

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER 2 en Electrotechnique

Filière : **Energies Renouvelables**

INTITULE :

Contribution à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation

Présenté par :

M^r : BOUANANI Youcef

M^r : OURDANI Nabil

Encadré par :

M^r : S. TAMALOUZT

M^r : K. IDJDARENE

Remerciements

Nous tenons à remercier éternellement Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener a terme ce modeste travail.

Que messieurs S. TAMALOUZT et K. IDJDARENE trouvent ici l'expression de nos plus vifs remerciements pour nous avoir aidés et suivis patiemment dans l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont à toute personne ayant contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie de travail :

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu

A mes grands parents

Mon frère Ali et mes sœurs

A toutes ma famille

A tous mes amis.

Et à tout le groupe Aqla- -idwen.

Nabil

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents

Mes frères et sœurs

Toute ma famille

Tous mes amis

Et tous ceux qui me sont chers

Youcef

Liste des symboles

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation
V	: Vitesse du vent
ρ	: Masse volumique de l'air
S	: Surface balayée par les pâles
P_v	: Puissance extraite du vent
C_p	: Coefficient de puissance
R	: Rayon des pales
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
ω_t	: Vitesse de rotation de la turbine
C_{aero}	: Couple aérodynamique
	: Vitesse spécifique
C_g	: Couple de la génératrice
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation de la génératrice
J	: moment d'inertie totale
J_g	: moment d'inertie de la génératrice
J_t	: moment d'inertie de la turbine
C_{mec}	: Couple mécanique
C_{visq}	: Couple visqueux
G	: Gain du multiplicateur
ω_s	: pulsation statorique

Symboles

ω_r	: pulsation rotorique
f_s	: fréquence statorique
f_r	: fréquence rotorique
V_{s-abc}	: Tensions simples du stator de la MADA
V_{r-abc}	: Tensions simples du rotor de la MADA
i_{s-abc}	: Courants du stator de la MADA
i_{r-abc}	: Courants du rotor de la MADA
ϕ_{s-abc}	: Flux statorique de la MADA
ϕ_{r-abc}	: Flux rotorique de la MADA
R_s	: Résistance d'une phase due stator
R_r	: Résistance d'une phase due rotor
L_s	: Inductance propre d'une phase du stator
L_r	: Inductance propre d'une phase du rotor
M_{ss}	: Inductance mutuelle entre phases du stator
M_{sr}	: Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor
M_{rr}	: Inductance mutuelle entre phases du rotor
M	: Inductance mutuelle maximale
P	: Nombre de paires de pôles
V_{sd}, V_{sq} et q	: Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q
V_{rd}, V_{rq} et q	: Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q

Symboles

ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	: Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q
ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	: Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$[P(\theta)]$: Matrice de transformation directe de PARK
$[P(\theta)]^{-1}$: Matrice de transformation inverse de PARK
P_s	: Puissance active statorique
P_r	: Puissance active rotorique
Q_s	: Puissance réactive statorique
Q_r	: Puissance réactive rotorique
SVM	: Space Vector Modulation
$[C(\theta)]$: Matrice de transformation directe de Clarck
ϕ_s^*	: Flux statorique de référence
P_{ref}	: Puissance active de référence statorique
Q_{ref}	: Puissance réactive de référence statorique
$S(x)$: Surface de glissement d'une variable à réguler
$\dot{S}(x)$: Dérivé de la surface de glissement d'une variable à réguler
$V(x)$: Fonction de Lyapunov
$S(P)$: Surface de glissement pour puissance active
$S(Q)$: Surface de glissement pour puissance réactive
r	: Degré relatif de la surface de glissement
u_n	: Commande discontinue

Symboles

u_{eq} : Commande équivalente

g : glissement

RMG : régulateur à mode glissant

Liste des figures

Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure 1.2. Constitution d'une éolienne.....	5
Figure 1.3. Caractéristique Puissance-vitesse du vent.....	6
Figure 1.4. Éolienne à axe horizontal.....	7
Figure 1.5. Éolienne de type Darrieus.....	8
Figure 1.6. Éolienne de type Savonius.....	8
Figure 1.7. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	12
Figure 1.8. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	12
Figure 1.9. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	13
Figure 1.10. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	14
Figure 1.11. Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	15
Figure 1.12. MADA – structure de Kramer.....	15
Figure 1.13. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	16
Figure 1.14. Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	17
Figure 1.15. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	17
Figure 1.16. Analogie entre la commande de la machine à courant continu et la MADA.....	19
Figure 2.1. Générateur éolien basée sur une MADA connectée au réseau.....	22
Figure 2.2. représentation de la GADA dans le repère (a,b,c).....	25
Figure 2.3. Représentation schématique de la GADA dans le repère (d,q).....	28
Figure 2.4. Les états de l'onduleur.....	33
Figure 2.5. Représentation des états de l'onduleur dans le repère	34
Figure 2.6. Bloc de la transformation de Clarke.....	36

Figure 2.7. Bloc de détermination des secteurs.....	37
Figure 2.8. Bloc de calcul des variables X, Y et Z.....	38
Figure 2.9. Bloc de détermination de T_{cm1} , T_{cm2} et T_{cm3}	39
Figure 3.1. Orientation du repère de Park.	41
Figure 3.2. Modes de fonctionnement dans le plan de phase.....	43
Figure 3.3. Interprétation de U_{eq}	47
Figure 3.4. Fonction «sign».....	48
Figure 3.5. Phénomène de broutement «Chattering ».....	49
Figure 3.6. Fonction de saturation «sat».....	50
Figure 3.7. Schéma de commande de la puissance active et réactive.....	52
Figure 3.8. Schéma globale du système étudié.....	53
Figure 3.9. Caractéristique $C_p(\)$	54
Figure 3.10. Profil du vent.....	54
Figure 3.11. Vitesse mécanique de la génératrice.....	55
Figure 3.12. Allure du glissement de la machine.....	55
Figure 3.13. Allure de la vitesse réduite.....	55
Figure 3.14. Allure du coefficient de puissance.....	56
Figure 3.15. Allure de la puissance active statorique.....	57
Figure 3.16. Allure de la puissance réactive statorique.....	57
Figure 3.17. Allure de couple électromagnétique.....	58
Figure 3.18. Allures de la tension V_{sa} et du courant i_{sa} d'une phase statorique.....	58
Figure 3.19. Zoom du courant d'une phase statorique i_{sa}	59

Figure 3.20. Allure du courant d'une phase rotorique i_{ra}	59
Figure 3.21. Allure du flux statorique direct.....	60
Figure 3.22. Allure du flux statorique quadrature.....	60
Figure 3.23. Allure de variation de R_s et R_r	61
Figure 3.24. Allure de variation de M et L_s et L_r	61
Figure 3.25. Allure de la vitesse de vent.....	62
Figure 3.26. Allure de glissement.....	62
Figure 3.27. Allure de la vitesse mécanique.....	63
Figure 3.28. Allure de la puissance active.....	63
Figure 3.29. Allure de la puissance réactive.....	64
Figure 3.30. Allure de couple électromagnétique.....	64
Figure 3.31. Allure de flux statorique.....	65
Figure 3.32. Allure de la vitesse de vent.....	65
Figure 3.33. Allure de la vitesse mécanique.....	66
Figure 3.34. Allure de glissement.....	66
Figure 3.35. Allure de couple électromagnétique.....	67
Figure 3.36. Allure de la puissance active.....	67
Figure 3.37. Allure flux statorique.....	68
Figure 3.38. Allure du flux statorique quadrature.....	68

Sommaire

SOMMAIRE

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

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie éolienne

1.1. Introduction.....	3
1.2. L'énergie éolienne.....	3
1.2. 1. Définition de l'énergie éolienne	3
1.2.2. Avantages de l'éolien.....	4
1.2.3. Inconvénients de l'éolien	4
1.2.4. Constitutions d'une éolienne	4
1.2.5. Zone de fonctionnement.....	6
1.2.6. Les différents types d'éolien	7
1.2.6.1. Eolienne à axe horizontal	7
1.2.6.2. Eolienne à axe vertical	7
1.2.7. Type de système éolien	9
1.2.7.1. Système autonome	9
1.2.7.2. Système connecté au réseau.....	9
A. A vitesse fixe.....	9
B. A vitesse variable.....	9
1.2.8. Avantages et inconvénients de différentes machines utilisée dans le système éolien.....	10
1.3. Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation.....	11
1.3.1. Pourquoi la MADA ?.....	11
1.3.2. Mode de fonctionnement de la MADA.....	11
1.3.2.1. Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone.....	11

1.3.2.2. Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone.....	12
1.3.2.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone.....	13
1.3.2.3. Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone.....	13
1.3.3. Différent structure de la MADA.....	14
1.3.3.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"	14
A. MADA – structure de Kramer	15
B. MADA à énergie rotorique dissipée.....	16
C. MADA – structure de « Scherbius» avec cycloconvertisseur.....	16
1.3.3.2. Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"	17
1.4. Les différents types de commande de la MADA.....	18
1.4.1. La commande directe du couple DTC.....	18
1.4.2. La commande directe De puissance DPC.....	19
1.4.3. La commande vectorielle.....	19
1.4.3.1. La commande par mode glissant	20
1.4.3.2. Les avantages de la commande par mode glissant.....	20
1.5. Conclusion.....	20

Chapitre 2 : Modélisation de la chaine de conversion électrique

2.1. Introduction	22
2.2. Modélisation de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne basée sur une GADA.....	22
2.2.1. Schéma de la structure étudié.....	22

2.2.2	Modélisation de la vitesse du vent.....	22
2.2.3	Modélisation de la turbine	23
2.2.4.	Modélisation du multiplicateur.....	24
2.2.5.	Modélisation de l'arbre mécanique.....	24
2.2.6.	Modélisation de machine asynchrone à double alimentation	25
2.2.6.1.	Equations de la MADA.....	26
A.	Les équations électriques.....	26
B.	Les équations magnétiques.....	27
C.	L'équation mécanique.....	28
2.2.6.2	Transformation de park.....	28
2.2.6.3.	Choix du référentiel.....	31
A.	Référentiel lié au stator.....	32
B.	Référentiel lié au rotor	32
C.	Référentiel lié au champ tournant	32
2.3.	Modélisations du convertisseur de puissance.....	32
2.3.1.	La technique SVM (Space Vector Modulation).....	32
2.3.2	Principe de la SVM.....	33
2.3.3.	Les étapes de la réalisation de la méthode SVM.....	35
2.3.3.1.	Détermination des tensions de références V_u, V_v	35
2.3.3.2.	Détermination des secteurs.....	36
2.3.3.3.	Calcul des temps de fonctionnement de vecteurs fondamentaux.....	37
2.3.3.4.	Génération de forme d'onde.....	38
2.4.	Conclusion.....	39

Chapitre 3 : Application de la commande

3.1. Introduction.....	40
3.2. Modèle de la GADA en vue de la commande.....	41
3.3. Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable..	42
3.4. Conception de la commande par mode de glissement.....	44
3.4.1. Choix des surfaces de glissement.....	44
3.4.2. Condition de d'existence et de convergence du régime glissant.....	45
3.4.2.1 La Fonction discrète de commutation.....	45
3.4.2.2 La Fonction de LYAPUNOV.....	45
3.4.2.3 Détermination de la loi de commande.....	46
3.4.2.4. Phénomène de broutement.....	49
A. Fonction de saturation.....	49
B. Commande linéaire par des régulateurs PI.....	50
3.6. Application de la commande par mode glissant au contrôle de la puissance active et réactive du GADA.....	50
3.6.1 Schéma bloc de système.....	52
3.6.2. Résultats de simulation.....	53
3.7.Conclusion.....	68
Conclusion général.....	69

Introduction

générale

La croissance spectaculaire de la population mondiale dans le courant du siècle dernier, le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation se traduisent par une demande d'énergie en forte expansion. Notre planète comptera près de 8 milliards d'habitants en 2030, augmentation largement liée à la poussée démographique des pays émergents. On parle d'un triplement de la demande énergétique entre 1970 et 2030 [1].

Actuellement l'énergie produite a près de 80% a partir des énergies fossiles (pétrole, le gaz naturel et le charbon) ou fissiles (nucléaire), leur reconstitution naturelle demanderait des millions d'années pour être achevée [1]. Outre leur épuisement inéluctable, l'exploitation de ces combustibles est à l'origine de problèmes environnementaux relatifs aux dégâts écologiques liés à leur extraction et à leur utilisation, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteur qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse...) dans la production de l'électricité [2].

Parmi les énergies non polluantes, l'énergie éolienne a été identifiée comme une des plus prometteuses et viable pour la production d'énergie en complément des autres sources d'énergie renouvelables.

De nos jours, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisé dans les unités de production supérieure à 1MW. Cependant de nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éolienne. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pâles, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur [3].

Notre travail concerne l'étude et la simulation d'une commande par mode glissant d'une génératrice asynchrone double alimentation alimenté via un convertisseur.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation générale de l'énergie éolienne, ainsi que les différentes structures de la MADA et les diverses techniques de commandes existantes dans la littérature des aérogénérateurs basés sur la GADA.

Dans le second chapitre, nous présenterons la modélisation de la chaîne de conversion proposée. En premier lieu nous modélisons la partie mécanique de l'éolienne, puis nous passerons à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

dans les différents repères et nous verrons ensuite la modélisation et la commande de l'onduleur.

Au troisième chapitre nous allons présenter le concept de la commande à structure variable des systèmes et son application à la GADA. Nous étudierons la commande par mode glissant puis son application à une génératrice asynchrone à double alimentation.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherches envisagées.

Chapitre 1

1.1. Introduction

Une forte demande d'énergie électrique et la surexploitation des énergies fossiles ont incité à exploiter d'autre source d'énergie renouvelable non polluante et inépuisable.

Les énergies renouvelables sont divisées en 6 catégories [1]:

- L'énergie hydraulique.
- L'énergie éolienne.
- L'énergie solaire.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie biomasse.
- L'énergie marine.

Dans ce chapitre on parle beaucoup plus sur l'énergie éolienne car elle est au centre de ce présent travail.

1.2. L'énergie éolienne

1.2. 1. Définition de l'énergie éolienne

Les turbines éoliennes permettent de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique à travers une génératrice.

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes.

Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales [3].

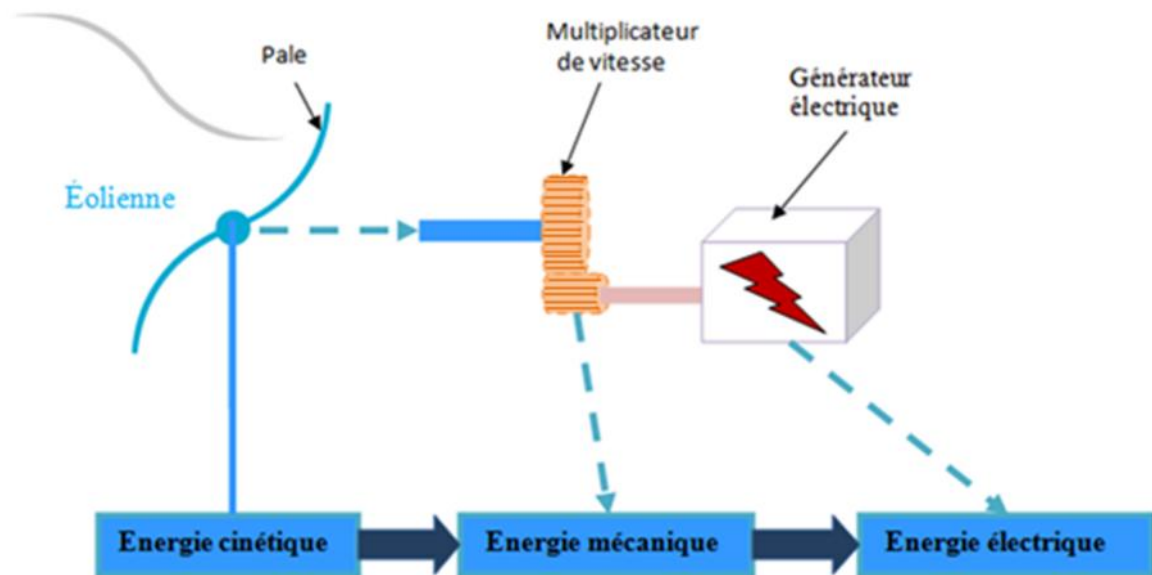


Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.2.2. Avantages de l'éolien

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement peu de sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.
- Une énergie renouvelable : Contrairement aux énergies fossiles.
- Une énergie sans risque : Contrairement à l'énergie nucléaire.
- Une énergie qui n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces.

1.2.3. Inconvénients de l'éolien

- L'impact visuel qui reste un thème subjectif.
- Le bruit d'une éolienne a une double source : d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle
- L'impact sur les oiseaux : des collisions au niveau du mât, des pâles, des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

1.2.4. Constitutions d'une éolienne

L'éolienne est constituée essentiellement [4]

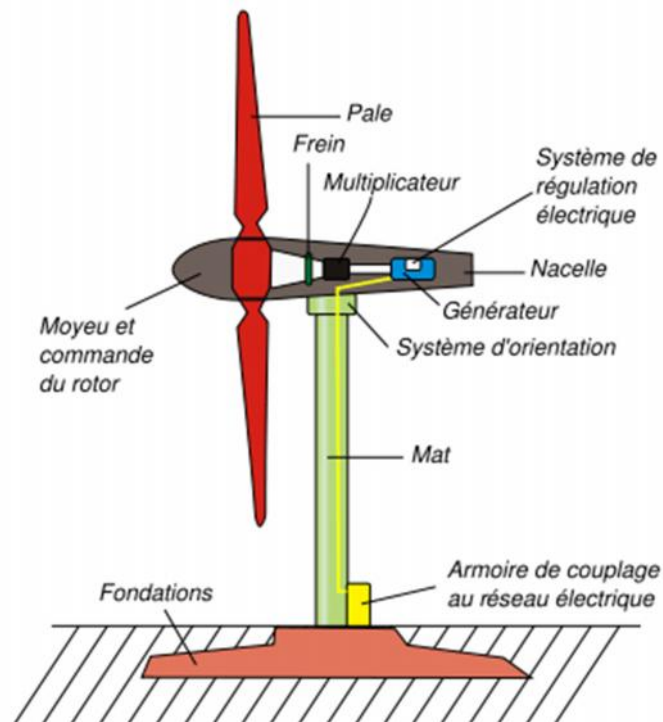


Figure 1.2. Constitution d'une éolienne.

- **Un mât** permettant d'élever l'hélice à une altitude adéquate, où la vitesse du vent est plus élevée et ne rencontre pas autant d'obstacles qu'au niveau du sol.
- **Une hélice** de trois pales généralement, montée sur l'axe horizontal de l'éolienne
- **Une nacelle** montée au sommet du mât et constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie.
- Une cabine située au pied de l'éolienne et qui permet de se connecter au réseau domestique dans le cas d'une utilisation individuelle.

1.2.5. Zone de fonctionnement

La courbe de puissance détermine la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses du vent. Généralement, fournie par les constructeurs, elle permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne en fonction de la vitesse du vent [5].

