



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'Electrotechnique

Mémoire

de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
électrotechnique

Options : Machine électrique

Thème :

**Commande vectorielle en puissance d'une
génératrice asynchrone à double
alimentation**

Dirigé par :

M^r CHIBAH ARZKI

Réalisé par :

M^r BOUADDOU Oualid
&
M^r LAHOUAZI Salem.

Promotion 2012/2013

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu, nos chers parents de nous avoir aidés pour arriver au terme de ce travail qui est le fruit de plusieurs années d'études.

Nous remercions aussi notre promoteur Mr CHIBAH AREZKI (maitre-assistant) de nous avoir aidé énormément et pour son sacrifice et ses conseils précieux.

Nos remerciements vont également au président de jury Mr AZZOUG YAZID (maitre de conférences) d'avoir accepté la présidence de jury de ce mémoire, qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury MEZIANI MADJID (maitre-assistant) et Melle KECILLI NADIA (maitre-assistante) qui ont l'honneur d'examiner et juger notre travail.

En fin nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

I. Introduction.....	3
II. Présentation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	3
III. Principe de fonctionnement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	6
IV. Modélisation de la GADA.....	5
IV.1.Introduction.....	5
IV.2. Hypothèses simplificatrices :	6
IV.3. Mise en équation de la machine:.....	7
IV.3.1 Equations électriques :.....	7
IV.3.2 Equations des flux :	8
IV.4. Transformation triphasée – diphasée.....	9
IV.4.1 Transformation de Concordia.....	9
IV.4.2 Transformation de Park:.....	11
IV.5.Modèle diphasé de la GADA dans le repère de PARK :	11
IV.5.1 Equations électrique dans le repère de PARK :	11
IV.5.2. Equation magnétique dans le repère de PARK	11
IV.6. Equation mécanique.....	12
IV.7. Couple électromagnétique.....	13
IV.8.Modèle d'état non linéaire et non stationnaire de la MADA:	13
V.Modélisation de l'onduleur de tension.....	14
V.1.Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	16
VI.Conclusion.....	18

Chapitre II

I. Introduction.....	19
II. Principe de la commande vectorielle.....	19
III. Variantes de la commande vectorielle.....	19
IV. Contrôle Vectoriel par orientation du flux statorique de la GADA.....	20
V. Relation entre puissance statoriques et courants rotoriques :	23
VI. Conclusion.....	25

CHAPITRE III

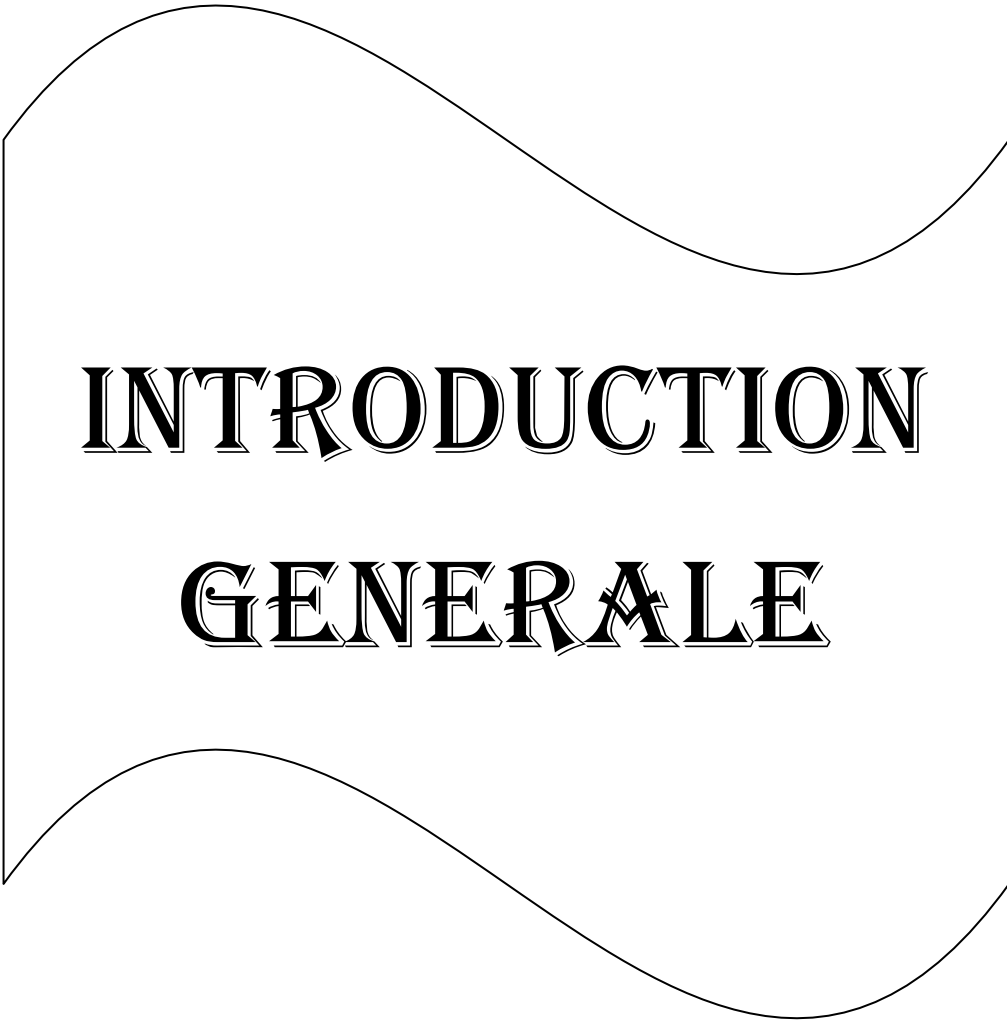
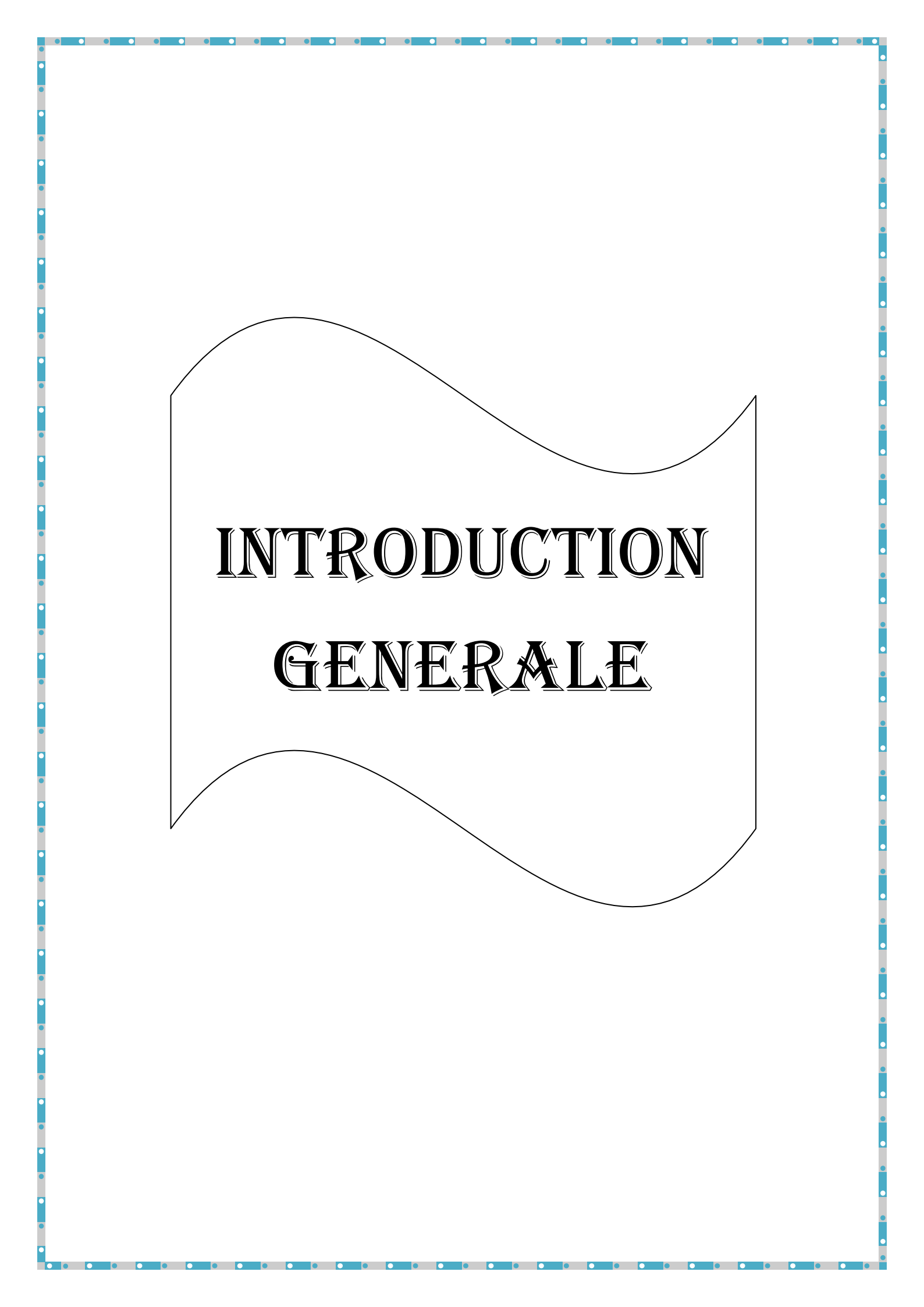
I. Introduction	26
II. Structure générale de la simulation.....	26

SOMMAIRE

II.1.	Système Electromécanique :.....	27
II.1.1	Partie électrique	27
II.2.	Système de Puissance.....	29
II.2.1.	Partie onduleur :	30
II.2.2.	Partie commande MLI.....	30
II.3.	Système de commande.....	31
II.3.1.	Boucle de puissance :.....	31
II.3.2.	Boucle de courant :.....	32
III.	Résultats de simulation.....	33
III.1.	Interprétation des résultats.....	39
IV.	Conclusion.....	40

INTRODUCTION

GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, elle garantit de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation) et elle est considérée comme un facteur essentiel pour le développement économique.

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé.

Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant d'ici 2012 à leur niveau de 1990, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable. Ceci a été recommandé à la 3ème Conférence des Parties de la Convention – Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997. Dans cette logique, la Commission européenne a adopté en 2008 un « paquet » de directives consistant à indexer pour moitié sur le PIB des états-membres l'objectif des « trois fois 20 » : Réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport au niveau de 1990, amélioration de 20 % en matière d'efficacité énergétique et part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie augmentée à 20 % d'ici à 2020.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dites 'renouvelables' sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Durant la dernière décennie, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW notamment pour tirer parti au maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la Machine

Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages. En effet, cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Par ailleurs, les convertisseurs statiques utilisés pour le contrôle de cette machine peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une fraction de la puissance totale (qui représente la puissance du glissement).

Le présent travail concerne une étude de la commande vectorielle en puissance d'une GADA à flux statorique orienté. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail constitué de trois chapitres organisés comme suit :

- Le premier chapitre est dédié à la présentation de la modélisation détaillée de la machine asynchrone à double alimentation avec son système d'alimentation. Un modèle mathématique biphasé de la machine asynchrone à double alimentation sera introduit.
- Dans le deuxième chapitre, nous développons la stratégie de commande adoptée à savoir le contrôle vectoriel en puissance par orientation du flux statorique.
- Le troisième chapitre portera sur la mise en œuvre de la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation sous l'environnement Matlab /Simulink.

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

I. Introduction

Traditionnellement et jusqu'à nos jours, la machine à courant continu possède l'image de marque d'une machine essentiellement prédisposée au fonctionnement à vitesse variable, puisque la nature de la source qu'elle requiert, ainsi que sa commande pour assurer cette fonction sont simple à aboutir.

La machine asynchrone à cage, a connu ces dernières années, grâce à l'évolution technologique récente de l'électronique de puissance et la maîtrise des techniques de commande un essor considérable, et elle est devenue la machine la plus utilisée surtout dans le domaine des entraînements à vitesse variable car cette dernière présente l'avantage d'être plus robuste et moins coûteuses que les autres machines. Cependant, elle présente des inconvénients tels que la consommation de la puissance active, un courant de démarrage élevé, une limitation en puissance, de même qu'elle présente des grandeurs que on peut pas mesurer au niveau du rotor, ce qui nécessite une commande plus compliquée.

Ces différents inconvénients sont à l'origine de l'émergence d'un nouveau type de machine à savoir ; la machine asynchrone à double alimentation. En effet, ces dernières années un grand intérêt est accordé à ce type de machine dans diverses applications ; soit en générateur dans l'énergie éolienne, soit en moteur dans la traction ferroviaire...ect.

Dans le présent chapitre, nous présenterons la modélisation de la MADA (type courant) et de son alimentation. Nous débuterons par la mise en équation de la MADA en exprimant les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement dans le référentiel triphasé que l'on notera (a,b,c). Nous réduirons l'ordre du système et éliminerons la dépendance qui existe entre les coefficients d'inductances et la position du rotor par la transformation de Park. Cette transformation nous permettra de donner un nouveau modèle de la MADA dans le référentiel biphasé de Park noté usuellement (d, q). Ensuite, nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et sa commande MLI de type sinus triangle.

II. Présentation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitués le plus souvent de tôles magnétique empilées munies d'encoques dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine 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

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

Dans cette machine, les enroulements statorique sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

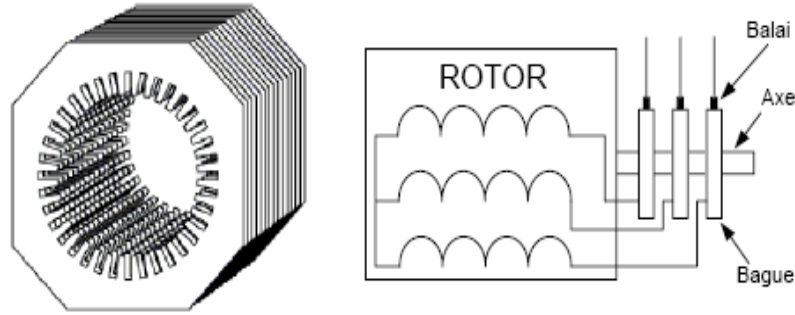


Figure 1.1. Structure du stator et du contact rotorique de la GADA.

III. Principe de fonctionnement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

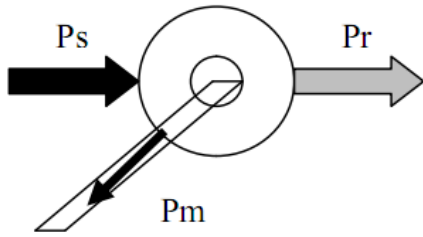
La machine asynchrone à double alimentation est excitée simultanément au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentations. Une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée pour garantir une certaine stabilité de la machine. Le caractère synchrone de ce type de machine demeure dans la mesure où la vitesse du rotor ne sera ni synchronisée avec la vitesse du champ du stator ni avec celui du rotor mais elle sera donnée par leur combinaison linéaire, telle que [1].

$$\omega = P\Omega = \omega_s \pm \omega_r.$$

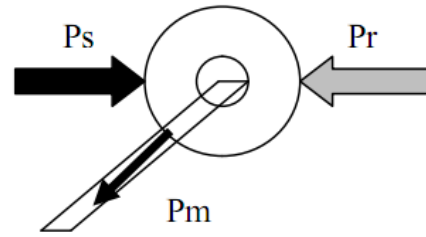
(-) pour un fonctionnement hyper synchrone et (+) pour un fonctionnement hypo synchrone. Dans les deux modes de fonctionnements et par l'imposition des fréquences, la vitesse en régime permanent est constante pour n'importe qu'elle charge.

