

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Génie Electrique

Spécialité : Commande Electrique et Electrotechnique Industrielle

Thème

Commande non linéaire en puissance d'une génératrice asynchrone à
double alimentation dédiée à une éolienne.

Réalisé par :

OUAOUDIA Fatima

YAHIA Thinhinane

Encadré par :

M^r. TAMALOUZT Salah

M^r. SAHRI Younes

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur TAMALOUZT SALAH ainsi qu'à notre Co-promoteur SAHRI YOUNES, de nous avoir encadré, orienté, aidé, conseillé, ainsi que pour leurs disponibilité et tous le temps qu'ils nous ont consacré.

Nous tenons à remercier très profondément les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et les responsables du Département d'Electrotechnique de l'Université de Bejaia qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous adressons nos plus sincère remerciement à tous nos proches et amis qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de notre formation.

Yahia Thininane

Ouaoudia Fatima

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leurs encouragements
et leurs prières*

A mes chers frères Rayane et Tarik

Pour leur appui et leurs encouragements

A mes grands parents

A toute ma famille

Pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

A tous mes amis

Thinkinane Yahia

C'est avec un grand amour que je dédie ce modeste travail :

A ma source de vie, d'amour et de joie, Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi ma très chère maman.

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, A toi mon cher père.

A toi mon cher grand père MOHAND SAID, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour. Merci pour tout et que Dieu vous donne bonne santé et longue vie parmi nous.

A mes chères sœurs, et chers frères pour leurs encouragements permanents.

A mon soutien moral et source de joie, A toi ma très chère amie et sœur OULDBENALI Latifa symbole de tendresse et de fidélité.

A mes amies de toujours « NACEFF Sabrina, OUARI Yassmina, OULDBENALI Ouzna, YAICHE Mouna, YAHIA Thinhinane » Au nom de l'amitié qui nous réunit et au nom de nos souvenirs inoubliables veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A toute ma famille qui m'a soutenue durant mon parcours universitaire.

OUAOUDIA Fatima!

Table des matières

Introduction générale	7
1 Généralités sur l'énergie éolienne	10
1.1 Introduction	10
1.2 Définition de l'énergie éolienne	10
1.3 Aérogénérateur	11
1.4 Principe de fonctionnement	11
1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	11
1.5.1 Avantages	12
1.5.2 Inconvénients	12
1.6 Types d'éoliennes	12
1.6.1 Éoliennes à axe vertical	12
1.6.2 Eoliennes à axe horizontal	13
1.7 Constitutions d'une éolienne à axe horizontal	13
1.8 Technologies des systèmes éoliens	14
1.8.1 Éoliennes à vitesse fixe	14
1.8.2 Éoliennes à vitesse variable	14
1.9 Intérêt de la vitesse variable	15
1.10 Zones de fonctionnement d'une éolienne	15
1.11 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	16
1.12 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	17
1.12.1 Machines asynchrones à cage (MAS)	17
1.12.2 Machine synchrone	17
1.12.3 Machine asynchrone à double alimentation	18
1.12.3.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation.	18
1.12.3.2 Principe de fonctionnement de la MADA	18
1.12.3.3 Modes de fonctionnement de la MADA	19
1.12.3.4 Plage de variation de vitesse de la MADA	20
1.12.4 Avantages et inconvénients de la MADA	20
1.13 Conclusion	21
2 Modélisation des différentes parties du système étudié	22
2.1 Introduction	22
2.2 Description de la structure étudiée	22
2.3 Modélisation de la partie mécanique de l'aérogénérateur	23
2.3.1 Modèle du vent	23
2.3.2 Modèle de la turbine	24
2.3.2.1 Modèle du Multiplicateur	25

TABLE DES MATIÈRES

2.3.2.2	Équation dynamique de l'arbre	26
2.3.3	Stratégie de commande de la turbine	27
2.3.3.1	Techniques d'extraction du maximum de la puissance	27
2.3.3.2	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	28
2.4	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	30
2.4.1	Hypothèses simplificatrices	30
2.4.2	Modèle de la MADA dans un repère triphasé (a,b,c)	31
2.4.3	La transformation de Park	32
2.4.4	Modèle de la machine dans le repère diphasé(d,q)	33
2.4.5	Choix du référentiel	35
2.4.5.1	Référentiel lié au Stator	35
2.4.5.2	Référentiel lié au rotor	35
2.4.5.3	Référentiel lié au champ tournant	35
2.5	Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance	36
2.5.1	Modélisation de l'onduleur	36
2.6	Conclusion	37
3	Commande direct du couple (DTC) de la MADA	38
3.1	Introduction	38
3.2	Principe général de la commande directe du couple	39
3.3	Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension	39
3.4	Contrôle du flux rotorique et du couple électromagnétique	41
3.4.1	Principe de contrôle du flux rotorique	41
3.4.2	Principe de contrôle du couple de la machine	42
3.5	Sélection du vecteur de tension	43
3.6	Estimation des grandeurs de commande	44
3.6.1	Estimation du flux rotorique	44
3.6.2	Estimation du couple électromagnétique	45
3.7	Correction du flux rotorique et du couple électromagnétique	45
3.7.1	Correcteur du flux	45
3.7.2	Correcteur du couple	46
3.8	Elaboration de la table de commutation	46
3.9	Simulation de la chaîne éolienne proposée	47
3.10	Résultats de simulation et interprétations	48
3.10.1	Fonctionnement à vitesse du vent en paliers	48
3.10.2	Fonctionnement avec un profil du vent aléatoire	52
3.11	Conclusion	55
4	Commande directe de puissance (DPC) de la MADA	56
4.1	Introduction	56
4.2	Principe générale de la DPC-C	56
4.3	Principe de la commande des puissances active et réactive	57
4.4	Estimation des deux puissances active et réactive	57
4.5	Comparateur à hystérésis	58
4.6	Elaboration de la table de commutation	59
4.7	Structure générale de la commande des puissances active et réactive	60
4.8	Résultats de simulation et interprétation	61
4.8.1	Fonctionnement à vitesse du vent en paliers	61

TABLE DES MATIÈRES

4.8.2	Essai avec profil du vent aléatoire	63
4.9	Conclusion	65
	conclusion générale	66
	Bibliographie	68

NOMENCLATURE

MADA	Machine à Double Alimentation,
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation,
DFIM	Doubly Fed Induction Machine,
MAS	Machine Asynchrone à Cage,
MS	Machine Synchrone,
CCM	Convertisseur Coté Machine,
CCR	Convertisseur Coté Réseau,
MPPT	Maximum Power Point Tracking,
DTC	Direct torque control,
DPC	Direct Power Control,
V_{vent} (m/s)	Vitesse du vent,
P_{aer} (W)	Puissance aérodynamique de la turbine,
ρ (Kg/m ³) (15°C),	Masse volumique de l'air en température ambiante
S (m ²)	Surface circulaire balayée par la turbine,
C_p (–)	Coefficient de puissance,
$C_{p\text{-max}}$ (–) de puissance,	Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale
Ω_{turbine} (rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine,
Ω_{mec} (rad/s)	Vitesse mécanique de la génératrice,
R (m)	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne),
G (–)	Gain du multiplicateur,
λ (–)	Vitesse relative ou Ratio de vitesse,
λ_{opt} (–)	Vitesse relative optimale,
β (deg)	Angle de calage des pales,
C_g (N.m)	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice,

$C_{em\ ref}$ (N.m)	Couple mécanique de référence	C_t (N.m)	Couple mécanique disponible sur l'arbre lent de la turbine,
C_{vis} (N.m)	Couple de frottement visqueux,		
J_t (Kg.m ²)	Moment d'inertie de la turbine,		
J_g (Kg.m ²)	Moment d'inertie de la génératrice,		
J (Kg.m ²)	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice »,		
R_s (Ω)	Résistance statorique par phase,		
R_r (Ω)	Résistance rotorique par phase,		
L_s (H)	Inductance cyclique statorique par phase,		
L_r (H)	Inductance cyclique rotorique par phase,		
L_m (H)	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor),		
l_s (H)	Inductance propre d'une phase statorique,		
l_r (H)	Inductance propre d'une phase rotorique,		
m_s (H)	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,		
m_r (H)	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,		
M (H)	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et autre rotorique,		
p (–)	Nombre de paires de pôles,		
f (N.m.s/rd)	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,		
C_{em} (N.m)	Couple électromagnétique de la génératrice		
(d, q)	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme),		
(α , β)	Axes de référentiel de Concordia/Clarke (repère de Park fixe au stator),		
θ_{sr} (rad)	Position angulaire du rotor par rapport au stator,		
θ_s (rad)	Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d),		
θ_r (rad)	Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d).		

$v_{s a, b, c}$ (V)	Tensions instantanées statoriques triphasées,
$v_{s d, q}$ (V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q),
$v_{s \alpha, \beta}$ (V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β),
$i_{s a, b, c}$ (A)	Courants instantanés statoriques triphasées,
$i_{s d, q}$ (A)	Courants statoriques diphasées dans le repère (d, q),
$i_{s \alpha, \beta}$ (A)	Courants statoriques diphasées dans le repère (α, β),
P_s (W)	Puissance active statorique,
Q_s (VAr)	Puissance réactive statorique.
$\phi_{s a, b, c}$ (Wb)	Flux instantané magnétiques au stator,
$\phi_{s \alpha, \beta}$ (Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère (α, β),
$\phi_{s d, q}$ (Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q).
ϕ_s (Wb)	Module du vecteur de flux statorique.
$\phi_{r a, b, c}$ (Wb)	Vecteur de flux magnétiques au rotor,
$\phi_{r \alpha, \beta}$ (Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β),
$\phi_{r d, q}$ (Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q).
ϕ_r (Wb)	Module du vecteur de flux rotorique.
ω_r (rad/s) rotation,	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,
ω_s (rad/s) tournant),	Pulsation électrique des grandeurs statoriques (champ tournant),
ω_m (rad/s) (Pulsation de glissement),	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques
g (-)	Glissement de la vitesse de rotation,
$C_{em ref}$ (N.m)	Consigne du couple électromagnétique,
$C_{em est}$ (N.m)	Couple électromagnétique estimé,
ϕ_{ref} (Wb)	Consigne du flux rotorique,
$\phi_{r est}$ (Wb)	Flux rotorique estimé,
γ (°)	Déphasage entre le vecteur flux statorique et rotorique,

ε (–)	Erreur statique,
S_a, S_b, S_c (–)	Etats de commutation des interrupteurs de l'onduleur,
ΔC_{em} (N.m) électromagnétique,	Largeur de la bande à hystérésis du couple
$\Delta \phi_r$ (Wb)	Largeur de la bande à hystérésis du flux rotorique ,
ΔP_s (W) active,	Largeur de la bande à hystérésis de la puissance
ΔQ_s (VAr) réactive,	Largeur de la bande à hystérésis de la puissance
i_{si} (A)	Le courant qui passe par l'iterupteur si,
V_{si} (V)	La tension au borne de l'interupteur si .

Table des figures

1.1	Principales étapes de la conversion de l'énergie éolienne	11
1.2	Principaux composants d'une éolienne.	13
1.3	Eolienne à vitesse fixe connecté directement au réseau.	14
1.4	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.	15
1.5	zones de fonctionnement d'une éolienne.	16
1.6	Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	18
1.7	Les quatre modes de fonctionnement de la MADA.	19
1.8	Plage de variation de vitesse d'une MADA.	20
2.1	Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA	23
2.2	Shéma de la turbine éolienne	23
2.3	Coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs β	25
2.4	Schéma bloc du modèle de la turbine	27
2.5	Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne	28
2.6	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	29
2.7	Représentation de la MADA dans le système triphasé	30
2.8	Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.	33
2.9	Shéma de connexion d'un onduleur de tension sur le rotor de la MADA.	36
3.1	Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à une MADA	39
3.2	Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur.	40
3.3	Principe du contrôle du flux rotorique	41
3.4	Illustration de la composante du couple et du flux lors de la variation du vecteur flux	42
3.5	Sélection du vecteur tension approprié.	43
3.6	(a) : Sélection des vecteurs tensions correspondants au contrôle de l'amplitude ϕ_r . (b) : Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.	45
3.7	Correcteur du couple à trois niveaux	46
3.8	Schéma structurel de commande du système éolien global.	47
3.9	Profil de la Vitesse du vent.	48
3.10	Rapport de vitesse et coefficient de puissance.	48
3.11	Evolution de la Vitesse mécanique et du glissement de la MADA.	49
3.12	Couple électromagnétique avec référence et Amplitude de flux rotorique avec sa référence.	49
3.13	Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$).	50
3.14	Evolution temporaire des flux rotorique $\phi_{R\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$	50

TABLE DES FIGURES

3.15	Allures des Courants de phases rotorique avec des zooms dans les trois régimes de fonctionnement de la MADA	51
3.16	Courant d'une phase statorique avec un zoom.	51
3.17	Puissances active statorique et rotorique.	52
3.18	Allure de la Vitesse du vent et allure de la vitesse mécanique de la MADA.	52
3.19	Couple électromagnétique de la MADA et Amplitude du flux rotorique	53
3.20	Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$) et Evolution temporaire des flux rotorique $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$	53
3.21	Allure des Courants de phases rotorique	53
3.22	Allure des Courant d'une phase statorique avec un zoom.	54
3.23	La puissance active statorique et la puissance active rotorique.	54
3.24	Analyse harmonique de spectre du crouant d'une phase statorique	54
4.1	Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive.	59
4.2	Présentation des vecteurs de commutation et des secteurs	59
4.3	Structure de la commande directe des puissance active et réactive de la MADA.	60
4.4	Allures des puissances active et réactive statorique avec leurs références.	61
4.5	Allure du facteur de puissance statorique	61
4.6	Vitesse mécanique et Couple électromagnétique de la MADA.	62
4.7	Allures des Courants rotoriques avec des zooms dans les trois modes de fonctionnement de la MADA.	62
4.8	Allure des Courants statoriques avec un zoom.	62
4.9	Allure des puissances active et réactive statorique avec leurs références	63
4.10	Allure de la vitesse mécanique et du couple électromagnétique	64
4.11	Allure des Courants rotoriques et des courants statorique avec un zoom.	64
4.12	Analyse harmonique de spectre du crouant d'une phase statorique.	65

Liste des tableaux

3.1	Module et argument de chaque vecteur tension	41
3.2	Table de commutation avec un correcteur du couple à trois niveaux.	47
4.1	Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive).	60

Introduction générale

L'électricité est de plus en plus primordiale pour l'humanité, aujourd'hui notre société ne saurait plus s'en passer, elle est devenue un élément indispensable à notre confort personnel, et au développement et l'évolution des activités industrielles. Cette demande énergétique, constamment croissante, a poussé les gens à développer de nouveaux moyens de production d'énergie, toujours plus efficaces, sans s'inquiéter outre mesure de leur impact environnemental et sanitaire[1].

Actuellement, à l'échelle mondiale, l'énergie que nous utilisons quotidiennement pour produire de l'électricité provient majoritairement des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui présentent l'avantage d'être facilement utilisables et restent longtemps bon marché. Mais leur emploi systématique et massif fait apparaître plusieurs problèmes majeurs. Tout d'abord, dans un futur très proche, l'homme sera vraisemblablement confronté à leur épuisement et il est d'ores et déjà confronté aux perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre produits lors de leur combustion[2].

Pour faire face à ces problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. (Il s'agit d'énergies à priori peu polluantes et dont les sources présentent, en théorie, l'avantage d'être abondantes et inépuisables dans les millénaires à venir)[3].

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important, elle n'est pas proposée pour remplacer les sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint. En effet cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Par ailleurs, le site d'implantation des éoliennes reste toujours exploitable, pour l'agriculture par exemple. Enfin, les petites installations permettent d'électrifier les lieux isolés et donnent une certaine indépendance à des petites communautés (un village, un regroupement d'industries...), mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son inconstance en effet le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin. En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année[4].

A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne a connu une forte croissance, cela conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à augmenter l'efficacité de la conversion électromécanique d'une part et à améliorer la qualité de l'énergie fournie d'une autre part [2].

L'utilisation des éoliennes à vitesse variable sont les plus répandues, ce qui permet de diminuer le coût de production d'électricité par des aérogénérateurs et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie, par rapport

aux éoliennes à vitesse fixe[4].

Actuellement, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages. En effet, le schéma de raccordement le plus typique de cette machine consiste à raccorder le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté rotor CCM et l'autre côté réseau CCR). Cette dernière configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse. Par ailleurs, les convertisseurs statiques utilisés pour le contrôle de cette machine peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une fraction de la puissance totale (qui représente la puissance du glissement). Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élevé et impliquant une réduction des coûts et des pertes additionnelles[5].

De plus la stratégie de commande adoptée pour l'ensemble MADA associée aux convertisseurs statiques joue un rôle important dans l'amélioration des performances du système éolien en matière de production d'une énergie électrique de bonne qualité.

Notre travail rentre dans le cadre de faire un choix entre deux types de commandes directes la DTC et la DPC, appliqué à une GADA partiellement interfacée. Pour cela, nous allons opter pour le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Nous décrirons les différents composants constituant l'aérogénérateur ainsi que les différents types d'éoliennes existantes en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées, en s'attardant sur la machine asynchrone à double alimentation ou sa structure, son principe de fonctionnement et ses différents modes de fonctionnement seront présentés pour montrer ses avantages surtout en vitesse variable.

Le second chapitre, sera consacré à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation à partir de laquelle sont reposés les travaux de cette thèse. Dans la première partie on modélisera la partie mécanique (la turbine, le multiplicateur, et l'arbre mécanique) puis on présentera la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) . puis dans la seconde partie on modélisera la partie électrique (la GADA et l'onduleur).

Dans le troisième chapitre on propose une technique de commande appelée DTC (Direct Torque Control) appliquée au convertisseur à deux niveaux de tension côté MADA (CCM). En premier lieu des notions de base sur la théorie de cette commande seront données. Puis on présentera la stratégie de commande par DTC appliquée à la génératrice asynchrone à double alimentation. L'objectif de cette commande est de contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique de la GADA. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.

Le dernier chapitre est réservé à la technique de contrôle DPC (Direct Power Control). Elle est basée sur le concept du contrôle direct du couple étudié dans le chapitre précédent. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive de la MADA à travers le convertisseur

LISTE DES TABLEAUX

CCM. On commencera par présenté son principe ,puis sa stratégie de commande pour une GADA . On finira par la présentation des résultats de simulations pour mettre en évidence les performances apportées par cette techniques de contrôle . On clôturera se travail par une conclusion générale et des perspectives .

Chapitre 1

Généralités sur l'énergie éolienne

1.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des aérogénérateurs n'a cessé d'évoluer notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes et pour ce qui est de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones .

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Les types de systèmes éoliens les plus utilisés sont ceux à vitesse variable avec une génératrice constituée le plus souvent de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA offre plusieurs avantages, dont un très bon rendement énergétique, une très bonne flexibilité de fonctionnement ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. [6] [7] [8] [9].