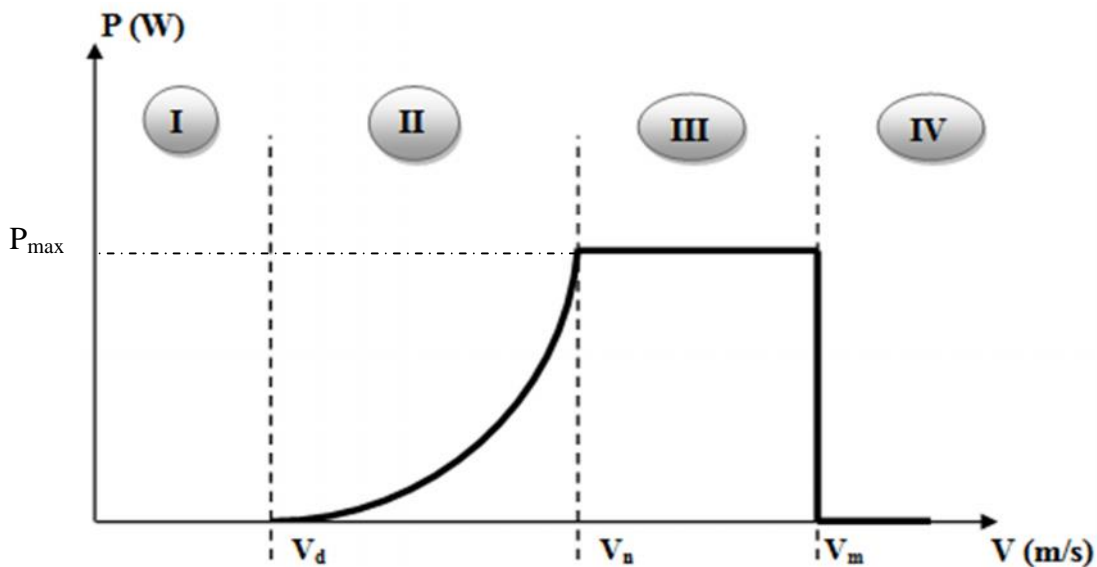


Figure 1.3. Caractéristique Puissance-vitesse du vent

V_d : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

V_n : Vitesse du vent correspondant à la vitesse nominale de la génératrice.

V_m : Vitesse du vent correspondant à la vitesse de décrochage, pour laquelle l'éolienne doit être déconnectée, pour des raisons de sécurité mécanique.

Zone I : La vitesse du vent dans cette zone est inférieure à la vitesse de démarrage V_d , la puissance à extraire est trop faible et n'arrive même pas à compenser les pertes occasionnées par la machine dans ce cas l'éolienne ne fonctionne pas.

Zone II : Un maximum de puissance est extrait pour chaque vitesse de vent et ça enclenche d'un algorithme de commande d'extraction de puissance maximum.

Zone III : La puissance est maintenue à sa valeur nominal et le fonctionnement est à charge partielle.

Zone IV : Afin de protéger l'installation, un dispositif d'arrêt d'urgence est actionné et cela en mettant l'éolienne en drapeau.

1.2.6. Les différents types d'éolien

1.2.6.1. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes modernes classiques tripales : conception qui s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure.



Figure 1.4. Éolienne à axe horizontal.

1.2.6.2. Eolienne à axe vertical

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

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

A. Darrieus

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

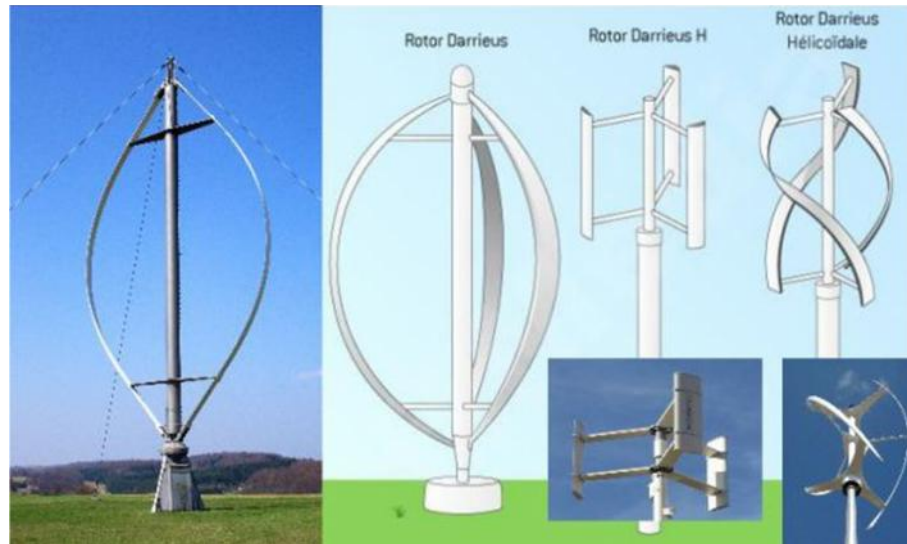


Figure 1.5. Éolienne de type Darrieus.

B. Savonius

Cette éolienne a également un faible rendement par rapport à une éolienne classique mais elle a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent. L'éolienne est compact et le fait d'être sur un axe vertical diminue les vibrations ce qui peut être très contraignant sur un bâtiment.

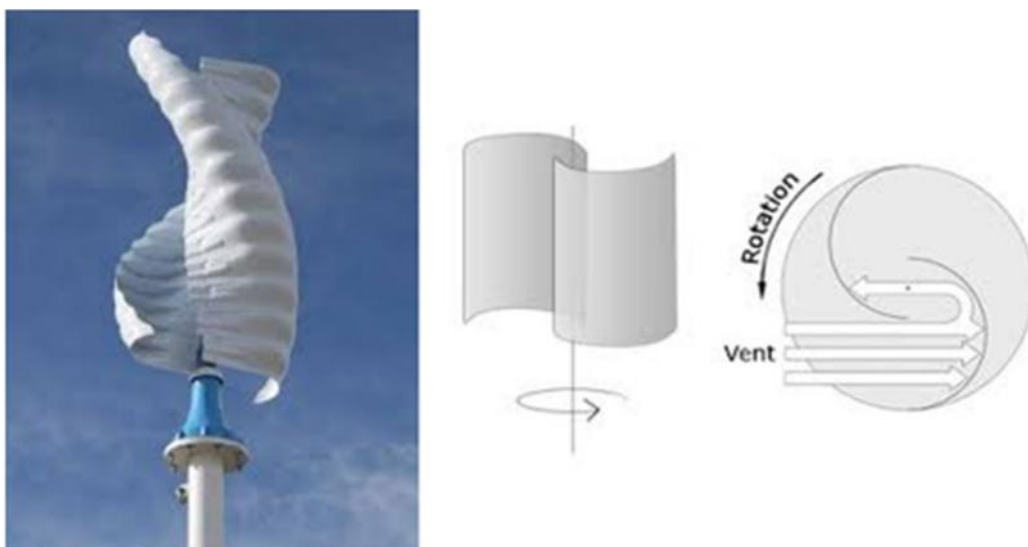


Figure 1.6. Éolienne de type Savonius.

1.2.7. Type de système éolien

1.2.7.1. Système autonome

C'est un système complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des unités de stockage d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé. Les machines utilisées sont des machines synchrones et les machines asynchrones à cage d'écureuil [6].

1.2.7.2. Système connecté au réseau

On distingue deux types d'éoliennes raccordées au réseau :

A. A vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

B. A vitesse variable

Constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

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

1.2.8. Avantages et inconvénients de différentes machines utilisées dans le système éolien

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des différentes machines [6].

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<p>MAS Vitesse fixe</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Machine robuste. - Faible coût. - Pas d'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée. - Maintenance boîte de vitesse. - Pas de contrôle de l'énergie réactive. - Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
<p>MADA Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée. - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale. - Machine standard. - connexion de la machine plus facile à gérer. - Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boîte de vitesse. - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle - commande complexe. - Contact glissant bagues – balais.
<p>MSAP Vitesse Variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance. - Machine spécifique. - Grand diamètre de machine. - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

1.3. Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation

1.3.1. Pourquoi la MADA ?

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types de génératrice à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes [7].

1.3.2. Mode de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [8].

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [9].

1.3.2.1. Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone

La figure 1.7 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de 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 alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [10]

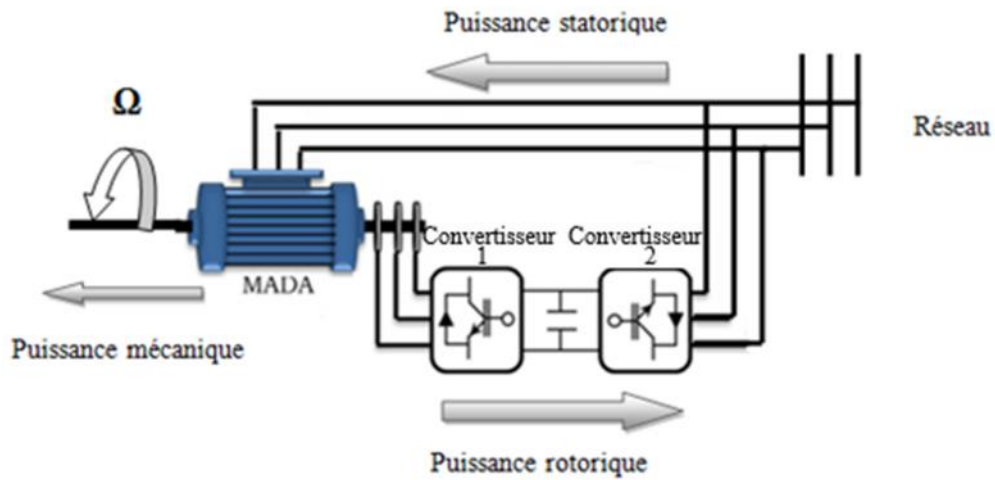


Figure 1.7. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

1.3.2.2. Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

La figure 1.8 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [8], [11].

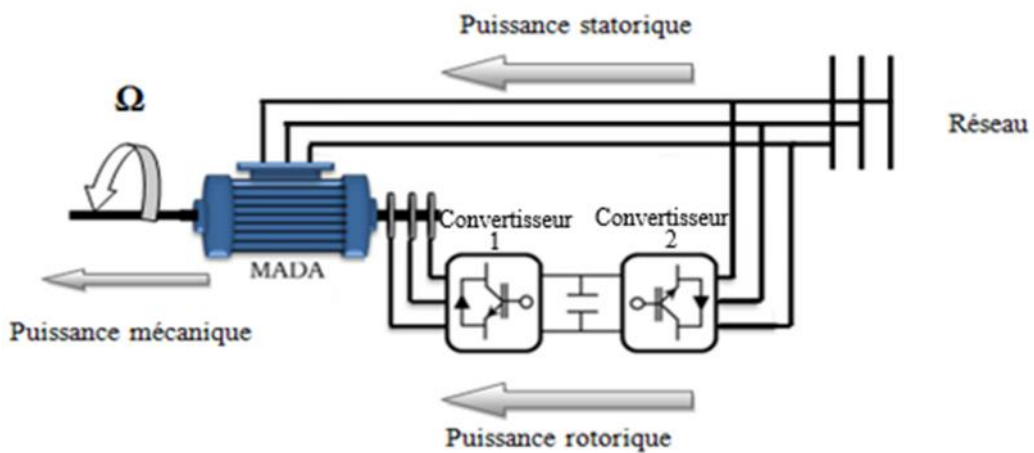


Figure 1.8. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

1.3.2.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

La figure 1.9 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [10].

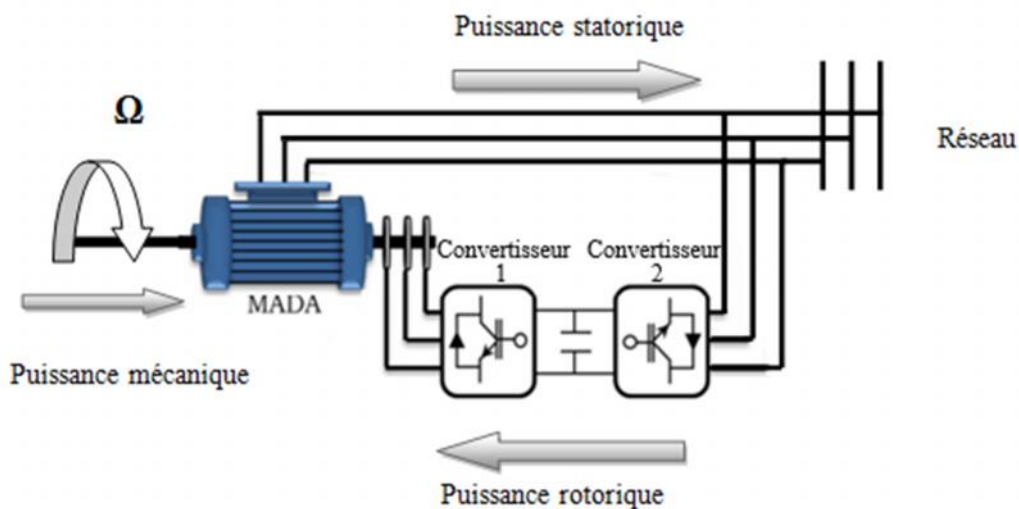


Figure 1.9. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.

1.3.2.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

La figure 1.10 montre que la puissance est alors 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 générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [7], [12].

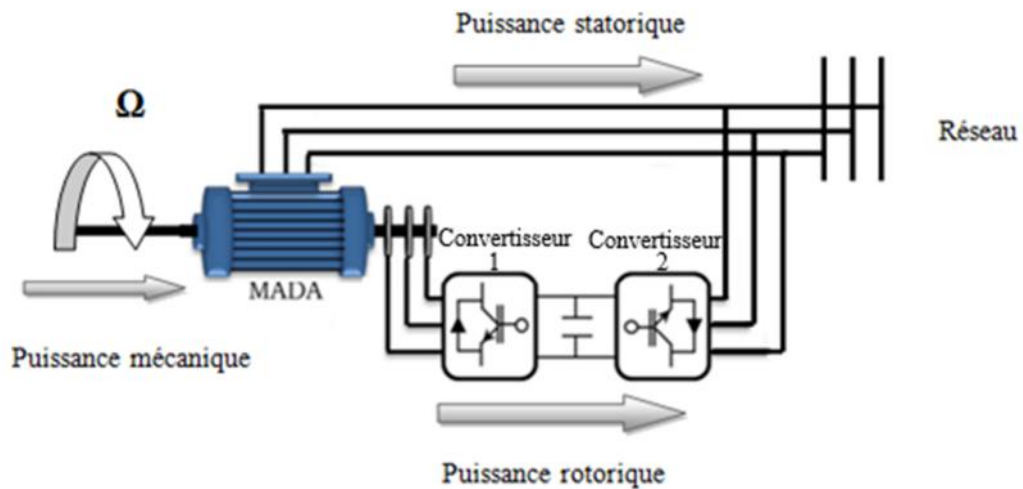


Figure 1.10. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [13].

1.3.3. Différent structure de la MADA

1.3.3.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure 1.11). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [14]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor [15].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse [16].

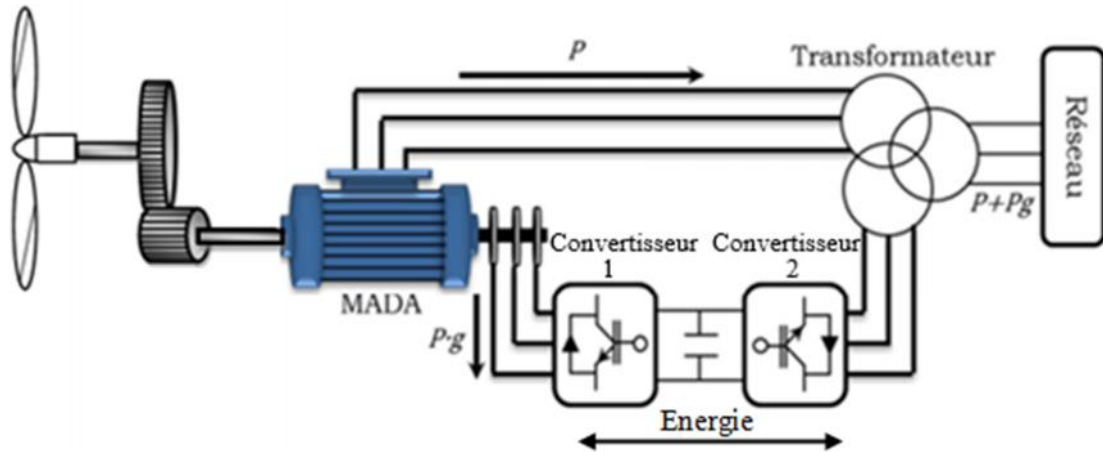


Figure 1.11. Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables.

A. MADA – structure de Kramer

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure 1.12, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [17].

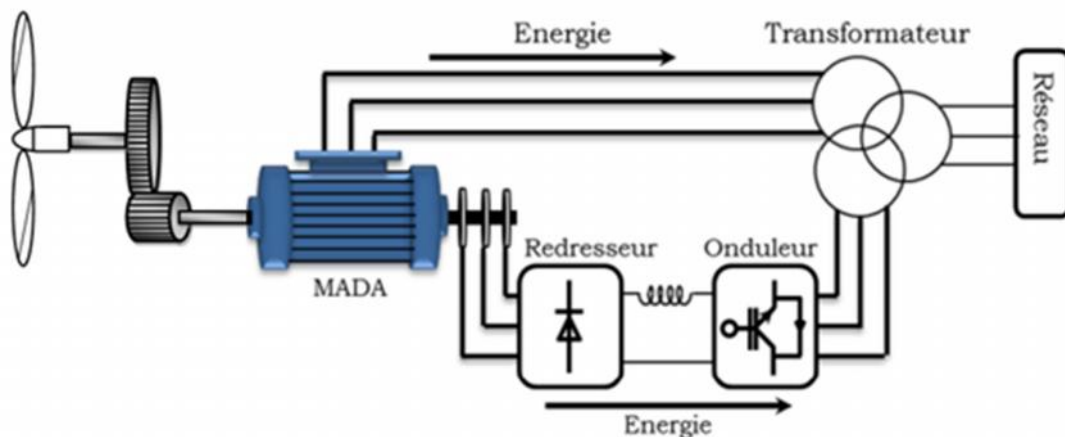


Figure 1.12. MADA – structure de Kramer.

B. MADA à énergie rotorique dissipée

La Figure 1.13 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone.

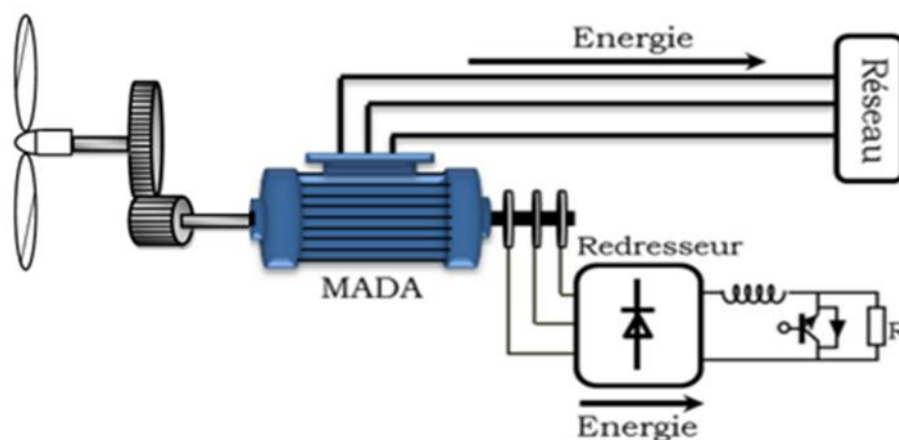


Figure 1.13. MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

C. MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Figure 1.14) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ».

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. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [18].

