

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université ABDERRAHMANE Mira-Béjaia

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme de Master en
Électrotechnique

Option : Commande des Systèmes Electrique

Thème

**CONTRIBUTION À LA COMMANDE NON LINÉAIRE D'UN
AÉROGÉNÉRATEUR BASÉE SUR UNE GADA**

Présenté par :

M^r. AISSOU Fadel

M^r. HAMANA Abdelmoumene

Proposé par :

M^r. S.TAMALOUZT

Année Universitaire 2013-2014

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout Puissant de nous avoir guidés à travers nos choix et notre travail.

Nous adressons nos vifs remerciements et notre gratitude à notre promoteur Mr. S. TAMALOUZT pour sa disponibilité, son dévouement, et ses orientations qui nous ont permis d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de ce travail. Nous tenons à remercier également nos professeurs qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Pour finir, il nous est plus qu'agréable de réserver l'expression de notre gratitude et nos remerciements les plus particuliers aux membres de nos familles respectives qui ont su nous encourager et nous soutenir sans relâche durant toute notre scolarité. Puissent-ils être fiers de nous.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Celui qui m'a indiqué la bonne voie : à mon cher Père,
Celle qui a tant veillé sur moi : ma très chère mère*

Mes très chers frères et sœurs.

La mémoire de mes grands-parents.

Ma grand-mère.

Mes oncles et tantes.

Tous mes amis,

Toute la promotion 2014 d'Electéchnique,

Tous ceux qui me sont chers.

ABDELMOUMENE

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

*Celui qui m'a indiqué la bonne voie : à mon cher Père,
Celle qui a tant veillé sur moi : ma très chère mère.*

Mon très cher frère et ma très chère sœur.

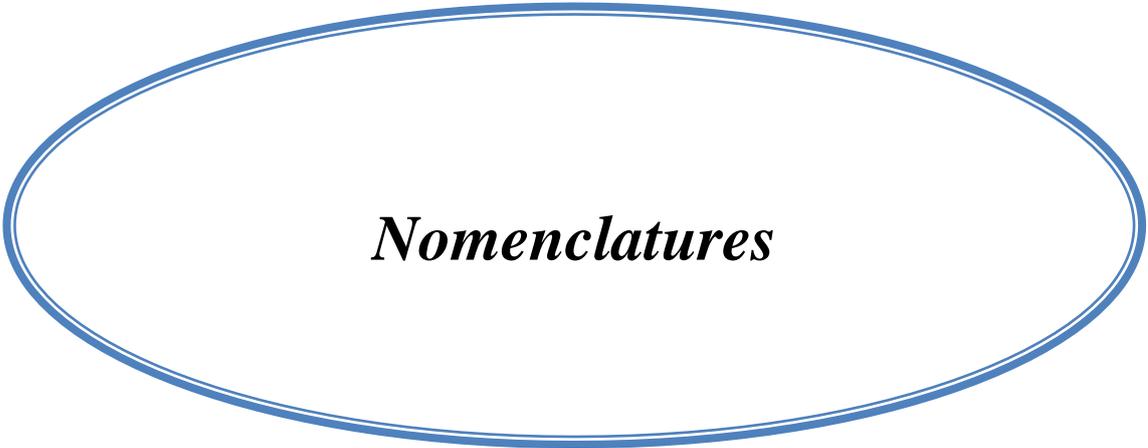
*La mémoire de mes grands-parents.
Mes oncles et tantes.*

Tous mes amis,

Toute la promotion 2014 d'Electéchnique,

Tous ceux qui me sont chers.

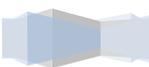
FADEL



Nomenclatures

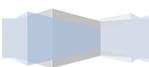
Nomenclatures

MAS	: Machine Asynchrone.
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.
GADA	: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.
MSAP	: Machine Synchrone à Aimants Permanents.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
P_v	: La puissance fournie par le vent [W].
P_t	: Puissance de la turbine éolienne [W].
ρ	: Masse volumique de l'air [kg/m^3].
S_t	: La surface balayée par la turbine éolienne [m^2].
R_t	: Rayon de la turbine éolienne [m].
V_v	: La vitesse du vent [m/s].
Ω_t	: La vitesse de la turbine éolienne [rad/s].
Ω_m	: La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].
C_p	: Le coefficient de puissance.
C_m	: Le coefficient du couple.
λ	: Le rapport de la vitesse au bout des pales.
λ_{opt}	: Le rapport optimal de la vitesse au bout des pales.
T_t	: Couple de la turbine éolienne [N.m].
β	: L'angle de calage des pales [rad].
S	: Opérateur de Laplace.
J	: Inertie totale ramenée à l'arbre de la génératrice [Kg.m^2].
J_g	: Inertie de l'arbre de la génératrice [Kg.m^2].
J_t	: Inertie de la turbine [Kg.m^2].



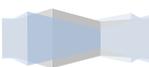
Nomenclatures

T_{em}	: Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone [N.m].
T_m	: Couple mécanique total [N.m].
T_g	: Couple transmit à la génératrice [N.m].
T_{vis}	: Couple des frottements visqueux[N.m].
F	: Coefficient de frottement.
G	: Gain du multiplicateur.
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	: Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) [V].
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	: Courants statoriques [A].
R_s	: Résistance d'une phase statorique [Ohm].
$[L_s]$: Matrice d'inductance statorique [H].
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique [H].
l_s	: Inductance de fuite d'une phase statorique [H].
ω_s	: Pulsation du champ statorique [rad/s].
$[v_s]$: Matrice des tensions statorique [V].
$[i_s]$: Matrice des courants statoriques.
$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
V_{ds}, V_{qs}	: Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) [V].
i_{ds}, i_{qs}	: Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) [A].
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$: Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) [Wb].
$\varphi_{\alpha s}, \varphi_{\beta s}$: Les flux statorique dans le repère de Concordia [Wb].
$V_{\alpha s}, V_{\beta s}$: Tension statorique dans le repère de Concordia [V] .
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: Les courants de phases statoriques dans le repère de Concordia [A].
θ_s	: Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	: Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) [V].
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	: Courants rotoriques [A].



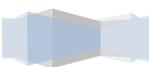
Nomenclatures

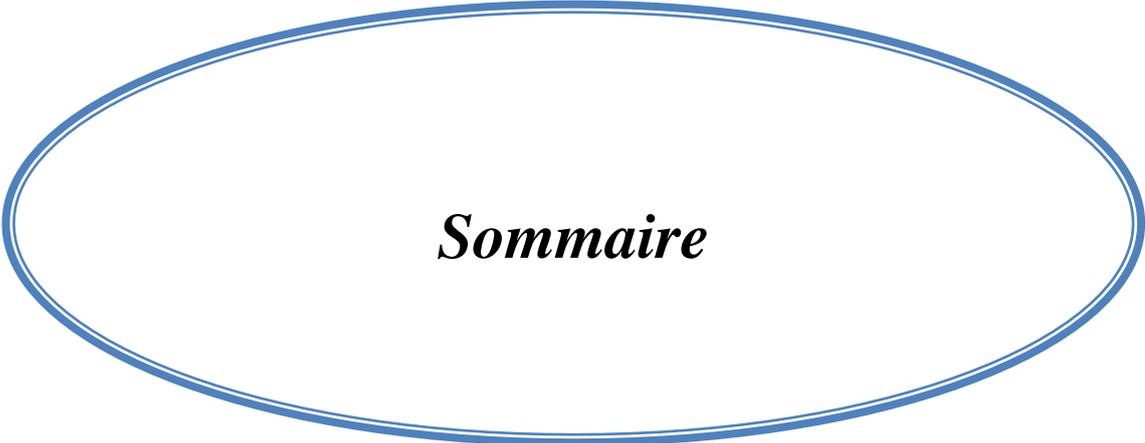
R_r	: Résistance d'une phase rotorique [Ohm].
$[L_r]$: Matrice d'induction rotorique [H].
L_r	: Inductance propre d'une phase rotorique [H].
l_r	: Inductance de fuite d'une phase rotorique [H].
ω_r	: Pulsation du champ rotorique [rad/s].
$[v_r]$: Matrice des tensions rotorique.
$[i_r]$: Matrice des courants rotoriques.
$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.
V_{dr}, V_{qr}	: Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) [V].
$V_{\alpha r}, V_{\beta r}$: Tension rotorique dans le repère de Concordia [V].
i_{dr}, i_{qr}	: Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) [A].
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$: Les courants de phases rotorique dans le repère de Concordia [A].
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$: Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) [Wb].
$\varphi_{\alpha r}, \varphi_{\beta r}$: Les flux rotorique dans le repère de Concordia [Wb].
θ_r	: Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
X_{dq0}	: Les grandeurs (courants, tension, flux) dans le repère de PARK.
$[M_s]$: Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator [H].
$[M_r]$: Coefficient de mutuelle inductance ente deux phases du rotor [H].
M	: Maximum de l'induction mutuelle entre phase du stator et phase du rotor [H].
$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle entre stator et rotor [H].
$[M_{rs}]$: Matrice d'inductance mutuelle rotor et stator (H).
ω	: Vitesse électrique de la machine [rad/s].
p	: Nombre de paires de pôles de la machine.
Θ	: Angle électrique de position de la machine [rad].
γ	: L'angle entre les vecteurs flux.



Nomenclatures

g	: Glissement de la machine.
i_{dc}	: Courant modulé par le redresseur [A].
$V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$: Tensions à la sortie de l'onduleur [V].
F_1, F_2, F_3	: Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.
V_{dc}	: Tension du bus continu [V].
P_s, P_r	: Puissances actives envoyée au réseau [W].
Q_s, Q_r	: Puissances réactives envoyée au réseau [VAR].
T_{em-ref}	: La référence du couple [N.m].
$\Delta\phi_{r-ref}$: La référence du flux [N.m].
C_{cpl}	: La grandeur de sortie du contrôleur du couple
C_{flx}	: La grandeur de sortie du contrôleur de flux.
ΔC_e	: La bande d'hystérésis du correcteur couple [N.m].
$\Delta\phi_s$: La largeur d'hystérésis du correcteur flux [wb].
$\varepsilon_{T1}, \varepsilon_{T2}$: Erreurs du couple.
ε_{flx}	: Erreur du flux.
$\Delta\phi_r$: La largeur de l'hystérésis du correcteur de flux.
ΔT	: La moitié de la largeur de la bande hystérésis du correcteur du couple.





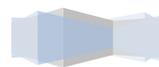
Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

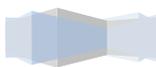
I.1. Introduction.....	2
I.2. L'aérogénérateur	2
I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	2
I.4. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	3
I.5. Recherche du rendement maximum MPPT des éoliennes.....	3
I.6. Avantages et inconvénients d'une éolienne	4
I.6.1. Avantages	4
I.6.2. Inconvénients	4
I.7. Classification des éoliennes	4
I.7.1. Types d'éoliennes selon l'axe	4
I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical	4
I.7.1.2. Les éoliennes à axe horizontal	6
I.7.2. Types d'éoliennes selon la connexion au réseau.....	7
I.7.2.1. Les éoliennes connectées au réseau	7
I.7.2.2. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	9
I.7.3. Types d'éoliennes selon le mode de régulation	10
I.7.3.1. La régulation « pitch »	10
I.7.3.2. La régulation « stall contrôle »	10
I.7.4. Types d'éoliennes selon la machine électrique	10
I.7.4.1. Machine synchrone	10
I.7.4.2. Machine asynchrone	11
I.8. Présentation de la MADA type "rotor bobiné"	12
I.9. Intérêt de la MADA	12
I.9.1. Fonctionnement en moteur hypo synchrone (quadrant 1).....	13
I.9.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone (quadrant 2).....	13
I.9.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone (quadrant 3)	13
I.9.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone (quadrant 4)	13



I.10. Le mode de connexion du rotor de la MADA au réseau	14
I.10.1. Connexion via des convertisseurs directs.....	14
I.10.1.1. Le cycloconvertisseur	14
I.10.1.2. Le convertisseur matriciel.....	15
I.10.2. Connexion via des convertisseurs indirects	15
I.10.2.1. Redresseur et onduleur.....	16
I.11. Choix de la structure	16
I.11.1. Choix de la turbine	16
I.11.2. Choix du convertisseur électromécanique.....	16
I.11.3. Choix du dispositif de connexion du rotor de la MADA au réseau	17
I.12. Conclusion	17

Chapitre II : Modélisation de la chaîne éolienne

II.1. Introduction	18
II.2. Modélisation de la partie mécanique	18
II.2.1. Hypothèses simplificatrices	18
II.2.2. Modèle du vent	18
II.2.3. Modèle de la turbine éolienne.....	19
II.2.4. Modélisation du multiplicateur de vitesse	20
II.2.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission	20
II.3. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT).....	22
II.4. Modélisation de la partie électrique.....	22
II.4.1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation	22
II.4.2. Modélisation de la MADA dans le repère abc.....	23
II.4.2.1 Les équations électriques.....	23
II.4.2.2. Les équations magnétiques	24
II.4.2.3. Les équations mécaniques.....	26
II.5. Transformation de Park	26
II.6. Modélisation de l'onduleur	29
II.6.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux.....	29
II.6.2. Onduleurs multi-niveaux	30
II.6.2.1. Présentation de l'onduleur de tension trois à niveaux	30
II.6.2.2. Génération des trois niveaux de tension dans un onduleur NPC.....	31



II.6.2.3 Différentes configurations d'un bras d'un onduleur à trois niveaux	32
II.6.2.4. Commandabilité d'un bras d'un onduleur à trois niveaux	34
II.6.2.5. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux	34
II.7 Conclusion	36

Chapitre III : Contrôle de la chaîne éolienne

III.1. Introduction	37
III.2. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple	37
III.3. Les avantages et les inconvénients de la DTC	37
III.3.1. Les avantages.....	37
III.3.2. Les inconvénients	37
III.4. Principe de la commande DTC	38
III.4.1. Modélisation vectorielle de la MADA et de l'onduleur de tension à deux niveaux.	38
III.4.2. Contrôle de flux et de couple électromagnétique	39
III.4.2.1. Contrôle vectoriel de flux rotorique	39
III.4.2.2. Contrôle vectoriel de couple électromagnétique	40
III.5. Sélection du vecteur tension.....	40
III.6. Estimation du flux rotorique	41
III.7. Elaboration du correcteur du couple	41
III.8. Elaboration du correcteur du flux.....	42
III.9. Elaboration de la table de commutation.....	43
III.10. Commande directe du couple avec onduleur à trois niveaux.....	44
III.10.1. Introduction	44
III.10.2. Onduleur à trois niveaux type NPC.....	44
III.10.3. La DTC de la MADA alimentée par un onduleur à trois niveaux.....	45
III.10.3.1. Elaboration du correcteur du couple	45
III.10.3.2. Elaboration du correcteur du flux.....	46
III.10.3.3. Construction de la table de commutation	46
III.11. Structure générale de la commande directe du couple	47
III.12. Conclusion.....	49

Chapitre IV: Simulation de la chaîne éolienne

IV.1.Introduction.....	50
------------------------	----



IV.2. Simulation et interprétation des résultats	50
IV.3. La DTC avec un onduleur à deux niveaux.....	53
IV.4. La DTC avec onduleur à trois niveaux	58
IV.5. Analyse spectrale et le calcul de THD pour i_{sa}	63
IV.5.1. Pour onduleur à deux niveaux	63
IV.5.2. Pour onduleur à trois niveaux.....	65
II.6. Conclusion.....	67
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	69
Annexe	73





Liste des Figures

Listes des figures

Chapitre I : Généralité sur les systèmes éoliens

Figure I.1 : Schéma du principe de convention de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. ...	2
Figure I.2 : Courbe caractéristique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.	3
Figure I.3 : Eolienne à axe verticale (structure de Darrieus).....	5
Figure I.4 : Eolienne à axe verticale (structure de Savonius).....	5
Figure I.5 : Eolienne à axe horizontal.	6
Figure I.6 : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	6
Figure I.7 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et celle du vent.	9
Figure I.8 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	9
Figure I.9 : Structure du rotor de la MADA.....	12
Figure I.10 : Modes de fonctionnement de la MADA.....	14
Figure I.11 : Structure avec cycloconvertisseur.	15
Figure I.12 : Structure avec convertisseur matriciel.....	15
Figure I.13 : MADA avec convertisseurs indirects	16
Figure I.14 : Structure de la chaîne de conversion éolienne.....	17

Chapitre II: Modélisation de la chaîne éolienne

Figure II.1 : Schéma du système à étudier.	18
Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne.....	19
Figure II.3 : Coefficient de puissance	19
Figure II.4 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.	21
Figure II.5 : Schéma du modèle de la turbine.	21
Figure II.6 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.....	22
Figure II.7 : Représentation schématique de la MADA.....	23
Figure II.8 : Représentation de la machine dans le repère biphasé.	26
Figure II.9 : Structure d'un onduleur de tension à deux niveaux.	29
Figure II.10 : Structure d'un onduleur de tension à trois niveaux.....	31
Figure II.11 : Structure d'un bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.....	31
Figure II.12 : Configuration possible d'un onduleur à trois niveaux NPC.....	32
Figure II.13 : Génération des trois niveaux dans un onduleur NPC.....	33

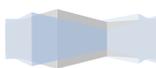
Chapitre III: Modélisation de la chaîne éolienne

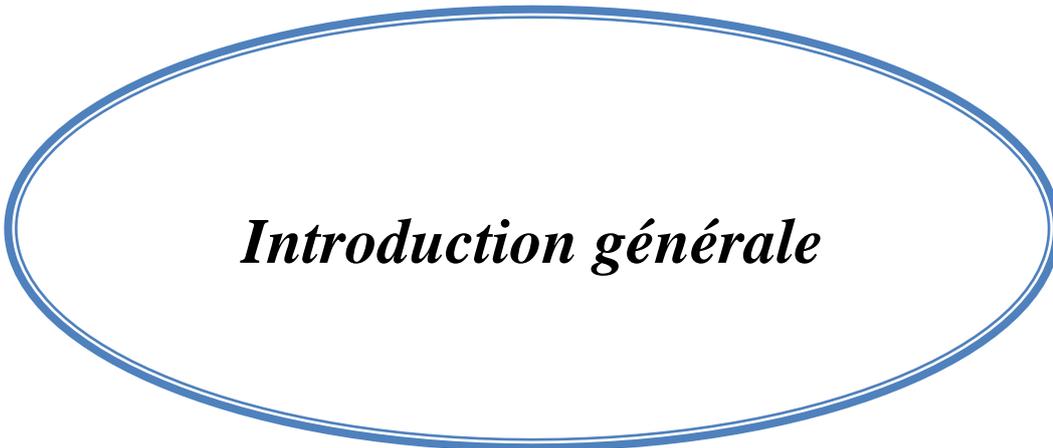
Figure III.1 : Représentation des vecteurs tensions générés par l'onduleur	39
Figure III.2 : Exemple de l'évolution de l'extrémité de φ_r pour (R_r, i_r) négligeable.	39
Figure III.3 : Sélection du vecteur de tension.....	40
Figure III.4 : Correcteur hystérésis du couple.	42
Figure III.5 : Correcteur hystérésis du flux.	43
Figure III.6 : Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à trois niveaux de tension.	44
Figure III.7 : Correcteur hystérésis du couple 5 niveaux.	46
Figure III.8 : Correcteur hystérésis du flux 3 niveaux.....	46
Figure III.9 : Schéma de principe global de la commande DTC appliquée à une MADA.....	48



Chapitre IV: Simulation de la chaîne proposée

Figure IV.1 : Caractéristique $C_p(\lambda)$	50
Figure IV.2 : Profil du vent.	51
Figure IV.3 : Allure de la vitesse mécanique de la génératrice.....	51
Figure IV.4 : Allure du glissement de la machine.....	51
Figure IV.5 : Allure de la vitesse spécifique(λ).....	52
Figure IV.6 : Allure de coefficient de puissance.....	52
Figure IV.7 : Allure de la puissance active statorique.....	53
Figure IV.8 : Allure de la puissance active rotorique.....	53
Figure IV.9 : Allure de la puissance fournie au réseau.	54
Figure IV.10 : Allure du couple électromagnétique.....	54
Figure IV.11 : Trajectoire du flux rotorique estimé.	55
Figure IV.12 : Evolution et zoom du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.....	55
Figure IV.13 : Zoom de $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$	56
Figure IV.14 : Allure du courant d'une phase rotorique.	57
Figure IV.15 : Allure du courant d'une phase statorique.....	57
Figure IV.16 : Zoom sur i_{sa}	58
Figure IV.17 : Allure du couple électromagnétique.	58
Figure IV.18 : Trajectoire du flux rotorique estimé.	59
Figure IV.19 : Evolution et zoom du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.....	59
Figure IV.20 : Zoom de $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$	60
Figure IV.21 : Allure de la puissance active statorique.....	60
Figure IV.22 : Allure de la puissance active rotorique.....	61
Figure IV.23 : Allure de la puissance fournie au réseau.	61
Figure IV.24 : Allure du courant d'une phase rotorique.	61
Figure IV.25 : Allure du courant d'une phase statorique.....	62
Figure IV.26 : Zoom sur i_{sa}	62
Figure IV.27 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=8.44s$	63
Figure IV.28 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=10s$	63-64
Figure IV.29 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=14.53s$	64
Figure IV.30 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=8.44s$	65
Figure IV.31 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=10s$	65-66
Figure IV.32 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=14.53$	66





Introduction générale

Introduction générale

Après le développement de l'industrie et la multiplication des appareils électriques qui ont conduit à un besoin en énergie électrique considérables. En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité ? Que ce soit pour l'éclairage, le chauffage, la réalisation de mouvements de rotation ou de translation, la transmission de signaux, ainsi que le fonctionnement de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore. La liste est longue en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable. Les pays industrialisés ont fait appel aux centrales nucléaires et thermiques, mais le risque d'accident nucléaire et le traitement des déchets ont éloigné ces deux dernières. Face à ces problèmes, plusieurs pays ont fait appel à l'énergie renouvelable telle que les éoliennes [**Che 10**].

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Eole le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique [**Ghe 11**].

Le dispositif en question présente de nombreux avantages. En effet, il produit une énergie complètement propre. Il n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre. Son fonctionnement n'est pas polluant pour l'atmosphère, le sol et l'eau. Il convertit en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée [**Rap 10**].

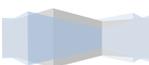
L'objet de ce mémoire est d'étudier la commande directe du couple (DTC) appliquée à une machine asynchrone à doublement alimentée (MADA) dédiée à l'éolienne.

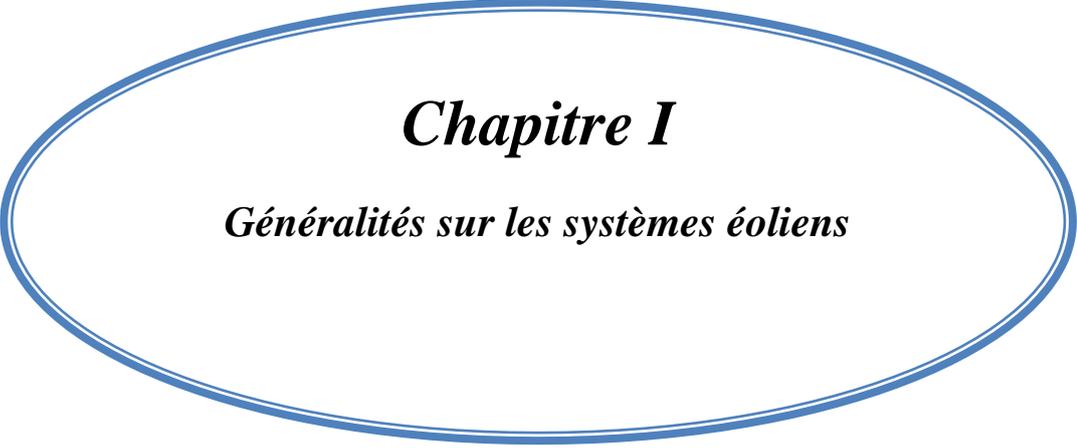
Le premier chapitre est consacré à la présentation de quelques généralités sur les éoliennes et le choix de la structure à étudier.

Le deuxième chapitre présente la modélisation de la chaîne de conversion éolienne qui se compose de la turbine, de la machine asynchrone à double alimentation, du bus continu, des convertisseurs de puissance et de la liaison au réseau en utilisant des modèles mathématiques.

Le troisième chapitre met en œuvre la commande directe du couple afin de réguler le flux rotorique et le couple électromagnétique en réalisant un schéma de principe qui nous permettra de faire la simulation de ce modèle.

Et finalement, le quatrième chapitre, comportera la représentation et l'interprétation des résultats de simulation numérique du modèle de la chaîne de conversion réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink.





Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien. L'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique. En outre, l'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [Bou 12]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des génératrices synchrones et asynchrones, afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, le rendement énergétique et la robustesse des commandes appliqués [Poi 03].

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur les éoliennes et le choix de la structure à étudier.

I.2. L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [Poi 03]:

- Eolienne de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eolienne de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eolienne de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne

C'est un système qui capte de l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. Dans la plupart des cas, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée et un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome Fig.I.1 [Idj 10].

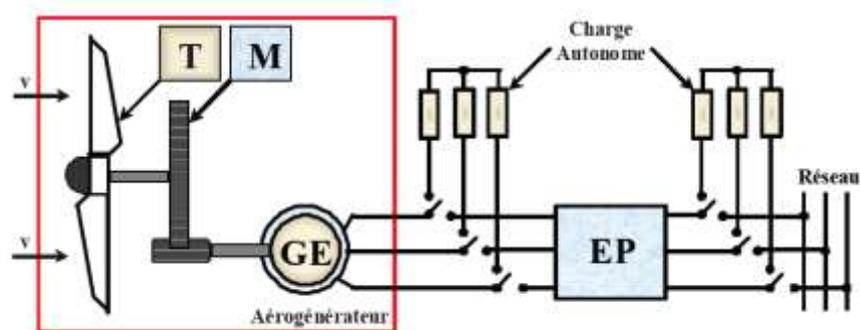


Figure I.1: Schéma du principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

I.4. Zone de fonctionnement d'une éolienne

La courbe caractéristique qui donne la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur qui fonctionne à vitesse variable, en fonction de la vitesse du vent est donnée sur la Fig.II.2.

On peut distinguer quatre zones de fonctionnement [Bou 12].

- **La zone I :** Correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- **La zone II :** Correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.
- **La zone III :** Correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.
- **la zone IV :** La vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\sim 90^\circ$).

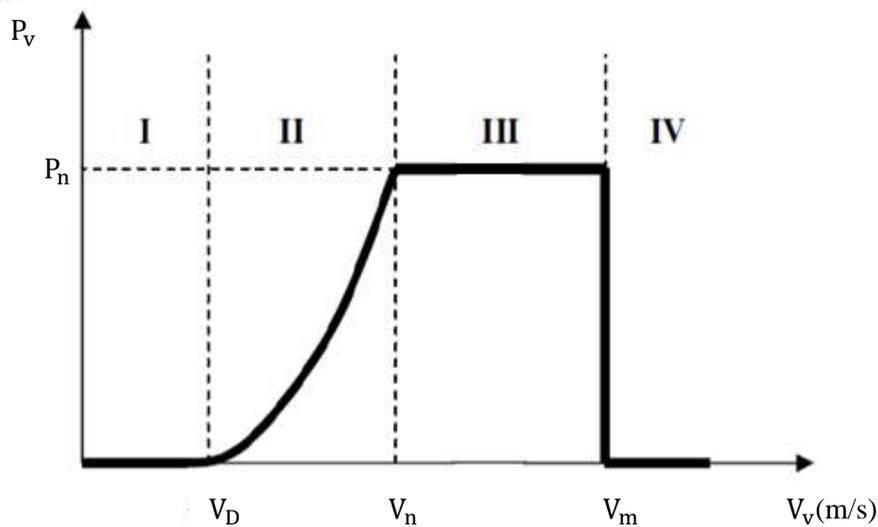


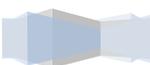
Figure II.2 : Courbe caractéristique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

I.5. Recherche du rendement maximum MPPT des éoliennes

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT: Maximum Power Point Traking). Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore de jouer sur la commande de la génératrice.

La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance.



De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne [Men 08].

I.6. Avantages et inconvénients d'une éolienne

I.6.1. Avantages [Fer 09]

- **Ecologiquement**, l'énergie éolienne est une énergie propre :
 - Elle ne nécessite aucun carburant ;
 - Elle ne crée pas de gaz à effet de serre ;
 - Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs ;
 - Elle n'est pas une énergie à risque ;
- L'énergie éolienne est une énergie durable et renouvelable : elle est issue d'un potentiel énorme et inépuisable.
- **Economiquement** :
 - Les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés et non raccordés au réseau électrique général.
 - L'énergie éolienne est la moins coûteuse par rapport aux autres énergies renouvelables (pour les sites bien ventés).

