

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMMANDÉ D'UNE CHAÎNE ÉOLIENNE À BASE DE MADA CONNECTÉE AU RÉSEAU  
ÉLECTRIQUE PAR UN CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA**

**MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE**

**PAR**

**FAHEM ABBACHE**

**Avril 2025**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. SC. A.)

**Direction de recherche :**

---

Prof. Mamadou Lamine Doumbia

directeur de recherche

**Jury d'évaluation**

---

Prof. Mamadou Lamine Doumbia    Université du Québec à Trois-Rivières    Éval.interne

---

Prof. Rachid Beguenane

Collège Militaire Royal, Kingston

Éval.externe

---

Prof.ass. Abdeldjebar Hazzab    École de technologie supérieure, Montréal    Éval.externe

## Résumé

Ces dernières années, l'énergie éolienne s'est affirmée comme une alternative crédible et durable aux sources d'énergie conventionnelles, en réponse aux enjeux environnementaux et à la transition énergétique mondiale.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en proposant une contribution à l'optimisation de la conversion d'énergie éolienne à travers l'étude, la modélisation et la commande d'une chaîne complète basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

L'objectif principal de cette recherche est de maximiser l'énergie extraite du vent tout en garantissant une injection stable, efficace et de qualité dans le réseau électrique. Pour atteindre cet objectif, une modélisation aérodynamique de la turbine a été réalisée, suivie de l'implémentation d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) permettant d'adapter dynamiquement la vitesse de rotation en fonction des conditions de vent.

Par la suite, la modélisation dynamique de la MADA dans le repère de Park a permis le développement de deux stratégies de commande vectorielle, l'une directe et l'autre indirecte en boucle fermée, ces approches ont été testées sous l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'évaluer leur efficacité à maintenir le contrôle indépendant des puissances active et réactive, tout en assurant une réponse rapide et robuste face aux

perturbations. Les résultats de simulation ont démontré que la commande indirecte offre de meilleures performances globales, notamment en termes de stabilité et de robustesse.

En complément, une étude a été menée sur la connexion au réseau à l'aide d'un onduleur de tension à deux niveaux commandés par modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion (SPWM), garantissant la régulation de la tension du bus continu et la qualité des courants injectés. L'originalité de ce travail réside dans l'intégration cohérente de toutes les étapes de la chaîne de conversion, depuis la captation de l'énergie mécanique jusqu'à son injection dans le réseau, tout en assurant un pilotage précis par des techniques de commande avancées.

Les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes éoliens plus performants, notamment par l'intégration des convertisseurs multiniveaux, qui permettraient une amélioration significative de la qualité des signaux injectés et une réduction des pertes liées aux harmoniques, ainsi que l'adoption de techniques de commande intelligentes et prédictives.

**Mot Clés :**

Conversion d'énergie éolienne, MPPT, Machine asynchrone à double alimentation (MADA), Commande vectorielle, Commande directe, Commande indirecte en boucle fermée, Onduleur à deux niveaux, Injection réseau.

## **Remerciements**

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, M. Mamadou Lamine Doumbia, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour sa patience, sa grande disponibilité et la qualité de ses conseils tout au long de cette maîtrise. Son encadrement rigoureux et bienveillant a été un véritable pilier dans la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire à la mémoire de mon père, dont l'influence continue de m'accompagner chaque jour, à ma chère mère pour son amour inconditionnel, pour leur présence réconfortante, leur patience et leur soutien constant.

Mes sincères remerciements vont également à l'ensemble de ma famille et mes amis, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans les moments de doute comme dans les réussites.

Je souhaite enfin remercier l'ensemble des professeurs et du personnel de l'UQTR, en particulier ceux du département de génie électrique et de génie informatique, pour leur disponibilité, leur accompagnement et leur contribution à mon parcours universitaire. Merci à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

## Table des matières

Résumé .....	iii
Mot Clés.....	iv
Remerciements .....	v
Table des matières .....	vi
Liste des figures .....	x
Liste des symboles .....	xiii
<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION .....</b>	<b>20</b>
1.1 Problématique.....	20
1.2 Objectif.....	21
1.3 Méthodologie.....	22
<b>CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE .....</b>	<b>24</b>
2.1 Introduction .....	24
2.2 Histoire de l'énergie éolienne.....	24
2.3 État actuel des éoliennes.....	27
2.4 Statistiques actuelles concernant l'énergie éolienne à l'échelle mondiale.....	29
2.5 Les différents types d'éoliennes .....	30
2.5.1 Éoliennes à axe vertical : .....	30
2.5.2 Éoliennes à axe horizontal .....	33
2.6 Constitution d'une éolienne moderne.....	34
2.7 Méthodes de contrôle au niveau du générateur électrique .....	36
2.7.1 Système a vitesse fixe .....	36
2.7.2 Système a vitesse variable .....	38
<u>2.7.2.1</u> Architecture de conversion utilisant une GSAP .....	40
<u>2.7.2.2</u> Systèmes utilisant La machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	42
2.8 La Conversion aérodynamique des énergies éoliennes .....	44
2.8.1 La théorie de BETZ .....	45
2.9 Conclusion.....	47
<b>CHAPITRE 3 - MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE.....</b>	<b>48</b>