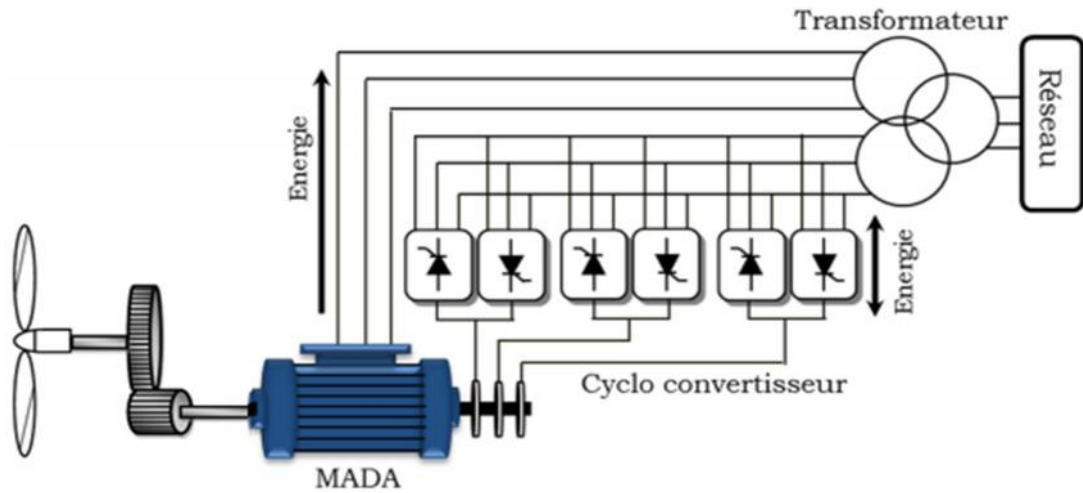


Figure 1.14. Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

1.3.3.2. Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure 1.15).

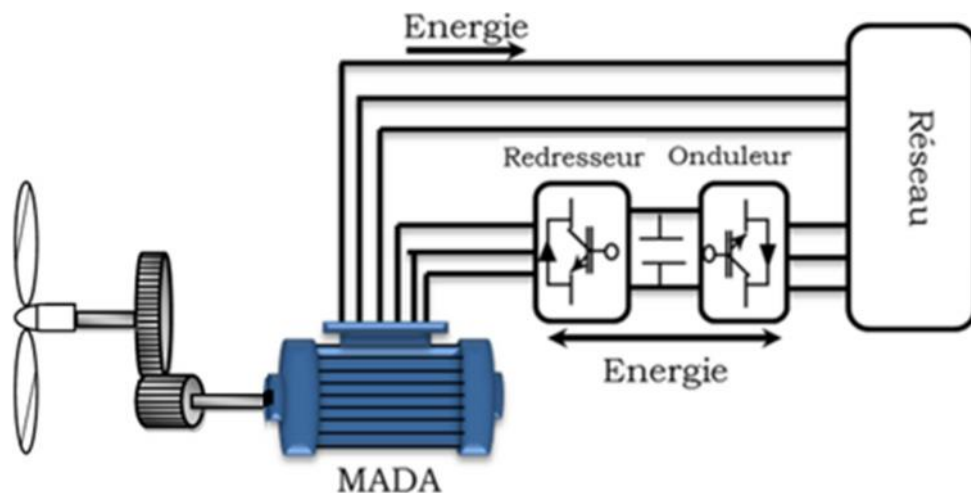


Figure 1.15. Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

1.4. Les différents types de commande de la MADA

Les performances et la production de puissance ne dépendent pas uniquement de la MADA, mais aussi de la manière avec laquelle les convertisseurs associés à cette machine sont contrôlés, la nécessité d'imposer à ces dispositifs un fonctionnement fiable et robuste, avec de hautes performances statiques et dynamiques conduit à des cahiers de charges de plus en plus contraignants.

La commande de la MADA constitue l'un des domaines les plus riches en termes d'algorithmes, d'outils d'analyse et de techniques de design, toutefois toutes ces techniques sont basées sur la connaissance des paramètres du système à contrôler

Plusieurs techniques de commande de la MADA sont proposées parmi elles :

1.4.1. La commande directe du couple DTC

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs des onduleurs à partir des valeurs calculées du flux et de l'angle .

Les changements d'état des interrupteurs sont liés à l'évolution de l'état électromagnétique du moteur. Afin de déterminer la commande des interrupteurs des deux onduleurs, il faut pour cela disposer d'un modèle approprié de la machine au celui ci donne à chaque instant :

- les flux réels dans la machine.
- le couple réel qu'elle développe.

Les flux sont calculés et comparés à leurs valeurs de référence pour déterminer les instants de commande des interrupteurs [19].

1.4.2. La commande directe de puissance DPC

La stratégie de commande directe de puissance DPC sur un système de conversion d'énergie éolienne basé sur la MADA dans le cas où les conditions de tension de réseau déformée.

La cinquième et la septième harmoniquement déformée de la puissance injectée au réseau est mentionnée comme une base. Considérant que la production d'énergie éolienne devrait se concentrer sur la qualité de l'énergie injectée dans le réseau, puissance active et réactive du stator sans oscillation est sélectionnée comme cible de maîtrise harmonique [20].

1.4.3. La commande vectorielle à flux orienté

Le but de la commande vectorielle est de rendre le comportement de la machine asynchrone à double alimentation semblable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée dont le couple est régi par le courant d'induit et le courant inducteur. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux résultant, La Figure 1.16 illustre le principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation [21].

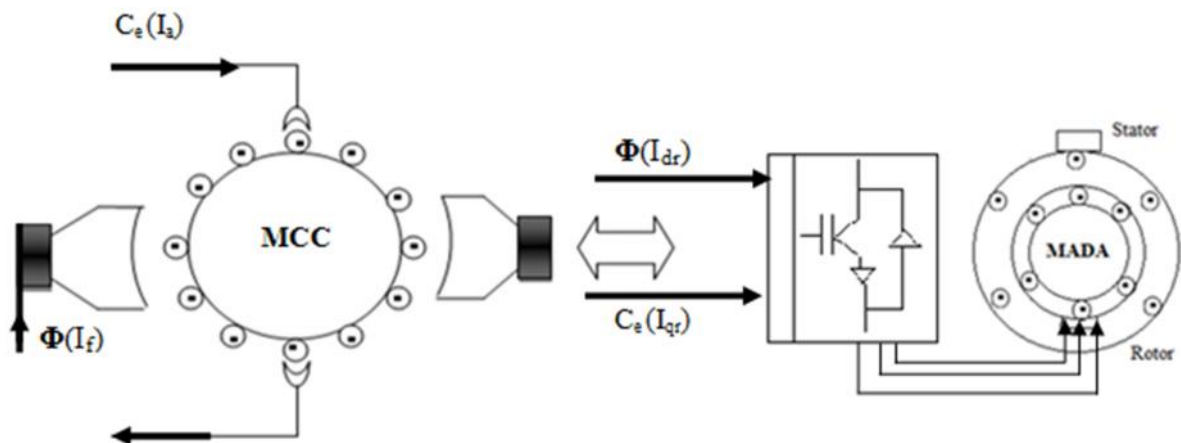


Figure 1.16. Analogie entre la commande de la machine à courant continue et la MADA

1.4.3.1. La commande par mode glissant

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [17].

Le succès de cette commande est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase [22].

1.4.3.2. Les avantages de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant a de multiples avantages, comme la haute précision, la stabilité, la simplicité, un temps de réponse très faible et notamment la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour traiter les systèmes à modèle imprécis, dû soit à un problème d'identification soit à un problème de modélisation [22].

1.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons effectué une présentation de différentes solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un aperçu sur les notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement. La seconde partie de ce chapitre nous a permis de présenter les avantages et les inconvénients des différentes machines adapté à un système éolien.

Pour le fonctionnement d'une machine asynchrone double alimentation connecté au réseau apparait comme une solution intéressante, l'intégration des convertisseurs est nécessaire pour améliorer les performances et la production de puissance mais pour contrôler l'échange de puissance entre la machine et le réseau, il est nécessaire d'introduire une stratégie de commande.

Nous orientons notre travail en premier lieu vers une étude de la commande en mode glissant de la GADA.

Chapitre 2

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation du système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation.

Nous modélisons chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne, la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur dans les différents repères et nous verrons ensuite la modélisation et la commande de l'onduleur.

2.2. Modélisation de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne basée sur une GADA

2.2.1. Schéma de la structure étudié

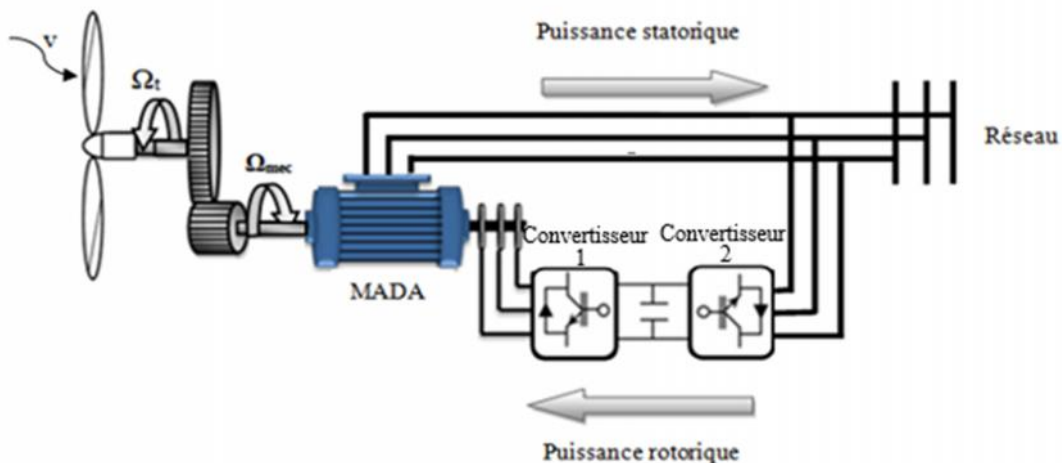


Figure 2.1. Générateur éolien basée sur une MADA connectée au réseau.

2.2.2 Modélisation de la vitesse du vent

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois [3].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent

à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [23].

2.2.3 Modélisation de la turbine

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.1)$$

Où :

ρ est la densité d'air ($\rho \approx 1.22 \text{ kg/m}^3$).

S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle R où $S = \pi R^2$.

v est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, P_{aero} dépend du coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par :

$$P_{aero} = C_p(\lambda) \cdot P_v \quad (2.2)$$

C_p Coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0,593). Le C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pâles, de leur angle de calage et de la vitesse de rotation.

Le couple aérodynamique est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine ω_t :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\omega_t} = \frac{\rho S v^3 C_p(\lambda)}{2 \cdot \omega_t} \quad (2.3)$$

La relation de vitesse λ est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (2.4)$$

2.2.4. Modélisation du multiplicateur

La turbine est normalement couplée à l'axe du générateur par un multiplicateur dont le gain de vitesse G est choisi afin de placer la vitesse d'axe du générateur dans une marge de vitesse désirée. En négligeant les pertes de transmission, le couple et la vitesse de la turbine se sont rapportés au côté du générateur par [24] :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (2.5)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.6)$$

C_g est le couple de la génératrice.

Ω_{mec} est la vitesse de rotation de la génératrice.

2.2.5. Modélisation de l'arbre mécanique

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 du générateur. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle du générateur J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor du générateur [25].

$$J = \frac{J}{G^2} + J_g \quad (2.7)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale C_{mec} appliqué au rotor :

$$C_{mec} = J \cdot \frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} \quad (2.8)$$

Le couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{visq} et le couple issu du multiplicateur C_t .

$$C_{mec} = C_t - C_{em} - C_{visq} \quad (2.9)$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{visq} = f. \tag{2.10}$$

Avec :

f : coefficient de frottement visqueux

2.2.6. Modélisation de machine asynchrone à double alimentation

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles [8], [10]. La figure 2.2 représente l'enroulement triphasé de la MADA.

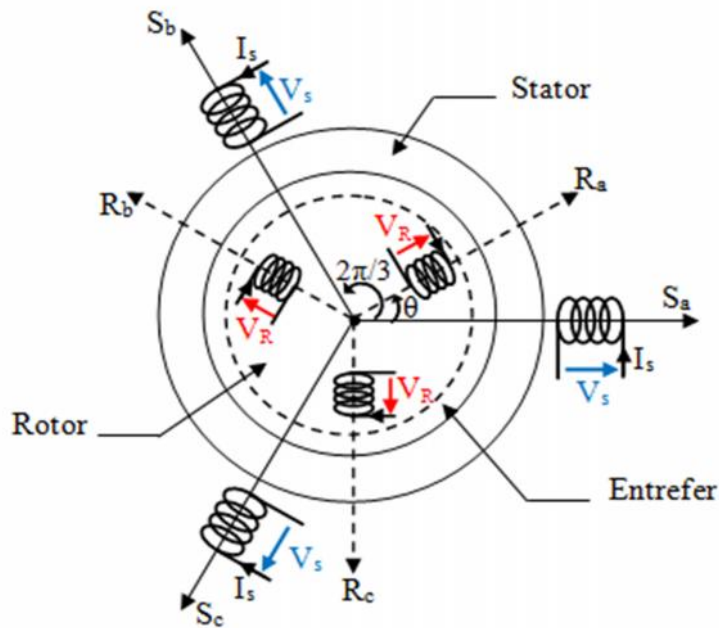


Figure 2.2. Représentation de la GADA dans le repère (a,b,c).

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [26] :

- L'entrefer est supposé à épaisseur constante.

- La machine n'est pas saturée.
- L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale.
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale.
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courants de FOUCAULT ni d'hystérésis).
- L'influence de l'effet de peau est négligée.

2.2.6.1. Equations de la MADA

On considère que la machine est alimentée par deux systèmes de tensions sinusoïdales triphasées équilibrées (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) de pulsation $\omega_s = 2 \cdot f_s$ et (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) de pulsation $\omega_r = 2 \cdot f_r$ [27].

Les équations générales des tensions de la machines s'obtiennent en considérant que la tension appliquée à chacune des enroulements est la somme de la tension ohmique et de la chute de tension inductif.

$$V = Ri + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.11)$$

A. Les équations électriques

Pour les phases statorique et rotoriques on a :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{\partial \phi_{sabc}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{\partial \phi_{rabc}}{\partial t} \quad (2.13)$$

Les vecteur de tension statorique et rotorique sont définies par :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}$$

Les vecteur des résistances statorique et rotorique sont définies par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Les vecteurs des courants statoriques et rotoriques sont définies par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

B. Les équations magnétiques

Les équations magnétiques de la GADA sont données par :

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}] \quad (2.14)$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rr}] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}] \cdot [i_{sabc}] \quad (2.15)$$

Avec:

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

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{rs}] = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

D'après les relations précédentes, on aura:

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad (2.17)$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rr}] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad (2.18)$$

Finalement

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{\partial}{\partial t} [L_{ss}] \cdot [i_{sabc}] + \frac{\partial}{\partial t} [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}] \quad (2.19)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{\partial}{\partial t} [L_{rr}] \cdot [i_{rabc}] + \frac{\partial}{\partial t} [M_{rs}] \cdot [i_{sabc}] \quad (2.20)$$

C. L'équation mécanique

L'équation mécanique est exprimé par :

$$J \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial t} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (2.21)$$

2.2.6.2. Transformation de park

Afin de déterminer les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d,q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente [28].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé équilibré (abc) au système biphasé (d,q), afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le module physique de la machine (Figure 2.3).

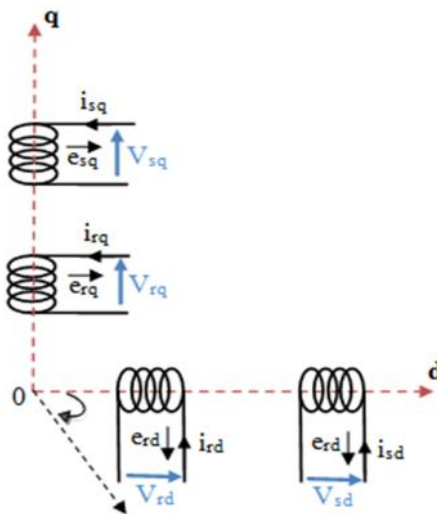


Figure 2.3. Représentation schématique de la GADA dans le repère (d,q).

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice de park $P(\theta)$:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La matrice inverse de Park est donné par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Alors, le modèle électrique général de la machine asynchrone obtenue en utilisant la transformation de Park est donné par les équations suivantes [24], [29], [30] :

Les tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{\partial \phi_{sd}}{\partial t} - \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} + \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} - \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} + \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.24)$$

Les flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (2.25)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \\ P_r = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \\ Q_r = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Induction cyclique statorique de la machine.

$L_r = l_r - M_r$: Induction cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Induction mutuelle cyclique entre stator et le rotor de la machine.

A partir des équations des flux (2.25) in tire les expressions des courants :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\phi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{rd} = \frac{\phi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\phi_{rd}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.27)$$

L'équation de couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{sq} i_{rd} - \phi_{sd} i_{rq}) \quad (2.28)$$

Avec:

P : Nombre de paires de pôles.

En régime permanent :

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques.}$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques.}$$

$$\omega_r = p \cdot \omega_s \quad (2.29)$$

Avec:

ω_m : La pulsation mécanique.

v_m : La vitesse mécanique.

D'après les équations (2.24), (2.25) on obtient l'équation matricielle qui rassemble les différents équations électriques de la machine dans le repère (d,q) :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial i_{sd}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{sq}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{rd}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{rq}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.2.6.3. Choix du référentiel

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe [31].

A partir du système d'axe (d,q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

A. Référentiel lié au stator

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} + \omega \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} - \omega \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

B. Référentiel lié au rotor

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \omega_s \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = 0 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{\partial \psi_{sd}}{\partial t} - \omega_s \psi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

C. Référentiel lié au champ tournant

Il permet correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \omega_s \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_s - \omega \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \psi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (2.33)$$

2.3. Modélisations du convertisseur de puissance

2.3.1. La technique SVM (Space Vector Modulation)

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique injectée au réseau, nous proposons la technique de la MLI vectorielle, en anglais Space Vector Modulation (SVM), qui

permet de réduire au minimum les harmoniques des courants statoriques. Le principe de cette technique repose sur la sélection de la séquence et le calcul des temps de conduction ou d'extinction.

2.3.2 Principe de la SVM

Dans cette modulation on représente par seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteur complémentaires. Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation T [32].

Elle est basée sur la représentation spatiale du vecteur des tensions dans le repère fixe. Les huit états de commutation (Figure 2.4) peuvent s'exprimer dans le plan (α, β) par huit vecteurs $(\vec{V}_0, \vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6, \vec{V}_7)$ parmi lesquels, deux sont nuls \vec{V}_0 et \vec{V}_7 [11]. Ils correspondent respectivement à $S(0\ 0\ 0)$ et $S(1\ 1\ 1)$. Les autres sont appelés états actifs.