Ce premier chapitre sera essentiellement divisée en deux grandes parties, la première sera consacré aux généralités sur les systèmes éoliens où on étalera les notions élémentaires pour son fonctionnement. Alors que la seconde présentera les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique et on s'attardera sur la machine asynchrone à double alimentation ,pour présenter son principe de fonctionnement et ses différents modes de fonctionnement .

1.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne c'est l'énergie directement tirée du vent qui peut être convertie soit en énergie mécanique ou en énergie électrique au moyen d'un dispositif aérogénérateur. C'est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée. De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps

et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[6][10].

1.3 Aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[11].

1.4 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique suivant le schéma suivant :

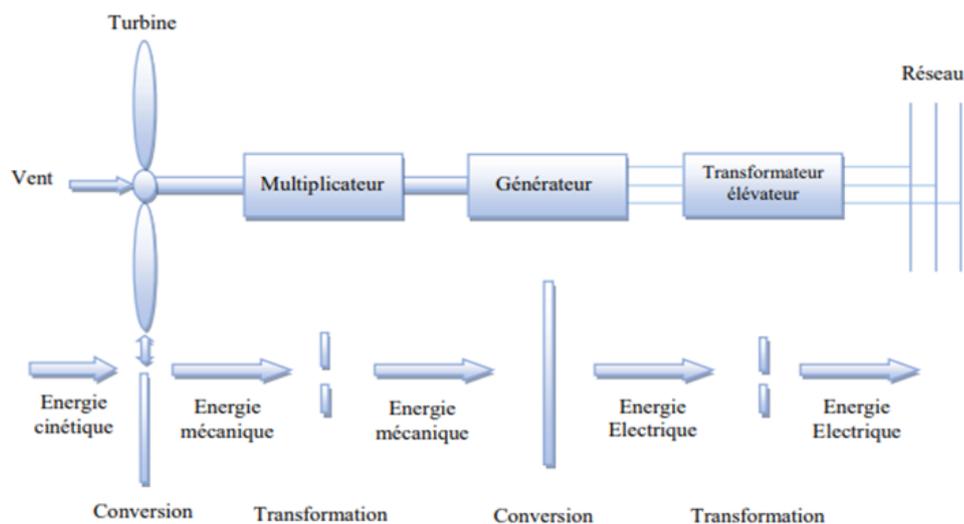


FIGURE 1.1 – Principales étapes de la conversion de l'énergie éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique envoyée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage.

1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'intérêt porté à l'énergie éolienne durant ces dernières années revient sans aucun doute au fait qu'elle ait des avantages. Cependant, elle en possède aussi des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux – ci ne deviennent pas un frein à son développement[12][13][14][7][15].

1.5.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable c'est à dire qu'elle est inépuisable.
- Elle est non polluante, aucune rejection de CO2 ni d'aucun autre gaz polluant ou toxique.
- Son exploitation ne présente pas de risque, Contrairement au nucléaire.
- Elle peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés).
- En termes de coût de revient, elle est la moins chère parmi toutes les énergies renouvelables .
- Après son temps de fonctionnement, une éolienne est entièrement démontable et recyclable.

1.5.2 Inconvénients

- Son aspect aléatoire, la production d'énergie a lieu en fonction du vent.
- l'éolienne produit du bruit.
- L'éolienne à des effets sur le paysage (au niveau de l'esthétique) .
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel.
- le coût de l'énergie éolienne est élevé par rapport aux sources d'énergie classiques.

1.6 Types d'éoliennes

Les éoliennes se rangent en deux grandes familles selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

1.6.1 Éoliennes à axe vertical

Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique[7].

De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus[13].

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est freiné par le relief.

- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour. [7]

1.6.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les éoliennes les plus répandues actuellement comparées à celles à axe vertical sans doute à cause de leurs avantages remarquables.

Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Elles ont un rendement élevé.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénients

- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Coût d'installation plus Elevé.

1.7 Constitutions d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne horizontale est généralement constituée de trois éléments principaux :

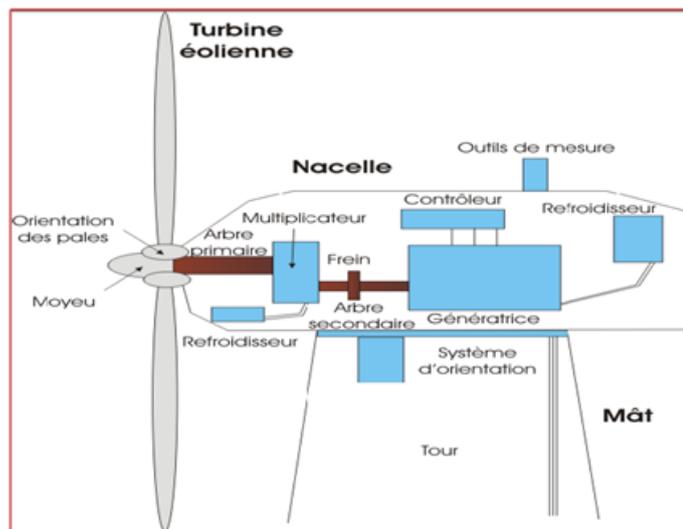


FIGURE 1.2 – Principaux composants d'une éolienne.

Le mât : C'est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.

La nacelle, regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (L'arbre primaire, Le multiplicateur, L'arbre secondaire, Le générateur

électrique).

Le rotor : il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale).

1.8 Technologies des systèmes éoliens

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement donc sur le type d'éolienne utilisée (éolienne à vitesse fixe ou variable).

1.8.1 Éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières éoliennes mises en œuvre. Elles sont munies d'un système d'orientation de pales qui permet le fonctionnement à vitesse fixe donc à une puissance captée limitée à la puissance nominale de la génératrice. Généralement, ce type d'éoliennes repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau. Parmi ses avantages nous avons : [16]

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

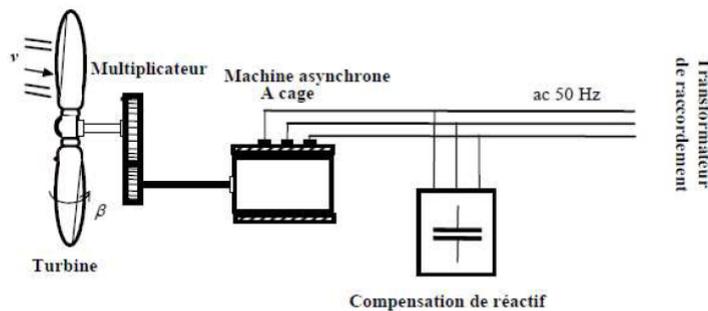


FIGURE 1.3 – Eolienne à vitesse fixe connecté directement au réseau.

1.8.2 Éoliennes à vitesse variable

Malgré ses avantages ; le système précédent peut être bruyant, et limite la plage de vitesses du vent exploitable. Le fonctionnement à vitesse variable peut, en grande partie, remédié à ces inconvénients. Il permet alors de maximiser la puissance extraite du vent en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent. Ce fonctionnement est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. Les deux types de machines électriques utilisées pour ce fonctionnement sont : les machines synchrones et les machines asynchrones à double alimentation.

Les avantages de ce type d'éolienne sont :

- Augmentation du rendement énergétique.
- L'autorisation d'une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- La simplicité du système d'orientation des pales.
- réduction du stress sur l'arbre mécanique.

1.9 Intérêt de la vitesse variable

On donne sur la figure (1.4) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

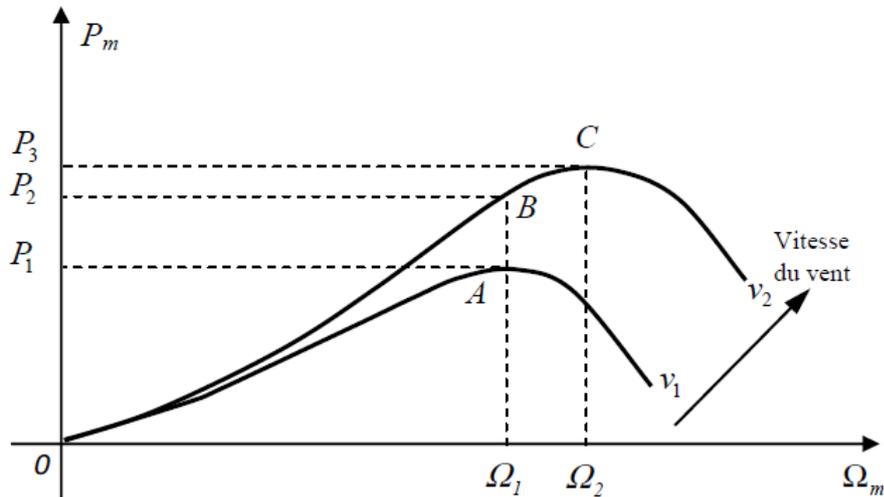


FIGURE 1.4 – Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse du vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A), si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B), la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

1.10 Zones de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne, quelle que soit sa puissance, à une plage de fonctionnement bien délimité en fonction de la vitesse du vent. la figure ci-dessous montre ces zones de fonctionnement :

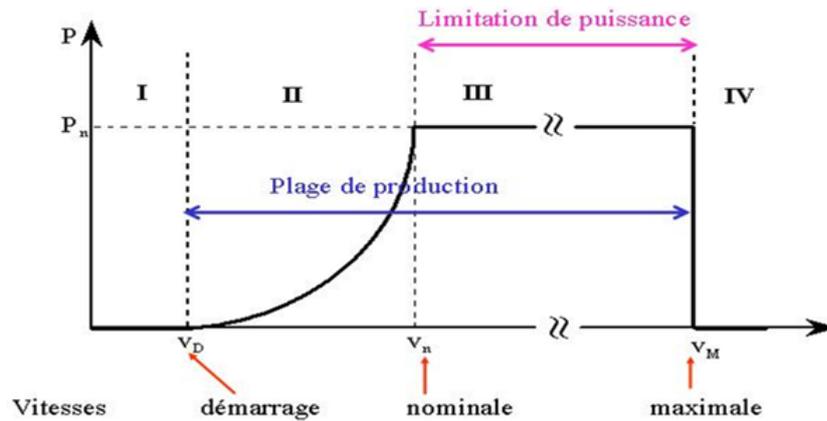


FIGURE 1.5 – zones de fonctionnement d'une éolienne.

Zone I : la vitesse du vent est insuffisante pour faire fonctionner la turbine.

Zone II : l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal.

Zone III : L'extraction du maximum de puissance dans la zone (II) devient une limitation de puissance à sa valeur nominale P_n .

Zone IV : la vitesse du vent est très élevée pour éviter tout endommagement de la turbine, des mesures de protection sont prises en considération. Cela revient à déconnecter l'arbre des pales.

1.11 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter, afin d'éviter la destruction de l'aérogénérateur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine :

Système d'orientation des pales « pitch » : C'est un système de régulation aérodynamique actif qui consiste à conserver une vitesse de rotation constante des pales pour toute une gamme de vitesse du vent, en faisant varier l'angle de calage des pales sur le moyeu. C'est une technique pour réguler la puissance d'une éolienne, lorsque cet angle de calage, d'inclinaison est égale à 90° , les pales sont face au vent, on dit qu'elles sont en drapeau et l'éolienne est arrêtée.

Système à décrochage aérodynamique « stall » : Ce système utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Autrement dit à partir d'une certaine vitesse du vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par les pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales[17].

1.12 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

La technologie des aérogénérateurs évolue dans le temps avec l'avancée de l'électronique de puissance. Ainsi, plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché [18].

Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans les éoliennes de grandes puissances : la machine synchrone, la machine asynchrone à cage (MAS) et la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

1.12.1 Machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Dans cette structure, le rotor de la machine est couplé à l'arbre de la turbine et ses enroulements sont court-circuités, tandis que le stator est directement connecté au réseau par l'intermédiaire d'un banc de condensateur assurant sa magnétisation.

La machine fonctionne sur une plage de vitesse très limitée à cause de son nombre de paires de pôles fixe. L'avantage de cette structure est la simplicité de sa configuration (aucune interface entre le stator et le réseau) et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance extraite du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau.

L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau ça permet un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce qui entraîne une amélioration du rendement et de la qualité d'énergie du système éolien. En plus, permet à la machine de fonctionner à vitesse variable. Cependant, l'interface de l'électronique de puissance est dimensionnée pour la totalité de la puissance nominale ce qui engendre d'énorme perte[18].

1.12.2 Machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes[19]. L'utilisation de ce genres de machine dans le système éolien nécessite obligatoirement une interface d'électronique de puissance entre le stator et le réseau, car il est difficile de maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe afin de synchroniser celle-ci avec le réseau pendant la connexion, ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation[18].

Les principaux inconvénients de cette structure sont :

- le surcoût.
- l'entretien régulier des bagues et balais [20].
- le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. Donc il faut des composants de puissances plus performants voire spéciaux [21].

1.12.3 Machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a été utilisée pendant des années, pour les entraînements à vitesse variable. Pour les éoliennes utilisant cette machine comme génératrice (GADA), le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté aussi au réseau mais à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau) (Figure 1.6). Cette interface permet de découpler partiellement la vitesse mécanique du rotor de la fréquence du réseau. C'est cette machine qui sera adoptée pour le reste de notre travail.

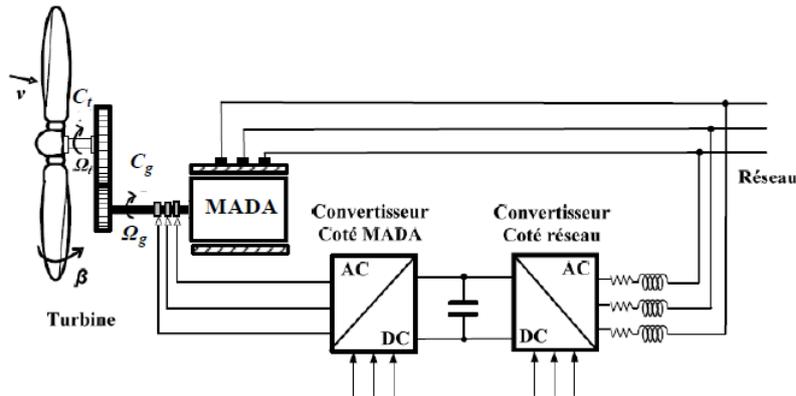


FIGURE 1.6 – Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA

1.12.3.1 Structure des machines asynchrones à double alimentation.

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation et association convertisseurs - MADA sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages. Néanmoins le fonctionnement à vitesse variable de la MADA est atteint avec un convertisseur statique (back-to-back) conçu pour transiter une fraction de sa puissance nominale. C'est pour cela qu'on choisit d'utiliser cette association durant notre travail.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice dans la production en moyenne et forte puissance [12].

1.12.3.2 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour expliquer le principe de fonctionnement de la MADA on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie $(1-g)P$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste $(g.P)$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $(g.f)$. Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs. Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe

apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant [6].

1.12.3.3 Modes de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice, mais la différence avec les autres types de machine 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. C'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme ou même en synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Pour le fonctionnement en mode synchrone ($g=0$) la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle [7].

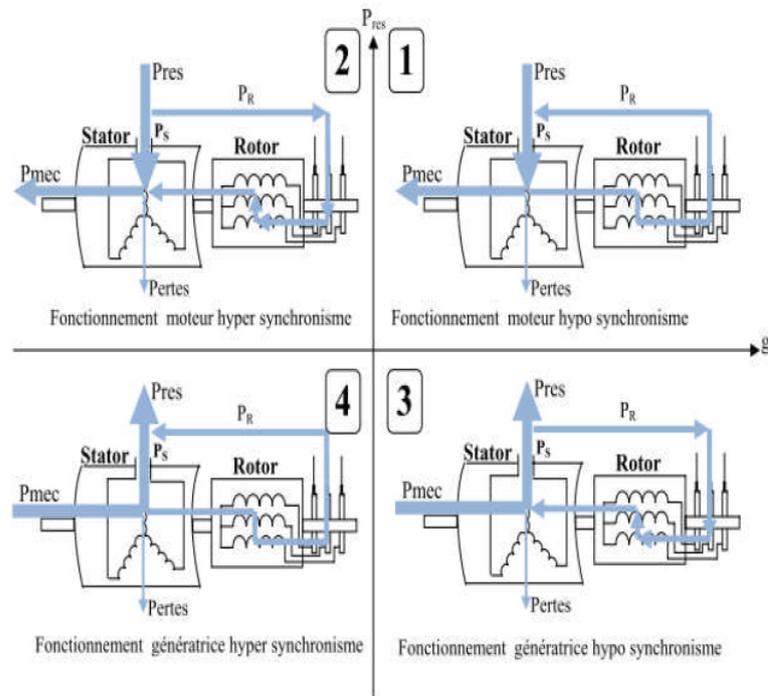


FIGURE 1.7 – Les quatre modes de fonctionnement de la MADA.

1.12.3.4 Plage de variation de vitesse de la MADA

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement de cette machine en génératrice est intéressant. Le convertisseur est dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire une fraction de la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage[6].

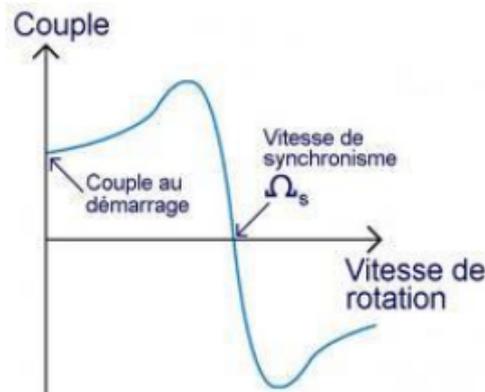


FIGURE 1.8 – Plage de variation de vitesse d'une MADA.

1.12.4 Avantages et inconvénients de la MADA

Avantages

- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine.
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- Le convertisseur coté rotor est dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la MADA, ce qui réduit le prix de revient.
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge ;
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée[22].

Inconvénients

- Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente.

- Le surcoût engendré par la maintenance due à l'emploi d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de la MADA, comparativement aux autres machines.

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre on a commencé par donner quelques notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, où différents types d'éoliennes et leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs capacités de réglage ont été décrits. Par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés adaptables à un système éolien ont été présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : les machines asynchrones et les machines synchrones.

Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable. Un intérêt particulier a été porté au système éolien utilisant une MADA comme génératrice car cela offre plus de possibilités de réglage et la possibilité d'injection directe dans le réseau d'évacuation sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Ce système sera la base du travail de modélisation qui va suivre.

Chapitre 2

Modélisation des différentes parties du système étudié

2.1 Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Après avoir présenté les différentes structures d'une chaîne de conversion électromécanique au chapitre I, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation associée à deux convertisseurs statiques afin de permettre une production optimale d'électricité à vitesse du vent variable.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation de chaque partie de la chaîne de conversion à savoir la partie mécanique (turbine - arbre de transmission) tout en présentant la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) et la partie électrique (la MADA et l'onduleur).