I.6.2. Inconvénients [Fer 09]

- Le problème majeur de l'énergie éolienne est l'instabilité de la puissance fournie, car lorsqu'elle est inférieure à la capacité du réseau, on utilise des sources de puissance complémentaire (groupes électrogènes). Quand cette puissance dépasse la capacité de la charge du réseau, l'intervention d'un système de régulation (stockage, ajout de charge de délestage) est nécessaire.
- La perturbation de l'écologie locale des sites : il faut éviter que les fermes éoliennes soient situées sur le couloir de migration des oiseaux mais plus globalement celle de la faune et de la flore en général.

I.7. Classification des éoliennes

Les générateurs éoliens peuvent être classés selon différentes catégories [Idj 05]:

- Le type de capteur (à axe horizontal ou vertical) ;
- Connecter au réseau électrique ou non ;
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable) ;
- Le mode de régulation (Pitch ou stall control) ;
- La nature de convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone).

I.7.1. Types d'éoliennes selon l'axe [Net 00]

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : à axe vertical et à axe horizontal.

I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus coûteuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier.



Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place: en ville, sur le toit d'un immeuble par exemple.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus.

A. Darrieus

Elles sont peu encombrantes, ne nécessitent pas des systèmes d'orientations et sont simples à installer. Par contre, elles ont un faible rendement et ne démarrent pas toutes seules.

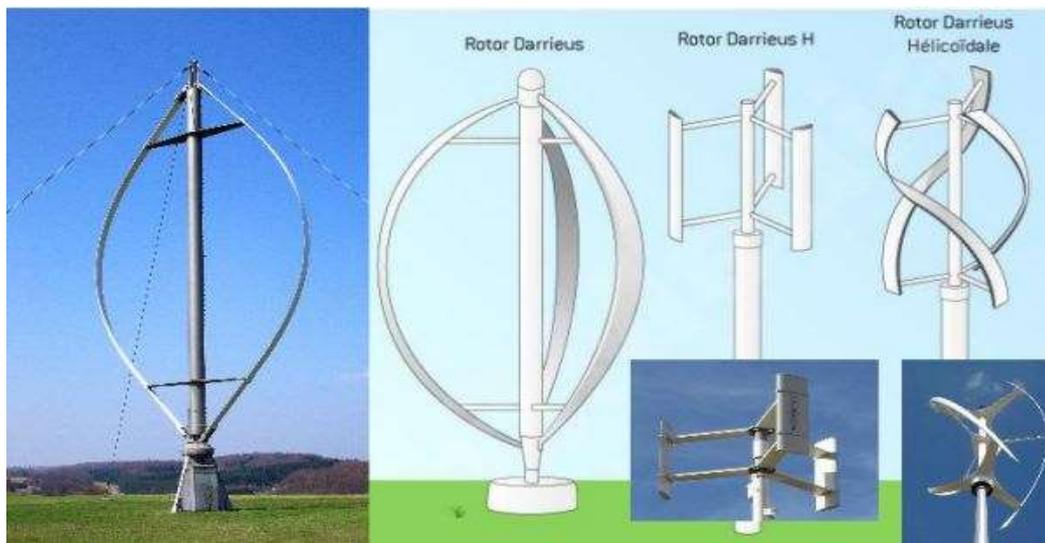


Figure I.3 : Eolienne à axe verticale (structure de Darrieus).

B. Savonius

Cette éolienne a également un faible rendement, mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent.

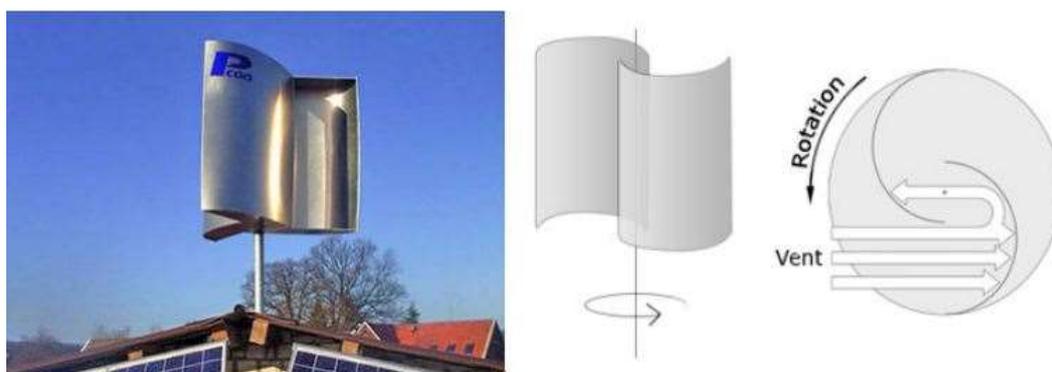
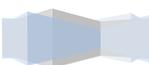


Figure I.4 : Eolienne à axe verticale (structure de Savonius).



I.7.1.2. Les éoliennes à axe horizontal

Beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Le nombre de pale utilisé varie entre 1 et 3. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.



Figure I.5 : Eolienne à axe horizontal.

A. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [Che 10][Poi 03].

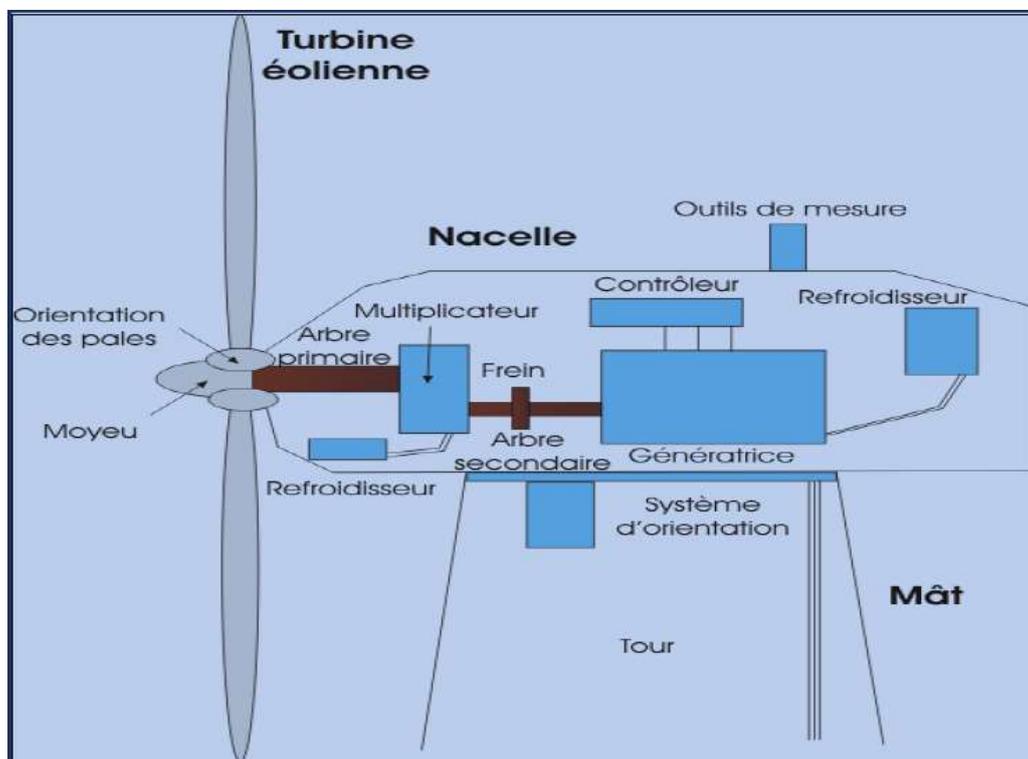
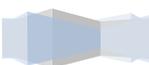


Figure I.6 : Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal



➤ La tour

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol, mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

➤ La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- **Arbre** : Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Multiplicateur** : Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **Le système de refroidissement** : Se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **Le système de commande** : Il contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement par l'intermédiaire du frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
- **Le générateur** : (MSAP, MAS à cage, MADA)...
- **Les systèmes d'orientation des pales** : Ils servent à orienter la turbine face au vent.

➤ Les pales

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leurs nombres est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

➤ Le moyeu

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse du vent.

I.7.2. Types d'éoliennes selon la connexion au réseau

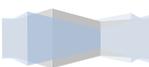
Il existe deux types d'éolienne :

- Les éoliennes connectées au réseau ;
- Les éoliennes autonomes.

I.7.2.1. Les éoliennes connectées au réseau

Aujourd'hui on peut distinguer deux types d'éoliennes connecté au réseau électrique : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP).

Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [Idj 10].



A. Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch contrôle) par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Généralement ces éoliennes reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à cage d'écurieil directement connecter au réseau, une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation [Dav 07][Ghe 11]. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe peuvent se résumer dans les point suivants [Ghe 11][Tou 10]:

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

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- Une puissance extraite non optimale : ce type d'éolienne n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.
- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.

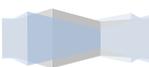
B. Les éoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes, permet de maximiser la puissance extraite du vent, pour cela une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause de caractère variable de la fréquence des tensions, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau est alors nécessaire [Dav 07].

Ce type de fonctionnement améliore aussi la qualité de l'énergie électrique par rapport aux éoliennes à vitesse fixe et il diminue les efforts mécaniques ce qui diminue le niveau du bruit. C'est pour cela que les développements technologique des dernières années ont favorisé la mise en place d'éoliennes à vitesse variable.

En effet, pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_1 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [Ela 04].

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Fig.I.7.



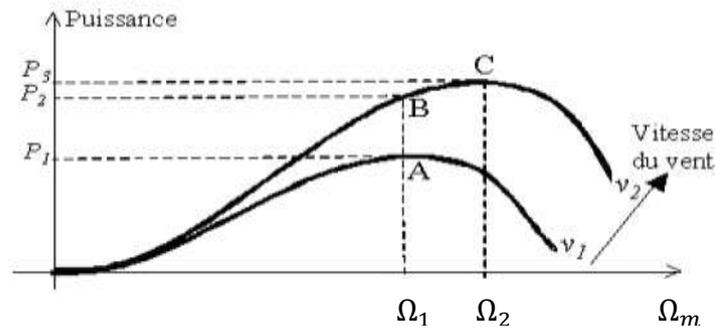


Figure I.7: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et celle du vent.

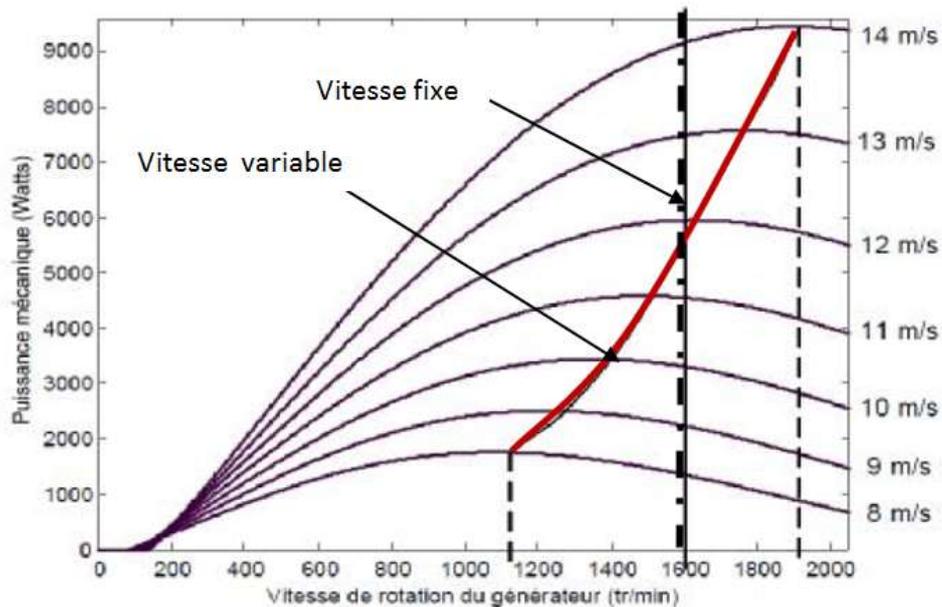


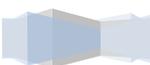
Figure I.8 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [Poi 03].

I.7.2.2. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et le développement technologique de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans les régions isolées [Idj 10].

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées 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 éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible [Idj 10].

Souvent dans les endroits isolés et d'accès difficiles, les éoliennes ne sont pas connectées aux réseaux, dont les systèmes de stockage sont nécessaires. Ainsi l'énergie électrique emmagasinée permet alors de répondre à la demande de l'électricité allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages [Tre 09].



I.7.3. Types d'éoliennes selon le mode de régulation

Pour une vitesse du vent élevée, la puissance captée par l'éolienne devient supérieure à ce que peut supporter ses composantes, d'où la nécessité de réduire la vitesse de la turbine.

Deux types de régulations permettant de réaliser cette tâche :

I.7.3.1. La régulation « pitch »

Le système «pitch» ou a pas de calage variable est une technique active, très coûteuse qui consiste à régler automatiquement la position angulaire des pales sur leur axe, elle est donc utilisée dans les systèmes à vitesse variable de moyenne et forte puissance [Rog 04].

I.7.3.2. La régulation « stall contrôle »

Le système «stall» ou a décrochage aérodynamique est un système de contrôle simple, robuste et ne nécessite aucune installation ou dispositif de contrôle additionnel. Cependant, il ne permet pas une optimisation de la puissance extraite du vent c'est la forme des pales qui conduit à une perte importante donc c'est une solution passive [Sow 12].

I.7.4. Types d'éoliennes selon la machine électrique

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.7.4.1. Machine synchrone

Il existe deux types de machine synchrone : machine synchrone à rotor bobiné et machine synchrone à aimant permanent.

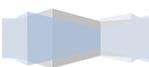
A. Machine Synchrone à Rotor Bobiné [Lat 12]

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine.

Les machines synchrones à rotor bobiné nécessitent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau (la nécessité d'une source continue externe pour l'excitation).

B. Machine synchrone à aimants permanents

La machine la plus utilisée pour les applications à faible puissance est la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). En effet celle-ci présente en général un bon rendement ainsi qu'un bon rapport couple massique et couple volumique. Les avantages majeurs de la MSAP proviennent du fait qu'une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement, à savoir celle créant un champ magnétique au rotor, est présente grâce aux aimants. On peut considérer les aimants au rotor comme une réserve d'énergie emmagasinée lors de leur aimantation. Cependant, les aimants terres rares, offrant un niveau d'induction



permettant d'obtenir un rapport couple/volume important, sont sensibles à l'élévation de température et ont un coût important [Poi 03].

Les inconvénients des générateurs synchrones à aimants permanents (MSAP) résident :

- ✓ Le prix élevé des aimant terre rare ;
- ✓ Grand diamètre de la machine ;
- ✓ Electronique de puissance dimensionnée pour la totalité de la puissance.

I.7.4.2. Machine asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique, pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

A. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où le générateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qu'équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde [Poi 03].

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

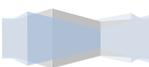
Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son faible coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce qu'elle reste au voisinage du synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées. Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

Les inconvénients de la machine asynchrone à cage peuvent se résumer dans les points suivants [Bou 12] :

- ✓ Puissance extraite non optimisée ;
- ✓ Maintenance de la boîte de vitesse ;
- ✓ Pas de contrôle de l'énergie réactive ;
- ✓ Magnétisation de la machine imposée par le réseau ;
- ✓ Dimensionnement du convertisseur d'électronique de puissance pour la totalité de la puissance.

B. Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le système décrit ci-dessus, certains aérogénérateurs sont équipés d'une machine asynchrone à double stator, c'est-à-dire deux enroulements statoriques : l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre de paires de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre de paires de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un



second bobinage statorique qui rend sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important [Bou 12].

C. Machine asynchrone à double alimentation stator -rotor (MADA)

La Machine asynchrone à double alimentation stator -rotor est actuellement l'une des solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Actuellement, plusieurs projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissances.

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne 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 où est injectée cette génératrice [Che 10].

I.8. Présentation de la MADA type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constituées le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches 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 extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [Ghe 11].

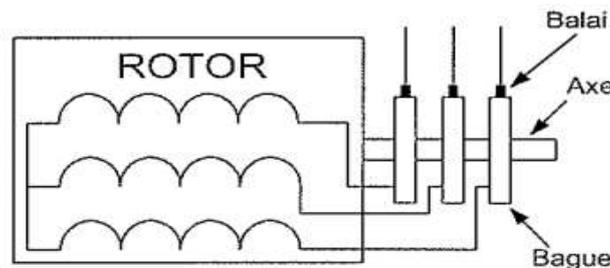


Figure I.9 : Structure du rotor de la MADA.

I.9. Intérêt de la MADA

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné à la fraction de la puissance nominale du stator, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc. Pour des applications moteur, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances, fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la

vitesse nominale) sans démagnétisation, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse,...etc. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine.

Le fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans quatre quadrants est schématisé dans la Fig.I.10, tel que P_s , P_r désignent les puissances absorbées ou fournies par le stator et le rotor de la machine [Boy 06].

I.9.1. Fonctionnement en moteur hypo synchrone (quadrant 1)

La puissance de stator est constante et la puissance du glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est dissipée en perte joule dans le rotor ici la fréquence de glissement dans le rotor crée un champ tournant dans le même sens que celui du stator et la vitesse du rotor $w_r = w_s - w_g$.

I.9.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone (quadrant 2)

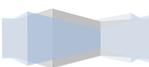
Le glissement devient négatif lorsqu'on augmente la vitesse, la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor. Pour réaliser ce mode on inverse l'ordre de phase de sorte que le champ tournant induit par la fréquence du glissement soit en opposition de phase avec celui du stator.

I.9.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone (quadrant 3)

Le stator fournit de l'énergie électrique au réseau dans le mode hypo synchrone de vitesse. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ tournant au stator on a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

I.9.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone (quadrant 4)

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau on a donc un fonctionnement au-dessus de la vitesse de synchronisme la Fig.I.10 représente le fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.



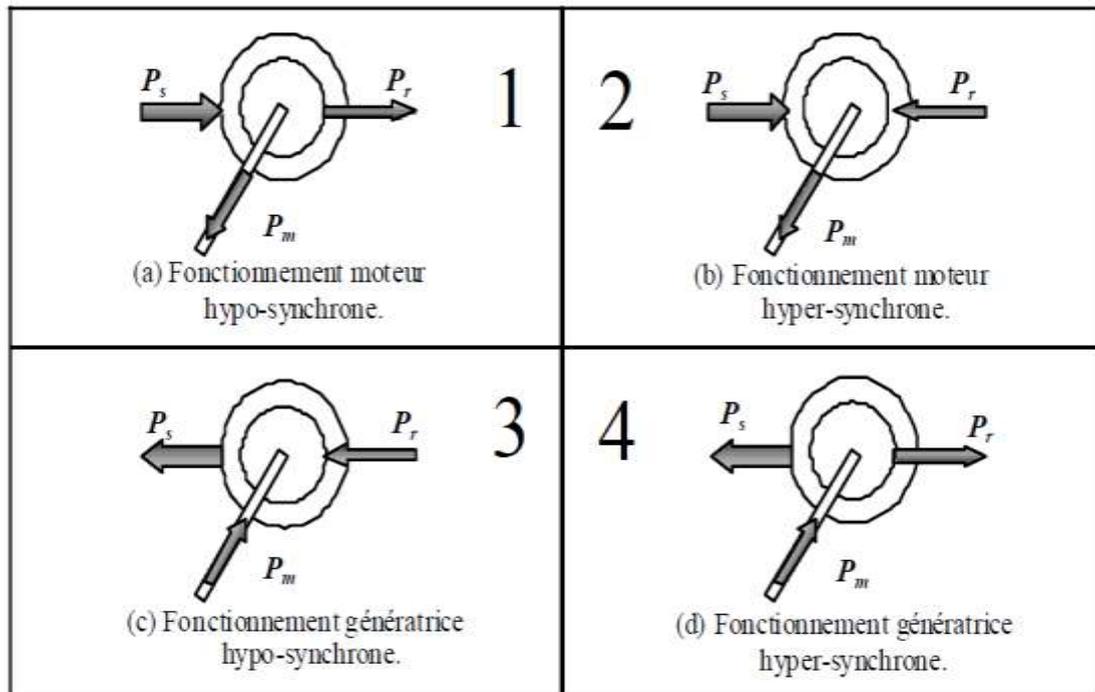


Figure I.10 : Modes de fonctionnement de la MADA.

La MADA offre un autre mode de fonctionnement pour une fréquence rotorique nulle ($f_r = 0$) appelé le fonctionnement en mode synchrone.

I.10. Le mode de connexion du rotor de la MADA au réseau [Tam 05]

Il existe deux modes de connexion du rotor de la MADA au réseau avec des convertisseurs d'électroniques de puissances : connexion via des convertisseurs directs AC/AC et connexion via des convertisseurs indirects AC/DC/AC.

I.10.1. Connexion via des convertisseurs directs

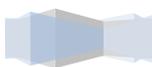
Ce système est raccordé au réseau à la fois directement par le stator, par contre le rotor est connecté via des convertisseurs électroniques de puissance directs (le cycloconvertisseur et le convertisseur matriciel).

I.10.1.1. Le cycloconvertisseur

Le cycloconvertisseur est un montage de l'électronique de puissance qui réalise une conversion alternatif /alternatif fonctionnant en commutation naturelle.

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure.

Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif.



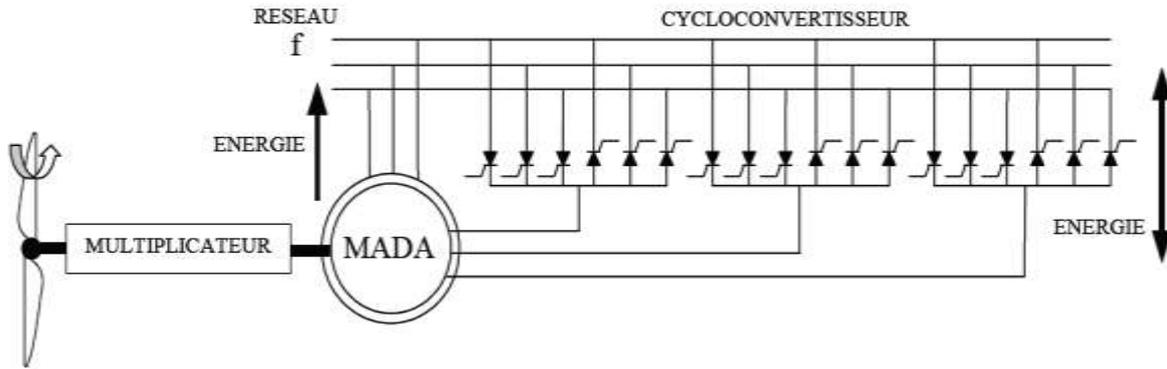


Figure I.11 : Structure avec cycloconvertisseur.

I.10.1.2. Le convertisseur matriciel

Un convertisseur matriciel est un convertisseur de fréquence direct, générant des tensions triphasées variables en amplitude et en fréquence à partir des tensions triphasées d'entrée. Un circuit intermédiaire continu n'est pas nécessaire. Le principe est basé sur une topologie matricielle reliant chaque phase d'entrée à chaque phase de sortie par un commutateur de puissance bidirectionnel. Les inconvénients du convertisseur matriciel consistent d'abord en une commutation du courant plus délicate. En outre, la commande est relativement complexe [Den 10].

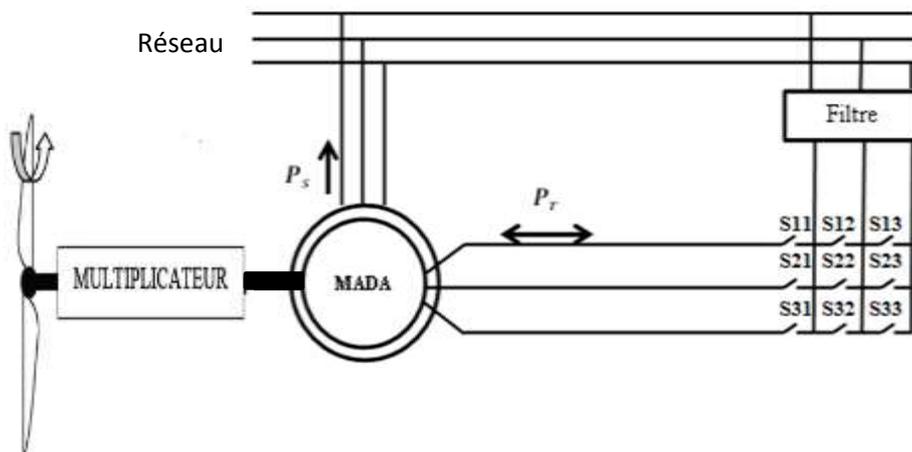
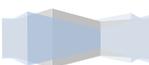


Figure I.12 : Structure avec convertisseur matriciel.

I.10.2. Connexion via des convertisseurs indirects

Ce système est raccordé au réseau à la fois directement par le stator, par contre le rotor est connecté indirectement via l'association de deux convertisseurs d'électroniques de puissance (redresseur + onduleur) qui permet d'adapter la fréquence du rotor à celle du réseau.



I.10.2.1. Redresseur et onduleur

Un ensemble de deux convertisseurs à IGBT est inséré afin de contrôler le flux et la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et contrôle aussi des puissances actives et réactives transitées au réseau.

Un redresseur classique à diodes ou à thyristors perturbe le réseau alternatif qui l'alimente en y injectant des harmoniques et en consommant de la puissance réactive.

Les onduleurs de tension ou de courant sont réversibles on peut les faire fonctionner en sens inverse de leur sens habituel, c'est-à-dire en redresseur.

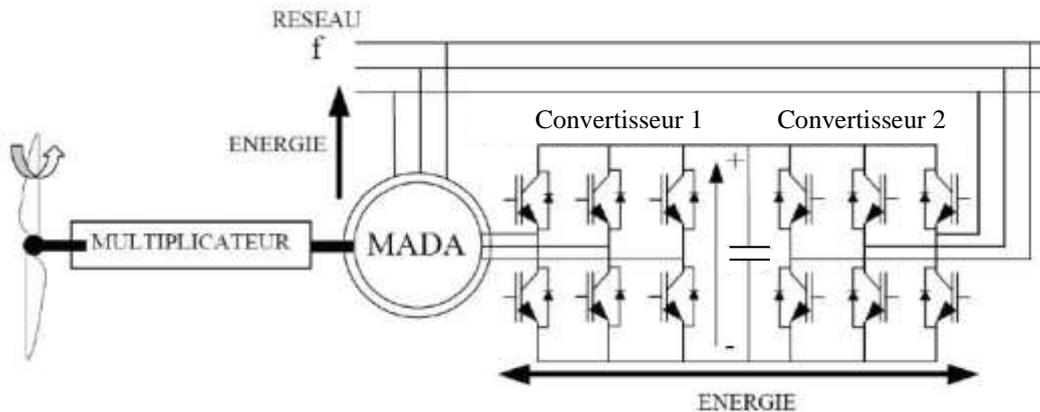


Figure I.13 : MADA avec convertisseurs indirects.

I.11. Choix de la structure

I.11.1. Choix de la turbine

En s'appuyant sur l'expression de coefficient de puissance (C_p), on voit que sa valeur change en fonction de la variation de la vitesse du vent, le but de la vitesse variable est d'adopter la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent pour travailler souvent à la puissance optimale. La turbine peut tourner à vitesse fixe donc à puissance fixe sous de fortes rafales de vent et cela en diminuant le rendement de la turbine.

I.11.2. Choix du convertisseur électromécanique

Actuellement, la majorité des projets éoliens repose sur l'utilisation des machines asynchrones à double alimentation stator-rotor qui sont comparables du point de vue technologique à la machine asynchrone à rotor bobiné classique.

Son utilisation est préférée pour ses avantages qui sont [Bou 12]:

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper) et la récupération de la puissance de glissement, la puissance produite peut être supérieure de la puissance nominale sans être surchauffée ;
- Possibilité d'accès au stator et rotor de la MADA pour la mesure des courants, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique ;
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance nominale de la machine (glissement) contrairement au système utilisant la machine

asynchrone à cage d'écureuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine ;

- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.

I.11.3. Choix du dispositif de connexion du rotor de la MADA au réseau

Notre choix est porté sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), alimentée au rotor par un redresseur et un onduleur. Ce choix est favorisé afin d'éviter certains inconvénients des convertisseurs directs qui sont:

- Des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance (cycloconvertisseur).
- Nécessite un nombre important de semi-conducteur (cycloconvertisseur).
- Complexité de la commande (convertisseur matriciel).
- La connexion indirecte permet le découplage du système secondaire du primaire pour minimiser les perturbations au réseau.