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

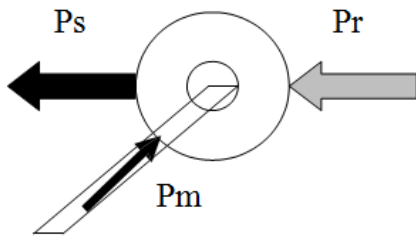
Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation



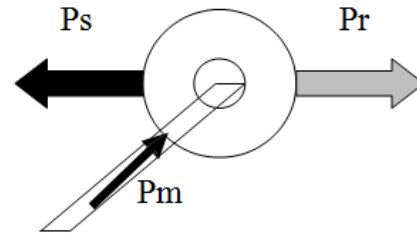
a) Fonctionnement moteur hypo synchrone



b) Fonctionnement moteur hyper synchrone



c) Fonctionnement génératrice hypo synchrone



d) Fonctionnement génératrice hyper synchrone

tel que :

- P_s : la puissance staorique.
- P_r : la puissance rotorique.
- P_m : la puissance mecanique.

Figure I.2. Différent mode de fonctionnement de la MADA

IV. Modélisation de la GADA

IV.1.Introduction

La modélisation d'une machine électrique est une phase intrinsèque de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider des développements par une quantification des phénomènes, en outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

Pour obtenir le modèle d'un système; trois taches doivent être accomplies : choisir le modèle, déterminer ses paramètre et enfin vérifier sa validité.

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entrées-sorties sous la forme de fonction de transfert.

Les modèles qui seront établis font ressortir plusieurs paramètres électriques et mécaniques dont l'identification par l'une des diverses méthodes existantes est nécessaire: essais classiques, essais indiciels, essais harmoniques ou fréquentiels...etc.

Cependant, il faut signaler l'impact de la précision des méthodes d'identification paramétrique sur la signification et la portée des modèles des machines électriques. En effet une identification correcte et précise confère à la modélisation toute son utilité pratique en permettant de généraliser une validité expérimentale et donne le moyen d'agir sur le système.

IV.2.Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation est un système complexe. Afin de réduire la complexité du modèle de la machine et d'obtenir une formulation simple, on considérera quelques hypothèses simplificatrices, à savoir :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La machine est symétrique.
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté, ce qui en résulte que les pertes fer et les pertes par hystérésis (les courants de Foucault) sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La F.m.m créée dans chaque phase au stator et au rotor est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

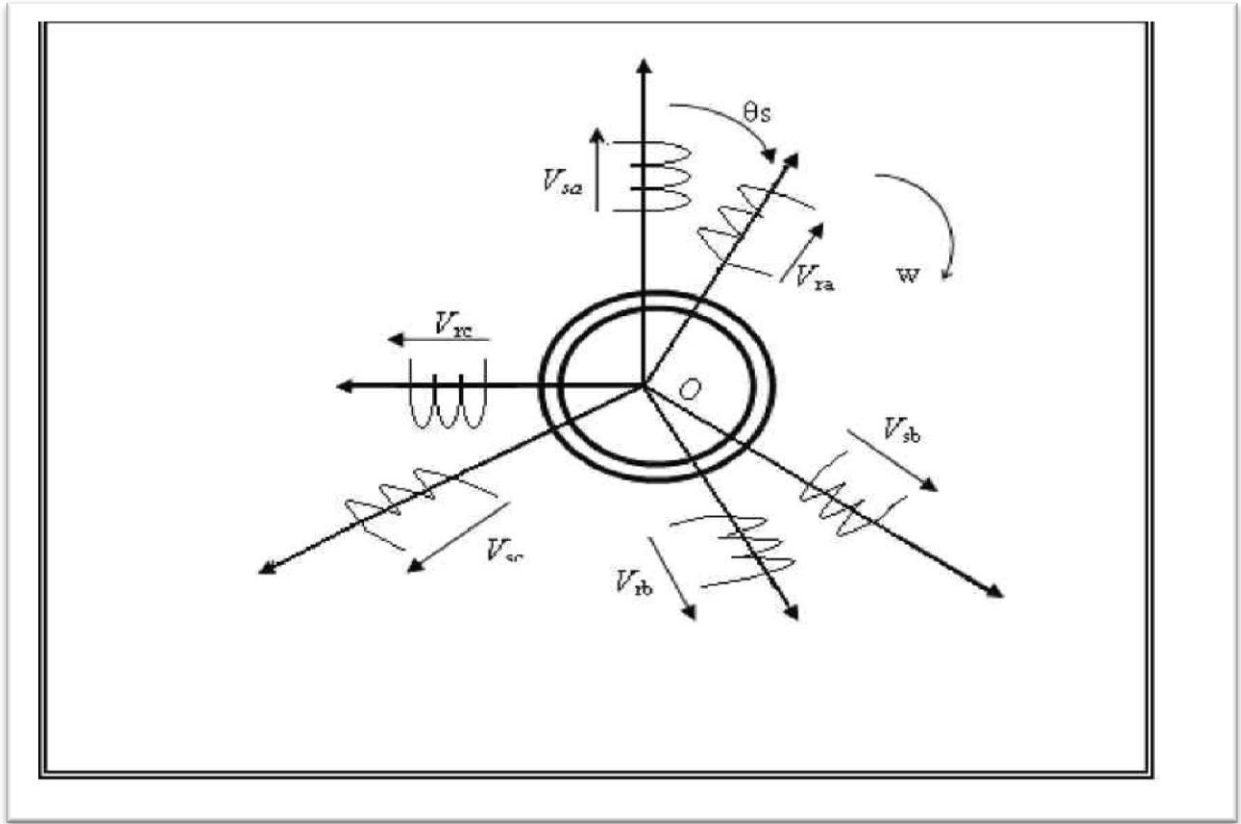


Figure I.3. Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation.

IV.3. Mise en équation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Les tensions, les flux et les courants statoriques et rotoriques triphasés de la machine asynchrone à double alimentation sont décrits par les équations vectorielles suivantes :

IV.3.1. Equations électriques :

Les équations électriques caractérisant la machine asynchrone à double alimentation sont :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ V_r &= [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{aligned} \quad (I.1)$$

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

Avec :

$$\begin{matrix} V_{as} \\ V_s = V_{bs} \\ V_{cs} \end{matrix} \quad \begin{matrix} I_{as} \\ I_s = I_{bs} \\ I_{cs} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \varphi_{as} \\ \varphi_s = \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} V_{ar} \\ V_r = V_{br} \\ V_{cr} \end{matrix} \quad \begin{matrix} I_{ar} \\ I_r = I_{br} \\ I_{cr} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_r = \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} R_s & 0 & 0 \\ R_s = 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{matrix} \quad \begin{matrix} R_r & 0 & 0 \\ R_r = 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{matrix}$$

Avec :

V_s , V_r :Représente respectivement les tensions statoriques et rotoriques.

I_s , I_r : Représente respectivement les courants statoriques et rotoriques.

φ_s , φ_r :Représente respectivement les flux statoriques et rotoriques. R_s et R_r : Résistance des enroulements statoriques et rotorique.

IV.3.2.Equations des flux :

Les flux créent par les enroulements statoriques et rotorique ont pour expression :

$$\begin{aligned} \varphi_s &= L_s I_s + M_{sr} I_r \\ \varphi_r &= L_r I_r + M_{rs} I_s \end{aligned} \quad (I.2)$$

Avec :

$$\begin{matrix} & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} = M_{rs} = & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{matrix}$$

L_s, L_r : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique respectivement.

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

M_{sr}, M_{rs} : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

En introduisant (I.2) dans (I.1), on aura :

$$V_s = R_s I_s + L_{ss} \frac{d I_s}{dt} + M_{sr} \frac{d I_r}{dt} \quad (I.3)$$

$$V_r = R_r I_r + L_{rr} \frac{d I_r}{dt} + M_{sr}^T \frac{d I_s}{dt} \quad (I.4)$$

Cette mise en équation aboutit à deux équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est relativement laborieuse. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Parmi ces transformations, on distingue celle de Concordia et de Park qu'on utilisera dans la suite de notre travail.

IV.4.Transformation triphasée – diphasée

IV.4.1.Transformation de Concordia

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé (abc) vers un système biphasé ($\alpha\beta$), comme le montre la figure I.4. Il existe principalement deux transformations : Clark et Concordia. La transformation de Clark conserve l'amplitude des grandeurs mais non la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient 3/2), tandis que celle de Concordia, qui est normée, elle conserve la puissance mais pas les amplitudes.

Le choix de matrice de passage non normée (Clark) est bien pratique en commande où l'on traite des grandeurs dq. En effet, cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant qui est absorbé par le moteur, sans avoir à passer par un coefficient multiplicateur. Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation de Concordia.

Le passage du système triphasé vers le système biphasé fixe ce fait comme suit :

$$X_{abc} = C_{32} \cdot X_{\alpha\beta} \quad (I.5)$$

Avec :

$$C_{32}^t = \begin{matrix} & \begin{matrix} -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{matrix} & \end{matrix}$$

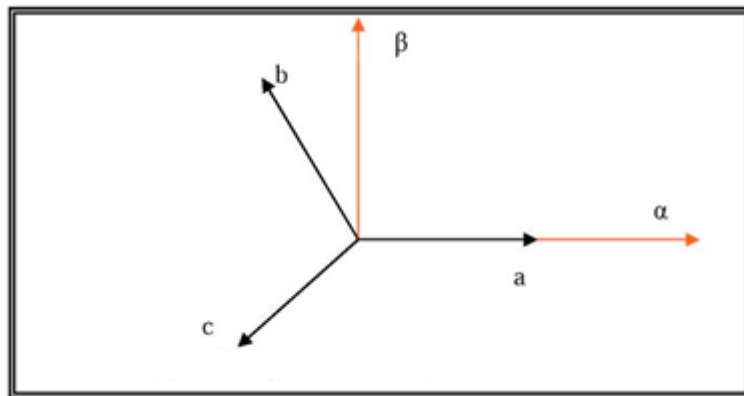


Figure I.4. Représentation schématique d'une transformation triphasée – diphasée.

Le tableau suivant représente la transformation de Clark et de Concordia :

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

<i>Transformation de Concordia</i>	<i>Transformation de Clark</i>
<i>Passer d'un système triphasé abc vers un système biphasé αβ</i>	
$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{Con23} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C23} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix}$
c.-à-d. $[X_{\alpha\beta}] = Con_{23} [X_{abc}]$	c.-à-d. $[X_{\alpha\beta}] = C_{23} [X_{abc}]$
avec $Con_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	avec $C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
<i>Passer d'un système biphasé αβ vers un système triphasé abc</i>	
$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{Con32} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C32} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$
c.-à-d. $[X_{abc}] = Con_{32} [X_{\alpha\beta}]$	c.-à-d. $[X_{abc}] = C_{32} [X_{\alpha\beta}]$
avec $Con_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	avec $C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Tableau. I.1.Tableau représentant la transformation de Clark et de Concordia.

IV.4.2.Transformation de PARK :

La transformation de Park est constituée d'une transformation biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer d'un repère (α - β) vers un repère mobile (d-q). Cette transformation s'effectue à travers une matrice dite matrice de Park $P(\vartheta_e)$.

$$P \vartheta_e = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_e & -\sin \vartheta_e \\ \sin \vartheta_e & \cos \vartheta_e \end{bmatrix}$$

Le passage du système biphasé fixe au système biphasé mobile, ce fait en multipliant par $P(\vartheta_e)$:

$$X_{dq} = P \vartheta_e \cdot X_{\alpha\beta} \quad (I.6)$$

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

IV.5.Modèle diphasé de la GADA dans le repère de PARK :

L'application de la transformation de PARK aux équations de la machine asynchrone dans un repère (d-q) tournant à une vitesse ω quelconque par rapport au stator et $(\omega - \omega_r)$ par rapport au rotor, nous donne :

IV.5.1.Equations électrique dans le repère de PARK

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega \phi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega - \omega_r) \phi_{dr} \end{aligned} \quad (I.7)$$

IV.5.2.Equation magnétique dans le repère de PARK

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \phi_{qr} &= L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{aligned} \quad (I.8)$$

On choisit $\mathcal{G}_e = \mathcal{G}_s$ le modèle en flux de la MADA se simplifier, en effet, les sous matrice inductance sont diagonales et elles ne dépendent plus de l'angle électrique entre le stator et le rotor :

$$\begin{aligned} \begin{matrix} \phi_{sq} \\ \phi_{rq} \\ \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{matrix} &= \begin{matrix} L_s & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} \\ \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_r \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} \end{aligned} \quad (I.9)$$

En intégrons l'équation (I.9) dans (I.7) on a :

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

$$\begin{matrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{matrix} = \begin{matrix} R_s - L_s \omega_s & 0 & -\frac{3}{2} \omega_s M_{sr} & 0 \\ 0 & R_s + L_s \omega_s & 0 & \frac{3}{2} \omega_s M_{sr} \\ -\frac{3}{2} \omega_r M_{sr} & 0 & R_r - L_r \omega_r & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} \omega_r M_{sr} & 0 & R_r + L_r \omega_r \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} + \begin{matrix} L_s & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} \\ \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_r \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} \quad (I.11)$$

IV.6. Equation mécanique

D'après la relation fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.12)$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Ω : Vitesse de rotation mécanique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

IV.7. Couple électromagnétique

La forme générale du couple électromagnétique développé par une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante [4] :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (I.13)$$

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

IV.8.Modèle d'état non linéaire de la MADA:

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} X &= f(x, u, t) \\ Y &= g(x, u, t) \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} X &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (I.14)$$

Avec :

X : vecteur d'état, U : vecteur d'entrée, Y : vecteur de sortie

Plusieurs possibilités sont offertes pour le choix du vecteur d'état qui traduit ensuite l'établissement de l'expression du couple électromagnétique.

$$X = (I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr})^t.$$

$$U = (V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}) : \text{Variable de commande.}$$

Le modèle d'état de la MADA peut être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \\ \omega \\ \vartheta \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -a_1 I_{sd} + a\omega + \omega_s I_{sq} + a_3 I_{rd} + a_5 \omega I_{rq} \\ -a\omega + \omega_s I_{sd} + a_1 I_{sq} + a_5 \omega I_{rd} - a_3 I_{rq} \\ a_4 I_{sd} + a_6 \omega I_{sq} + a_2 I_{rd} + (\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}) I_{rq} \\ -a_6 \omega I_{sd} - a_4 I_{sq} + \omega_s - \frac{\omega}{\sigma} I_{rd} - a_2 I_{rq} \\ m_1 I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq} - m_2 \omega \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & 0 & -b_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\ -b_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \\ C_r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (I.15)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1-\sigma}{\sigma} & a_1 &= \frac{R_s}{\sigma L_s} & a_2 &= \frac{R_r}{\sigma L_r} & a_3 &= \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_s L_r} & a_4 &= \frac{R_r M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \\ a_5 &= \frac{M_{sr}}{\sigma L_s} & a_6 &= \frac{M_{sr}}{\sigma L_r} & b_1 &= \frac{1}{\sigma L_s} & b_2 &= \frac{1}{\sigma L_r} & b_3 &= \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \end{aligned}$$

Et

$$m_1 = \frac{p^2 M_{sr}}{J} \quad m_2 = \frac{f}{J} \quad m_3 = \frac{p}{J}$$

V. Modélisation de l'onduleur de tension

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

Les onduleurs de tension sont les convertisseurs statiques continu alternatif permettent de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue [5].