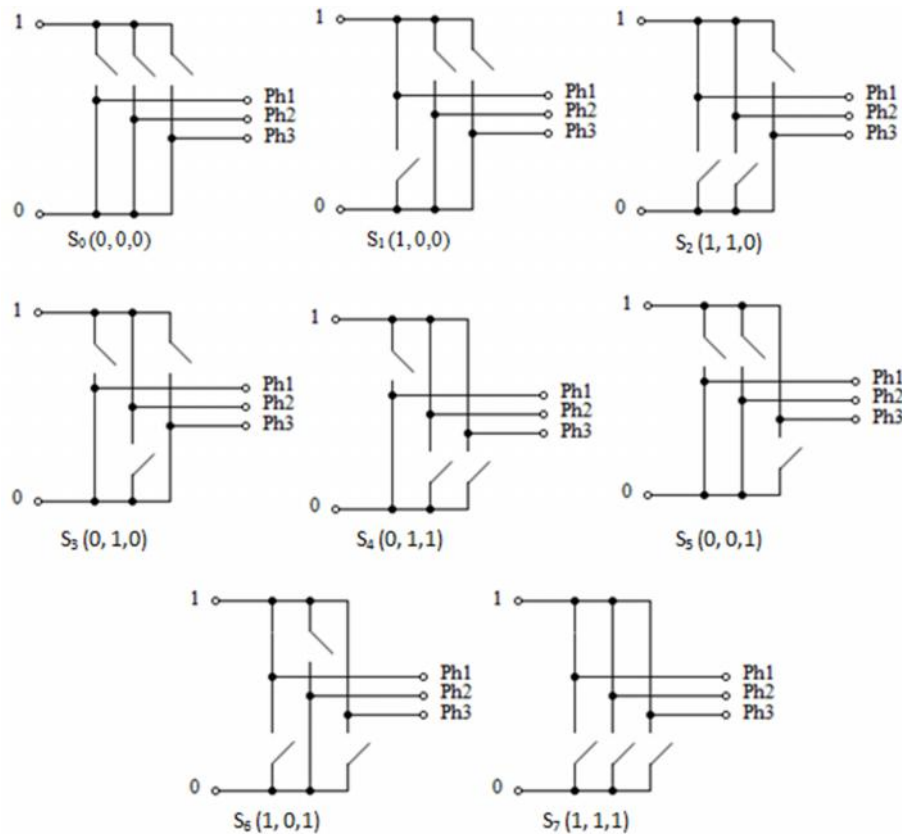


Figure 2.4. Les états de l'onduleur.

La représentation dans le plan de ces vecteurs, équi-réparti tous les 60°, permet de déterminer un hexagone (Figure 2.5) à l'intérieur duquel le vecteur tension de référence \vec{V}_{ref} doit s'y trouver pour éviter la saturation de la grandeur de commande :

$$\vec{V}_{ref} = V_{\alpha} + j V_{\beta} = \frac{2}{3} (v_{ao} + av_{bo} + a^2 v_{co}) = \frac{2}{3} (S_a + aS_b + a^2 S_c) \quad (2.34)$$

Avec:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

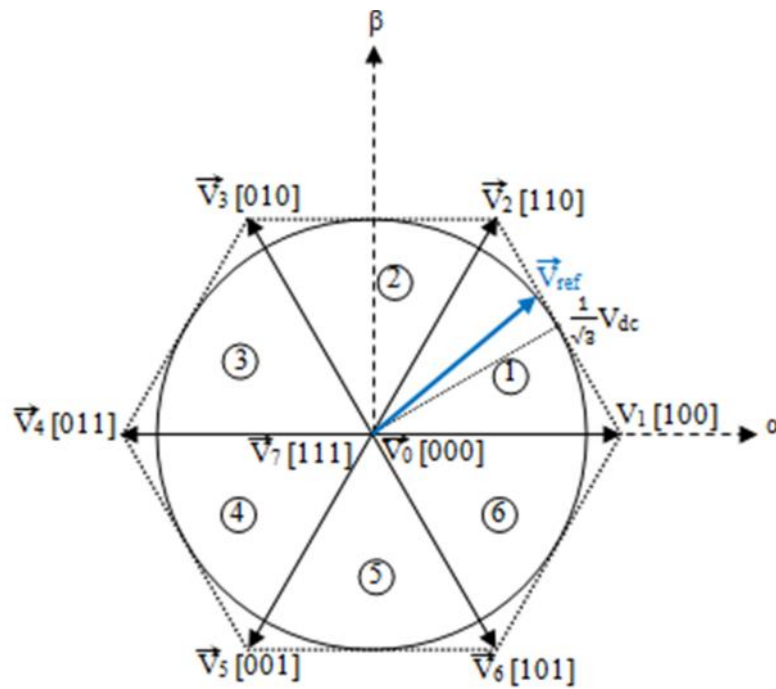


Figure 2.5. Représentation des états de l'onduleur dans le repère $\alpha - \beta$.

Les vecteurs tensions de six états actifs peuvent s'écrire en fonction des positions de l'hexagone appelés secteur k , ou $k = 1, 2, \dots, 6$:

$$\vec{V}_k = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} \quad (2.35)$$

Chaque vecteur de référence \vec{V}_{ref} dans l'hexagone peut être exprimé comme une combinaison de deux vecteurs tensions actives adjacentes et deux vecteurs tensions d'états nuls. En se reportant à la Figure 2.5, si le vecteur de référence est dans le secteur k, les vecteurs actifs adjacents sont \vec{V}_k et \vec{V}_{k+1} (avec $k + 1 = 1$ pour $k = 6$).

Tableau 2.1. Valeurs de tensions correspondantes.

Vecteurs d'état $\vec{v}_i (S_a S_b S_c)$	Tensions simples			Tensions composées		
	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
$\vec{v}_0(000)$	0	0	0	0	0	0
$\vec{v}_1(100)$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	1	0	-1
$\vec{v}_2(110)$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	1	-1
$\vec{v}_3(010)$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	-1	1	0
$\vec{v}_4(011)$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	1
$\vec{v}_5(001)$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	-1	1
$\vec{v}_6(101)$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	-1	0
$\vec{v}_7(111)$	0	0	0	0	0	0

2.3.3. Les étapes de la réalisation de la méthode SVM

2.3.3.1. Détermination des tensions de références V_α, V_β

Les tensions V_α et V_β sont issues directement de la transformation de Clarke comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \tag{2.36}$$

Le bloc de détermination de V_α et V_β sous Simulink est présenté par la figure 2.6 :

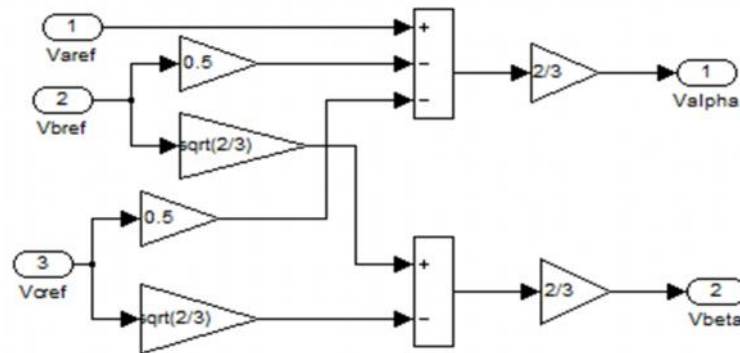


Figure 2.6. Bloc de la transformation de Clarke.

2.3.3.2. Détermination des secteurs

Pour l'application de technique SVM, il est demandé de déterminer le secteur ou le vecteur de tension à l'intérieur. Considérant que l'expression du vecteur dans la coordonnée $\alpha - \beta$ est adaptée pour la commande la mise œuvre. La procédure suivante est utilisée pour la détermination du secteur.

Quand $V_\alpha > 0$, $A=1$; quand $\sqrt{3} V_\beta - V_\alpha > 0$, $B=1$; quand $\sqrt{3} V_\alpha + V_\beta < 0$, $C=1$.

Le secteur contenant le vecteur de tension peut être décidé en fonction de $N=A+2B+4C$, énumérés dans le tableau 2.2

Tableau 2.2. Détermination des secteurs

Secteur	I	II	III	IV	V	VI
N	3	1	5	4	6	2

Le bloc de détermination du secteur sous Matlab/Simulink est présenté par la figure 2.7 :

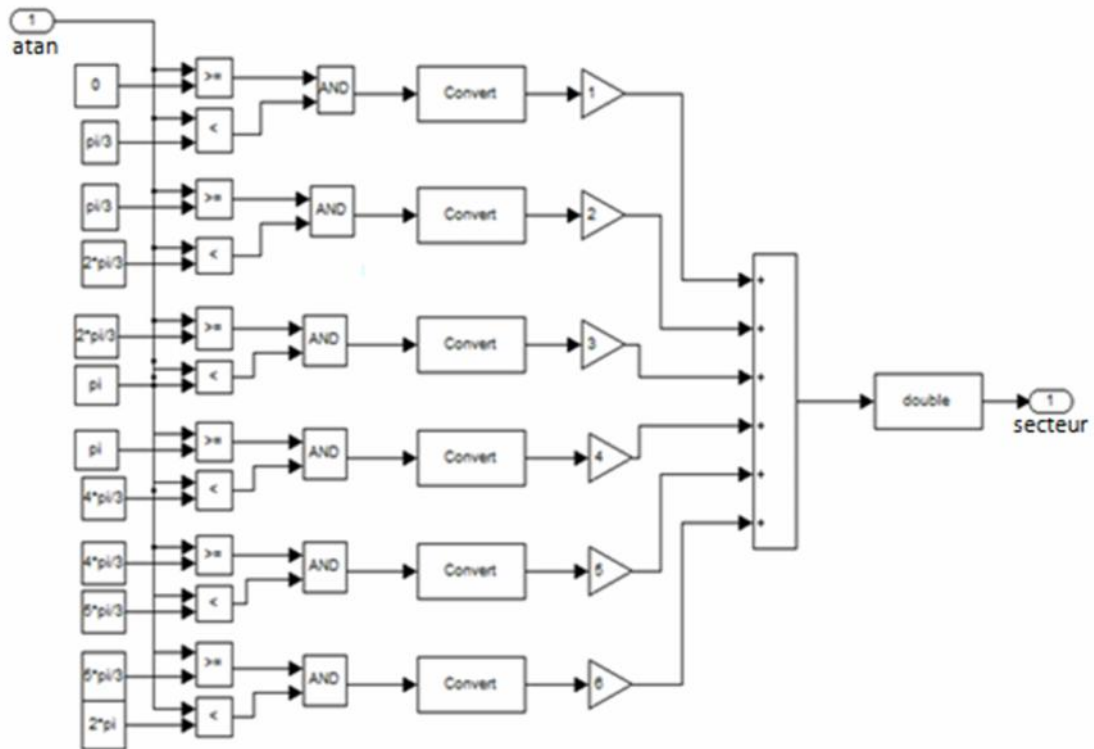


Figure 2.7. Bloc de détermination des secteurs.

2.3.3.3. Calcul des temps de fonctionnement de vecteurs fondamentaux

Le tableau 2.3 présente les durées de fonctionnement des vecteurs fondamentaux en fonction de N avec T_1 et T_2 se réfèrent à des durées de fonctionnement de deux adjacents non nuls des vecteurs spatiaux de tension dans la même zone.

Tableau 2.3. Les durées de fonctionnement des vecteurs fondamentaux.

N	1	2	3	4	5	6
T_1	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
T_2	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

Avec :

$$X = \sqrt{3} \frac{T}{V_{dc}} V_{\beta} \tag{2.37}$$

$$Y = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T}{V_{dc}} V_{\beta} + \frac{3}{2} \frac{T}{V_{dc}} V_{\alpha} \tag{2.38}$$

$$Z = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T}{V_{dc}} V_{\beta} - \frac{3}{2} \frac{T}{V_{dc}} V_{\alpha} \tag{2.39}$$

Le bloc qui permet de calculer les variables X, Y et Z est présenté par la figure 2.8 :

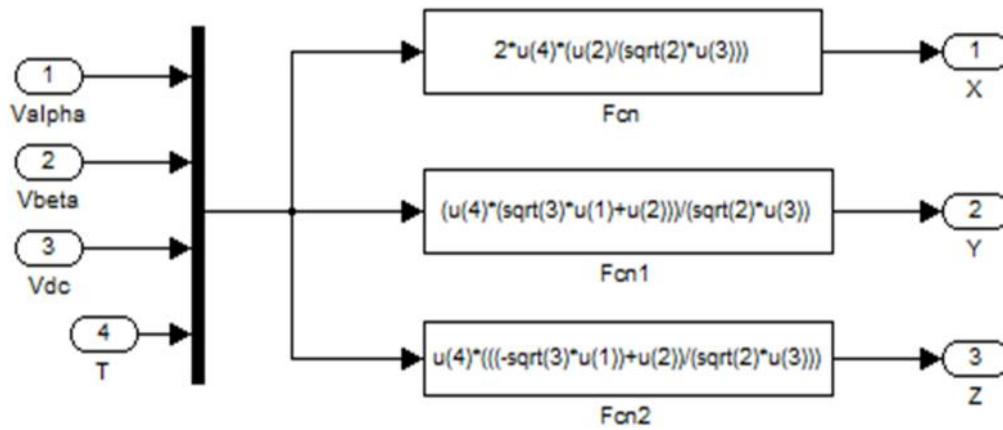


Figure 2.8. Bloc de calcul des variables X, Y et Z.

2.3.3.4. Génération de forme d'onde

La relation entre N et les temps de fonctionnement du commutateur est indiquée dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. La relation entre N, T_{cm}, T_a, T_b et T_c.

N	1	2	3	4	5	6
T _{cm1}	T _b	T _a	T _a	T _c	T _b	T _c
T _{cm2}	T _a	T _c	T _b	T _b	T _c	T _a
T _{cm3}	T _c	T _b	T _c	T _a	T _a	T _b

Avec :

$$T_a = (T - T_1 - T_2) / 2 \quad (2.40)$$

$$T_b = T_a + T_1 \quad (2.41)$$

$$T_c = T_b + T_2 \quad (2.42)$$

T_{cm1} , T_{cm2} et T_{cm3} sont les temps de fonctionnements des trois phases respectivement. Le modèle de la technique SVM est illustré par la figure 2.9.

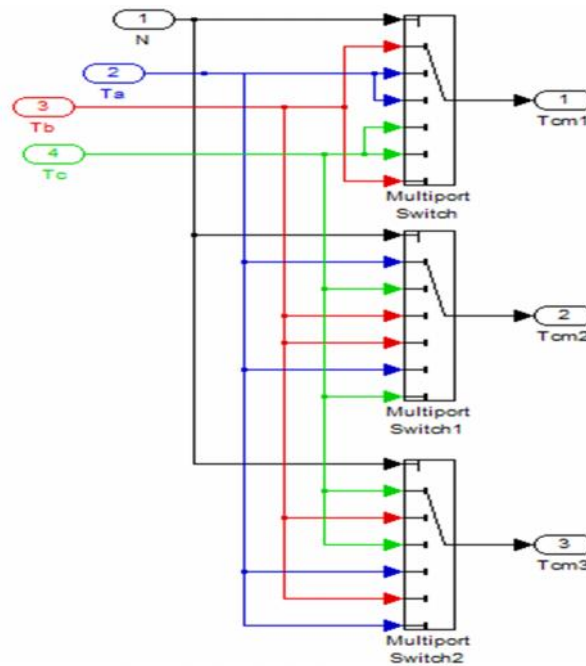


Figure 2.9. Bloc de détermination de T_{cm1} , T_{cm2} et T_{cm3} .

2.4. Conclusion

Ce second chapitre a été dédié à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

On a d’abord présenté le modèle de la partie mécanique (turbine, multiplicateur), puis on a modélisé les différentes parties de la machine (MADA) dans les repères triphasé et Park, et enfin, nous avons achevé ce chapitre par la modélisation des convertisseurs statiques.

Le chapitre suivant sera consacré à la commande de la génératrice asynchrone double alimentation par la technique vectorielle.

Chapitre 3

3.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner[33].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

La commande par mode glissant des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive qu'à partir des années 80. La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement [17] [34].

Dans le présent chapitre, nous présenterons le concept général de la commande des systèmes à structure variable et son application à la GADA. En premier lieu nous introduisons des notions générales de la commande par mode de glissement mono variable. Ensuite, nous étudierons la commande par mode de glissement avec une surface de commutation non linéaire et quelques phénomènes liés à cette commande. Enfin nous présenterons l'application de cette technique de commande sur la génératrice asynchrone à double alimentation.

3.2. Modèle de la GADA en vue de la commande

En orientant un des flux, le modèle obtenu de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui résulte l'est également. Un control vectorielle de cette machine à été conçu en orientant le repère de Park (d,q) suivant la tension statorique((d,q) lié au champ tournant est choisie de telle façon que q coïncide avec V_s).

Le flux ϕ_s est aligné selon l'axe d, pour cette orientation on doit avoir un facteur de puissance unitaire coté statorique ($i_{sd}=0$) et ($i_{sq}=i_s$), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s^* \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \tag{3.1}$$

$$\begin{cases} \hat{V}_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \phi_s \end{cases} \tag{3.2}$$

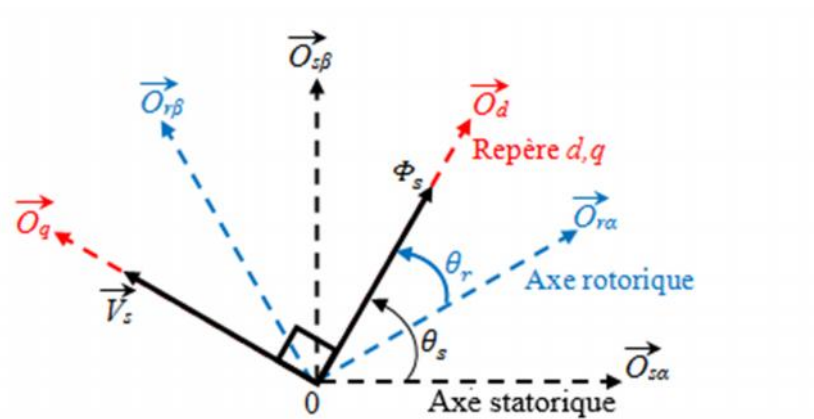


Figure3.1. Orientation du repère de Park.

A partir des équations du second chapitre (2.26) et (2.33) on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \tag{3.3}$$

Après le traitement et le remplacement des différentes équations nous aurons :

$$\begin{cases} \frac{\partial i_{rd}}{\partial t} = \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r i_{rd} + L_r \sigma \omega_r i_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{\partial \phi_s}{\partial t}) \\ \frac{\partial i_{rq}}{\partial t} = \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rq} - R_r i_{rq} + L_r \sigma \omega_r i_{rd} - \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_s) \end{cases} \quad (3.4)$$

$\sigma = L_r \cdot (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$: Coefficient de dispersion entre les enroulements d et q.

A partir des équations (3.2), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (3.5)$$

D'après (2.27) et (3.5) les puissances active et réactive statoriques peuvent être écrites selon les courants rotoriques comme suit:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.6)$$

3.3. Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement [34]. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Le contrôle par mode glissant consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation autour de celle-ci.

Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans

la seconde phase on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure 3.2 [22].

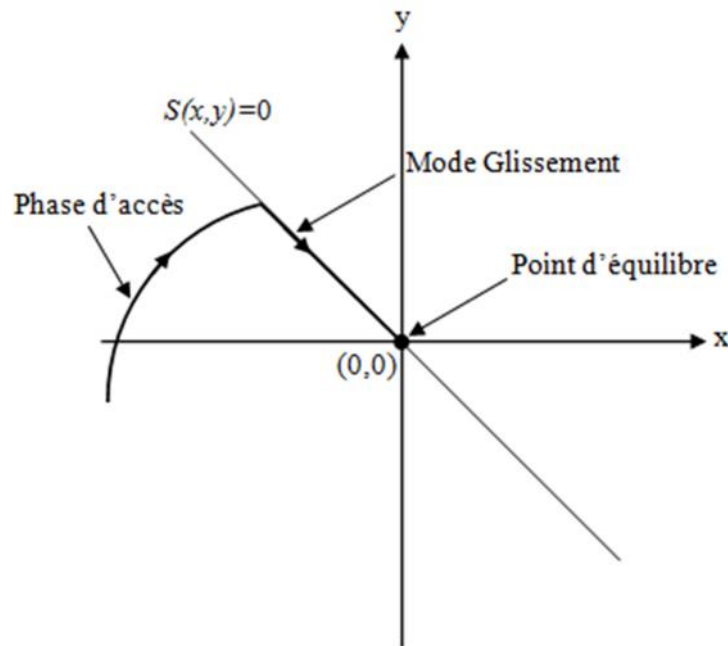


Figure 3.2. Modes de fonctionnement dans le plan de phase.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [22]:

- **Le mode de convergence (MC)** : durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation $S(x,y)=0$ et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- **Le mode de glissement (MG)** : durant lequel la variable d'état atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x,y)=0$.
- **Le mode de régime permanent (MRP)** : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

3.4. Conception de la commande par mode de glissement

La conception de l'algorithme de commande par mode glissant prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par [34]:

- Choix des surfaces de glissement;
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant;
- Détermination de la loi de commande.