2.2 Description de la structure étudiée

Le système à étudier est composé d'une éolienne à axe horizontal tripales raccordée à un arbre de transmission qui entraîne une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. La MADA est raccordée directement au réseau par le stator et par le rotor à travers deux convertisseurs statiques triphasés (Redresseur- bus continue- Onduleur) comme le montre la figure (2.1).

Cette structure permet la possibilité de lui appliquer les lois de commandes pour générer une production optimale de la puissance électrique à vitesse du vent variable.

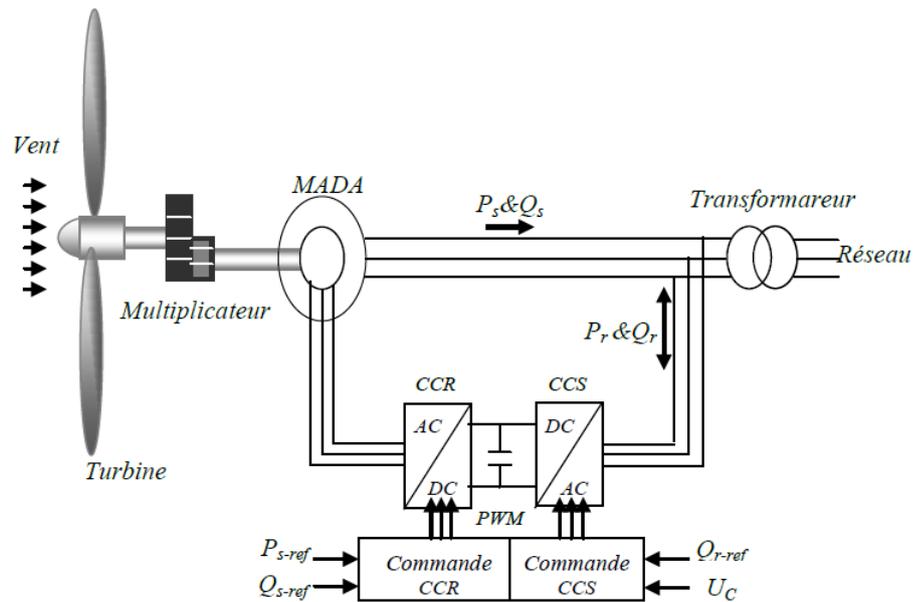


FIGURE 2.1 – Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA

2.3 Modélisation de la partie mécanique de l'aérogénérateur

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

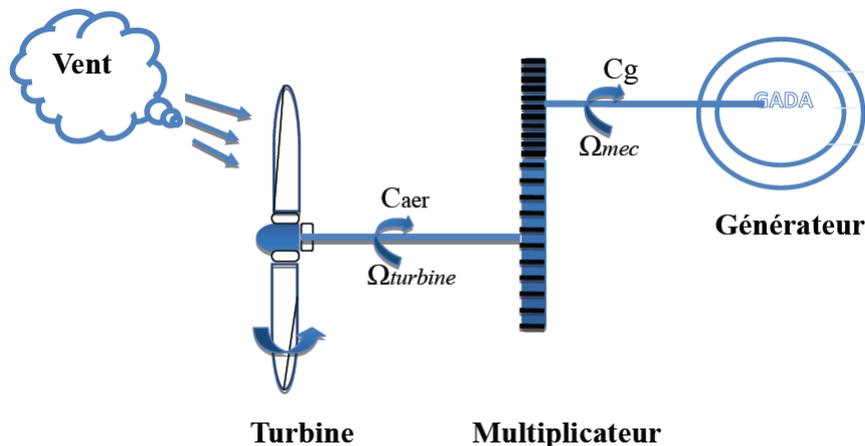


FIGURE 2.2 – Schéma de la turbine éolienne

2.3.1 Modèle du vent

La première étape nécessaire pour un projet de production éolienne est le choix géographique du site. Les propriétés du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, puisque sa puissance, dans les conditions idéales est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour connaître les caractéristiques d'un site, il

est indispensable d'avoir des mesures de la vitesse du vent et de sa direction, sur une grande période du temps[23].

2.3.2 Modèle de la turbine

La puissance produite par un vent traversant une surface S dépend du cube de la vitesse du vent V_{vent} et de la densité de l'air ρ . Cette puissance est donnée par :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho S V_{vent}^3 \quad (2.1)$$

Avec

S : surface circulaire balayée par la turbine, où $S = \pi R^2$. (R : rayon de la turbine (longueur de pale)).

ρ : densité de l'air (approximé $1,22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C).

V_{vent} : vitesse du vent (m/s).

Dans un système éolien, en raison de diverses pertes, la puissance extraite fournie sur le rotor de la turbine est inférieure à la puissance incidente. La puissance extraite est exprimée par :

$$P_{aero} = C_p P_{vent} = \frac{1}{2}\rho S V_{vent}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.2)$$

Où $C_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend du rapport, qui est le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et l'angle d'orientation β des pales. La vitesse relative λ est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ($\Omega_{turbine} R$) et la vitesse du vent comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{V_{vent}} \quad (2.3)$$

Où $\Omega_t(\text{rad/s})$ est la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine.

À partir de l'équation (2.2), et en connaissant la vitesse de la turbine on déduit l'expression du couple éolien :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho S V_{vent}^3 \quad (2.4)$$

Comme nous l'avons déjà cité l'évolution du coefficient de puissance C_p est une donnée spécifique à chaque éolienne, elle dépend de la vitesse spécifique λ (en fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β . On choisit pour cette étude une éolienne de 7.5 KW, tripale dont la longueur d'une pale est de 3.24m. L'expression de son coefficient de

puissance est approximée par l'équation(2.5)[26].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(\frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda_i \quad (2.5)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (2.6)$$

et :

β : Angle d'orientation de pales, exprimé en degrés.

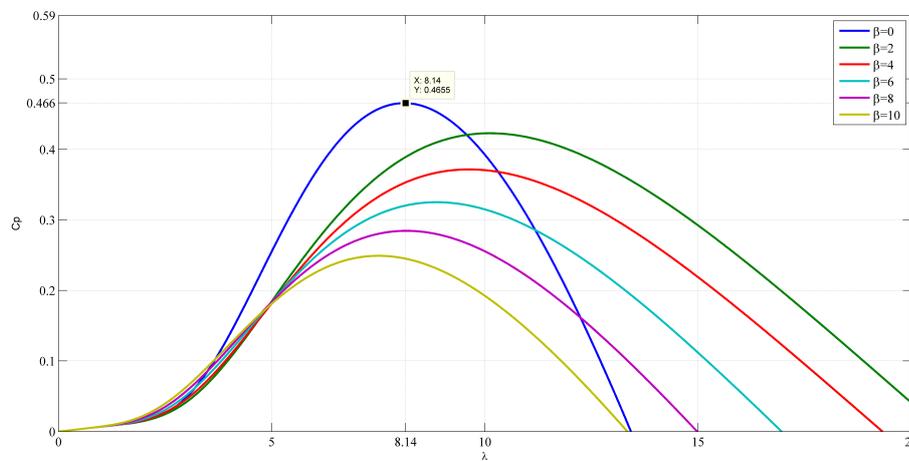


FIGURE 2.3 – Coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs β .

La figure(2.3) montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs β . Cela donne un coefficient de puissance maximum de 0,46 pour un rapport de vitesse λ qui est de 8,14 en maintenant β à 0 °.En réglant respectivement C_p et λ à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale décrivant le principe de la MPPT.

2.3.2.1 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente ($\Omega_{turbine}$) et à couple élevé (C_{aer}) produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse (Ω_{mec}) et à couple faible (C_g) utilisée par la génératrice[24].

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement par un Gain de vitesse G.

Le couple aérodynamique est défini comme le rapport entre la puissance aérodynamique et la vitesse angulaire de la turbine :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \quad (2.7)$$

Le couple sur l'arbre de la machine est donné par :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.8)$$

La vitesse de la turbine est donnée par :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.9)$$

On peut résumer :

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turbine}} = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (2.10)$$

2.3.2.2 Équation dynamique de l'arbre

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentés par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramené sur l'axe rapide et de l'inertie de la génératrice J_g et supposant que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale est donnée par l'expression suivante :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.11)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor est donnée par la relation suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{turbine}}{dt} = C_{mec} \quad (2.12)$$

Où

J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

C_{mec} est le couple mécanique et prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.13)$$

L'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice est donnée par (2.14) :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (2.14)$$

Si on applique la transformé de Laplace sur l'équation précédente on peut écrire :

$$C_g - C_{em} = (JP + f)\Omega_{mec} \quad (2.15)$$

Le schéma bloc de la figure (2.4) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la GADA. La vitesse du vent V_{vent} est considérée comme une entrée perturbatrice au système[5][7].

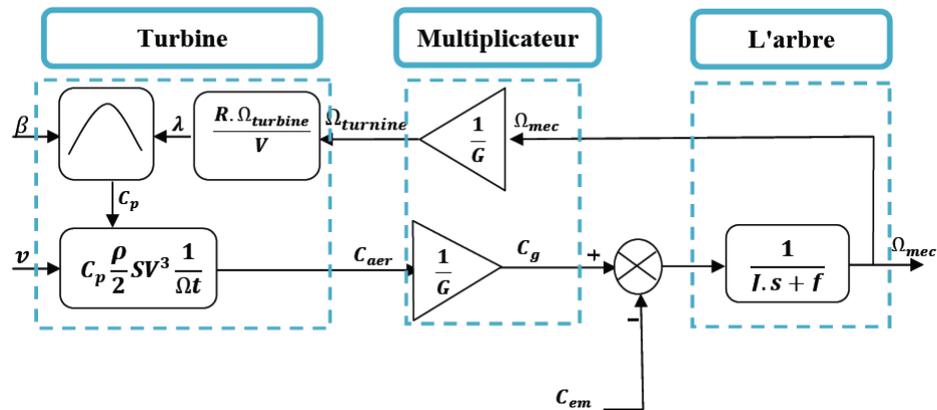


FIGURE 2.4 – Schéma bloc du modèle de la turbine

2.3.3 Stratégie de commande de la turbine

On distingue quatre zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable comme l'indique la figure(2.5). La première zone concerne la période de démarrage, la deuxième est la zone d'extraction de la puissance maximale "MPPT", la troisième zone est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale et la quatrième à la limitation de la puissance produite à sa valeur nominale.

Dans ce qui suit on va s'intéresser à la deuxième zone de fonctionnement, où la recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking), peut être réalisée tout en agissant sur la vitesse de rotation de l'éolienne.

2.3.3.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (à travers le couple électromagnétique) en ajustant la vitesse relative à sa valeur optimale (λ_{opt}), et cela en régulant la vitesse de rotation de la génératrice à une valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice.[5]

On distingue deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite :

- Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse ;
- Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.

C'est cette dernière qu'on a utilisée dans notre travail.

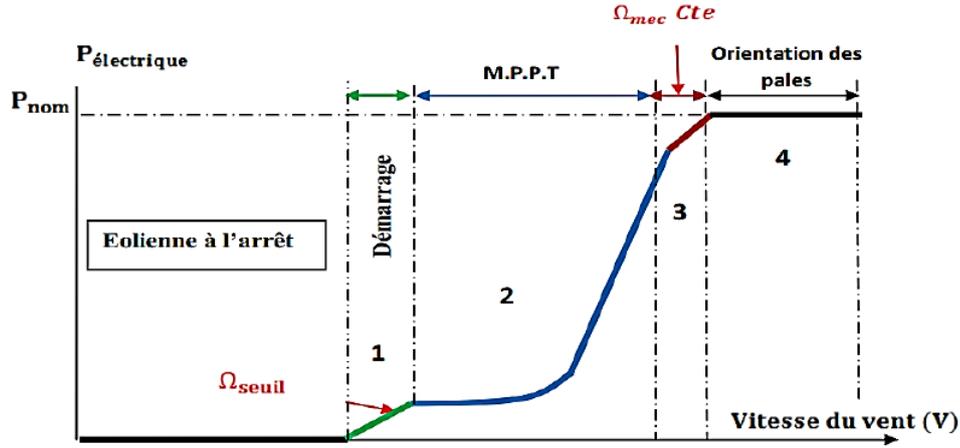


FIGURE 2.5 – Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

2.3.3.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette stratégie de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.16)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique (C_{mec}) développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (2.17)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estime}}{G} \quad (2.18)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (2.4) :

$$C_{aer-estime} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estime}} V_{vent-estime}^3 \quad (2.19)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-estime}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.20)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$V_{vent-estime} = \frac{\Omega_{turbine-estime} \cdot R}{\lambda} \quad (2.21)$$

En regroupant ces quatre équations (2.18)(2.19)(2.20)(2.21), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \pi R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.22)$$

CHAPITRE 2. MODÉLISATION DES DIFFÉRENTES PARTIES DU SYSTÈME ÉTUDIÉ

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho\pi R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.23)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice :

$$C_{em-ref} = K \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (2.24)$$

Avec :

$$K = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho\pi R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3}$$

Le schéma bloc de la figure (2.6) résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

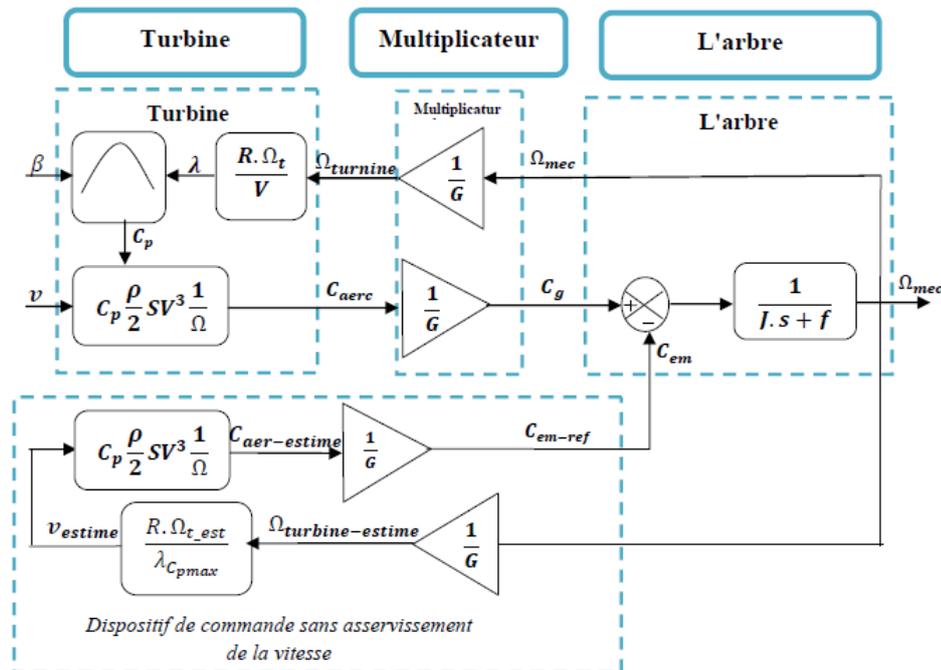


FIGURE 2.6 – Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

2.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

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[25].

Le stator de la machine est constitué de trois enroulements (a_s, b_s, c_s) répartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $(\frac{2\pi}{3})$ et de pulsation ($\omega_s = 2\pi f_s$). Le rotor est aussi formé de trois enroulements (a_r, b_r, c_r) de pulsation ($\omega_r = 2\pi f_r$) et séparés d'un angle électrique de $(\frac{2\pi}{3})$ [26].

La représentation schématique de la MADA dans le repère triphasé est donnée par la figure en bas , θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase (a_s) statorique et la phase (a_r) rotorique.

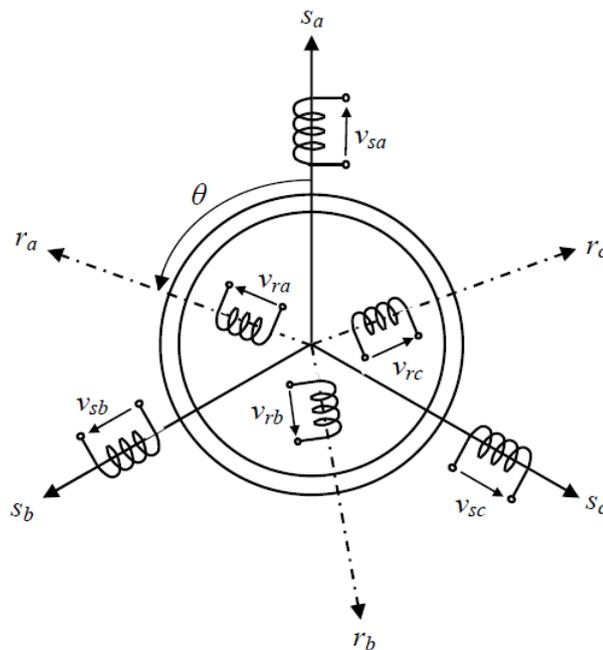


FIGURE 2.7 – Représentation de la MADA dans le système triphasé

2.4.1 Hypothèses simplificatrices

La MADA est une machine très complexe. Nous devons procéder à quelques simplifications pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA) .

On suppose que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants,
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;

- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte le fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements[25].

2.4.2 Modèle de la MADA dans un repère triphasé (a,b,c)

Equations électriques

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine peuvent être exprimées par la loi de Faraday et s'écrivent comme suit :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

R_s et R_r : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

M_s, M_r : Inductances mutuelles.

Et la matrice des inductances mutuelles stator-rotor :

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

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Equation mécanique

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_{mec} \quad (2.25)$$

La machine asynchrone à des équations compliquées dans le repère triphasé abc. La complexité provient du fait que la matrice $[M_{sr}]$ varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaire. Et dans le but de rendre l'écriture des ces équations plus simple à exploiter on a recours au changement de repère. Dans notre étude nous allons utiliser la transformation de Park[10].

2.4.3 La transformation de Park

La transformation de Park permet de passer du repère triphasé (a-b-c) au repère équivalent biphasés généralisé (d-q-o) et inversement.

On utilise cette méthode pour simplifier les équations de la machine asynchrone et ainsi obtenir un modèle plus simple. Ce changement permet d'éliminer les inductances variables dans le temps, notamment de rendre la matrices impédance indépendante de θ . Cette transformation permet d'orienter le repère (d-q-o) comme on le désire. Ainsi, on peut l'orienter suivant le stator, le rotor ou encore suivant le champ tournant[5][27].

Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe (2.26) et inverse (2.27).

