

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique
Option : Electromécanique

THEME

**Etude par Simulation d'une Génératrice
Asynchrone à Double Alimentation en
Fonctionnement Autonome**

Présenté par :

M^r ABDOUNE Kaddour

M^r BRAHMI Louhab

Encadré par :

M^r D. AOUZELLAG

M^r F. ABDOUNE

Promotion 2012-2013

Remerciements

*C'est un agréable plaisir pour nous d'exprimer nos vifs remerciements à Monsieur **Djamel AOUZELLAG** maitre de conférence à l'université A. Mira de Bejaia, d'avoir accepté de diriger ce travail de recherche et pour la confiance et l'intérêt qu'il nous a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail, pour sa disponibilité ainsi de nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques.*

*Nous avons une reconnaissance infinie auprès de Monsieur **Fateh ABDOUNE** doctorant à l'université A. Mira de Bejaia pour la précieuse assistance durant la réalisation de ce travail. Nous avons apprécié vos qualités humaines et professionnelles qui ont toujours suscité nos admirations.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jurys, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail en participant aux jurys d'évaluation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de pré ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Dédicaces

À qui je dédie cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

À Mes chers frères ;

À Mes sœurs et leurs familles ;

À tous mes amis ;

À Mon binôme Kaddour ;

À tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.

Louhab BRASMI

Dédicaces

À qui je dédie cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

À Mes chers grands parents;

À Mes chers frères ;

À Mes sœurs et leurs familles ;

À tous mes amis ;

À Mon binôme louhab;

À tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.

Kaddour ABDOUINE

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergies électriques utilisés dans les systèmes isolés et autonome	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Sources d'énergie électrique.....	4
I.2.1 Sources d'énergie renouvelable	4
I.2.1.1 Hydraulique	5
I.2.1.2 Eolienne.....	6
I.2.2 Autres sources d'énergie électrique	7
I.2.2.1 Groupe électrogène.....	7
I.2.2.2 Centrale à vapeur	8
I.2.2.3 Centrale à gaz	8
I.2.2.4 Centrale nucléaire	9
I.3 Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique.....	9
I.3.1 Cas des systèmes connectés aux réseaux	9
I.3.1.1 Fonctionnements à vitesse fixe.....	9
I.3.1.2 Fonctionnement à vitesse variable.....	10
a) Machine asynchrone à double alimentation.....	11
b) Machine asynchrone à cage	11
c) Machine synchrone	12
I.3.2 Cas des systèmes en fonctionnement isolé et autonome	12
I.3.2.1 Machine synchrone.....	13
I.3.2.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	13
I.3.2.1.2 Machines synchrones à aimants permanents	13
A. Structure avec redresseur à diodes.....	13
B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur	14
C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont	14
D. Structure avec redresseur à MLI.....	15
I.3.2.1.3 Machines asynchrones à cage d'écureuil.....	16
A. Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes	16
A.1 Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe	16
A. 2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes.....	16

B. Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation	17
B. 1 Capacités de compensation en série.....	17
B.2 Générateurs de puissance réactive	18
I.3.2.1.4 Machines asynchrone à double alimentation.....	19
I.3.2.1.4.1 Principe de fonctionnement de la MADA	19
I.3.2.1.4.2 Principe d'auto-excitation des machines asynchrones.....	20
I.3.2.1.4.3 Différents modes de fonctionnement de la MADA	20
I.3.2.1.4.4 Structure des machines asynchrones à double alimentation	22
I.3.2.1.4.4.1 Structure partiellement interfacée avec la charge.....	22
I.3.2.1.4.4.2 Structure entièrement interfacée avec la charge.....	23
I.3.2.1.4.5 Domaines d'application	24
I.3.2.1.4.6 Avantage et inconvénient de la MADA.....	25
I.3.2.1.4.6.1 Avantages de la MADA	25
I.3.2.1.4.6.2 Inconvénients de la MADA.....	26
I.4 Choix de la structure envisagée pour notre étude en fonctionnement isolé et autonome dans les prochains chapitres	26
I.5 Conclusion	27

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1 Introduction	29
II.2 Modélisation de la MADA	29
II.2.1 Hypothèses simplificatrices	30
II.2.2 Modèle triphasée de la MADA	30
a- Equations électriques	31
b- Equations magnétiques	32
c- Equation mécanique :.....	33
II.2.3 Modèle biphasé de la MADA	33
II.2.3.1 Application de la transformation de Park à la MADA.....	34
a- Equations électriques	35
b- Equations magnétiques	36
c- Expression du couple électromagnétique.....	36
II.3 Choix du référentiel (dq)	36
a- Référentiel lié au stator.....	36

b- Référentiel lié au rotor.....	37
c- Référentiel lié au champ tournant.....	37
II.4 Représentation complexe du modèle diphasée.....	37
II.5 Bilan de puissances.....	38
II.6 Conclusion.....	40

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA et contrôle de la tension

III.1 Introduction.....	41
III.2 Commande vectorielle de la MADA.....	41
III.2.1 Principe de la commande vectorielle.....	41
III.2.2 Orientation de flux.....	42
III.3 Etude de la variation des courants et tensions de la MADA.....	48
III.3.1 Variation des courants.....	48
III.3.2 Variation des tensions.....	49
III.4 Modélisation de convertisseur triphasé à MLI.....	50
III.4.1 Tensions des phases.....	50
III.4.2 Tensions composées de la charge.....	51
III.4.3 Tensions simple de la charge.....	51
III.5 Commande MLI.....	52
III.6 Modélisation de bus continu.....	53
III.7 Conclusion.....	54

Chapitre IV : Résultats de simulations

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Simulation global de la MADA entièrement interfacée.....	55
IV.2.1 Auto-amorçage.....	56
IV.2.2 Impact de variation de la charge.....	58
IV.2.2.1 Charge purement résistive.....	58
IV.2.2.2 Charge à effet capacitif.....	61
IV.2.2.3 Charge à effet inductif.....	64
IV.2.3 Impact de variation de la vitesse.....	66
IV.3 Conclusion.....	70
<i>Conclusion général</i>	71

NOTATIONS

a_s, b_s, c_s	Axes magnétiques des enroulements statoriques
a_r, b_r, c_r	Axes magnétiques des enroulements rotoriques
C_{dc}	Capacité du condensateur du bus continu [F]
(d,q)	Système d'axes du repère tournant
$F^s(s)$	Fonction de transfert liant tensions-courants statoriques
$F^r(s)$	Fonction de transfert liant tensions-courants rotoriques
g	Glissement de la génératrice
\vec{i}_s, \vec{i}_r	Vecteurs courants stator et rotor définis dans le repère de Park [A]
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	Composantes de courant statorique dans le repère (S_α, S_β) [A]
i_{ds}, i_{qs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q) [A]
i_{dr}, i_{qr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d, q) [A]
i_s, i_r	Module du courant du stator et du rotor [A]
i_{cm}	Courant continu modulé par le convertisseur coté machine [A]
i_{cr}	Courant continu modulé par le convertisseur coté réseau [A]
i_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu [A]
J	Inertie de l'arbre de la génératrice [kg.m^2]
L_s	Inductance cyclique statorique de la machine [H]
L_r	Inductance cyclique rotorique de la machine [H]
L_m	Inductance magnétisante de la machine [H]
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statoriques [W] [VAR]
P_r, Q_r	Puissances active et réactive rotoriques [W] [VAR]
P_m	Puissance mécanique captée par la génératrice [W]
P_{ch}	Puissance de charge [W]
P_{ele}	Puissance électromagnétique [W]
R_s	Résistance d'une phase du stator [Ω]
R_r	Résistance d'une phase du rotor [Ω]
s	Opérateur de Laplace
S_1, S_2, S_3	Etats des interrupteurs hauts des trois bras de l'onduleur

S_4, S_5, S_6	Etats des interrupteurs bas des trois bras de l'onduleur
(S_α, S_β)	Système d'axes lié au stator
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine sur l'arbre rapide [N.m]
\bar{v}_s, \bar{v}_r	Vecteurs tensions stator et rotor définis dans le repère de Park [V]
v_{ds}, v_{qs}	Composantes de la tension statorique dans le repère (d, q) [V]
v_{dr}, v_{qr}	Composantes de la tension rotorique dans le repère (d, q) [V]
v_s, v_r	Module de la tension du stator et du rotor [V]
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur du bus continu [V]
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	Tensions de sortie de l'onduleur rapportées au point milieu [V]
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions de sortie de l'onduleur rapportées au point neutre [V]
Ω_m	Vitesse de rotation de la génératrice [rd/s]
Ω_s	Vitesse du champ tournant du stator [rd/s]
Ω_r	Vitesse du champ tournant du rotor [rd/s]
$\bar{\phi}_s, \bar{\phi}_r$	Vecteurs flux stator et rotor définis dans le repère de Park [Wb]
$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$	Coefficient de dispersion entre le stator et le rotor
ϕ_{ds}, ϕ_{qs}	Composantes du flux statorique dans le repère (d, q) [Wb]
ϕ_{dr}, ϕ_{qr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q) [Wb]
ϕ_s, ϕ_r	Module du flux du stator et du rotor [Wb]
ω_s, ω_r	Pulsations respectives des grandeurs statoriques et rotoriques [rd/s]
ω_m	Vitesse de rotation électrique du rotor de la génératrice [rd/s]
ω_n	Pulsation naturelle [rd/s]
ω_{gl}	Vitesse angulaire de glissement
θ_r	L'angle électrique du champ du rotor par rapport au stator [°]
θ_s	L'angle électrique du champ du stator par rapport au stator [°]
θ_m	Position angulaire du rotor par rapport au stator [°]

Indices

X^*	Indique la valeur de référence
X_n	Indique la valeur nominale
X_m	Indique la valeur maximale
\bar{X}^*	Indique le conjugué d'un vecteur complexe
\Re	Indique la partie réelle d'un vecteur complexe
\Im	Indique la partie imaginaire d'un vecteur complexe

Table des figures

Figure I.1	Système basé sur une machine asynchrone à double alimentation	11
Figure I.2	Système basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable	12
Figure I.3	Machine synchrone avec redresseur à diodes	14
Figure I.4	Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur	14
Figure I.5	Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	15
Figure I.6	Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	15
Figure I.7	Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.....	17
Figure I.8	Machine asynchrone auto – excitée avec compensation série	18
Figure I.9	Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge	18
Figure I.10	Phénomène d’auto-amorçage	20
Figure I.11	Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	21
Figure I.12	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	22
Figure I.13	Système à base de MADA partiellement interfacée avec la charge.....	22
Figure I.14	Système à base de MADA totalement interfacée avec la charge	24
Figure II.1	Stator de la MADA.....	29
Figure II.2	Rotor de la MADA	29
Figure II.3	Représentation schématique de la MADA dans le système triphasé.....	31
Figure II.4	Système d’axes réels et système d’axes fictifs	34
Figure II.5	Position des différents systèmes d’axes.....	35
Figure II.6	Schéma équivalent du modèle de la machine en représentation diphasée.....	38
Figure III.1	Equivalence entre la commande d’une MCC et la commande vectorielle d’une asynchrone.....	42
Figure III.2	Orientation du flux statorique	43
Figure III.3	Boucles de régulation des courants du stator et du rotor	45
Figure III.4	Schéma de commande d’une MADA en fonctionnement autonome.....	47
Figure III.5	Variation du flux statorique en fonction de la vitesse désirée.....	49
Figure III.6	Schéma d’un convertisseur triphasé.....	50
Figure III.7	Schéma fonctionnel d’une réalisation analogique d’une MLI	52
Figure III.8	Principe de la commande MLI Intersective	53

Figure III.9 Représentation du bus continu	53
Figure IV.1 Dispositif de commande global d'une MADA en fonctionnement autonome.....	56
Figure IV.2 Allures de tension du bus continu	57
Figure IV.3 Zoom sur comportement de tension	57
Figure IV.4 Composantes directe et quadrature du flux statorique	57
Figure IV.5 Composantes directe et quadrature du flux rotorique.....	57
Figure IV.6 Composantes directe et quadrature du courant statorique.....	58
Figure IV.7 Composantes directe et quadrature du courant rotorique.....	58
Figure IV.8 Puissances active et réactive statoriques	58
Figure IV.9 Puissances active et réactive rotorique.....	58
Figure IV.10 Allures de tension du bus continu	59
Figure IV.11 Composantes directe et quadrature du flux rotorique	59
Figure IV.12 Composantes directe et quadrature du flux statorique	59
Figure IV.13 Allures des puissances statoriques	60
Figure IV.14 Allures des puissances rotoriques.....	60
Figure IV.15 Rapport des puissances	60
Figure IV.16 Allures des puissances de la charge	60
Figure IV.17 allures de courant de charge	60
Figure IV.18 Zoom sur le courant de charge	60
Figure IV.19 allures de tension de charge.....	61
Figure IV.20 Zoom sur la tension de charge.....	61
Figure IV.21 courant et tension d'une phase	61
Figure IV.22 Allure du couple électromagnétique.....	61
Figure IV.23 Allures de tension du bus continu.....	62
Figure IV.24 Composantes directe et quadrature du flux statorique	63
Figure IV.25 Composantes directe et du flux rotorique.....	63
Figure IV.26 Allures de tension de charge	63
Figure IV.27 Zoom sur la tension de charge.....	63
Figure IV.28 Allure de courant de charge.....	63
Figure IV.29 Zoom sur les courants de charge	63
Figure IV.30 Courant et tension d'une phase	64
Figure IV.31 Zoom sur le courant et la tension	64

Figure IV.32 Allures des puissances de la charge	64
Figure IV.33 Allure de la variation de couple électromagnétique.....	64
Figure IV.34 Tension de bus continu.....	65
Figure IV.35 Composantes directe et quadrature de flux statorique.....	65
Figure IV.36 Composantes directe et quadrature du flux rotorique	65
Figure IV.37 Allures des courants de charge	65
Figure IV.38 Allures des tensions de charge	66
Figure IV.39 Zoom sur le courant et la tension d'une phase	66
Figure IV.40 Allures des puissances de charge	66
Figure IV.41 Courbe couple électromagnétique	66
Figure IV.42 Profil de vitesse	67
Figure IV.43 Tension du bus continu.....	68
Figure IV.44 Composantes directe et quadrature du flux statorique	68
Figure IV.45 Composantes directe et quadrature du flux rotorique	68
Figure IV.46 Allures des courants de charge	68
Figure IV.47 Allures des tensions de charge	68
Figure IV.48 allure de courant et tension d'une phase	69
Figure IV.49 Allures des courants statoriques	69
Figure IV.50 Allures des courants rotoriques	69
Figure IV.51 Allure de la puissance de la charge	69
Figure IV.52 Allure de couple électromagnétique.....	69

Introduction générale

Introduction générale

La croissance de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète [8]. Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables.

La maîtrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine, autant elle fut un facteur de construction et de création de richesse. D'une part, l'évolution démographique de la planète, implique une progression durable des besoins énergétiques. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et rapproche l'échéance de leur épuisement [21]. Cette situation, ajoutée à la conviction grandissante que le changement climatique d'origine humaine est réel et que les émissions de dioxyde de carbone à effet de serre y contribuent grandement. On suscite un nouvel intérêt dans les sources d'énergie renouvelables sans carbone. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

Jusqu'à présent, une grande partie des utilisateurs de l'énergie électriques sont raccordés au réseau public. Pourtant, un des domaines où les technologies renouvelables peuvent se développer de façon substantielle est celui de l'électrification rurale ou des sites isolés. Quand les méthodes conventionnelles de fourniture d'énergie électrique comme l'extension du réseau et l'utilisation de générateurs diesel deviennent trop coûteuses ou difficiles à implémenter, les technologies renouvelables, capables de générer de l'électricité sur place, sont une possibilité très intéressante, tant au niveau technique qu'économique.

D'autre part, les systèmes individuels qui fournissent de l'électricité à des petites communautés sont de plus en plus nombreux. On peut situer dans ce chemin, des systèmes hybrides avec un support diesel, photovoltaïque et/ou avec un moyen de stockage de l'énergie

sont populaires pour les zones éloignées [8]. Dans la gamme des petites puissances, la tendance est de développer des systèmes commandés de plus en plus efficaces, utilisant des structures de conversion à découpage électronique pour élargir la plage exploitable de vitesses.

Actuellement un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux systèmes de conversion à base de machines asynchrones à rotor bobiné. Cet intérêt est du aux degrés de liberté qu'elle offre cette catégorie de machine, du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. De plus, ses capacités de réglage pourraient lui permettre de participer au réglage de tension [7]. C'est dans ce cadre que nous allons développer notre étude sur un système de conversion basé sur une machine asynchrone double alimentée, permettant de produire la puissance nécessaire pour une alimentation d'un site isolé, ce système sera caractérisé par une tension qu'admise une fréquence et une amplitude fixe tout en offrant la meilleure qualité d'énergie. Le mémoire sera organisé en quatre chapitres, en voici une brève description :

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres, une conclusion générale et une bibliographie. Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les différentes sources d'énergies renouvelables, suivies par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés, sachant qu'une attention particulière est consacrée pour la conversion d'énergie basé sur la MADA pour fonctionnement dans un site isolé tout en indiquant les points fort de la structure a étudié, les domaines de son applications et ces inconvénients. Dans le deuxième chapitre, on présente la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, pour cela on fait appel à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park dans le but de réduire la complexité du système et de faciliter sa mise en équation. La structure a étudié, consiste en une MADA dont les deux cotés, stator et rotor, sont alimentés par des convertisseurs triphasés commandables par MLI.

Le troisième chapitre est affecté pour présenter la commande de la MADA en tant que génératrice à vitesse variable, les grandeurs de commande utilisées seront détaillées. Afin d'aborder la commande, nous commencerons tout d'abord par établir les équations dynamiques classiques de la machine, par la suite, une stratégie de commande vectorielle basée sur l'orientation du flux statorique sera proposée. Le quatrième chapitre se focalisera sur les principaux moyens de réglage de tension, nous allons illustrer à l'aide des résultats de

simulation l'efficacité de la commande utilisée pour régler la tension et les performances d'utilisation de la MADA pour la conversion d'énergie dans les sites isolés ou éloignés

Enfin, le travail sera achevé par une conclusion générale et des perspectives envisageables dans l'avenir.

Chapitre I

**Généralités sur les différentes chaînes
de conversion d'énergie électrique
utilisée dans les systèmes isolés et
autonomes**

I.1 Introduction

Pour satisfaire la demande d'électricité il existe une grande variété de moyens de production, dont les caractéristiques technico-économiques sont très dissemblable, depuis les équipements hydrauliques, pour lesquelles les investissements sont élevés et les coûts proportionnels pratiquement nuls, jusqu'aux turbines à gaz, où le combustible est un poste important du prix de revient [1].

Dans le sillage des avancées technologiques des unités de production de masse, l'utilisation de petites systèmes pour la production d'énergie dans l'envie d'alimenter des sites isolées ou autonomes, suit une progression relativement modique de part les attraits économiques limités.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter quelques types de centrales électrique, présenter un état d'art sur les différentes chaines utilisées dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique soit dans les systèmes connectés au réseau électrique (moyennes et grandes puissances) ou dans les systèmes isolés et autonomes (petites puissances), ces derniers font l'objet de notre étude.

Nous commençons dans la première partie de ce chapitre par la description des différentes sources d'énergie électrique ; renouvelable, à combustibles fossiles et à combustibles nucléaires.

La deuxième parties est consacrées à la description des différentes chaines de conversion d'énergie soit à vitesse fixe ou à vitesse variable employées dans les systèmes connectés au réseau électrique et dans les systèmes isolés et autonomes, une attention particulière est évidemment accordée à ces dernières.

En suite, nous choisissons les architectures qui feront l'objet de notre étude en fonctionnement isolé et autonome.

I.2 Sources d'énergie électrique

I.2.1 Sources d'énergie renouvelable

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. De plus, la production peut être centralisée ou décentralisée. En revanche, elle se caractérise par un rendement relativement faible, un coût important et une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables.

