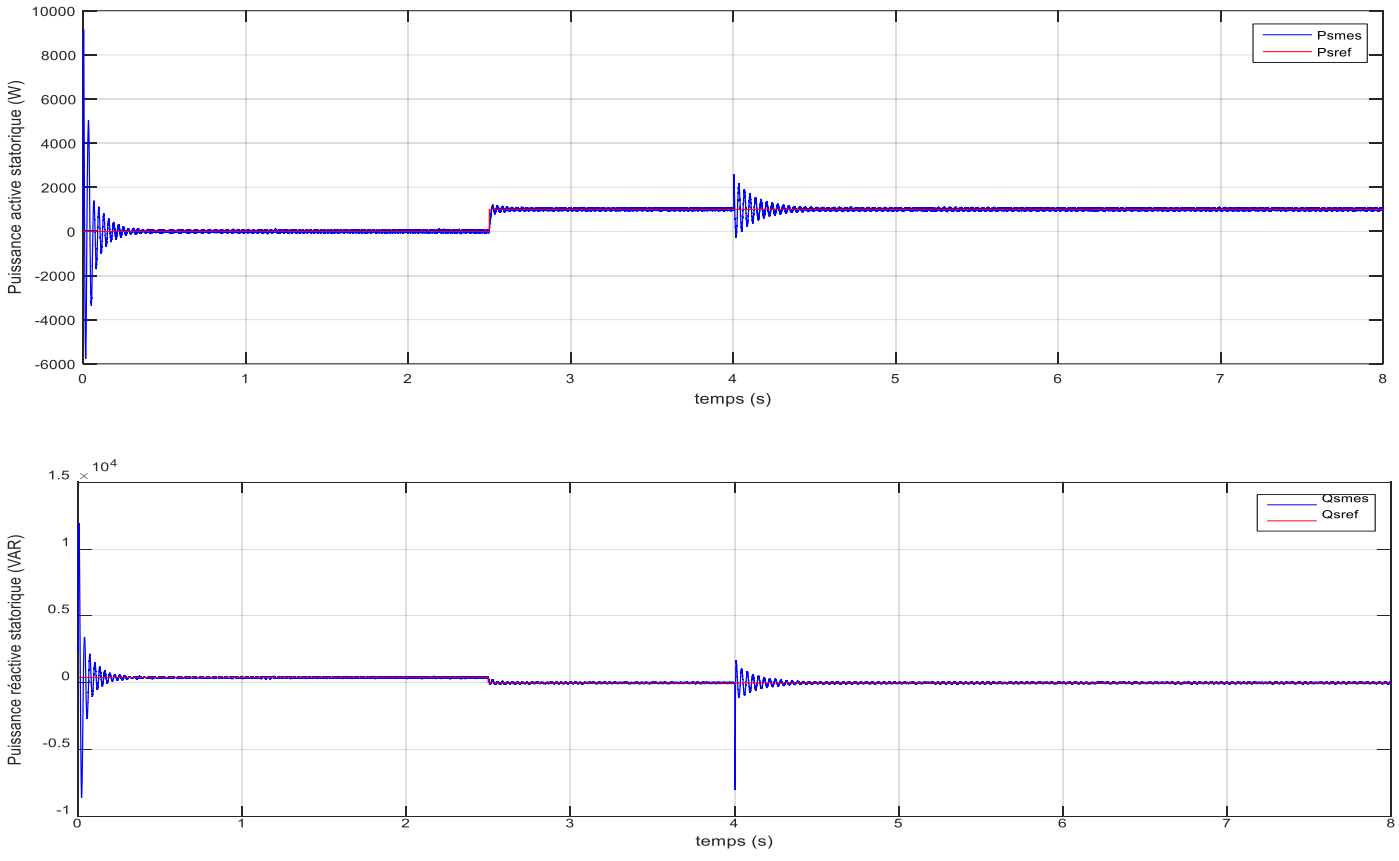


Figure III-11. Résultats de puissance (Ps,Qs) du test de robustes obtenue par le régulateur PI.