3.4.1. Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme de fonction nécessaires. Ces deux facteurs dépendent de l'application et de l'objectif visés.

Pour un système défini par l'équation suivante, le vecteur de surface a la même dimension que le vecteur de commande (u).

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][U] \quad (3.7)$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi la surface représente le comportement dynamique désiré du système. Nous trouvons dans la littérature différentes formes de la surface de glissement et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à une surface non linéaire.

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler (x), elle est donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (3.8)$$

Avec :

λ : coefficient positif,

$e(x) = \dot{x} - x$: L'écart de la variable à réguler,

r : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande, tel que $\frac{\partial S}{\partial u} \neq 0$ assurant la contrôlabilité; $S(x)$ est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $S(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

3.4.2. Condition de d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation [10].

On présente deux types de conditions qui sont :

3.4.2.1 La fonction discrète de commutation

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme:

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (3.9)$$

3.4.2.2 La fonction de LYAPUNOV

La fonction de Lyapunov, C'est une fonction scalaire positive ; $V(x) > 0$, pour les variables d'état du système. Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande pour l'étude de la robustesse, elle garantit la stabilité du système non linéaire et l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence; elle a la forme suivante [34].

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (3.10)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (3.11)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$\dot{V}(x) < 0 \quad (3.12)$$

L'équation (3.10) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface du glissement exprimée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux cotés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal [35].

3.4.2.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilité (U_n).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (3.13)$$

U_{eq} correspond à la commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande est équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$.

Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander. Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{min} et U_{max} .

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence (3.9) en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

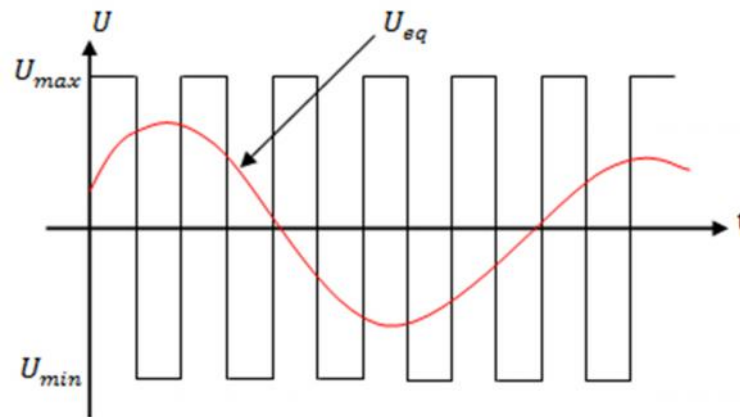


Figure 3.3. Interprétation de U_{eq}

Afin de mettre en évidence le développement précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (3.7), il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande(U).

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3.14)$$

En remplaçant les expressions (3.7) et (3.13) dans l'expression (3.14), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \{[A][x] + [B]U_{eq}\} + \frac{\partial S}{\partial x} [B]U_n \quad (3.15)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent la surface est nulle et par conséquent sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B] \right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot [A][x] \quad (3.16)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B] \neq 0 \quad (3.17)$$

Durant le mode de convergence et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (3.15), nous trouverons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B] \cdot U_n \quad (3.18)$$

Et la condition d'attractivité $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$ devient :

$$S(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B] \cdot U_n < 0 \quad (3.19)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B]$.

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais donnée par l'expression :

$$U_n = k \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (3.20)$$

Où:

k : est un gain.

Le signe de k doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot [B]$.

La figure 3.4 représente la fonction de la commande discrète de type relais :

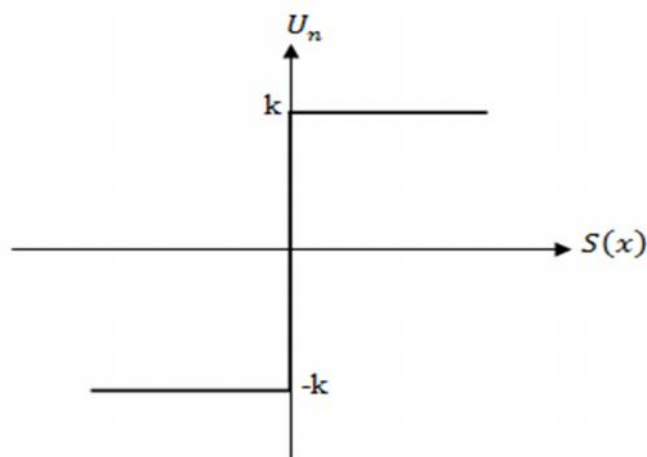


Figure 3.4. Fonction «sign».

3.4.2.4. Phénomène de broutement

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu par le broutement soit en anglais "chattering". En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe (sgn). Ce phénomène de broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode glissant, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou au moins réduire ses effets [36]. La figure 3.5 représente le phénomène de broutement.

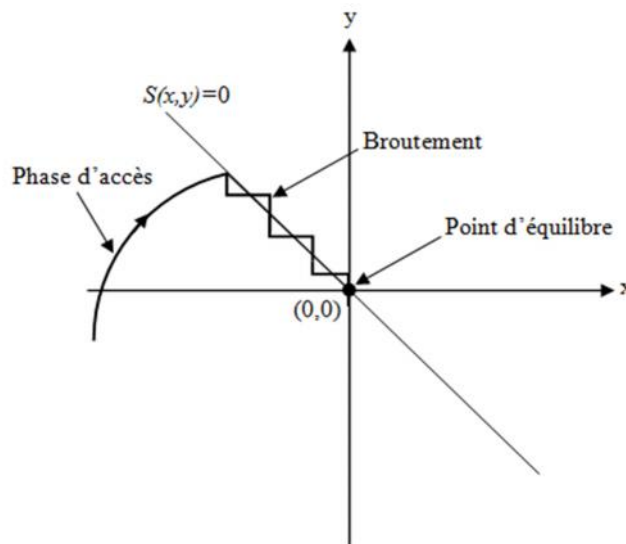


Figure 3.5. Phénomène de broutement «Chattering ».

A. Fonction de saturation

Néanmoins, le broutement peut être réduit (ou éliminé) en remplaçant la fonction signe (sign) par une fonction de saturation (sat) adéquate qui filtre ces hautes fréquences (figure 3.6). Cette fonction de saturation peut être exprimée par :

$$\begin{cases} sat(S(x)) = 1 \text{ si } S(x) > \varepsilon \\ sat(S(x)) = -1 \text{ si } S(x) < -\varepsilon \\ sat(S(x)) = \frac{S(x)}{\varepsilon} \text{ si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3.21)$$

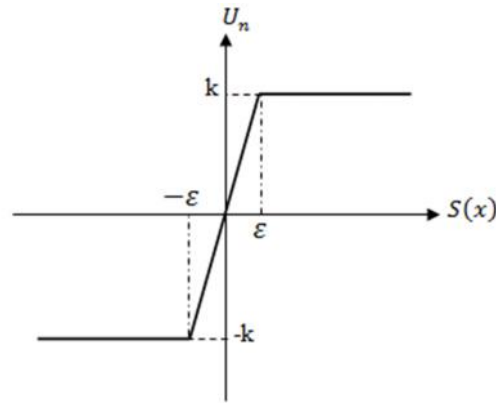


Figure 3.6. Fonction de saturation «sat».

Alors, on obtient la commande douce suivante :

$$U_n = \begin{cases} k \cdot \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \\ \frac{k}{\varepsilon} \cdot \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \end{cases} \quad (3.22)$$

B. Commande linéaire par des régulateurs PI

Le dispositif de la commande en mode glissant qui fonctionne en parallèle avec une commande linéaire. Ce contrôleur est un système flexible qui nous permet d'avoir des meilleurs caractéristiques et une robustesse aux perturbations.

3.5. Domaine d'application du réglage par mode glissant

La technique par mode glissant à connue des développements importants dans le domaine de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatique, il existe des valeurs fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : soit complètement ouvertes ou fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz [37].

3.6. Application de la commande par mode glissant au contrôle de la puissance active et réactive du GADA

Après avoir présenté la théorie de la commande par mode glissant avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande par mode glissant au générateur asynchrone à double alimentation (GADA) afin de valider l'approche présentée par des résultats de simulation.

Nous avons :

$$\begin{cases} P_s = -K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd} \cdot \Phi_{rq} \\ Q_s = K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd} \left(\frac{L_r}{M} \Phi_{sd} - \Phi_{rq} \right) \end{cases} \quad (3.23)$$

Avec :

$$K_s = 1.5M / (L_r \cdot L_s \cdot \sigma)$$

$$\sigma = (L_r \cdot L_s - L^2 m) / (L_r \cdot L_s)$$

Comme le flux statorique est constant, pour une période de temps constante l'équation (3.23) devient comme suite :

$$\begin{cases} \Delta P_s = -K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd} \cdot \Delta \Phi_{rq} \\ \Delta Q_s = -K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd} \cdot \Delta \Phi_{rd} \end{cases} \quad (3.24)$$

Les équations de la tension rotorique s'exprime :

$$\begin{cases} V_{rd} = -\frac{1}{T_s} \cdot \frac{\Delta Q_s}{K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd}} + g \cdot \frac{P_s}{K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd}} \\ V_{rq} = -\frac{1}{T_s} \cdot \frac{\Delta P_s}{K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd}} + g \cdot \left(\frac{L_r}{M} \Phi_{sd} - \frac{Q_s}{K_s \cdot \omega_s \cdot \Phi_{sd}} \right) \end{cases} \quad (3.25)$$

Avec :

T_s : est une constante du temps.

La surface du glissement est imposée pour avoir le mode glissant pour une fonction du premier ordre

$$\begin{cases} S_{Q_s} + jS_{P_s} \\ S = e_{Q_s} + c_{Q_s} \frac{\partial e_{Q_s}}{\partial t} + j(e_{P_s} + c_{P_s} \frac{\partial e_{P_s}}{\partial t}) \end{cases} \quad (3.26)$$

Avec :

$$e_{Qs} = Q_{sref} - Q_s$$

$$e_{Ps} = P_{sref} - P_s$$

c_{Qs} et c_{Ps} sont des constante sélectionnées afin de satisfaire la linéarisation de la commande.

K_s : est une constante positive qui représente le gain de mode glissant.

La tension de référence est donnée par :

$$V_{r-ref} = V_{rd-ref} + jV_{rq-ref} \tag{3.27}$$

De l'équation de la surface du glissement (3.26), on tire l'erreur dynamique de la puissance active et réactive :

$$\begin{cases} c_{Qs} \frac{\partial e_{Qs}}{\partial t} = -e_{Qs} \\ c_{Ps} \frac{\partial e_{Ps}}{\partial t} = -e_{Ps} \end{cases} \tag{3.28}$$

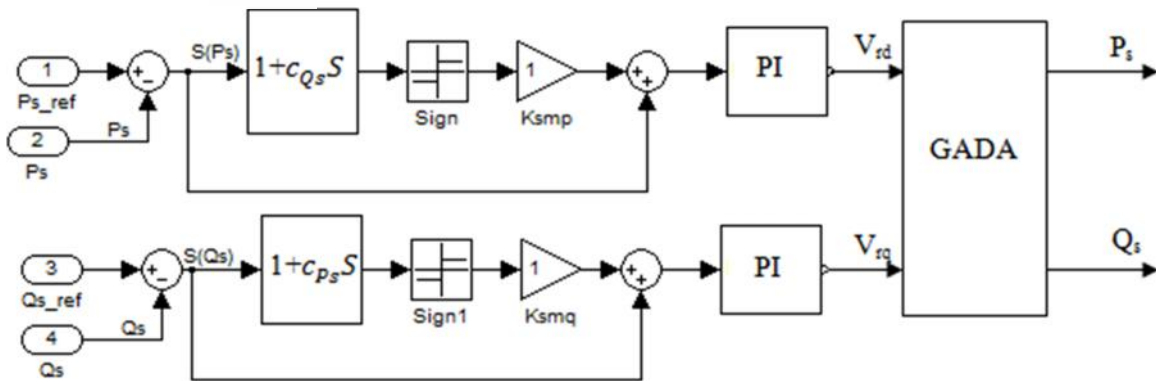


Figure 3.7. Schéma de commande de la puissance active et réactive.

3.6.1. Schéma bloc de simulation

Le schéma global du système étudié est montré sur la figure 3.8. Ce système est implanté sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

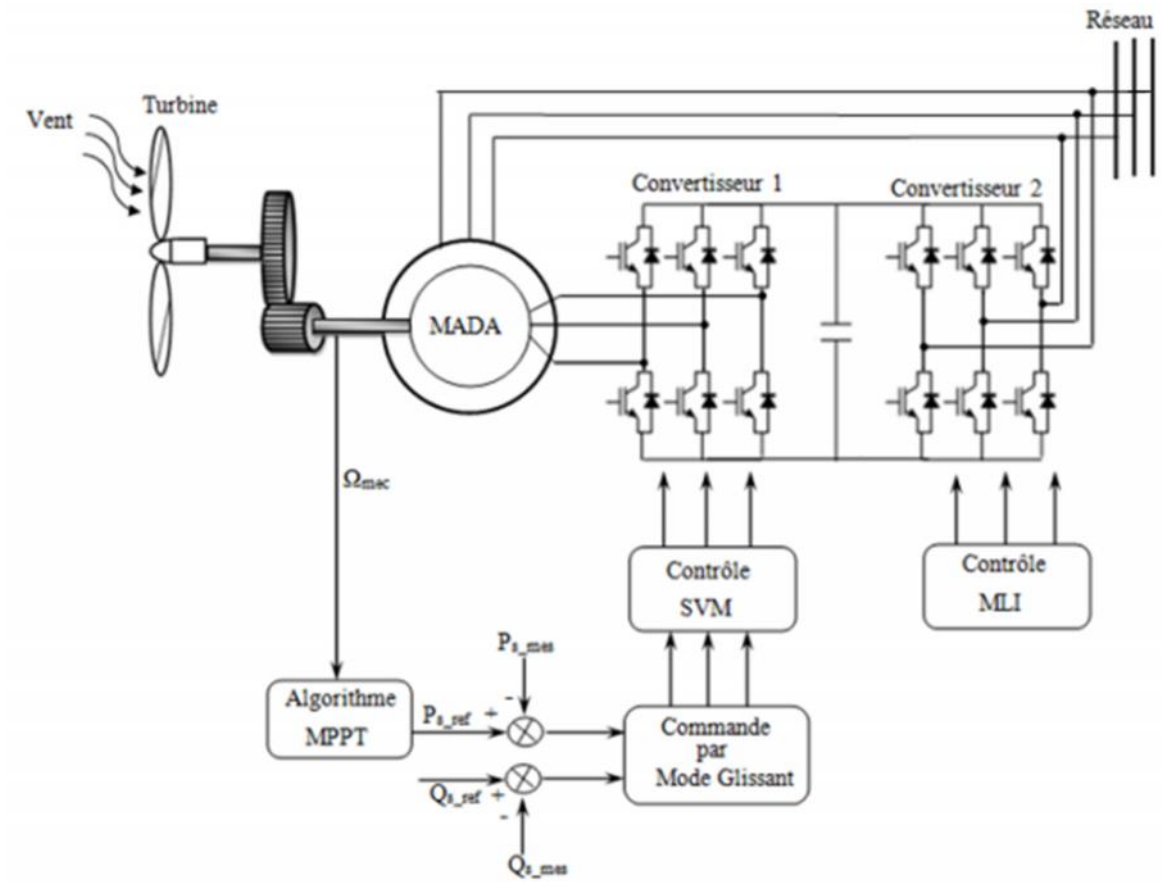


Figure 3.8. Schéma global du système étudié.

3.6.2. Résultats de simulation

A. Poursuite des références

Dans ce type de fonctionnement, afin de maximiser la puissance extraite du vent un algorithme dit MPPT est appliqué. Cet algorithme nous fournit un couple de référence, traduit par l'équation suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \frac{\rho \pi R_t^3}{2} \frac{\Omega^2}{G^3} \quad (3.29)$$

Le produit entre ce couple de référence et la vitesse, nous donne la puissance de consigne de la commande. Les résultats de simulation obtenus dans ce cas sont donnés ci-dessous.

La caractéristique $C_p(\lambda)$ de la turbine éolienne est représentées sur la figure suivante (figure (3.9)).

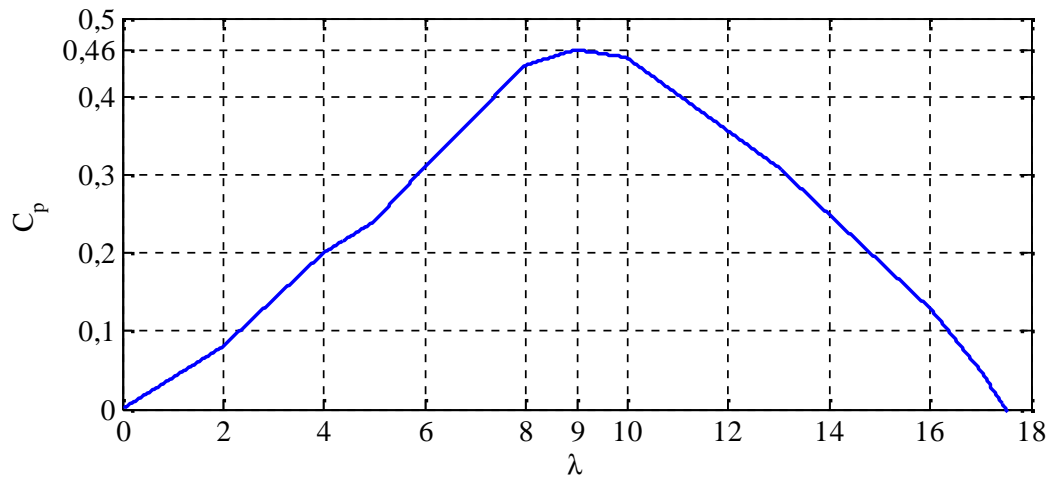


Figure 3.9. Caractéristique $C_p(\lambda)$.

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 (Figure (3.10)), hypo synchrone, synchrone et hyper synchrone comme l'indique les allures de la vitesse et du glissement respectivement, Figures (3.11 et 3.12).