Mais l'utilisation des ressources renouvelables, en dehors des grands hydrauliques, restent généralement limitée aux sites isolés où le coût des systèmes renouvelables devient compétitif par rapport aux autres moyens de production d'électricité du fait de l'acheminement très coûteux de l'électricité [2].

I.2.1.1 Hydraulique

Les centrales hydrauliques sont aujourd'hui les premières sources d'énergie renouvelable [4], qui ont une forme de production d'énergie répondant aux trois critères fixés dans la définition généralement admise pour les énergies renouvelables [9] :

a. Pérennité des ressources

L'énergie hydroélectrique utilise presque exclusivement la partie « terrestre » du cycle de l'eau, c'est-à-dire celle qui concerne l'écoulement de l'eau entre l'arrivée à terre des précipitations (pluies et neiges) et le retour à la mer.

b. Respect de l'environnement

L'hydroélectricité n'a recours à aucune combustion. Elle n'émet donc aucun gaz pouvant concourir à l'effet de serre, problème majeur à l'échelle planétaire.

c. Possibilité de production décentralisée

Le plus souvent, l'énergie hydroélectrique se trouve partout sur la terre. Elle représente une énergie décentralisée, même si les régions de production sont principalement situées en zone montagneuses et en zones rurales.

Le choix d'un générateur et du système de régulation dépend en premier lieu du mode de fonctionnement de la centrale ou la micro centrale : en parallèle avec le réseau de distribution électrique ou en régime isolé.

En parallèle, l'installation injecte du courant électrique dans le réseau de distribution local, alors qu'en mode isolé, la microcentrale n'alimente qu'un seul utilisateur (alpage, hôtel ou cabane de montagne).

Pour le fonctionnement en régime isolé, ou îlot, le groupe turbine générateur doit avoir la capacité de maintenir par lui-même une tension et une fréquence constantes. La puissance produite par le générateur doit être identique à celle consommée par les utilisateurs.

Les deux générateurs utilisés dans la conversion d'énergie hydraulique sont [4] :

- Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné débitant sur un réseau ou sur charge isolée. Elles restent les génératrices les plus utilisées pour générer

une tension alternative sinusoïdale. Pour fournir une fréquence constante, il faut un système de régulation mécanique du débit d'eau permettant de maintenir une vitesse constante de la turbine.

- Les machines asynchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée. Son utilisation reste encore limitée mais devrait rapidement évoluer du fait du coût relativement faible de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence. Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte.

On note bien que les machines asynchrones à double alimentation débitant sur un réseau ou sur charge isolée, sont très peu d'utiliser dans les centrales hydrauliques.

1.2.2 Eolienne

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [3].

Les deux types de machines électriques les plus utilisées pour ces éoliennes sont les machines asynchrones et les machines synchrones sous leurs diverses variantes [5].

Le faible coût et la standardisation des machines asynchrones ont conduit à une large domination des générateurs asynchrones à cage. Leur puissance nominale peut aller au-delà du mégawatt. En raison de la consommation de puissance réactive, elles ne peuvent pas fonctionner indépendamment d'une source qui leur fournisse la puissance réactive. D'autres éoliennes utilisent des générateurs synchrones à aimant permanent. Ces derniers, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. La connexion directe du générateur synchrone au réseau n'est pas habituelle, [4]. Avec les machines synchrones, les machines asynchrone a double alimentation sont actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable, [5].

Les éoliennes pour les petits systèmes électriques isolés utilisent des machines électriques ayant une petite taille (≤ 25 kW). Elles représentent une bonne solution pour générer de l'électricité à basse tension dans des endroits isolés. Les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont généralement utilisés pour des maisons, sur des bateaux à voiles ou pour les relais de télécommunication.

I.2.3 Autres sources d'énergie électrique

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le nucléaire pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂ [10].

I.2.3.1 Groupe électrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité, la plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. Leur taille et leur poids peuvent varier de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de tonnes. [1]

Les groupes électrogènes sont utilisés en tant que sources d'énergie électrique autonomes :

- dans des zones non couplées à un réseau d'énergie. La souplesse de l'installation du groupe électrogène, sa modularité et son coût en font le moyen de production d'électricité idéal.
- pour les systèmes de secours nécessitant une haute qualité de fourniture d'énergie (évacuation de personnes, hôpitaux, etc.). Il présente des avantages liés à un large éventail de puissance, la rapidité de sa mise en œuvre et sa capacité à fonctionner pendant de longues périodes ;
- comme fourniture d'énergie auxiliaire pour limiter la puissance de pointe absorbée sur le réseau d'énergie.

Les groupes électrogènes peuvent fonctionner à vitesse fixe comme à vitesse variable, on distingue deux avantages de la vitesse variable [11] :

- pour un même moteur diesel, on augmente la puissance fournie si en fait varier la vitesse d'entraînement ;
- l'amélioration du rendement de moteur diesel, toutes les études qui ont été déjà menées sur les groupes électrogènes à vitesse variable ont montré que la consommation de diesel est optimisée et réduite par rapport au groupe électrogène fonctionnant à vitesse fixe.

Les machines utilisées dans les groupes électrogènes sont ordinairement des machines synchrones à excitation bobinée. Certes, ce type de machine possède un bon rendement et une assez bonne puissance massique mais la fragilité des bagues et balais et son volume font appel aux aimants permanents.

Les machines à aimants permanents et commutation électronique ont connu en effet des progrès continus, depuis le développement des aimants permanents en terres rares permet de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables, plusieurs qualités spécifiques participent au succès de ces machines comme l'absence de contacts glissants permise par les aimants permanents et qui autorise une très grande variété de structure par le jeu d'implantations variées des aimants, [11].

1.2.3.2 Centrale à vapeur

Une centrale thermique comprend une ou plusieurs unités thermiques. Chaque unité se compose principalement d'une chaudière ou d'un générateur de vapeur, d'une turbine et d'un turboalternateur. Le principe de fonctionnement d'une unité thermique se résume comme suit: Le combustible (charbon, fioul, gaz) est brûlé dans une chaudière. La chaleur dégagée transforme l'eau en vapeur. La turbine est alors alimentée de la chaudière par la vapeur et la pression. La turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique d'un flux de vapeur d'eau en énergie mécanique, entraînant le turboalternateur couplé à cette turbine qui génère ainsi l'électricité. La vapeur redevient ensuite eau en traversant le condenseur, puis repart pour un nouveau cycle vers la chaudière [12].

1.2.3.3 Centrale à gaz

Les turbines à gaz fonctionnent de façon similaire aux turbines à vapeur sauf que les gaz de combustion sont utilisés pour activer les aubes de turbine au lieu de la vapeur. Outre l'alternateur, la turbine commande également un compresseur tournant pour comprimer l'air, qui est ensuite mélangé aux combustibles gazeux ou liquides dans une chambre de combustion. Plus la compression est importante, plus la température et le rendement atteint dans une turbine à gaz sont élevés. Les gaz d'échappement de la turbine sont émis à l'atmosphère [12].

1.2.3.4 Centrale nucléaire

La production nucléaire actuelle montre des performances de densité de puissance très importantes et des avantages environnementaux par rapport à l'émission de CO₂. Cependant, cette énergie présente de nombreux inconvénients : le retraitement difficile des déchets, son impact sur l'environnement, les problèmes de sécurité et le fait que son combustible ne soit pas renouvelable (épuisement évalué à la fin du siècle pour l'uranium235). Malgré des recherches très importantes menées afin de résoudre les problèmes des déchets et de développer de nouvelles générations de surgénérateurs dont la réserve en combustible est plus importante, le niveau moyen de sécurité ainsi que les conséquences humaines et écologiques d'un accident nucléaire restent les inconvénients majeurs de cette technologie. Bien qu'il soit difficilement concevable d'éliminer cette solution énergétique, il est préférable de la limiter à son plus bas niveau de nécessité [2].

I.3 Généralités sur les différentes chaînes de conversion d'énergie électrique

I.3.1 Cas des systèmes connectés aux réseaux

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de systèmes raccordés sur les réseaux électriques [6] [15] :

- systèmes de production à vitesse fixe ;
- systèmes de production à vitesse variable.

I.3.1.1 Fonctionnements à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les systèmes dont la vitesse de rotation est régulée. Généralement, ces systèmes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques pour une application éolienne dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control) [6], ou d'une machine synchrone avec des régulateurs pour la production hydroélectrique, centrales thermique, et nucléaire [14].

Les avantages des systèmes à vitesse fixe peuvent se résumer alors dans les points suivants [13]:

- ✓ Système électrique simple;
- ✓ Grande fiabilité;
- ✓ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type de système n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.

- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.
- ✓ le cout élevé des systèmes de régulation.

I.3.1.2 Fonctionnement à vitesse variable

De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable sur le plan énergétique, qui permet alors de maximiser la puissance extraite. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques [6].

Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. Les avantages de cette configuration sont les suivants:

- ✓ Augmentation du rendement énergétique.
- ✓ Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance.
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient.

Dans ce qui suit, nous exposons brièvement les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique. [6]

a) Machine asynchrone à double alimentation

Cette machine est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en système à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [15].

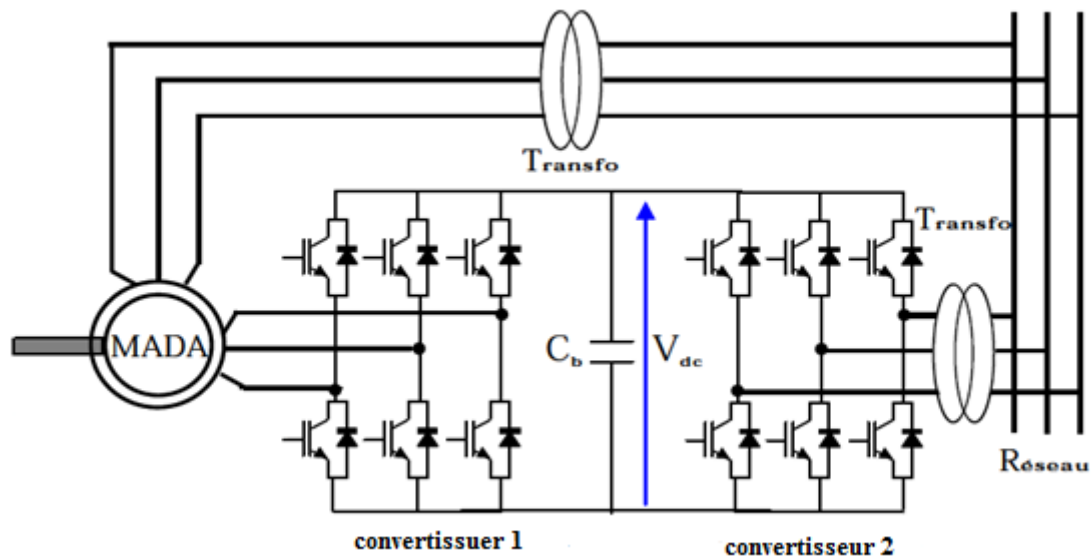


Figure I.1 Système basé sur une machine asynchrone à double alimentation

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux convertisseurs MLI triphasés [16]. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau [17].

b) Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la figure I.2. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais elle est globalement coûteuse. En effet, le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée car elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation

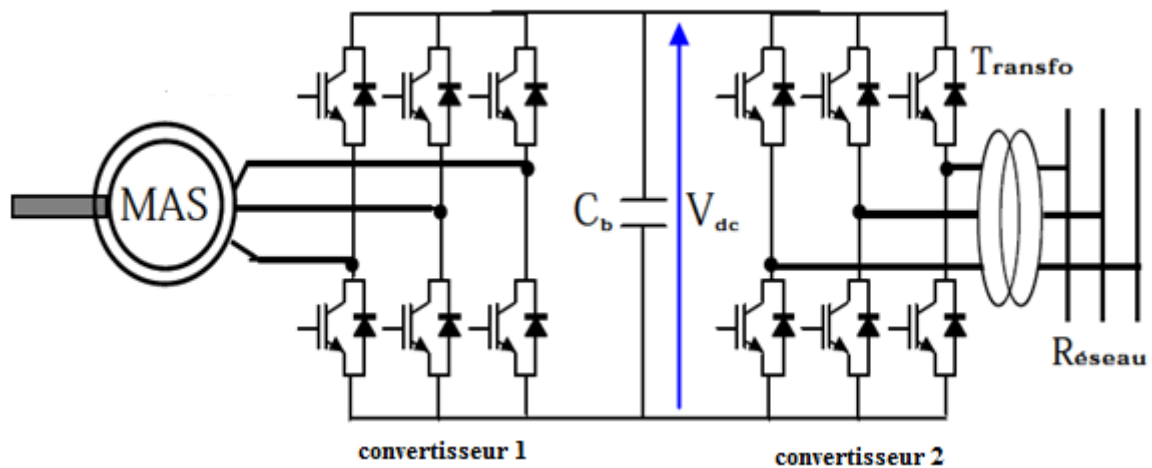


Figure I.2 Système basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

c) Machine synchrone

Les machines synchrones (à rotor bobiné ou à aimant permanent) sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement.

I.3.2 Cas des systèmes en fonctionnement isolé et autonome

Les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation de systèmes autonomes de plus en plus courants dans la plupart des sites isolés et d'accès difficile comme les gîtes et les fermes de montagne ou encore les îles. On utilise en générale des machines de petites puissances (jusqu'à 25 kW), dans le cas de fonctionnement autonome les grandeurs statorique ne sont plus imposées et il faut fournir à la machine la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation.

La conception des petits systèmes est considérablement différente de celles des systèmes connectés aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible.

Les systèmes dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages. Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie

mécanique utilisées dans ces applications de petites puissances pour les systèmes isolés et autonomes.

I.3.2.1 Machine synchrone

I.3.2.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

Ces machines sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, une solution peut être réalisée en ajoutant une machine à aimant permanent pour l'excitation de cette machine à rotor bobinée.

I.3.2.1.2 Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications des systèmes isolés et autonomes vu ses avantages : un bon rendement, un bon couple massique et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous.

A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [6]. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure I.3. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal.

Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée [17].

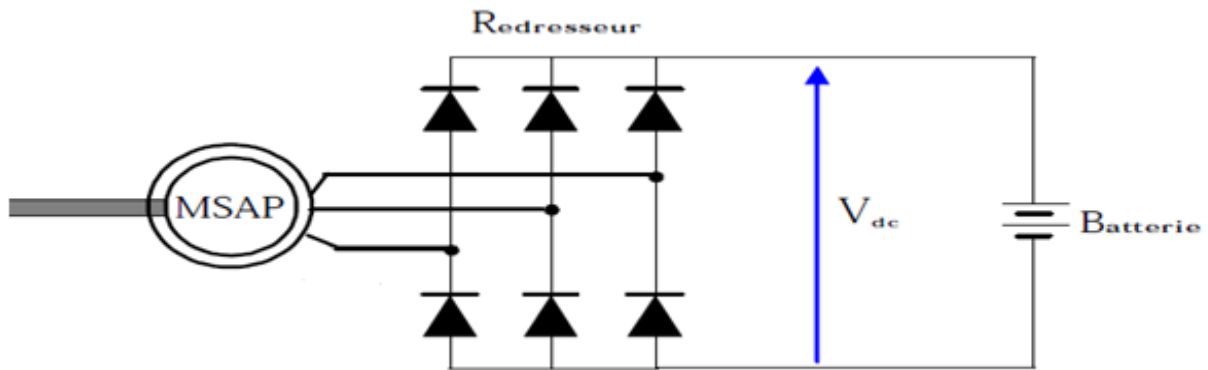


Figure I.3 Machine synchrone avec redresseur à diodes

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie permet le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de la machine d'entraînement. L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure 1 .4) [17].

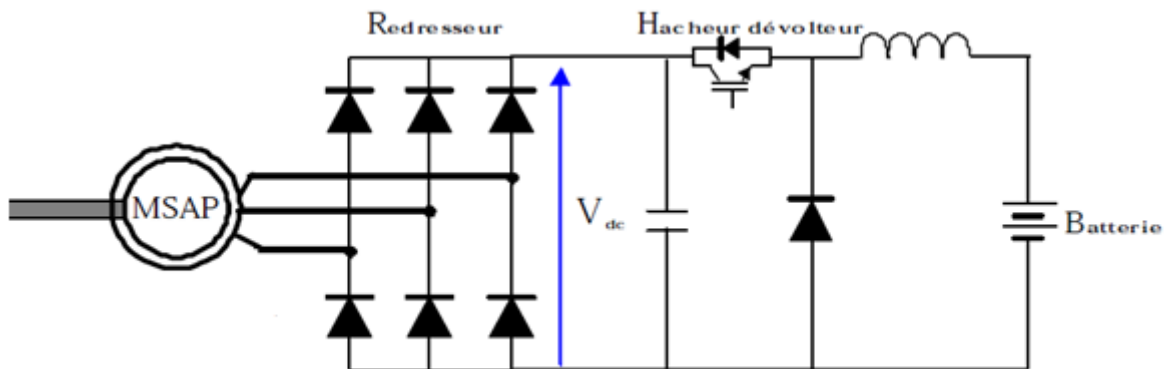


Figure I.4 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur

C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T_1 et T_2 . Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [6].

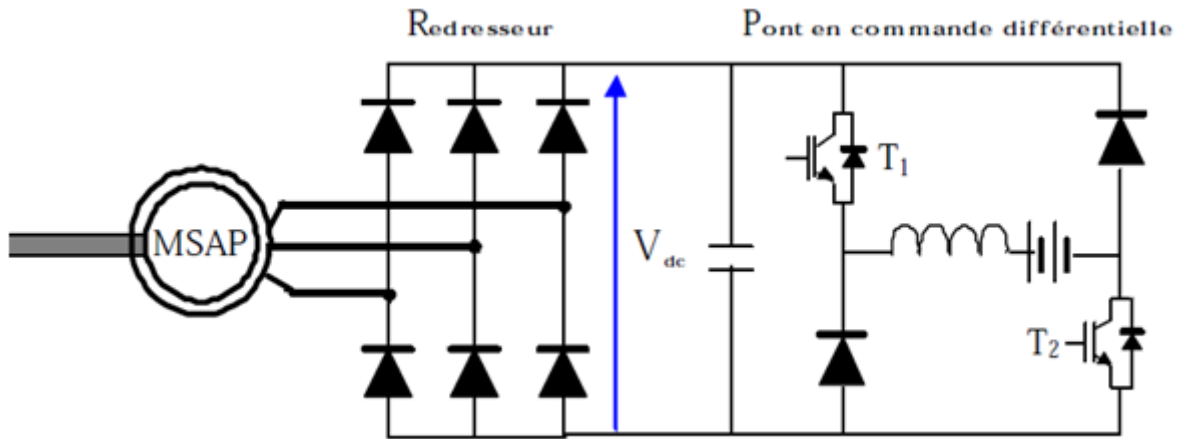


Figure I.5 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

D. Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure I.6, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse où en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [6].

Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

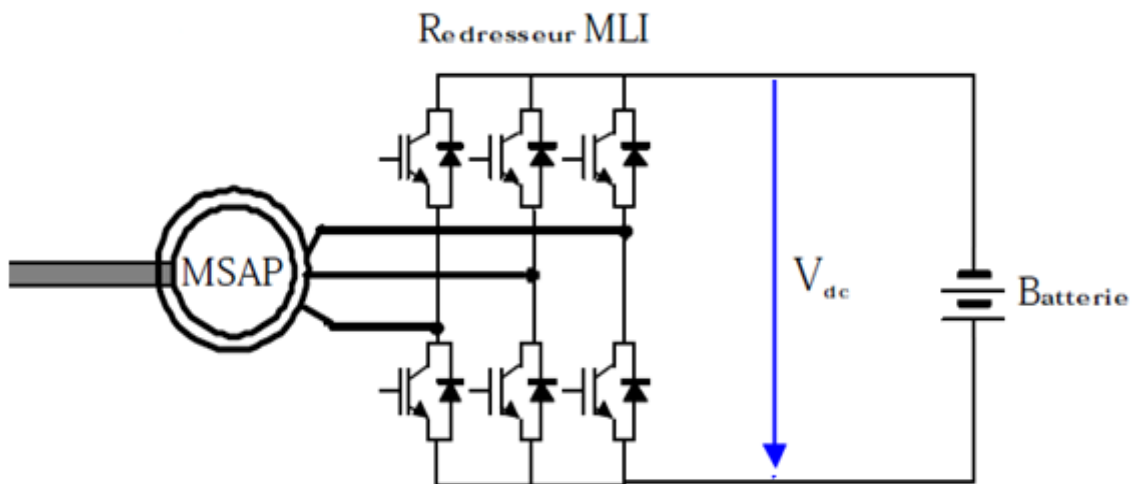


Figure I.6 Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI

I.3.2.2 Machines asynchrones à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage reste l'une des machines les plus répandues pour des applications en conversion autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par balais-collecteurs et d'aimants permanents ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égales et également un

coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance [5]. Enfin, elle est très tolérante à des régimes extrêmes de fonctionnement (survitesses, surcharges ...etc). Par ailleurs, comme mentionné précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient [6].

A. Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques. Cependant, cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en compte, notamment les variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions lors des variations de charge et de vitesse. Par ailleurs, il faut prendre des précautions et éviter de surcharger la machine au risque de la démagnétiser. Cela nécessiterait alors une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de la remagnétiser.

Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la machine :

A.1 Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe

Des travaux ont été effectués dans le cas où la génératrice asynchrone est auto-amorcée par une seule capacité d'excitation. Le bobinage de la machine étant connecté en étoile ou en triangle. Plusieurs configurations ont été mises en étude pour les deux connections. [6]

A. 2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes

Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacités en parallèle à la charge. Beaucoup de travaux ont été consacrés à l'étude de la structure présentée dans la figure I.7. Dans d'autres travaux la connexion des condensateurs est en triangle

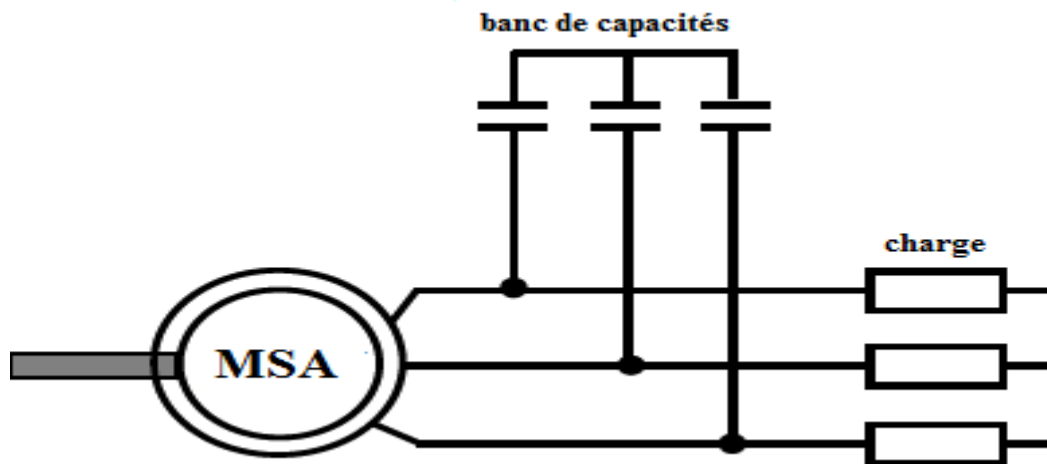


Figure I.7 Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs.

B. Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation

L'utilisation d'un banc de capacités fixes ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constantes lors de variations de charge ou de vitesse de la machine d'entraînement. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées.

B. 1 Capacités de compensation en série

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge ou avec le stator de la machine (dénommée en anglais "short-shunt connexion"). Cette approche permet de diminuer la chute de tension en charge mais elle limite les possibilités d'une régulation continue de la tension sur une large gamme de charges et/ou de vitesses

La figure I.8 présente la machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et une compensation où les capacités sont en série avec la charge

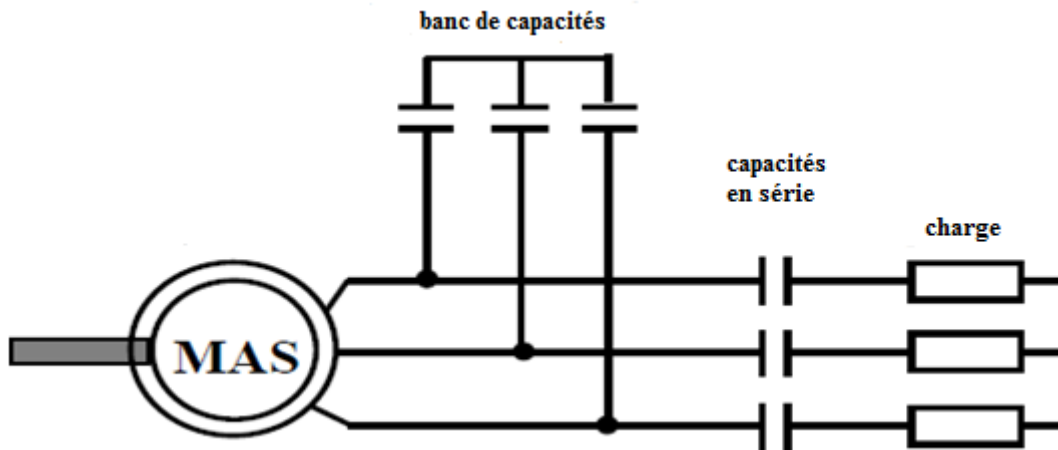


Figure 1.8 Machine asynchrone auto – excitée avec compensation série

B.2 Générateurs de puissance réactive

Enfin, des solutions plus efficaces, mais également plus complexes, ont été proposées sous formes de ‘générateurs statiques d’énergie réactive’. Ces derniers utilisent des systèmes à base d’électronique de puissance

Plusieurs structures des compensateurs statiques de l’énergie réactive (Static VAR compensator (SVC)) ont été proposées afin de maintenir la tension constante :

- 1) Réactances commandées par thyristors (TCR : Thyristor Controlled Reactor).
- 2) Capacités commutées par thyristor (TSC : Thyristor Switched Capacitor).
- 3) Le compensateur statique (STATCOM : STATic COMpensator).
- 4) La source de tension basée sur un convertisseur (VSI : Voltage Source Inverter).

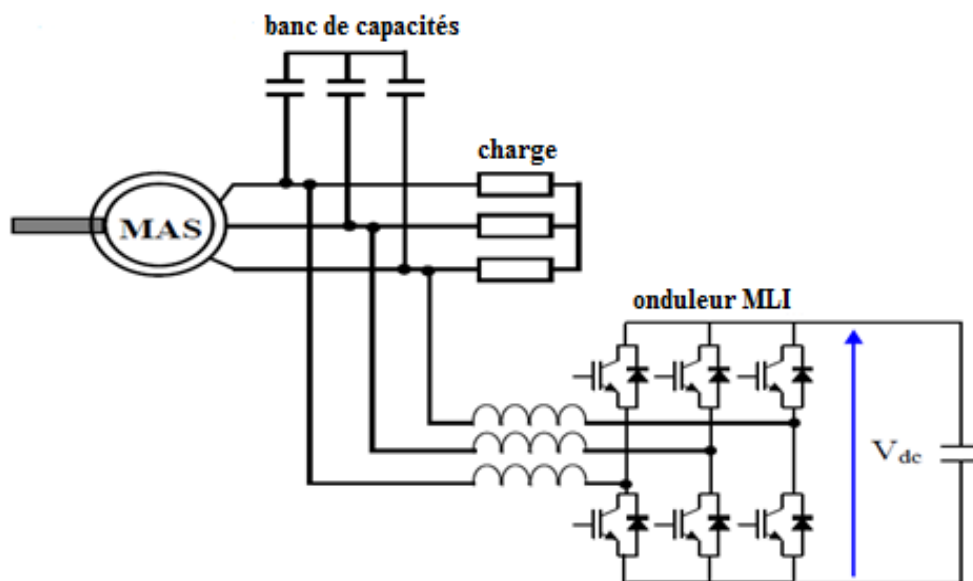


Figure I.9 Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge

Tous les systèmes à base de l'électronique de puissance cités auparavant offrent des résultats satisfaisants en termes de régulation de la tension mais leurs inconvénients résident dans leur complexité de mise en œuvre et leur coût élevé.

I.3.2.3 Machines asynchrone à double alimentation

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de production d'énergies électriques, car il offre de grands avantages de fonctionnement. La génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses d'entraînement, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse. Son circuit statorique est connecté directement à la charge isolée. Un second circuit placé au rotor est également relié à la même charge mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec un système à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [6].

I.3.2.3.1 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM_s des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM_r des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement. Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [19].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM_s par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$; c'est-à-dire

$$f_{ro} = fg$$

I.3.2.3.2 Principe d'auto-excitation des machines asynchrones

Une génératrice synchrone, ou alternateur, est entraînée en fonctionnement normal à sa vitesse de synchronisme (par exemple 1500 tr/mn pour un 4 pôle). Pour la génératrice asynchrone, elle doit être entraînée au-delà de sa vitesse de synchronisme pour fournir de l'énergie électrique. Démunie du circuit d'excitation autonome comme les alternateurs, la magnétisation de la génératrice asynchrone (à cage d'écurueil) lui est fournie par une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'autoamorçage et enfin les entretenir. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour son auto-amorçage [18]. Il est possible, dans ces conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau pour un fonctionnement dit autonome pour pouvoir alimenter une charge isolée.

La figure I.10 représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe de condensateur (ω_s est la pulsation des grandeurs statorique et C est la capacité d'auto-amorçage) en fonction du courant statorique I_M pour un fonctionnement à vide de la machine, l'interaction de deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent.

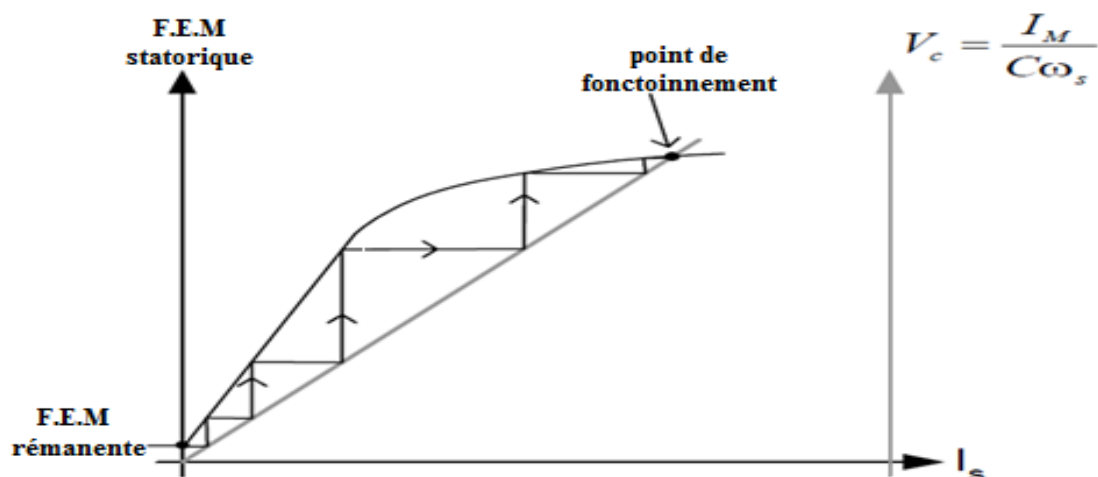


Figure I.10 Phénomène d'auto-amorçage

I.3.2.3.3 Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction du glissement g comme suit [21] :

- **Stationnaire** ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence f_r égale à celle du stator. Dans ce cas là la MADA se comporte comme un transformateur.
- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence f_r

décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.

- **Synchrone** ($g=0$) dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle, et les grandeurs rotoriques présentent des valeurs continues imposées par le convertisseur statique rotorique.
- **Hypersynchrone** ($g < 0$) par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence f_r devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension.

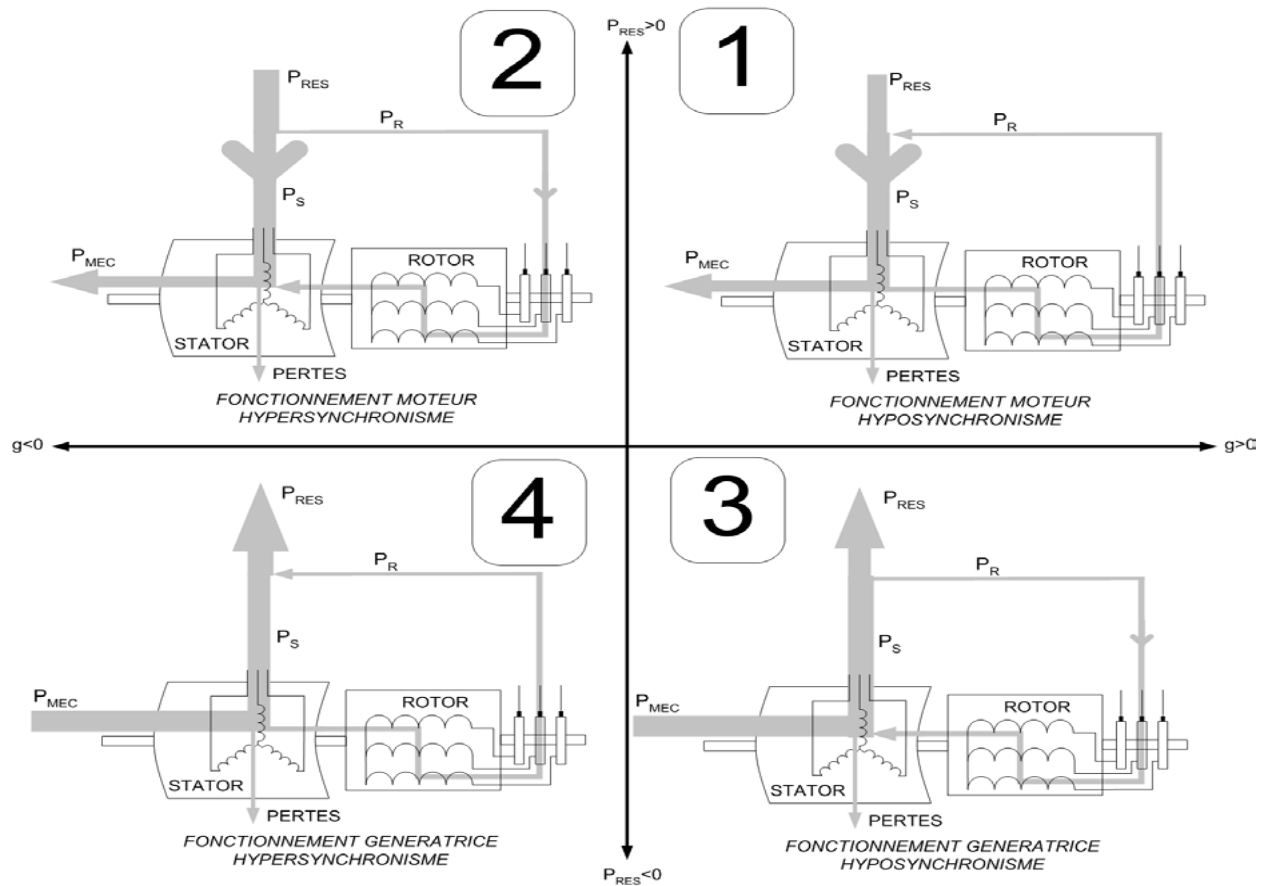


Figure I.11 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

I.3.2.3.4 Structure des machines asynchrones à double alimentation

L'originalité de la MADA provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il 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 figure I.15 délustre cette structure du stator ainsi que du rotor.

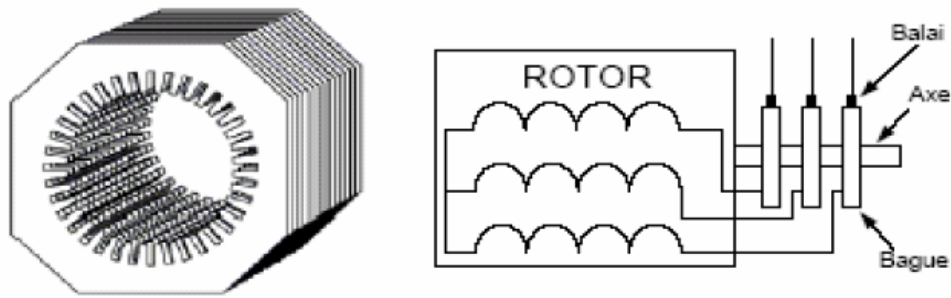


Figure I.12 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

I.3.2.3.4.1 *Structure partiellement interfacée avec la charge*

Dans ce cas-la, le stator de la génératrice est directement couplé à la charge isolée alors que l'enroulement rotorique est connecté à cette même charge par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance, constituée de deux convertisseurs à MLI, et généralement d'un transformateur selon la plage de vitesses souhaitées.

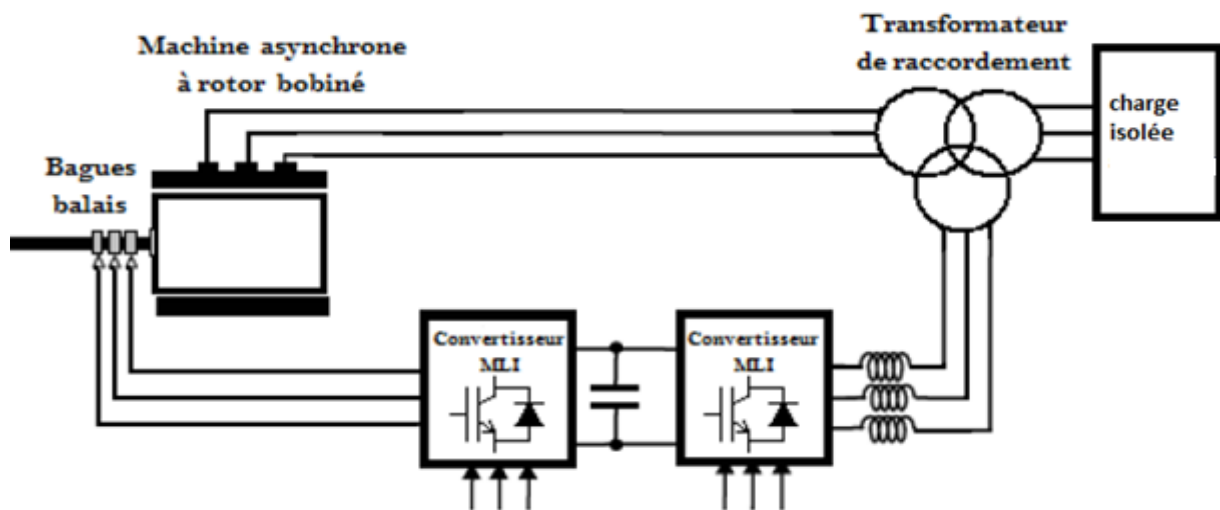


Figure I.13 : Système à base de MADA partiellement interfacée avec la charge

Le point fort de cette structure est que les convertisseurs associés n'étant pas sur le chemin principal du flux de puissance, ce qui présente un intérêt économique non négligeable à moyenne et grande puissance. La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élevé. Cette structure permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement, permettant ainsi l'optimisation de la puissance extraite pour des vitesses d'entraînements faibles et moyens.

La tension appliquée au rotor peut être commandée via le convertisseur coté rotor. Le générateur peut se magnétiser du rotor par un contrôle approprié permettant une connexion du stator à la charge d'une manière bien plus douce. Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à celui d'un alternateur synchrone.

On note bien parmi les inconvénients de la structure de la figure I.13 avec le stator directement connecté à la charge, ce qui ne permet pas de réduire le flux de la machine lorsque nécessaire. En effet, le flux est fortement imposé par la tension au stator et ne peut être diminué efficacement via le circuit du rotor. De plus, on peut spécifier que la connexion directe du stator à la charge isolée introduit une très forte sensibilité lors de la présence de défaut sur celui-ci [7].