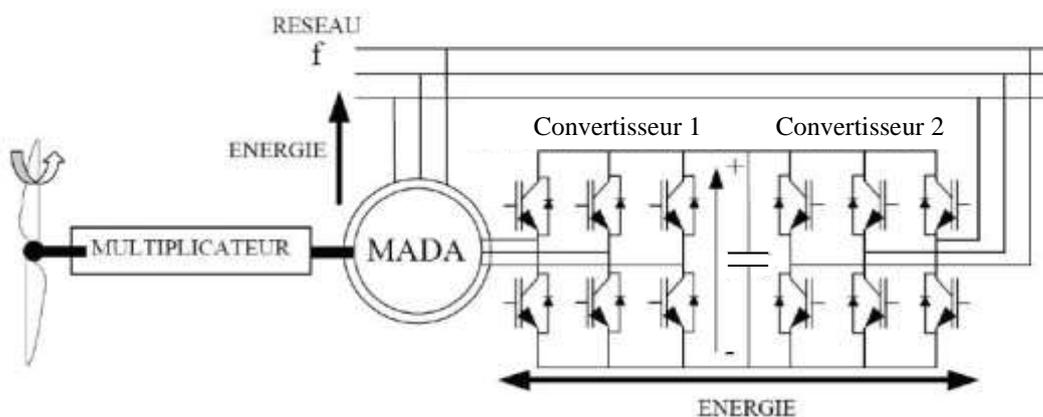


Figure I.14 : Structure de la chaîne de conversion éolienne.

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini l'éolienne, et donné une brève description des chaînes de conversion. Puis nous avons établi une classification des éolienne selon : l'axe de rotation (axe vertical ou horizontal), le type de connexion au réseau électrique (connecté au réseau ou fonctionnement isolé et autonome), ces stratégies de fonctionnement (vitesse variable, vitesse fixe) et le type de régulation (pitch ou stall control) ainsi que selon le convertisseur électromécanique (machine synchrone, machine asynchrone) avec les avantages et les inconvénients de chaque machine.

Une description de la MADA et l'intérêt qui lui est porté dans le domaine des énergies renouvelables et le mode de connexion du rotor de la MADA au réseau, nous a permis d'opter pour une structure d'un aérogénérateur basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation connectée au réseau via un convertisseur indirect (AC/DC/AC), cette structure est une solution intéressante du point de vue coût et performance car les pertes dans le convertisseur sont faibles.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne éolienne

II.1. Introduction

Dans cette partie on s'intéresse essentiellement à la modélisation des différents éléments de notre chaîne de conversion d'énergie éolienne en commençant par la partie mécanique puis la partie électrique.

Notre système est composé des éléments suivants :

- Une turbine éolienne.
- Une génératrice asynchrone à double alimentation.
- Les convertisseurs de puissance (onduleur).

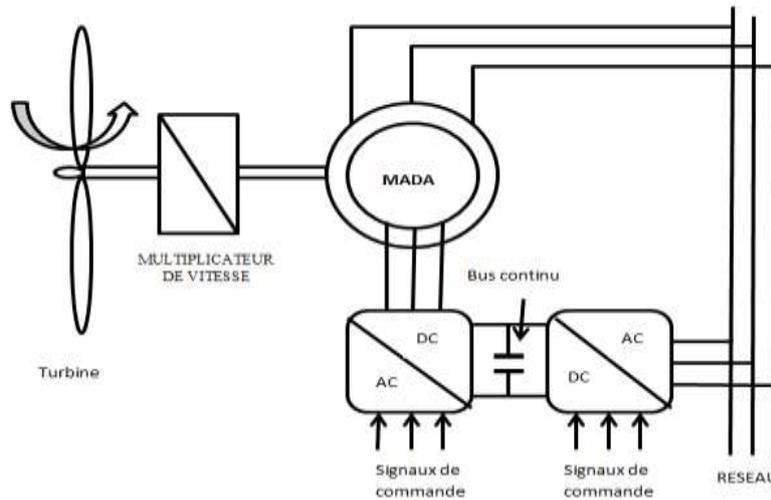


Figure II.1 : Schéma du système à étudier.

II.2. Modélisation de la partie mécanique

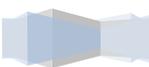
II.2.1. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses suivantes sont adoptées [Ela 04] :

- Les pâles sont considérées de conception identiques ;
- Une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pâles, alors nous pouvons considérer l'ensemble des pâles comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toute les caractéristiques mécaniques ;
- De part, la conception aérodynamique des pâles, leurs coefficients de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé ;
- La vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

II.2.2. Modèle du vent

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie électrique. Le vent peut-être modélisé par une simple loi exponentiel jusqu'à des distributions spectrales et spatiales très complexes qui tiennent compte de sa phénoménologie turbulente. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction sur une grande période du temps sont nécessaires [Ait 09].



II.2.3. Modèle de la turbine éolienne

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique.

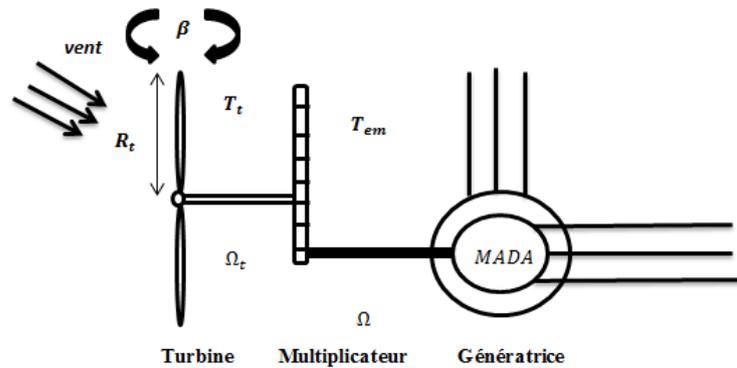


Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance P_v , issue de l'énergie cinétique d'un vent incident d'une vitesse V_v , traversant une surface S_t , s'exprime par la relation suivante [Idj 10] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S_t V_v^3 \tag{II.1}$$

Avec $S_t = \pi R_t^2$ (II.2)

ρ : Représente la masse volumique de l'air.

La puissance P_t captée par la turbine éolienne est alors liée à la puissance P_v par un coefficient, appelé coefficient de puissance, dont l'expression est donnée sous la forme suivante [Mou 07] [Sma 06] :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V_v^3} \tag{II.3}$$

Où R_t représente le rayon de la turbine.

Ce coefficient de puissance est intrinsèque à la turbine. Il est fonction de plusieurs paramètres (profil des pâles, matériaux, etc.) et admet une valeur maximale théorique, appelée limite de Betz qui est de: $\frac{16}{27} \approx 0.5926$.

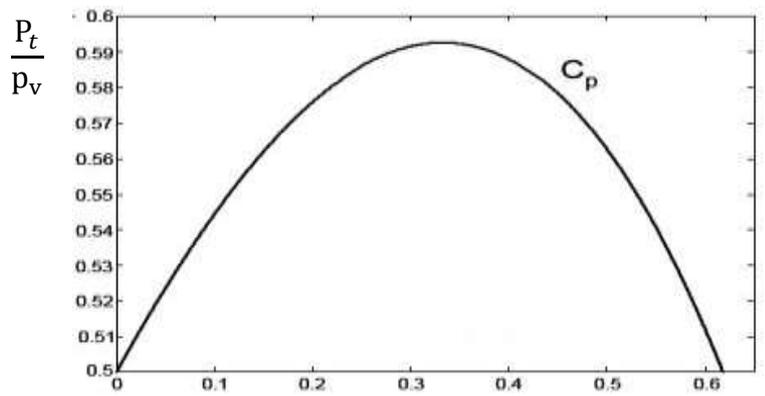
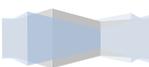


Figure II.3 : Coefficient de puissance [Bel 10]. λ



On définit également le coefficient de couple C_m , plus pratique pour élaborer les stratégies de commande d'une éolienne, par l'expression suivante [Sma 06] [Mir 05] :

$$C_m = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V_v^2} \quad (\text{II. 4})$$

Où T_t est le couple de la turbine éolienne de vitesse Ω_t .

$$\text{Sachant que } P_t = T_t \Omega_t \quad (\text{II. 5})$$

Les coefficients C_m et C_p sont liés par :

$$C_p = \lambda C_m \quad (\text{II. 6})$$

Où λ appelée vitesse réduite, est définie comme étant le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pâles ($\Omega_t R_t$) sur la vitesse instantanée du vent (V_v) soit [Bra 12] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (\text{II. 7})$$

Considérant une turbine éolienne munie de pâles (tripâle) de longueur R_t entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , Fig.II.2, La puissance cinétique du vent P_v est donnée par l'équation (II.1). La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique T_t est donné à partir des équations (II.1), (II.3), (II.4) :

$$T_t = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S_t V_v^3 \quad (\text{II. 8})$$

C_p Est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pôle, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pôle β) [Ghe 11][Idj 10].

II.2.4. Modélisation du multiplicateur de vitesse [Ela 04]

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω_m . Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_m \quad (\text{II. 9})$$

$$T_{em} = \frac{1}{G} T_t \quad (\text{II. 10})$$

G : Le gain du multiplicateur.

T_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

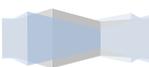
Ω_m : La vitesse mécanique de la génératrice.

Ω_t : La vitesse de la turbine.

II.2.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pâles, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice [Ela 04].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II. 11})$$



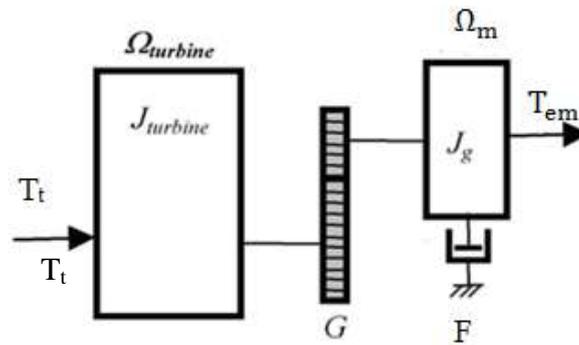


Figure II.4 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

L'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total T_m .

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = T_m \tag{II.12}$$

Le couple mécanique T_m prend en compte le couple électromagnétique T_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux T_{vis} , T_g le couple issu du multiplicateur.

$$T_m = T_g - T_{vis} - T_{em} \tag{II.13}$$

Le couple des frottements visqueux T_{vis} est modélisé par un coefficient de frottements visqueux F :

$$T_{vis} = F \cdot \Omega_m \tag{II.14}$$

L'équation dynamique de l'arbre est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + F\Omega_m = T_g - T_{em} \quad \rightarrow \quad (J S + F)\Omega_m = T_g - T_{em} \tag{II.15}$$

Avec:

J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.

F : Coefficient de frottement dynamique.

Le schéma du modèle de la turbine est donné par les équations (II.7, II.8, II.9, II.10, II.15) :

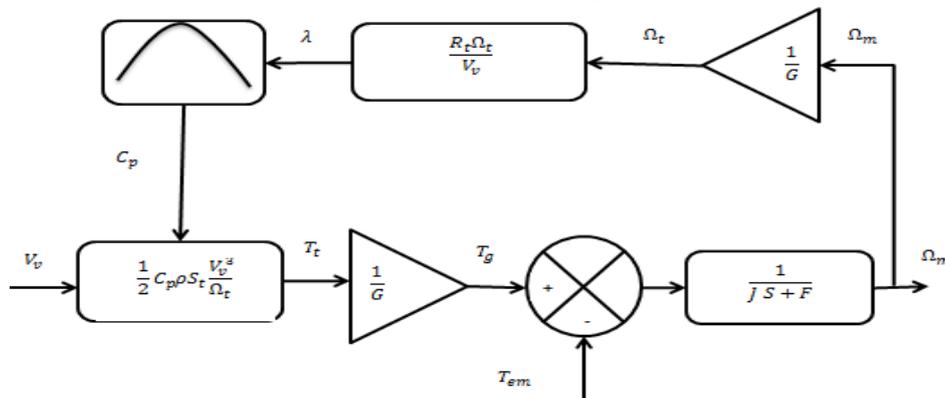
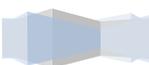


Figure II.5 : Schéma du modèle de la turbine.



II.3. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT)

La courbe caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme parabolique admet un maximum C_{p-max} pour λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (**M.P.P.T**). L'asservissement de vitesse nécessite le calcul de la vitesse du vent. Or une mesure précise de cette dernière est difficile à réaliser. En s'appuyant sur le rapport de vitesse optimale λ_{opt} pour lequel le coefficient de puissance est maximal C_{pmax} l'expression du couple électromagnétique de référence est donnée par la relation suivante [Ait 09]:

$$T_{em-ref} = \frac{1}{2} C_{p-max} \rho \pi \frac{R_t^5}{\lambda_{opt}^3} \Omega_t^2. \quad (II.16)$$

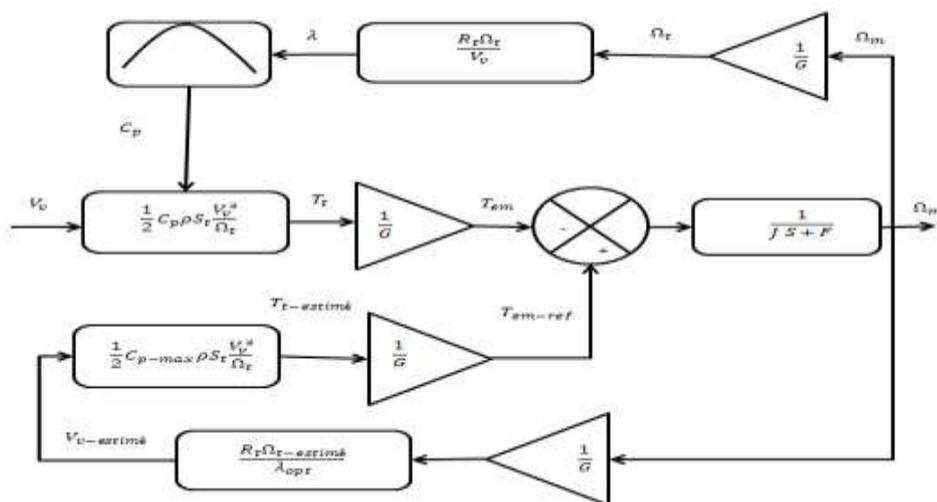


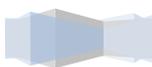
Figure II.6 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.

II.4. Modélisation de la partie électrique

II.4.1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices afin de présenter un modèle qui correspond à cette machine [Ayo 13].

- Le circuit magnétique sera considéré non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants;
- Le circuit magnétique sera supposé parfaitement feuilleté, ce qui permet de négliger les effets des courants induits de Foucault ;
- Les effets thermiques n'entreront pas dans cette étude ;
- La densité de courant sera supposée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (Absence d'effets pelliculaires) ;
- La machine sera supposée parfaitement symétrique au niveau des trois phases ;
- Au niveau mécanique, les frottements secs et turbulents ne seront pas pris en compte.



II.4.2. Modélisation de la MADA dans le repère abc

La représentation de la machine asynchrone à double alimentation dans un plan cartésien abc est schématisé sur la Fig.II.7, les trois enroulements statorique sont déphasés l'un par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{3}$ de même pour les enroulements rotorique.

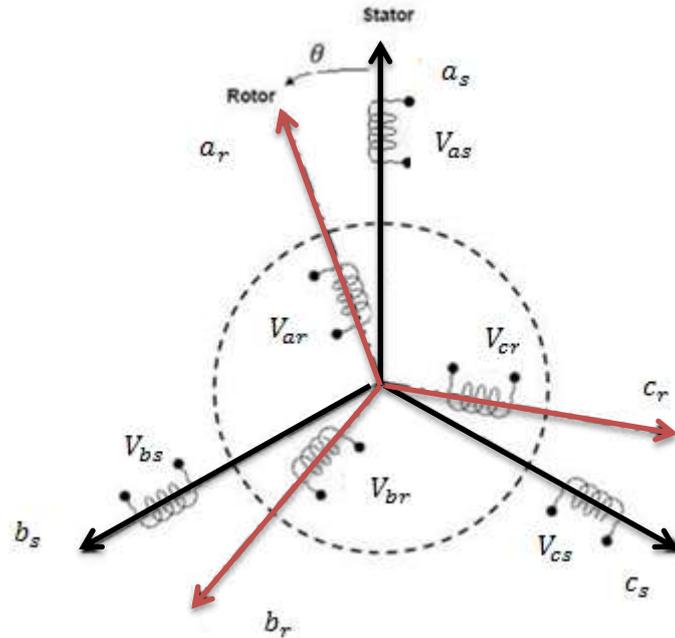


Figure II.7 : Représentation schématique de la MADA.

L'application de la loi Faraday aux bornes des enroulements du stator et du rotor permet d'obtenir les équations des tensions suivantes [Ben 06][Den 10] :

II.4.2.1 Les équations électriques

Le stator :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

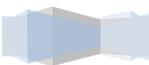
Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

$$\text{On peut écrire : } [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.19})$$

Le rotor :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$



Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{On peut écrire : } [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.22})$$

Les équations de tension de la machine deviennent :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \} \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions instantanées aux bornes des enroulements statorique.

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tensions instantanées aux bornes des enroulements rotorique.

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : Courants instantanés dans les phases des enroulements statorique.

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : Courants instantanés dans les phases des enroulements rotorique.

$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$: Flux totalisés traversant les enroulements statorique.

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$: Flux totalisés traversant les enroulements rotorique.

R_s, R_r : Résistances statoriques et rotoriques respectivement.

II.4.2.2. Les équations magnétiques

Les flux totalisés peuvent être exprimés en fonction des inductances et des courants en admettant l'hypothèse de la non-saturation de la machine.

Pour le stator :

$$\begin{cases} \varphi_{as} = l_s i_{as} + M_s i_{bs} + M_s i_{cs} + M_1 i_{ar} + M_2 i_{br} + M_3 i_{cr} \\ \varphi_{bs} = M_s i_{as} + l_s i_{bs} + M_s i_{cs} + M_3 i_{ar} + M_1 i_{br} + M_2 i_{cr} \\ \varphi_{cs} = M_s i_{as} + M_s i_{bs} + l_s i_{cs} + M_2 i_{ar} + M_1 i_{br} + M_3 i_{cr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Sous forme matricielle :

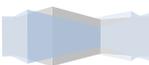
$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_3 & M_1 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{ar} = M_1 i_{as} + M_3 i_{bs} + M_2 i_{cs} + l_r i_{ar} + M_r i_{br} + M_r i_{cr} \\ \varphi_{br} = M_2 i_{as} + M_1 i_{bs} + M_3 i_{cs} + M_r i_{ar} + l_r i_{br} + M_r i_{cr} \\ \varphi_{cr} = M_3 i_{as} + M_2 i_{bs} + M_1 i_{cs} + M_r i_{ar} + M_r i_{br} + l_r i_{cr} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$



Avec :

$$\begin{cases} M_1 = M \cos(\theta) \\ M_2 = M \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.28)$$

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

θ : L'écart angulaire entre les phases du stator et celle du rotor.

M : Maximum de l'induction mutuelle entre phase du stator et celle du rotor

En regroupons les deux systèmes matriciels on obtient le système suivant

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s M_s M_s M_1 M_2 M_3 \\ M_s l_s M_s M_3 M_1 M_2 \\ M_s M_s l_s M_2 M_1 M_3 \\ M_1 M_3 M_2 l_r M_r M_r \\ M_2 M_1 M_3 M_r l_r M_r \\ M_3 M_2 M_1 M_r M_r l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

On peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] [M_{sr}] \\ [M_{sr}] [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

Avec la matrice des inductances statorique :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s M_s M_s \\ M_s l_s M_s \\ M_s M_s l_s \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

La matrice des inductances rotorique :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r M_r M_r \\ M_r l_r M_r \\ M_r M_r l_r \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

La matrice inductance mutuelle stator-rotor

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^{-1} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.33)$$



II.4.2.3. Les équations mécaniques

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \tag{II.34}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \tag{II.35}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \tag{II.36}$$

$$T_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} \tag{II.37}$$

$$\omega_s - \omega_r = \omega = p \cdot \Omega_m \tag{II.38}$$

II.5. Transformation de Park

La résolution du système d'équation est difficile du fait que les termes des matrices d'inductances varient en fonction de la position du rotor par rapport au stator.

Pour faciliter la tâche et surmonter cette difficulté on fait appel à l'usage de la transformation de PARK.

L'intérêt de la transformation de Park est de d'écrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants facilitant l'étude de la machine en conservant la puissance instantanée et la réciprocité des inductance mutuelle aussi que d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé qui reste valable pour la machine réel à travers une matrice appliquer au équations de la machine.

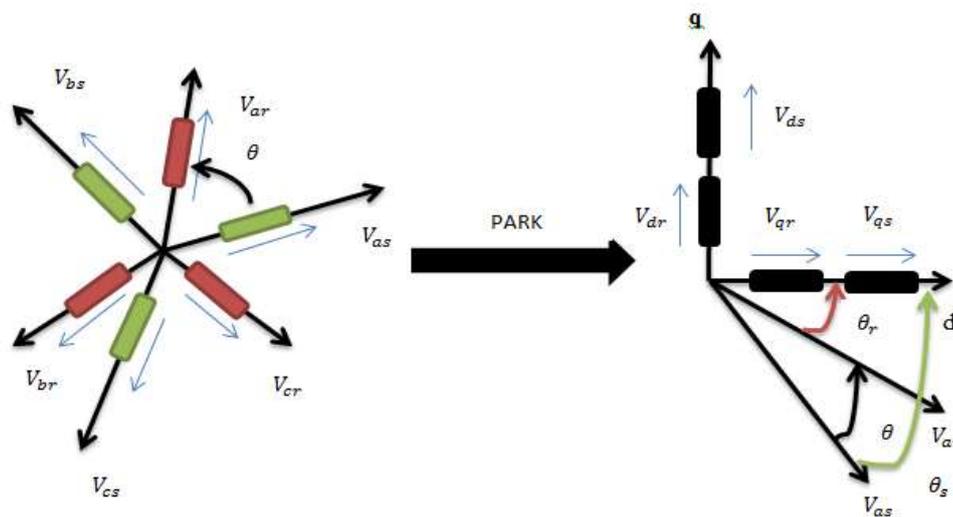
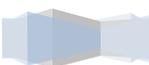


Figure II.8 : Représentation de la machine dans le repère biphasé.

$$P[(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.39}$$



La transformation inverse de PARK est donnée par :

$$P[(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$\theta = \theta_s$: (phase statorique) pour les grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_r$: (phase rotorique) pour les grandeurs rotoriques.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II.41})$$

Avec :

X : représente les grandeurs (courants, tension et flux)

On définit les composantes C_{dq0} de Park directe 'd' quadratique 'q' et homopolaire 'o' comme suite :

$$\begin{bmatrix} G_d \\ G_q \\ G_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \\ G_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

On applique la transformation de PARK aux équations statorique de la machine on aura:

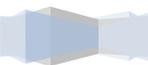
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} \\ V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d}{dt} \varphi_{os} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

De la même manière pour avoir les équations des tensions du rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} \\ V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d}{dt} \varphi_{or} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Avec : $\omega = p \cdot \Omega_m$ (II.45)

D'après les hypothèses simplificatrices, les composantes homopolaires sont nulles, les deux systèmes précédents deviennent :



Les équations de tension dans le référentiel de Park :

Stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Les équations de flux en coordonnées de Park :

Stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance propre du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance propre du rotor.

$M = \frac{3}{2} M_{rs}$

M_{rs} : Inductance mutuelle cyclique stator rotor.

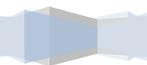
En remplaçant les flux par leurs expressions en fonction des courants statoriques et rotoriques relations on aura le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega) M & R_r & -(\omega_s - \omega) L_r \\ (\omega_s - \omega) M & 0 & (\omega_s - \omega) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Après la résolution de ce système d'équations matricielles, on obtient les expressions des courants statoriques et rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[V_{ds} - M \frac{di_{dr}}{dt} - R_s \cdot i_{ds} + \omega_s L_s i_{qs} + \omega_s M i_{qr} \right] \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[V_{qs} - M \frac{di_{qr}}{dt} - R_s \cdot i_{qs} - \omega_s L_s i_{ds} - \omega_s M i_{dr} \right] \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[V_{dr} - R_r \cdot i_{dr} - M \frac{di_{ds}}{dt} - (\omega_s - \omega) (L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs}) \right] \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[V_{qr} - R_r \cdot i_{qr} - M \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega) (L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds}) \right] \end{cases} \quad (\text{II.52})$$



Les expressions de la puissance et du couple électromagnétiques :

$$\text{Les puissances statoriques : } \begin{cases} P_s = V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs} \\ Q_s = V_{qs}i_{ds} - V_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

$$\text{Les puissances rotoriques : } \begin{cases} P_r = V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr} \\ Q_r = V_{qr}i_{dr} - V_{dr}i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

L'expression du couple électromagnétique :

$$T_{em} = \begin{cases} P \frac{M}{L_s} (\varphi_{ds}i_{dr} - \varphi_{ds}i_{qr}) \\ P (\varphi_{qr}i_{dr} - \varphi_{dr}i_{qr}) \\ P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \\ PM (i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

II.6. Modélisation de l'onduleur :

II.6.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

L'onduleur de tension utilisé est composé de six interrupteurs répartie d'une façon symétrique sur trois bras commandés à l'ouverture et à la fermeture avec des diodes en antiparallèle comme le montre la Fig.II.9

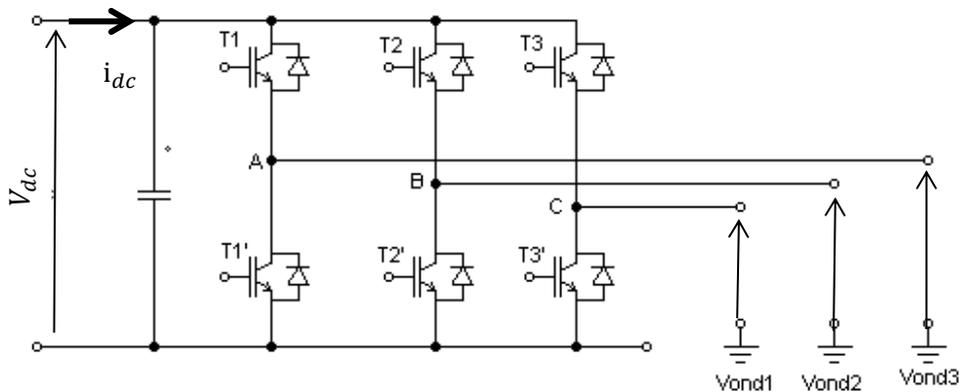


Figure II.9 : Structure d'un onduleur de tension à deux niveaux.

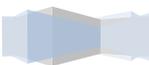
On pose les fonctions logiques suivantes :

$$\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } T_i \text{ est fermé} \\ S_i = 0 \text{ si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

$$\begin{cases} s'_i = 1 \text{ si } T'_i \text{ est fermé} \\ s'_i = 0 \text{ si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction F_i , avec ($i=1.2.3$) tel que :

$$F_i = (s_i - s'_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } s_i = 1 (s'_i = 0) \\ -1 & \text{si } s_i = 0 (s'_i = 1) \end{cases} \quad (\text{II.58})$$



Les tensions $V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$ sont exprimées par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Avec F_1, F_2, F_3 fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.6.2. Onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs à deux niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part, d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel [Tou 08] :

- Avantages technologiques** : Dans les onduleurs multi niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer.
- Avantages fonctionnels pour le convertisseur** : possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance. Il Possède de meilleurs compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage).
- Avantages fonctionnels pour la machine** : le nombre de tension généré par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'onduleur à deux niveaux de tension, ce qui permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduira par une réduction de sa distorsion harmonique. Ceci peut entraîner des avantages considérables comme la diminution des pertes fer, l'augmentation de la durée de vie des isolants [Tou 08].

II.6.2.1. Présentation de l'onduleur de tension à trois niveaux

La Fig.II.10 représente le schéma général de l'onduleur de tension à trois niveaux, de structure appelée à point neutre "clampé" (NPC Neutral-Point-Clamped). Cette structure présente beaucoup d'avantage, tels que le nombre de tension généré est plus élevé, moins d'harmonique de distorsion et faible fréquence de commutation. Chaque bras de l'onduleur est constitué de 4 interrupteurs: (S_i, S'_i, S_j, S'_j) . Les interrupteurs S_i et S'_i ont un fonctionnement complémentaire [Tou 08].