L'onduleur de tension transforme un signal constant en un signal alternatif dont nous pouvons contrôler l'amplitude et la fréquence [6].

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un Thyristor (figure I.5). Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la Sortie deux niveaux de tension [6].

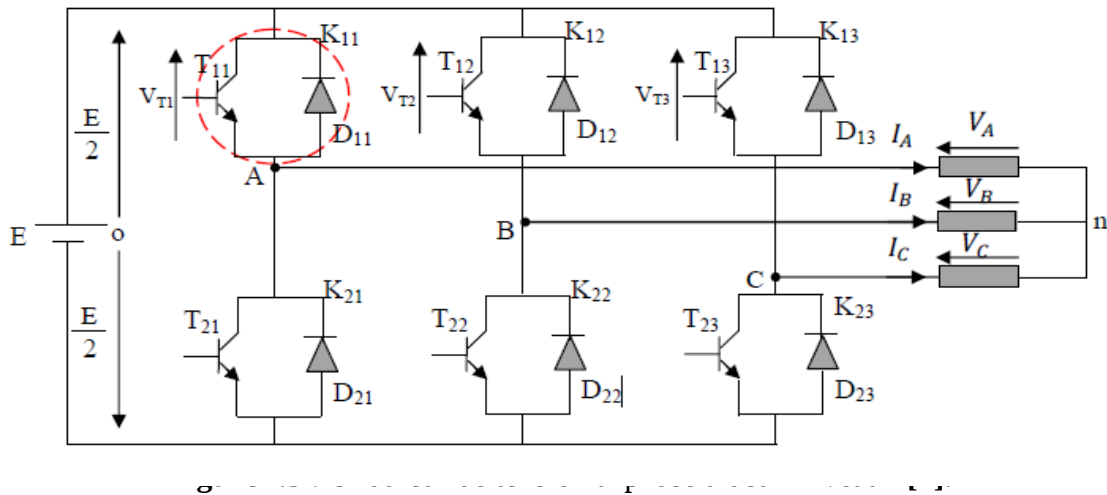


Figure I.5. Onduleur de tension triphasé à deux niveaux [1].

Les couples d'interrupteurs (K11, K21), (K12, K22), (K13, K23) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques et rotorique de la machine, et pour éviter de court-circuiter la source. Les diodes D_{ij} ($ij=1, 2, 3$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors.

En se basant sur la figure (I.5) représentant la structure de l'onduleur de tension, les tensions composées délivrées par ce dernier sont données comme suit :

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (\text{I. 16})$$

$$U_{BC} = V_B - V_C \quad (\text{I. 17})$$

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

$$U_{CA} = V_C - V_A \quad (\text{I.18})$$

Étant donné que le récepteur de sortie est équilibré, on peut passer des tensions simples aux tensions composées.

Les tensions simples forment un système de tension triphasée équilibrée, alors :

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (\text{I. 19})$$

De (I. 16), (I. 18) et (I. 19), on a :

$$V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \quad (\text{I. 20})$$

De (I. 16), (I. 17) et (I. 19), on a :

$$V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{AB}) \quad (\text{I. 21})$$

De (I. 17), (I. 18) et (I. 19), on a :

$$V_C = \frac{1}{3} U_{CA} - \frac{1}{3} U_{BC} \quad (\text{I. 22})$$

Les tensions simples peuvent aussi être données en fonction des tensions prises par rapport à un point commun « O » :

$$V_A = \frac{1}{3}(2U_{AO} - U_{BO} - U_{CO}) \quad (\text{I. 23})$$

$$V_B = \frac{1}{3}(2U_{BO} - U_{AO} - U_{CO}) \quad (\text{I. 24})$$

$$V_C = \frac{1}{3}(2U_{CO} - U_{AO} - U_{BO}) \quad (\text{I. 25})$$

Sous une forme matricielle, ces tensions sont données comme suit :

$$\begin{matrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{matrix} = \frac{1}{3} \begin{matrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{matrix} \quad (\text{I. 26})$$

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

En utilisant la notion de fonction de connexion, qui explicite la nature des connexions réalisées par des interrupteurs entre deux points d'un circuit, le système (I.26) deviendra :

$$\begin{matrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{matrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{matrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{matrix} \quad (\text{I. 27})$$

Avec : K_1, K_2, K_3 ; fonctions de connexion déterminant l'état des interrupteurs.

V.1.Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale [1].

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [1].

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence $m = \frac{f_p}{f_r}$
- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse: $r = \frac{V_p}{V_r}$

Le schéma de principe est donné par la (figure I.6) :

Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et de son Alimentation

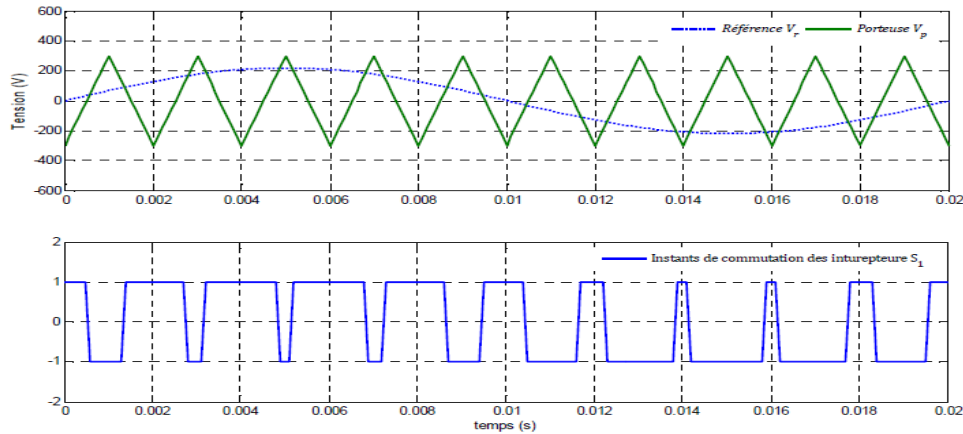


Figure I.6. Principe de la commande MLI [1].

On note que la MLI permet une nette réduction des harmoniques des courants, en augmentant la fréquence de découpage. Elle permet aussi de repousser vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage ; comme elle permet aussi de faire varier le fondamental de la tension désirée [14].

VI. Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté en premier lieu, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices qui nous ont permis de réduire sa complexité. En second lieu, nous avons abordé la modélisation de la partie alimentation qui a porté sur le principe de fonctionnement et de commande de l'onduleur triphasé, ainsi que sur le principe de la commande MLI.

I. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celui d'une machine à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [15],[16].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [17].

II. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par **Blaschk**, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées [16].

III. Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [6]:

- Suivant la source d'énergie :
 - Commande en tension (Voltage Source Inverter).

- Commande en courant (Current Controlled Inverter).
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - Commande vectorielle de flux rotorique.
 - Commande vectorielle de flux statorique.
 - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).
- Suivant la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase).
 - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

IV. Contrôle Vectoriel par orientation du flux statorique de la GADA

Afin de réaliser le principe de la commande vectorielle nous choisissons d'orienter l'axe d suivant le flux statorique. Le principe de ce type d'orientation de flux est illustré par la figure (II.1) :

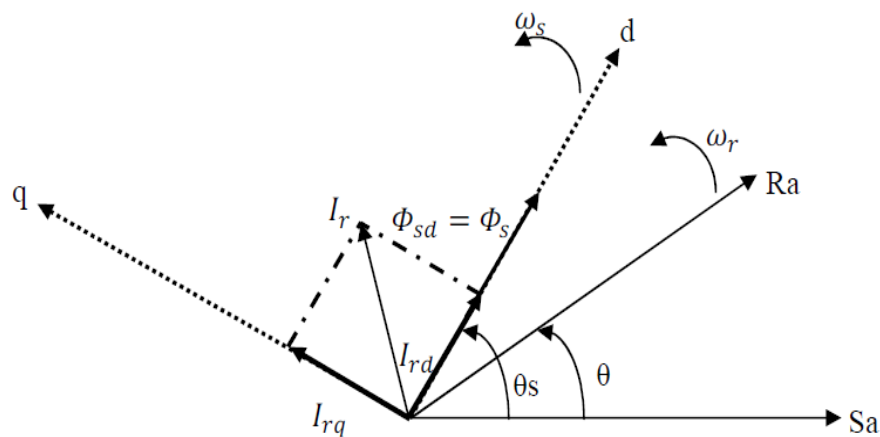


Figure II.1.Orientation du flux statorique.

Cette orientation conduit aux conséquences suivantes :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0.$$

En tenant compte de ces hypothèses les équations de la machine asynchrone peuvent être réécrites comme suit:

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\
V_{qs} &= R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\
V_{dr} &= -R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \\
V_{qr} &= -R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr}
\end{aligned} \quad (II.1)$$

Tenant compte de ces conséquences, le courant statorique suivant l'axe d et q peuvent être déterminés comme suit :

$$\begin{aligned}
I_{qs} &= -\frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\
I_{ds} &= \frac{\varphi_s - M_{sr} I_{dr}}{L_s}
\end{aligned} \quad (II.2)$$

En remplaçant le système d'équation (II.2) dans les équations des composantes directe et en quadrature des flux rotoriques on obtient :

$$\begin{aligned}
\varphi_{dr} &= (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds} = L_r \sigma I_{dr} + \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds} \\
\varphi_{qr} &= (L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}) I_{qr} = L_r \sigma I_{qr}
\end{aligned} \quad (II.3)$$

En injectant les systèmes d'équation (II.2) et (II.3) dans (II.1), on a :

$$\begin{aligned}
V_{ds} &= \frac{R_s}{L_s} \varphi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} M_{sr} I_{dr} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\
V_{qs} &= -\frac{R_s}{L_s} M_{sr} I_{qr} + \omega_s \varphi_{ds}
\end{aligned} \quad (II.4)$$

$$\begin{aligned}
V_{dr} &= R_r I_{dr} + L_r \sigma \frac{dI_{dr}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_s} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r L_r \sigma I_{qr} \\
V_{qr} &= R_r I_{qr} + L_r \sigma \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_r L_r \sigma I_{dr} + \omega_r \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds}
\end{aligned} \quad (II.5)$$

Les tensions du système d'équation (II.5) peuvent être réécrites sous la forme :

$$\begin{aligned}
V_{dr} &= V_{1rdc} + e_q \\
V_{qr} &= V_{1rqc} + e_d + e_\varphi
\end{aligned} \quad (II.6)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
V_{1rdc} &= R_r (1 + T_r \sigma \frac{d}{dt}) I_{rd} \\
V_{1rqc} &= R_r (1 + T_r \sigma \frac{d}{dt}) I_{rq}
\end{aligned} \quad (II.7)$$

$$\begin{aligned}
e_q &= -\frac{M_{sr}}{L_s} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r L_r \sigma I_{qr} \\
e_d &= \omega_r L_r \sigma I_{dr} \\
e_\varphi &= \omega_r \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds}
\end{aligned} \quad (II.8)$$

Le système d'équation (II.8) représente les termes de couplage.

En se basant sur l'équation (II.2), l'expression du couple a pour forme:

$$C_{em} = -p \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} = -p \frac{M_{sr}}{L_s} \varphi_s I_{qr} \quad (II.9)$$

A flux statorique constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à I_{qr} :

$$C_{em} = K I_{qr} \quad (II.10)$$

Nous pouvons remarquer, d'après les considérations précédentes, que le couple ne dépend que de la composante en quadrature I_{qr} si le flux statorique est maintenu constant. Ainsi, nous avons réalisé la décomposition du courant rotorique en deux termes qui correspondent respectivement au flux et au couple, et par conséquent, nous avons obtenu une structure semblable à celle d'une machine à courant continu.

A partir de l'équation (II.7), nous obtenons la même fonction de transfert régit les courants et les tensions d'un même axe au stator, ainsi qu'au rotor :

$$\frac{I_{rd}(s)}{V_{1rdc}(s)} = \frac{I_{rq}(s)}{V_{1rqc}(s)} = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \sigma T_r s} \quad (II.11)$$

A partir des équations (II.7) et (II.11), on peut schématiser la régulation associé à chacun des courants rotorique :

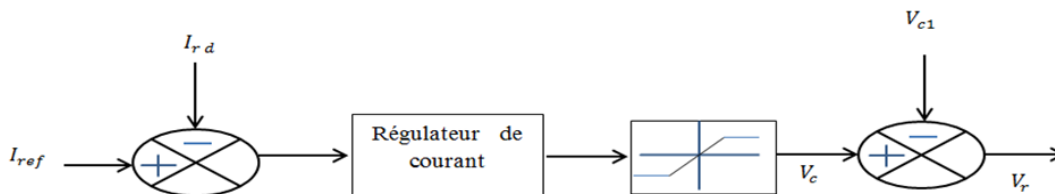


Figure. II.2. Schéma de régulation d'un courant.

V. Relation entre puissance statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \\ Q_s &= V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \end{aligned} \quad \text{II.12}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds}=0$) donne :

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s I_{qs} \\ Q_s &= V_s I_{ds} \end{aligned} \quad \text{II.13}$$

En remplaçant I_{qs}, I_{ds} par leurs expressions données par l'équation II.2, nous obtenons les expressions suivantes pour la puissance active et réactive :

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s &= \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{\varphi_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} \end{aligned} \quad \text{II.14}$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{\varphi_{ds} M_{sr}}{L_s} I_{dr} \quad \text{II.15}$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant I_{qr} et la puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant I_{dr} .

Les schémas global présentant la régulation en puissance d'une machine asynchrone à double alimentation, alimenté en tension et commandé par orientation de flux, peut être représenté par la figure (II.3).

Comme le montre la figure (II.3), la commande vectorielle en puissance de la GADA est constituée de deux boucles imbriquées à savoir la boucle des puissances et la boucle des courants I_{dr} et I_{qr} .

Les puissances actives et réactives sont régulées à travers la boucle externe du bloc. Les sorties des régulateurs des puissances actives et réactives permettent de générer les courants de référence $I_{dr}^{ref}, I_{qr}^{ref}$ qui sont comparés aux valeurs de courants I_{dr} et I_{qr} issues de la mesure des courants réels et l'erreur sollicite les régulateurs des courants I_{dr} et I_{qr} .