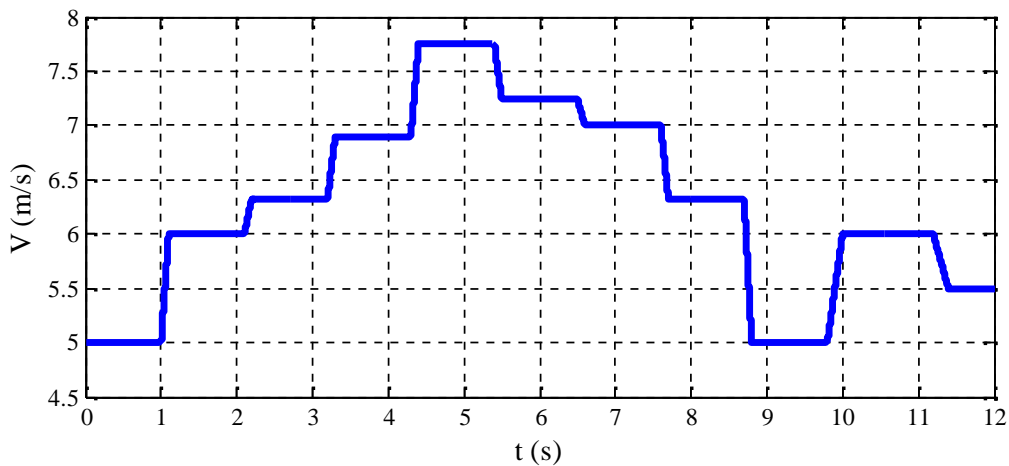


Figure 3.10. Profil du vent.

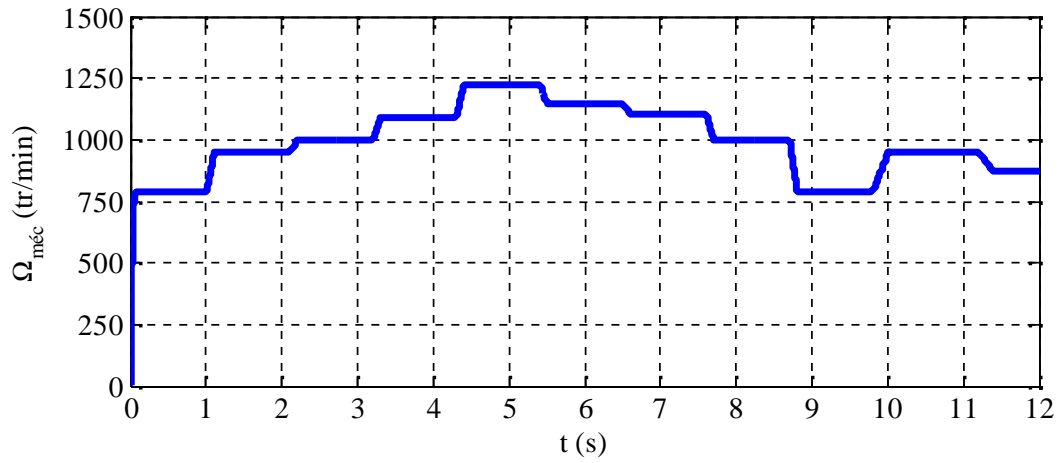


Figure 3.11. Vitesse mécanique de la génératrice.

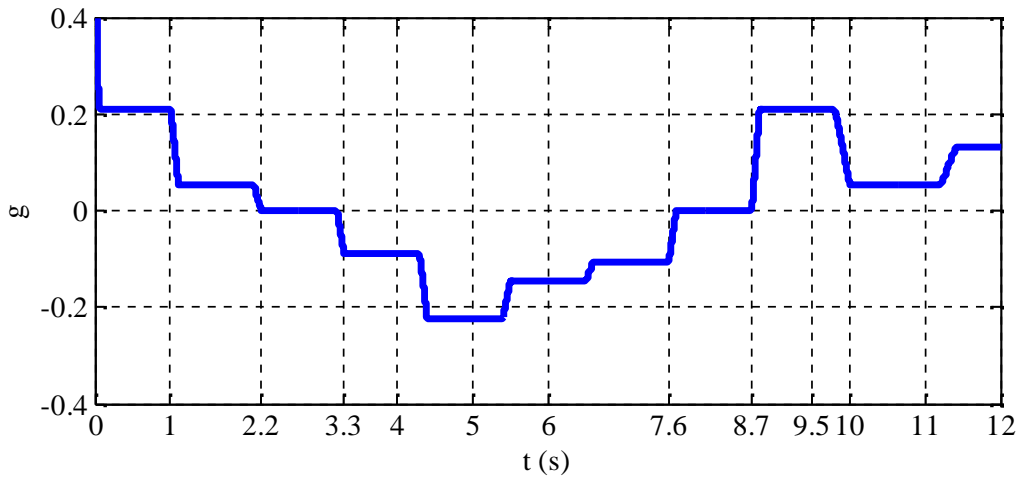


Figure 3.12. Allure du glissement de la machine.

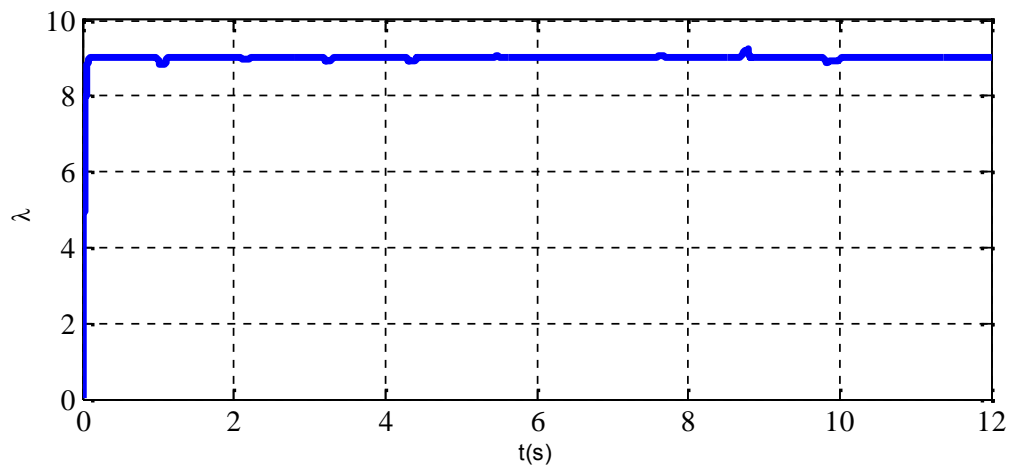


Figure 3.13. Allure de la vitesse réduite.

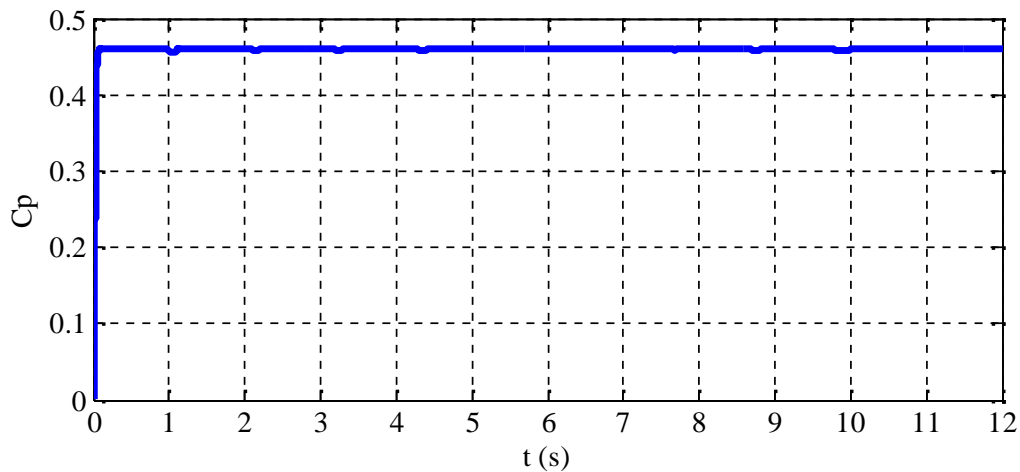


Figure 3.14. Allure du coefficient de puissance.

La figure (3.11) montre que la vitesse de rotation de la génératrice varie en fonction du vent. L'algorithme MPPT appliqué a permis de garder le rapport de vitesse à sa valeur optimale ($\lambda_{opt} = 9$) comme le montre la figure (3.13), cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximal quel que soit la vitesse du vent, figure (3.14), et de travailler continuellement, comme prévu, avec un rendement aérodynamique optimal et extraire le maximum de puissance.

Les figures (3.15 et 3.16) montrent que les deux puissances statorique active et réactive suivent parfaitement leurs références. On peut constater que la puissance active est toujours fournie au réseau ($P_s < 0$) quel que soit le régime de fonctionnement de la machine. On remarque que la puissance maximale est atteinte dans le fonctionnement hyper synchrone ($g < 0$) car dans ce cas la machine produit de l'énergie non seulement du stator mais également du rotor vers le réseau, c'est l'un des intérêts de la MADA par rapport aux autres machines.

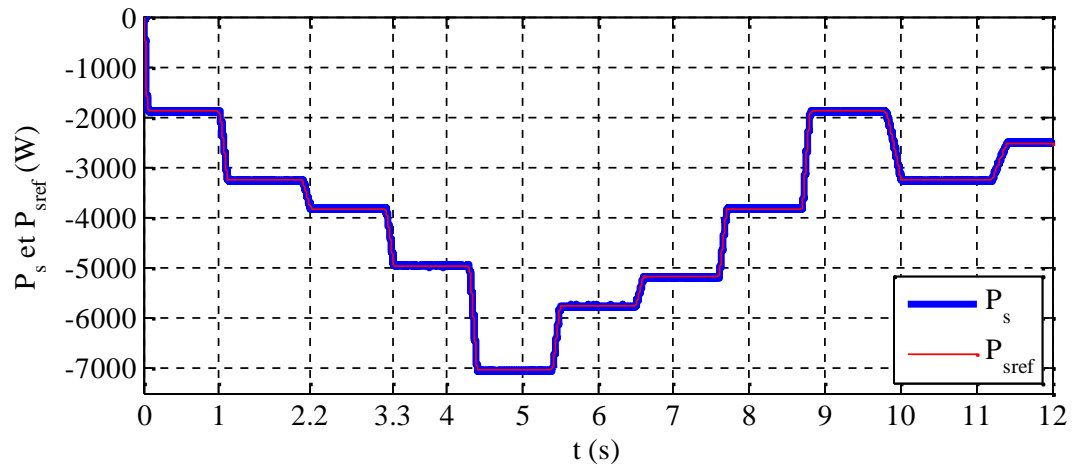


Figure 3.15. Allure de la puissance active statorique.

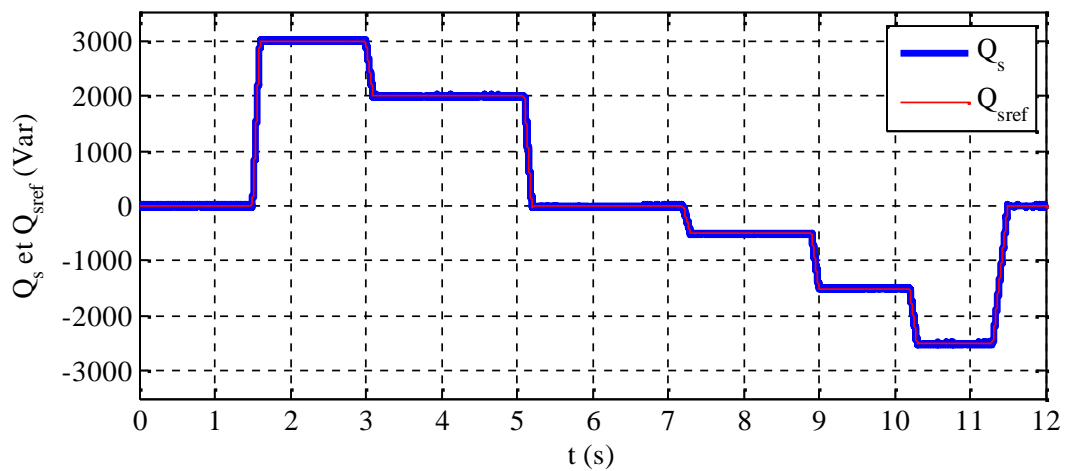


Figure 3.16. Allure de la puissance réactive statorique.

La figure (3.17) montre que le couple électromagnétique suit l'évolution de la puissance active en fonction du vent de manière à maximiser le coefficient de puissance.

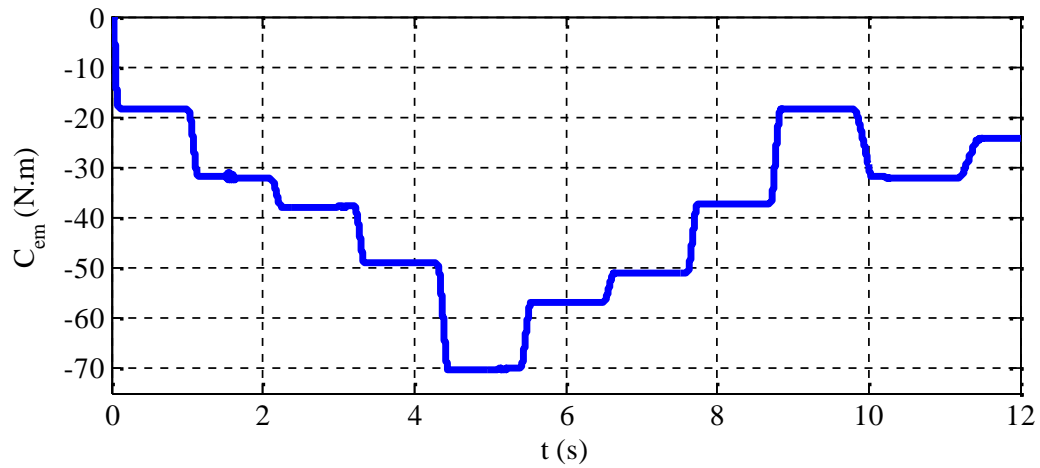


Figure 3.17. Allure de couple électromagnétique.

L'évolution du courant d'une phase statorique suit les variations de la puissance active statorique (figure(3.18)). La nature sinusoïdale de ce dernier est montrée sur le zoom (figure (3.19)), dont la fréquence est imposée par le réseau ($f_s = 50$ Hz).

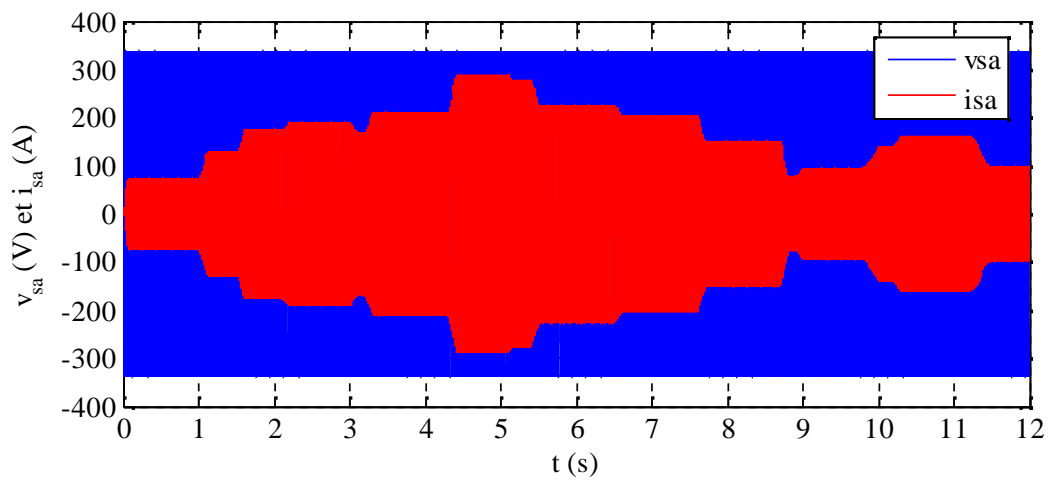


Figure 3.18. Allures de la tension V_{sa} et du courant i_{sa} d'une phase statorique.

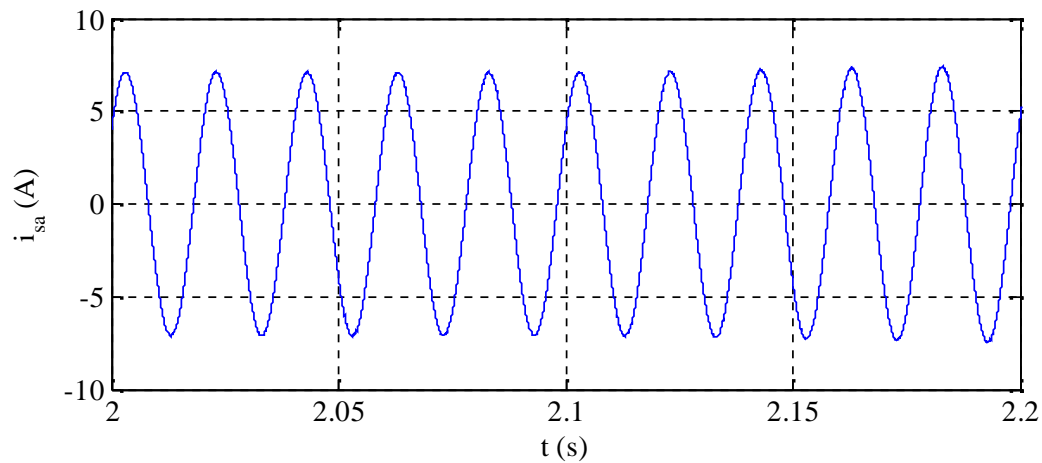


Figure 3.19. Zoom du courant d'une phase statoriques.

La figure (3.20) illustre l'évolution du courant d'une phase rotorique dont on remarque des changements d'amplitude (liés aux variations du couple électromagnétique) et de pulsations (liés aux variations du glissement). Pour un $g=0$ nous avons un courant continu de valeur constante.

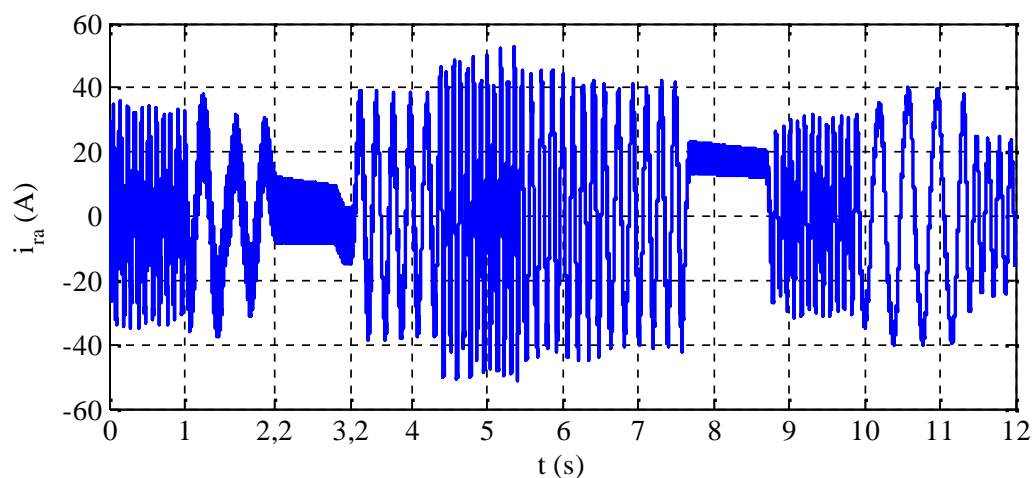


Figure 3.20. Allure du courant d'une phase rotorique i_{ra} .

Les flux statorique direct et quadrature sont donnés par les figures (3.21) et (3.22). Le découplage de la machine apparaît clairement sur la valeur de ϕ_{sq} qui est nulle. Donc le flux ϕ_s est orienté selon l'axe direct.