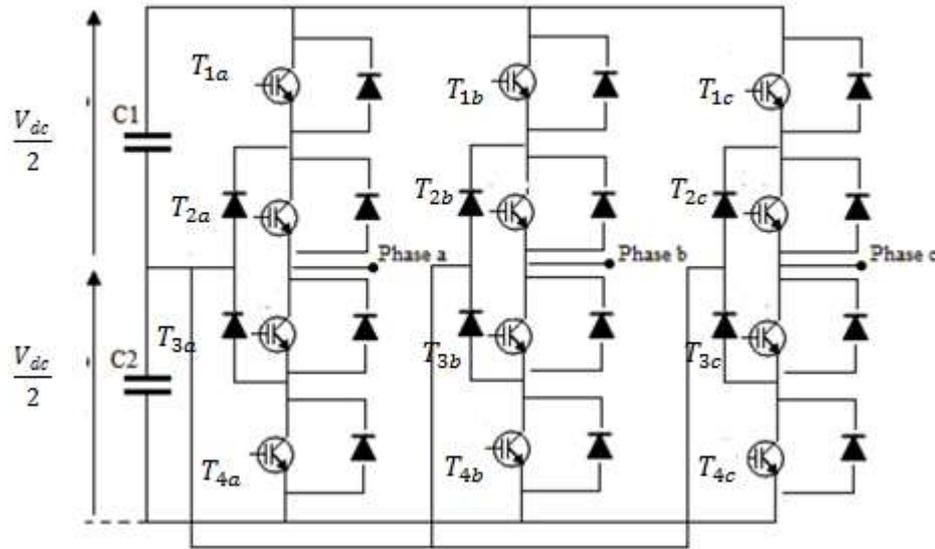


Figure II.10 : Structure d'un onduleur de tension à trois niveaux.

Tel que : $(S_i = T_{1k}), (S_{i'} = T_{3k}), (S_j = T_{2k}), (S_{j'} = T_{4k})$. avec k représente le bras de l'onduleur (k=a,b,c).

II.6.2.2. Génération des trois niveaux de tension dans un onduleur NPC

Pour des raisons de simplification à cause de la symétrie de l'onduleur, seule une branche de celui-ci est représentée à la Fig.II.11 : Elle est constituée principalement de quatre interrupteurs ($T_{1a}, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}$). Chaque point milieu entre (T_{1a} et T_{2a}) et entre (T_{3a} et T_{4a}) est relié à un point neutre « M » via une diode supplémentaire (D'_{11} et D'_{21}) ce point neutre est formé par la subdivision d'une source de tension continue V_{dc} en deux sources égales à $\frac{V_{dc}}{2}$. Ces sources peuvent être remplacées par deux condensateurs. [Sed 09].

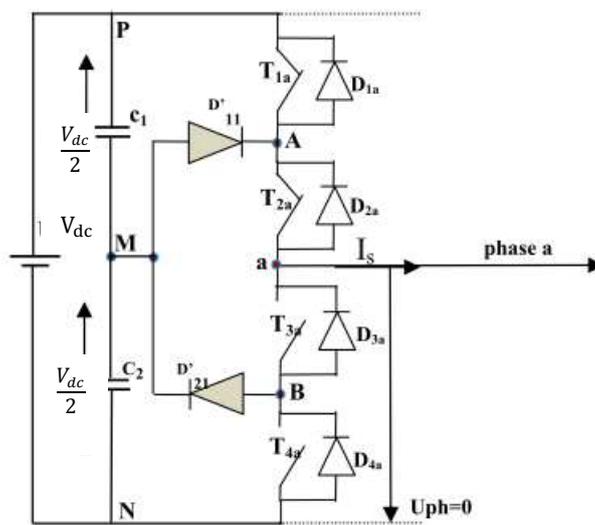
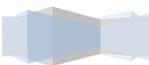


Figure II.11: Structure d'un bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.



L'une des particularités de cette topologie est que les semi-conducteurs externes, T_{1a} et T_{4a} , ne découpent pas pendant au moins la moitié de la période de modulation. Les diodes D'_{11} et D'_{21} n'interviennent pas pour les phases de fonctionnement A et B. En revanche, l'une d'entre elles est passante et permet de fixer le potentiel du point A ou du point B à 0 V. Le signe du courant de charge indique quelle diode est rendue passante : si $I_s > 0$, D'_{11} est amorcée et D'_{21} est bloquée ; la configuration est inversée pour $I_s < 0$. Les trois niveaux de l'onduleur NPC peuvent être générés comme présenté aux Fig.II.11 et Fig.II.12. Avec $T_{3a} = \overline{T_{1a}}$ et $T_{4a} = \overline{T_{2a}}$ [Sed 09]

II.6.2.3 Différentes configurations d'un bras d'un onduleur à trois niveaux

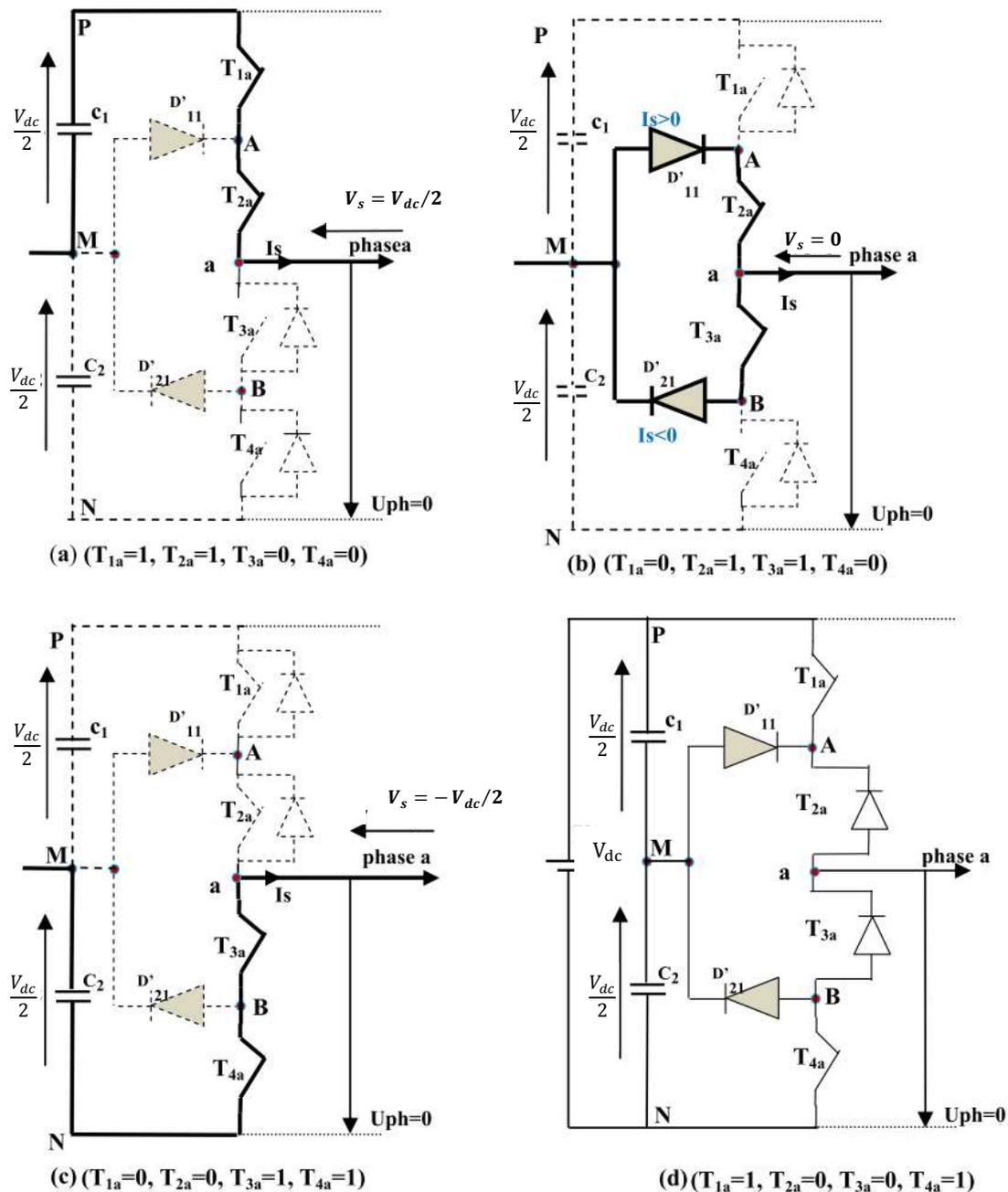
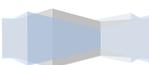


Figure II.12 : Configuration possible d'un onduleur à trois niveaux NPC.



- Quand T_{1a} et T_{2a} sont fermés, les diodes D_{1a} et D_{2a} ne conduisent pas et la phase est connectée au potentiel positif du circuit intermédiaire Fig.II.12.a. Ce qui explique pendant l'alternance positive de la référence, T_{2a} est toujours passant et T_{4a} toujours bloqué. Si T_{1a} est amorcé, alors T_{3a} est OFF et la tension de sortie est fixée à $\frac{V_{dc}}{2}$. Ainsi, l'onduleur génère l'état maximum : état 2 de la Fig.II.13. Au contraire si T_{3a} est ON alors T_{1a} est OFF, et la tension de sortie égale à 0 V, Fig.II.12.b.
- Quand T_{2a} et T_{3a} sont fermés, et par conséquent T_{4a} et T_{1a} sont bloqués, la phase est connectée au point milieu M via les diodes supplémentaires (D'_{11} et D'_{21}) indépendamment du signe du courant Fig.II.12.b. Cela permet de générer le niveau intermédiaire l'état 1 de la Fig.II.13. Ainsi, grâce aux diodes supplémentaires (D'_{11} et D'_{21}), l'onduleur peut générer le niveau intermédiaire, d'où le nom Neutral-Point-Clamped.

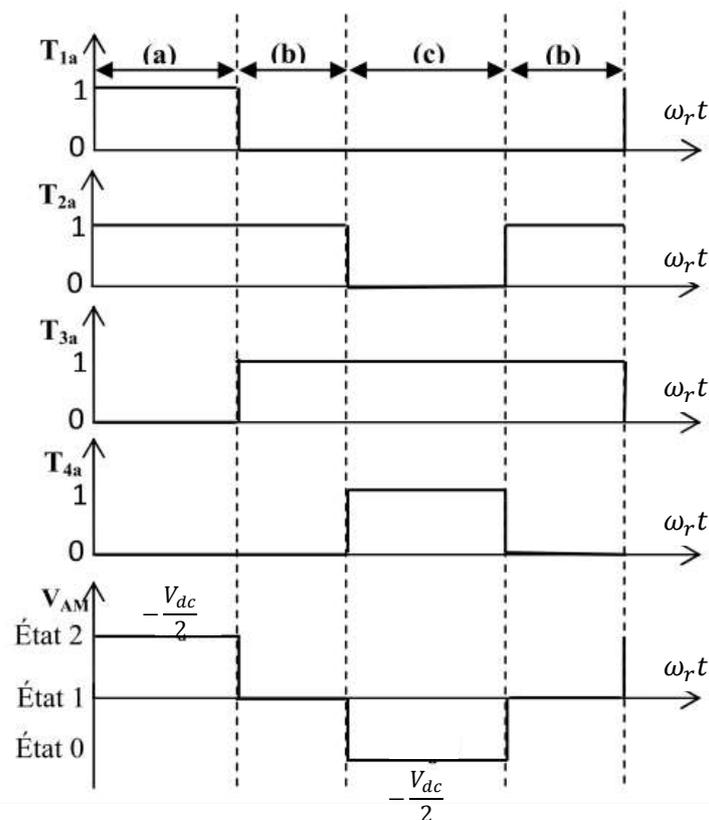
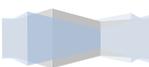


Figure II.13 : Génération des trois niveaux dans un onduleur NPC.

- De manière analogue, pendant l'alternance négative de la référence, T_{2a} est toujours bloqué et T_{4a} toujours passant. Si T_{4a} est amorcé, alors T_{2a} est OFF et la tension de sortie est fixée à $-\frac{V_{dc}}{2}$ Fig.II.12.c ; à l'inverse si T_{2a} est ON, alors T_{4a} est OFF, et la tension de sortie est égale à 0 V Fig.II.12.b. Ainsi, l'onduleur génère l'état minimum : état 0 de la Fig.II.13.
- Par contre, quand T_{1a} et T_{4a} sont fermés, et par conséquent T_{2a} et T_{3a} sont bloqués, cet état est indéfini et donc interdit dans un fonctionnement normal de l'onduleur Fig.II.12.d.



Les séquences a, b et c vont s'enchaîner durant chaque période de la façon suivante : a-b-c-b.

Cette analyse montre que, la structure de l'onduleur à trois niveaux limite à $\frac{V_{dc}}{2}$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète V_{dc} . C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monter en tension et en puissance, dans le cas des applications de forte puissance [Sed 09].

II.6.2.4. Commandabilité d'un bras d'un onduleur à trois niveaux

Sur les $2^4 = 16$ séquences possibles, seules trois séquences sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent, soient, des courts-circuits des sources de tension continue :

- Court-circuit de $\frac{V_{dc}}{2}$ et de $-\frac{V_{dc}}{2}$ avec les séquences [1111] et [1001],
- Court-circuit de $\frac{V_{dc}}{2}$ avec les séquences [1110], [1000] et [1010],
- Court-circuit de $-\frac{V_{dc}}{2}$ avec les séquences [0111], [0001] et [0101].

Soient, elles provoquent la déconnexion de la charge pour la séquence [0000]. Soient encore, elles ne permettent pas d'assurer la connexion de la charge au point neutre pour les séquences [0100] et [0010].

Afin d'avoir un fonctionnement totalement commandable qui permet à l'onduleur de délivrer les trois tensions désirées, on doit définir la commande complémentaire du convertisseur. Trois commandes complémentaires peuvent être définies pour un bras.

$$\left\{ \begin{matrix} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{matrix} \right\} \quad \left\{ \begin{matrix} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{matrix} \right\} \quad \left\{ \begin{matrix} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{matrix} \right\} \quad (II. 60)$$

Avec B_{ki} : Commande de base d'un transistor T_{ki} , (K =a, b, c)

Il a été démontré que la deuxième commande est celle qui donne les trois niveaux de tension possibles $\frac{V_{dc}}{2}, 0, -\frac{V_{dc}}{2}$ [Sed 09].

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	V_k
1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
1	0	1	0	Indéfinie
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$

II.6.2.5. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux [Abd 11]

On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur elle vaut (1) si l'interrupteur est fermé et (0) si l'interrupteur est ouvert les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par la relation suivante :



$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_{k1} = 1 - F_{k3} \\ F_{k2} = 1 - F_{k4} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_{k3} = 1 - F_{k1} \\ F_{k4} = 1 - F_{k2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 61})$$

Avec k=1, 2 ou 3 représente le numéro du bras.

On définit la fonction de connexion F_{km}^b du demi-bras comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{k1}^b = F_{k1} * F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} * F_{k4} \end{array} \right. \quad (\text{II. 62})$$

On désigne par m=1 le demi-bras du haut et m=0 le demi-bras du bas.

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'exprime comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AM} = F_{11}^b * V_{c1} - F_{10}^b * V_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^b * V_{c1} - F_{20}^b * V_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^b * V_{c1} - F_{30}^b * V_{c2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 63})$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} * V_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} * V_{c2} \right\} \quad (\text{II. 64})$$

Dans notre cas, on considère $C_1 = C_2 = C \Rightarrow V_{c1} = V_{c2} = \frac{V_{dc}}{2}$.

Equation (II.63) devienne :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{AM} = (F_{11}^b - F_{10}^b) * \frac{V_{dc}}{2} \\ V_{BM} = (F_{21}^b - F_{20}^b) * \frac{V_{dc}}{2} \\ V_{CM} = (F_{31}^b - F_{30}^b) * \frac{V_{dc}}{2} \end{array} \right. \quad (\text{II. 65})$$

En remplace les équations (II.61) et (II.62) dans (II.65) :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_{11} + F_{12} - 1 \\ F_{21} + F_{22} - 1 \\ F_{31} + F_{32} - 1 \end{bmatrix} * \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II. 66})$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} * \frac{V_{dc}}{2} \text{ tel que } \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} + F_{12} - 1 \\ F_{21} + F_{22} - 1 \\ F_{31} + F_{32} - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 67})$$

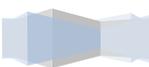
Avec $F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}, F_{31}, F_{32}$ fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.



II.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne. En commençant par la modélisation de la partie mécanique ou on a présenté le schéma global du modèle de la turbine, dans la deuxième partie nous avons modélisé la machine dans le repère du Park, ainsi on a établi un modèle de fonctionnement des deux onduleurs (à deux niveaux et a trois niveaux)

Les modèles exposés dans ce chapitre seront dédiés à la commande que nous allons essayer d'exposer dans le chapitre suivant, on parle ici d'une commande directe du couple appelée (DTC).



Chapitre III

Contrôle de la chaîne éolienne

III.1. Introduction

La structure de contrôle direct de couple DTC (direct torque control) des machines asynchrones sont initiées dans la deuxième moitié des années 80 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielles des méthodes classiques [Tam 07].

La commande DTC est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone. Son objectif est de réguler le flux rotorique et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, de flux ou de couple. Les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants de la machine. Le flux et le couple sont entièrement estimés à partir de ces mesures.

La DTC consiste à commander directement la fermeture et l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur selon l'évolution des valeurs du flux rotorique et du couple électromagnétique de la machine.

III.2. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple

- La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions rotoriques de la machine.
- L'obtention des flux et des courants rotoriques proches des formes sinusoïdales.
- La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.
- L'existence des oscillations de couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis [Bou 07], [Zek 13].

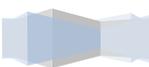
III.3. Les avantages et les inconvénients de la DTC

III.3.1. Les avantages

- Une très bonne dynamique du couple qui peut se caractériser par des faibles temps de réponse ;
- Absence de bloc de calcul de modulation de tension MLI ;
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle ;
- Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position statorique, car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur flux rotorique est nécessaire ;
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques ;
- Possibilité d'appliquer les algorithmes du système avec des cartes d'acquisition.

III.3.2. Les inconvénients

- Problèmes de commande à basse vitesse.
- Nécessité de disposer d'estimateurs du flux rotorique et du couple.
- Existence d'oscillations de couple.



- Fréquences de commutation non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis). Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruits acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

III.4. Principe de la commande DTC

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur.

Les variables contrôlées sont le flux rotorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée.

La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation [Bou 07][Zek 13].

III.4.1. Modélisation vectorielle de la MADA et de l'onduleur de tension à deux niveaux

Dans les conditions précédentes, les tensions rotorique de la machine asynchrone à double alimentation sont données par :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\phi_r}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$V_r = V_{r\alpha} + jV_{r\beta} \quad (\text{III.2})$$

$V_{r\alpha}$ et $V_{r\beta}$: Ce sont des projections de vecteur tension V_r dans le repère orthogonal (α, β) .

Le vecteur V_r est produit par l'onduleur de tension qu'on suppose parfait, et exprimé ainsi en fonction des trois grandeurs logiques (S_a, S_b, S_c) déjà démontrées précédemment.

Par l'application de la forme vectorielle, on aura :

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}} (V_{ar} + aV_{br} + a^2V_{cr}) \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

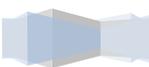
A l'aide des variables booléennes d'états des interrupteurs, le vecteur tension aura la forme suivante :

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a + aS_b + a^2S_c] \quad (\text{III.4})$$

En utilisant, la matrice de Concordia sur les tensions rotoriques, on aura les composantes de vecteur tension sur le repère (α, β) comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Les positions spatiales dans le plan (α, β) , des vecteurs tensions générées par l'onduleur deux niveaux sont présentées sur la Fig.III.1 :



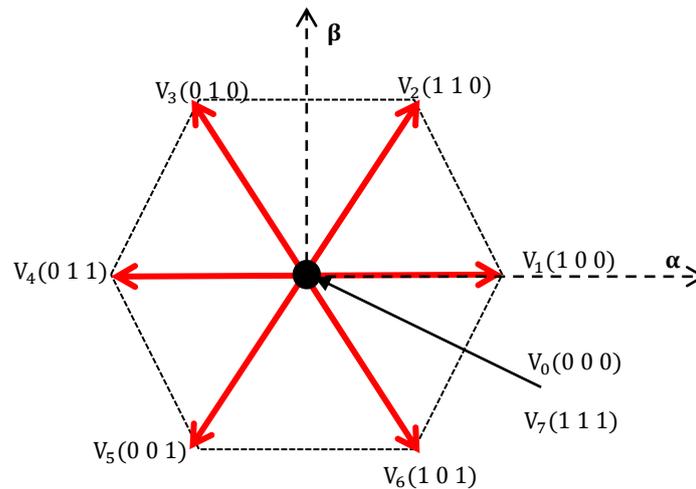


Figure III.1 : Représentation des vecteurs tensions générés par l'onduleur

III.4.2. Contrôle de flux et de couple électromagnétique

III.4.2.1. Contrôle vectoriel de flux rotorique

L'expression du flux rotorique est obtenue d'après la loi de Faraday par la relation suivante :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \Rightarrow \varphi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt + \varphi_r(0) \tag{III.6}$$

Sur un intervalle $[0, T_e]$ où T_e correspond à une période d'échantillonnage les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixes donc on peut écrire :

$$\varphi_r(t) = \varphi_r(0) + V_r T_e - \int_0^t (R_r i_r) dt \tag{III.7}$$

Où $\varphi_r(0)$ est le vecteur flux à l'instant $t=0$ en considérant la chute de tension $(R_r i_r)$ négligeable devant la tension V_r on aura:

$$\varphi_r(t) = \varphi_r(0) + V_r T_e \Rightarrow \Delta\varphi_r = V_r T_e \tag{III.8}$$

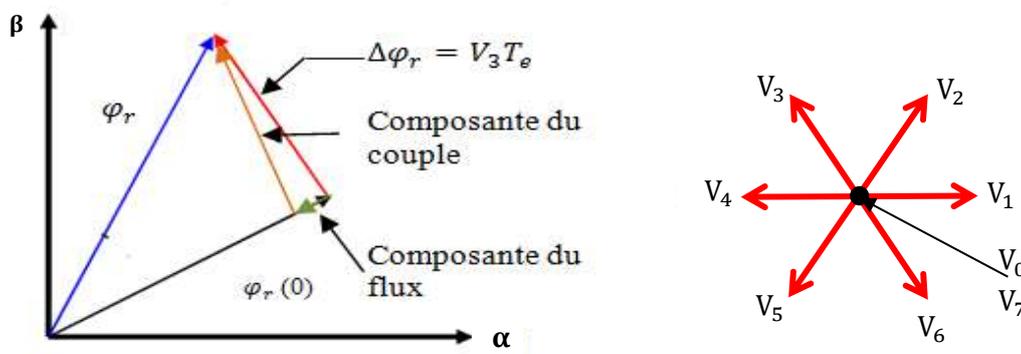
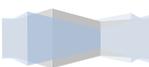


Figure III.2 : Exemple de l'évolution de l'extrémité de φ_r pour $(R_r i_r)$ négligeable.



III.4.2.2. Contrôle vectoriel de couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel des vecteurs flux statoriques et rotoriques d'après cette équation [Mok 04] :

$$T_{em} = k(\overline{\varphi_s}, \overline{\varphi_r}) = k|\overline{\varphi_s}||\overline{\varphi_r}| \sin\gamma \tag{III.9}$$

γ : L'angle entre le flux statorique et le flux rotorique.

Le vecteur flux statorique tourne à la vitesse de synchronisme puisque le stator est relié directement au réseau, en plus si on néglige la chute de tension au niveau de la résistance statorique, l'amplitude du flux peut être considérée comme constante. Si on alimente encore le flux rotorique dans sa bande d'hystérésis autour de sa consigne, le couple sera fonction de l'angle du déphasage entre ces deux flux. Donc, si on veut régler le couple, on peut agir sur la position de vecteur flux rotorique on appliquant le vecteur de tension qu'il faut.

III.5. Sélection du vecteur tension

Le choix de vecteur tension rotorique dépend de la variation souhaitée pour le module du flux φ_r , le sens de rotation de φ_r et de l'évolution souhaitée pour le couple. L'espace de l'évolution de φ_r est décomposé en six zones i, avec $i = [1, \dots, 6]$

Lorsque le flux se localise dans une zone $k = [V_{i+1}, V_{i-1}, V_{i+2}, V_{i-2}]$, le contrôle du couple et du flux est assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tension suivants :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors φ_r croît et T_{em} croît.
- Si V_{i-1} est sélectionné alors φ_r croît et T_{em} décroît.
- Si V_{i+2} est sélectionné alors φ_r décroît et T_{em} croît.
- Si V_{i-2} est sélectionné alors φ_r décroît et T_{em} décroît.

Si V_0 ou V_7 sont sélectionnés, alors la rotation du flux φ_r est arrêtée, ce qui conduit à une décroissance du couple alors que le module de flux φ_r reste inchangé

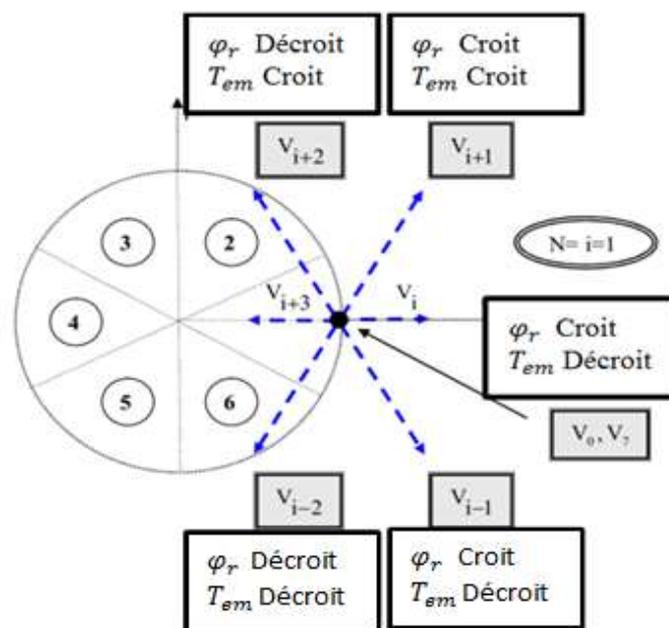


Figure III.3 : Sélection du vecteur de tension.

III.6. Estimation du flux rotorique

Le flux rotorique est estimé à partir des grandeurs rotoriques courant et tension de la machine. A partir de l'équation :

$$\varphi_r = \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt \quad (\text{III.10})$$

Cette équation nous permettra d'établir les composants d et q du vecteur flux rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha}) dt \\ \varphi_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r i_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

$V_{r\alpha}, V_{r\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ Sont tirés à partir de la modélisation de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs et la tension d'entrée de l'onduleur V_{dc} .

$$V_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a - \frac{1}{2}(S_b - S_c)] \quad (\text{III.12})$$

$$V_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \quad (\text{III.13})$$

De même pour les courants $I_{r\alpha}$ et $I_{r\beta}$ sont également obtenus à partir de la mesure des courants I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} et de l'application de la transformation de concordia :

$$I_r = I_{ra} + jI_{r\beta} \quad (\text{III.14})$$

L'expression générale du couple nous permet d'estimer le couple uniquement à partir des grandeurs rotoriques flux et courant estimées.

$$T_{em} = p(\varphi_{r\alpha} i_{r\beta} - \varphi_{r\beta} i_{r\alpha}) \quad (\text{III.15})$$

$$I_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{ra} \quad (\text{III.16})$$

$$I_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{rb} - I_{rc}) \quad (\text{III.17})$$

Alors que le module du flux rotorique s'écrit

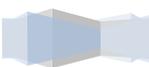
$$\varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \quad (\text{III.18})$$

La zone où se situe le vecteur φ_r est déterminée à partir des composantes $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$. L'angle entre le référentiel (α, β) et le vecteur φ_r est égale à :

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \right) \quad (\text{III.19})$$

III.7. Elaboration du correcteur du couple

Un comparateur à hystérésis à trois niveaux (-1, 0, 1), permet de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, en générant soit un couple positif, ou un couple négatif, il



confère à la commande la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. Ce comparateur est modélisé par l’algorithme (III.20).