En parallèle avec cette boucle, on trouve une boucle de régulation des courants I_{dr}, I_{qr} . Les sorties des régulateurs de courant sont appliquées à des blocs de découplage qui

permettent de générer les tensions de commande V_{dr} et V_{qr} et par transformation de Park, on obtient les tensions de commande V_{ar} , V_{br} et V_{cr}

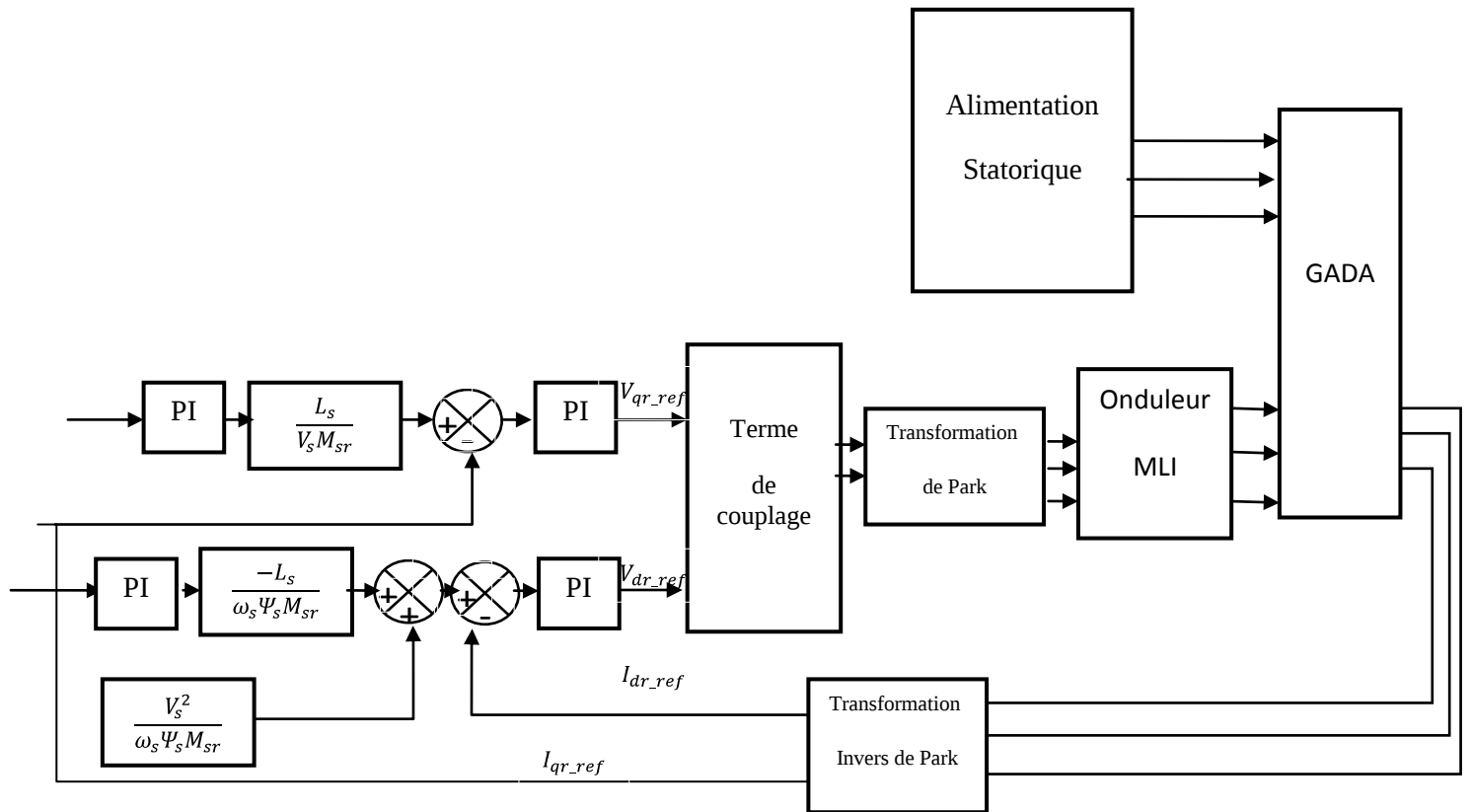


Figure. II. 3. Schéma Global de régulation vectorielle en puissance de la GADA.

VI. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la commande vectorielle de la GADA avec orientation du flux statorique. Cette commande a permis de découpler les grandeurs du couple et du flux pour un contrôle facile et une commande en puissance de la machine.

Nous avons dans ce sens établie une relation liant les courants rotoriques d'axes d et q aux puissance statoriques réactives et actives respectivement, ceci nous a permis de réaliser deux boucles de régulation en utilisant le régulateur PI.

I. Introduction :

Ce chapitre représente la partie simulation de notre projet qui consiste à la mise en œuvre de la stratégie de commande vectorielle en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation.

II. Structure générale de la simulation

La section suivante décrit la mise en œuvre sous l'environnement Matlab/Simulink de la stratégie de commande vectorielle en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation.

Le circuit réalisé est constitué de trois systèmes principaux :

- Le système électromécanique.
- Le système de puissance.
- Le système de commande.

Le schéma globale du bloc sous Matlab/Simulink et représenté dans la figure suivante :

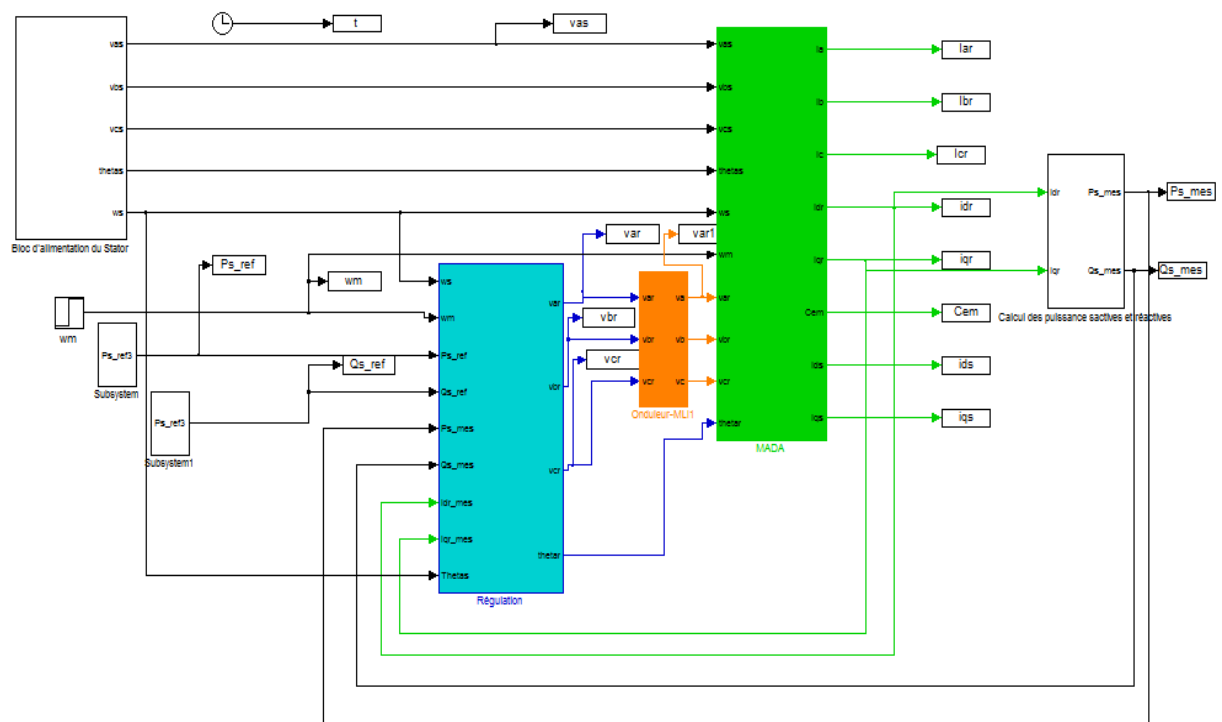


Figure III.1. Schéma global de la simulation.

II.1.Système Electromécanique

Ce système comporte le bloc décrivant le modèle simplifié de la machine étudiée. Les entrées de ce bloc sont les tensions issues du système de puissance. Il est constitué d'un seul bloc qui décrit les équations électriques de la machine.

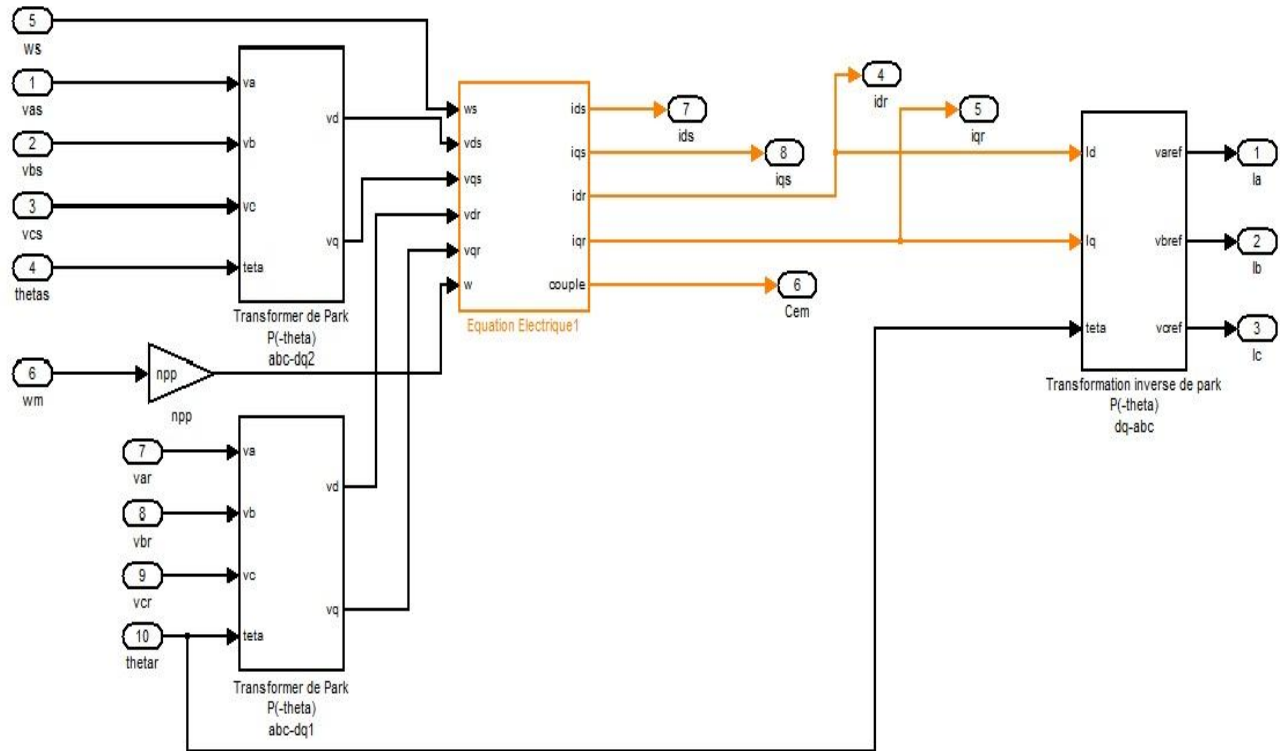


Figure III.2. Machine asynchrone à double alimentation.

II.1.1.Partie électrique

Cette partie comporte le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dont le modèle est décrit dans le paragraphe IV.8 du chapitre I.

Ce bloc a comme entrée les tensions de commande (V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq}) et la pulsation électrique ω_s et ω_r , et donne en sortie les courants (I_{sd}, I_{sq}, I_{rd} et I_{rq}) ainsi que le couple électromagnétique C_{em} .

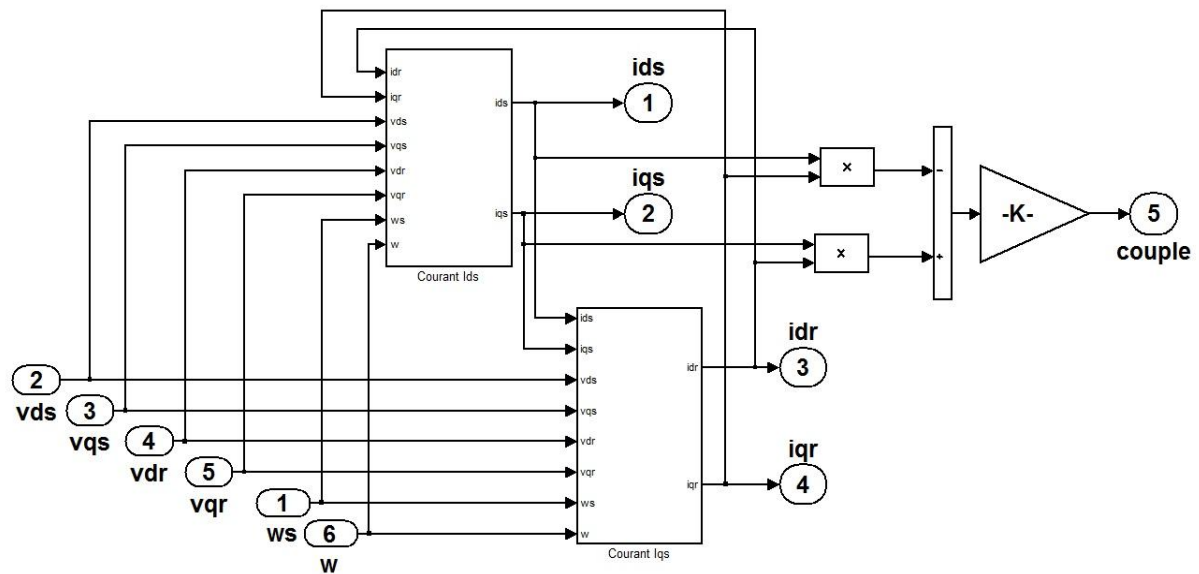


Figure III.3. Partie Electrique de la GADA

II.2. Système de Puissance

Afin d'alimenter la machine asynchrone à double alimentation, un système de puissance a été utilisé. Ce système est constitué de deux onduleurs de tension triphasé connectés à deux bus continus indépendants, pouvant fournir le maximum de puissance exigée de chaque côté. Les interrupteurs seront choisis en fonction du courant maximal qui les parcourt, de la tension à leurs bornes ainsi que de la fréquence de la porteuse de l'onduleur. Une modulation de largeur d'impulsion MLI, de type sinusoïdale régulière symétrique (sinus-triangle à fréquence fixe), est adoptée pour la commande des onduleurs

Ce système de puissance est constitué de deux sous blocs ; le premier décrit les équations électriques de l'onduleur et le deuxième la commande MLI.

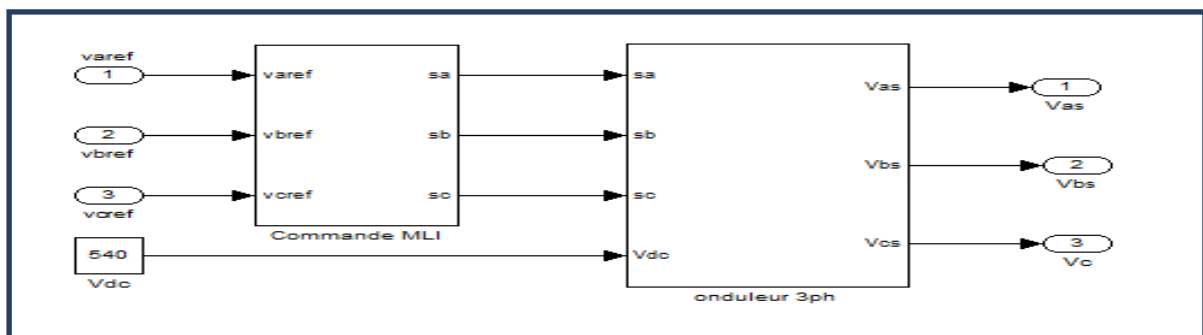


Fig.III.4. L'onduleur et sa commande MLI.