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

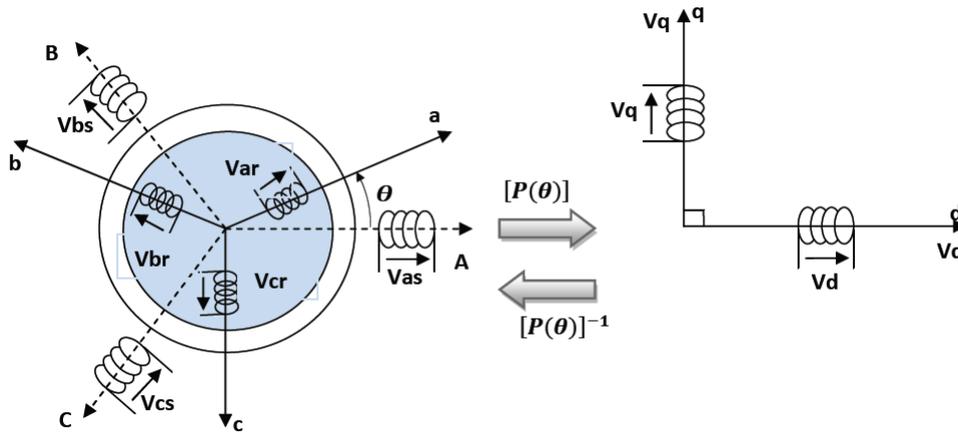


FIGURE 2.8 – Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.

La projection des grandeurs réelles (a-b-c) sur le repère (d-q) se fait en utilisant la matrice de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Et inversement :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix}$$

Avec :

$x_a; x_b; x_c$ sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées ;

$x_d; x_q$ sont les valeurs instantanées des grandeurs diphasées ;

x_o est la composante homopolaire.

2.4.4 Modèle de la machine dans le repère diphasé(d,q)

Pour un système équilibré la composante homopolaire est considérée comme nulle. L'application de la transformation de Park aux équations de la MADA dans un repère abc, nous donne :

Les expressions électriques

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Avec :

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

Equations magnétiques

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statoriques de la machine ;

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotoriques de la machine ;

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

Équation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être obtenu à l'aide du bilan de puissance .Il existe plusieurs expressions du couple électromagnétique toutes égales.

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (2.30)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{array} \right. \quad (2.31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \\ Q_r = V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

2.4.5 Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique. [28]

2.4.5.1 Référentiel lié au Stator

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées telles que régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \end{array} \right. \quad (2.33)$$

2.4.5.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est supposée constante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (2.34)$$

2.4.5.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X ,Y),il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \end{array} \right. \quad (2.35)$$

Dans notre travail on utilise le référentiel lié au champs tournant pour la modélisation et la commande de la MADA. Dans ce cas, le modèle de la MADA devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (2.36)$$

2.5 Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance

Afin que la MADA fonctionne à des vitesses variables (en mode hypo ou hypersynchrone) le convertisseur d'électronique de puissance doit être bidirectionnel[29].

La chaîne de conversion d'électronique de puissance est composée de deux convertisseurs statiques un coté machine (CCM) et l'autre coté réseau (CCR) couplés sur un bus continu commun.

La commande du convertisseur statique branché au réseau (CCR) consiste à réguler le bus continu intermédiaire quelque soit la puissance générée par le système de conversion sous fréquence variable, tout en assurant un facteur de puissance unitaire du coté alternatif. Tandis que, le convertisseur statique branché au rotor de la MADA (CCM) est utilisé pour la gestion des puissances actives et réactives de la machine. Dans notre étude, nous nous intéressons à la commande du (CCM)

2.5.1 Modélisation de l'onduleur

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux alimenté par une tension U_{dc} est représentée par la Figure (2.9).

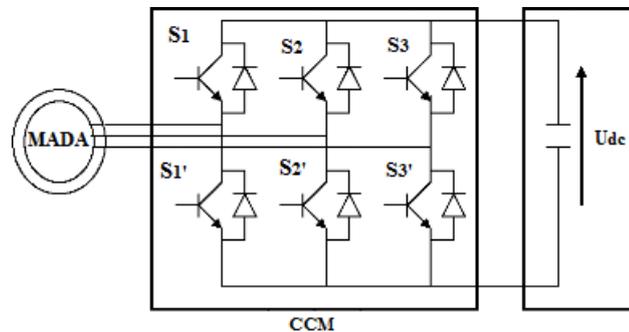


FIGURE 2.9 – Schéma de connexion d'un onduleur de tension sur le rotor de la MADA.

Pour des interrupteurs idéaux :

$i_{Si} = 0, V_{Si} \neq 0$:Interrupteur ouvert ;

$i_{Si} \neq 0, V_{Si} = 0$:Interrupteur fermé .

La loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.37)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

La substitution des équations précédentes nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

En remplaçant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.38)$$

Nous déduisant le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}.$$

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modéliser la chaine de conversion d'énergie éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation. En premier lieu nous avons modéliser la partie mécanique(turbine-arbre de transmission),tout en décrivant le principe de la MPPT.

Ensuite nous avons modéliser la MADA en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices.Nous avons constaté que le modèle du MADA est un système à équations différentielles. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au champ tournant à l'aide de la transformation de PARK.

Le chapitre suivant sera consacré à la commande directe du couple (DTC) de la MADA.

Chapitre 3

Commande direct du couple (DTC) de la MADA

3.1 Introduction

Après avoir déterminé le modèle mathématique simplifié de la machine dans le deuxième chapitre, une commande adéquate est nécessaire afin de bien contrôler les puissances statiques pour permettre un bon fonctionnement de la MADA en génératrice. Plusieurs méthodes ont été présentées dans la littérature, dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la commande directe du couple (DTC).

La structure de la commande direct du couple (DTC), appliquée aux machines à courant alternatif a été introduite par I. Takahashi et M. Deponbrock en 1986, depuis de nombreux travaux ont été effectués sur ce sujet et donnent lieu à diverses évolutions. Son objectif est de réguler le flux et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, de flux ou de couple, les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants qui alimentent la machine[26]. Si le couple ou le flux sortent d'une plage de tolérance prédéfinies, les interrupteurs de l'onduleur sont commutés vers l'état suivant de telle manière à revenir dans la plage aussi vite que possible[30].

La DTC a été proposée comme alternative aux méthodes classiques, appelées méthodes de commande indirecte qui exigent une alimentation par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). De par ses avantages déjà bien connus par rapport aux techniques conventionnelles, notamment dans : la réduction du temps de réponse du couple, l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations paramétriques de la machine, l'imposition directe de l'amplitude des ondulations du couple et du flux, l'absence de transformations de coordonnées de Park sur des axes tournants. D'autre part, cette loi de commande s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique (vitesse, position)[7].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la commande DTC appliquée au convertisseur coté rotor de la MADA. On développera le principe général ainsi que les caractéristiques principales de cette commande, puis on présentera les résultats de la simulation de celle ci sur Matlab/Simulink.

3.2 Principe général de la commande directe du couple

La commande directe du couple (Direct torque control) d'une machine asynchrone à double alimentation est basée sur la détermination directe des séquences de commande appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension. La commande de ces interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux rotorique la direction déterminée par les valeurs de consigne.

Pour déterminer la commande de ces interrupteurs il faut connaître l'état électromagnétique de la machine. Les deux variables contrôlées sont le flux rotorique et le couple électromagnétique qui sont commandées par des régulateurs à hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant de commutation.

Le schéma de principe de cette technique est montré par la figure(3.1), où sont représentés les estimateurs du flux et du couple, ainsi que les régulateurs à hystérésis de ces derniers. La position du vecteur flux est calculée à partir de ses composantes dans le plan complexe $\alpha\beta$. Le régulateur du flux et à deux niveaux par contre celui du couple est à trois niveaux. Dans une commande DTC il est préférable de travailler avec une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations de couple provoquées par les régulateurs[5][7][26].

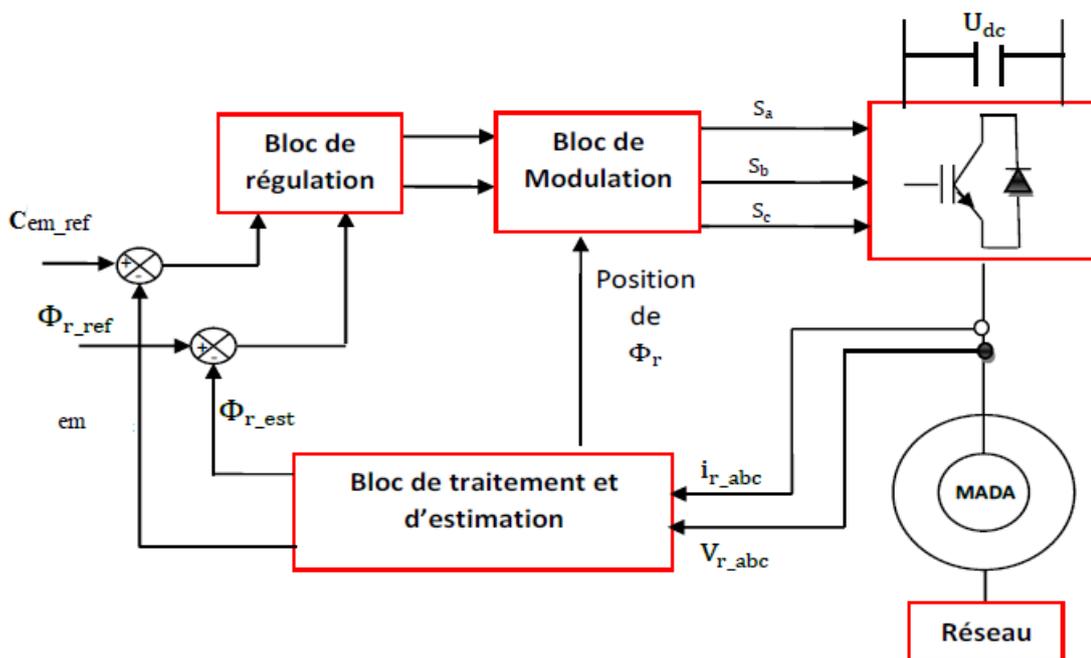


FIGURE 3.1 – Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à une MADA

3.3 Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension

Le convertisseur de puissance utilisé dans le coté rotor de la machine (CCM) est un onduleur de tension. Ce dernier permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase correspondant aux huit séquences de la tension de sortie, on cherche donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration bien déterminée des interrupteurs. Comme nous disposons de trois bras, il y a donc $2^3 = 8$ possibilités pour le

vecteur V_r . Deux vecteurs (V_0 et V_7) correspondent au vecteur nul ($S_a S_b S_c$) = (111) ou (000), où les trois interrupteurs du haut (ou du bas) du convertisseur sont actifs en même temps[26], les six autres ont le même module égale à $\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$. Les extrémités de ces six vecteurs définissant les sommets d'un hexagone régulier puisque deux vecteurs successifs font entre eux un angle de $\frac{\pi}{3}$.

En utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, le vecteur tension peut s'écrire :

$$V_r = \sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}(S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (3.1)$$

Les huit vecteurs de tension sont représentés dans le plan ($\alpha_r - \beta_r$) par la figure (3.2) et la position et le module de chaque vecteur sont donnés dans le tableau (3.1).

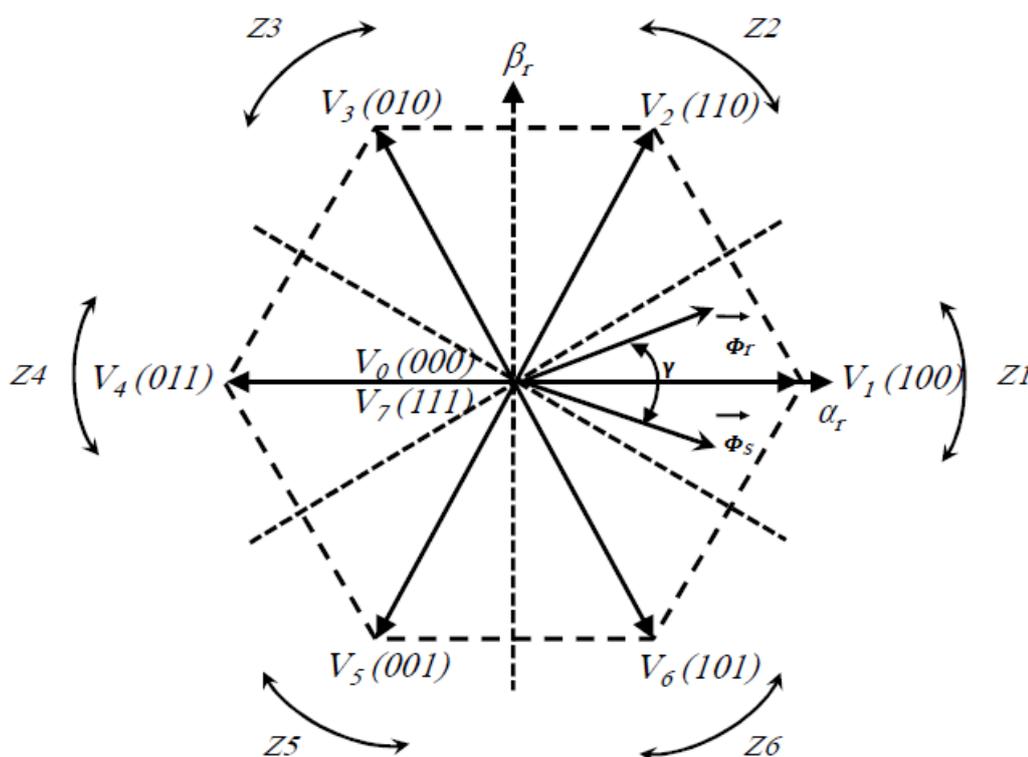


FIGURE 3.2 – Représentation vectorielle des tensions de l'onduleur.

V_r	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7
Module	0	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	$U_{dc}\sqrt{\frac{2}{3}}$	0
Argument	0	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	π	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3}$	0

TABLE 3.1 – Module et argument de chaque vecteur tension

3.4 Contrôle du flux rotorique et du couple électromagnétique

3.4.1 Principe de contrôle du flux rotorique

L'expression du flux rotorique déduite à partir de l'expression de la tension rotorique :

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\phi_r}{dt} \implies \phi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r I_r) dt + \phi_r(0) \quad (3.2)$$

Où $\phi_r(0)$ est le vecteur flux à l'instant $t=0$.

Entre deux commutations de l'onduleur, le vecteur tension sélectionné est toujours le même, d'où :

$$\phi_r(t) = \phi_r(0) + V_r T_e - \int_0^t (R_r I_r) dt \quad (3.3)$$

Avec l'hypothèse que (R_r) reste constante et que le terme $(R_r I_r)$ est négligeable devant la tension (V_r) , soit :

$$\phi_r(t) = \phi_r(0) + V_r T_e \implies \Delta\phi_r = V_r T_e \quad (3.4)$$

L'équation (3.4) implique que pour une période d'échantillonnage constante T_e , le vecteur (ϕ_r) se déplace sur une droite dont la direction et l'amplitude sont données par (v_r) .

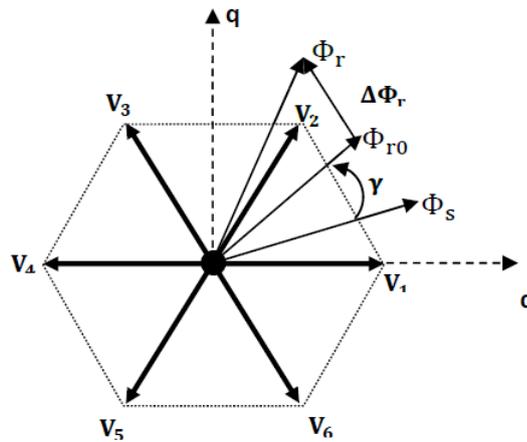


FIGURE 3.3 – Principe du contrôle du flux rotorique

Pour l'augmentation du flux, on applique un vecteur de tension V_r parallèle à ϕ_r et de même sens, et de sens opposé pour le diminuer; tandis que l'application d'un vecteur de tension en quadrature avec ϕ_r fait varier sa phase et n'agit pas sur son amplitude. Donc, la variation du flux donne deux composantes, une composante change l'amplitude du vecteur noté « composante du flux » et l'autre change sa position notée « composante du couple » [20] comme l'illustre la figure suivante(3.4) :

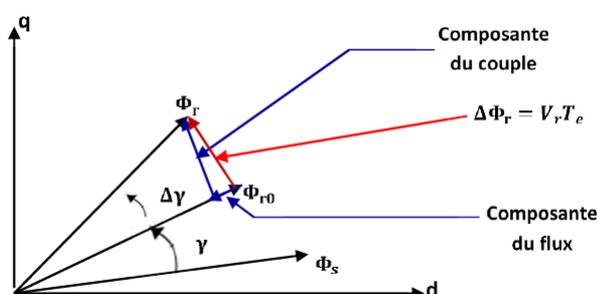


FIGURE 3.4 – Illustration de la composante du couple et du flux lors de la variation du vecteur flux

Ainsi il est possible de fonctionner avec un module de flux (ϕ_r) pratiquement constant; pour cela il suffit de choisir une trajectoire presque circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Alors le vecteur tension appliqué doit être toujours perpendiculaire au vecteur flux (T_e devra nécessairement être la plus petite que possible). La valeur du flux balance entre deux valeurs proches ϕ_{rmin} et ϕ_{rmax} déterminées par la bande du comparateur à hystérésis utilisé[31].

Le choix d'une séquence adéquate des vecteurs V_r durant chaque période d'échantillonnage, doit permettre d'avoir une composante du flux minimale et une composante du couple maximale[32].

3.4.2 Principe de contrôle du couple de la machine

Le but de la commande des interrupteurs de l'onduleur de tension est d'obtenir une variation du couple rapide en changeant le vecteur flux rotorique. L'interaction entre le flux statorique et rotorique produit un couple électromagnétique proportionnel à l'angle γ entre les deux vecteurs où il sera maximal lorsque les deux vecteurs seront parfaitement en quadrature selon l'équation (3.5) [33].

$$C_{em} = K(\vec{\phi}_s \cdot \vec{\phi}_r) = K|\vec{\phi}_s| \cdot |\vec{\phi}_r| \sin(\gamma) \quad (3.5)$$

Avec γ l'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.

on constate que le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs ϕ_s et ϕ_r et de leur position relative γ .

En considérant que le flux statorique est constant, ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator de la MADA et si en plus on maintient le flux rotorique à peu près constant en le limitant dans sa bande d'hystérésis autour de sa consigne, le couple sera donc en fonction de l'angle de déphasage entre ces deux flux. Pour régler l'angle et donc le couple, il suffit de régler la position du vecteur flux du rotor en appliquant un vecteur de tension approprié.