On peut écrire alors :

$$\left\{ \begin{array}{lll} \text{si } \Delta T > +\varepsilon_{cpl} & & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta T \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\ \text{si } 0 \leq \Delta T \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\ \text{si } \Delta T < -\varepsilon_{cpl} & & \text{alors } C_{cpl} = -1 \\ \text{si } -\varepsilon_{cpl} \leq \Delta T \leq 0 & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\ \text{si } -\varepsilon_{cpl} \leq \Delta T \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = -1 \end{array} \right. \quad \text{(III.20)}$$

Tels que C_{cpl} représente l’état de sortie de comparateur et ΔT la limite de la bande d’hystérésis, Fig.III.4 [Bag 99].

Le correcteur du couple nous permet de maintenir le couple dans les limites souhaitables, $|T_{em.ref} - T_{em}| < \Delta T$ tel que $T_{em.ref}$: la référence du couple, ΔT la moitié de la largeur de la bande hystérésis du correcteur [Can 00]

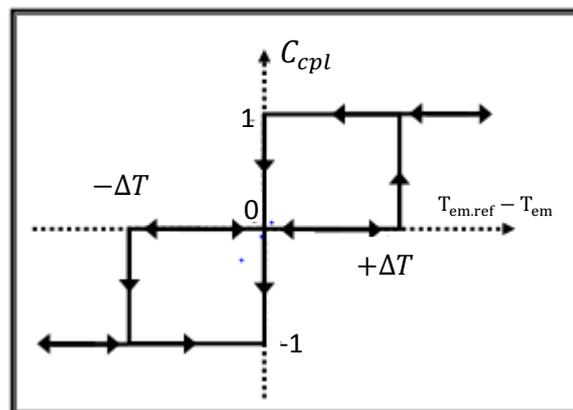


Figure III.4 : Correcteur hystérésis du couple.

La sortie C_{cpl} indique directement si l’amplitude du couple doit augmenter en valeur absolue ($C_{cpl}=1$) pour une consigne positive et ($C_{cpl}= -1$) pour une consigne négative et ($C_{cpl}=0$) pour maintenir le couple constant [Azi 05].

III.8. Elaboration du correcteur du flux

Le correcteur de flux qui a pour but de maintenir l’extrémité du vecteur φ_r dans une couronne circulaire. L’erreur doit être maintenue à l’intérieur de la bande d’hystérise $\Delta\varphi_r$ du correcteur, $|\varphi_{r.ref} - \varphi_r| < \Delta\varphi_r$, tel que $\varphi_{r.ref}$ la référence de flux et $\Delta\varphi_r$ la largeur de l’hystérésis du correcteur

La sortie du correcteur indique directement si l’amplitude du flux doit être augmentée ou diminuée, pour cela elle est représentée par une variable booléenne C_{flx} [Ham 07] :

$C_{flx}=1$ l’amplitude du flux doit être augmenté (l’erreur du flux est positive)



$C_{flx}=0$ l'amplitude du flux doit être diminuée (l'erreur du flux est négative)

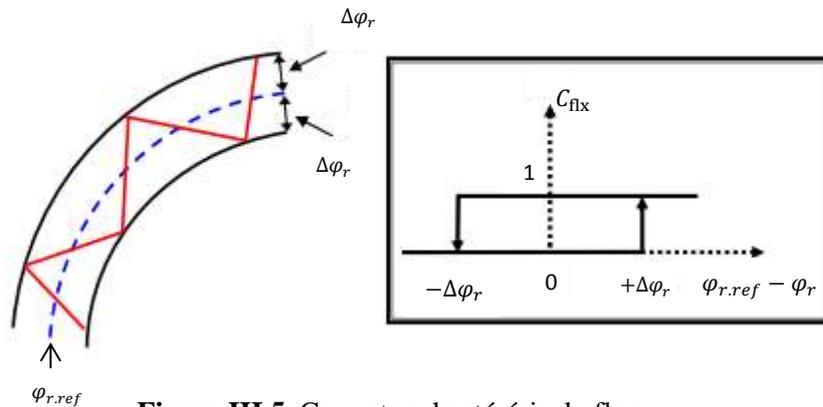


Figure III.5. Correcteur hystérésis du flux.

Ce comparateur est modélisé par l’algorithme (III.21) :

$$\begin{cases}
 \text{si } \Delta\varphi_r > +\varepsilon_{flx} & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_r \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} > 0 & \text{alors } C_{flx} = 0 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_r \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} < 0 & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } \Delta\varphi_r < -\varepsilon_{flx} & \text{alors } C_{flx} = 1
 \end{cases} \quad (III.21)$$

III.9. Elaboration de la table de commutation

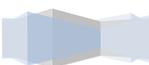
Comme on l’a vu il est possible d’utiliser deux vecteurs tension pour chaque sens de rotation, l’un fait croître et l’autre fait décroître le vecteur flux rotorique, pour cela le couple peut être contrôlé, en utilisant un tableau nommé « table logique de commutation optimal » qui permet de définir le vecteur qu’il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteurs et la position du vecteur flux rotorique, le tableau III.1 présente cette table [Pen 00].

A noter que la fréquence de commutation dépend de la bande d’hystérésis du flux utilisée, si cette bande est petite alors la fréquence est élevée, si non la fréquence est moins élevée.

N		1	2	3	4	5	6
$C_{flx}=1$	$C_{cpl}=1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$C_{cpl}=0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	$C_{cpl}=-1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$C_{flx}=0$	$C_{cpl}=1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$C_{cpl}=0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	$C_{cpl}=-1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Tableau III.1 : La table de commutation de la commande directe du couple.

Avec : $V_0=[0\ 0\ 0]$; $V_1=[1\ 0\ 0]$; $V_2=[1\ 1\ 0]$; $V_3=[0\ 1\ 0]$; $V_4=[0\ 1\ 1]$; $V_5=[0\ 0\ 1]$; $V_6=[1\ 0\ 1]$; $V_7=[1\ 1\ 1]$;



Les vecteurs V_0 et V_7 sont choisis alternativement de manière à minimiser le nombre de commutations dans les bras de l'onduleur.

III.10. Commande directe du couple avec onduleur à trois niveaux

III.10.1. Introduction

L'onduleur multi-niveaux est basé sur la production de petits pas de tension de sortie, résultant en une meilleure qualité de l'alimentation. Malgré le besoin de plusieurs transistors de puissance, elles fonctionnent à des niveaux de tension bas et également à basse fréquence de commutation de sorte que les pertes de commutation sont réduites.

L'objectif de cette partie est d'appliquer la commande directe du couple (DTC) à une GADA en utilisant un onduleur trois niveaux.

III.10.2. Onduleur à trois niveaux type NPC

Un onduleur multi-niveaux est un convertisseur d'électronique de puissance qui peut fournir plus de deux niveaux de la ligne de tension à la sortie de chaque branche de l'onduleur.

Différentes structures de circuits ont été mis en œuvre dans les onduleurs multi-niveaux. La structure la plus utilisée des onduleurs multi-niveaux est le point neutre "clampé" (NPC). Le schéma de l'onduleur à trois niveaux NPC est présenté Fig.II.10

La combinaison des 4 interrupteurs d'un même bras (S_i, S'_i, S_j, S'_j), on peut imposer à la phase trois niveaux de tension différents: $(0,0,1,1) \rightarrow -E/2$, $(0,1,1,0) \rightarrow 0$, $(1,1,0,0) \rightarrow E/2$ les combinaisons $(1,1,1,0)$ et $(0,1,1,1)$ réalisent un court-circuit de l'une des deux demies sources de tension continue pour cela il sont interdites.

Les vecteurs de tension de sortie de l'onduleur à trois niveaux. : L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à trois niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la Fig.III.6 [Tou 08].

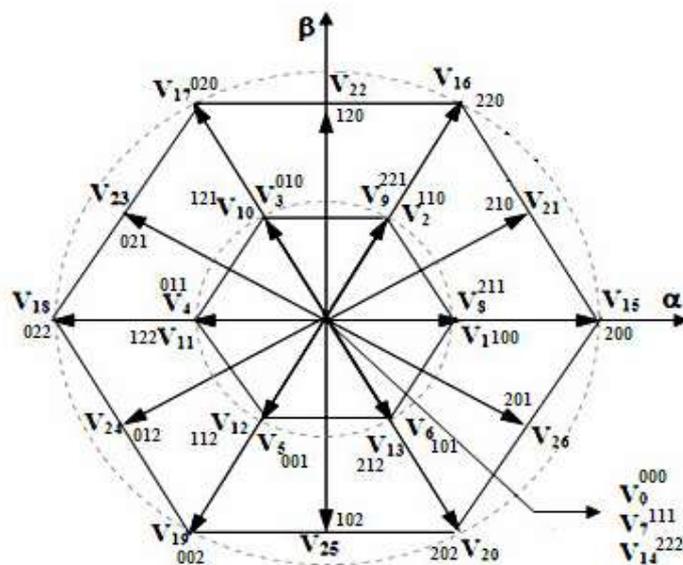
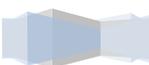


Figure III.6 : Vecteurs tension que peut fournir l'onduleur à trois niveaux de tension [Tou 08].



Par exemple le vecteur V_{21} (210) : le 2 correspond à la fermeture du T_{a2} et T_{a3} du bras 1 de l'onduleur, le 1 correspond à la fermeture du T_{b1} et T_{b2} du bras 2 de l'onduleur, le 0 correspond à la fermeture T_{c3} et T_{c4} du bras 3 de l'onduleur.

Comme on le voit dans la Fig.III.6, il existe 4 différents types de vecteurs tensions:

Zéro vecteurs: V_0, V_7, V_{14}

Grands vecteurs: $V_{15}, V_{16}, V_{17}, V_{18}, V_{19}, V_{20}$

Vecteurs moyens: $V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{25}, V_{26}$.

Petits vecteurs: $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}$

Bien que dans un onduleur à trois niveaux, il y a 27 états possibles, certains d'entre eux appliquent le même vecteur de tension. Il existe deux configurations possibles pour chaque petit vecteur et trois pour les vecteurs nuls. Par conséquent, les 19 vecteurs différents sont disponibles dans un onduleur à trois niveaux [Kad 11].

III.10.3. La DTC de la MADA alimentée par un onduleur à trois niveaux

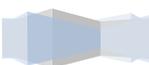
Afin de réaliser le contrôle direct du flux rotorique et du couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par un onduleur à trois niveaux de tension de structure NPC, nous devons élaborer la table de commutation mettant en œuvre au mieux les possibilités de l'onduleur.

En inspirant des parties précédemment développées dans ce chapitre, nous considérerons certains mécanismes comme acquis. Certains points, redondant avec l'étude du contrôle appliqué à la machine asynchrone à double alimentation alimentée par un onduleur à deux niveaux de tension, ne seront pas repris car les conclusions sont identiques[Kad 11][Tou 08].

III.10.3.1. Elaboration du correcteur du couple

Ce comparateur est modélisé par l'algorithme suivant [Kad 11][Tou 08]:

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 \text{si } \Delta T > \varepsilon_{T2} & & \text{alors } C_{cpl} = +2 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T1} \leq \Delta T \leq \varepsilon_{T2} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = +1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T1} \leq \Delta T \leq \varepsilon_{T2} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = +2 \\
 \text{si } 0 < \Delta T \leq \varepsilon_{T1} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 \text{si } 0 < \Delta T \leq \varepsilon_{T1} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = +1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T1} \leq \Delta T \leq 0 & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = -1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T1} \leq \Delta T \leq 0 & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T2} \leq \Delta T \leq -\varepsilon_{T1} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = -2 \\
 \text{si } -\varepsilon_{T2} \leq \Delta T \leq -\varepsilon_{T1} & \text{et } \frac{d\Delta T}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = -1 \\
 \text{si } \Delta T < -\varepsilon_{T2} & & \text{alors } C_{cpl} = -2
 \end{array} \right. \quad (III.22)$$



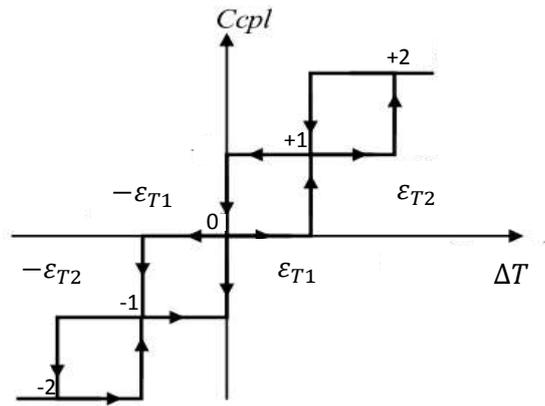


Figure III.7 : Correcteur hystérésis du couple 5 niveaux.

III.10.3.2. Elaboration du correcteur du flux

Ce comparateur est modélisé par l’algorithme III.22 [Kad 11] :

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 \text{si } \Delta\varphi_r > +\varepsilon_{flx} & & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_r \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} > 0 & \text{alors } C_{flx} = 0 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_r \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} < 0 & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{flx} < \Delta\varphi_r < 0 & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} > 0 & \text{alors } C_{flx} = -1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{flx} < \Delta\varphi_r < 0 & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} < 0 & \text{alors } C_{flx} = 0 \\
 \text{si } \Delta\varphi_r < -\varepsilon_{flx} & & \text{alors } C_{flx} = -1
 \end{array} \right. \quad (III.22)$$

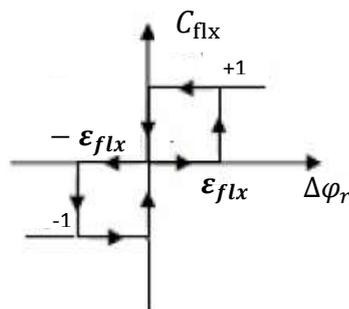
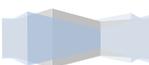


Figure III.8 : Correcteur hystérésis du flux 3 niveaux.

III.10.3.3. Construction de la table de commutation

La construction des tables de commutation Tableau III.2, se base effectivement sur le choix du vecteur tension rotorique appliqué pour permettre d'augmenter ou de diminuer le module du flux rotorique et la valeur du couple électromagnétique.

Cette table contient 12 secteurs [Kad 11].



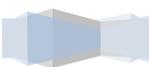
C_{flx}	C_{cpt}	N											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
+1	+2	V_{21}	V_{16}	V_{22}	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}	V_{19}	V_{25}	V_{20}	V_{26}	V_{15}
	+1	V_{21}	V_2	V_{22}	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}	V_5	V_{25}	V_6	V_{26}	V_1
	0	Zéro vecteur											
	-1	V_{26}	V_1	V_{21}	V_2	V_{22}	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}	V_5	V_{25}	V_6
	-2	V_{26}	V_{15}	V_{21}	V_{16}	V_{22}	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}	V_{19}	V_{25}	V_{20}
-1	+2	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}	V_{19}	V_{25}	V_{20}	V_{26}	V_{15}	V_{21}	V_{16}	V_{22}
	+1	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}	V_5	V_{25}	V_6	V_{26}	V_1	V_{21}	V_2	V_{22}
	0	Zéro vecteur											
	-1	V_5	V_{25}	V_6	V_{26}	V_1	V_{21}	V_2	V_{22}	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}
	-2	V_{19}	V_{25}	V_{20}	V_{26}	V_{15}	V_{21}	V_{16}	V_{22}	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}
0	+2	V_{22}	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}	V_{19}	V_{25}	V_{20}	V_{26}	V_{15}	V_{21}	V_{16}
	+1	V_{22}	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}	V_5	V_{25}	V_6	V_{26}	V_1	V_{21}	V_2
	0	Zéro vecteur											
	-1	V_{25}	V_6	V_{26}	V_1	V_{21}	V_2	V_{22}	V_3	V_{23}	V_4	V_{24}	V_5
	-2	V_{25}	V_{20}	V_{26}	V_{15}	V_{21}	V_{16}	V_{22}	V_{17}	V_{23}	V_{18}	V_{24}	V_{19}

Tableau III.2. La table de commutation de la commande directe du couple.

III.11. Structure générale de la commande directe du couple

La structure générale de la commande directe du couple proposée peut se diviser en quatre blocs :

- Bloc de traitement : ce bloc sert à faire les transformations des courants et tensions réels de la machine de triphasé au biphasé.
- Bloc d'estimation : ce bloc permet d'estimer le flux, le couple et la position du vecteur flux du model de la machine.
- Bloc de régulation : ce bloc contient : un bloc de régulation de vitesse et de génération du couple de référence, un bloc qui contient deux correcteurs à hystérésis un pour le flux et l'autre pour le couple.
- Bloc de modulation : ce bloc est composé de table logique de commutation. Il a comme entrées la position sectorielle, les sorties des correcteurs de flux et de couple afin de pointer sur le vecteur tension voulue.



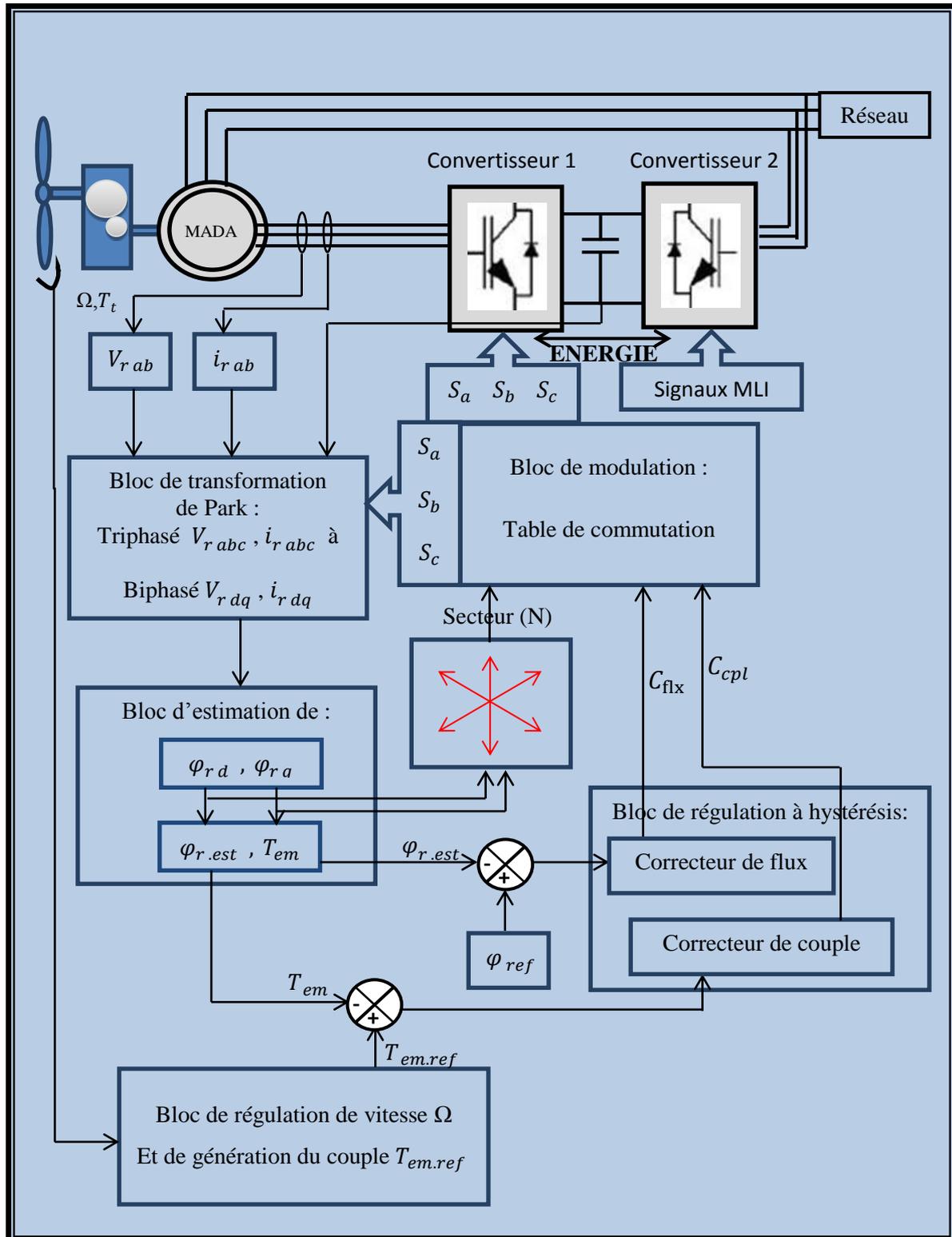


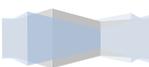
Figure III.9 : Schémas de principe global de la commande DTC appliquée à une MADA.



III.12. Conclusion

Nous avons présenté la structure de la commande directe du couple (DTC) qui est une technique simple pour la commande d'une machine asynchrone à double alimentation, et qui présente une solution aux problèmes de la robustesse par rapport aux contrôles vectoriels.

Le modèle présenté dans ce chapitre fera l'objet d'une simulation numérique avec présentation et interprétation des résultats dans la prochaine partie de notre travail.





Chapitre IV

Simulation de la chaîne éolienne

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une simulation de la technique choisie pour les deux convertisseurs, onduleur à deux niveaux et celui à trois niveaux les résultats obtenus seront commentés.

IV.2. Simulation et interprétation des résultats

La simulation sera effectuée sur une génératrice de 7.5 Kw dont les paramètres sont pris dans la référence [Pen 00] les paramètres de simulation sont les suivants :

- les bandes à hystérésis pour le couple $\begin{cases} \varepsilon_{T1} = 0.01 \\ \varepsilon_{T2} = 0.005 \end{cases}$
- les bandes à hystérésis pour le flux $\varepsilon_{flux} = 0.001$
- les paramètres de régulateur de vitesse $\begin{cases} K_i = 100 \\ K_p = 10 \end{cases}$

La caractéristique $C_p(\lambda)$ de la turbine éolienne est représentée sur la figure suivante :

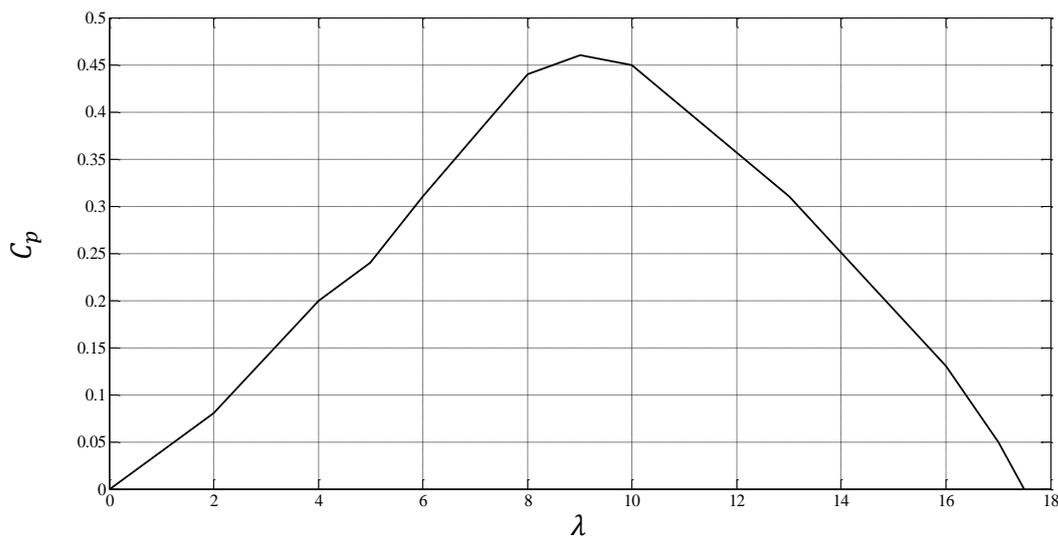
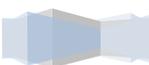


Figure IV.1 : Caractéristique $C_p(\lambda)$.

Le vent est une grandeur aléatoire, par conséquent nous avons modélisé le vent par une fonction variable tout en faisant tourner la machine dans les trois modes de fonctionnement, Fig.IV.2, hypo synchrone, hyper synchrone, synchrone comme l'indique l'allure du glissement Fig.IV.4 ainsi que celle de la vitesse mécanique de la génératrice.



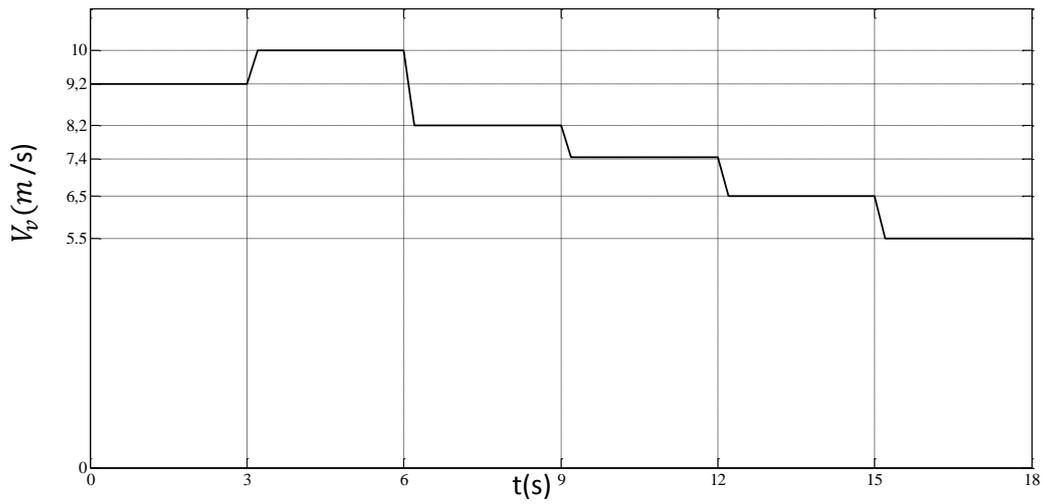


Figure IV.2 : Profil du vent.

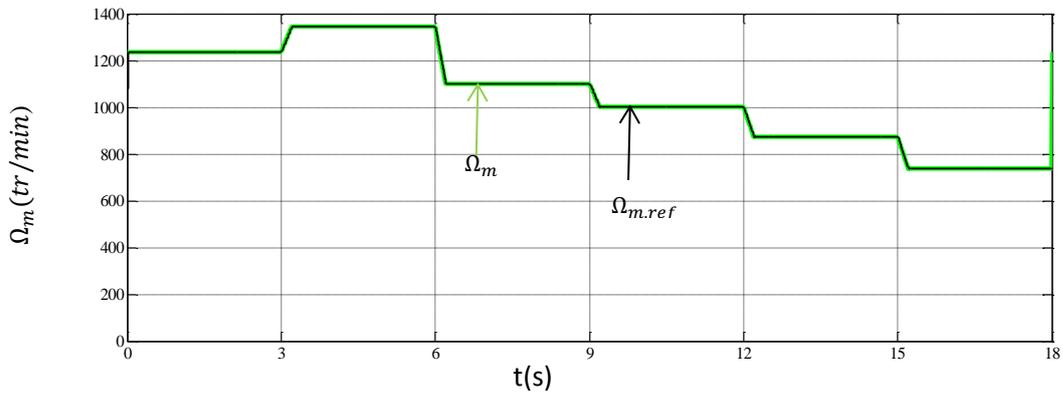


Figure IV.3: Allure de la vitesse mécanique de la génératrice.

La Fig.IV.3 montre que la vitesse de rotation de la génératrice suit parfaitement sa référence toute en variant celle du vent.

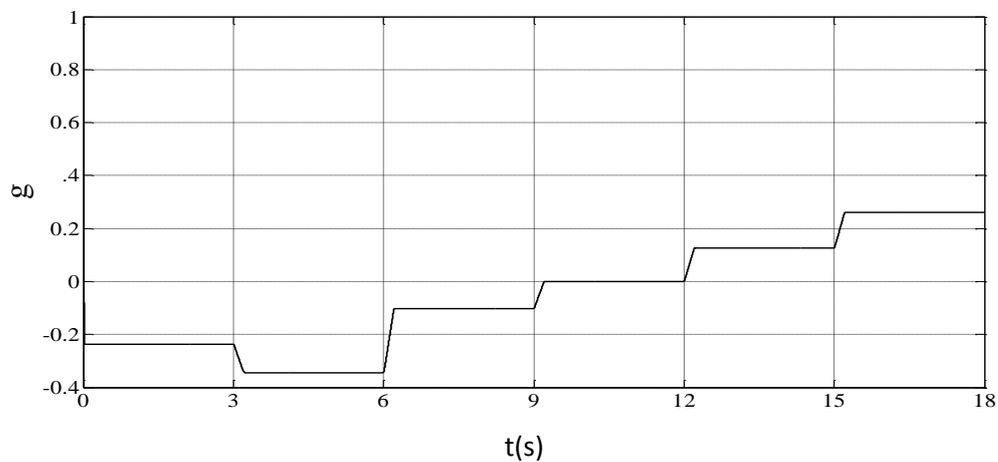


Figure IV.4 : Allure du glissement de la machine.