II.2.1. Partie onduleur :

Dans le présent travail, on a utilisé un onduleur dont le modèle électrique est présenté dans le paragraphe (V) du chapitre (I).

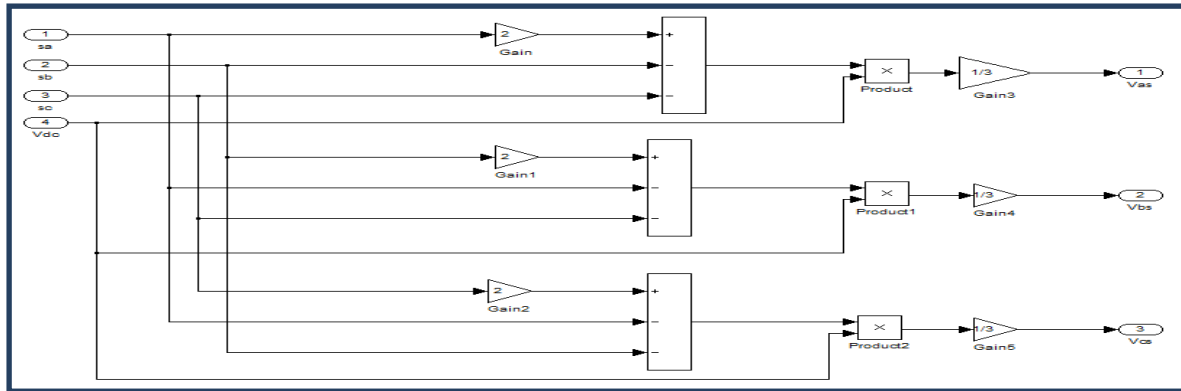


Fig.III.5. Partie onduleur.

II.2.2. Partie commande MLI

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_1 , S_2 et S_3 des interrupteurs de l'onduleur.

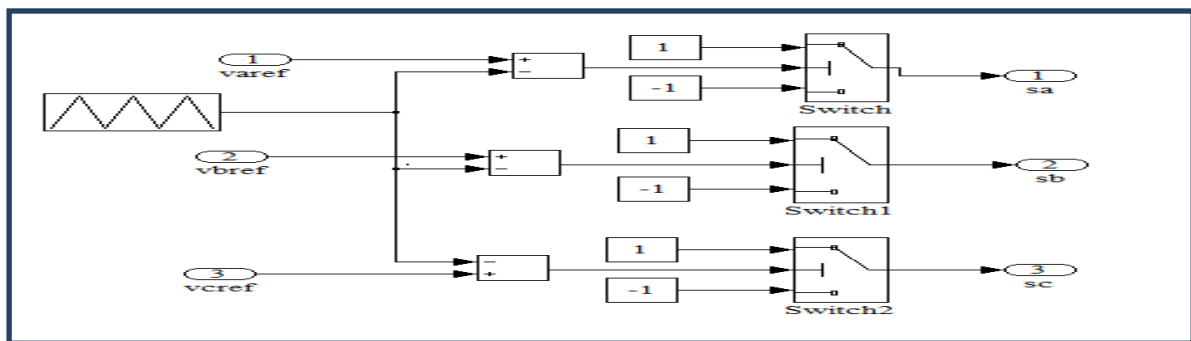


Fig.III.6. Partie la commande MLI.

II.3. Système de commande

Ce système représente la partie régulation de la GADA. La régulation des machines électriques se fait suivant différentes lois de commande en utilisant des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI). Comme il a été rappelé dans le paragraphe V du chapitre II, la stratégie de commande vectorielle comporte deux boucles de régulation : une boucle de puissance et une boucle de courant :

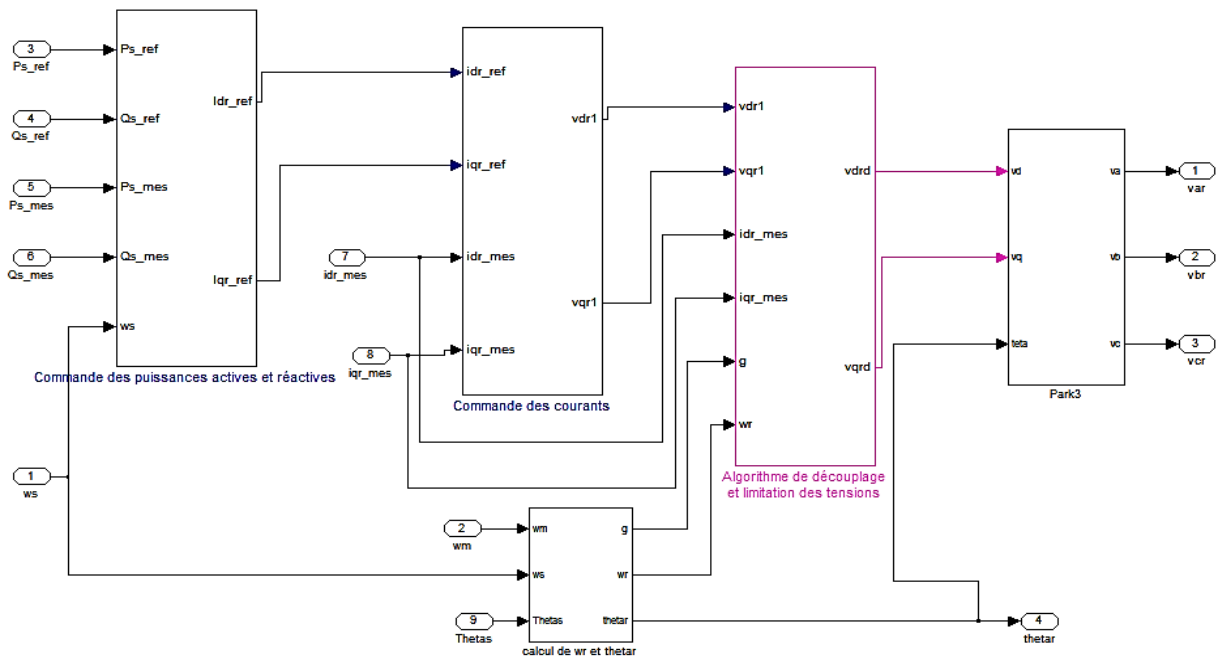


Figure III.9. Bloc de régulation

II.3.1. Boucle de puissance

Cette boucle a pour but le contrôle et la maîtrise des puissances dans la machine, afin de réaliser une commande performante en puissance. Ces puissances sont commandées par des régulateurs de type Proportionnel-Intégral équipés d'un système d'anti-saturation. Ces régulateurs permettent de générer les courants de référence I_{dr}^{ref} , I_{qr}^{ref} qui sont comparés aux valeurs de courants I_{dr} et I_{qr} issues de la mesure des courants réels et l'erreur sollicite les régulateurs des courants I_{dr} et I_{qr} .

La détermination des paramètres des PI peut se faire suivant plusieurs méthodes. Parmi elles, on distingue la méthode par placement de pôles qui offre de bonnes performances (temps de réponse, rapidité et stabilité). Dans le cadre de notre travail, cette méthode a été utilisée pour le calcul des paramètres de nos régulateurs (annexe 2).

II.3.2.Boucle de courant

Cette boucle permet la régulation et le contrôle des courants rotoriques de la machine. En effet, les courants rotoriques sont régulés au moyen de régulateurs de type PI équipé d'un système d'anti-saturation. Les sorties des régulateurs de courant sont appliquées à des blocs de découplage qui permettent de générer les tensions de commande V_{dr} et V_{qr} et par transformation de Park, on obtient les tensions de commande V_{ar} , V_{br} et V_{cr} .

La méthode de placement de pôles a été exploitée pour déterminer les paramètres des régulateurs de courant.

III. Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation de la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation. La machine est alimentée au stator par un système de tension triphasée et au rotor par un onduleur MLI dont la fréquence de commutation est fixée à 15 kHz. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe 2.

L'essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive alors la machine est entraînée à vitesse fixe de 1600tr/min.

Afin de déterminer et d'évaluer les performances de la stratégie mise en œuvre une trajectoire de puissance active et réactive ont été conçue (figure III.10) et (figure III.11)

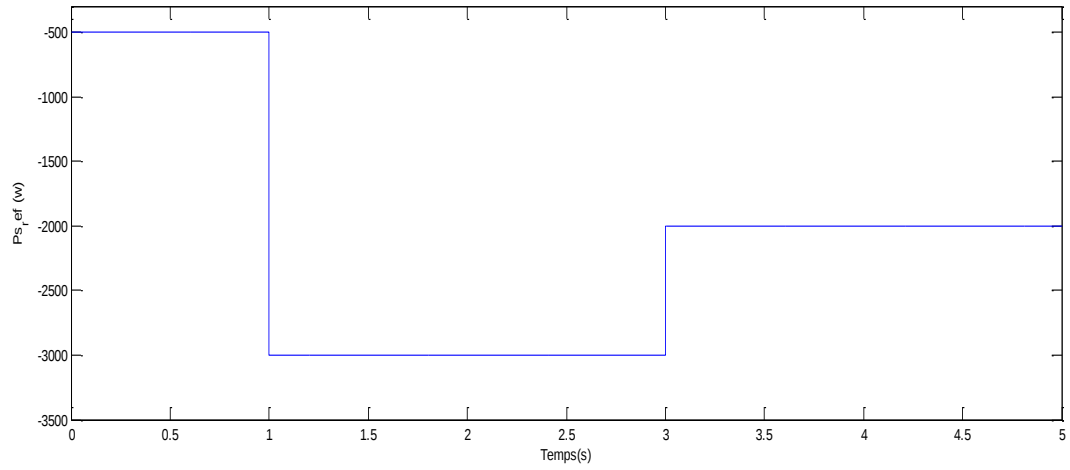


Figure .III.10 Puissance active du stator P_{s_ref} .

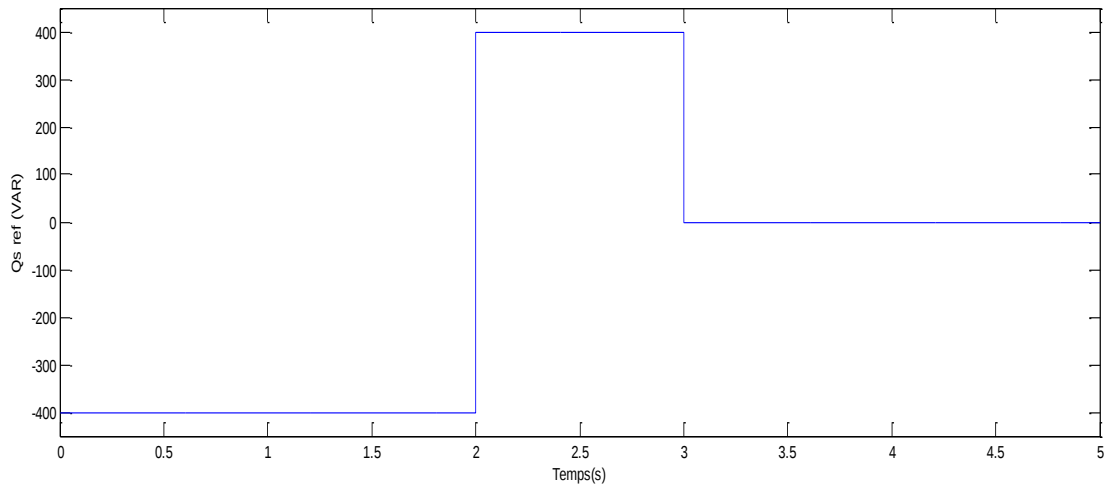


Figure III.11. Puissance réactive du stator Q_{s_ref} .

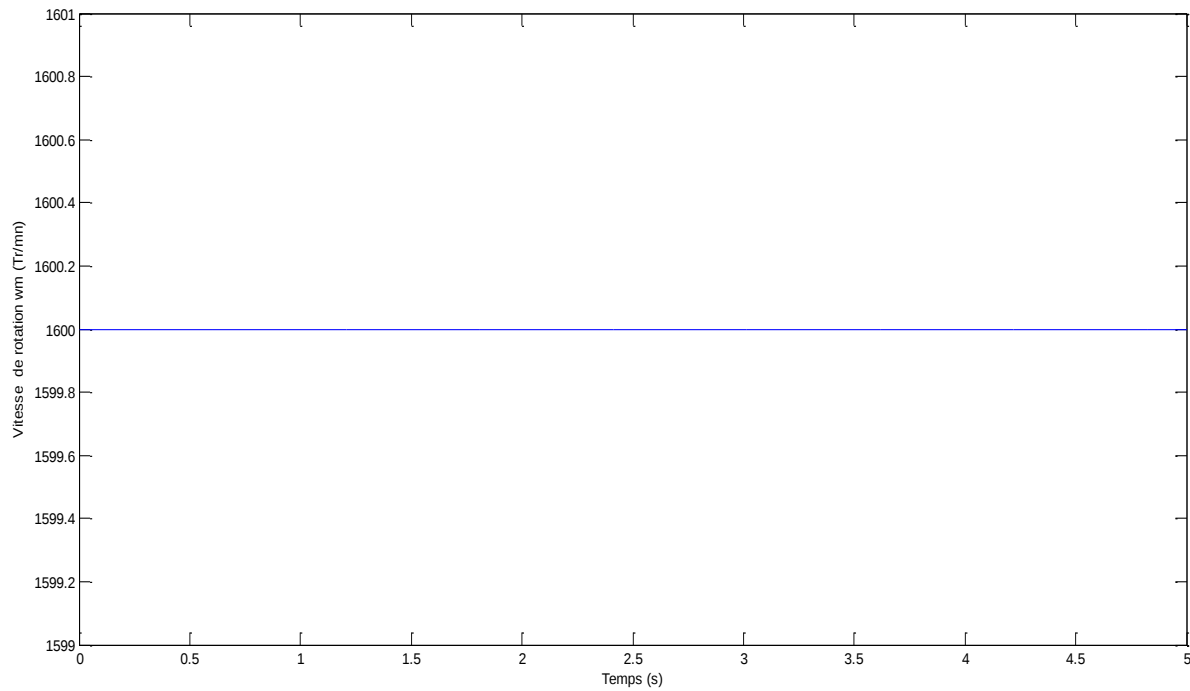


Figure III.12. Vitesse d'entraînement de la GADA.