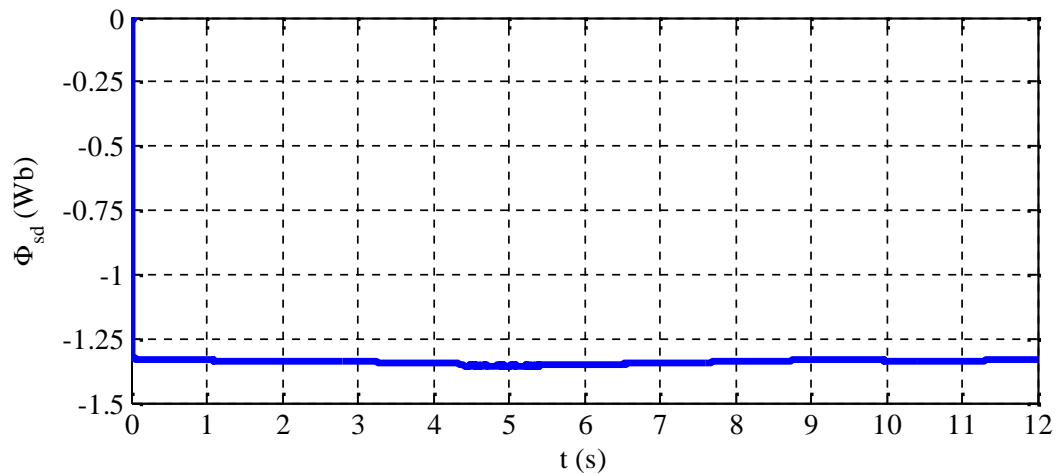


Figure 3.21. Allure du flux statorique direct.

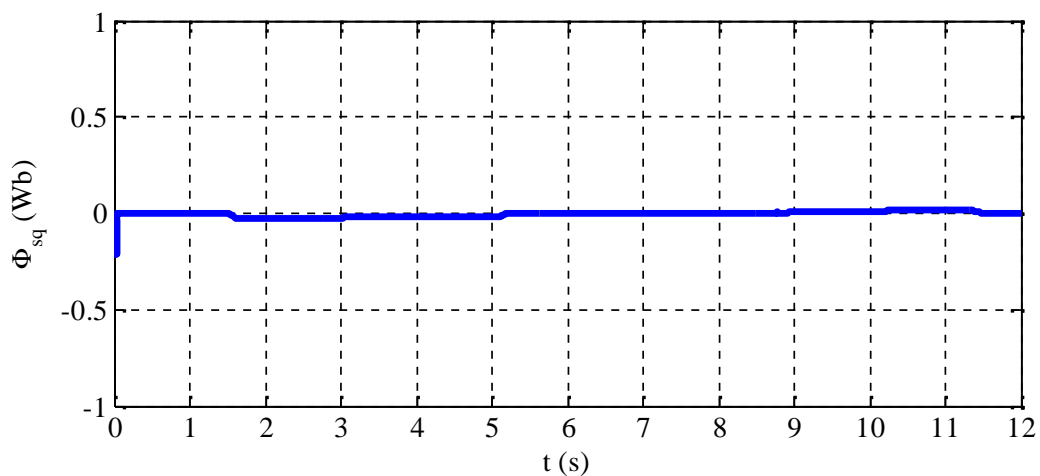


Figure 3.22. Allure du flux statorique quadrature.

B. Test de robustesses

B.1. Variations paramétriques

Pour montrer les performances et la robustesse de la commande appliquée, nous allons effectuer des tests de robustesses vis-à-vis des variations paramétriques. Sachant que, le fonctionnement de la génératrice pour une durée importante se répercute sur son échauffement. Ce dernier a une influence directe sur l'évolution des valeurs des résistances des enroulements statoriques et rotoriques. La magnétisation de la machine dépend des valeurs des inductances statorique et rotorique.

L'évolution de variations des résistances statorique et rotorique avec une erreur de +50% de la valeur initiale est représentée sur la figure (3.23). Alors que, la démagnétisation de cette machine est simulée par une réduction de -50% de la valeur de la mutuelle (M) initiale (figure (3.24)). Néanmoins, la variation de M engendre celles des inductances des deux enroulements statorique et rotorique, ce qui est très claire sur la figure (3.24). Cependant, les tests de robustesses sont appliquées dans les trois régimes de fonctionnement de la GADA (régime hypo, hyper et synchrone), comme l'indique la figure (3.25).

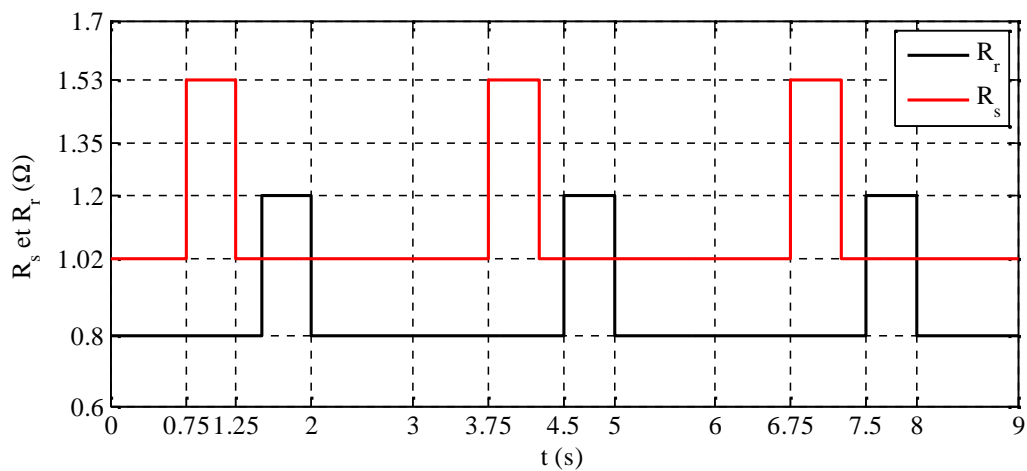


Figure 3.23. Allure de variation de R_s et R_r .

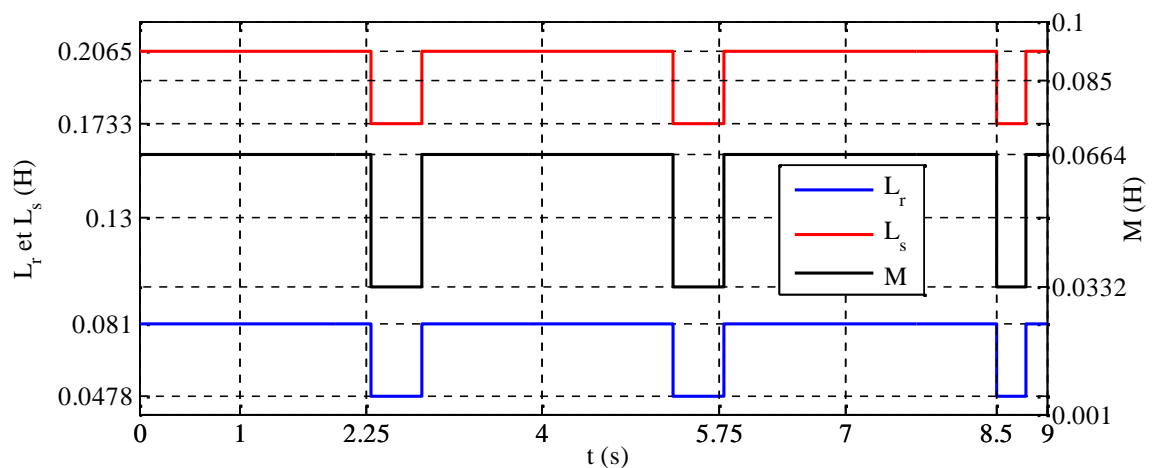


Figure 3.24. Allure de variation de M et L_s et L_r .

Les allures de la vitesse et du glissement représentés respectivement sur les figures (3.26) et (3.27), se découlent du profil du vent choisit montré sur la figure (3.25). Montrant ainsi, les trois régimes de fonctionnement de la GADA.

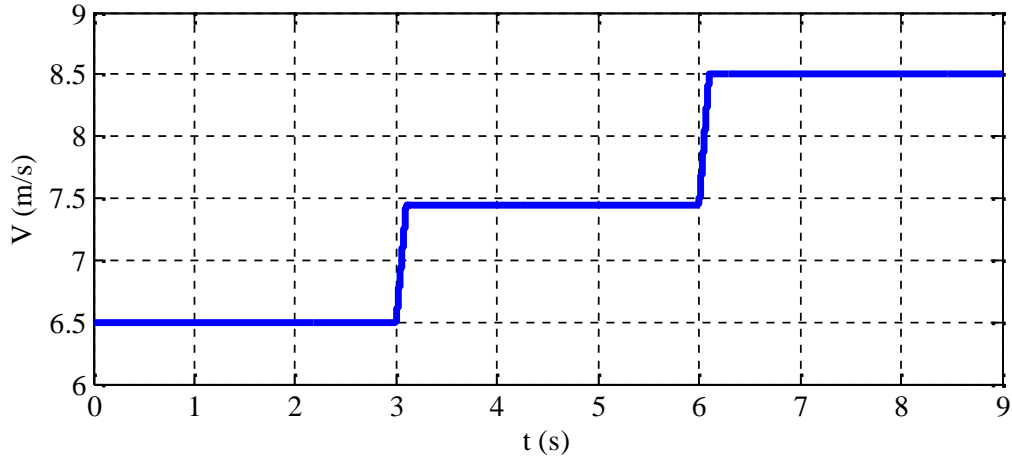


Figure 3.25. Allure de la vitesse de vent.

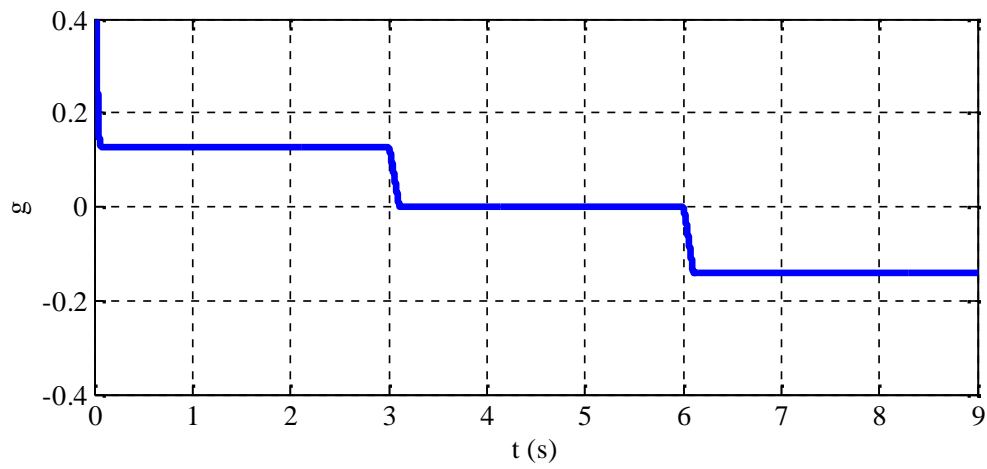


Figure 3.26. Allure de glissement.

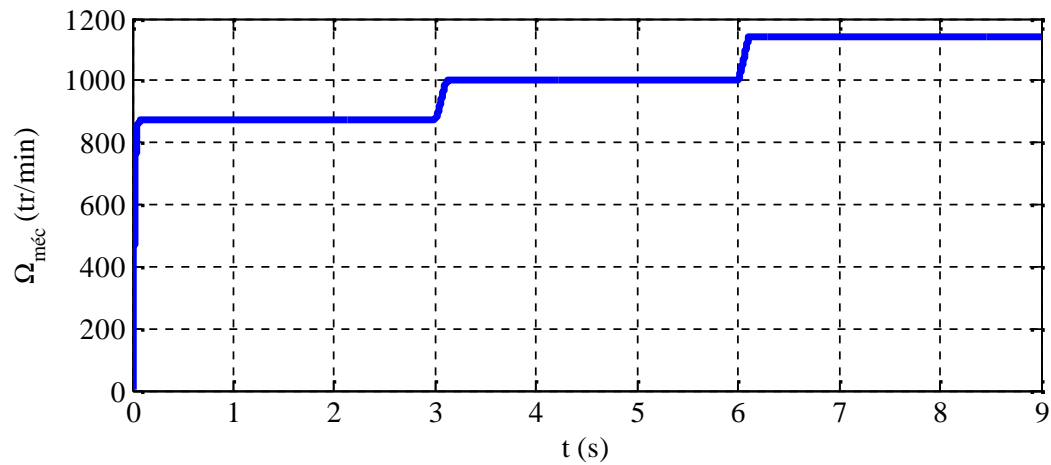


Figure 3.27. Allure de la vitesse mécanique.

Les deux puissances statorique active et réactive, illustrées sur les figures (3.28) et (3.29), suivent parfaitement leurs références, malgré les variations paramétriques imposées.

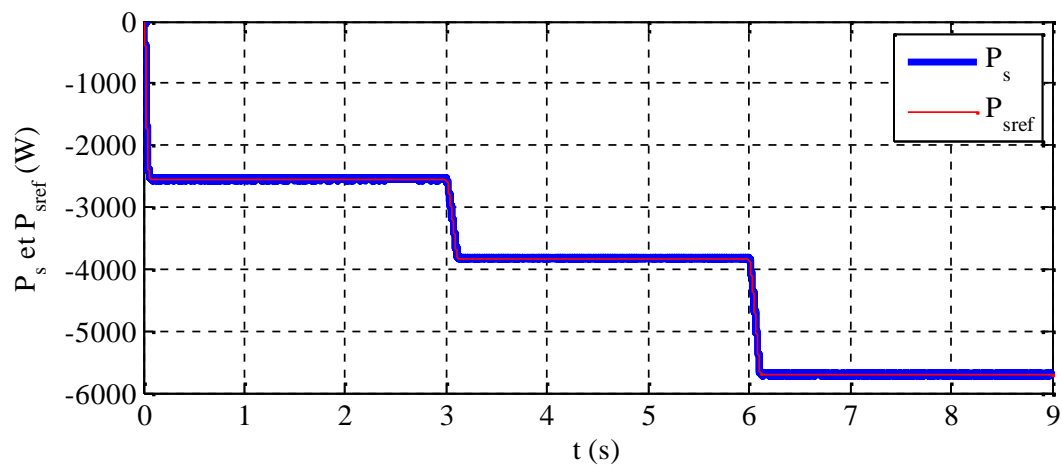


Figure 3.28. Allure de la puissance active.

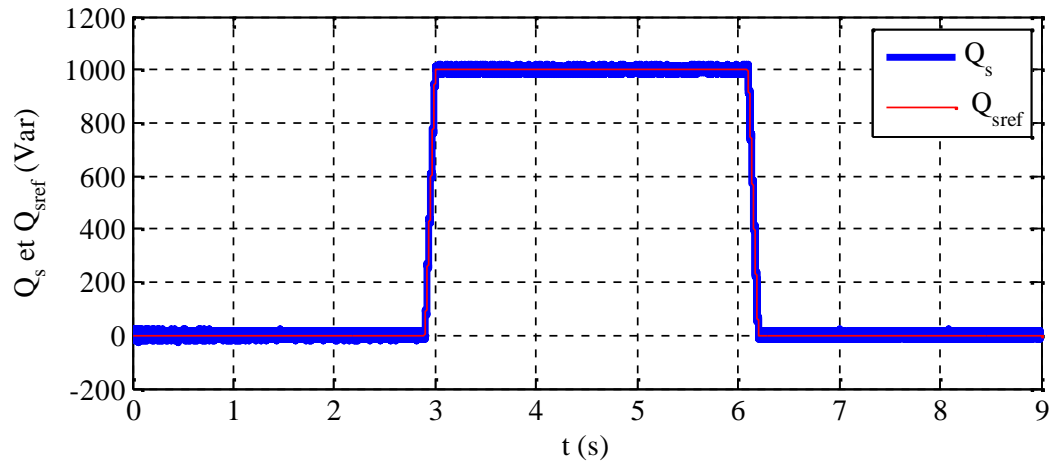


Figure 3.29. Allure de la puissance réactive.

Les variations paramétriques n'ont aucune influence sur l'évolution du couple électromagnétique qui suit l'allure de la puissance active statorique, comme le montre la figure (3.30).

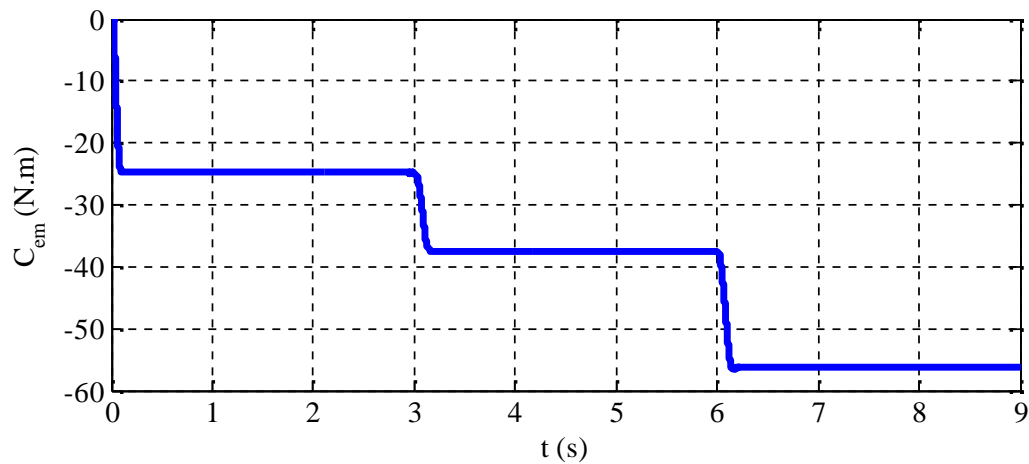


Figure 3.30. Allure de couple électromagnétique.

B.2. Variation aléatoire de vent

L'allure du profil du vent, Figure (3.31), est choisie d'une manière à lui donner son image aléatoire et faire fonctionner la machine dans ces régimes.

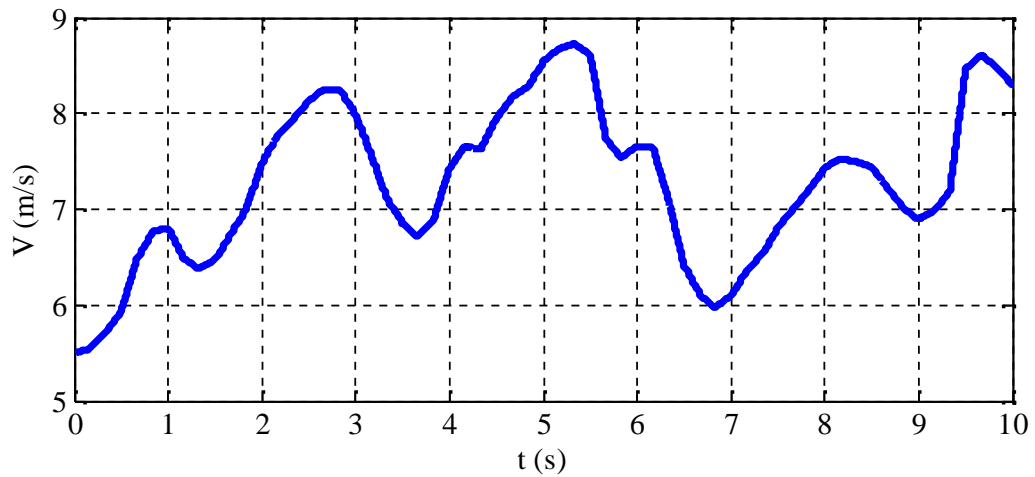


Figure 3.31. Allure de la vitesse de vent.