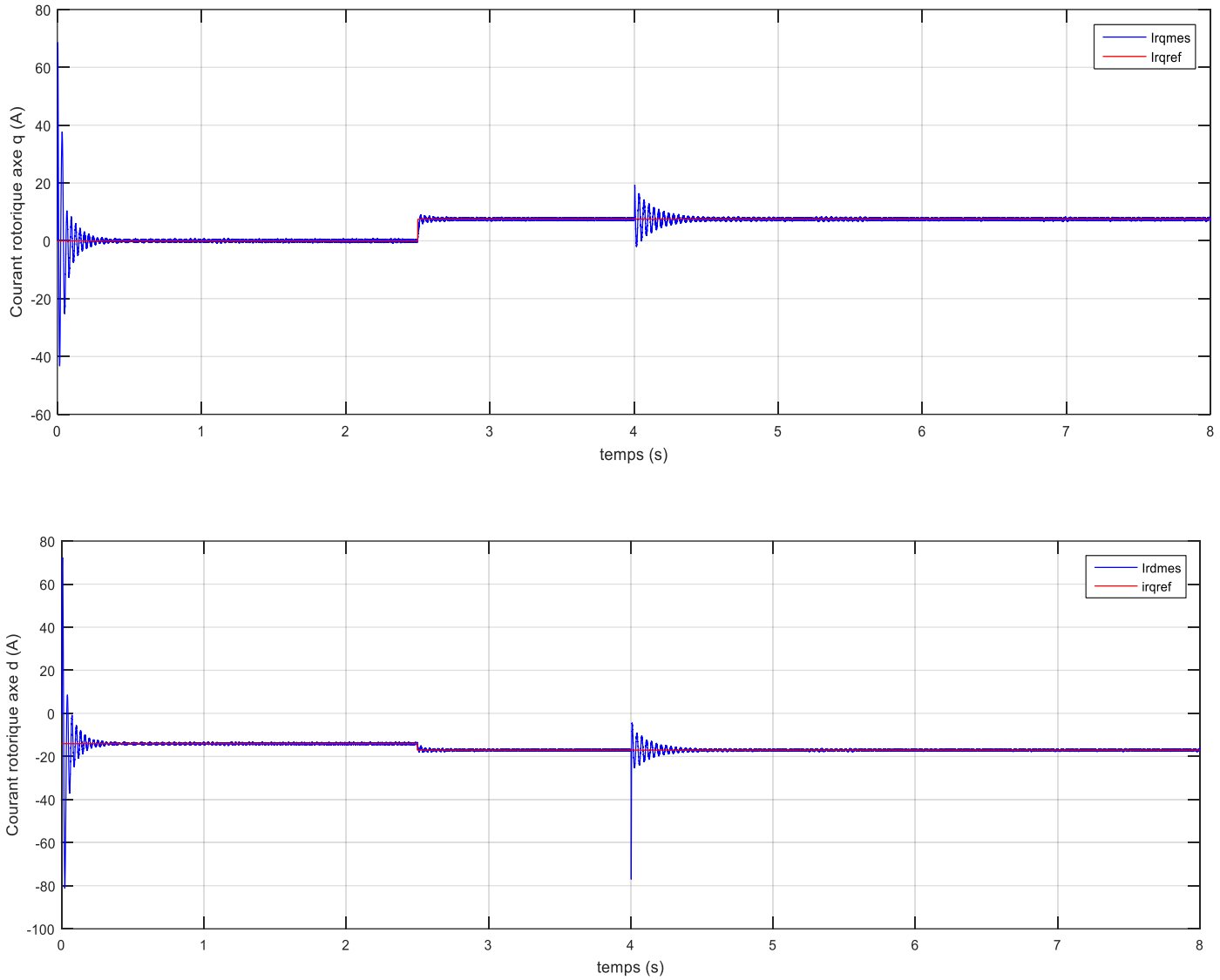
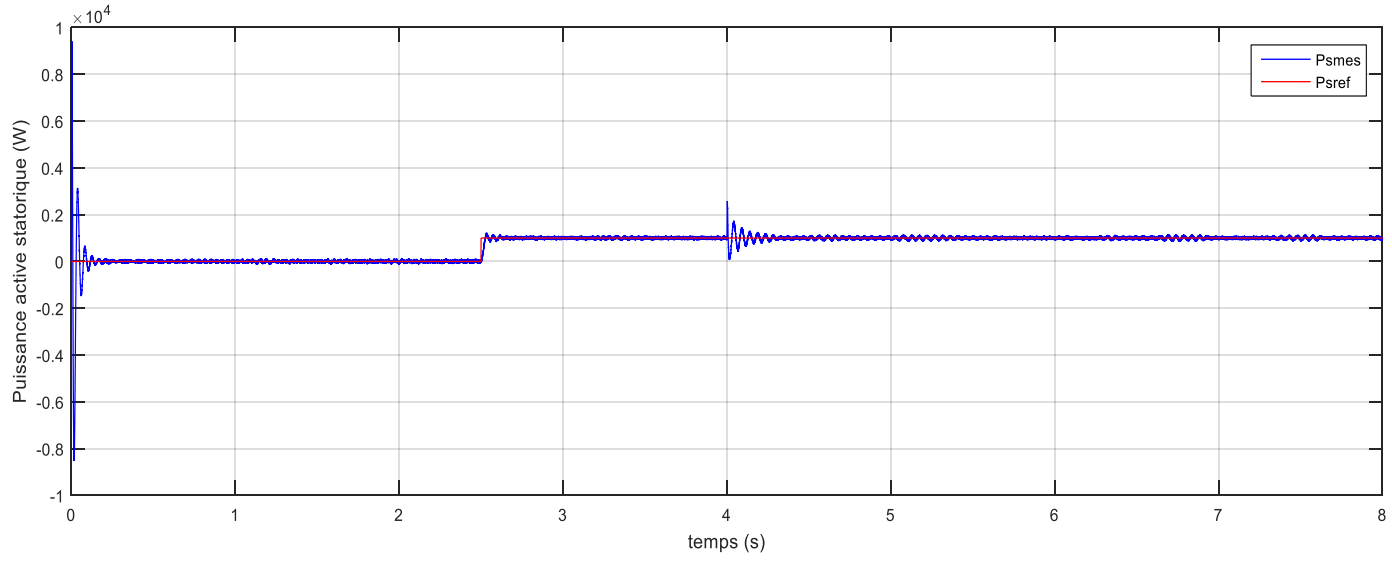