I.3.2.3.4.2 Structure entièrement interfacée avec la charge

Une autre structure d'alimentation a également été envisagée. Elle consiste en une MADA dont les deux cotés, stator et rotor, sont alimentés par des convertisseurs triphasés commandables par MLI. Il n'existe donc aucun lien entre la génératrice et la charge. La structure d'alimentation peut prendre deux configurations très similaires.

La configuration montrée sur la figure I.18 utilise un seul convertisseur coté de la charge, les trois convertisseurs sont alors couplés par un bus continu commun. Toutefois, il faut noter que cette configuration exige que les deux cotés de la machine soient dimensionnés de façons identiques en termes de tenue en tension. C'est à dire que le rapport de transformation de la machine doit être très proche de l'unité. Si ce n'était pas le cas, dans un fonctionnement avec un modulateur à largeur d'impulsion, se verrait appliquer des niveaux de tensions trop élevées par rapport à son dimensionnement. Nous pouvons donc imaginer que les conducteurs, fortement sollicités au niveau de leur tenue en tension, auraient un vieillissement prématuré [21].

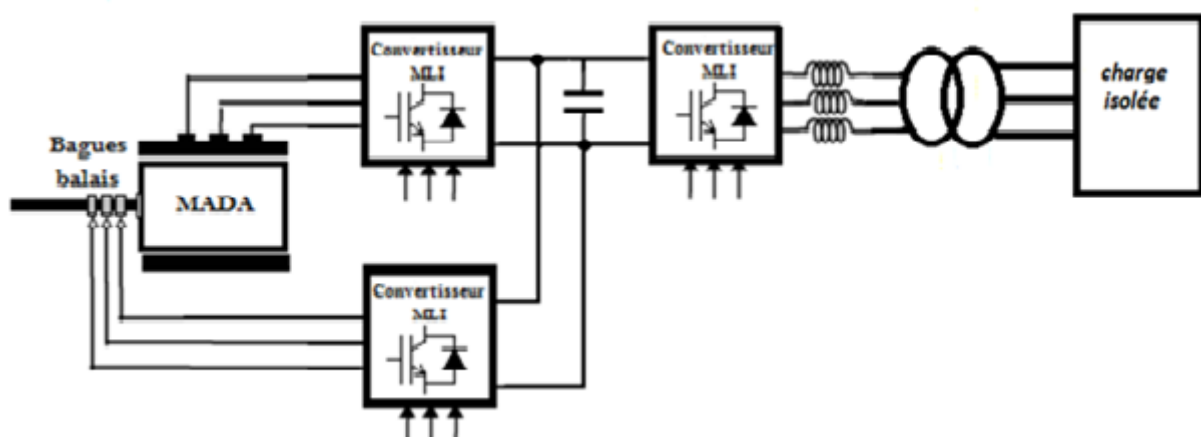


Figure I.14 Système à base de MADA totalement interfacée avec la charge

Cette structure hérite des mêmes caractéristiques que la structure à base de la machine synchrone, en ce qui concerne le comportement face aux perturbations affectant la charge et l'échange de puissance réactive avec la charge. Elle présente aussi de nombreux avantages comparée à la structure avec un seul convertisseur au rotor :

- Les convertisseurs disposés aux bornes des deux circuits permettent une bonne maîtrise du flux et du couple de la machine et confère une dynamique particulièrement élevée sur toute la plage de variation de vitesse ;
- Cette structure permet un fonctionnement sur une large plage de vitesse à puissance constante. Ce qui permet d'envisager une réduction de la complexité du système mécanique de régulation de la puissance ;
- La possibilité de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement, et les puissances sont également partagées évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

L'inconvénient principal de cette solution est le nombre de convertisseurs plus importants relativement à une application avec stator directement connecté à la charge isolé. Le cout global de l'ensemble serait donc relativement cher [7].

I.3.2.3.5 Domaines d'application

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que :

- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges, etc.

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [19].

I.3.2.3.6 Avantage et inconvénient de la MADA

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

I.3.2.3.6.1 Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- 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 ;
- Elle offre plusieurs possibilités de reconfigurations grâce à sa double alimentation se qui permet a cette dernière de trouver un large domaine d'application ;
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux convertisseurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation ;
- Une possibilité de réglage de la répartition des puissances statoriques et rotoriques pour optimiser les dimensions des convertisseurs (le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine) [21] ;
- Un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant (jusqu'à deux fois la vitesse de synchronisme) [21].

I.3.2.3.6.2 Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais ;

- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) ;
- La présence du système balais-bague qui a des effets indésirables sur la machine comme les frottements [21] ;
- Nécessite une maintenance périodique, ce qui va augmenter le coût [21].

I.4 Choix de la structure envisagée pour notre étude en fonctionnement isolé et autonome dans les prochains chapitres

Alors même que tous les regards se portent vers des machines de plus en plus puissantes, à l'inverse une demande croissante est observée pour de petites unités en vue d'une installation à proximité des habitations ou bâtiments dans lesquels l'énergie électrique est utilisée. Les génératrices asynchrones à double alimentation sont largement répandues pour la production de l'énergie électrique, particulièrement dans des régions éloignées et isolées. Vu tous les avantages cités précédemment, elles sont favorisées dans le cadre de production des petites puissances en fonctionnement isolé et autonome.

Dans le cas des sites isolés, on peut installer des petits systèmes où la puissance produite est faible (moins de 1 kW). Dans ces installations, le but est de concevoir un système le moins coûteux possible tout en assurant des performances les plus élevées possibles. Dans ce cadre, nous allons étudier le système de la figure 1.14. L'influence de la variation de la charge, de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de la génératrice sera étudiée avec le système choisi. On étudiera également les cas d'alimentation des charges équilibrées, ce système n'est pas coûteux, leur installation peut s'intensifier dans le cas de pays en voie de développement.

Dans le cas de mini-centrales autonomes, on peut installer des petits systèmes de 1 à 100kW. Dans ces mini-centrales, le but est plus focalisé sur une bonne qualité d'énergie et un bon fonctionnement de l'ensemble du système ce qui nous amène à utiliser des interfaces à base d'électronique de puissance afin d'alimenter les charges avec des tensions d'amplitudes et fréquences fixes. Pour réaliser cet objectif, plusieurs techniques citées auparavant ont été proposées par les auteurs [6]. Afin d'étudier ce type d'installations, on a retenu pour notre étude le système de la figure I.14 constitué d'une génératrice asynchrone à double alimentation et des convertisseurs à bases d'électroniques de puissance. Le choix de cette structure est justifié par le fait qu'il possible d'appliquer à cette topologie des lois de commande similaires à celles largement utilisées et validées dans le cas de fonctionnement en

moteur. Ce système est certes plus coûteux mais permet de générer une puissance électrique d'une meilleure qualité.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève description de chaînes de conversion de l'énergie électrique et les différentes sources de production d'énergie. Nous avons commencé par une description sur les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables, dans la seconde partie on a élaboré un aperçu sur les systèmes connectés au réseau en fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable ainsi que toute les structure les plus répandues, ensuite , nos travaux étant centrés sur l'utilisation de la conversion de l'énergie électrique pour des sites isolés, la dernière partie de ce chapitre a été consacrée à introduire les différentes solutions utilisées dans ce cadre en essayant d'être le plus exhaustif possible, nous avons présenté les architectures utilisées pour assurer ce fonctionnement tout en expliquant les différentes variantes et donnant les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

Au travers de l'étude des solutions existantes, il apparaît que la structure basé sur la MADA totalement interfacée avec la charge est la plus intéressante du point de vue caractéristiques et performances, ce qui favorise son utilisation pour l'alimentation de sites isolés dans diverses contrées. Comme nous l'avons montré dans ce chapitre, son utilisation pour un fonctionnement autonome a déjà fait l'objet d'études et/ou de réalisations. Toutefois, plusieurs aspects sont encore méconnus concernant ses performances en alimentation autonome avec ou sans convertisseurs.

L'objectif de nos travaux est de mieux appréhender ces différents aspects et de quantifier les performances de cette structure dans les cas les plus simples, et les moins onéreux, de fonctionnement en générateur autonome autant que ceux, plus complexes et coûteux, utilisant des convertisseurs et donc une commande. Ces différents objectifs passent par une étape incontournable qui consiste à élaborer un modèle de la structure qui soit le plus simple et le plus précis possible. C'est l'objet du chapitre II de Cette étude.

Chapitre II

**Modélisation de la machine asynchrone
à double alimentation**

II.1 Introduction

La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.2 Modélisation de la MADA

Cette section décrit le modèle dynamique d'une machine à induction triphasé symétrique à rotor bobiné. La machine à induction se compose principalement de deux parties, stator (Figure II.1) et rotor (Figure II.2). Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer.

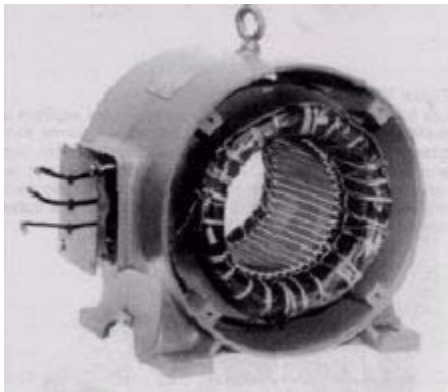


Figure II.1 Stator de la MADA

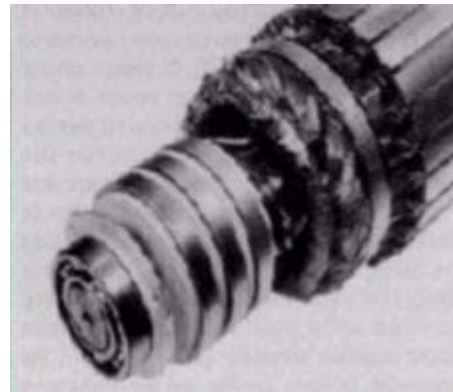


Figure II.2 Rotor de la MADA

En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais.

Dans le cas général, la machine est alimentée par deux sources externes de différentes tensions et fréquences. Ces dernières fournissent à la fois l'excitation en termes d'énergie réactive et la puissance active pour le développement du couple nécessaire. Ainsi, les courants du stator et du rotor vont créer deux champs tournants dont leur rotation est fonction des fréquences respectivement imposées par les deux sources d'alimentation.

Comme une machine synchrone, les fréquences imposées par les deux sources externes confèrent à la machine une vitesse de rotation fixe Ω_m . Afin de garantir un fonctionnement stable de la machine il faut que les champs tournants du stator et du rotor soient fixes l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire satisfaire la relation suivante [1] [2] :

$$\Omega_s = \Omega_m \pm \Omega_r \quad (2.1)$$

Dans cette expression Ω_s et Ω_r sont respectivement les vitesses du champ tournant du stator et celui du rotor. Le signe supérieur se rapporte au cas où le champ du rotor tourne dans le même sens que le rotor (mode Hyposynchrone) et le signe inférieur se rapporte au cas lorsque il tourne en sens opposé (mode Hypersynchrone).

II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Etant donné la complexité de sa construction, il est difficile d'entamer une analyse parfaite de la MADA en se référant à sa géométrie exacte, d'où la nécessité de dresser un certains nombres d'hypothèses simplificatrices [3], dès lors, nous admettons que:

- La machine à une parfaite symétrie de construction (équilibrée électriquement et géométriquement) ;
- Un entrefer constant ;
- Même nombre de phases entre le stator et le rotor ;
- Une répartition sinusoïdale le long de l'entrefer des forces magnétomotrices créées par les deux bobinages ;
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- Les pertes ferromagnétiques négligeables et les résistances ne varient pas avec la température ;

II.2.2 Modèle triphasée de la MADA

La représentation schématique d'une MADA dans le repère triphasé est donnée par la figure II.3, où nous introduisons :

- L'angle électrique θ_m entre le stator et le rotor ;
- a_s, b_s, c_s : axes magnétiques des enroulements statoriques ;
- a_r, b_r, c_r : axes magnétiques des enroulements rotoriques ;

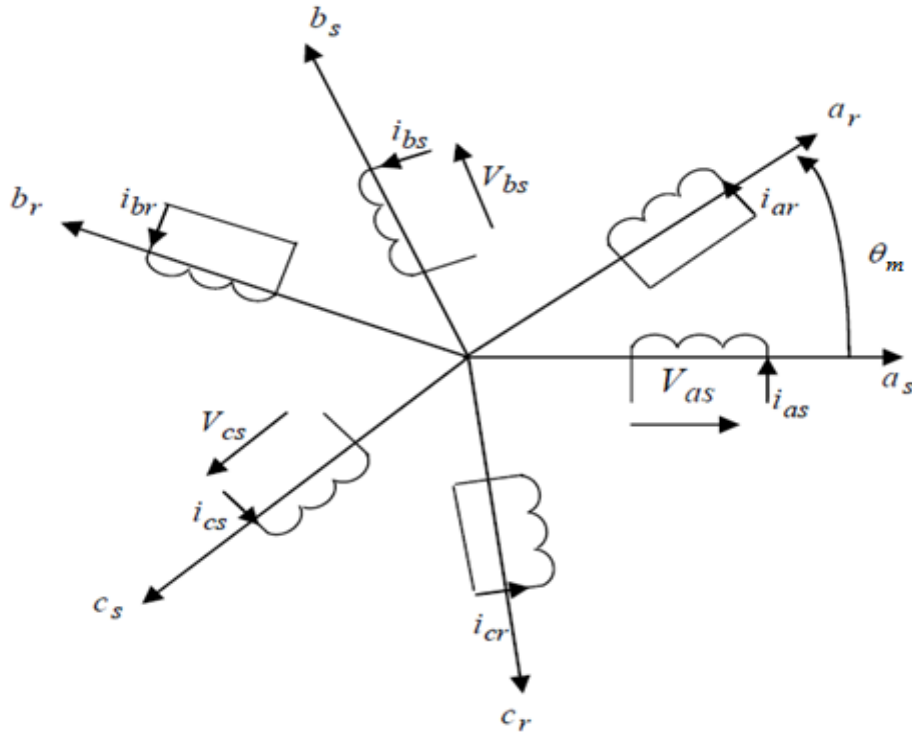


Figure II.3 Représentation schématique de la MADA dans le système triphasé

a- Equations électriques

La loi de Lenz associée à la loi d'Ohm permettent de déduire les expressions des tensions des circuits statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} (v_s)_{abc} = [R_s](i_s)_{abc} + \frac{d(\phi_s)_{abc}}{dt} \\ (v_r)_{abc} = [R_r](i_r)_{abc} + \frac{d(\phi_r)_{abc}}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

Au stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

b- Equations magnétiques

Les flux à travers les enroulements, exprimés par rapport aux matrices inductances et aux vecteurs courants sont :

$$\begin{cases} (\phi_s)_{abc} = [L_{ss}] \cdot (i_s)_{abc} + [M_{sr}] \cdot (i_r)_{abc} \\ (\phi_r)_{abc} = [L_{rr}] \cdot (i_r)_{abc} + [M_{rs}] \cdot (i_s)_{abc} \end{cases} \quad (2.3)$$

Comme on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix}$$

Où :

$$\begin{aligned} [\phi_{sabc}] &= \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; & [\phi_{rabc}] &= \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \\ [i_{sabc}] &= \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; & [i_{rabc}] &= \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Avec les matrices des inductances statoriques $[L_{ss}]$ et rotoriques $[L_{rr}]$:

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

Et la matrice des inductances mutuelles stator-rotor $[M_{sr}]$ et la matrice des inductances rotor-stator $[M_{rs}]$:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_m & \cos(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_m & \cos(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_m \end{bmatrix}$$

Où M_0 représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre deux phases statoriques et rotoriques.

c- Equation mécanique :

Le modèle doit être complété par l'aspect purement mécanique de la modélisation, pour cela, on applique le principe fondamental de la dynamique sur l'arbre moteur :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.4)$$

Avec : $C_r = C_0 + f\Omega$

II.2.3 Modèle biphasé de la MADA

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [4]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park

Cette transformation définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$, permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a,b,c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d,q,o). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimé par :

$$[X]_{dqo} = [P(\theta)]X_{abc} \quad (2.5)$$

Avec :

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

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$[X]_{abc} = [P(\theta)]^{-1}X_{dqo} \quad (2.6)$$

Avec :

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

Tel que :

- Pour les grandeurs statoriques : $\theta = \theta_s$
- Pour les grandeurs rotoriques : $\theta = \theta_r = \theta_s - \theta_m$
- Pour un système équilibré la composante homopolaire est nulle.

II.2.3.1 Application de la transformation de Park à la MADA

La figure II.4 montre l'orientation des systèmes d'axes réels et fictifs

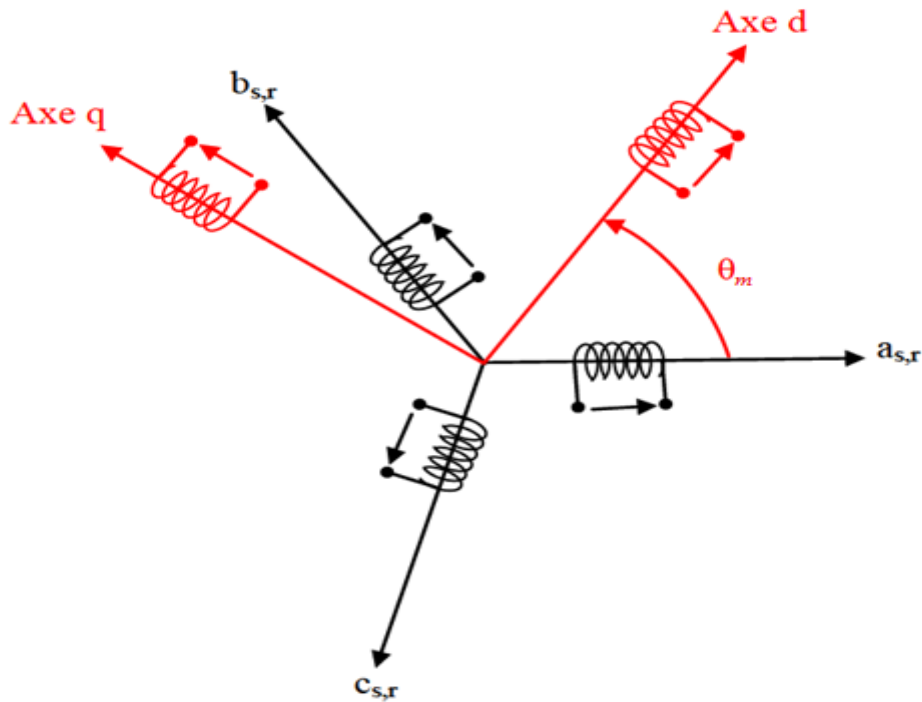


Figure II.4 Système d'axes réels et système d'axes fictifs

Une projection des équations du modèle de la machine dans le référentiel tournant (T) sur les deux axes (d,q), nous donne les équations de Park de la MADA en posant pour chaque vecteur \bar{X} :

$$\bar{X} = \bar{X}_d + \bar{X}_q \quad (2.7)$$

La transformation de Concordia permet de transformer l'enroulement triphasé de chaque armature de la machine en un enroulement diphasé magnétiquement équivalent. Le stator et le rotor sont alors diphasés avec deux axes (α, β) en quadrature. Là encore, il y a un mouvement relatif entre le stator et le rotor.