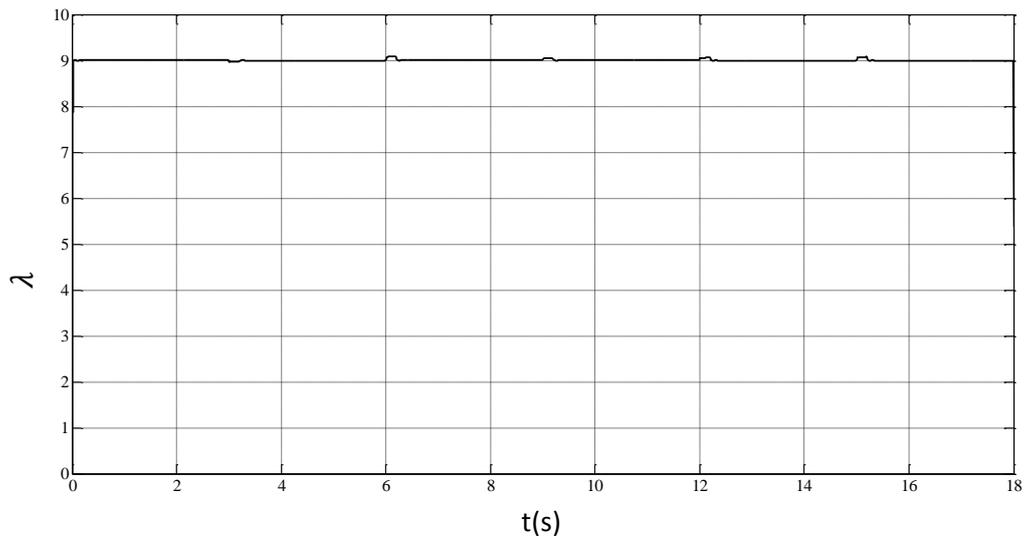


Figure IV.5 Allure de la vitesse spécifique (λ).

Sur la Fig.IV.4: on remarque que l'algorithme MPPT appliqué a permis de maintenir la vitesse réduite λ à sa valeur optimale ($\lambda_{opt} = 9$). Cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximale quel que soit la vitesse du vent, Fig.IV.5, ainsi un rendement aérodynamique optimal et extraire un maximum de puissance.

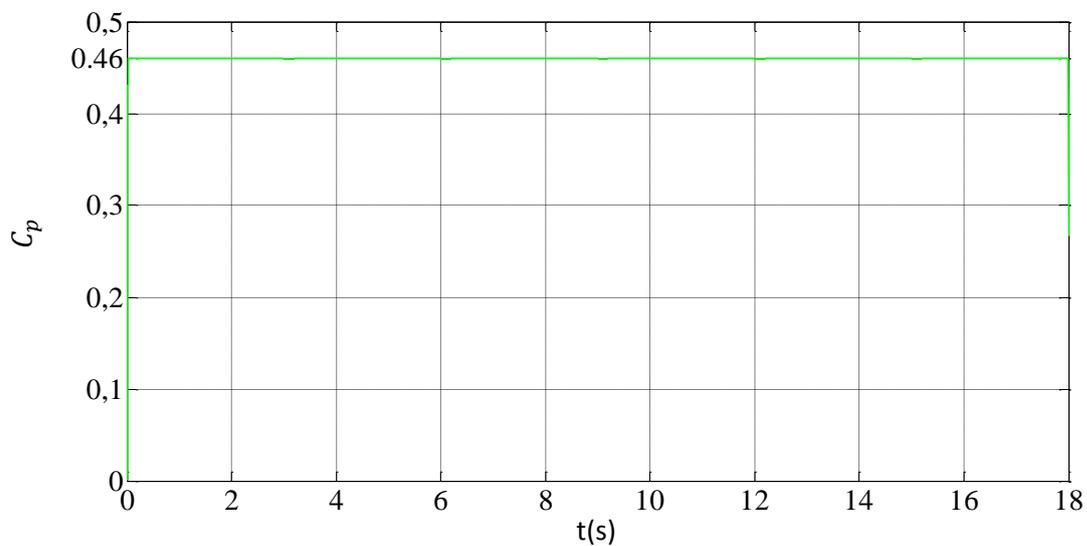
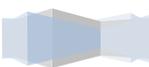


Figure IV.6: Allure de coefficient de puissance.



IV.3. La DTC avec un onduleur à 2 niveaux

Sur les figures ci-dessus, Fig.IV.7,..., Fig.IV.16, les résultats de simulation de la technique de commande DTC pour un onduleur à deux niveaux seront représentés.

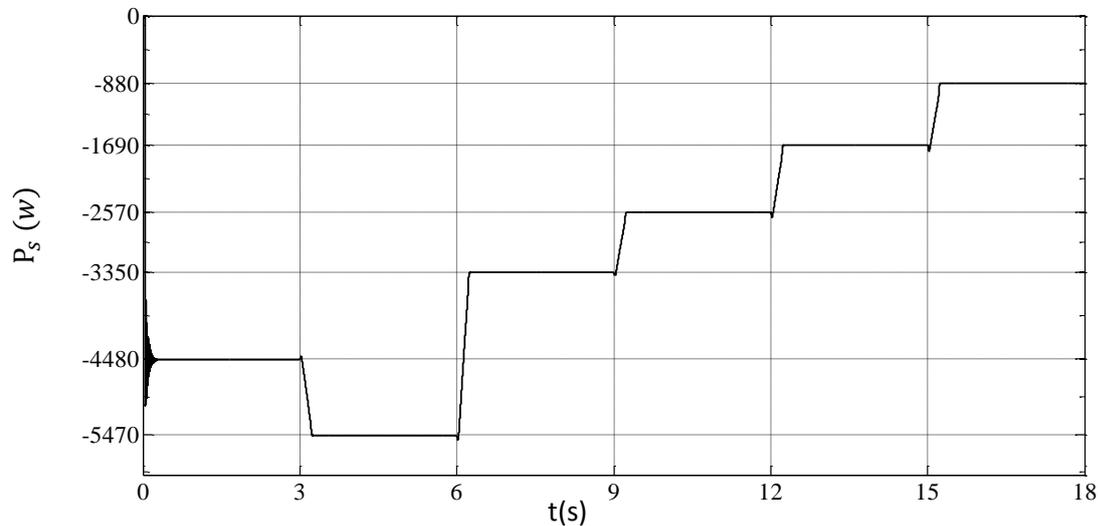


Figure IV.7: Allure de la puissance active statorique.

La puissance statorique est toujours fournie au réseau ($P_s < 0$), Fig.IV.7, quel que soit le régime de fonctionnement de la génératrice.

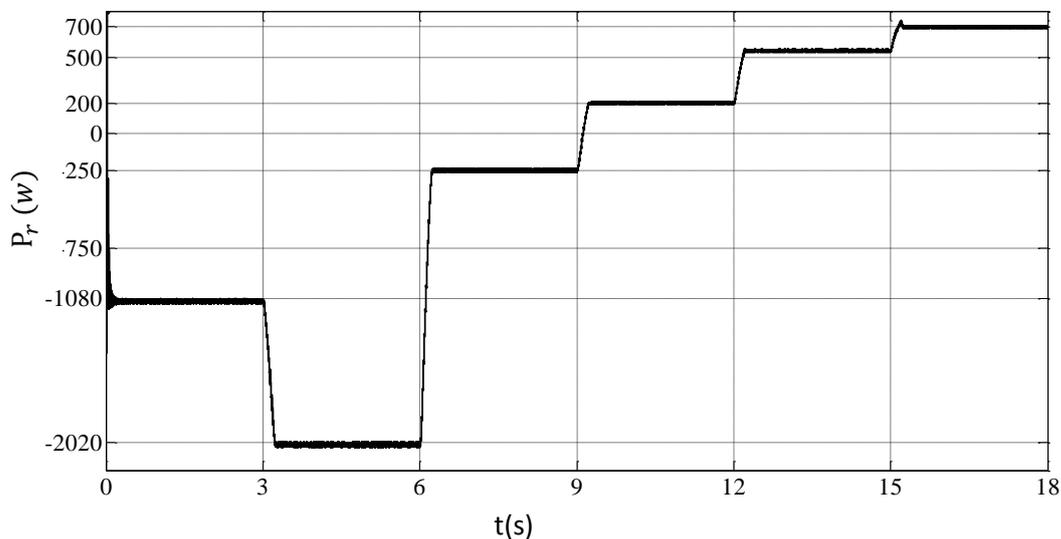
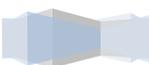


Figure IV.8 : Allure de la puissance active rotorique.

La Fig.IV.8 illustre le transfert bidirectionnel de la puissance active rotorique pour le fonctionnement hypo synchrone la puissance rotorique est absorbée par le rotor et dans le cas de l'hyper synchrone la puissance est fournie au réseau ce qui démontre les notions théoriques décrites par la Fig.I.10



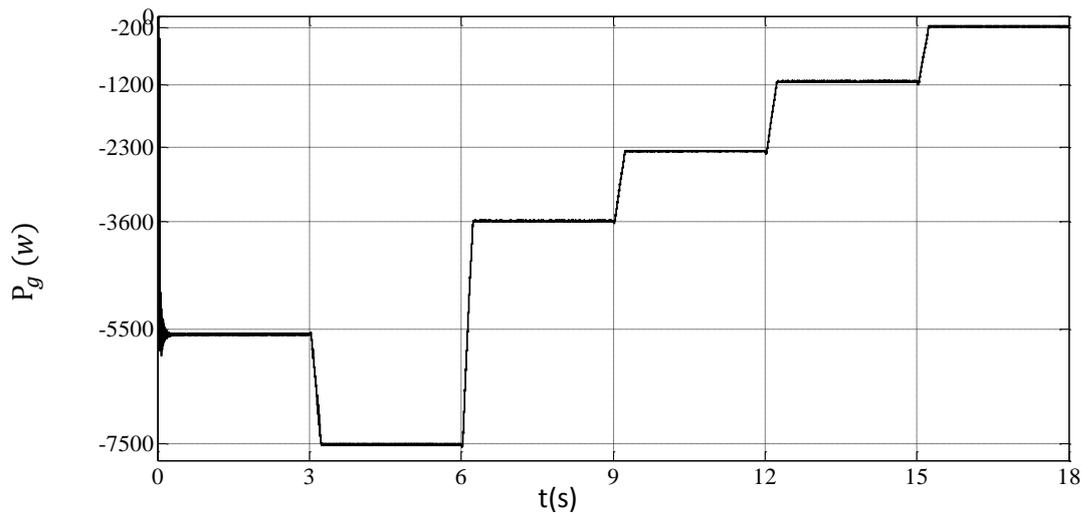


Figure IV.9: Allure de la puissance fournie au réseau.

La puissance active fournie au réseau par la génératrice est maximale et atteinte dans le fonctionnement hyper synchrone car dans ce régime la machine fournie de l'énergie du stator et du rotor vers le réseau c'est l'un des intérêts de la MADA par rapport aux autres machines.

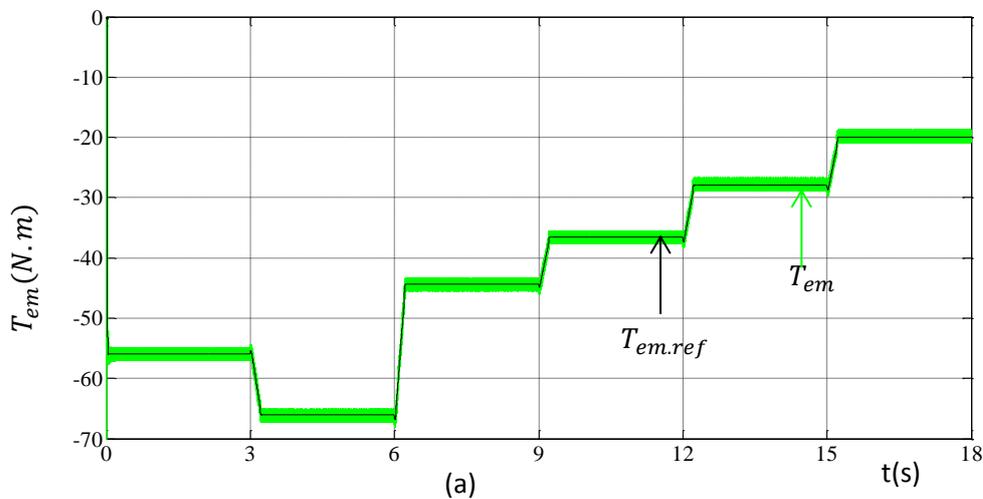
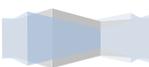


Figure IV.10 : Allure du couple électromagnétique.

Le couple électromagnétique suit parfaitement sa consigne et varie en fonction de la vitesse du vent de manière à maximiser le coefficient de puissance.



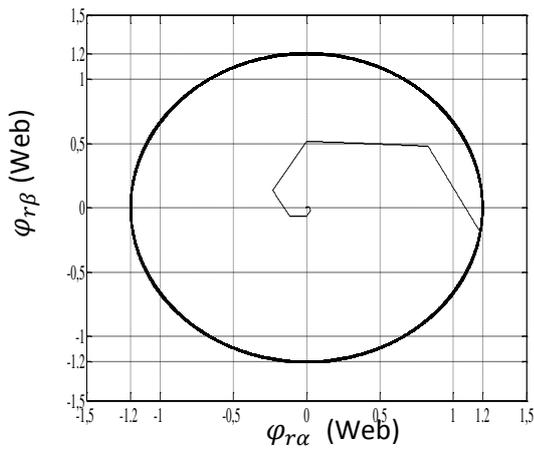
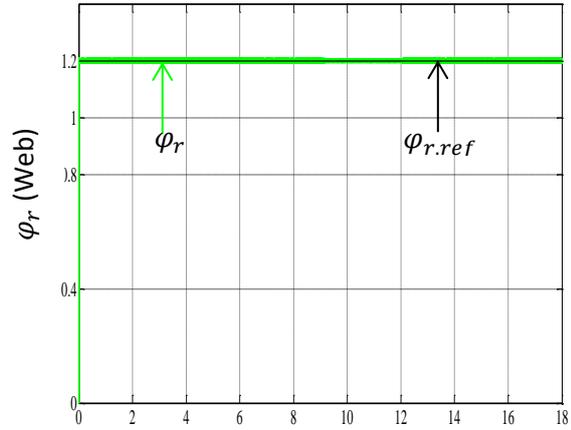
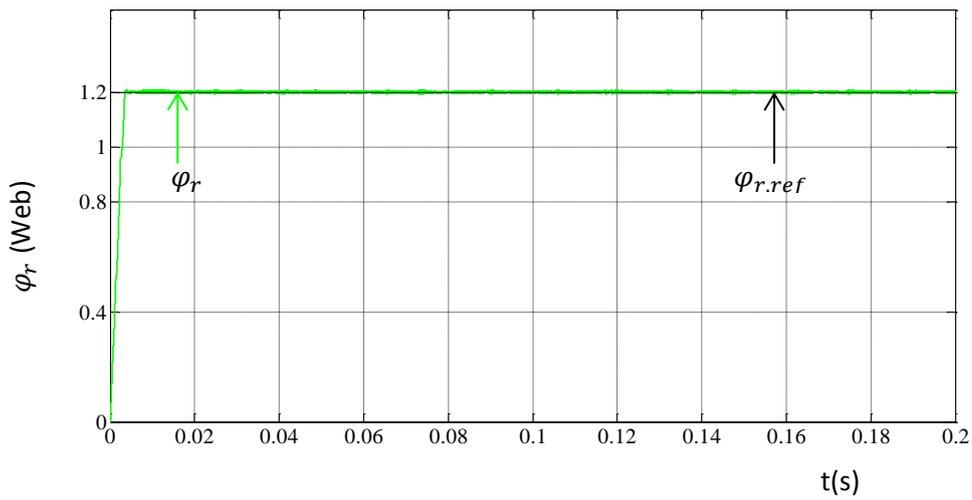


Figure IV.101: Trajectoire du flux rotorique estimé.



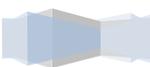
(a) : Evolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence



(b) Zoom sur l'évolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence

Figure IV.11: Evolution et zoom du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.

L'allure du flux est parfaitement circulaire Fig.IV.11, ce qui justifie que son module est toujours constant Fig.IV.12 malgré la variation du couple électromagnétique ce qui vérifie la notion du découplage.



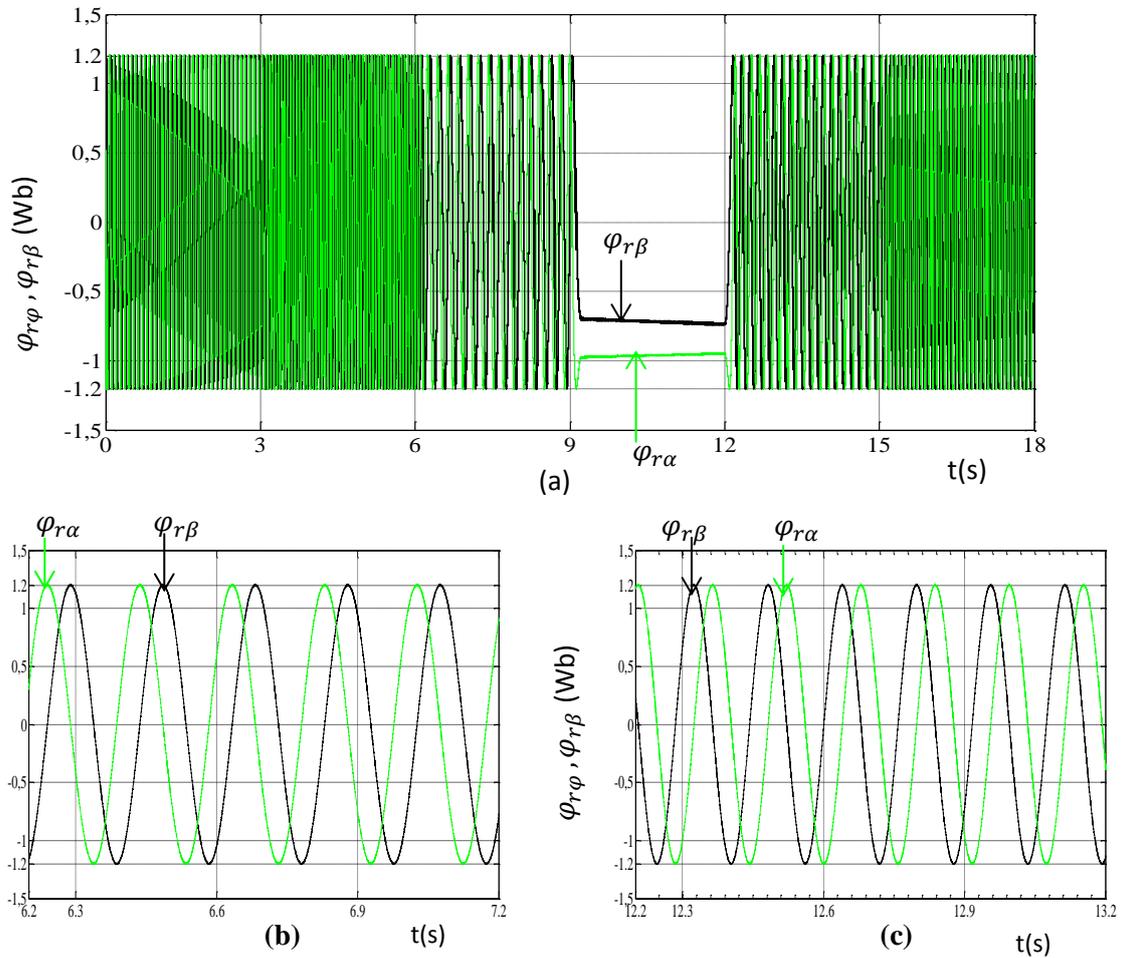
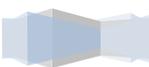


Figure IV.123 : Zoom de $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$

La Fig.IV.13.a illustre l'évolution des deux flux $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$ en fonction du temps. D'après la Fig.IV.4 du glissement, le mode hyper synchrone de la machine se trouve entre 0s et 9s, synchronisme entre 9s et 12s, le mode hypo synchrone entre 12s et 18s. En mode synchronise le flux $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$ sont constants, le zoom sur la Fig.IV.13.a, nous donne la Fig.IV.13.b et Fig.IV.13.c. On remarque qu'en mode hyper synchrone le flux $\varphi_{r\alpha}$ est en avance du flux $\varphi_{r\beta}$ Fig.IV.13.b, et en mode hypo synchrone le flux $\varphi_{r\alpha}$ est en retard de flux $\varphi_{r\beta}$ Fig.IV.13.b.



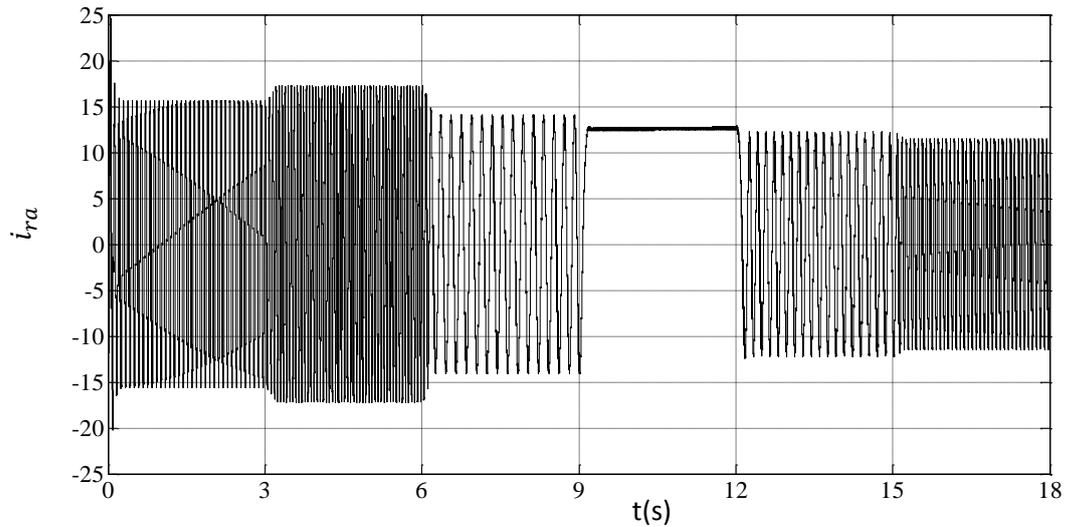


Figure IV.13 : Allure du courant d'une phase rotorique.

La Fig.IV.14 représente l'allure du courant rotorique dont on remarque des variations en amplitude du courant rotorique (liées à la variation du couple électromagnétique) et en fréquence (liées à la variation du glissement), pour le régime synchrone ($g=0$) nous avons un courant continu de valeur constante.

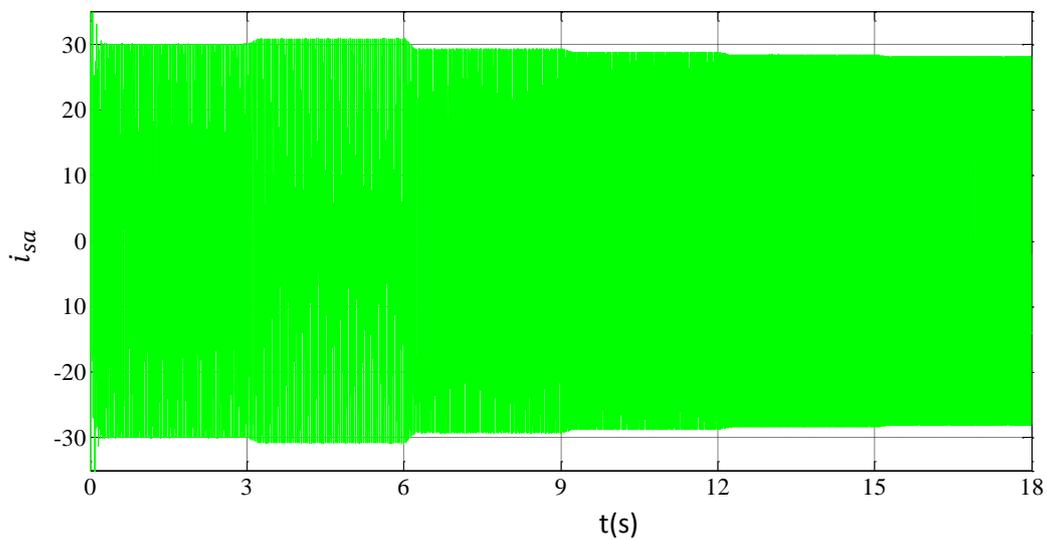


Figure IV.145 : Allure du courant d'une phase statorique.

Le courant d'une phase statorique est représenté dans la Fig.IV.15, son évolution suit celle du couple et de la puissance générée.



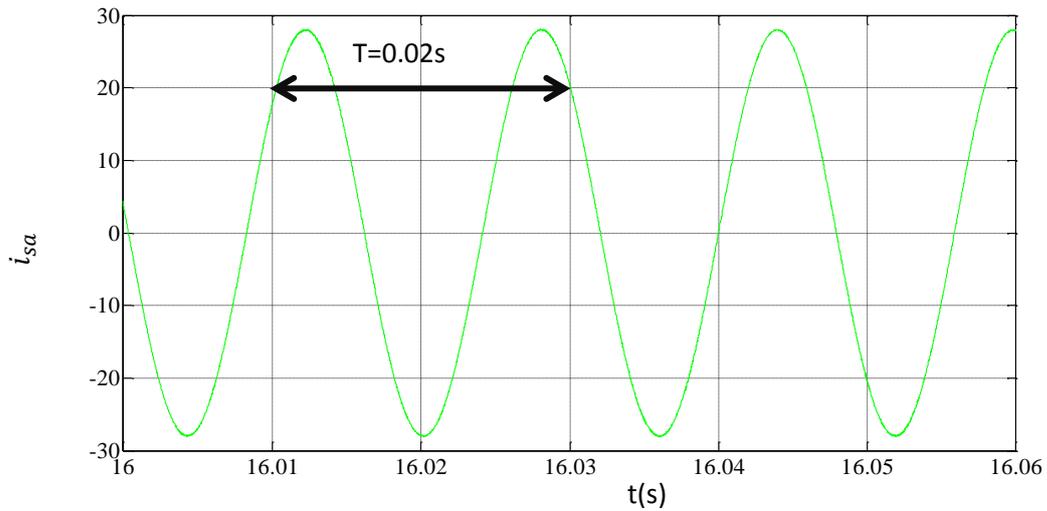


Figure IV.15 : Zoom sur i_{sa} .

IV.4. La DTC avec onduleur à trois niveaux

Sur les figures ci-dessus, Fig.IV.17,..., Fig.IV.26, les résultats de simulation de la technique de commande DTC pour un onduleur à trois niveaux sont présentés.

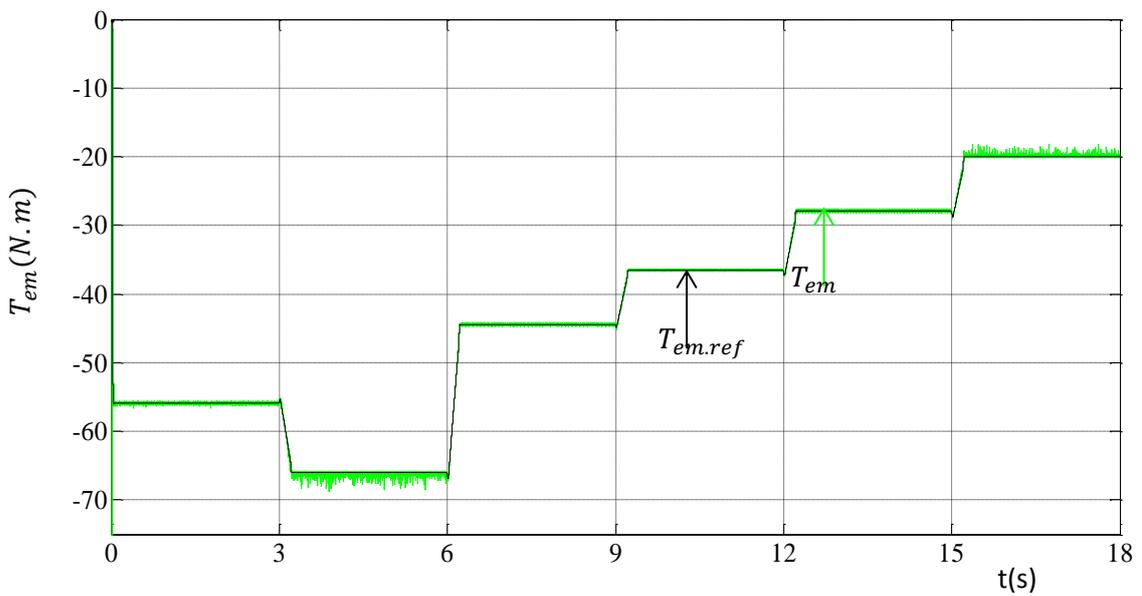
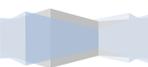


Figure IV.16 : Allure du couple électromagnétique.