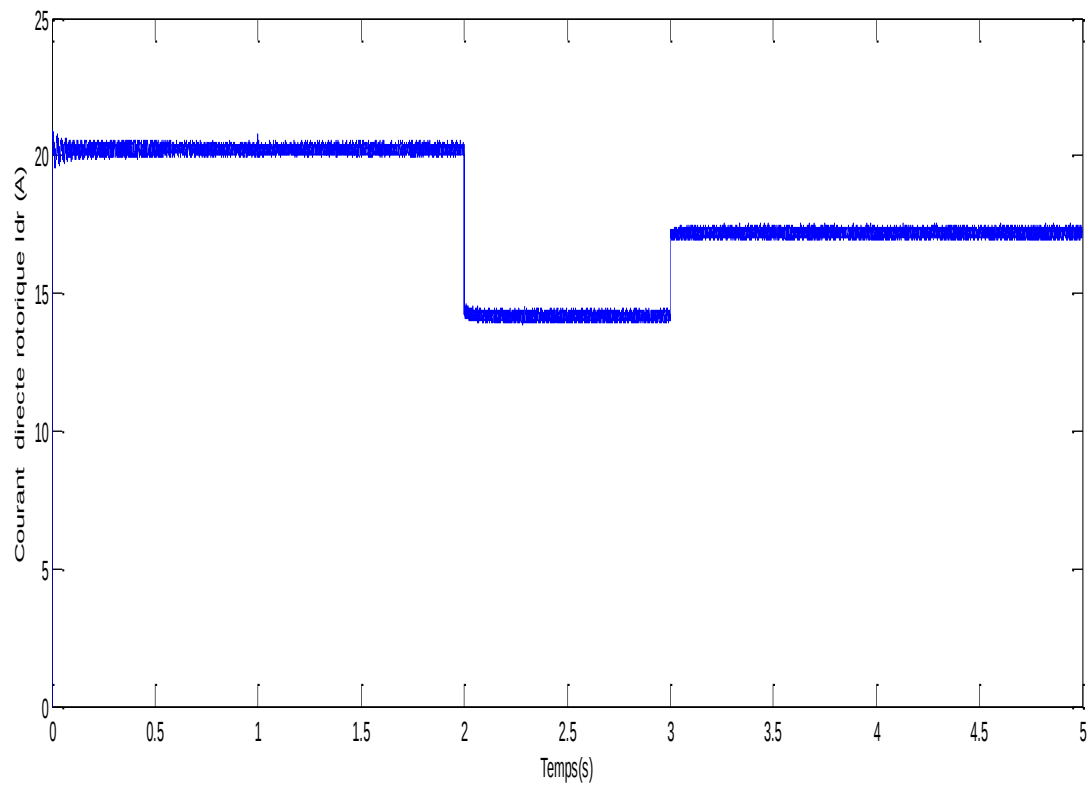


Figure.III.13. Courant rotorique suivant l'axe d.

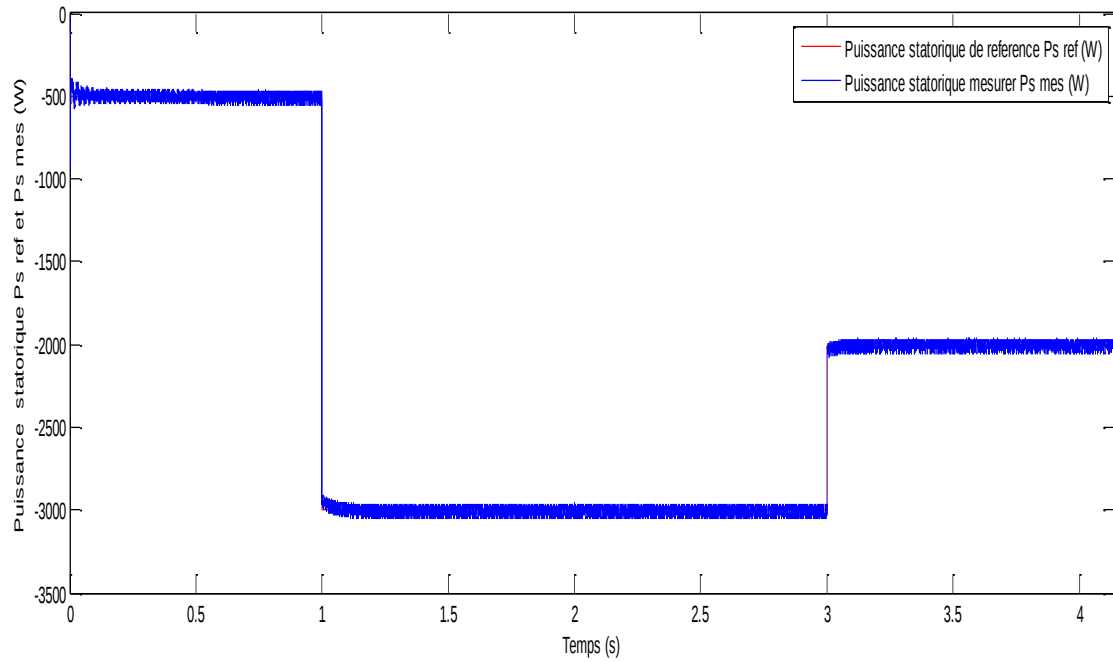


Figure III.14. Variation de la puissance active mesurée P_{s_mes} et la puissance de référence P_{s_ref} .

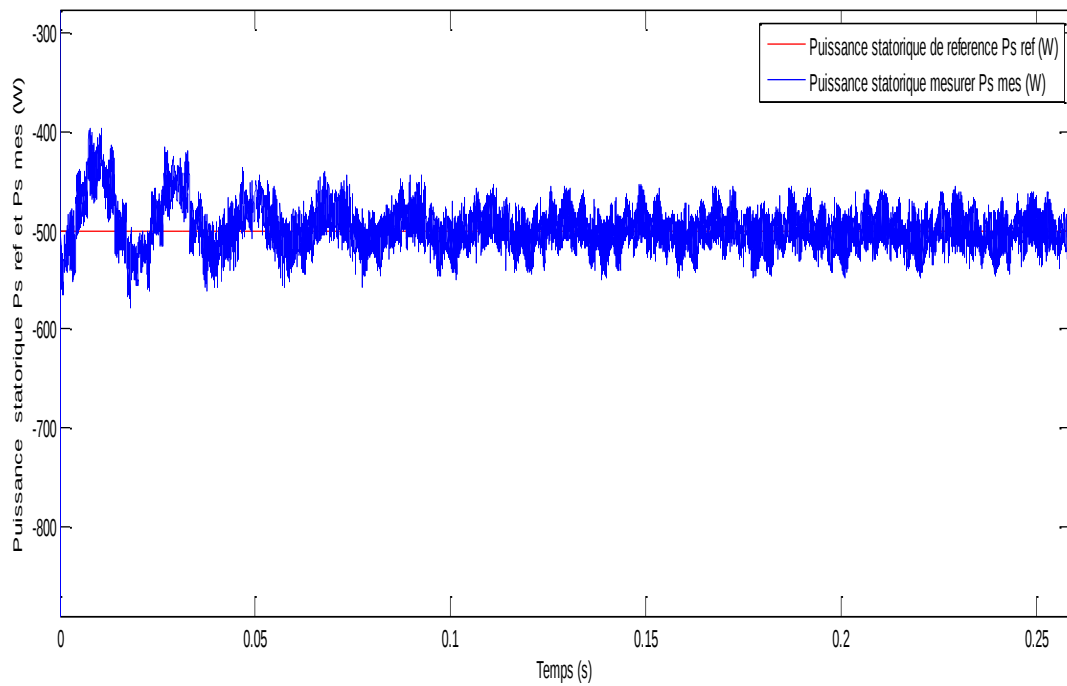


Figure III.15. Zoom sur la variation de la puissance active mesurée P_{s_mes} et la puissance de référence P_{s_ref}

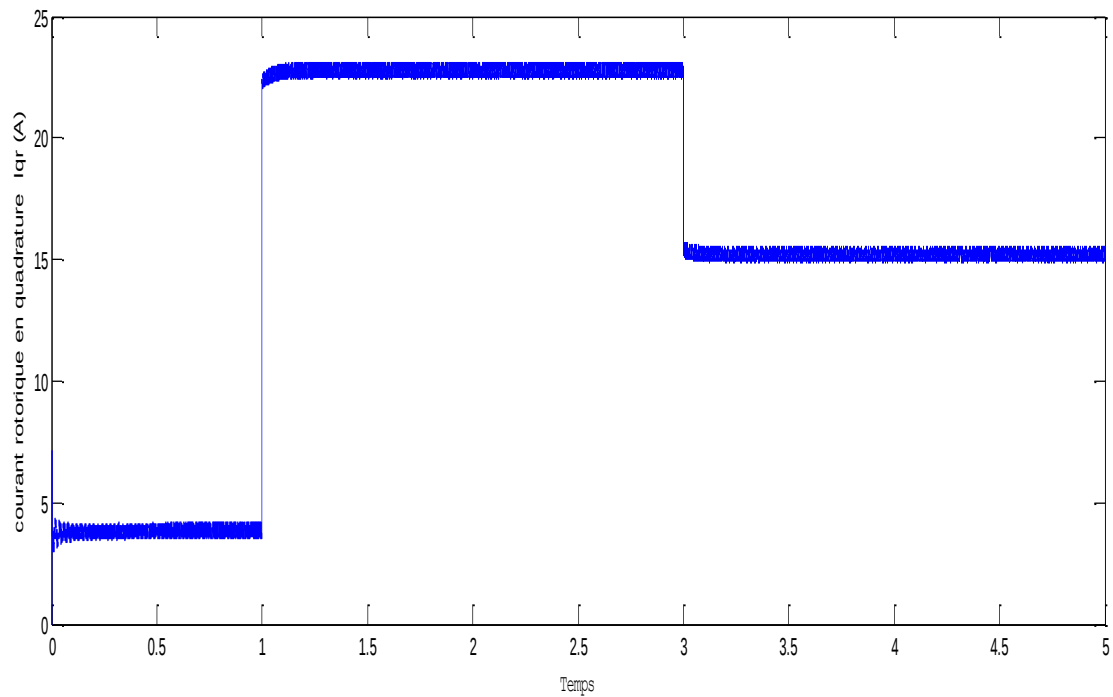


Figure III.16. Courant rotorique suivant l'axe q.

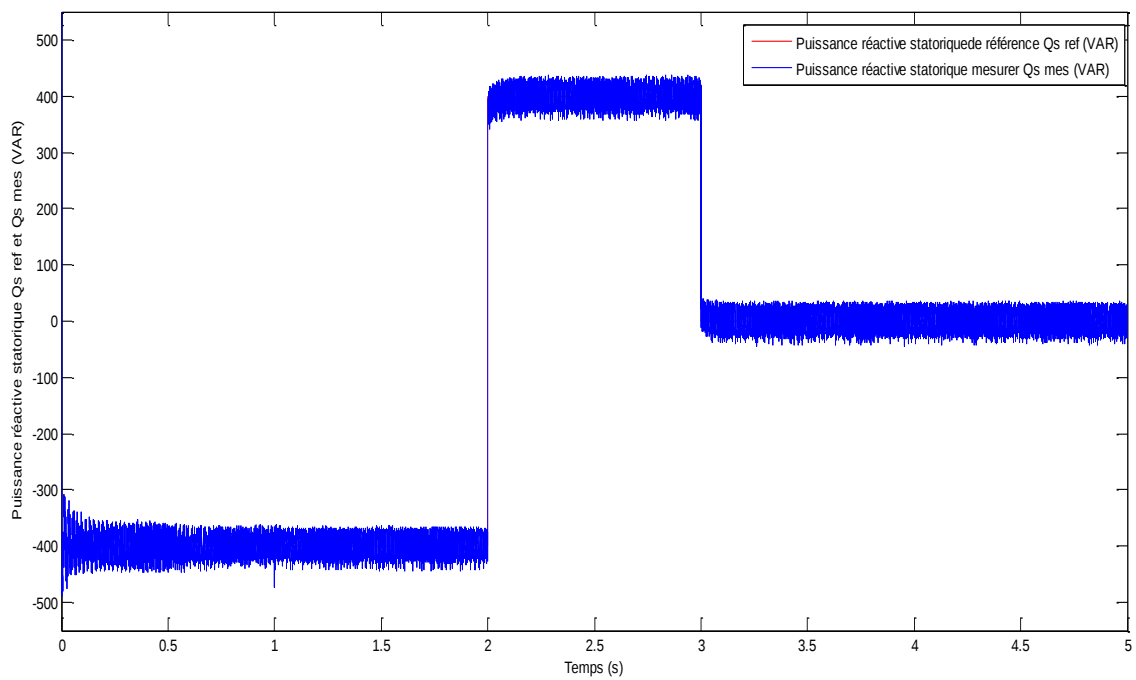


Figure III.17. Variation de la puissance réactive mesurée Q_{s_mes} et la puissance de référence Q_{s_ref} .

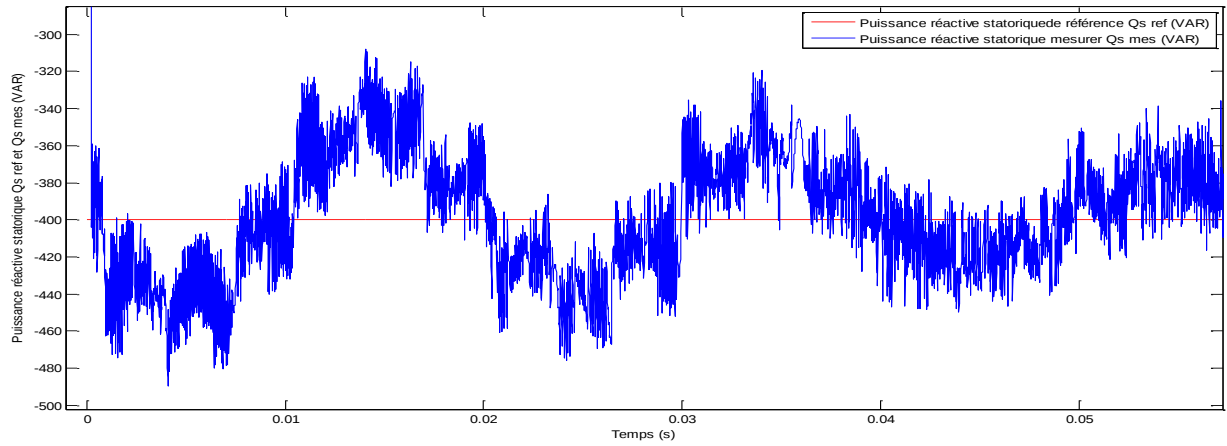


Figure III.18. Zoom sur la Variation de la puissance réactive mesurée Q_{s_mes} et la puissance de référence Q_{s_ref} .