3.5 Sélection du vecteur de tension

Le choix du vecteur tension rotorique dépend de la variation souhaitée pour le module de ϕ_r , de son sens de rotation et également de l'évolution souhaitée pour le couple. Lorsque le vecteur du flux ϕ_r se trouve dans une zone i , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivants :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors ϕ_r croît et C_{em} croît,
- Si V_{i-1} est sélectionné alors ϕ_r croît et C_{em} décroît,
- Si V_{i+2} est sélectionné alors ϕ_r décroît et C_{em} croît,
- Si V_{i-2} est sélectionné alors ϕ_r décroît et C_{em} décroît,
- V_0 ou V_7 sont sélectionnés, alors la rotation du flux ϕ_r est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux ϕ_r reste inchangé. En fait, les vecteurs nuls ne sont pas réellement nécessaires pour le réglage de flux et du couple ; cependant, ils sont employés pour réduire les ondulations au niveau du couple et de flux au minimum autant que possible [34].

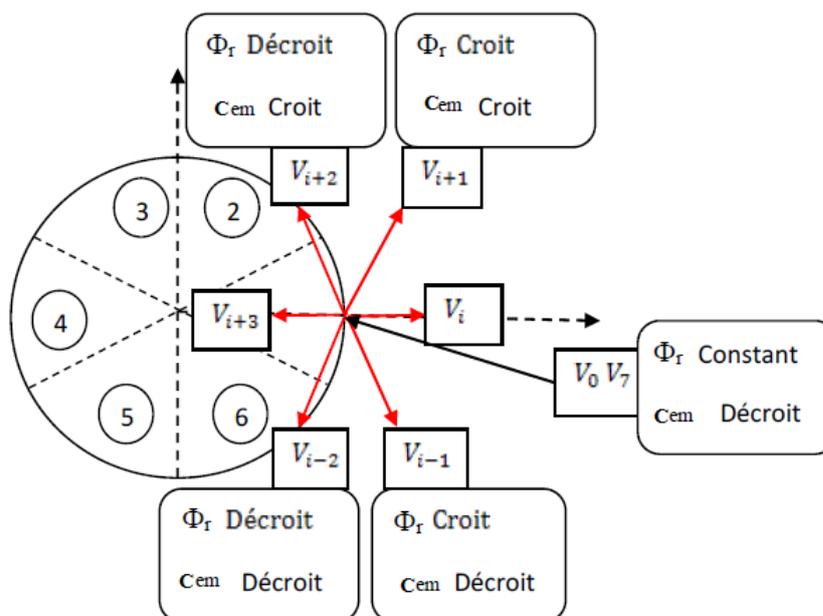


FIGURE 3.5 – Sélection du vecteur tension approprié.

En effet, les vecteurs V_{i+1} et V_{i-2} nous permettent d'avoir une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux au début de zone (car ils sont perpendiculaires au vecteur ϕ_r) et l'inverse en fin de zone. Alors que les vecteurs V_{i-1} et V_{i+2} c'est en fin de zone qu'il permettent d'avoir une évolution rapide du couple et une évolution lente de l'amplitude du flux et l'inverse au début de zone[35].

Pour ce qui est des deux vecteurs V_i et V_{i+3} , ils ne sont jamais utilisés quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux. En effet, ceux-ci ont la « composante de flux » la plus forte (évolution très rapide de ϕ_r) mais l'effet sur le couple lui, dépend de la position de ϕ_r dans la zone, avec un effet nul en milieu de zone[36].

Le vecteur de tension rotorique V_r à la sortie de l'onduleur à appliquer à la MADA, est déduit des écarts de couple et de flux estimés par rapport à leur référence, ainsi que de la position du

vecteur ϕ_r . Un estimateur de flux en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont nécessaires pour une commande DTC .

3.6 Estimation des grandeurs de commande

Le défi de la commande directe du couple et du flux consiste à obtenir une estimation fiable de la valeur instantanée du couple, du flux ainsi que de l'angle du flux rotorique. Les performances du système de contrôle dépendent de la précision dans l'estimation de ces grandeurs[5].

3.6.1 Estimation du flux rotorique

L'estimation du flux rotorique peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs rotoriques courant et tension. L'expression du flux rotorique s'écrit :

$$\phi_r = \int_0^t (V_r - R_r I_r) dt \quad (3.6)$$

Le vecteur flux rotorique est calculé à partir de ses deux composantes biphasées d'axes (α, β) , tel que :

$$\phi_r = \phi_{r\alpha} + j\phi_{r\beta} \quad (3.7)$$

Avec

$$\begin{cases} \phi_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r I_{r\alpha}) dt \\ \phi_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r I_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (3.8)$$

On obtient les tensions $(V_{r\alpha})$ et $(V_{r\beta})$ à partir des commandes $(S_a S_b S_c)$ et la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur U_{dc} et en appliquant la transformée de Concordia au rotor soient :

$$\begin{cases} V_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_a - \frac{1}{2}(S_b - S_c)) \\ V_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (3.9)$$

De même, les courants $i_{r\alpha}$ et $i_{r\beta}$ sont obtenus à partir de la mesure des courants réels rotorique (i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}) et par application de la transformé de Concordia :

$$\begin{cases} I_{r\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{ra} \\ I_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \end{cases} \quad (3.10)$$

Le module de flux rotorique s'écrit :

$$\phi_r = \sqrt{\phi_{r\alpha}^2 + \phi_{r\beta}^2} \quad (3.11)$$

La zone i dans laquelle se situe le vecteur ϕ_r est déterminée à partir des composantes $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$. L'angle α_r entre le référentielle rotorique et le vecteur flux(ϕ_r) est égal à :

$$\alpha_r = \arctan \frac{\phi_{r\beta}}{\phi_{r\alpha}} \quad (3.12)$$

3.6.2 Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant en utilisant l'expression du couple suivante :

$$C_{em} = P.(\phi_{r\alpha}i_{r\beta} - \phi_{r\beta}i_{r\alpha}) \quad (3.13)$$

On remarque que l'exactitude de l'expression du couple dépend de la qualité d'estimation du flux.

3.7 Correction du flux rotorique et du couple électromagnétique

3.7.1 Correcteur du flux

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande étudiée. En effet, avec un correcteur à hystérésis à deux niveaux on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux ϕ_r dans une couronne circulaire comme le montre la (Figure 3.6). La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de ϕ_r , afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Ainsi cflx représente l'état de sortie du comparateur à hystérésis et indique directement si l'amplitude de flux doit être augmentée (cflx = 1) ou diminuer (cflx = 0) de façon à maintenir $|\phi_{r,ref} - \phi'_r| < \Delta\phi_r$ [26].

Avec : $\phi_{r,ref}$: le flux rotorique de consigne ϕ'_r : le flux rotorique estimé. $\Delta\phi_r$: la largeur d'hystérésis du correcteur.

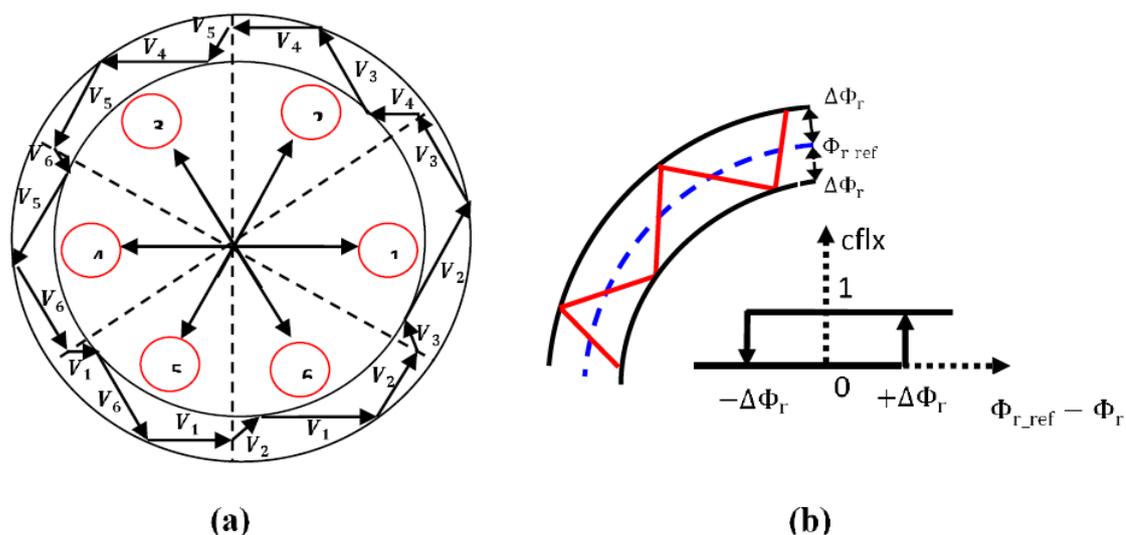


FIGURE 3.6 – (a) : Sélection des vecteurs tensions correspondants au contrôle de l'amplitude ϕ_r .
 (b) : Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.

3.7.2 Correcteur du couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites

$$|C_{em-ref} - C'_{em}| \leq \Delta C_{em}$$

Avec :

C_{em-ref} : la référence de couple .

C'_{em} : Le couple électromagnétique estimé.

ΔC_{em} : la bande d'hystérésis du correcteur.

Cependant, contrairement au flux, le couple peut être positif ou négatif selon le mode de fonctionnement de la machine. Donc, on choisit d'utiliser un correcteur à hystérésis à trois niveaux. La sortie de ce contrôleur est représentée par la variable booléenne $ccpl$, elle dépend de la valeur du couple électromagnétique par rapport à sa bande d'hystérésis.

Si $ccpl = 1$, le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l'augmenter.

Si $ccpl = 0$, le couple est à l'intérieur de la bande et il faut l'y maintenir.

Si $ccpl = -1$, le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande et il faut donc le diminuer.

Ce choix d'augmenter le nombre de niveaux est proposé afin de minimiser la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle du flux.

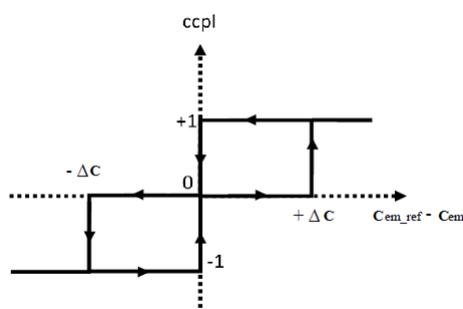


FIGURE 3.7 – Correcteur du couple à trois niveaux

3.8 Elaboration de la table de commutation

On élabore la table de commutation de la structure de contrôle en fonction des sorties des contrôleurs ($cflx$, $ccpl$) et des zones S de position du vecteur ϕ_r comme le montre le tableau (3.2).

Cette table permet de déterminer, pour chaque secteur donné, le vecteur optimal (la séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur) qu'il faut appliquer selon les différents états des sorties des correcteurs à hystérésis.

cflx	ccpl	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
1	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
1	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
0	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
0	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

TABLE 3.2 – Table de commutation avec un correcteur du couple à trois niveaux.

Avec :

$V_0=[0,0,0]$; $V_1=[1,0,0]$; $V_2=[1,1,0]$; $V_3=[0,1,0]$; $V_4=[0,1,1]$; $V_5=[0,0,1]$; $V_6=[1,0,1]$; $V_7=[1,1,1]$

3.9 Simulation de la chaine éolienne proposée

La structure complète du modèle global de la commande de la chaine éolienne est représentée par la figure (3.8), on utilise dans cette commande, la table classique de Takahashi. Le choix du vecteur de tension est effectué a chaque période d'échantillonnage. La structure de commande peut être divisée en quatre blocs comme il a été détaillé dans la figure ci-dessous :

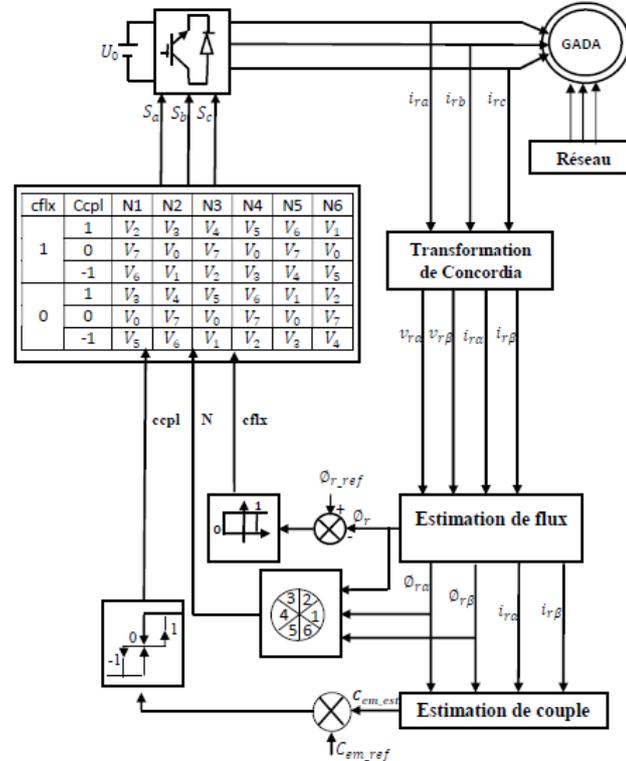


FIGURE 3.8 – Schéma structurel de commande du système éolien global.

Afin d'optimiser et de maximiser la puissance extraite du vent un algorithme MPPT est appliqué. Cet algorithme nous fournit un couple de référence (équation 2.23) qui sera la consigne de la commande. Les paramètres de simulation utilisés sont donnés en Annexe A.

3.10 Résultats de simulation et interprétations

3.10.1 Fonctionnement à vitesse du vent en paliers

Pour faire tourner la machine dans ses trois de régimes de fonctionnement (hyposynchrone, synchrone et hypersynchrone), nous avons choisit un profil du vent en forme de paliers de cinq niveaux, représenté dans la figure(3.9) .

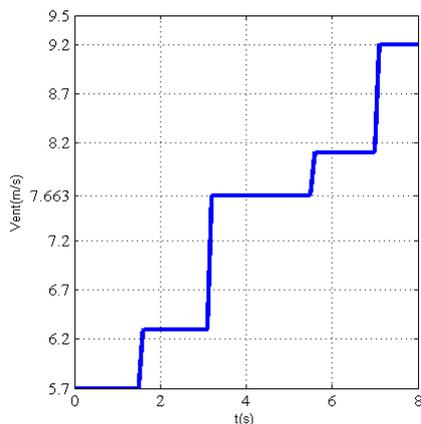


FIGURE 3.9 – Profil de la Vitesse du vent.

L'algorithme MPPT appliqué(dans la zone 2 de la figure 2.5) permet de fixer le rapport de vitesse (λ) à sa valeur optimale ($\lambda_{opt} = 8.14$) avec un coefficient de puissance maximal ($C_p - max = 0.46$) comme l'indique la figure (3.10)et ce quel que soit la vitesse du vent.

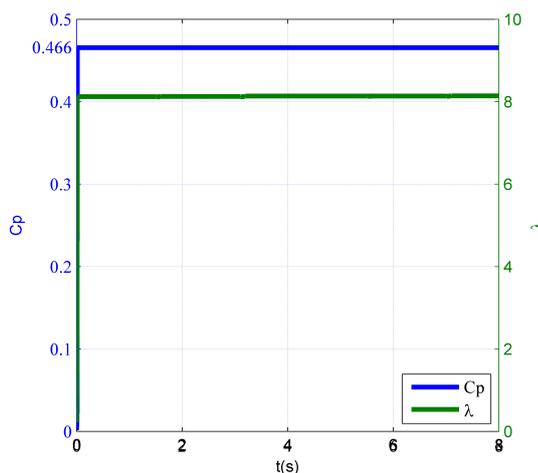


FIGURE 3.10 – Rapport de vitesse et coefficient de puissance.

La figure (3.11) représente respectivement la vitesse mécanique et le glissement de la MADA. Ces deux allures montrent clairement le fonctionnement en mode hypersynchrone dans l'intervalle [0 s, 3.2 s], le mode asynchrone synchronisé dans [3.3 s, 5.5 s] et le mode hypersynchrone dans [5.6 s, 8 s] .

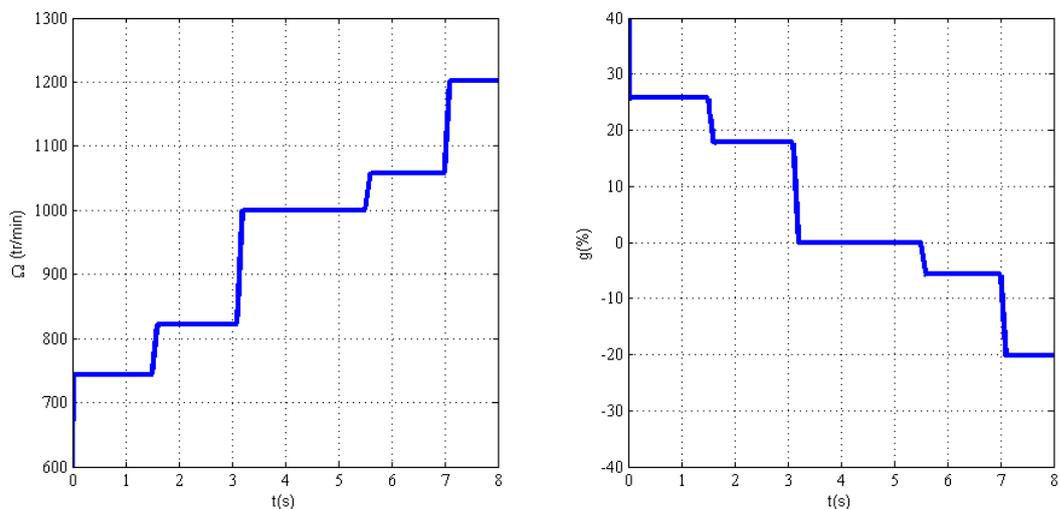


FIGURE 3.11 – Evolution de la Vitesse mécanique et du glissement de la MADA.

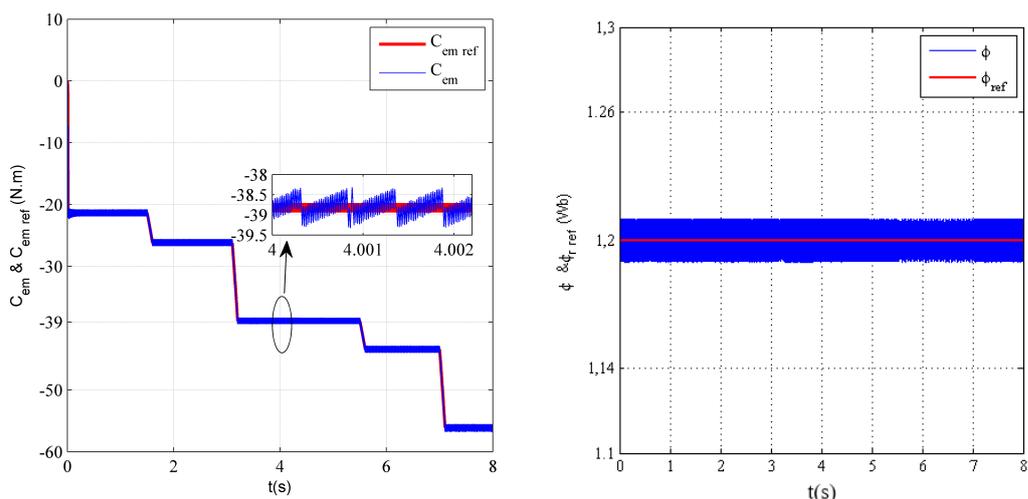


FIGURE 3.12 – Couple électromagnétique avec référence et Amplitude de flux rotorique avec sa référence.