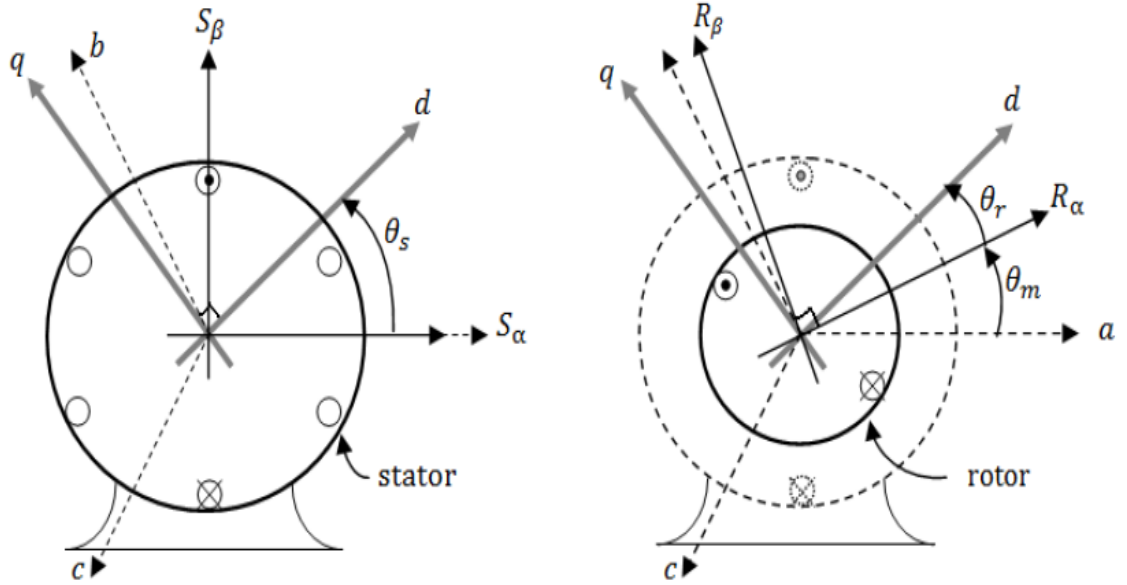


Figure II.5 Position des différents systèmes d'axes

Pour le changement de repère, le choix des angles de rotation θ_s et θ_r respectivement du repère statorique et rotorique est à priori totalement arbitraire. Cependant, nous voyons apparaître la condition de simplification suivante [5].

$$\theta_s = \theta_r + \theta_m \quad (2.8)$$

Qui signifie que les axes d et q du repère statorique et rotorique sont confondus (référentiel commun). La dérivation de l'équation précédente donne :

$$\omega_s = \omega_r + \omega_m \quad (2.9)$$

a- Equations électriques

Le stator :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.10)$$

Le rotor :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec :

- $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$
- $\omega_s - \omega_e = \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$

b- Equations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

Stator

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (2.12)$$

Rotor

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{qr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.13)$$

Tel que :

$L_r = l_r - M_r$: 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.

c- Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique en fonction des flux et courants statoriques est donné par :

$$C_e = P(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (2.14)$$

Avec : P : nombre de paire de pôles.

11.3 Choix du référentiel (dq)

Jusqu'à ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (dq) faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre

Il existe trois importants choix dont lesquels on peut fixer le référentiel (dq) :

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant

a- Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

b- Référentiel lié au rotor

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

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires ou la vitesse est supposée constante.

c- Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega = \omega_s$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande de la machine.

II.4 Représentation complexe du modèle diphasée

Pour chaque système de grandeurs diphasées (X_d, X_q) défini dans le repère tournant d'axes (d,q), on lui associe une représentation complexe définie par la relation suivante :

$$\bar{X} = X_d + jX_q \quad (2.15)$$

Ainsi, on peut déduire le modèle diphasé de la machine dans le référentiel tournant exprimé en notation complexe. Les équations associées sont :

$$\begin{cases} \bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\phi}_s \\ \bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \quad (2.16)$$

Les relations entre les flux et les courants s'écrivent :

$$\begin{cases} \bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \\ \bar{\phi}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s \end{cases} \quad (2.17)$$

On peut remarquer la présence de deux f.e.m dynamiques qui rappellent la rotation du référentiel par rapport au stator et également par rapport au rotor. Le schéma équivalent associé à ce modèle est représenté sur la figure II.6 :

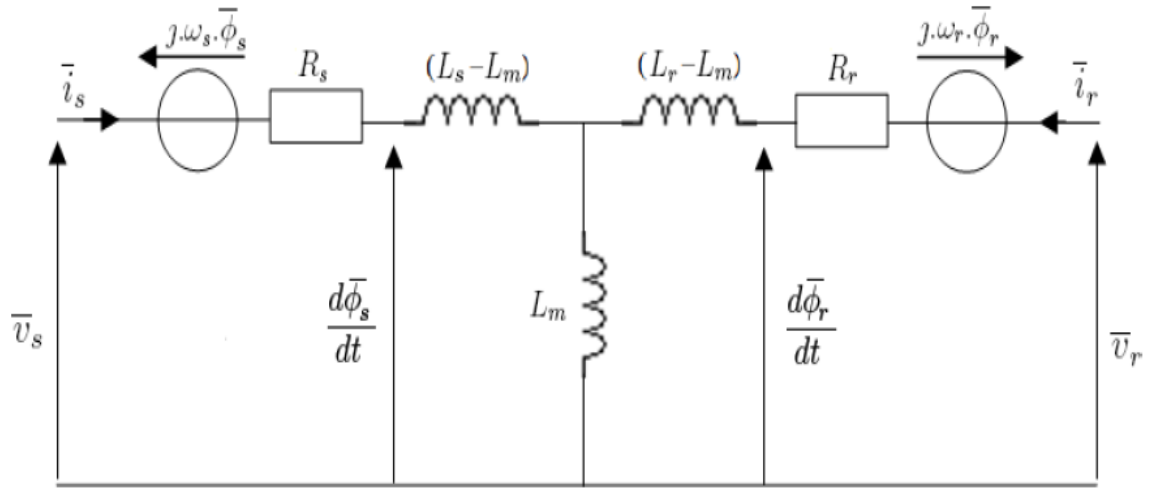


Figure II.6 Schéma équivalent du modèle de la machine en représentation diphasée

L'expression du couple, mettant en œuvre les vecteurs flux et courant statoriques, en notation complexe peut s'écrire comme suit :

$$C_{em} = P \Im m(\bar{\phi}_s \bar{i}_s^*) \quad (2.18)$$

En utilisant les expressions des flux, on déduit facilement l'expression du couple en fonction des vecteurs flux et courant rotoriques.

$$C_{em} = -P \Im m(\bar{\phi}_r \bar{i}_r^*) \quad (2.19)$$

Ces deux expressions mettent en évidence que le couple dépend toujours des modules et de l'orientation, l'un par rapport à l'autre, de deux vecteurs considérés.

II.5 Bilan de puissances

Il est possible d'établir un bilan de puissances de la machine à partir du modèle précédent. Les puissances apparentes de l'armature statorique et rotorique peuvent s'exprimer respectivement de la manière suivante :

$$\begin{cases} S_s = \bar{v}_s \bar{i}_s^* = \left(R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} + j\omega_s \bar{\phi}_s \right) \bar{i}_s^* \\ S_r = \bar{v}_r \bar{i}_r^* = \left(R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} + j\omega_r \bar{\phi}_r \right) \bar{i}_r^* \end{cases} \quad (2.20)$$

En se plaçant en régime permanent, les équations sont alors simplifiées. Par suite, en prenant la partie réelle et la partie imaginaire des expressions précédentes, on obtient celles des puissances actives et réactives au stator et au rotor :

✓ Pour les puissances actives :

$$\begin{cases} P_s = R_s i_s^2 + \omega_s \Im(\bar{\phi}_s \bar{i}_s^*) = R_s i_s^2 + \frac{\omega_s}{p} C_{em} \\ P_r = R_r i_r^2 + \omega_r \Im(\bar{\phi}_r \bar{i}_r^*) = R_r i_r^2 - \frac{\omega_r}{p} C_{em} \end{cases} \quad (2.21)$$

✓ Pour les puissances réactives :

$$\begin{cases} Q_s = \omega_s \Re(\bar{\phi}_s \bar{i}_s^*) = \omega_s L_s i_s^2 + \omega_s L_m \Re(\bar{i}_r \bar{i}_s^*) \\ Q_r = \omega_r \Re(\bar{\phi}_r \bar{i}_r^*) = \omega_r L_r i_r^2 + \omega_r L_m \Re(\bar{i}_s \bar{i}_r^*) \end{cases} \quad (2.22)$$

L'équation 2.21 montre qu'en tenant compte des termes résistifs il est difficile d'obtenir une relation simple entre les puissances actives du stator et du rotor. Si on néglige ces termes, une relation plus simple existe entre les puissances actives du stator et du rotor d'un côté et des pulsations correspondantes d'un autre côté ω_s et ω_r :

$$P_r = -\frac{\omega_r}{\omega_s} P_s = -g P_s \quad (2.23)$$

Par ailleurs, la puissance mécanique s'exprime par :

$$P_m = \frac{\omega_m}{p} C_{em} \quad (2.24)$$

Ceci permet d'arriver au bilan de puissances actives qui s'exprime par :

$$P_m = P_s + P_r \quad (2.25)$$

Ces relations démontrent que la puissance mécanique est répartie entre le circuit du stator et celui du rotor. Cette répartition dépend de la répartition de la fréquence de rotation de la machine entre les deux circuits. Pour une fréquence statorique fixe, si la vitesse de rotation est maintenue dans un intervalle où le glissement est faible, la puissance du rotor n'est alors qu'une fraction de la puissance nominale

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

Le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliqué et des grandeurs à commander, pour cela nous avons choisi une orientation de flux statorique selon l'axe « d », c'est le but du prochain chapitre.

Chapitre III

**Commande vectorielle de la MADA et
contrôle de tension**

IV.1 Introduction

Pour les régions isolées, les systèmes de conversions de l'énergie électrique sont utilisés pour alimenter une certaine charge. Pour ce type de centrale, la tension de sortie n'est pas imposée par le réseau, c'est pourquoi il faut maintenir son amplitude et sa fréquence constantes et ce, quelle que soit la charge et la vitesse d'entraînement, la grandeur la plus importante à commander sera la tension continue à la sortie du redresseur.




Dans les deux chapitres II et III, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement MATLAB/Simulink, les modèles de simulation de tous les composants de système de conversion basé sur la MADA illustré dans la figure I.14. Ces modèles peuvent être utilisés de manière modulaire, ce qui permet d'adapter le modèle aux objectifs des simulations. Les paramètres du système de conversion sont donnés dans l'Annexe C.

Afin de montrer l'influence des variations de la vitesse d'entraînement et/ ou de la charge sur les grandeurs de système, plusieurs simulation ont été effectuées et les résultats obtenues seront présentées.

IV.2 Simulation global de la MADA entièrement interfacée

Pour les simulations, les paramètres sont ceux de la MADA complètement interfacée à trois redresseurs de puissance nominal de 7.5 kW (décrite à l'annexe C), connecté à une charge triphasée en étoile équilibrée.

La vérification de bon fonctionnement de la commande sur une charge équilibrée est effectuée par le biais de plusieurs tests :

- Auto-amorçage
- Impact de variation de la charge.
 -  Charge purement résistive
 -  Charge à effet capacitif
 -  Charge à effet inductif
- Impact de variation de la vitesse variable

Le schéma global de la commande du système étudié est représenté dans la figure IV.1. Dans ce qui suit nous interprétons les résultats dans différents cas de notre étude.

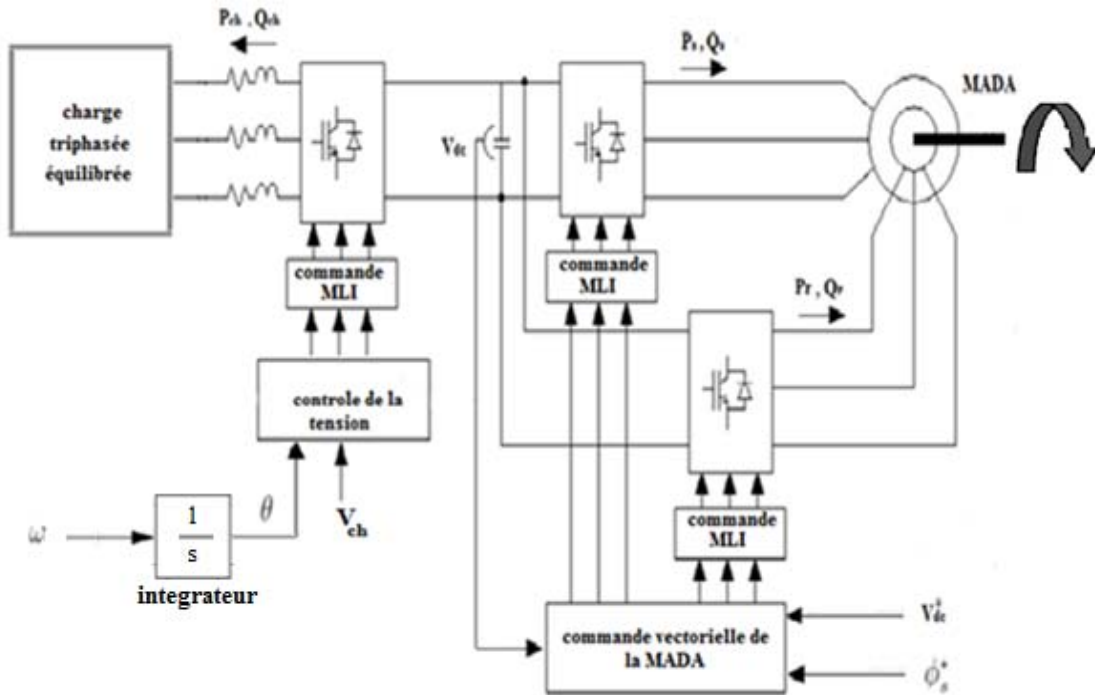


Figure IV.1 Dispositif de commande global d'une MADA en fonctionnement autonome

IV.2.1 Auto-amorçage

Dans un premier temps, nous étudions l'amorçage de la génératrice asynchrone à vitesse d'entraînement fixe (1500 tr/min). La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour l'amorçage de la génératrice, pour cela on a opté à charger la capacité initialement de 12 V afin de fournir de l'énergie réactive nécessaire pour l'amorçage.

Résultats et interprétation

La figure IV.2 montre l'effet de régulation de la tension du bus continu à la sortie de redresseur. On remarque que la tension mesurée suit parfaitement sa référence sur toute la période de simulation grâce au contrôle proposé. Afin de bien visualiser cette grandeur dans les premiers instants de l'amorçage, un zoom est montré sur la figure IV.3, où on remarque une faible baisse de tension de la capacité du bus continu (de 12V à 11.5V) après elle suit sa référence. Cette chute de tension est due à l'énergie fournie pour l'amorçage.

La figure IV.4 illustre les allures du flux statorique. Le flux d'axe d reste à sa valeur de référence et le découplage nous assure un flux statorique d'axe q pratiquement nul, donc une bonne orientation du flux statorique selon l'axe d.

Les allures de la figure IV.5 représentent les flux rotoriques selon les deux axes, où on remarque leurs proportionnalités au flux statorique désiré. L'analyse de courbes des figures IV.6 et IV.7 permet de confirmer la répartition des courants de magnétisations (I_{sd} et I_{rd}) entre les deux armatures.

Les puissances active et réactive des deux armatures statorique et rotorique sont montrées respectivement sur les figures IV.8 et IV.9. Les puissances actives sont presque nulles, cela nous explique la présence des pertes Joule dans les deux armatures et l'absence d'échange de puissance active. Les allures des puissances réactives des deux armatures représentent l'énergie de magnétisation de la génératrice.