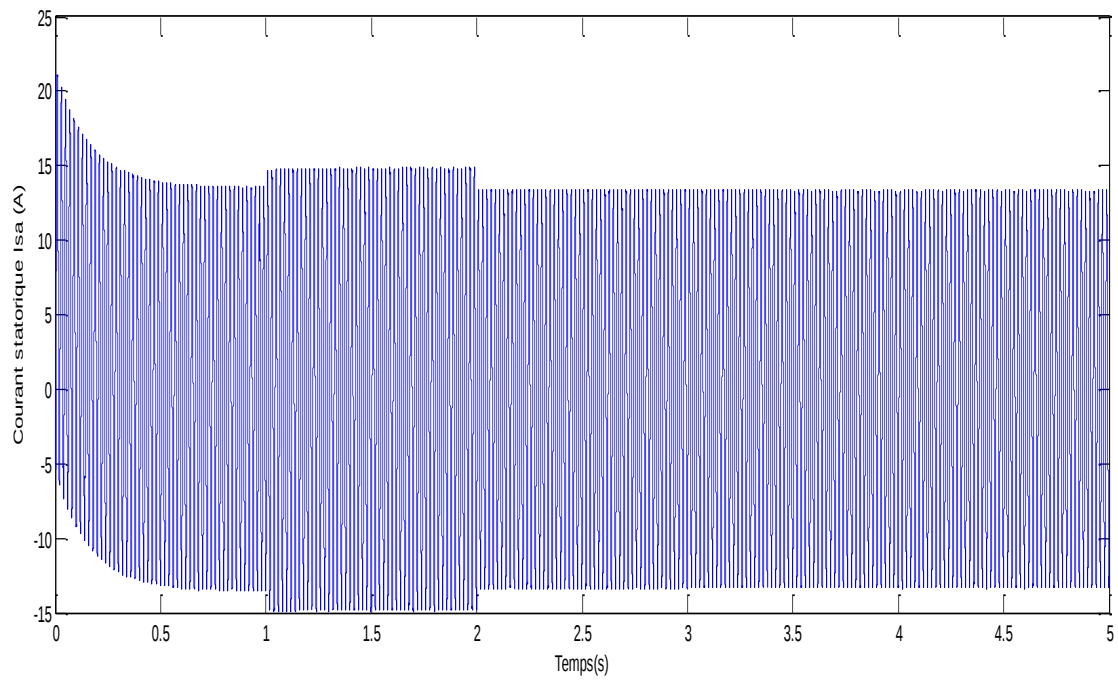


Figure III.19. Courant de la phase statorique I_{sa} .

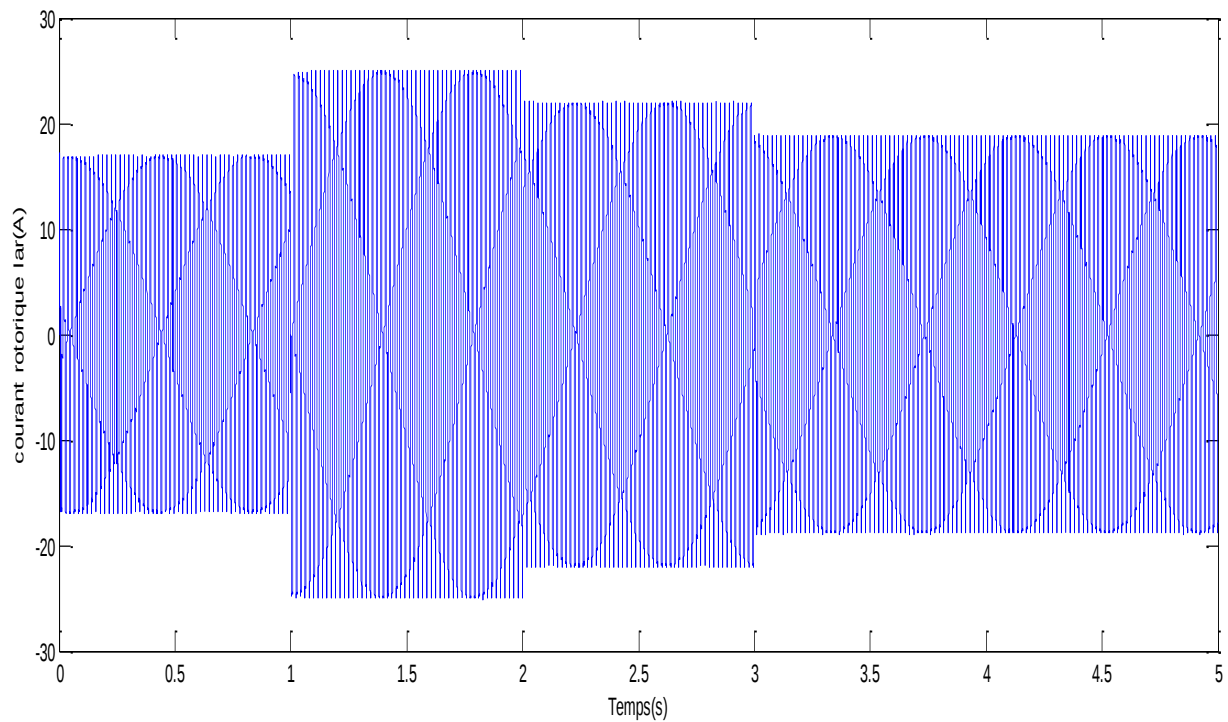


Figure III.20. Courant rotorique I_{ar} .

III.1. Interprétation des résultats

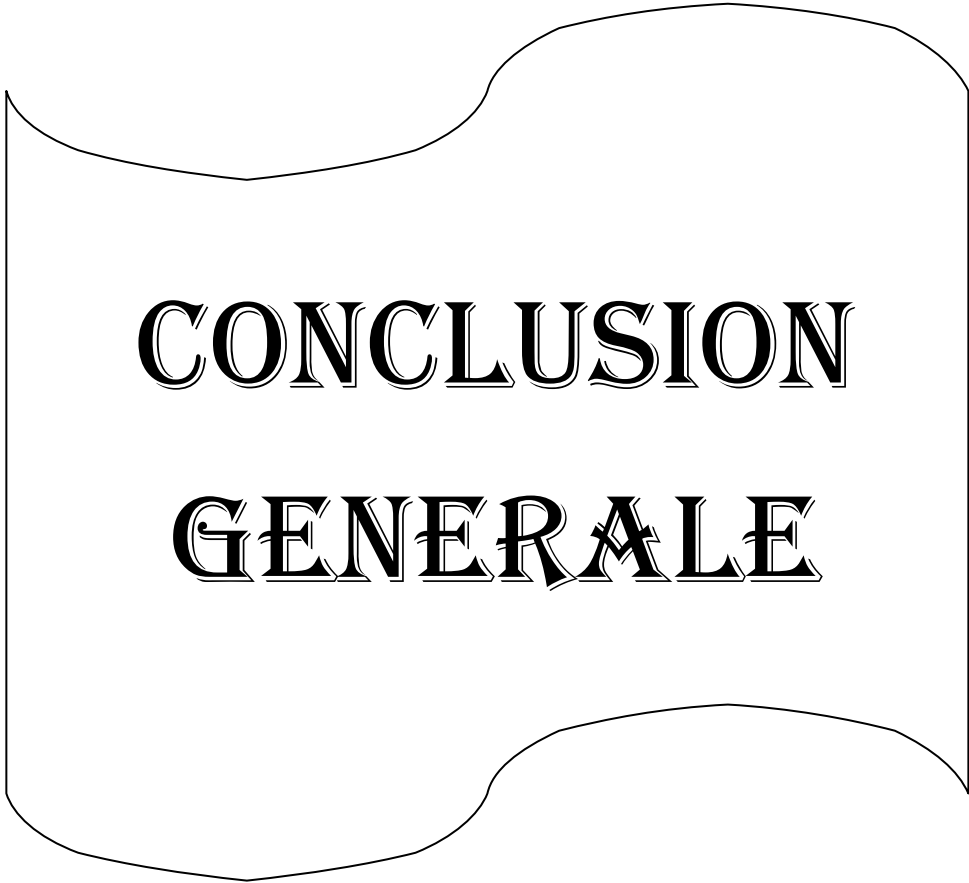
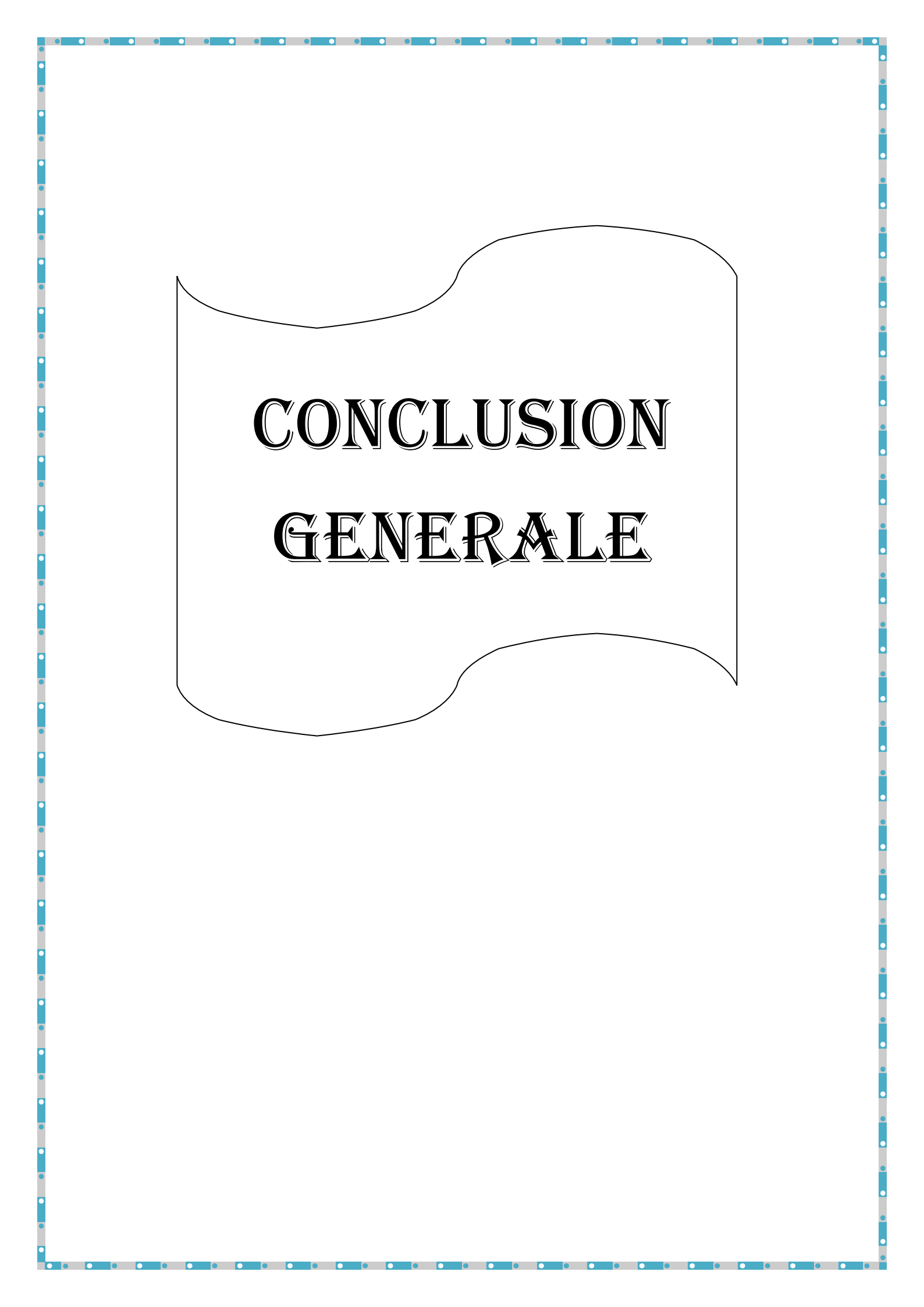
Les figures III.14 et III.15 montrent que la puissance active mesurée suit bien la puissance active de référence avec un bon temps de réponse mais avec des ondulations dues à utilisation des onduleurs et que cette puissance à une allure qui ressemble à celle du courant I_{qr} .

Les figures III.16 et III.17 montrent que la puissance réactive mesurée suit bien la puissance réactive de référence avec un bon temps de réponse mais avec des ondulations dues à utilisation des onduleurs et que cette puissance à une allure qui ressemble à celle du courant I_{dr} .

D'après les deux considérations précédentes, on peut dire qu'on a un bon découplage entre la puissance active et réactive.

IV. Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons effectué la simulation de la commande vectorielle en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Pour voir le comportement de la machine contrôlée par la technique du flux orienté, nous avons appliqué à la GADA des consignes de puissance variées. La simulation a été réalisée avec association d'un onduleur de tension au niveau du rotor. Les résultats de simulation ont montrés que les grandeurs contrôlés suivent bien leurs références dans tous les points de fonctionnement.



CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

La problématique abordée dans ce mémoire est une contribution à l'étude de la commande vectorielle en puissance avec régulateur PI d'une génératrice asynchrone alimentée au rotor par un onduleur MLI contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion.