Les figures (3.12) montre que le couple et le flux rotorique suivent parfaitement leurs consignes avec de bonnes performances dynamiques et statiques, néanmoins on remarque une présence d'oscillation . le couple varie en fonction de la vitesse du vent de sorte à maximiser le coefficient de puissance (C_p), tandis que le flux est tenu constant à sa valeur de référence .

la figure(3.13) montre que le flux rotorique prend une forme circulaire comme attendue dans le plan ($\alpha\beta$), avec une amplitude constante égale à 1.2 wb.

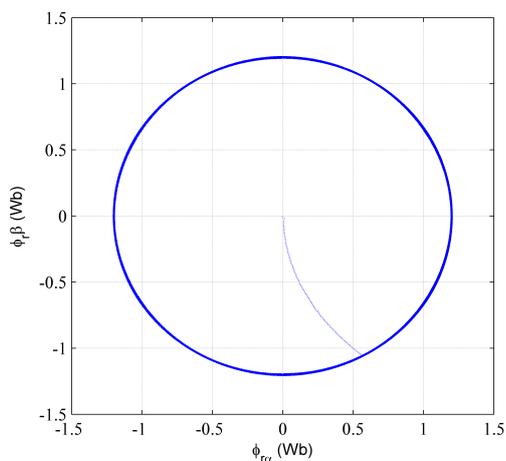


FIGURE 3.13 – Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$).

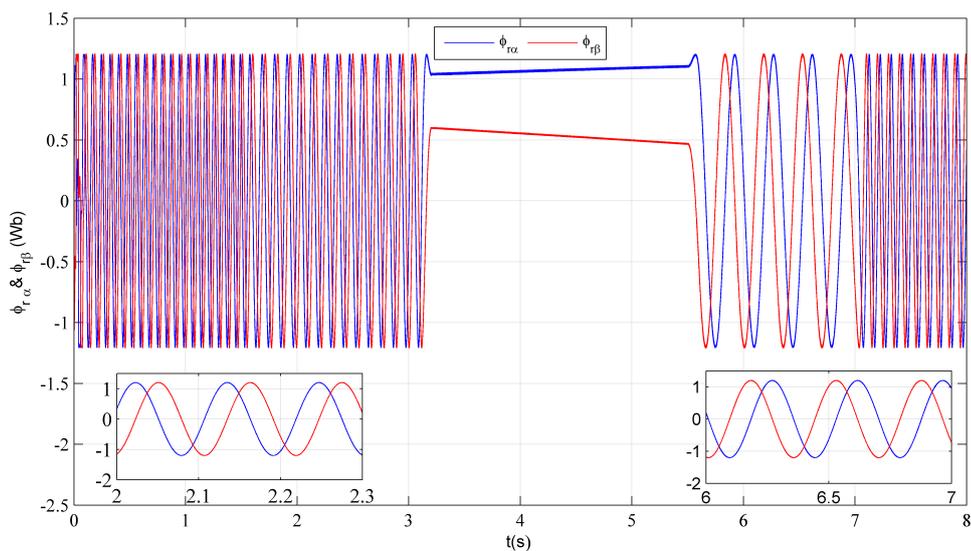


FIGURE 3.14 – Evolution temporaire des flux rotorique $\phi_{R\alpha}$ et $\phi_{R\beta}$.

D'après la figure (3.14) : En mode hypo et hypersynchrone les composantes $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$ sont sinusoïdales (d'où la forme circulaire du flux dans le repère $(\alpha \beta)$). Alors qu'en mode synchrone elles prennent des formes continues avec des amplitudes qui font que l'amplitude du flux reste constante.

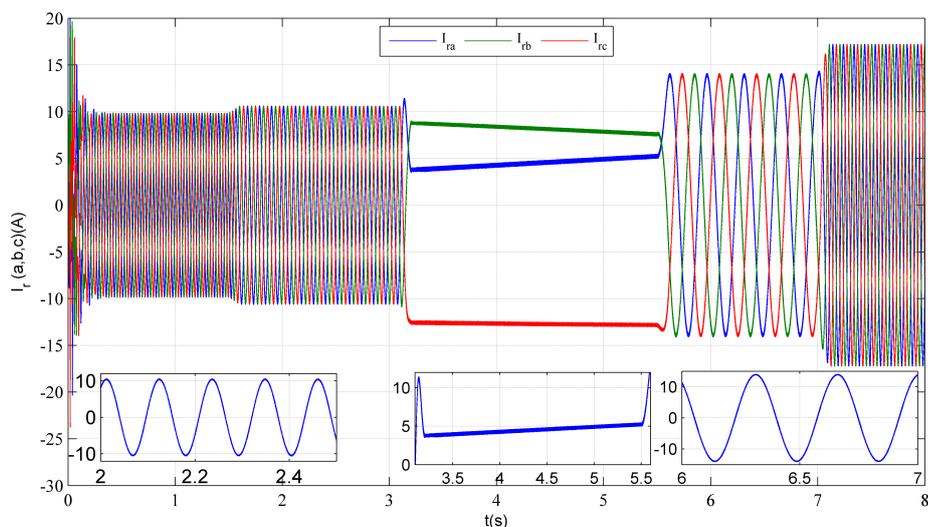


FIGURE 3.15 – Allures des Courants de phases rotorique avec des zooms dans les trois régimes de fonctionnement de la MADA .

Dans la figure(3.15) on remarque que les courants rotoriques ont des formes sinusoïdales,dans les deux modes hypo et hypersynchrone avec des amplitudes variables selon l'évolution du couple électromagnétique et des fréquences variables,selon les variations du glissement . Dans le mode synchrone ($g=0$),le courant est continu avec une amplitude constante.

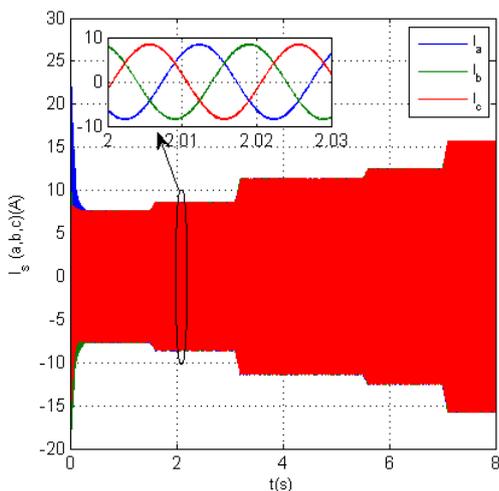


FIGURE 3.16 – Courant d'une phase statorique avec un zoom.

La forme sinusoïdale des courant statorique est illustrée par la figure.(3.16), justifiant ainsi la qualité du signalé fournie au réseau électrique.

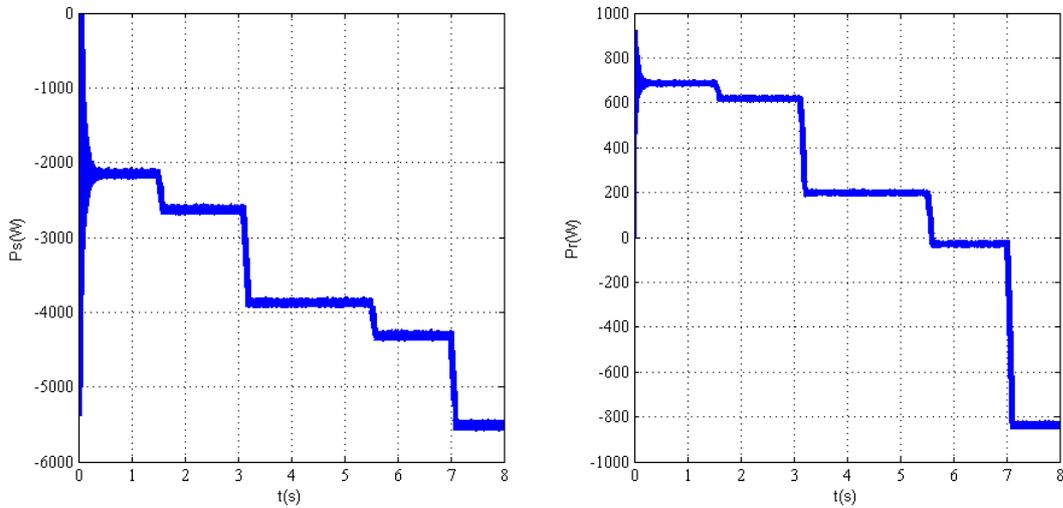


FIGURE 3.17 – Puissances active statorique et rotorique.

La figure 3.17 représente respectivement la puissance active statorique et la puissance active rotorique. Le signe négatif de la puissance active statorique indique qu'elle est fournie au réseau, ce qui confirme qu'on est bien dans un fonctionnement générateur. La puissance active rotorique transite entre deux signes opposés, le signe positif indique qu'elle est absorbée et le signe négatif indique qu'elle est transmise.

3.10.2 Fonctionnement avec un profil du vent aléatoire

Dans cette partie de simulation on va utiliser un vent aléatoire pour se rapprocher de la réalité, on a donc choisi l'allure du vent présentée dans la figure (3.18).

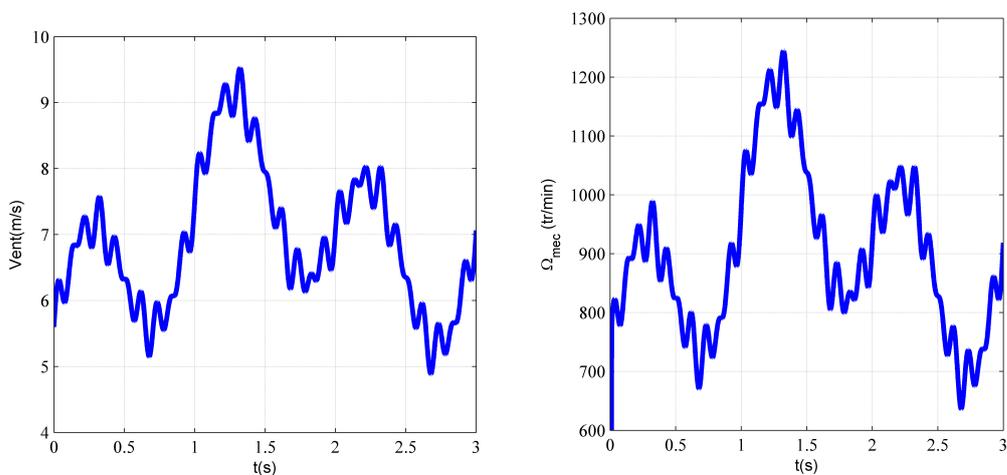


FIGURE 3.18 – Allure de la Vitesse du vent et allure de la vitesse mécanique de la MADA.

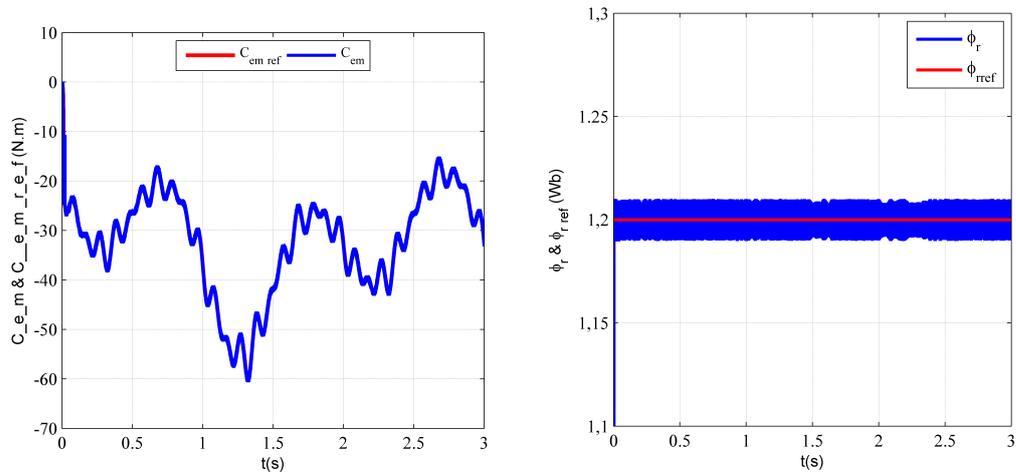


FIGURE 3.19 – Couple électromagnétique de la MADA et Amplitude du flux rotorique .

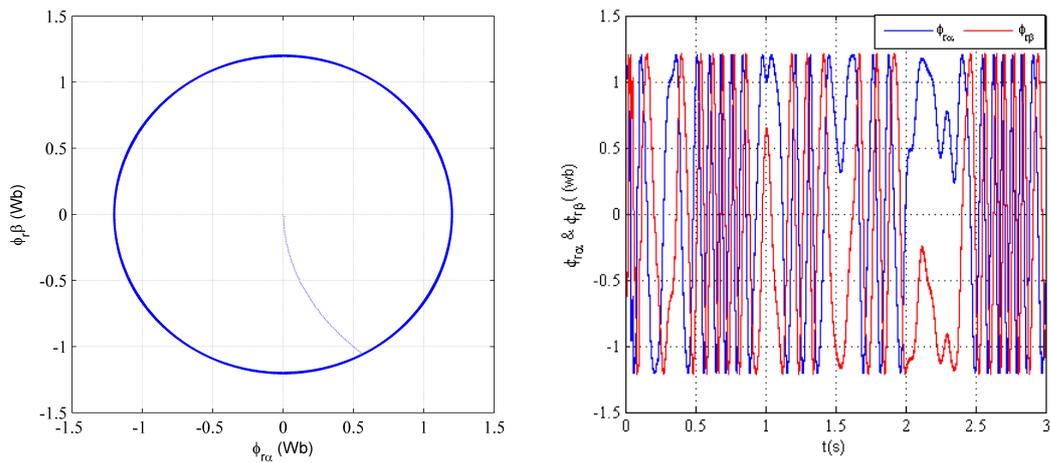


FIGURE 3.20 – Forme du flux rotorique ($\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$) et Evolution temporelle des flux rotorique $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$.

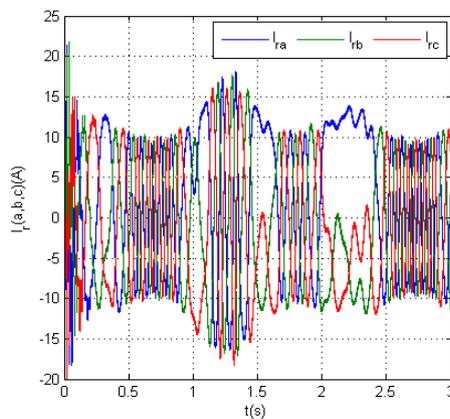


FIGURE 3.21 – Allure des Courants de phases rotorique .

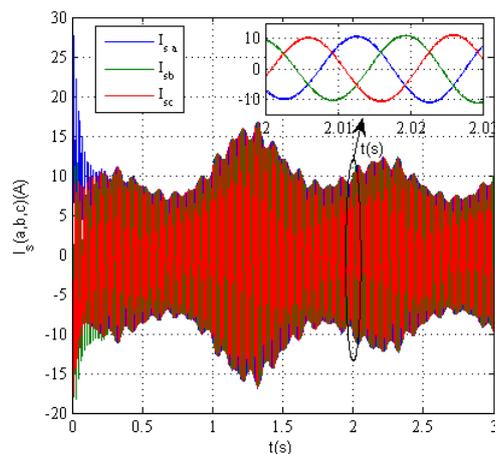


FIGURE 3.22 – Allure des Courant d’une phase statorique avec un zoom.

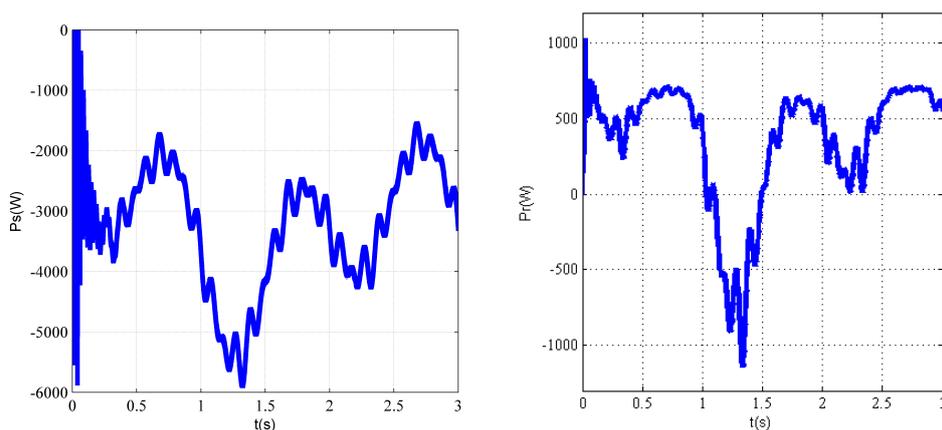


FIGURE 3.23 – La puissance active statorique et la puissance active rotorique.

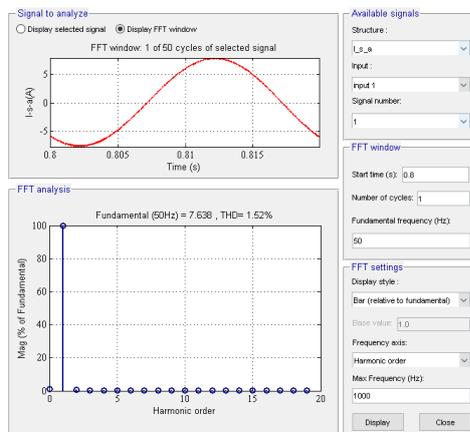


FIGURE 3.24 – Analyse harmonique de spectre du crouant d’une phase statorique .

D’après ces résultats on remarque que malgré le vent aléatoire, le flux et le couple suivent toujours leurs références avec de bonnes performances et pour tout changement du vent dans le

temps on a toujours le maximum de puissance (grâce à la MPPT).

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande de la chaîne éolienne par la technique de la commande directe du couple (DTC). Nous avons détaillé les principes généraux de cette commande appliqués pour la commande de la MADA pour un fonctionnement générateur connecté au réseau.

Les résultats de simulation obtenus montrent de bonnes performances dynamiques du couple et du flux ainsi qu'une bonne précision de contrôle grâce au principe de la régulation par hystérésis de ces deux grandeurs. La commande du couple revient à commander la puissance active délivrée au réseau indirectement. Enfin après l'analyse des différents résultats obtenus, on a remarqué que globalement la DTC aboutit à de bonnes performances. Dans le prochain chapitre on va opter pour une autre commande directe qui est la DPC.