Figure III-12. Résultats de courant (Irq,Ird) du test de robustes obtenue par le régulateur PI.



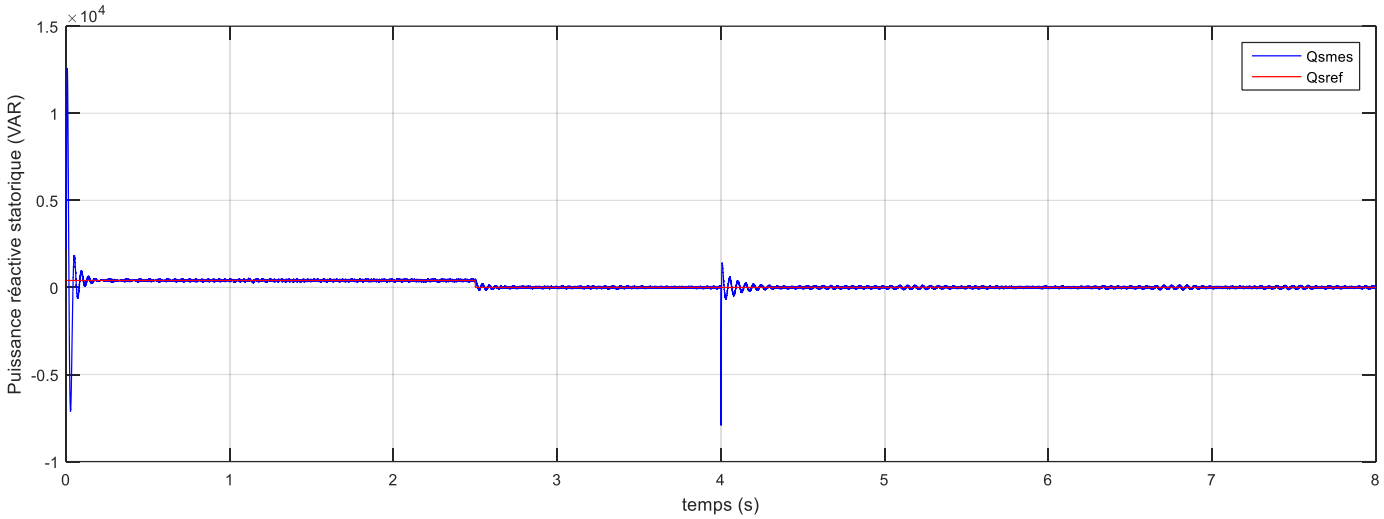


Figure III-13. Résultats de puissance (Ps,Qs) du test de robustes obtenue par le régulateur flou.