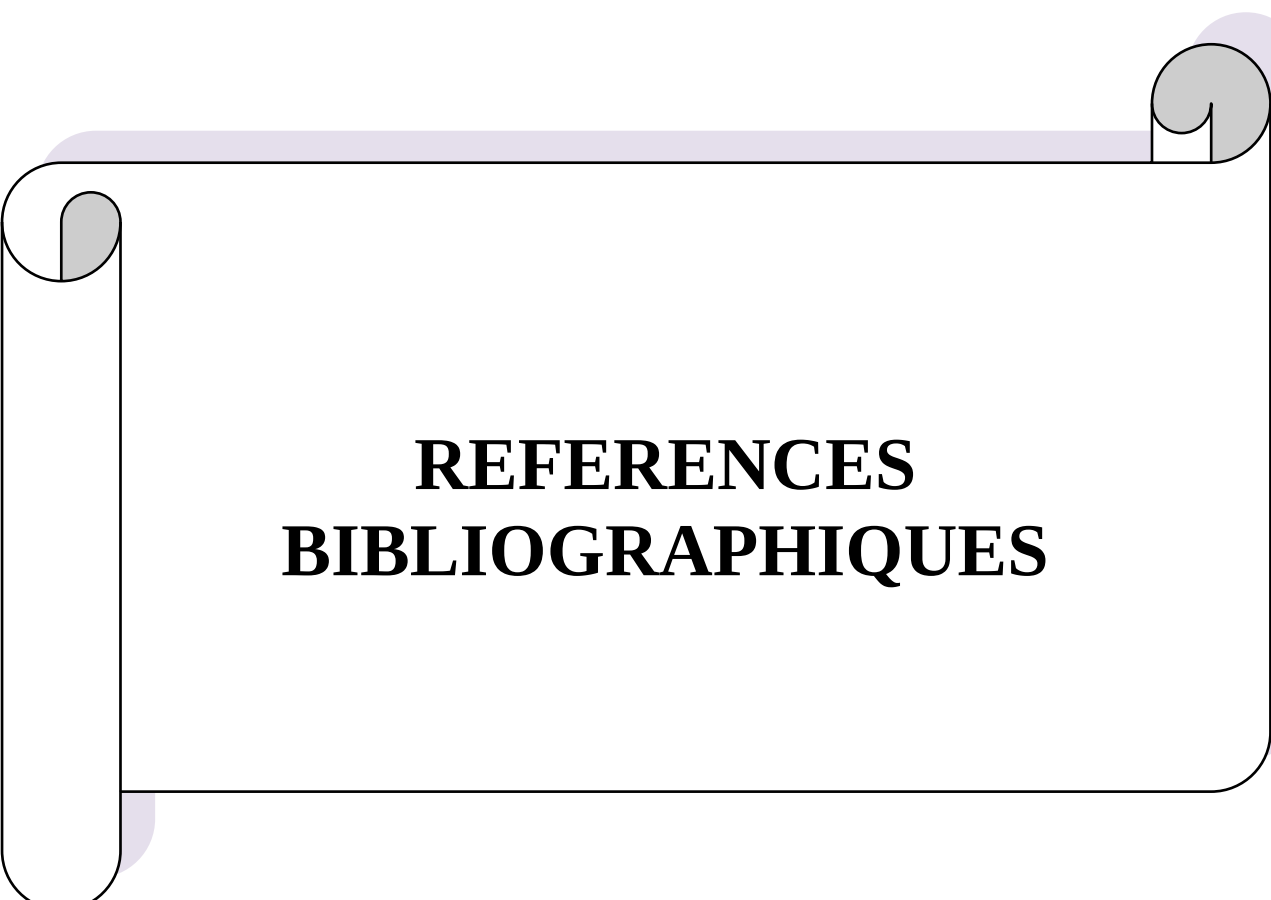
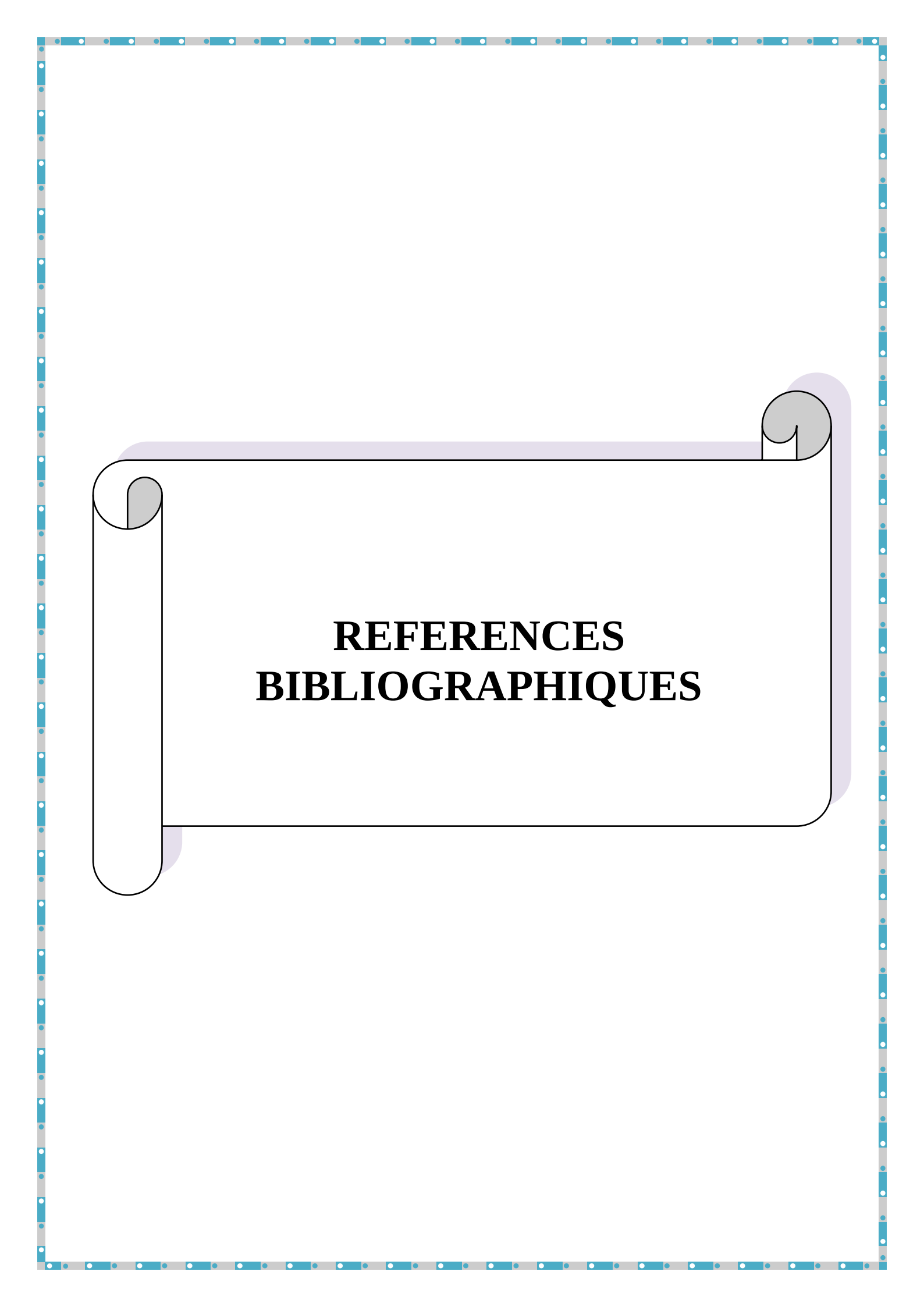
Après un aperçu bibliographique sur la machine asynchrone à double alimentation, on s'est intéressé à sa modélisation dans un repère biphasé, pour ensuite se consacrer aux différentes stratégies de commande des convertisseurs statiques continu/alternatif et particulièrement à la stratégie de modulation par largeur d'impulsion.

Afin de réaliser la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation, différentes stratégies ont été présentées et parmi elles, la stratégie de commande vectorielle en puissance par orientation du flux statorique. C'est ce contrôle qui a été mis en œuvre sous l'environnement Matlab/Simulink.

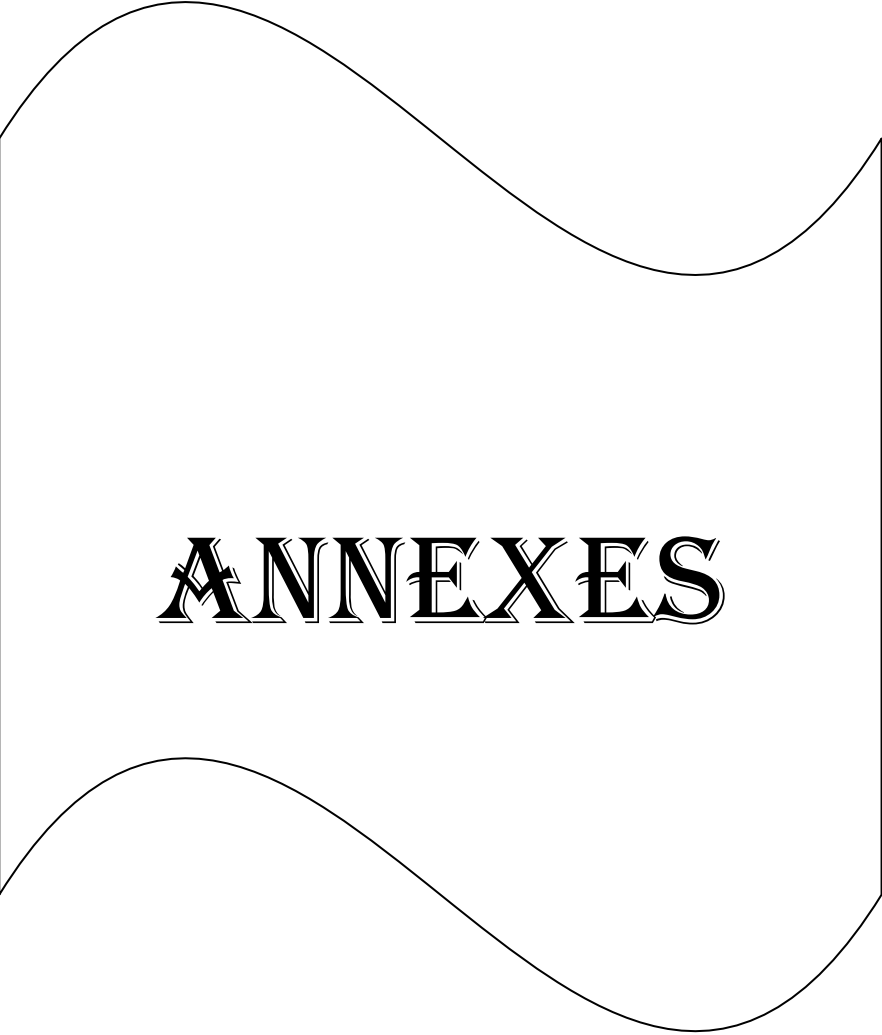
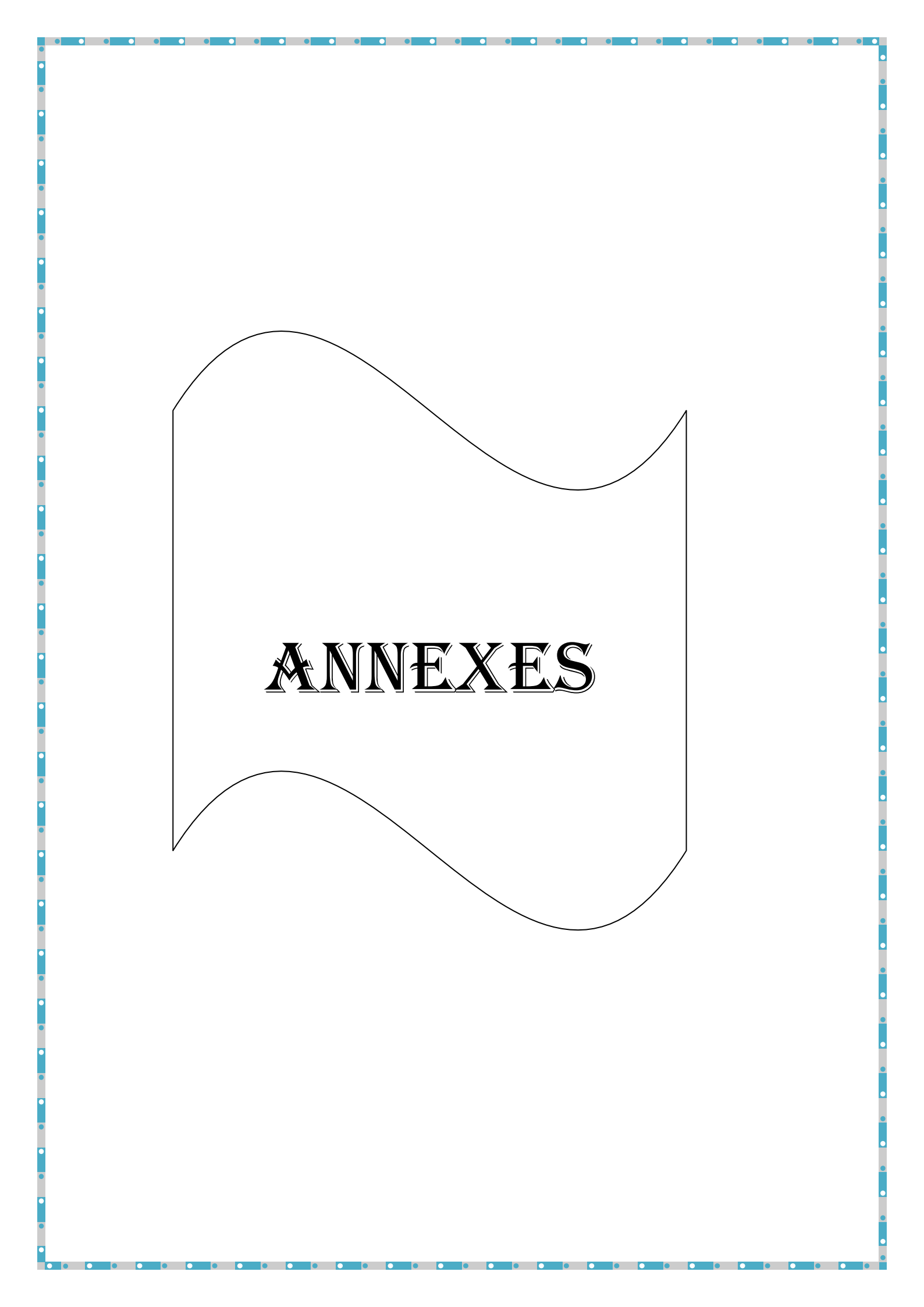
Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande implémentée présente des performances satisfaisantes.

En se basant sur les différents résultats obtenus, un ensemble de perspectives peuvent être envisagées à savoir :

- Notre mémoire s'étant concentré sur l'étude théorique et sur des résultats de simulation, il serait donc intéressant de les tester expérimentalement.
- Utiliser des techniques de commande adaptatives pour augmenter les performances et la robustesse de la commande en puissance de la GADA.
- Etudier la GADA associée à d'autres stratégies de commande.
- Orienter d'autres flux de la MADA (flux rotorique ou d'entrefer)
- Utiliser d'autres types de convertisseurs de fréquence, tels que les cyclo-convertisseurs et les convertisseurs matriciels adaptés aux grandes puissances.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



ANNEXES

Annexe 2

Détermination des paramètres du régulateur

Cette méthode consiste à déterminer la valeur des gains des correcteurs en effectuant un placement des pôles en boucles fermées dans le plan complexe.

La fonction de transfert d'un PI est :

$$G_{PI}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{K_i}{s}\right)$$

La fonction de transfert du système à réguler est :

$$G_Q(s) = \frac{1}{J \cdot s + f}$$

La fonction de transfert du processus en globale en boucle fermée du système est :

$$FTBF = \frac{G_Q(s) \cdot G_{PI}(s)}{1 + G_Q(s) \cdot G_{PI}(s)}$$

$$T_{bF}(s) = \frac{1}{\frac{K_i \cdot J}{K_p} \cdot s^2 + K_i \left(1 + \frac{f}{K_p}\right) \cdot s + 1}$$

Après les simplifications nécessaires, l'équation caractéristique de la fonction de transfert du système globale en boucle fermée est :

$$Eq(s) = \frac{K_i \cdot J}{K_p} \cdot s^2 + K_i \left(1 + \frac{f}{K_p}\right) \cdot s + 1$$

L'équation ci-dessus caractérise un système asservi du deuxième d'ordre, dont la forme générale est :

$$Eq(s) = \frac{1}{w_n^2} \cdot s^2 + \frac{2\delta}{w_n} \cdot s + 1$$

Avec w_n : La pulsation propre du système en Boucle Fermée

δ : Le coefficient d'amortissement du système en Boucle Fermée

Par identification entre les deux équations caractéristiques précédente, on obtient :

$$K_i = \frac{2 \cdot \delta \cdot w_n \cdot J - f}{J \cdot w_n^2}$$
$$K_p = J \cdot w_n^2 \cdot K_i$$

Annexe 1

Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Nombre de paires de pôles	P	2
Inductance cyclique statorique	L_s	0.196(H)
Inductance cyclique rotorique	L_r	0.196(H)
Inductance mutuelle	M_{sr}	0.188(H)
Coefficient de dispersion	σ	25.11
Résistance statorique	R_s	1.04(Ω)
Résistance rotorique	R_r	2.2(Ω)
frottements visqueux	f_v	0.035
Inertie	J	0.052 Kg.m
Tension nominale enroulement statorique	V_{sn}	220(V)
Tension nominale enroulement rotorique	V_{rn}	105(V)
Courant nominal enroulement statorique	I_{sn}	13.5(A)
Courant nominal enroulement rotorique	I_{rn}	13.5(A)
Vitesse de rotation maximale de la MADA	N_{nom}	1440(tr/min)
Couple nominal	C_{em-nom}	20(N.m)
Couple maximal	C_{em-max}	$2.5 * C_{em-nom}$
Fréquence statorique	f_s	50 (Hz)