Chapitre 4

Commande directe de puissance (DPC) de la MADA

4.1 Introduction

La commande Direct de Puissance (en anglais Direct Power Control, DPC) était proposée par T. Noguchi en 1998 pour le contrôle direct des puissances instantanées actives et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. Ensuite, cette approche a été développée et différentes configurations ont été proposées[5].

Il existe deux différentes techniques de Commande Direct de Puissance :

- La commande non linéaire à fréquence de commutation variable plus connu sous le nom DPC classique ;
- la DPC avec modulation de type vectoriel pour obtenir une fréquence de commutation fixe, qui est appelé DPC avec modulation vectorielle[37].

Dans ce chapitre on s'intéresse à la première technique, (DPC classique), appliquée à la MADA. Cette technique est proposée pour le contrôle des puissance active et réactive statorique. Cette stratégie est basée sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis[38].

Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique des puissances et une meilleur robustesse par rapport aux variations paramétriques de la machine.

4.2 Principe générale de la DPC-C

La commande DPC est basée exactement sur les mêmes relations vectorielles qui gouvernent la commande DTC. Seulement, plutôt que de s'attarder à contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique qui sont des composantes estimées à partir des paramètres de la machine, la commande DPC s'intéresse uniquement à l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau [39].

Le principe de la DPC consiste à sélectionner une séquence des ordres de commutation (Sa, Sb, Sc) du semi-conducteurs constituant le CCM (l'onduleur), à partir d'une table de

commutation. La sélection s'effectue sur la base des erreurs (ϵP_s et ϵQ_s) entre les références des puissances active et réactive (P_{s-ref} et Q_{s-ref}) et les valeurs réelles (P_s et Q_s), fournies par deux comparateurs à hystérésis de sorties numérisées cps et cqs respectivement, ainsi que sur le secteur (zone) dans le quel se trouve le vecteur du flux rotorique [40].

4.3 Principe de la commande des puissances active et réactive

Il est entendu que l'augmentation du couple (angle γ) à vitesse constante implique une augmentation de la puissance consommée par la machine en mode moteur. Par contre en mode générateur cette augmentation (du couple) réduit la puissance générée par la machine. Il suffit essentiellement d'échanger le terme couple par puissance active dans la commande directe de couple et de flux afin d'obtenir un entraînement à commande directe des puissances active et de flux.

Le traitement de la puissance réactive est identique en tous points à celui du flux dans la commande directe du couple et du flux.

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, durant tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernière et cela au cours d'une période complète de la tension rotorique. Les vecteurs de commande sélectionnés dans cette table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément[5].

4.4 Estimation des deux puissances active et réactive

Au lieu de mesurer les puissances sur la ligne, capturer les courants rotorique et estimer P_s et Q_s et avoir des valeurs anticipées des puissances dans les enroulements statoriques (car la commande DPC sera effectuée sur la base du modèle de la MADA établi en négligeant la résistance de la phase statorique). Nous pouvons trouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel (α_r - β_r), (Ce référentiel tourne solidaires avec le rotor de la MADA) [41]. Tel que :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} V_s \phi_{r\beta} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s}{\sigma L_s} \phi_s - \frac{V_s M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \phi_{r\alpha} \right) \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{r\alpha} = \sigma L_r I_{r\alpha} + \frac{M_{sr}}{L_s} \phi_s \\ \phi_{r\beta} = \sigma L_r I_{r\beta} \\ |\phi_s| = \frac{|V_s|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (4.2)$$

En introduisant l'angle entre le vecteur flux statorique et rotorique γ , les relations de P_s et Q_s deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\phi_s| |\phi_r| \sin \gamma \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\phi_s| \left(\frac{M_{sr}}{L_r} |\phi_r| \cos \gamma - |\phi_s| \right) \end{cases} \quad (4.3)$$

La dérivée des deux équations (4.3) donne :

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\phi_s| \frac{d|\phi_r| \sin \gamma}{dt} \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{M_{sr} \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\phi_s| \frac{d|\phi_r| \cos \gamma}{dt} \end{cases} \quad (4.4)$$

De (4.4) on peut déduire que les puissances active et réactive statoriques peuvent être contrôlées par la modification de l'angle relatif entre les vecteurs flux statorique et rotorique γ et de leur amplitudes [42].

4.5 Comparateur à hystérésis

Similairement à la DTC, la DPC pour la MADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis [40].

Donc pour contrôler les variations des puissances active et réactive on utilise les comparateurs à hystérésis à deux niveaux pour le contrôle de Q_s et à trois niveaux pour P_s leurs fonction est de maintenir les grandeurs P_s et Q_s dans les limites : $P_{s-ref} - P'_s \leq \Delta P$ et $Q_{s-ref} - Q'_s \leq \Delta Q_s$.

La sortie du comparateur à hystérésis de la puissance réactive est représentée par la variable booléenne cqs , elle indique directement si Q_s doit être augmentée ($cqs= 1$) ou diminuer ($cqs = 0$). Alors que celle du comparateur à hystérésis de la puissance active est représentée par la variable booléenne cps , elle dépend de la valeur de P_s par rapport à sa bande d'hystérésis Si $cps = 1$, P_s est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l'augmenter. Si $cps = 0$, P_s est à l'intérieur de la bande et il faut l'y maintenir. Si $cps = -1$, P_s est supérieur à la limite supérieure de la bande et il faut donc le diminuer [39].

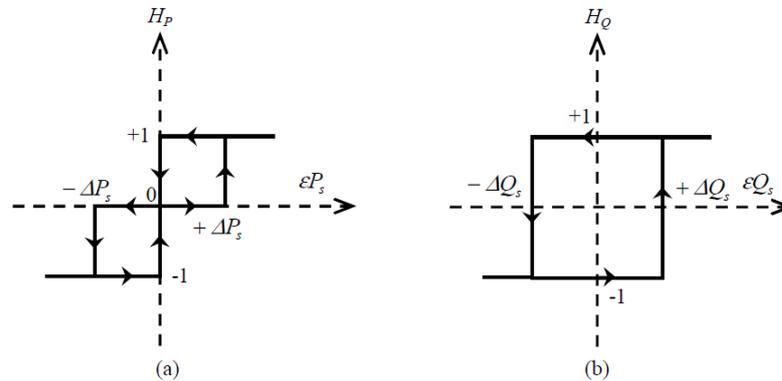


FIGURE 4.1 – Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive.

4.6 Elaboration de la table de commutation

Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux rotorique dans les six secteurs. Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA. Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan $(\alpha_r - \beta_r)$ des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la figure (4.2)

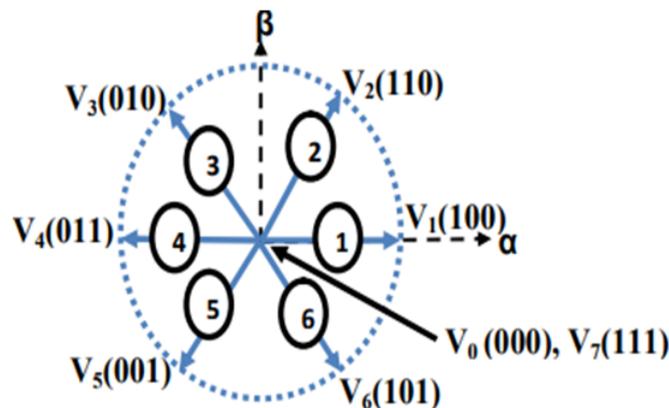


FIGURE 4.2 – Présentation des vecteurs de commutation et des secteurs .

La table de vérité de la DPC est élaborée en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive. Les signaux de sortie des comparateur à hystérésis cps et cqs ainsi que la position du vecteur flux rotorique, représentent ses entrées, alors que les états de commutation du CCM S_a, S_b, S_c représentent sa sortie.

cqs	cps	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4
1	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
1	-1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
0	1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
0	-1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1

TABLE 4.1 – Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive).

Avec :

$V_0=[0,0,0]$; $V_1=[1,0,0]$; $V_2=[1,1,0]$; $V_3=[0,1,0]$; $V_4=[0,1,1]$; $V_5=[0,0,1]$; $V_6=[1,0,1]$; $V_7=[1,1,1]$

4.7 Structure générale de la commande des puissances active et réactive

La structure détaillée de la commande directe des puissances active et réactive de la MADA est présentée dans la Figure(4.3). elle est d'une simplicité déconcertante, une table de comutation, deux régulateurs à hystérésis et le calcul des puissances actives et réactives sont nécessaires à son fonctionnement.

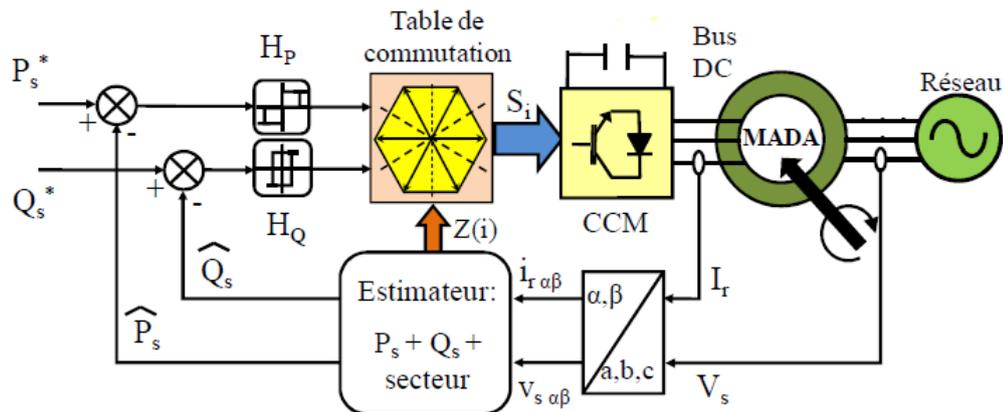


FIGURE 4.3 – Structure de la commande directe des puissance active et réactive de la MADA.

4.8 Résultats de simulation et interprétation

4.8.1 Fonctionnement à vitesse du vent en paliers

Pour cet essai on a pris le même profil du vent en paliers utilisé dans le chapitre précédent figure(3.9) pour la DTC, sauf que dans ce cas la puissance réactive est maintenue égale à zero pour avoir un fonctionnement à $\cos \phi_s = 1$.

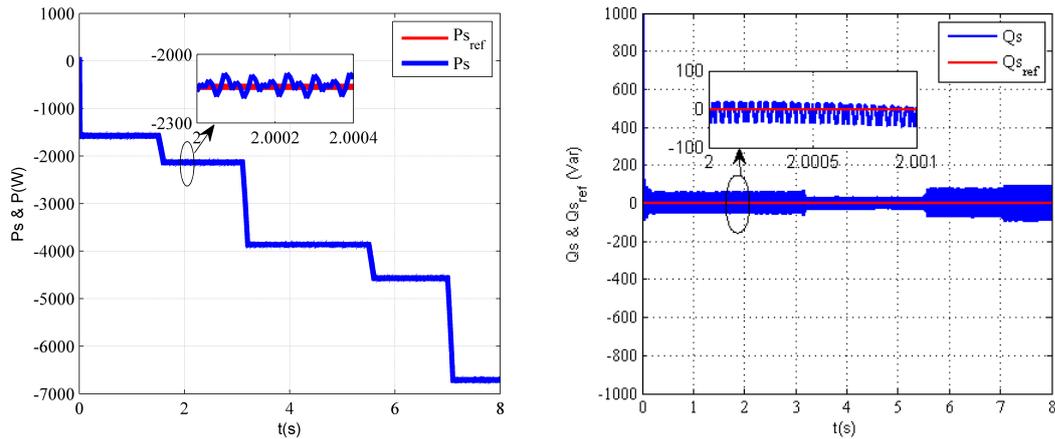


FIGURE 4.4 – Allures des puissances active et réactive statorique avec leurs références.

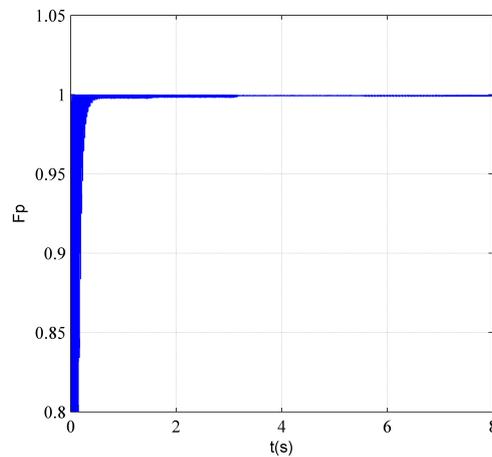


FIGURE 4.5 – Allure du facteur de puissance statorique .

la figure(4.4), montre que les puissances active et réactive statoriques suivent parfaitement leurs références, ce qui reflète les bonnes performances des résultats obtenus (temps de réponse très rapide, sans dépassement, erreur statique minimale). Nous avons fixé $Q_{s-ref} = 0$ pour avoir un facteur de puissance unitaire, comme illustré dans la figure (4.5).

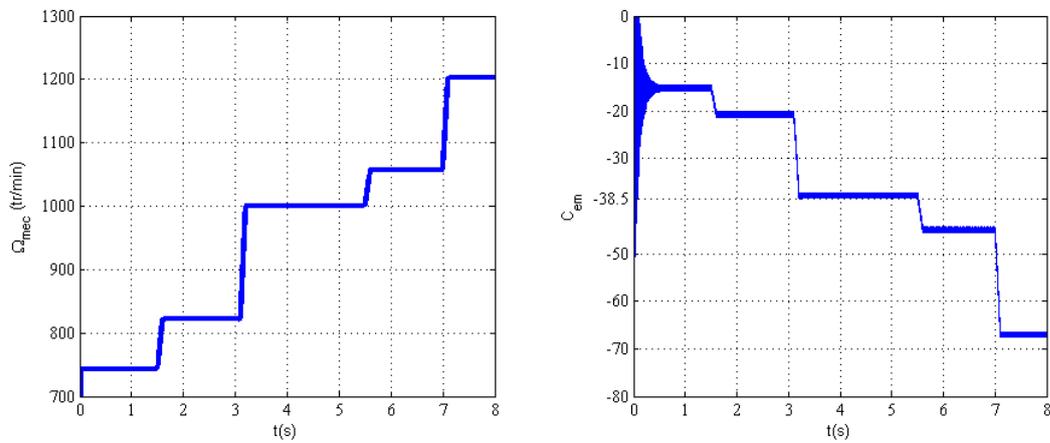


FIGURE 4.6 – Vitesse mécanique et Couple électromagnétique de la MADA.

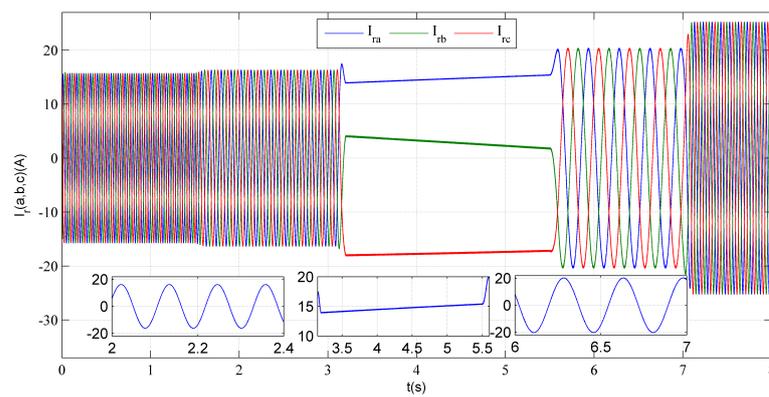


FIGURE 4.7 – Allures des Courants rotoriques avec des zooms dans les trois modes de fonctionnement de la MADA.

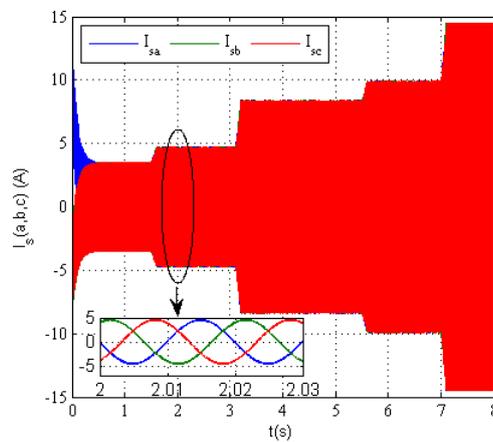


FIGURE 4.8 – Allure des Courants statoriques avec un zoom.

Les figures (4.6),(4.7),(4.8)) représentent le comportement de la MADA dans le cas de la commande DPC classique.

Sur la figure(4.6) :

L'allure de la vitesse mecanique montre clairement le fonctionnement de la MADA dans les trois modes (hyposynchrone, synchrone et hypersynchrone).

L'allure du couple électromagnétique de la MADA, représente une image de la puissance active statorique .

La figure(4.7) montre l'évolution des courants de phases rotoriques qui ont des formes sinusoïdales dans les deux modes hypo et hypersynchrone avec des amplitudes variables selon l'évolution du couple électromagnétique et des fréquences variables.

le courant statorique généré par la MADA (figure 4.8) possède une allure parfaitement sinusoïdale.

4.8.2 Essai avec profil du vent aléatoire

Dans cette partie de simulation on va utiliser le même profil du vent aléatoire utilisé dans le chapitre précédent, représenté dans la figure(3.18)

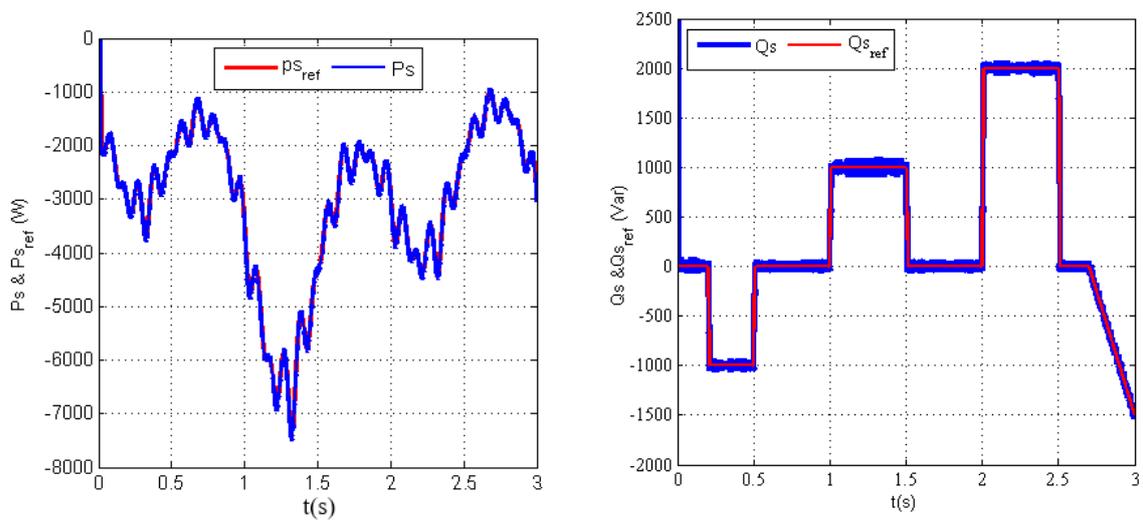


FIGURE 4.9 – Allure des puissances active et réactive statorique avec leurs références .