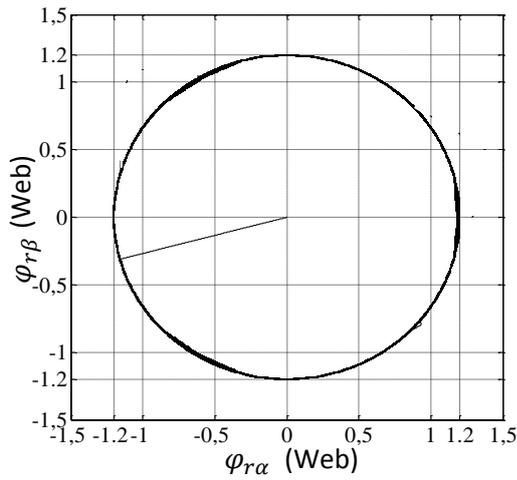
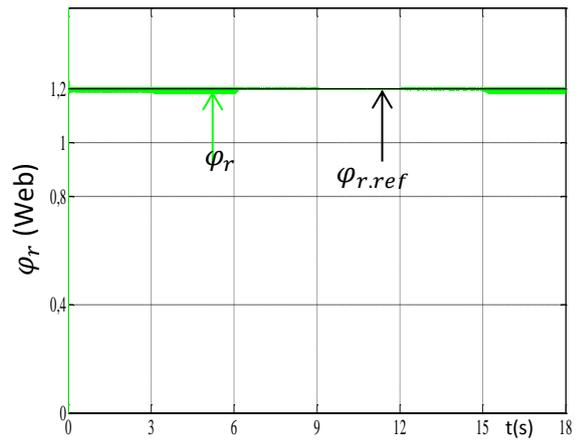
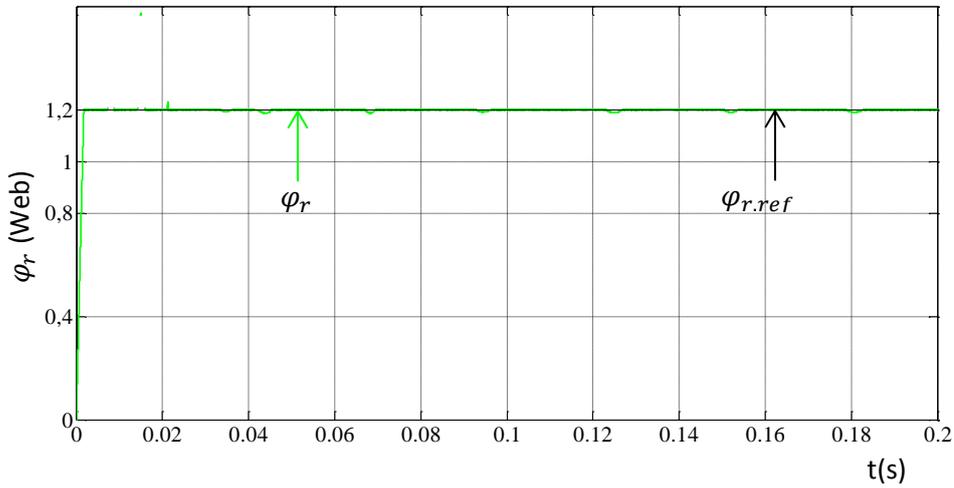


Figure IV.17: Trajectoire du flux rotorique estimé.

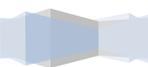


(a) : Evolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.



(b) Zoom sur l'évolution du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.

Figure IV.18: Evolution et zoom du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.



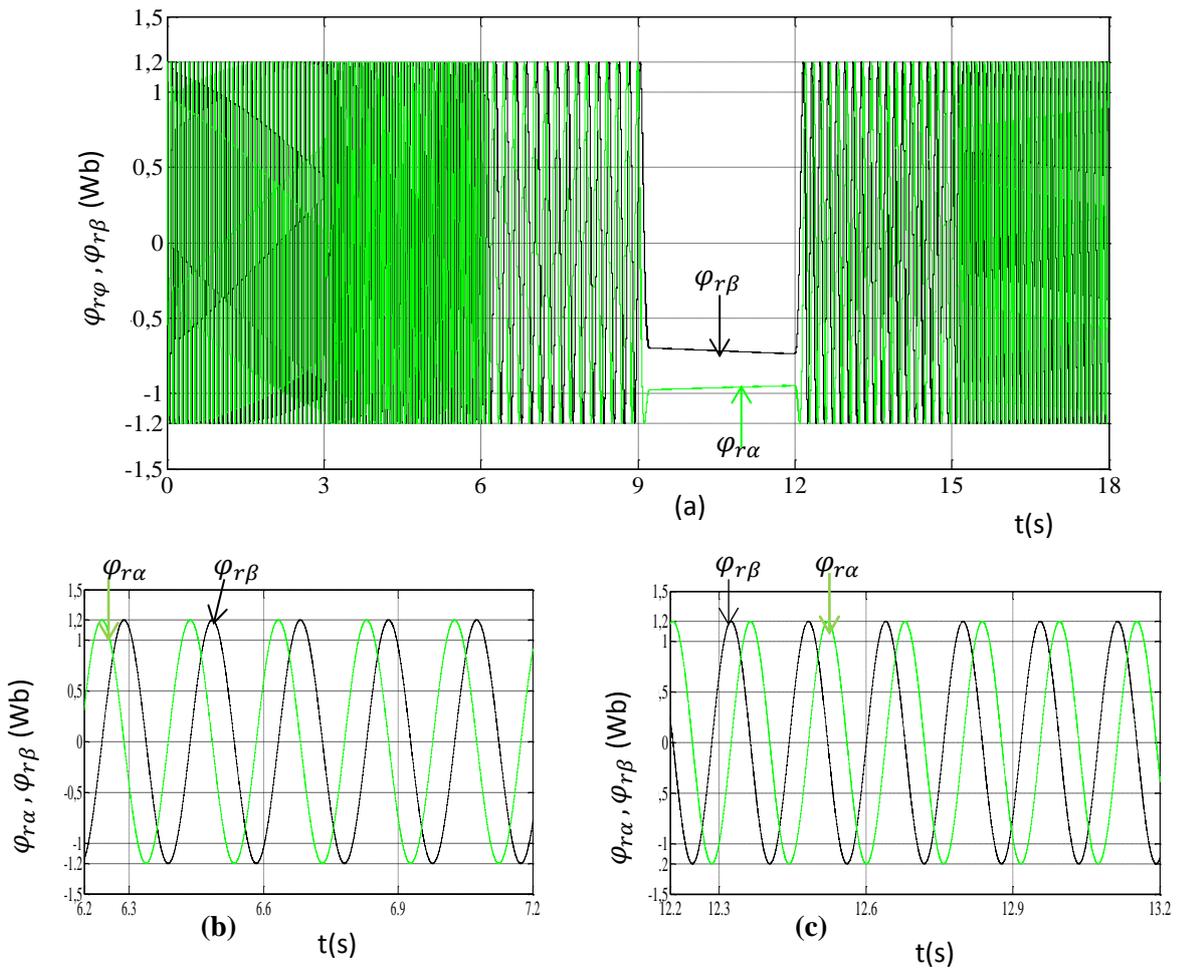


Figure IV.20 : Zoom de $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$

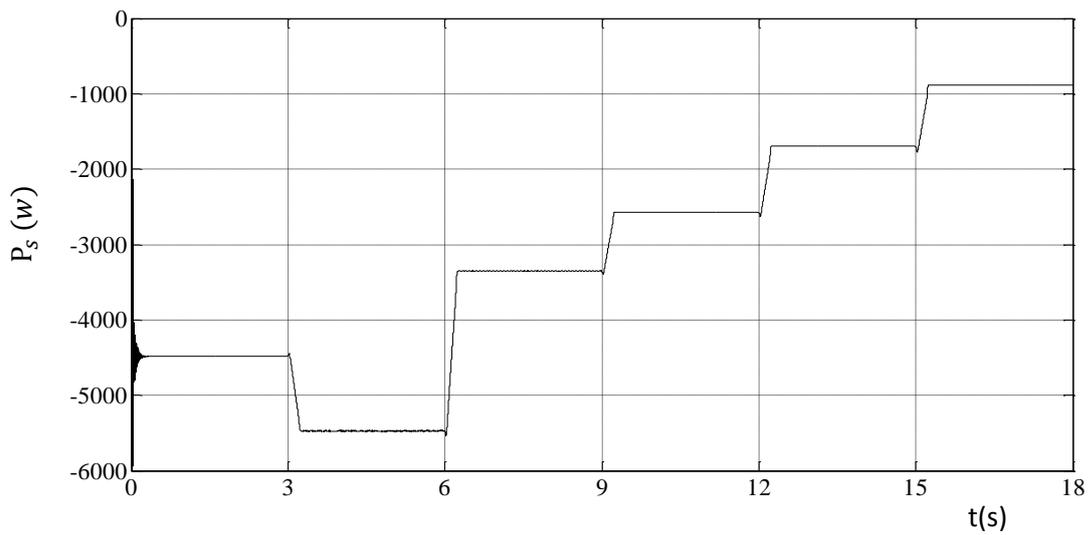


Figure IV.21 : Allure de la puissance active statorique.



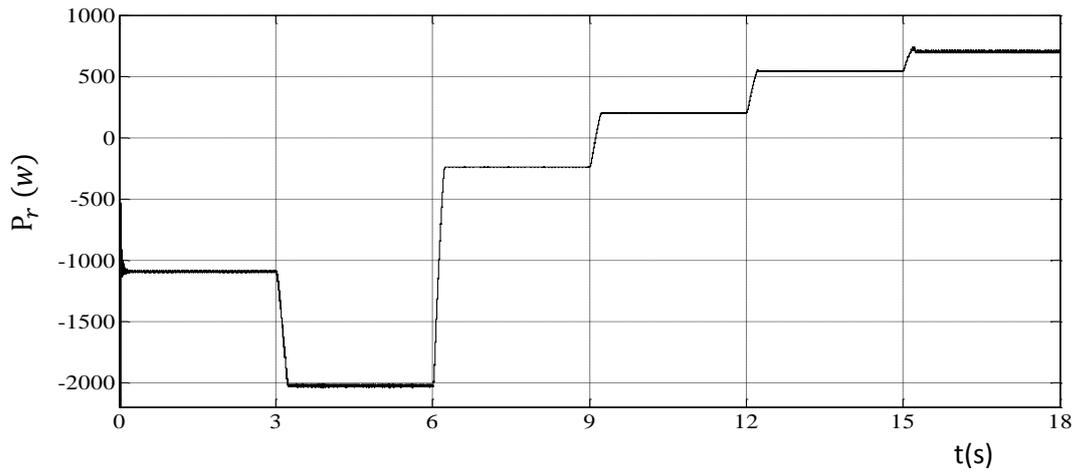


Figure IV.19 : Allure de la puissance active rotorique.

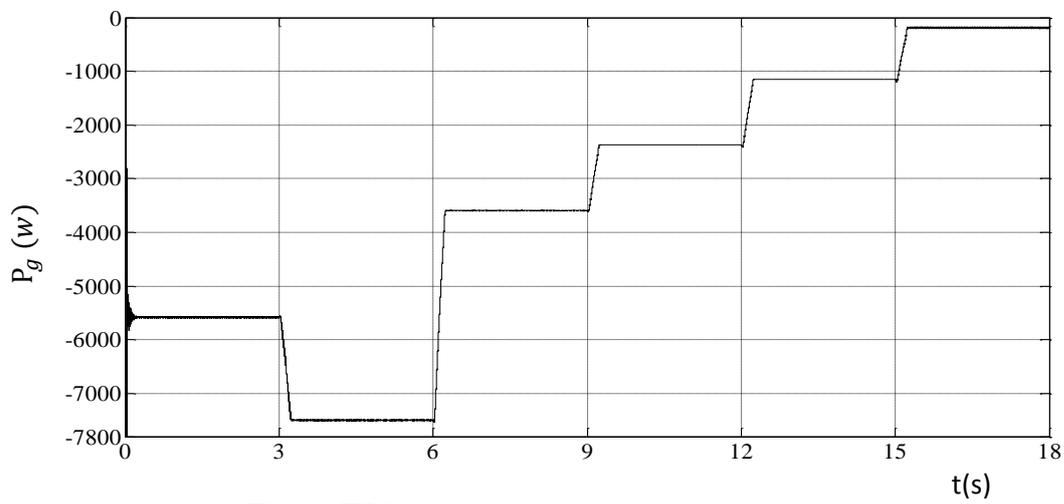


Figure IV.20: Allure de la puissance fournie au réseau.

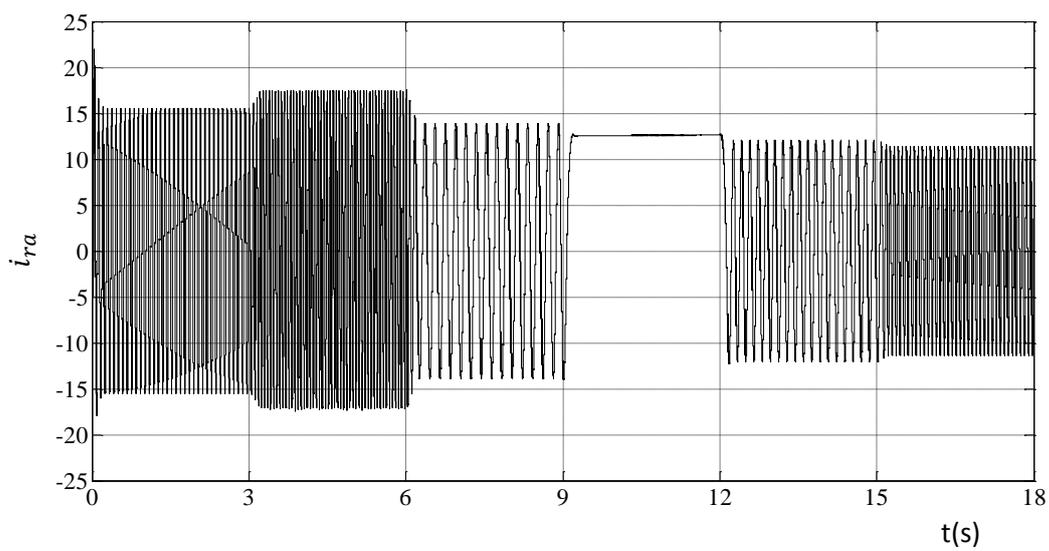
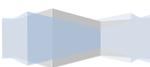


Figure IV.21 : Allure du courant d'une phase rotorique.



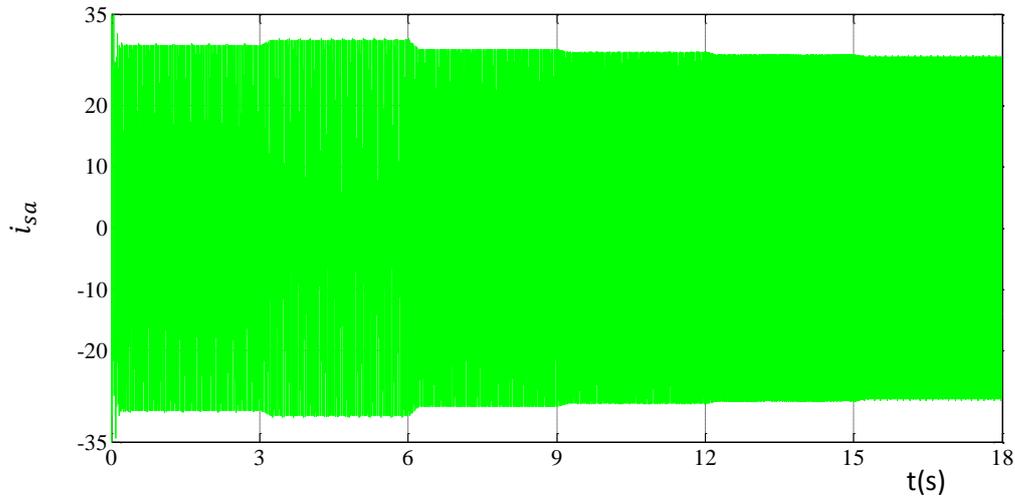


Figure IV.22: Allure du courant d'une phase statorique.

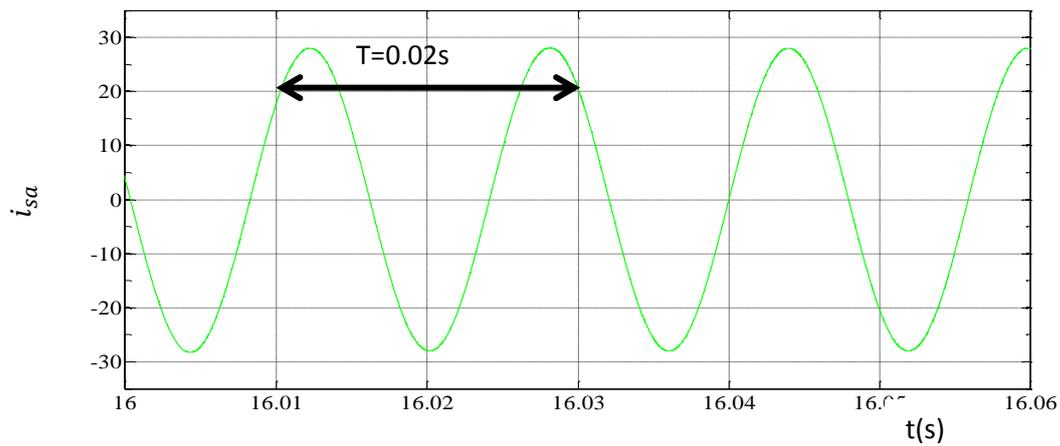


Figure IV.23: Zoom sur i_{sa} .

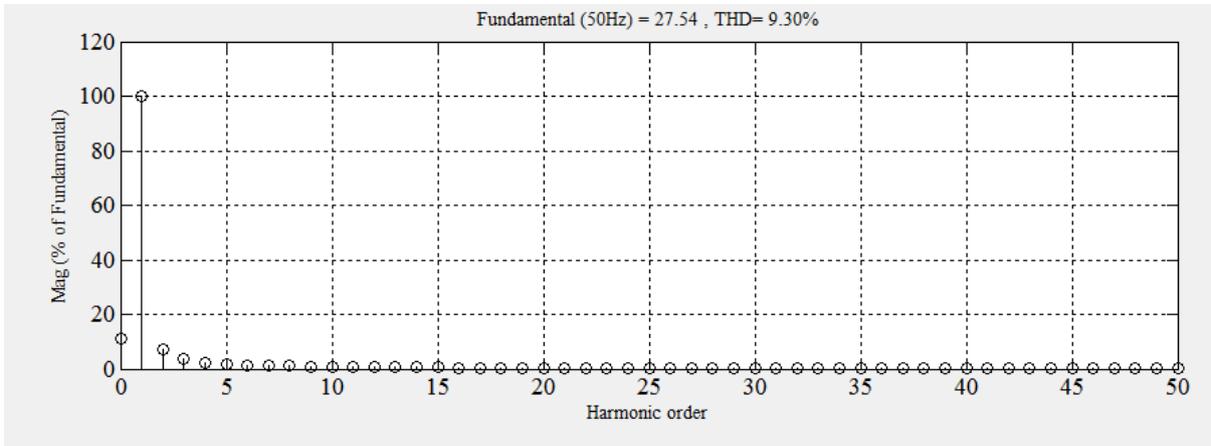
On remarque que les formes des allures de la DTC via un onduleur à trois niveaux sont les mêmes que celles de la DTC via un onduleur à deux niveaux.

Pour mieux les comparer, une analyse spectrale et calcul de taux de distorsion harmonique (THD) est nécessaire.

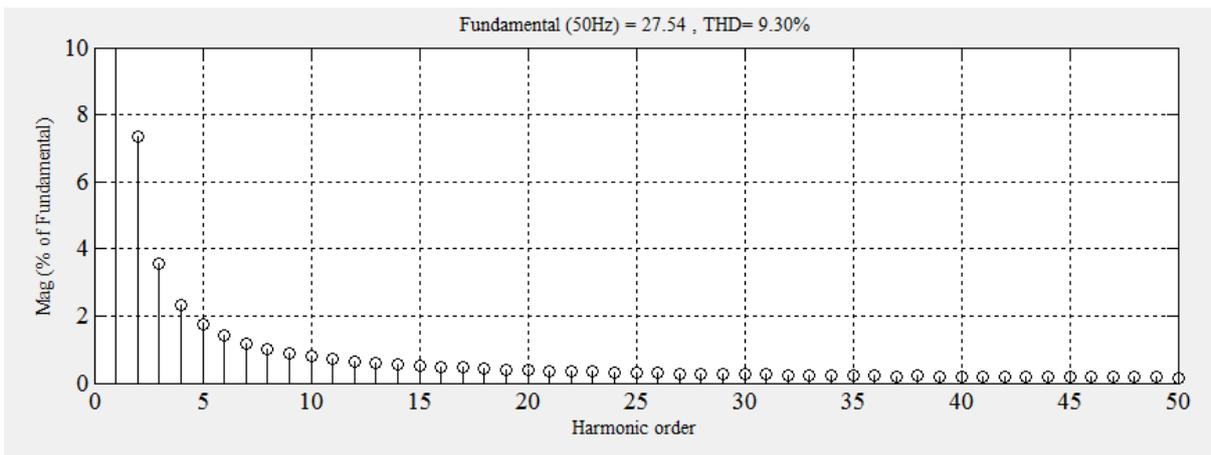


IV.5. Analyse spectrale et le calcul de THD pour i_{sa}

IV.5.1. Pour onduleur à deux niveaux

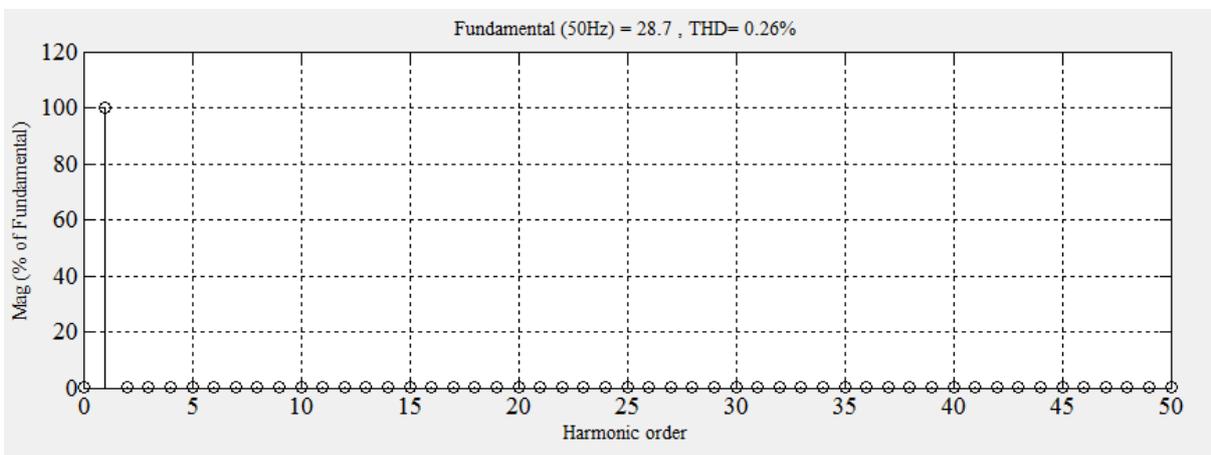


(a)

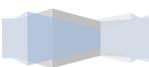


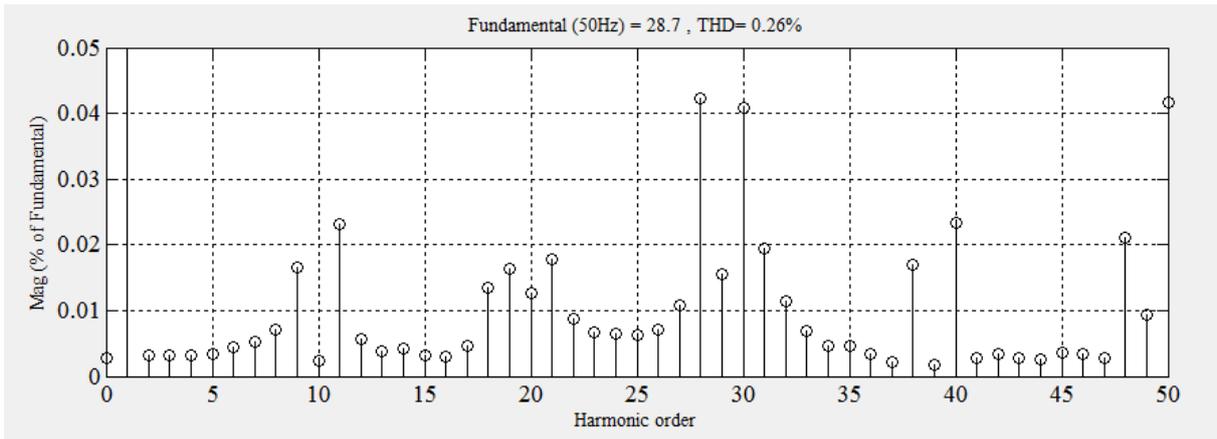
(b)

Figure IV.24: Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=8.44s$



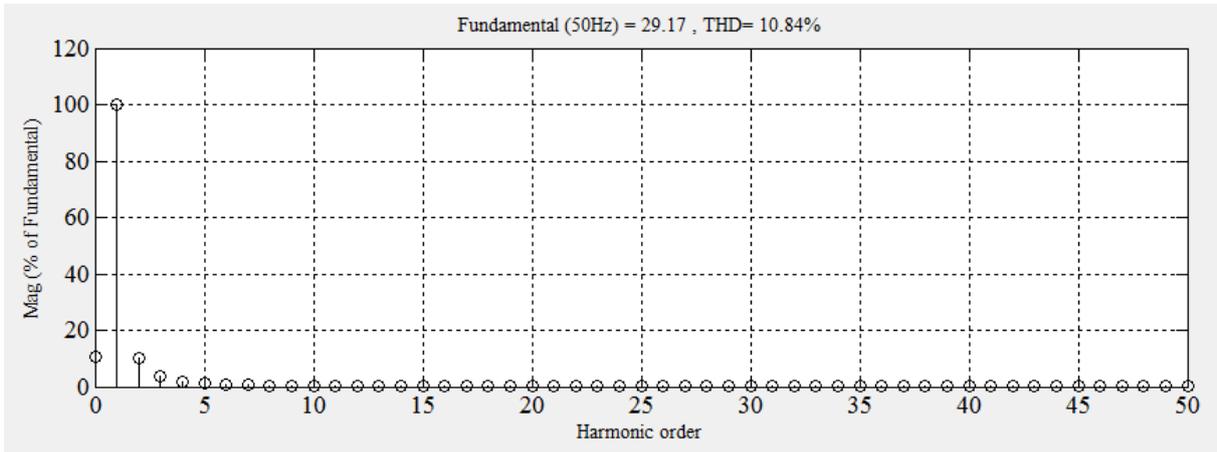
(a)



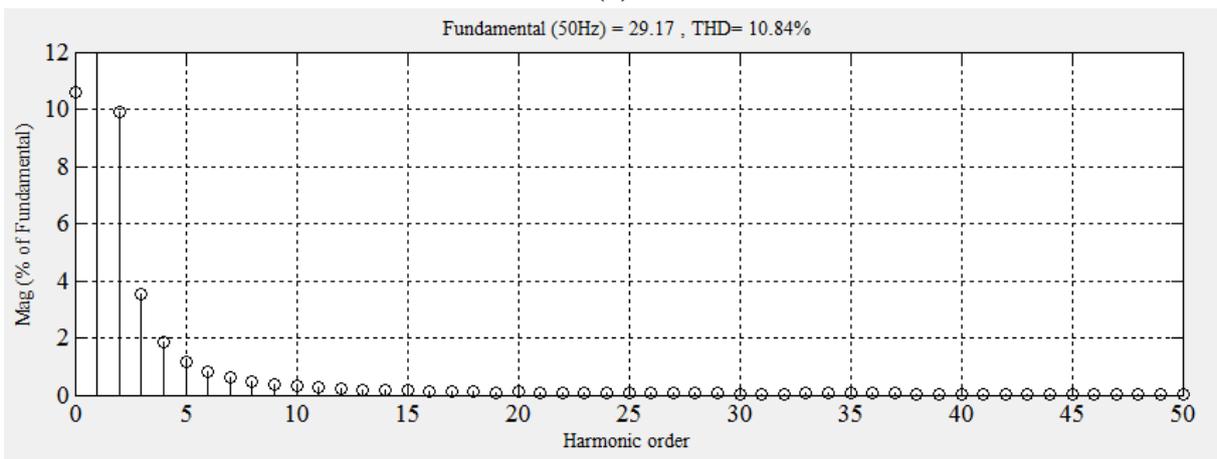


(b)