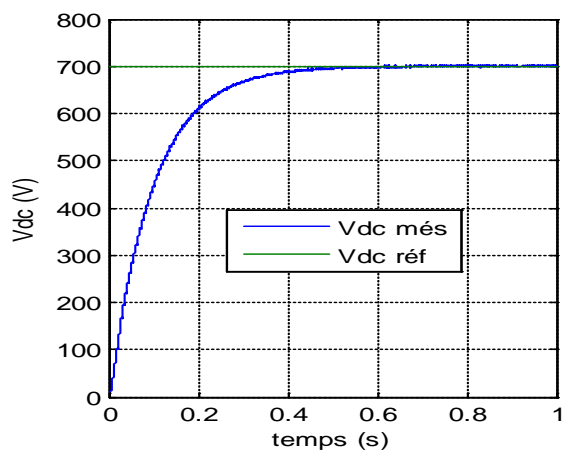


Figure IV.2 Allures de tension du bus continu

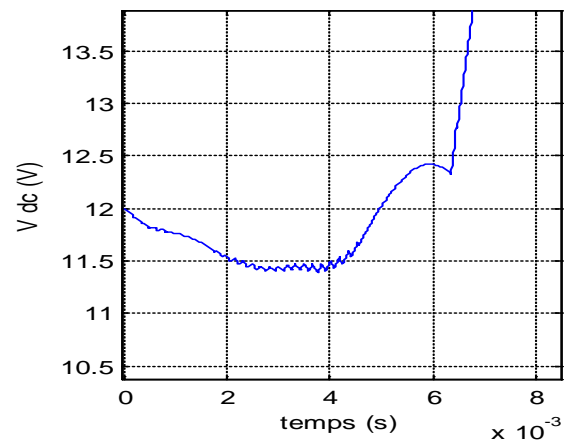


Figure IV.3 Zoom sur comportement de tension

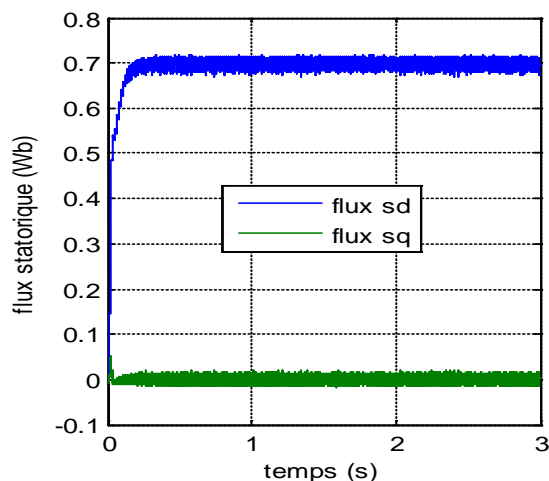


Figure IV.4 Composantes directe et quadrature du flux statorique

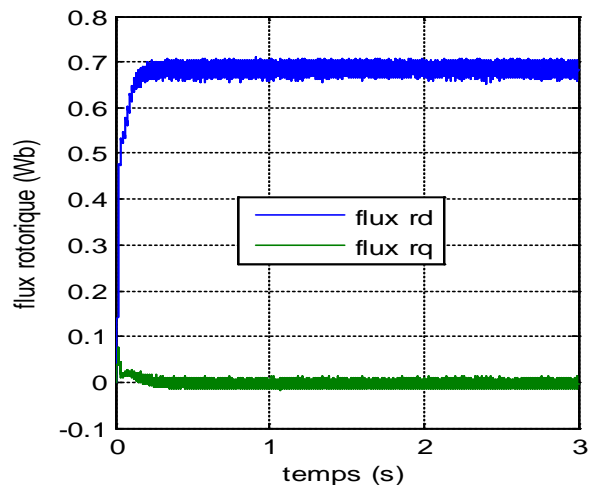


Figure IV.5 Composantes directe et quadrature du flux rotorique

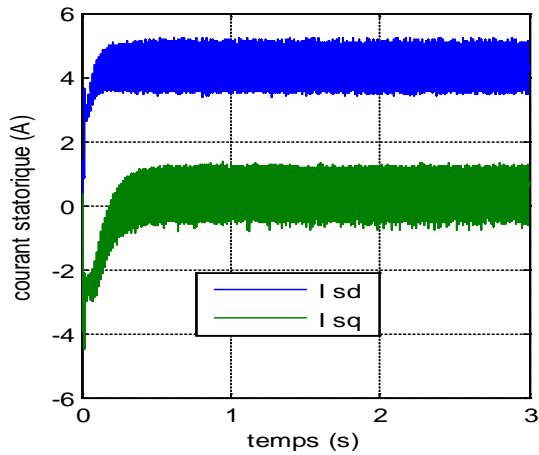


Figure IV.6 Composantes directe et quadrature du courant statorique

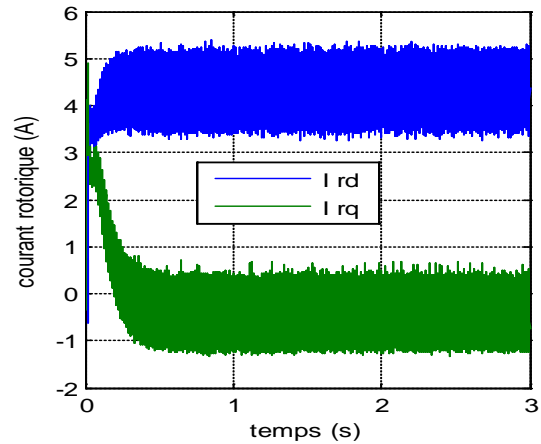


Figure IV.7 Composantes directe et quadrature du courant rotorique

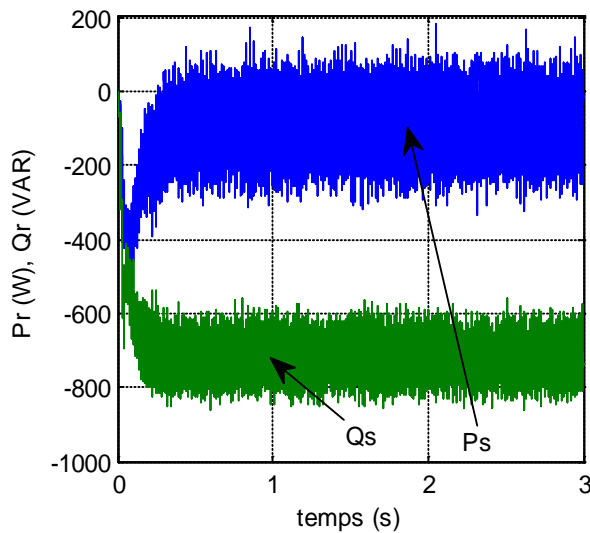


Figure IV.8 Puissances active et réactive statoriques

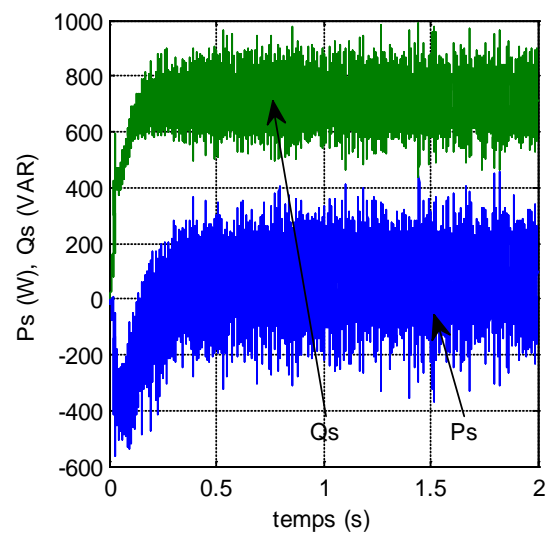


Figure IV.9 Puissances active et réactive rotorique

IV.2.2 Impact de variation de la charge

IV.2.2.1 Charge purement résistive

Au début, on fixe la vitesse d'entraînement à 3000 tr/min tout la durée de simulation, à l'instant $t=1s$ on insère une charge triphasée équilibrée purement résistive à 50% de sa valeur nominale, et à l'instant $t=2s$, on insère une autre charge en parallèle de même caractéristique que la première. Les courbes de la figure IV.10 à la figure IV.17 correspondent aux résultats de simulation.

Résultats et interprétations

On constate d'après les figures IV.10, IV.11 et IV.12 que les grandeurs commandées suivent bien leurs références ce qu'expliquent l'efficacité et la performance de la commande utilisée.

L'allure de la figure IV.15 montre que la puissance réactive est maintenue nulle, confirme ainsi un fonctionnement du facteur de puissance unitaire, la puissance active atteint presque deux fois la valeur nominal ce qu'est l'avantage principal de notre structure. Sur la figure IV.16 nous avons tracé le rapport entre les deux puissances actives statorique et rotorique, celui-ci est très proche de l'unité. Ce qui montre que ces deux puissances sont bien réparties entre les deux armatures de la machine.

L'analyse des figures (IV.17 - IV.22) a permis de voir le comportement de courant, tension et couple électromagnétique en fonction de la variation de la charge, où on constate que la tension est insensible à cette variation, contrairement au courant et le couple. On note que le couple est toujours dans la plage de fonctionnement nominal malgré que la vitesse est deux fois la vitesse de synchronisme.

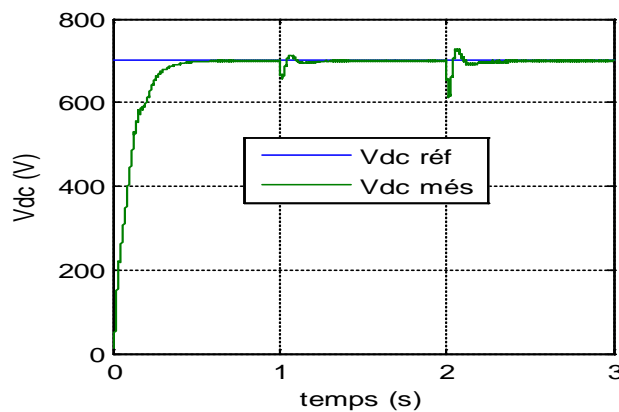


Figure IV.10 Allures de tension du bus continu

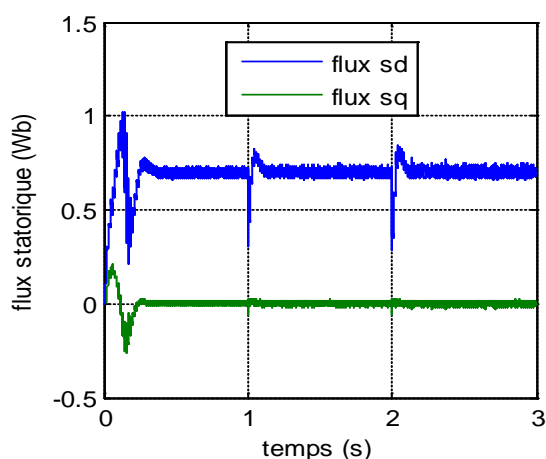


Figure IV.11 Composantes directe et quadrature du flux statorique

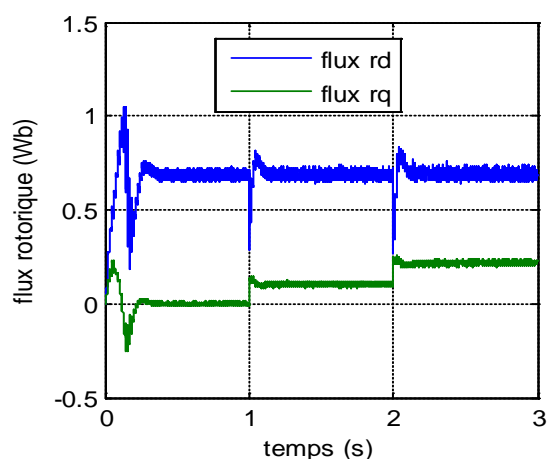


Figure IV.12 Composantes directe et du flux rotorique

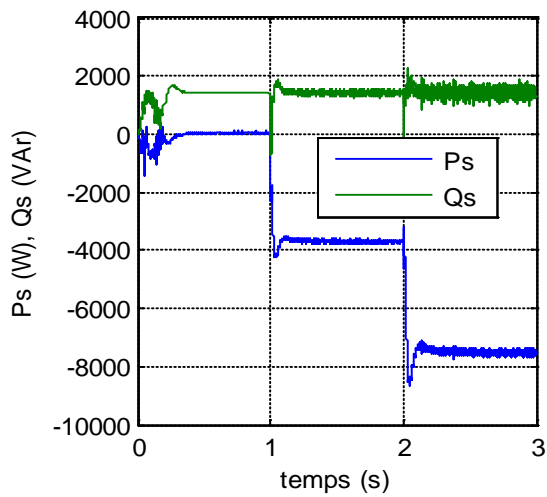


Figure IV.13 Allures des puissances statoriques

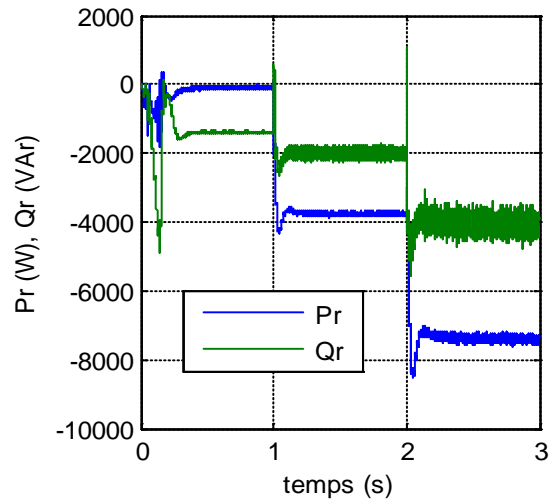


Figure IV.14 Allures des puissances rotoriques

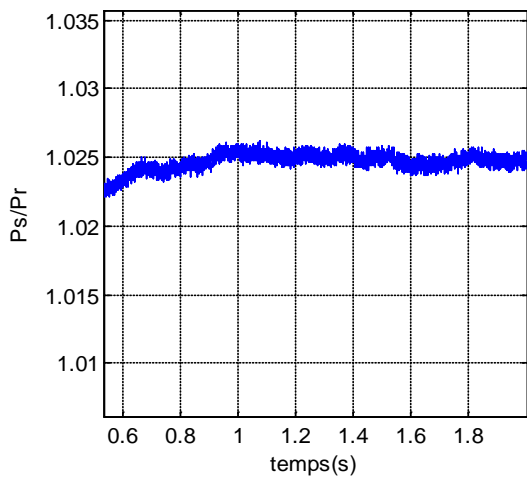


Figure IV.15 Rapport des puissances

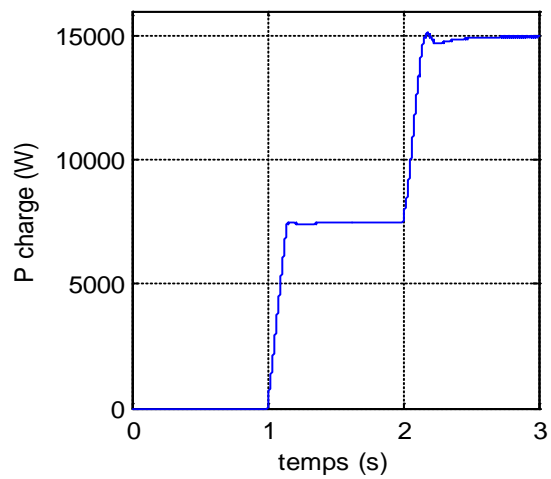


Figure IV.16 Allures des puissances de la charge

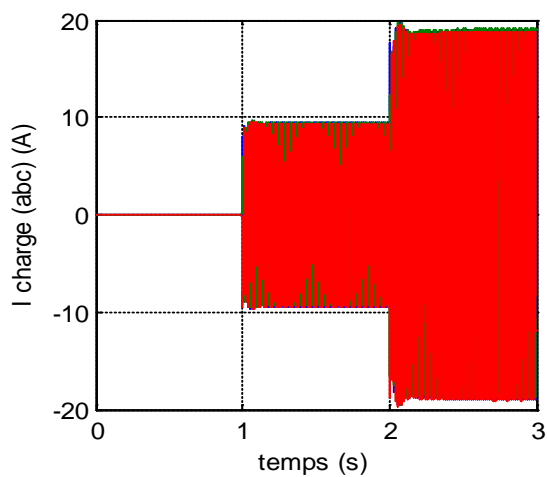


Figure IV.17 allures de courant de charge

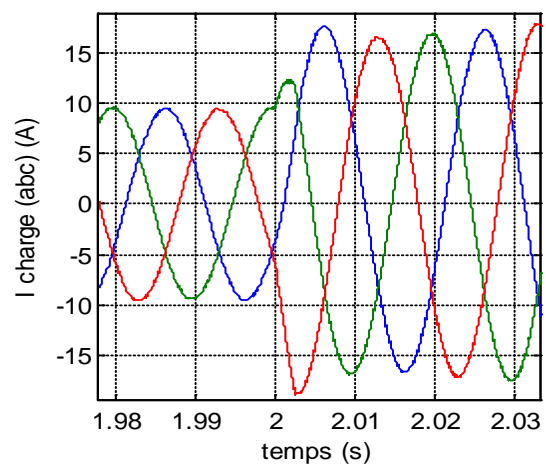


Figure IV.18 Zoom sur le courant de charge

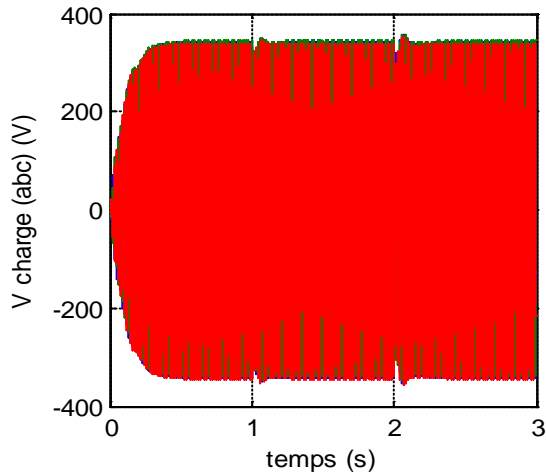


Figure IV.19 allures de tension de charge

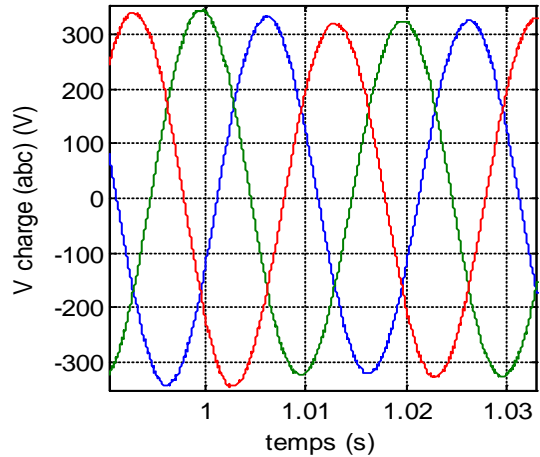


Figure IV.20 Zoom sur la tension de charge

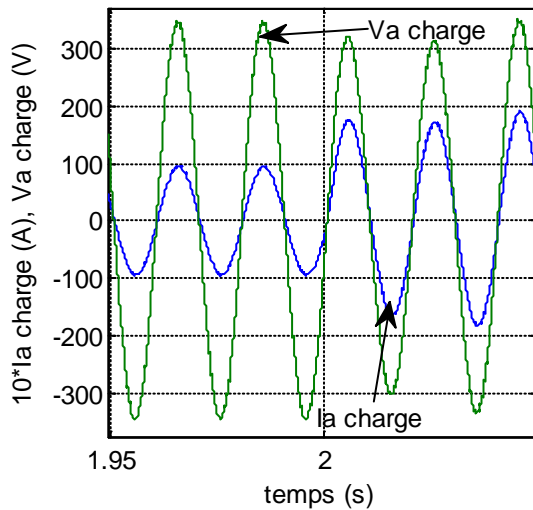


Figure IV.21 courant et tension d'une phase

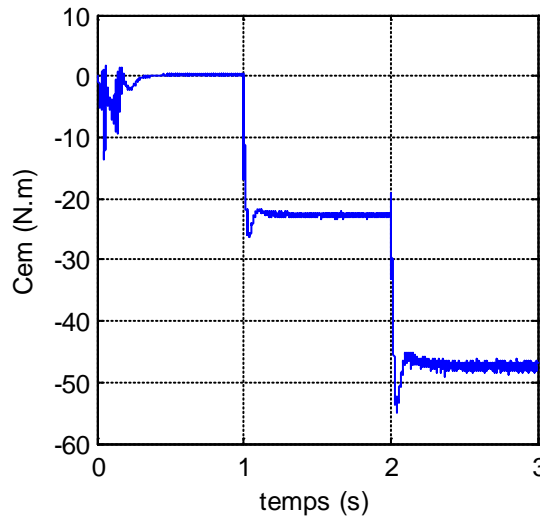


Figure IV.22 Allure du couple électromagnétique

IV.2.2.2 Charge à effet capacitif

Afin d'étudier l'effet de la variation de la charge sur notre système, on fixe la vitesse d'entraînement à 2000 tr/min toute la durée de simulation, à $t = 1s$, on insert une charge à effet capacitif avec un facteur de puissance 0.9 en parallèle à la charge initial (50% de la valeur nominale) qu'est purement résistive.

Résultats et interprétations

La figure IV.23 illustre l'impact de la variation de la charge sur la tension redressée, on remarque une baisse de cette dernière à l'instant de variation de la charge, après elle suit sa référence parfaitement.

On remarque d'après les figures IV.24 et IV.25 que le flux statorique d'axe d suit sa référence, et le découplage nous assure un flux statorique de l'axe q pratiquement nul quelque soit la variation de la charge, donc une bonne orientation du flux statorique selon l'axe d. Par conséquent on retrouve la composante q du flux rotorique varie avec la variation de la charge.

D'après les figures (IV.26 - IV.29), les allures des tensions de la charge sont indépendantes de la variation de la charge, se que il dénote l'effet de la régulation. Contrairement aux courants qui sont influencés par la variation de la charge, nous pouvons noter que leurs grandeurs ont une fréquence fixe 50 Hz et une amplitude qui varier proportionnelle à la variation de la charge, afin de bien visualiser ces grandeurs, un zoom est montré. La figure IV.31 montre que Le courant est en avance de phase par rapport à la tension, dans ce cas on dit que la charge fournie la puissance réactive.

Les résultats montrent que les puissances actives sont bien réparties entre les deux armatures de la machine et variable en fonction de la charge alimentée, elle augmente en augmentant la charge. Concernant les puissances réactives, celles-ci varient en fonction de la nature de la charge (figure IV.32).

L'allure de la figure IV.33 représente l'impact de variation de la charge sur le comportement du couple électromagnétique, d'où on constate que ce dernier est proprement proportionnel au courant.