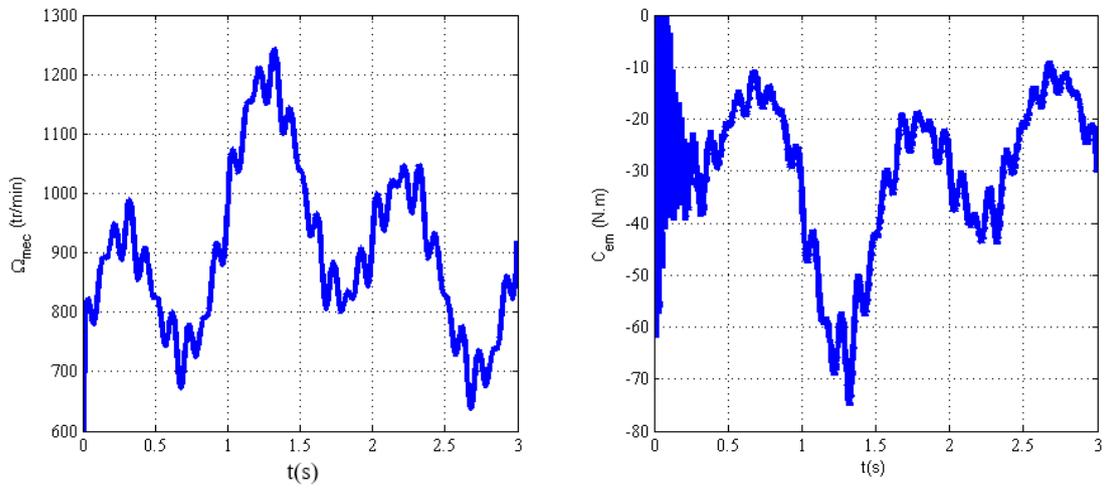


FIGURE 4.10 – Allure de la vitesse mécanique et du couple électromagnétique .

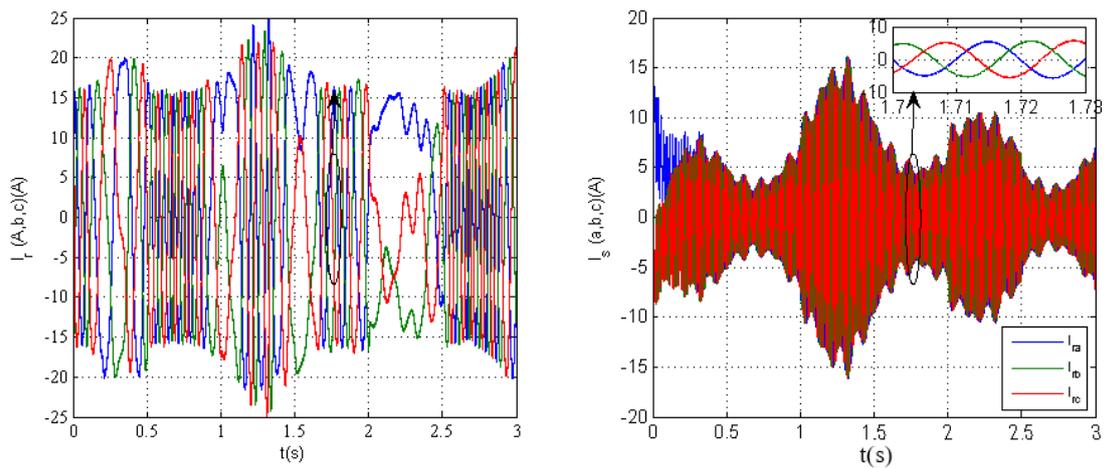


FIGURE 4.11 – Allure des Courants rotoriques et des courants statorique avec un zoom.

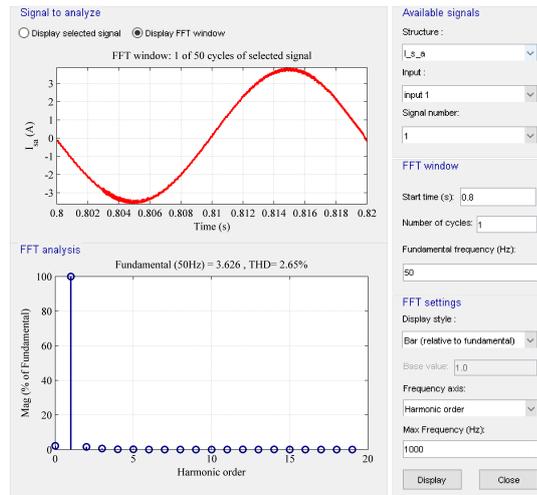


FIGURE 4.12 – Analyse harmonique de spectre du crouant d’une phase statorique.

D’après ces résultats on remarque que malgré un profil du vent aléatoire, les puissances active et réactive suivent toujours leurs références avec de bonnes performances. La première allure de la figure(4.9) représente le fonctionnement en générateur montré par le signe négatif de la puissance active transitée au réseau.alors que la deuxième allure (figure(4.9)) représente la deuxième tâche de cette machine, qui est la compensation locale de la puissance réactive,au point de connexion de la MADA au réseau.L’excès de la puissance réactive en ce point incite la MADA à la consommer.Tandis que,le manque de cette puissance engendre sa production par la MADA.

D’après les figures (3.24) et (4.12),le taux de distorsion harmonique(THD) des courants statoriques dans le cas de la commande directe des puissances active et réactive(DPC) est supérieure au THD obtenu dans le cas de la commande directe du couple (DTC),on peut alors dire que la qualité d’énergie délivrer par la MADA lorsque’elle est commandée par la DTC et nettement meilleure que celle qu’ elle delivre lorsque elle est commandée par la DPC.

4.9 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons commencer par décrire la stratégie de commande de la chaine éolienne par la technique de la commande directe de la puissance active et réactive (DPC) appliqué au convertisseur coté rotor (CCM) de la MADA pour un fonctionnement générateur connecté au réseau,puis nous avons présenté et analysé les résultats de simulation de cette commande, en commençant par un essai avec un profil du vent en paliers où on a obtenu de bonnes performance dynamiques des puissances active et réactive statorique,ainsi q’une bonne précision de contrôle.

Ensuite pour plus se rapprocher de la réalité nous avons opter pour un profil du vent aléatoire, où nous avons observer le fonctionnement de la MADA en tant que compensateur locale de la puissance réactive.

La DPC peut commander les deux puissances,active et réactive ,contrairement à la DTC,qui elle commande que la puissance active,ce qui rend la DPC plus attractive .

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par simulation numérique sur l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB, une commande en puissance d'un système éolien à base de la machine asynchrone à double alimentation pilotée par son convertisseur coté rotor CCM.

Nous avons choisi deux stratégies de commande directe, La DTC (la commande directe du couple et du flux) et la DPC (le commande directe de la puissance active et réactive).

Pour atteindre cet objectif, le premier chapitre de ce travail a été consacré à l'établissement des généralités sur l'énergie éolienne. Nous avons rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement et ses avantages par rapport aux autres types de machines .

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé la modélisation du système de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. En premier lieux nous avons modéliser la partie mécanique (la turbine, le multiplicateur, et l'arbre mécanique) et nous avons présenter la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking), puis en second lieux nous avons modéliser la partie électrique (la MADA , et l'onduleur).

Dans le troisième chapitre, on a proposé la stratégie de commande DTC (Direct torque control), appliquée au convertisseur CCM. Ses principaux avantages sont la rapidité de la réponse dynamique du couple et la faible dépendance vis-à-vis des paramètres de la machine.

Dans le quatrième chapitre, nous avons développé une autre stratégie de contrôle dite DPC (Direct Power Control) en faisant l'analogie avec la commande directe du couple (DTC). Cette stratégie de contrôle est simple et robuste grâce à sa moindre dépendance vis-à-vis des paramètres de la MADA.

De plus les résultats obtenus montrent que la MADA offre des avantages exceptionnels par rapport aux autres types de machines à savoir une plage étendue de fonctionnement en parcourant trois régimes de fonctionnement (hypo, hyper et synchrone). Elle permet aussi, un fonctionnement en double tâche et en parallèle, la première est la génération de l'énergie active, alors que la deuxième tâche est son utilisation en tant que compensateur local d'énergie réactive, ce qui peut être dénommé par un système de gestion d'énergie, on a aussi remarqué que la qualité d'énergie fournie par la MADA lorsqu'elle est commander par la DTC est meilleur que celle qu' elle fournie lorsqu'elle est commandée par la DPC.

Les perspective proposées a la suite de notre étude peuvent être récapitulées :

- Appliquer la commande DTC à une MADA pilotée par un onduleur de tension à multi-niveaux .
- la combinaison de la technique MLI vectorielle (SVM) avec la DPC pour fixer la fréquence de commutation des interrupteurs du convertisseur coté MADA « CCM » afin de réduire les ondulations des puissances et les harmoniques des courants délivrées par la MADA au réseau électrique.
- Amélioration des performances de la DTC et DPC par les réseaux de neurones artificiels.

Annexes

Annexe « A »

Les paramètres de la machin asynchrone à double alimentation (MADA)[26]

Puissance nominale	$P = 7.5 \text{ KW}$
Tension statorique nominale	$U_{sn} = 440 \text{ V}$
Tension rotorique nominale	$U_{rn} = 415 \text{ V}$
Nombre de paires de pôles	$P = 3$
Résistance statorique	$R_s = 1.02 \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 0.8 \Omega$
Inductance Statorique	$L_s = 0.093 \text{ H}$
Inductance rotorique	$L_r = 0.081 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$M = 0.0664 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.00075 \text{ Kg/m}^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.006N$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ HZ}$
La vitesse nominale	$\Omega = 970 \text{ tr/min}$

Tableau : - Paramètres de la MADA de 7.5KW

Les paramètres de la turbine à axe horizontal [26]

Puissance nominale	$P_t = 7.5 \text{ Kw}$
Rayon de la turbine	$R_t = 3.24 \text{ m}$
Vitesse nominale de la turbine	$\Omega_{tn} = 296 \text{ tr/min}$
Vitesse maximal de la turbine	$\Omega_{tmax} = 10 \text{ tr/min}$
Vitesse minimal de la turbine	$\Omega_{tmin} = 4 \text{ tr/min}$
Le gain du multiplicateur	$G = 5.065$

Tableau : - Paramètres de la turbine éolienne de 7.5 KW.

Annexe « B »

Transformation directe de Concordia [5]:

Passage du système triphasé (a ,b,c) vers le système biphasé (α , β)

$$\begin{bmatrix} xa \\ xb \\ xc \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} x\alpha \\ x\beta \end{bmatrix} \quad \text{c-à-d} \quad \begin{bmatrix} x\alpha \\ x\beta \end{bmatrix} = C_{32} [x_{abc}]^T$$

Avec :

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

Bibliographie

Bibliographie

- [1] N. LEBADI, L. LOUAFI « Control Des Puissances Active et Réactive De LA MADA »; Mémoire De fin D'ETUDES , Université De Mohamed BOUDIAF-M'SILA, Algerie, 2018.
- [2] F. KENDOULI « Centrale Éolienne et Qualité De L'énergie Electrique »; These Doctorat en Électrotechnique , Université Mentouri de Constantine, Algerie, 2012.
- [3] A. GAILLARDA « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service »; Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, avril 2010.
- [4] B. KELKOUL « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation »; Mémoire pour obtenir le grade de Magister API, Université de Tlemcen, Algérie juin 2011.
- [5] Y. DJERRIRI, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle. »; Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université Djilali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, octobre 2015.
- [6] M. TOUATI, « Étude d'une génératrice éolienne connectée au Réseau électrique »; Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister En Électrotechnique , Université de Batna, Algerie , 2012.
- [7] A. BEN AMAR « Etude de la commande d'un système éolien Basé sur une GADA »; Memoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Électrotechnique , Université Hadj Lakhdar – Batna, Algérie, Avril 2016.
- [8] M . BOUKACEM, D. Bekheitia « La commande non linéaire de la machine asynchrone à Double alimentation. »; Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique , Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, Algeie, 2017.
- [9] L. THIERNO, « Commande non linéaire de l'éolienne à MADA pour une participation au réglage de la fréquence DU RÉSEAU »; Mémoire À l'obtention de la maîtrise en génie électrique, école de technologie superieur univeristé du quebec , Canada , 2012.
- [10] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes »; Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Mentouri de Constantine , Algérie , 2008.
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:énergie_renouvelable.
- [12] K .Akif, S. KENTOUCH E « Contribution à la Commande en puissance d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à une éolienne, alimentant une charge autonome. »; mémoire pour l'obtention du diplôme master 2 en Électrotechnique; Université A.MIRA de Bejaïa, Algerie, 2012.
- [13] N . NENNAR, A. BOUGRINE « Commande directe de puissance DPC d'une MADA intégrée à un système éolien »; mémoire de fin d'étude université ahmed draria adrar, Algérie .

BIBLIOGRAPHIE

- [14] Y. IZGHECHE « Estimation de la vitesse de la machine d'une éolienne »; mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, université badji mokhtar annaba,Algérie,2019.
- [15] Z. AHMIDAT , Z. KOUIDRI « Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux »; memoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de master academique en Électrotechnique, Université Ahmed Draïa Adrar ,Algérie ,juin 2018 .
- [16] R. MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique »; MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en Electrotechnique, Université AbouBekr Belkaid de Tlemcen,Algerie,2017.
- [17] B.TOUAL « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à Double Alimentation,Application à un système Éolien à vitesse variable »Mémoir de Magister, Université de Batna,2010.
- [18] M. ABDOULAY « Modelisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation »; mémoire présenté à l'université du quebec à TROIS-RIVIÈRES ,hiver 2013.
- [19] K.Idjdarene «Contribution et l'étude et la Commande de génératrices asynchrones à Cage Dédiées à des centrales électrique éolienne Autonomes » ;thèse doctorat ,université lille 1 ,France ,université Abderrahmane Mira –Bejaia, Algérie, Mai 2010.
- [20] M.BOURAKI « Etude d'une entrainement a double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à tindouf »;Mémoire de Magister ,Université M'hamed bougara boumerdes ,Algerie ;2012.
- [21] F .BELAIMECHE « Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable »; Thèse de doctorat commande électctique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES1 Algérie.
- [22] F.POITIERS« Étude et commande de génératrices asynchronepour l'utilisation de l'energie éolienne »; Thèse de Doctorat , université de Nantes,France,2003.
- [23] B. BENYACHOU, F. Ait Ouhrouch, K. Gueraoui, B. Bahrar « Modélisation sous MATLAB/SIMULINK d'une turbine éolienne reliée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). », Article ,Equipe de Simulation en Mécanique et Energétique Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat Equipe de Mécanique, Energétique et environnement ENSET Mohammédia, Université Hassan II, Casablanca,2017.
- [24] S. GHOUELBOURK « Étude et modélisation des convertisseurs statiques dans une chaine éolienne à base de la GADA »; THESEde Doctorat en Sciences,université de badji mokhtar –ANNABA,Algérie,2016.
- [25] Y. BEKAKRA « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation »; Thèse de doctorat en science , université Mohamed Khider – Biskra,Algerie,octobre 2014
- [26] S. TAMALOUZT,« Contribution à l'Etude, Conception et la Commande des Convertisseurs Electromagnétiques Double Alimentés »; thèse doctorat , Université A.Mira bejaia ,Algérie ,2017
- [27] R.Defontaines « Étude et simulation de la MADA »;Mémoire pour l'obtention d'une maitrise en génie électrique, école technologie supérieure université du québec ,Canada,2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [28] F.TRIA « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques »; MÉMOIRE de Magister, Université d'El- oued,Algérie,2013.
- [29] A.Sid Ahmed El Mehdi « Commande d'un système d'énergies renouvelables Multisources relié au réseau électrique »,THèse de doctorat,Convertisseurs électromécaniques,université djillali liabes de sidi-bel-abbes,2016
- [30] I. YAICHI, «Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA»; thèse doctorat ,université djillali liabes de sidi-bel-abbes , Algérie ,2019
- [31] M.R.ZOLDGHADRI « contrôle directe de couple des actionneurs asynchrone »,these doctorat de l'institut internationale polytechnique de grenoble,France ,1997.
- [32] B. OUIZ,A . TEBA « Commande directe du couple d'un moteur asynchrone à double alimentation »; MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE, Université A.MIRA-BEJAIA,Algérie,2018.
- [33] E. TREMBLAY, « contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du Réseau électrique »; mémoire présenté à l'école de technologie supérieur ,université du quebec ,canada ,2009.
- [34] A. AMEUR « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants »; Mémoire Pour l'obtenir le diplôme de Magister en Électrotechnique, Université de Batna ,octobre 2005.
- [35] N. HABIS ,M. FAHEM « Etude de la machine asynchrone à double étoile en vue de son intégration dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne »;Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique , université djillali liabes de Sidi-Bel-Abbes ,Algérie,2019.
- [36] S. AMMAR,I. AKLIL « Commande directe du couple (DTC) d'un moteur asynchrone à double alimentation. »; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique, Université de Mouloud Mammeri, TIZI OUZOU,2013.
- [37] A. REBAA « Commande directe de puissance d'un redresseur trois Niveaux appliquée à un système de production éolien »; Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en électrotechnique, UNIVERSITÉ CONSTANTINE I ,Algerie,2013.
- [38] F. BOUMARAF « Commande D'un aérogénérateur- apport des techniques de L'intelligence artificielle»; Thèse Doctorat En Sciences En Electrotechnique, université de batna,Algérie,2009.
- [39] F . SENANI « La machine asynchrone à double alimentation : stratégies de commande et applications »;thèse Doctorat en électrotechnique ,université des frères mentouri de constantine 1,Algérie,2018.
- [40] S. MASSOUM « Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation »;thèse de doctorat, université djillali liabes de Sidi-Bel-Abbes,Algérie .
- [41] I.YAICHI , A. SEMMAH , P. WIRAE «direct power control of a wind turbine based on doubly fed induction generator » article, european journal of electrical engineering Vol. 21, No. 5, october, 2019, pp. 457-464 .
- [42] K .ZAABTA, « Commande d'une machine asynchrone a double alimentation pou la production de l'énergie eolienne »;Mémoire de fin d'étude,Université de science et de la technologie houari boumedién ,Algérie,2012 .