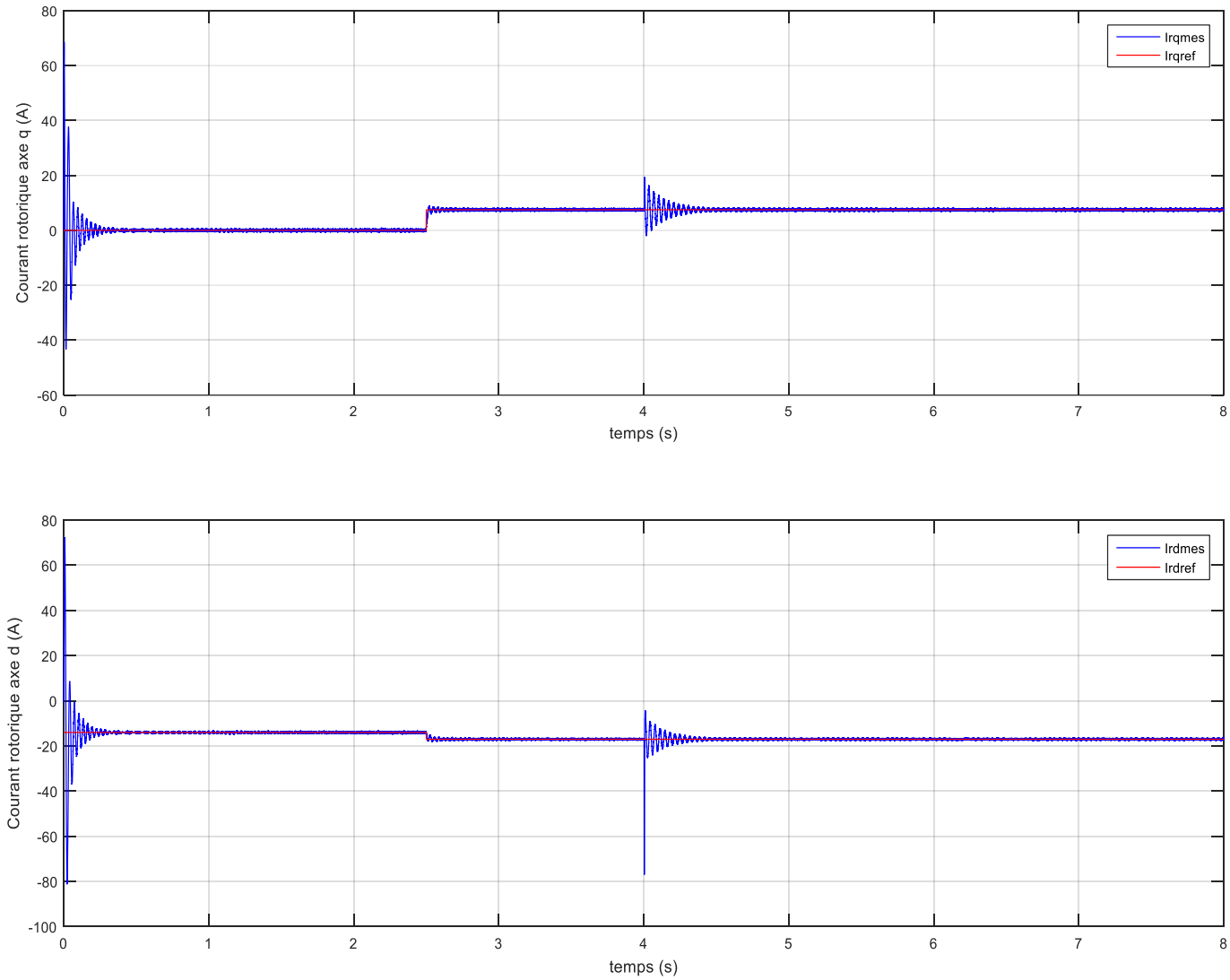


Figure III-14. Résultats de courant (Irq,Ird) du test de robustes obtenue par le régulateur flou.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et simulé la technique de la logique floue. Un régulateur flou utilisant la notion de tableau d'inférence est appliqué dans la commande vectorielle pour faire le réglage des puissances active et réactive statorique indirectement à travers le réglage des courants rotoriques de la MADA.

Les résultats de simulation obtenus montrent que le régulateur flou présente des performances de poursuite très satisfaisante, il a montré une bonne dynamique des puissances et des courants par rapport à celle du régulateur PI classique. En plus, le régulateur flou a montré une certaine robustesse vis-à-vis de la variation de certains paramètres de la machine.