Figure IV.25: Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=10s$

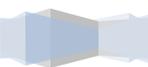


(a)

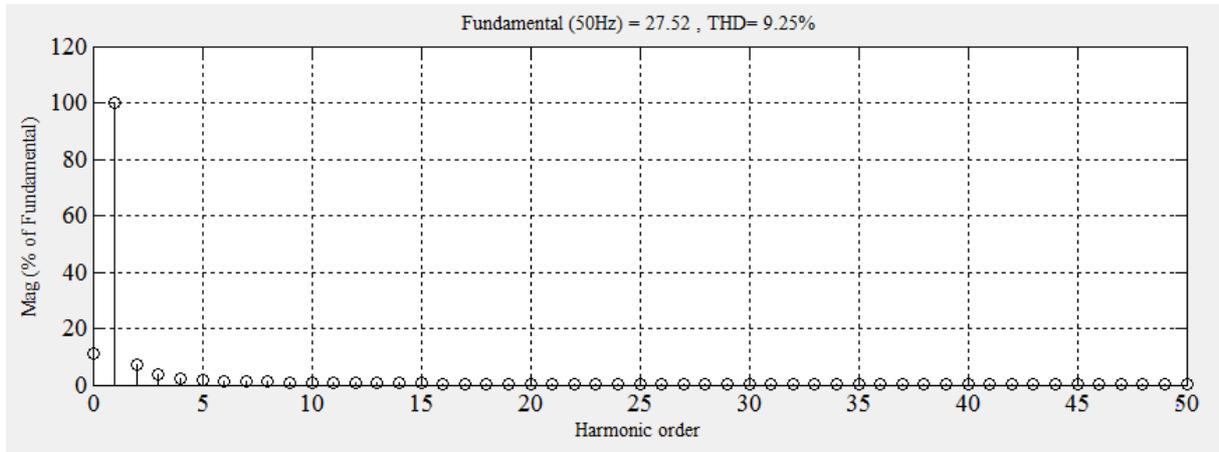


(b)

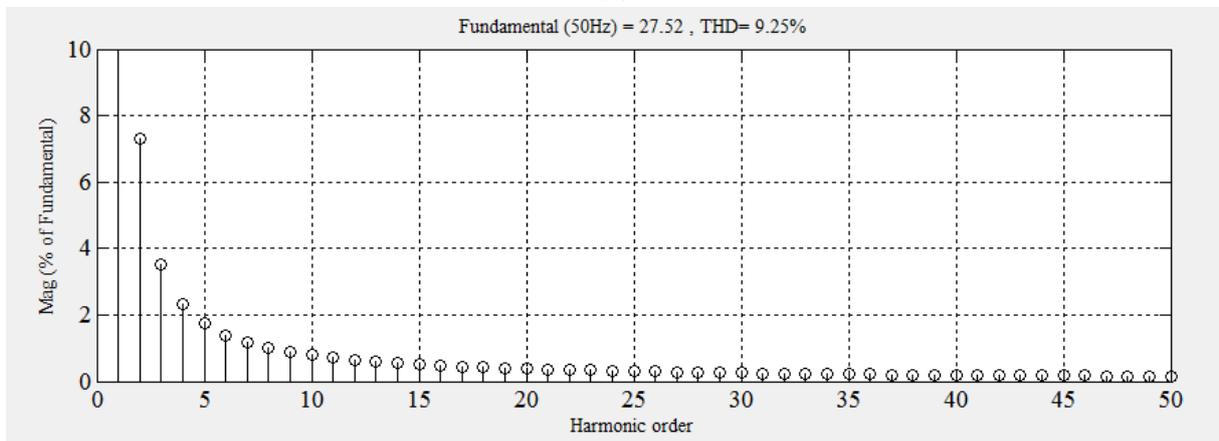
Figure IV.26 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=14.53s$



IV.5.2. Pour onduleur à trois niveaux

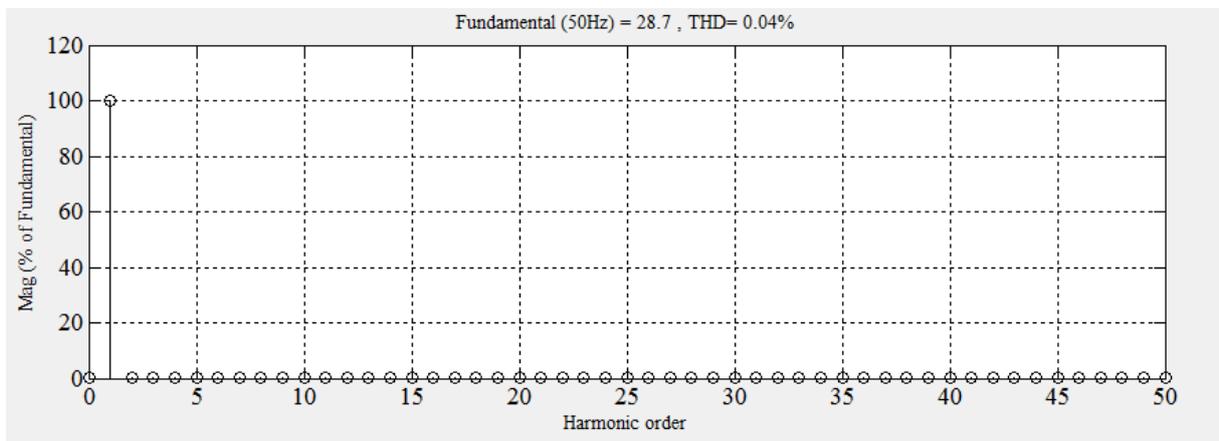


(a)

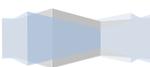


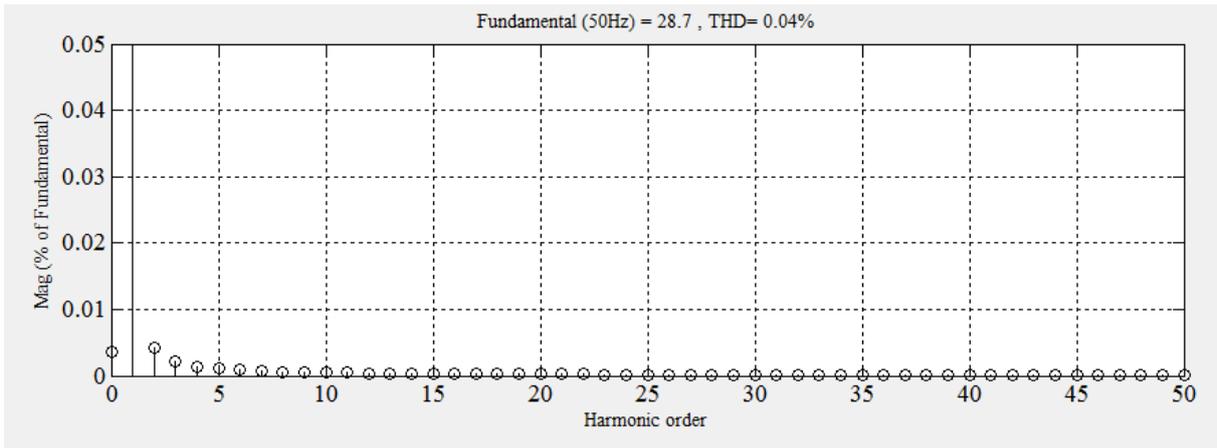
(b)

Figure IV.30 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=8.44s$



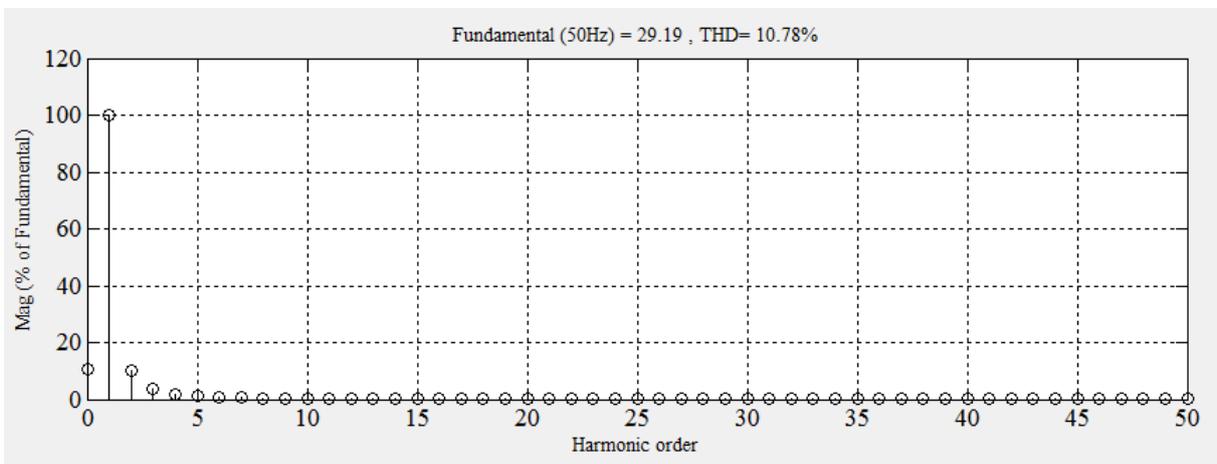
(a)



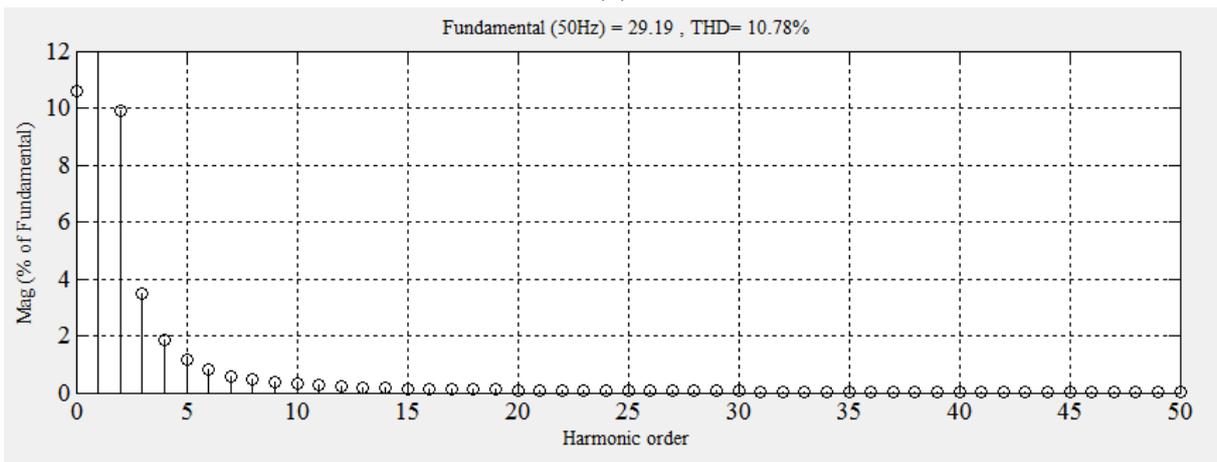


(b)

Figure IV.31 : Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=10s$



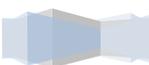
(a)



(b)

Figure IV.32: Zoom de l'allure du spectre harmonique i_{sa} à $t=14.53s$

On remarque que lors $t=10s$ le spectre harmonique et le taux de distorsion harmonique de la Fig.IV.31 est mieux que celui de la Fig.IV.28.



Par contre dans les Fig.IV.27 et Fig.IV.30, on remarque la différence sur la valeur du taux de distorsion harmonique, et c'est la même chose pour les Fig.IV.29 et Fig.IV.32.

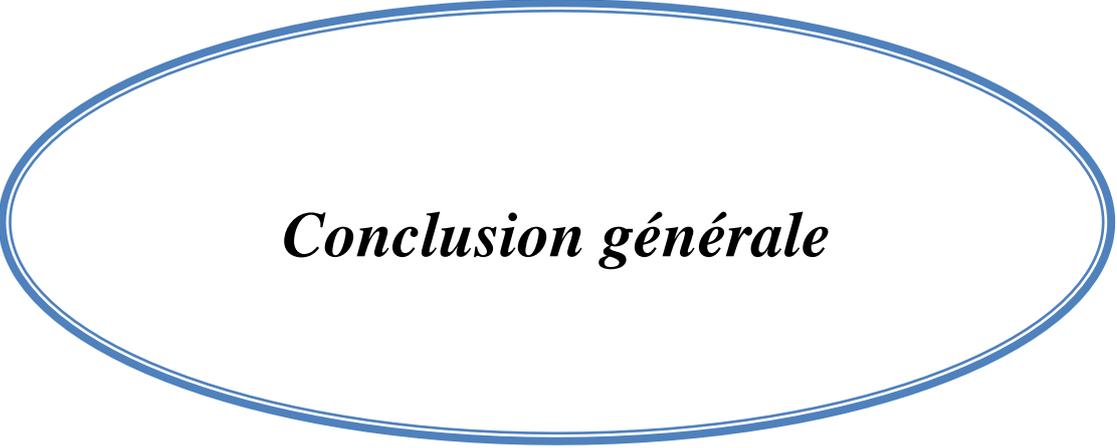
Donc la commande directe du couple (DTC) via un onduleur trois niveaux donne des résultats plus performants que la DTC via un onduleur deux niveaux.

II.6. Conclusion

Les résultats obtenus de la chaîne éolienne basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation par la technique de contrôle direct du couple (DTC) montrent les bonnes performances dynamiques du couple et du flux, elles confirment l'intérêt du fonctionnement à vitesse variable du fait de maximiser la puissance extraite donc avoir un meilleur rendement énergétique surtout en régime hyper synchrone.

La forme des courbes des puissances, flux et du couple électromagnétique sont les mêmes quel que soit l'onduleur utilisé à deux niveaux ou à trois niveaux, on remarque la différence lors du calcul de taux de distorsion harmonique (THD) et sur l'analyse spectrale des courants statoriques, où on constate que la valeur de THD obtenue à partir de l'onduleur à trois niveaux est mieux que celle à deux niveaux.





Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire avait comme objectif la commande directe de couple (DTC) d'une chaîne de production de l'énergie électrique par l'énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation associée à un convertisseur statique au rotor, connectée au réseau.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une brève description des systèmes éoliens et leur mode de fonctionnement ainsi que les principales machines utilisées (synchrone et asynchrone).

Pour l'application d'une commande à notre chaîne éolienne, une modélisation mathématique a été faite pour les différentes parties du système. Les modèles de cette chaîne sont exposés au deuxième chapitre.

Le troisième chapitre propose, l'étude de la commande directe du couple(DTC). On a présenté les notions théoriques de cette commande. En première partie ces notions ont été étudiées pour la chaîne éolienne connectée au réseau via un onduleur à deux niveaux, et via un onduleur à trois niveaux pour la seconde partie.

Le quatrième chapitre qui est le dernier, présente les résultats de la simulation avec interprétation. Nous avons utilisé des correcteurs de flux et de couple à hystérésis en plus des estimateurs pour estimer le flux et le couple.

En première partie, la simulation a été faite pour la chaîne connectée au réseau via un onduleur à deux niveaux.

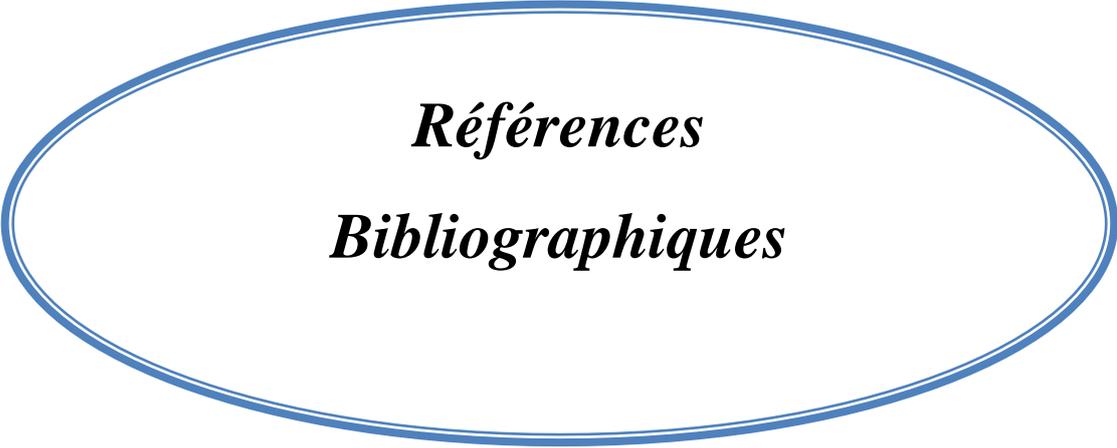
La commande du couple par le contrôle direct du flux rotorique, apporte une solution satisfaisante aux problèmes de robustesse rencontrés dans le contrôle vectoriel du flux rotorique des machines asynchrones à double alimentation. Un fonctionnement à vitesse variable de la chaîne éolienne a été illustré. Les essais par simulation ont montré que le maximum de puissance est atteint dans le fonctionnement à vitesse variable quel que soit la vitesse du vent. La commande directe du couple appliquée a montré une bonne dynamique du couple tout en gardant une bonne précision du contrôle.

En deuxième partie, pour améliorer les résultats précédant, une autre simulation a été faite mais cette fois en utilisant un onduleur à trois niveaux. Les résultats de cette simulation sont très proches que celle d'avant. Pour mieux comparer les résultats des deux simulations, une analyse spectrale et calcul de taux de distorsion harmonique (THD) ont été faites et les résultats montrent que l'utilisation d'un onduleur trois niveaux donne de très bonne valeur du THD et le spectre harmonique est mieux que celui de la deux niveaux.

Comme perspectives nous envisagerons :

- Application de la double DTC à la MADA.
- Utilisation des convertisseurs matriciels pour optimiser les fréquences de commutations des interrupteurs de l'onduleur.
- Utilisation des filtres pour améliorer le spectre harmonique et le taux de distorsion harmonique (THD).





Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

[Abd 11] T.ABDELKRIM, K.BENAMRANE, K.ALIOUANE, T.BENSLIMANE « Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle ». Revue des énergies renouvelables Vol. 14 N°2 pages 211-217, 2011.

[Ait 09] M. AIT ABDELMALEK, K.TATAH « Application de la commande vectorielle sur un système d'énergie éolien reliée au réseau ». Mémoire d'ingénieur 2009, Université A. Mira de Béjaia, Algérie.

[Ayo 13] T.AYOUB « Analyse et commande quatre quadrant de la MADA ». Mémoire d'ingénieur 2013. Université du Québec, Canada.

[Azi 05] S.AZIB « Modélisation, simulation et la commande vectorielle sous les conditions de défaut de la machine double étoile ». Mémoire d'ingénieur 2005. Université A. Mira de Béjaia, Algérie.

[Bag 99] L. BAGHLI « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques», Thèse de doctorat 1999, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France.

[Ben 06] S.BENIKEN, A.F IBOUDGHACEM « Contribution à la commande vectorielle par des régulateurs linéaires et à structures variable de la machine asynchrone à double alimentation ». Mémoire d'Ingénieur 2006, Université de Bejaia, Algérie.

[Bou 12] M.BOUARAKI « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à Tindouf ». Mémoire de magister 2012, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, Algérie.

[Bou 07] EL.M. BOUZERA, Kr. HACHEMI AMMAOUI , « Etude de la commande directe du couple d'une machine asynchrone avec optimisation énergétique ». Mémoire d'ingénieur 2007. Université A. Mira de Béjaia, Algérie.

[Boy 06] A.BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat 2006, Université Nancy, France.

[Bra 12] F.Brahim « l'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une central hybride PV/éolien ». Mémoire de magister 2012, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.

[Can 00] C.CANUDAS « Modélisation, contrôle vectorielle et DTC ». Commande des moteurs asynchrones 1 Edition Hermes Science, France, 2000.



Références bibliographiques

[Che 10] N.CHERFIA « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens ». Mémoire de magister 2010, Université Mentouri de Constantine, Algérie.

[Dav 07] A.DAVIGNY « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat 2007, Université des Sciences et Technologies de Lille, France.

[Den 10] A.DENDOUGA « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation », Thèse de doctorat 2010, Université de Batna, Algérie.

[Ela 04] S. El AIMANI « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension ». Thèse de doctorat 2004. Université des Sciences et Technologie de Lille 1, France.

[Fer 09] K. FERKOUS « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de magister 2009, Université Mentouri, Constantine, Algérie.

[Ghe 11] T.GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat 2011, délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille, France et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie.

[Ham 07] S.HAMADOUCHE « Contribution à l'amélioration des structures de régulation des courant des machine a courant alternatif ». Mémoire de magister 2007. Université de Batna, Algérie.

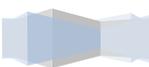
[Idj10] K.IDJDARENE « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes ». Thèse Doctorat 2010, Université de Béjaia, Algérie.

[Idj 05] K.IDJDARENE « Analyse et contrôle d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne ». Mémoire de magister 2005, Université de Béjaia, Algérie.

[Jia 12] H.JIABING, Y.XIAOMING « VSC-based direct torque and reactive power control of doubly fed induction generator ». Renewable Energy, 40. 13-23,2012.

[Kad 11] F. KADRI, S. DRID, DJEFFAL « Direct torque control of induction motor fed by three-level NPC inverter using fuzzy logic and neural network ». International conference on systems and processing information may 15-17, 2011 Guelma, Algeria.

[Lat 12] M.T. LATRECHE « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien ». Mémoire de magister 2012, Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie.



Références bibliographiques

[Men 08] I. MENASRI, L.MENASRI « Commande d'un système éolien autonome basée sur une génératrice asynchrone avec stockage ». Mémoire d'ingénieur 2008, Université A. Mira de Béjaia, Algérie.

[Mir 05] A.MIRECKI : « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat 2005, Institut national de polytechnique, Toulouse, France.

[Mok 04] B.MOKHTAREI, « Implantation de la DTFC par les techniques de l'intelligence artificielle neuronale et neuro floue ». Mémoire de magister 2004. Université de Batna Algérie.

[Mou 07] S.A.MOUSSA « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ». Mémoire d'ingénieur 2007, Ecole national de polytechnique, El Harrache, Algérie.

[Net 00] <http://eolupjv.wordpress.com/les-types-deoliennes/>.

[Pen 00] R.S.PENA, R.J.CARDENAS, G.MASHER et J.C.CLARE, « Vector controled induction machines for stand-alone wind energy application ». Electrical engineering departement. University of Magallances, Chili. 2000.

[Poi 03] F.POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) ». Thèse de doctorat 2003, l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, France.

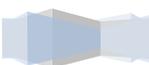
[Rog 04] V.ROGER « Modélisation spécifique des sources de décentralisée des études de dynamique des réseaux ». Thèse doctorat 2004, Université d'Artois, France.

[Sed 09] A.SEDDIKI « Contribution au contrôle direct du couple (DTC) d'une machine asynchrone à cage alimentée par un onduleur multiniveaux ». Mémoire de magister 2009, Université de Boumerdes, Algérie.

[Sow 12] T.L.SOW « Commande non linéaire de l'éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence du réseau ». Mémoire d'ingénieur 2012, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, Canada.

[Sma 06] N.SMATI, S.GHEUFA « Commande en couple d'une génératrice asynchrone à double alimentation "GADA" ». Mémoire 2006, Université A.Mira de Béjaia, Algérie.

[Tam 07] K.TAMASSAOUT, S.Belbessai « Contrôle directe modulé du couple d'une génératrice asynchrone dédiée à une éolienne », Mémoire 2007. Université A. mira de Bejaia, Algérie.



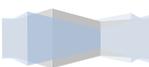
[**Tam 05**] S.TAMALOUZT « Etude comparative de l'alimentation d'une machine asynchrone à double alimentation par un convertisseur à commutation forcée et naturelle ». Mémoire magister 2005, Université Batna. Algérie.

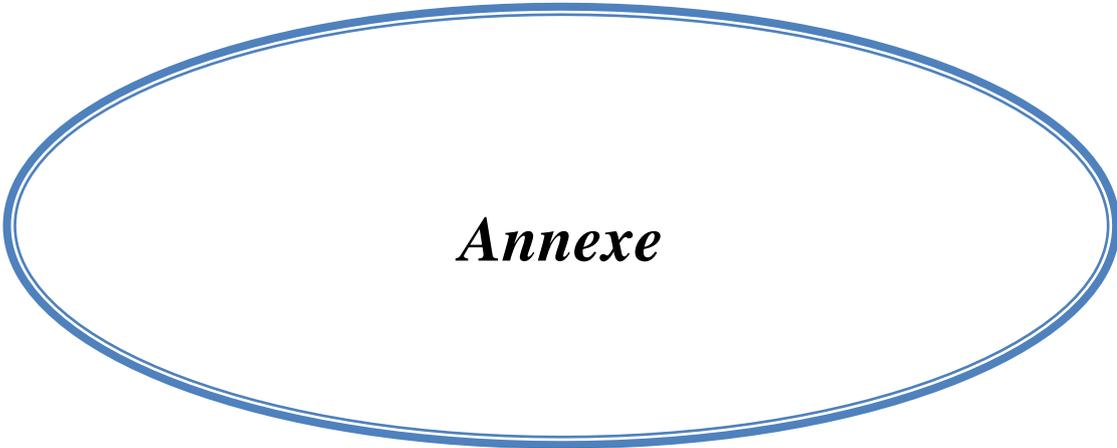
[**Tou 10**] B.TOUAL « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable ». Mémoire magister 2010, Université de Batna, Algérie.

[**Tou 08**] R.TOUFOUTI « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone » Thèse doctorat 2008, Université Mentouri Constantine, Algérie.

[**Tre 09**] E.TREMBLAY « Contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique ». Mémoire d'ingénieur 2009, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Canada.

[**Zek 13**] A. ZEKKOUR, D. ABDESSEMED, F.NACERI « Contrôle direct de couple (DTC) de la machine à induction ». Mémoire de magister 2013, Université de Batna, Algérie.





Annexe

Annexe

Paramètres de la turbine

- La puissance nominale $P = 7.5 \text{ KW}$
- Le rayon de la turbine $R_t = 3.24 \text{ m}$
- Vitesse nominale de la turbine $\Omega_t = 296 \text{ tr/min}$
- Vitesse maximale de la turbine $\Omega_{t \text{ max}} = 310 \text{ tr/min}$
- Le gain du multiplicateur $G = 5.065$
- Moment d'inertie $J = 0.03 \text{ kg.m}^2$

Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

- La puissance nominale $P = 7.5 \text{ KW}$
- Tension statorique nominale $U_{ns} = 415 \text{ V}$
- Vitesse nominale $N_n = 970 \text{ tr/min}$
- Nombre de pair de pôles $p = 3$
- Résistance statorique $R_s = 1.02 \Omega$
- Résistance rotorique $R_r = 0.8 \Omega$
- Inductance cyclique statorique $L_s = 0.093 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique $L_r = 0.08 \text{ H}$
- Inductance mutuelle $M = 0.664 \text{ H}$

Paramètres de simulation

- Les frottements $F = 0 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$
- Les paramètres du bus continu $V_{dc} = 880 \text{ V}$
- Pas de simulation 1 e-5 s.



Résumé

Ce mémoire a pour objectifs de développer une structure de contrôle d'une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à un aérogénérateur, capable de fournir une bonne dynamique du couple électromagnétique avec une bonne robustesse contre les variations paramétriques sans aucun capteur de vitesse d'où le contrôle direct du couple (DTC) permet d'atteindre ces objectifs.

En effet, par un choix judicieux d'une table de commutation des vecteurs de sortie de l'onduleur, le flux rotorique et le couple électromagnétique sont contrôlés directement et indépendamment. Alors, notre objectif était d'introduire une stratégie d'amélioration des performances de la (DTC), la première partie en utilisant un onduleur à deux niveaux, par contre la deuxième en utilisant un onduleur à trois niveaux.

Des simulations numériques sur Matlab/Simulink ont été implantées pour valider la méthode proposée.