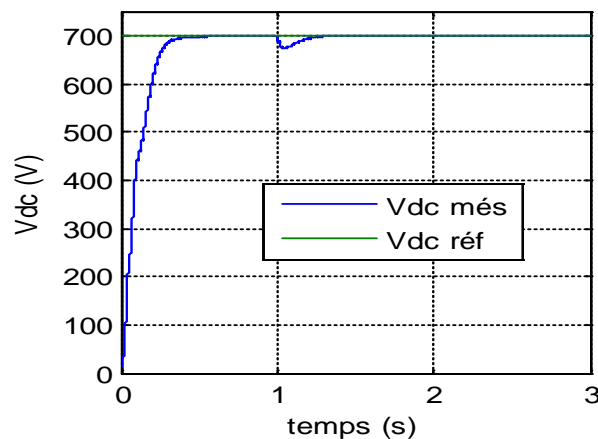


Figure IV.23 Allures de tension du bus continu

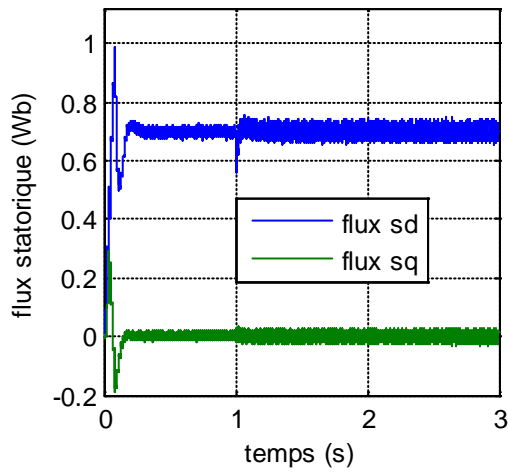


Figure IV.24 Composantes directe et quadrature du flux statorique

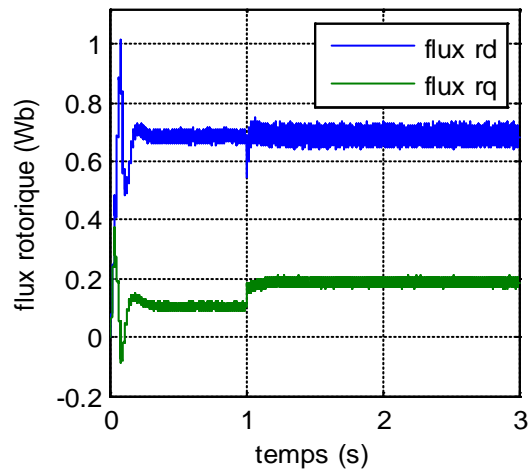


Figure IV.25 Composantes directe et quadrature du flux rotorique

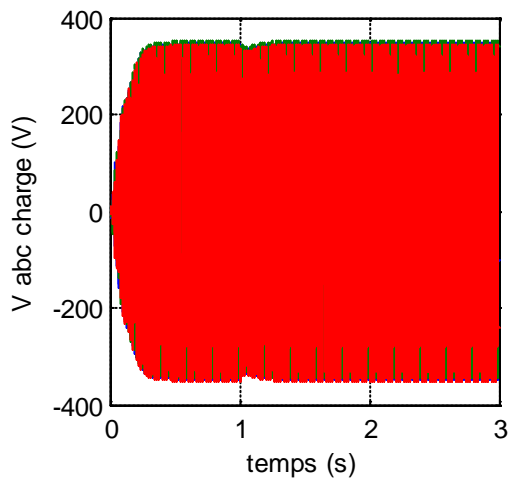


Figure IV.26 Allures de tension de charge

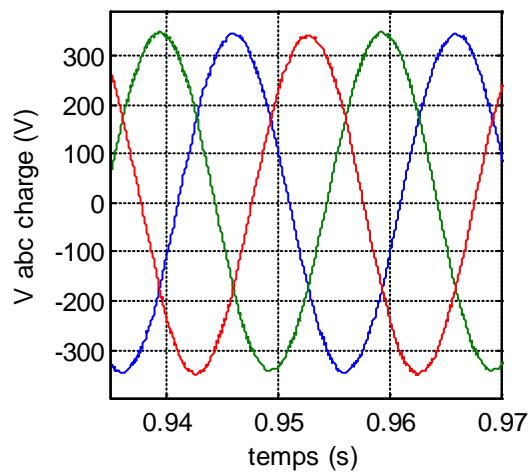


Figure IV.27 Zoom sur la tension de charge

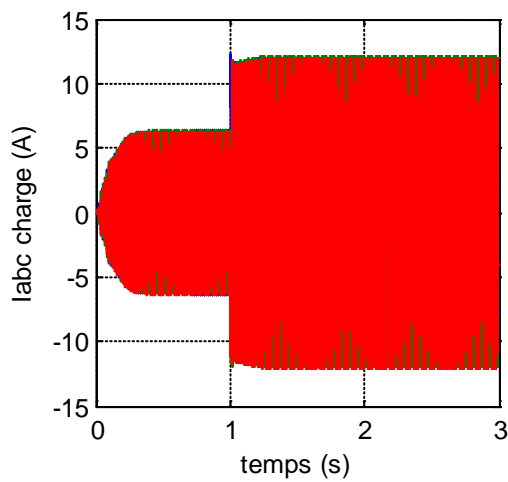


Figure IV.28 Allure de courant de charge

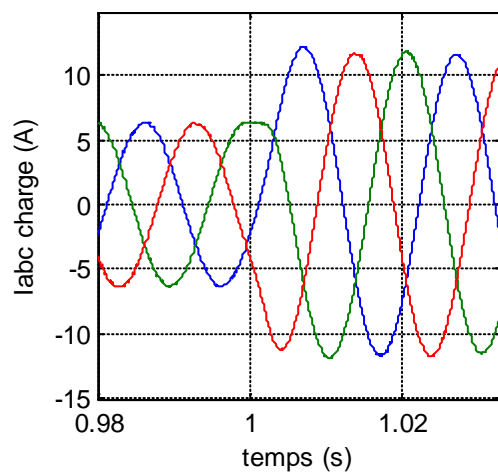


Figure IV.29 Zoom sur les courants de charge

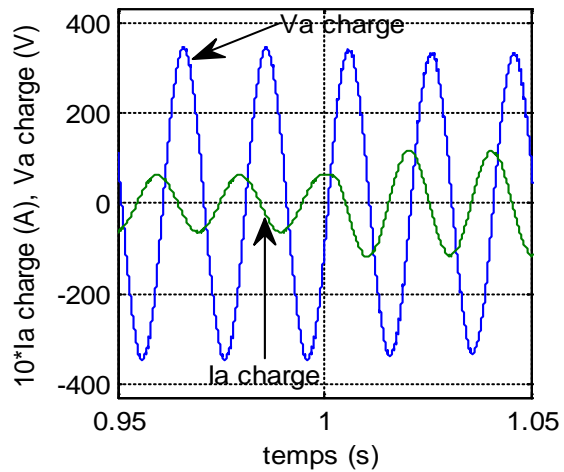
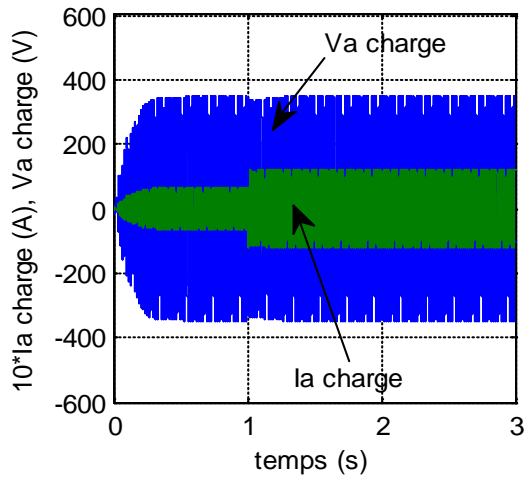


Figure IV.30 Courant et tension d'une phase **Figure IV.31** Zoom sur le courant et la tension

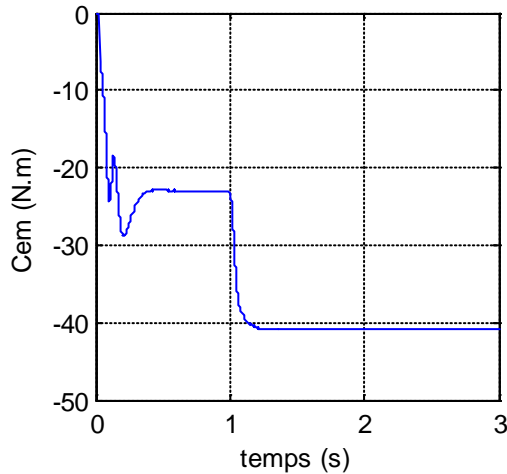
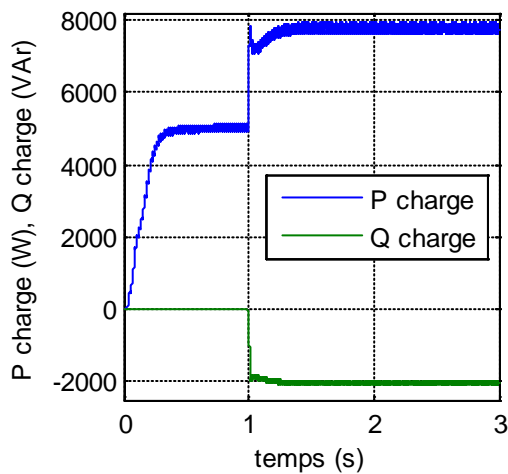


Figure IV.32 Allures des puissances de la charge **Figure IV.33** Allure de la variation de couple électromagnétique

IV.2.2.3 Charge à effet inductif

Dans le but de constater l'influence de la charge à effet inductive, on fixe la vitesse d'entraînement à 1500 tr/min toute la durée de simulation, à $t=1$ s, on insert une charge purement inductif 25% de la charge nominale en parallèle à la charge initial (75% de la valeur nominale) qu'est purement résistive.

Résultats et interprétations

D'après les allures de la figure IV34 – IV.36, les grandeurs commandées suivent bien leurs références, on note qu'après l'insertion de la charge à effet inductive en remarque des petites perturbations dû principalement à la régulation.

Les allures des tensions et des courants de charge sont indépendantes de la variation de la charge, nous pouvons noter que leurs grandeurs ont une amplitude et une fréquence fixe. La figure IV.39 montre que le courant est en retard de phase par rapport à la tension, dans ce cas on dit que le stator et le rotor fournissent la puissance active et réactive.

On remarque bien d'après les figures IV40- IV41 que la puissance active et le couple électromagnétique sont insensibles à la variation de la charge inductive, contrairement à la puissance réactive qui varie avec.

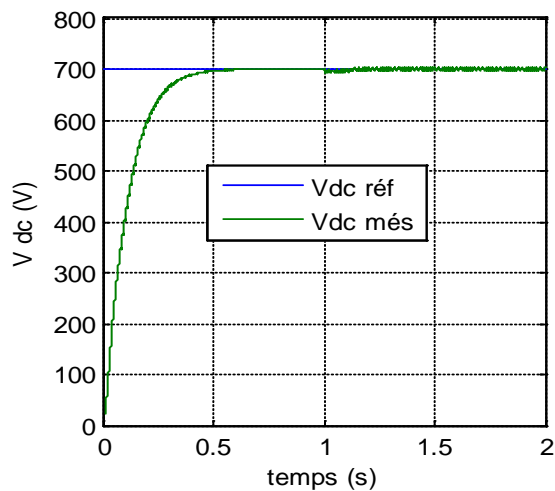


Figure IV.34 Tension de bus continu

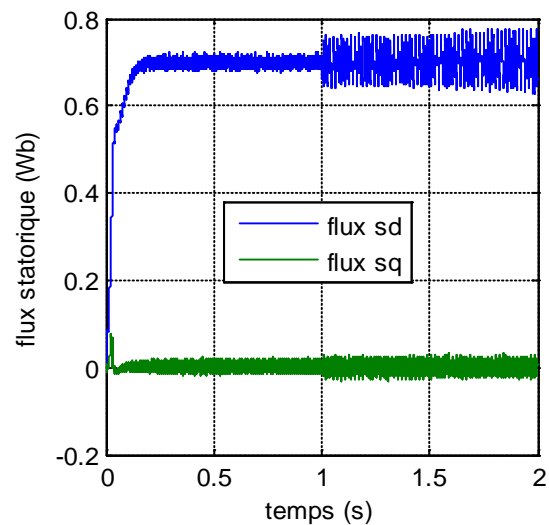


Figure IV.35 Composantes directe et quadrature de flux statorique

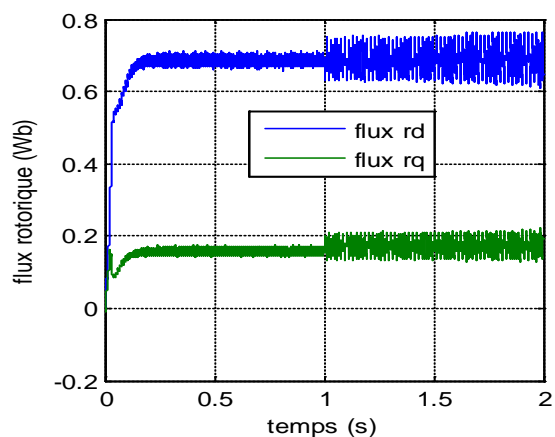


Figure IV.36 Composantes directe et quadrature du flux rotorique

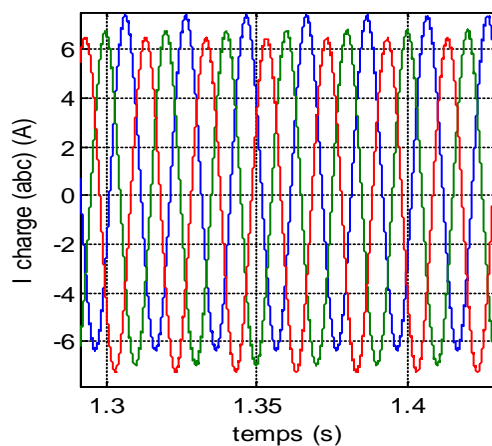


Figure IV.37 Allures des courants de charge

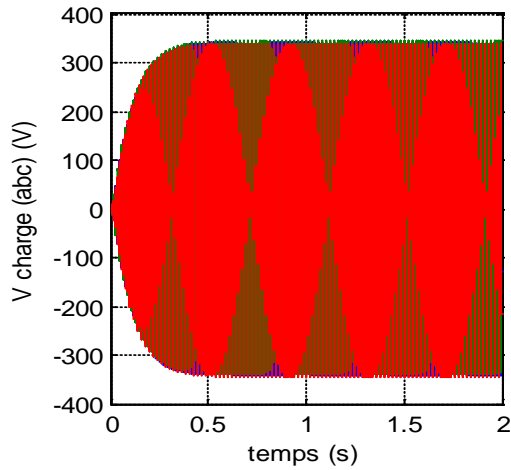


Figure IV.38 Allures des tensions de charge

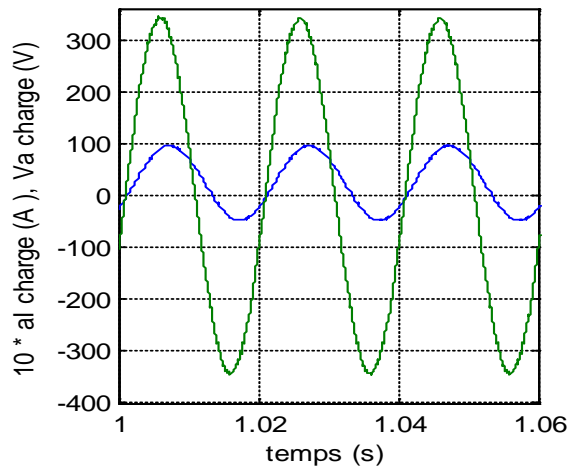


Figure IV.39 Zoom sur le courant et la tension d'une phase

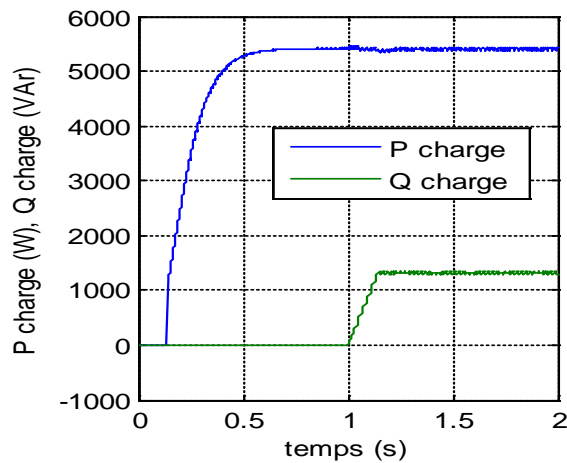


Figure IV.40 Allures des puissances de charge

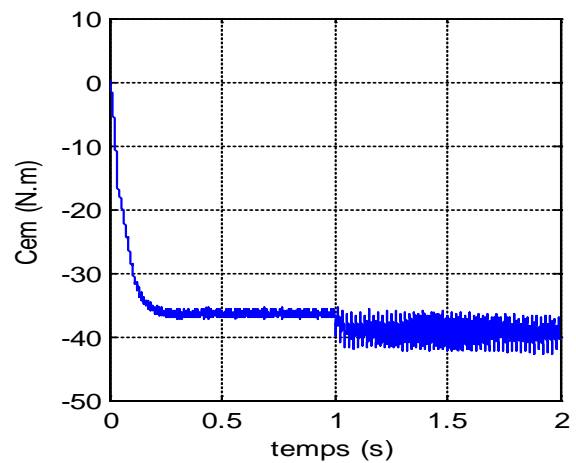


Figure IV.41 Courbe couple électromagnétique

IV.2.3 Impact de variation de la vitesse

Dans le contexte de voir l'influence de la variation de la vitesse d'entraînement sur les performances du système étudié, on fait fonctionner le modèle selon un profil de vitesse présenter dans la figure IV.34, et cela on alimentant une charge nominal purement résistive. Le comportement de différentes grandeurs sera illustré dans les figures qui suivent

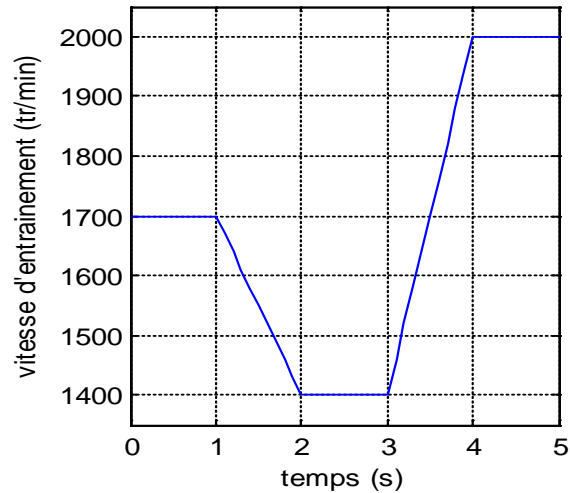


Figure IV.42 Profil de vitesse

Résultats et interprétations

Les résultats de simulation montrent que les grandeurs commandées demeurent intacte pendant la transition de la vitesse d'entraînement (figures IV.43-IV.45). L'impact de la variation de la vitesse sur la tension de charge est montré sur la figure IV.46, où on remarque qu'elle est insensible à cette variation.

L'évolution de courant d'une phase statorique et rotorique est montré sur les deux figures IV.48 et IV.49 respectivement, ils sont intimement liés aux variations de la vitesse en termes d'amplitude et indépendant en termes de fréquence. Sachant que le couple est proportionnel au courant statorique ou rotorique, on conclut que sa variation est similaire à la variation des courants, se qu'est représenté dans la figure IV.50.

La figure IV.49 représente la variation de la puissance active fonction de la variation de la vitesse, on constate qu'elle est légèrement sensible à la variation de cette dernière.