Conclusion générale

Le but principal de ce mémoire est de réaliser une étude comparative de la commande vectorielle pour la régulation des puissances active et réactive d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques classique et avancée. On a réalisé la commande vectorielle indirecte pour le réglage découplé et indépendant des puissances active et réactive, le réglage est effectué via le régulateur PI classique ensuite ce dernier est remplacé un régulateur flou. Les résultats de l'étude sont obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art et généralités sur les systèmes éoliens avec une étude plus détaillée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant la structure de cette machine, les principes du fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Ensuite, nous avons consacré le deuxième chapitre à la modélisation de la MADA en utilisant la transformation de Park, une étude comparative entre les deux types de fonctionnement à vide et en charge. L'utilisation de la commande vectorielle (indirecte sans boucle de puissance) à orientation du flux statorique est appliquée pour la régulation des puissances active et réactive via le réglage des courants rotoriques en utilisant un régulateur PI afin d'alimenter la MADA au rotor par un onduleur de tension de deux niveaux commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Le troisième et le dernier chapitre, nous avons étudié l'état de l'art, les différentes fonctions, les avantages et les inconvénients du contrôleur logique floue, ce dernier a pour objective de remplacer le régulateur PI classique afin d'obtenir des bonnes performances dynamiques.

Une comparaison entre les deux régulateurs d'après les résultats obtenue par le PI classique a montré l'amélioration des performances dynamique, ce qui rend le régulateur flou un choix très acceptable pour les systèmes d'entrainement nécessitant des réglages rapides, il est précis et moins sensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques.

Annexe

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (M.A.D.A) :

Paramètres	Signification
P = 1.5 [KW]	puissance nominal consommé
Ω =1500 [tr/m]	Vitesse nominale
p =2	Paire de pôles
V = 220 V/50 [Hz]	Tension d'alimentation /fréquence
Rs =4.08[Ω]	Resistance du stator
Rr =0.435[Ω]	Resistance du rotor
Ls =0.202[H]	Inductance du stator
Lr =0.0272[H]	Inductance du rotor
Msr = 0.0272[H]	Inductance mutuelle
J = 0.0361 [Kg.m^2]	Inertie de rotor
f = 0.00843 [N.m/rad/s]	Coefficient de frottement

Bibliographie

[1] A. Lebsir, A. Bentounsi, M. Benbouzid, et H. Mangel, « Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study », p. 16.

[2] V. Nelson, *Wind energy: renewable energy and the environment*. Boca Raton: CRC Press, 2009.

[3] boyette arm, « controle commande d'un generateur asynchrone a double alimentation avec systeme de stockage pour la production eolienne », p. 137.

[4] B. Robyns *et al.*, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *J3eA*, vol. 5, p. 003, 2006, doi: 10.1051/j3ea:20060028.

[5] H. Abu-Rub, M. Malinowski, et K. Al-Haddad, « Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation », p. 827.

[6] S. E. Aimani, « Modèlisation de différentes technologies d'éoliennes », p. 226.

[7] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », p. 199.

[8] F. Poitiers, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », p. 167, 2006.

[9] Y. Tang et L. Xu, « A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System », p. 6.

[10] L. Hanzo *et al.*, « IEEE Press 445 Hoes Lane Piscataway, NJ 08854 », p. 633.

[11] A. Abdelbaset, Y. S. Mohamed, A.-H. M. El-Sayed, et A. E. H. A. Ahmed, *Wind Driven Doubly Fed Induction Generator*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-70108-0.

[12] E. Elhoussin, G. Feld, Y. Amirat, M. Benbouzid, et F. Le, « Mise en œuvre expérimentale d'une plateforme de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice asynchrone double alimentation. », p. 22, 2020.

[13] F. Malrait, « Problèmes d'identification et d'observabilité du moteur à induction pour la variation de vitesse industrielle "« sans capteur »" », p. 142.

[14] K. M. Passino et S. Yurkovich, *Fuzzy control*. Menlo Park, Calif: Addison-Wesley, 1998.

[15] K. Loukal et L. Benalia, « Type-2 Fuzzy Logic Controller of a Doubly Fed Induction Machine », *Adv. Fuzzy Syst.*, vol. 2016, p. 1- 10, 2016, doi: 10.1155/2016/8273019.

[16] « Fuzzy Logic Toolbox User's Guide », p. 235.

[17] M. E. Azzaoui et H. Mahmoudi, « Fuzzy-PI control of a doubly fed induction generator-based wind power system », p. 13.