Les figures (3.32) et (3.33) illustrent les allures de la vitesse mécanique de la machine et le glissement qui suivent dans leur évolution les variations de la vitesse du vent et confirment que la génératrice parcourt tous ces régimes de fonctionnement.

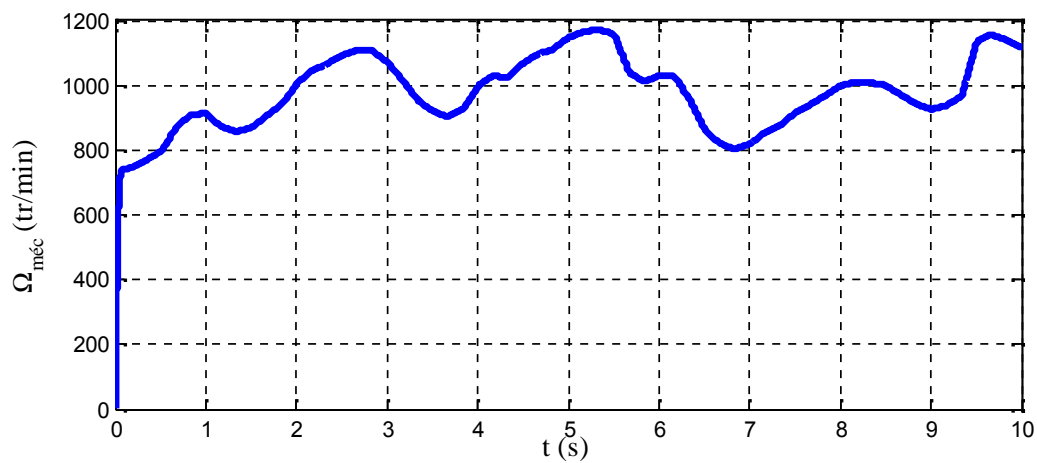


Figure 3.32. Allure de la vitesse mécanique.

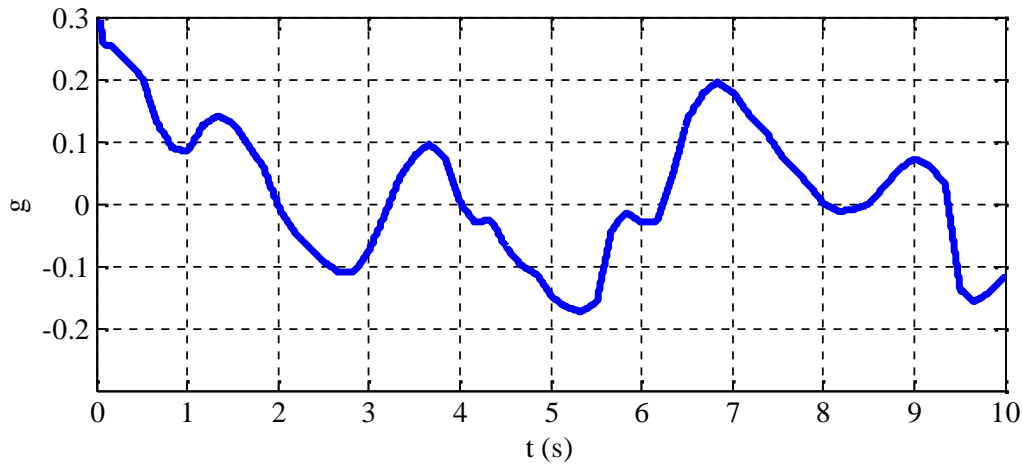


Figure 3.33. Allure de glissement.

Les figures (3.34) et (3.35) illustrent les deux puissances statorique active et réactive qui suivent parfaitement leurs références.

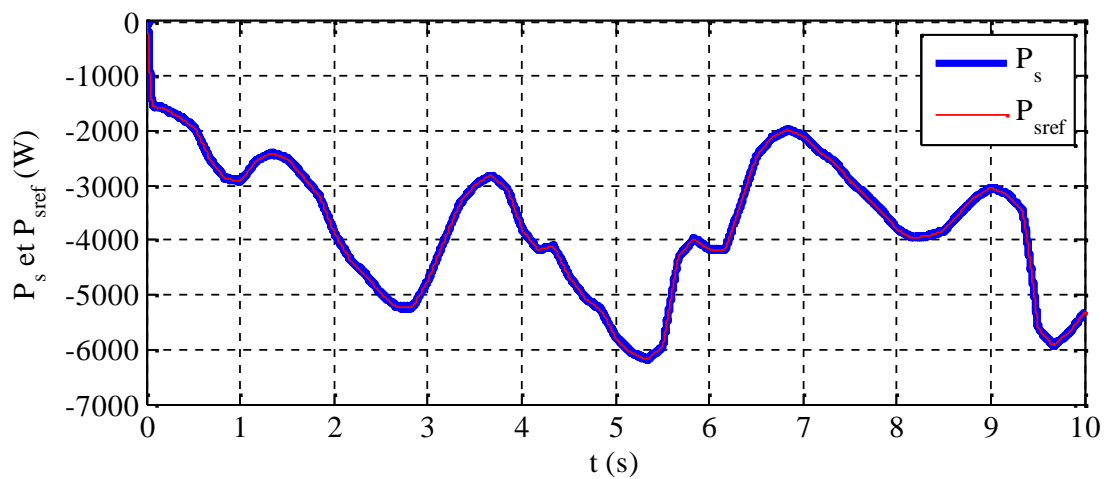


Figure 3.34. Allure de la puissance active statorique.

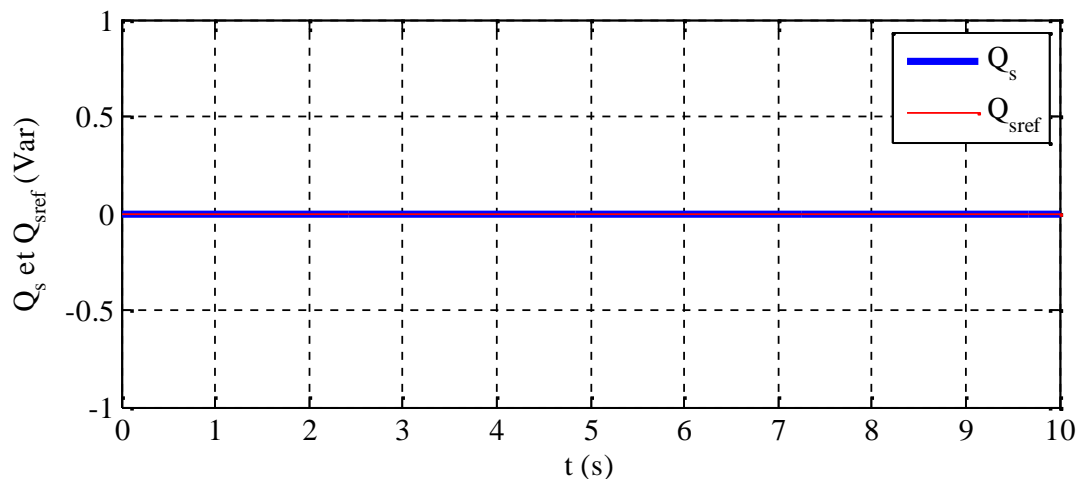


Figure 3.35. Allure de la puissance réactive.

La figure (3.36) montre que le couple électromagnétique suit l'évolution de la puissance active en fonction de la vitesse aléatoire du vent.

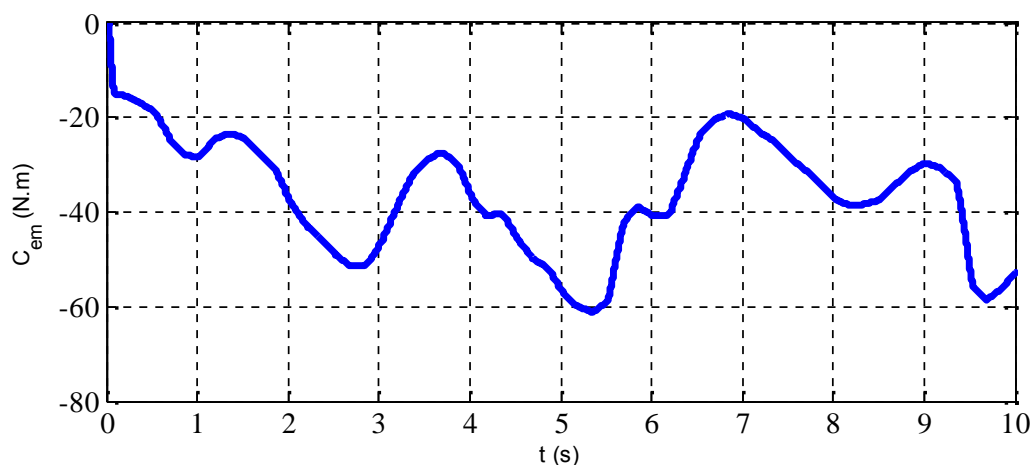


Figure 3.36. Allure de couple électromagnétique.

Les figures (3.37) et (3.38) représentent les allures des flux statorique direct et quadrature. On peut constater que l'orientation du flux ϕ_s selon l'axe direct et le découplage de la machine sont réalisés et cela apparaît clairement sur la valeur de ϕ_{sq} qui est nulle.

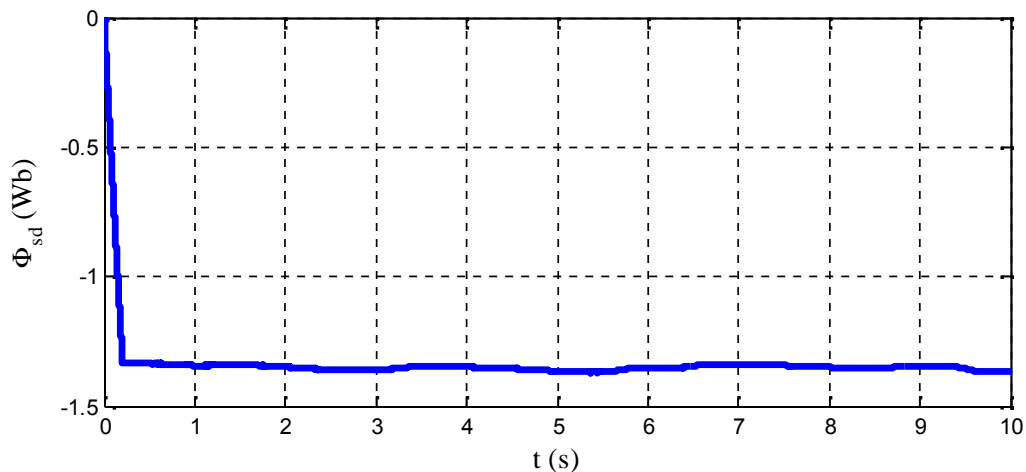


Figure 3.37. Allure flux statorique.

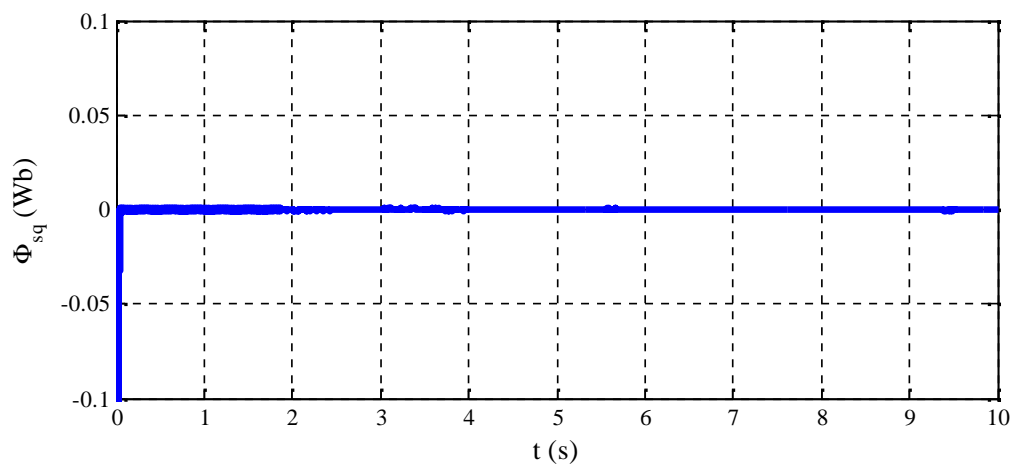


Figure 3.38. Allure du flux statorique quadrature.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contrôle par mode glissant de la génératrice asynchrone double alimentée. Après avoir développé le principe de cette commande, nous avons simulé le fonctionnement à vitesse variable où on varie la vitesse par paliers en premier lieu, pour justifier la poursuite des références, puis avec un profil aléatoire. Une autre simulation a été consacrée pour l'influence des variations paramétriques (reflétant la robustesse de la commande) sur la poursuite des puissances active et réactive statoriques ainsi que le découplage de cette dernière. Les résultats de simulation montrent une bonne poursuite des grandeurs contrôlées et la robustesse du contrôle par mode glissant vis-à-vis les variations paramétriques de la génératrice.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude de la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable connectée au réseau à travers le stator et via deux convertisseurs commandés à travers le rotor.

Pour se placer dans le contexte générale du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différentes modes de production éolienne, type de générateurs ainsi que l'intérêt que peut apporter la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées.

Bien évidemment toute implantation d'algorithme de commande nécessite la connaissance des modèles mathématique des différentes parties du système à commander. La modélisation complète du système a été abordée dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a été dédié à la commande à structure variable des systèmes et son application à la GADA. On a étudié la commande par mode de glissement et quelques phénomènes liés à cette commande et nous appliquons cette technique de commande sur la génératrice asynchrone à double alimentation.

Les résultats obtenus ont montrés, d'une manière générale, une poursuite parfaite de la consigne pour les différentes grandeurs imposée tout en gardant une meilleur précision du contrôle des bonne performances, ce qui est reflété par une très bonne régulation des puissances statoriques active et réactive la robustesse de cette commande vis-à-vis les variations paramétriques de la machine.

Comme perspectives nous envisagerons :

- Etablissement du modèle de la MADA avec prise en compte de la saturation magnétique.
- La qualité de la puissance générée est de nature stochastique. Ceci limite la participation de l'éolienne au service système. D'où le fonctionnement du générateur seul n'est pas souhaité pour pallier à ce problème, il est intéressant de prévoir un système de stockage.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] www.ifpenouvelles.fr . Consulté Mars 2015.
- [2] B. Beltran, «Contribution a la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest, France, Juillet 2010.
- [3] M. Touati, «Étude d'une génératrice éolienne connectée au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université de Batna, Janvier 2015.
- [4] S. Mokrane, «Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération», Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec, Canada, Aout 2013
- [5] H. Bekka, « Etude, modélisation et commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MASDA) utilisée en production d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat, Université de Béjaia, Mai 2014.
- [6] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.
- [7] H.Bennani, « Les lois de commande en régime permanent de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université Laval, Canada, 2011.
- [8] A. Boyette, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat /Université de Henri Poincaré, Nancy, France, Décembre 2006.
- [9] Y. Bekakra, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Octobre 2014.
- [10] Y. Bekakra, « Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées »,Mémoire de Magister, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.

Références bibliographiques

- [11] B. Kelkoul «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone a double alimentation» Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2011.
- [12] A. Chaiba «Commande de la machine asynchrone a double alimentation par des technique de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [13] C. Bennour «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation» Mémoire Magister, Université de Biskra, 2012.
- [14] Z. Tir, « Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade», mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [15] 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, Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [16] A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [17] F. Boudjema, « commande par mode de glissement application aux convertisseurs électriques», thèse de doctorat, université de Toulouse, France, 1991.
- [18] http://electronique1.blogspot.com/2011/02/machine-asynchrone-double-alimentation_6420.html, Consulté Avril 2015.
- [19] F. Boumaraf, R. Abdessemed, M.L. Bendaas, S. Belkacem, «La double DTC d'une machine asynchrone à double alimentation » Revue des sciences et de la technologie Vol. 5 N°1 / janvier 2014, pp. 60 - 70.
- [20] H. Nian, Y. Song « Direct power control of doubly fed induction generator under distorted grid voltage » IEEE Transactions on power electronics, Vol. 29, N° 2, Février 2014, pp. 894 - 905.

Références bibliographiques

- [21] T. Ayoub, « Analyse et commande de quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec, Canada, Janvier 2013
- [22] A. Hussain, «Contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants», thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, France, 2009.
- [23] V. Rogez, « modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », thèse de doctorat, université de Lille, 2004.
- [24] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, «Network power flux control of a wind generator», *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [25] 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, l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [26] M. Laamayad Tahar, «Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue», Mémoire de Magister de l'Université de Batna, 2008.
- [27] R. Abdessamed, «Modélisation des machines électriques», Presse de l'université de Batna 1997.
- [28] A. Tamarat, « modélisation d'une chaine de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009.
- [29] Y. Bekakra D. Ben Attous, «Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion», *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 12, pp. 2274-2286, 2011.

Références bibliographiques

- [30] Y. Bekakra, D. Ben attous, « DFIG sliding mode control driven by wind turbine with using a SVM inverter for improve the quality of energy injected into the electrical grid», ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.11, No. 1, pp. 63-75, February 2013.
- [31] C. Bennour, «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.
- [32] S. Rafa, H. Zeroug, L. Hocine, K. Boudjit, «Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension a Modulation vectorielle (SVM) », laboratoire des systèmes électriques industriels, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne.
- [33] N.AKKARI, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [34] A. L. Nemmour, « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation», Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Avril 2002.
- [35] A.Khaldi, « diagnostic et commande d'une machine synchrone a aimants permanents », mémoire de magister, ENP Alger, 2006.
- [36] C.C.D.Wit, «Commande des moteurs asynchrones».2 – «optimisation, discrétisation et observateurs», Hermès Science Publications, Paris, 2000.
- [37] A.Ben Mmamar, M.Liman, «Application de la MLI multi-niveau pour la commande des MAS», mémoire d'ingénieur d'état, université A.Mira Bejaia 2004.
- [38] R.S.Pena ,R.J.Cardenas ,G.Masher ,J.C.Clare, «Vector controlled induction machines for stand-alone wind energy applications»,Electrical Engineering Departement University of Magallannes,2000.

Annexe

A-Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation [38]

Puissance nominal :	$P=7.5$ kW
Tension statorique nominale :	$U_{ns}=415$ V
Tension rotorique nominale :	$U_{nr}=440$ V
Vitesse nominal :	$N_n=970$ tr/min
Nombre de paires de pôles :	$P=3$
Resistance statorique :	$R_s=1.06$
Resistance rotorique :	$R_r=0.8$
Inductance cyclique statorique :	$L_s=0.2065$ H
Inductance cyclique rotorique :	$L_r=0.0081$ H
Inductance mutuelle :	$M=0.0664$ H

B-Paramètres de la turbine [38]

Puissance nominal :	$P=7.5$ kW
Rayon de la turbine :	$R_t=3.24$ m
Vitesse nominal de la turbine :	$t_n=290$ tr/min
Vitesse maximal de la turbine :	$t_{max}=10$ tr/min
Vitesse minimal de la turbine :	$t_{max}=4$ tr/min
Moment d'inertie :	$J=0.075$ Kg.m ²
Le gain de multiplicateur	$G=5.065$

C- Les valeurs des gains des régulateurs PI :

$K_{pp} = 0.5$, $K_{pq} = 0.5$, $K_{ip} = 500$, $K_{iq} = 500$.

D- Les valeurs des gains des régulateurs mode glissant :

$K_{smp} = 1$, $K_{smq} = 1$, $C_{ps} = 0.0001$, $C_{qs} = 0.0001$.