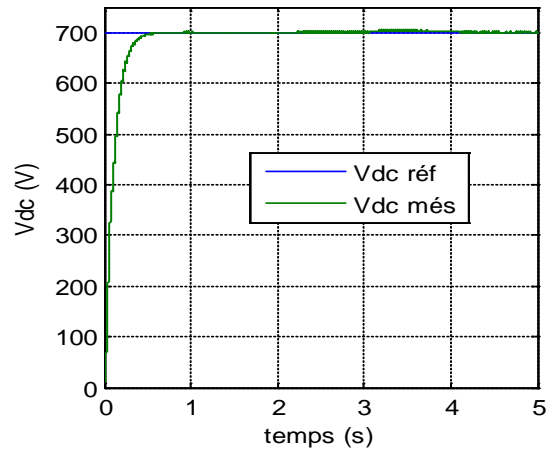


Figure IV.43 Tension du bus continu

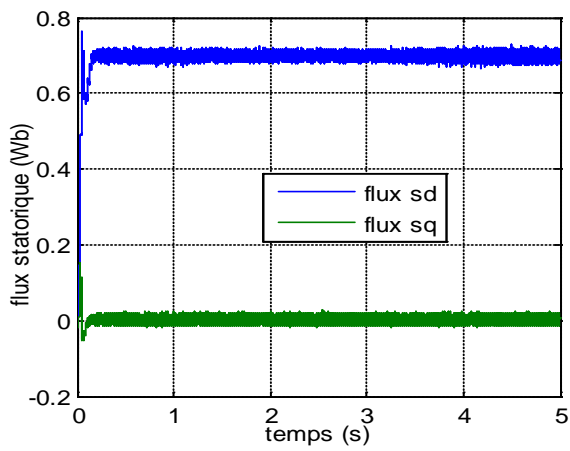


Figure IV.44 Composantes directe et quadrature du flux statorique

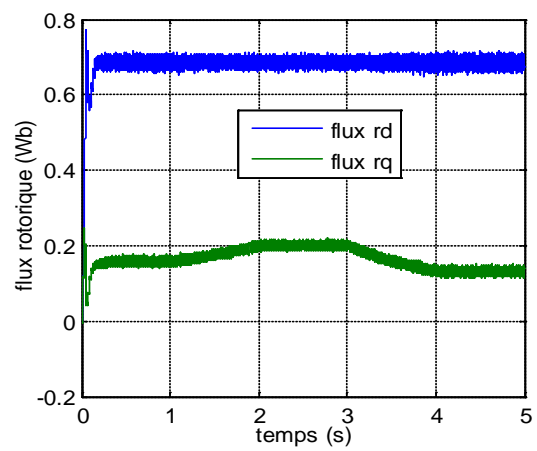


Figure IV.45 Composantes directe et quadrature du flux rotorique

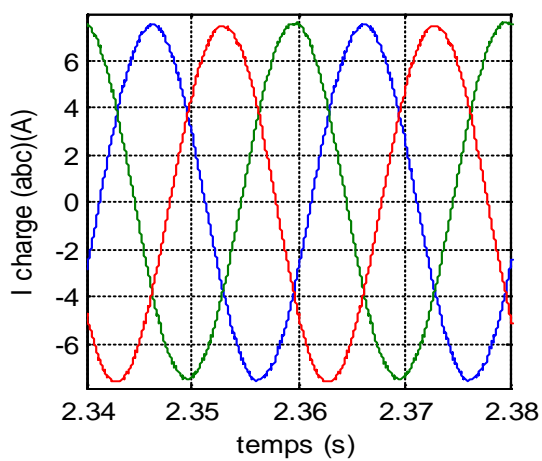


Figure IV.46 Allures des courants de charge

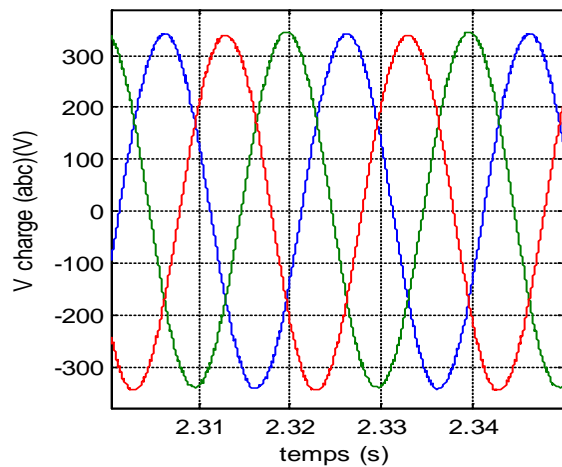


Figure IV.47 Allures des tensions de charge

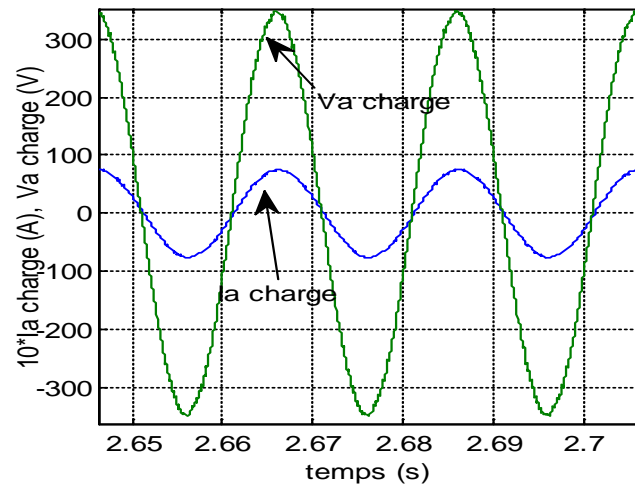


Figure IV.48 allure de courant et tension d'une phase

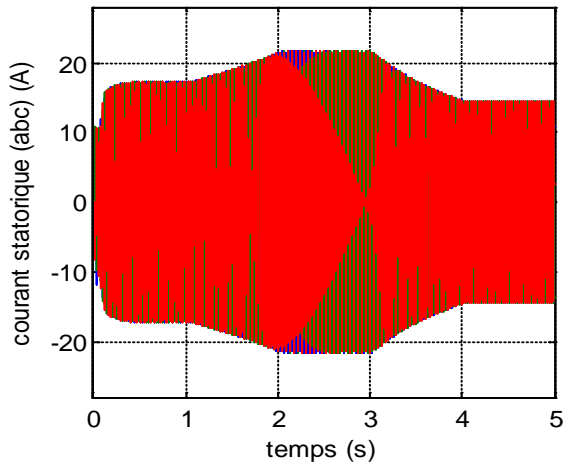


Figure IV.49 Allures des courants statoriques

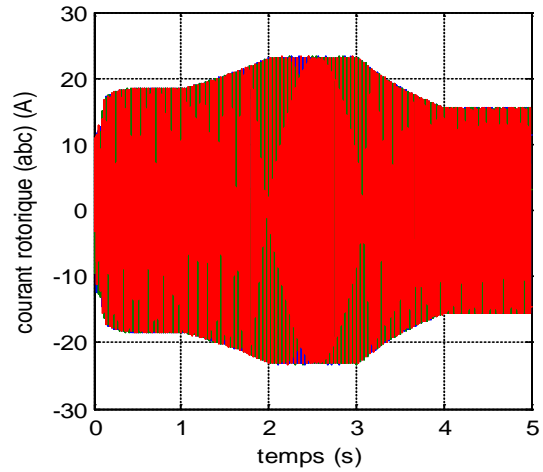


Figure IV.50 Allures des courants rotoriques

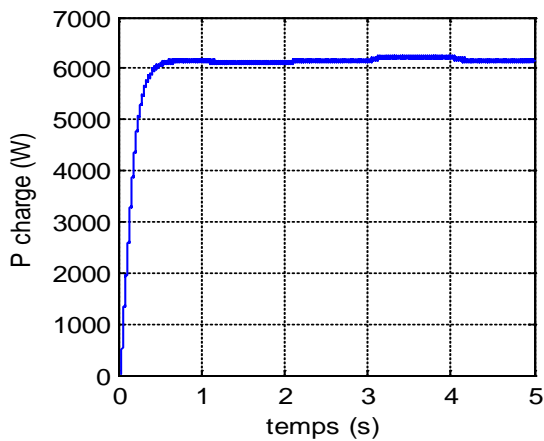


Figure IV.51 Allure de la puissance de la charge

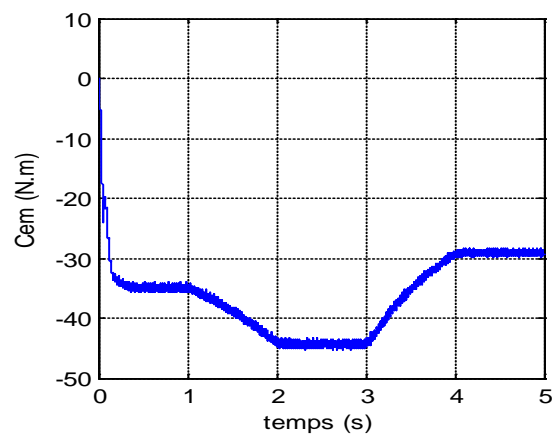


Figure IV.52 Allure de couple électromagnétique

IV.3 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à tester sur Matlab/simulink les performances de la commande d'une génératrice asynchrone afin de bien contrôler la tension continue à la sortie de redresseur pour des variations de vitesse et/ou charge.

Les résultats de simulation ont montré d'une manière générale, la capacité de notre structure optée pour l'étude de fonctionner à vitesse et à charge variable, une bonne régulation de la tension redressée pour les variations de vitesse mais une certaine sensibilité aux variations de la charge. Toute fois, la régulation permet à cette tension de retrouver rapidement sa valeur de référence.

Une fois que la tension continue est contrôlée à sa valeur de référence pour une plage donnée on peut alimenter une charge isolée avec des tensions d'amplitude et de fréquence fixe à travers un onduleur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation (Alimentation et commande), ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter son application dans une chaîne de production d'énergie pour un fonctionnement dédié pour un site isolé. Pour ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté les différentes sources d'énergies existantes, ensuite, nous avons présenté quelques chaînes de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique connectées au réseau puis les chaînes exploitées dans les stations isolées et autonomes. Enfin, pour des raisons de grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, aussi sa puissance massique importante, nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à double alimentation pour effectuer son étude dans le cas d'un système de petite puissance toute on opte un choix de structure totalement interfacée avec la charge.

Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices.

Afin de découpler la tension et le flux, et rendre ainsi le comportement de la machine asynchrone à double alimentation similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparé, dans le troisième chapitre on a proposé une stratégie de contrôle vectorielle pour régler la tension et la fréquence de la MADA débitant sur un réseau autonome en se basant sur le principe de l'orientation du flux statorique. La structure totalement interfacée avec la charge isolée permet de gérer le partage d'énergie entre le stator et le rotor et présente l'avantage de fonctionner sur une large plage de vitesse de rotation, grâce à la possibilité de réduire le flux dans la machine.

Le quatrième chapitre a été consacré à l'application de la technique de commande proposée dans le chapitre trois à la génératrice asynchrone et la visualisation des résultats obtenus. L'évolution du système pour une variation de la charge et de la vitesse d'entraînement est testée sur différentes charges (purement résistives, à effet inductive) et les résultats de simulation ont démontré que le contrôle proposé est capable de rejeter des

perturbations extérieures comme les variations de la charge et de la vitesse d'entraînement même sur une grande plage de transition.

Pour la continuité de ce travail, on peut dresser les perspectives de recherche associées au thème abordé dans ce mémoire :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique ;
- Etude de l'angle de charge existant entre la f.m.m statorique et la f.m.m rotorique ;
- Pour la commande, on envisage l'utilisation des régulateurs avancés à la place des régulateurs classiques PI ;
- L'utilisation d'autres convertisseurs statiques au stator et au rotor (convertisseur matriciel, convertisseur multi-niveau).

Références Bibliographiques

- [1] :F. Amir, « Etude du Fonctionnement des Centres de Production Dans un Système de Marché Libre de L'énergie Electrique », Ingénieur en Electrotechnique .Université Batna, 2012.
- [2] :S.Busquet, « Etude d'un Système Autonome de Production d'Energie Couplant un Champ Photovoltaïque, un Electrolyseur et une Pile a Combustible : Réalisation d'un Banc d'Essai et Modélisation », Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [3] : S.El-Aimani, « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [4] :Y.Vechiu, « Modélisation et Analyse de l'Intégration des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome », Thèse Doctorat, Université de Havre, 2005.
- [5] : H. Camblong – « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne Dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.
- [6] : K.Idjdarene, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse Doctorat, Université de Lille 1, 2010.
- [7] : F.Adboune, « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné », mémoire de Magister, université Bejaia
- [8] : M. Lopez, «contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour les unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Université Paris 11 Sud.
- [9] G. Salloum. Contribution `a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation. Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [10] : <http://www.techniques-ingenieur.fr//Convertisseurs et machines Électriques>.
- [11] :B.Tounsi, « Etude Comparative de Groupes Electrogènes Embarqués à Large Gamme de Vitesse Variable Associant Machines à Aimants Permanents et Conversion Statique », Thèse Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse ,2006.
- [12] : A.Bensalem, « Analyse Et Gestion De La Production Des Centrales Electriques Liées Aux Réseaux Electrique De Grande Taille ». Thèse de Doctorat d'Etat, Université de El- Hadj Lakhdar, Batna, 2007.
- [13] : A.Davigny, « Participation aux Services Systèmes de Fermes d'Eoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie », Thèse Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2007.
- [14] : Principes d'Electrotechnique, Cours et Exercices Corrigés, Dunod, Paris, 2005.
- [15] : F. Poitiers, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne :-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de L'Université de Nantes, France 2003.

- [16] : A. Abdelli – « Optimisation Multicritère d'une Chine Eolienne Passive », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [17] : A. Mirecki – « Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [18]: N.Mekkaoui, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ». Mémoire de Magister, Université Batna ,2004
- [19]:Y.Elbia, " Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté " Mémoire de Magister, Université Batna ,2009
- [20] : L.Louze, « Production Décentralisée de l'Energie Electrique : Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone Auto excitée », Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [21] : N.Bakouri « Etude et Commande des Générateurs Pour Réseaux Autonome de Bord d'Avion » Mémoire de Magister, Université Béjaïa, 2013.

Annexes

Annexes A

Calcul d'un PI avec compensation

Nous développons ici une autre conception du régulateur PI, dite méthode de compensation des pôles.

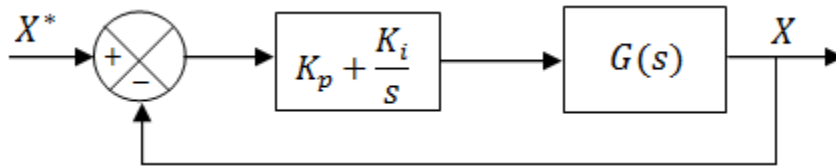


Figure A.1 Schéma bloc d'un processus régulé par un PI

La forme de correcteur est la suivante :

$$C_S = K_p + \left(\frac{K_i}{s}\right)$$

Avec :

- K_p : est le gain proportionnel du régulateur
- K_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert $G(s)$ pour un processus associé à ce correcteur :

$$G(s) = \frac{G}{1+\tau.s}$$

Tel que G est le gain statique et τ est la constant du temps du processus.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{BO}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{G}{1+\tau.s}$$

Afin d'éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous introduisons l'égalité suivante :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F_{BO}(s) = \frac{G \cdot K_i}{s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BF}(s) = \frac{G \cdot K_i}{G \cdot K_i + s}$$

Le temps de réponse t_r du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = 3 \cdot \frac{1}{G \cdot K_i}$$

On peut alors exprimer les gains du correcteur en fonction des paramètres du processus et du temps de réponse choisi :

$$K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{G \cdot t_r}$$

$$K_i = 3 \cdot \frac{1}{G \cdot t_r}$$

Les valeurs numériques des temps de réponse en boucle fermée des différentes grandeurs sont données ci-dessous :

Courants de stator : 10 ms

Courants du rotor : 10ms

Courants de filtre : 10ms

Flux du stator : 200ms

Annexe B

Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations de la machine asynchrone triphasée. Elle est constituée d'une transformation triphasée - diphasée et d'une rotation.

Le changement de repère que nous effectuons lors de la transformation de Park permet de décomposer l'espace de dimension trois en un repère orthogonal constitué d'une droite et d'un plan d'axe (d, q). Avec l'hypothèse d'un régime équilibré, les équations obtenues dans le plan (d, q) caractérisent entièrement le modèle triphasé.

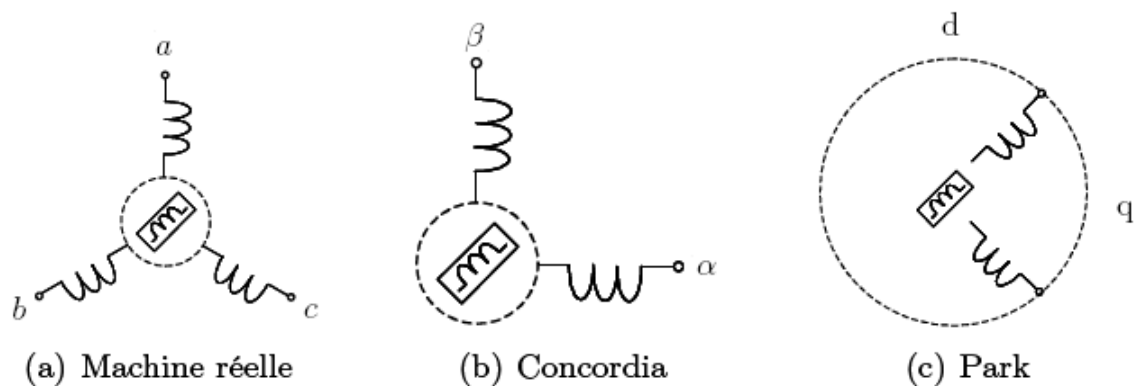


Figure B.1 interprétation d'une transformation de Park sur une machine électrique

Transformation triphasée-diphasée

L'idée des transformations de Clarke et de Concordia est de représenter les systèmes de grandeur triphasée dans un repère orthonormé (α, β, o) . Ce dernier est fixe par rapport au repère (a, b, c) . Le choix d'une matrice orthogonale (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie des transformations directe et inverse. Le produit matriciel définissant la transformation est donné par :

$$(X)_{\alpha\beta o} = C_{32} \cdot (X)_{abc}$$

Tel que :

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

La transformation inverse de Concordia est définie par le produit matriciel suivant :

$$(X)_{\alpha\beta o} = C'_{32} \cdot (X)_{abc}$$

La matrice de passage de Clarke est donnée par :

$$T_{32} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Cette dernière matrice n'est pas orthogonale, l'intérêt de la transformation de Clarke est de conserver les amplitudes dans l'un ou l'autre repère.

Matrice de rotation

La transformation qui permet le passage du repère fixe (α, β, o) d'axes au repère tournant d'axes (d, q, o) s'exprime par

$$(X)_{dqo} = R_{\theta} \cdot (X)_{\alpha\beta o}$$

Avec R est la matrice de rotation et θ l'angle que forme le repère (d, q, o) avec le repère (α, β, o) , il est appelé angle Park.

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice de transformation de Park $P(\theta)$ qui permet le passage direct du repère naturel (a, b, c) au repère tournant (d, q, o) , dans le cas où l'on souhaite que l'expression de la puissance soit la même dans les deux repères, est donnée par :

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

Cette matrice conserve les équivalences énergétique et magnétique instantanées dans les deux repères et donne des grandeurs continues.

Annexe C

Paramètres de la machine modélisée

- Machine asynchrone à double alimentation (à rotor bobiné)
- $R_s = 0.445 \Omega$
- $R_r = 0.62 \Omega$
- $L_s = 0.084 \text{ H}$
- $L_r = 0.081 \text{ H}$
- $L_M = 0.078 \text{ H}$
- $J = 0.005 \text{ kg.m}^2$
- $P = 2$
- $P_n = 7500 \text{ W}$

Résumé: Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel est la principale source d'énergie électrique. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement, cela donne l'avantage aux énergies renouvelables tel que les éoliennes et les mini centrales hydraulique. Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de mémoire concerne l'alimentation et la commande d'une machine asynchrone à double alimentation et l'effet qu'il pourra porter son application dans une chaîne de conversion d'énergie dédié pour un site isolé. La structure d'étude choisie (totalement interfacée) possédant plusieurs avantages.

La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a été présentée, ainsi nous avons proposé une stratégie de contrôle vectorielle basée sur le principe de l'orientation du flux statorique, les résultats de simulation du modèle sous l'environnement MATLAB/Simulank montrent que le contrôle permet le réglage de la tension et de la fréquence statorique à des valeurs constantes malgré les contraintes extérieures dues à la variation de la charge et/ou de la vitesse d'entraînement.

Mots clés : MADA, réseau autonome, commande vectorielle, convertisseur MLI, bus continu, réglage de la tension et de la fréquence, modélisation, totalement interfacée.

Abstract: in the most remote areas, diesel generator is the main power source. For these regions, the price of grid extension would be prohibitive and the additional cost of the fuel supply increases dramatically with isolation that gives the advantage to renewable energy such as wind and hydro plants. In this context, the contribution envisaged with this memory for the power and control of a double-fed asynchronous machine and the effect it may bring its application in a chain of dedicated energy conversion for isolated site. The study selected structure.

Modeling the double-fed asynchronous machine has been presented, and we have proposed a vector control strategy based on the principle of the stator flux orientation, the results of the simulation model in MATLAB / environment Simulank shows that control permits adjustment of the voltage and the stator frequency at constant values despite external stresses due to the variation of load and driving speed.

Keywords: MADA autonomous network, vector control PWM converter DC bus voltage control and frequency modeling.