3.1	Introduction .....	48
3.2	Modélisation de la turbine :.....	48
3.2.1	La puissance aérodynamique .....	49
3.2.2	Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ .....	50
3.3	Modèle mécanique de la turbine.....	51
3.3.1	Les Zones du fonctionnement de l'éolienne.....	53
3.3.2	Contrôle en charge partielle .....	55
3.4	Stratégie de commande de la turbine avec et sans asservissement .....	56
3.5	Résultats de simulation :.....	58
3.6	Conclusion.....	60
<b>CHAPITRE 4 - MODÉLISATIN DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION .....</b>		<b>62</b>
4.1	Introduction .....	62
4.2	Structure, principe et modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	62
4.2.1	Description et principe de fonctionnement .....	62
4.2.2	Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	63
4.3	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	66
4.3.1	Hypothèses simplificatrices : .....	66
4.4	Équations électriques et mécanique de la MADA :.....	67
4.4.1	Équations des tensions : .....	67
4.4.2	Équations des Flux :.....	67
4.4.3	Équation mécanique:.....	69
4.5	La transformation de Park .....	69
4.5.1	Équations des tensions : .....	71
4.5.2	Équations des flux :.....	72
4.5.3	Équations de couple électromagnétique : .....	74
4.6	Sélection du Référentiel Adapté pour la Modélisation de la MADA .....	75
4.7	Résultats de simulation :.....	76
4.8	Conclusions : .....	78
<b>CHAPITRE 5 - COMMANDE DES PUISSANCES ACTIVES ET RÉACTIVES DE LA MADA .....</b>		<b>79</b>

5.1	Introduction .....	79
5.2	Principe fondamental de la commande vectorielle de la MADA.....	79
5.3	Sélection du référentiel pour la modélisation en repère diphasé.....	80
5.4	Établissement des relations entre les puissances statoriques et les courants rotoriques.....	82
5.5	Établissement des relations entre les tensions et les courants rotoriques .....	84
5.6	Commande des puissances actives et réactives .....	85
5.6.1	Commande directe des puissances .....	85
5.6.2	Commande indirecte en boucle fermée des puissances .....	87
5.6.3	Établissement des angles pour des transformations .....	88
5.6.4	Synthèse des régulateurs PI .....	89
5.7	Modélisation de l'alimentation côté rotor de la MADA .....	91
5.7.1	Modèle de l'onduleur :.....	92
5.7.2	Commande par MLI .....	94
5.8	Résultants de simulation.....	96
5.9	Test de robustesse .....	99
5.10	Conclusions .....	102
<b>CHAPITRE 6 - COMMANDE ET ASSERVISSMENT DE LA CHAINE ÉOLIENNE À BASE DE MADA.....</b>		103
6.1	Introduction .....	103
6.2	Structure globale du système.....	104
6.3	Régulations de la liaison rotor-réseau via le bus continu .....	105
6.3.1	Modélisation du filtre.....	105
6.3.2	Modélisation de Convertisseur cote réseau (CCR) .....	107
6.3.3	Régulation de la tension du bus continu .....	108
6.3.4	Contrôle des courant côte réseau .....	110
6.4	Résultats de simulation.....	112
6.5	Conclusion .....	115
<b>CHAPITRE 7 - CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		117
<b>RÉFÉRENCES .....</b>		120
Annexe A– Paramètres de simulation.....		124

**Liste des tableaux**

Tableau 2-1 - Bilan des ajouts annuels et de la capacité globale connectée au réseau entre 2021 et 2022. ....	29
Table 3-1 - Caractéristiques de la turbine. ....	51
Tableau A-1 - Paramètres de la turbine.....	124
Tableau A-2 - Paramètres de la machine .....	125
Tableau A-3 - Paramètres du régulateur .....	125

## Liste des figures

Figure 2-1 Ensemble de moulins alignés dans les polders de Leidschendam, aux Pays-Bas .....	25
Figure 2-2 Parc éolienne Californie (début des années 80).....	26
Figure 2-3 Évolution de la capacité nouvelle mondiale de l'énergie éolienne de 2001 à 2022.....	28
Figure 2-4 Évolution de la capacité totale mondiale de l'énergie éolienne de 2001 à 2022.....	29
Figure 2-5 Exemple d'éolienne à traîner différentielle de type Savonius.....	31
Figure 2-6 Éoliennes de type Darrieus.....	32
Figure 2-7 Modèle d'éolienne à axe horizontal équipé de trois pales.....	33
Figure 2-8 Constitution d'une éolienne de type-NORDEX.....	35
Figure 2-9 Système à vitesse fixe.....	37
Figure 2-10 Caractéristique d'une éolienne à vitesse fixe avec décrochage aérodynamique .....	37
Figure 2-11 Évolution de la puissance disponible en fonction des conditions de vent au niveau de la turbine. ....	39
Figure 2-12 V Comparaison du coefficient de puissance selon le type d'éolienne [13].	40
Figure 2-13 Structure d'une éolienne utilisant une machine synchrone à nombre élevé de paires de pôles.....	41
Figure 2-14 Schéma d'une éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA). ....	43
Figure 2-15 Schéma de principe illustrant la théorie de Betz. ....	46
Figure 3-1 Courbes du coefficient aérodynamique $C_p \lambda, \beta$ selon $\lambda$ pour divers angles d'orientation $\beta$ . ....	51
Figure 3-2 Schéma simplifié du modèle mécanique de la turbine éolienne. ....	52
Figure 3-3 Schéma fonctionnel du modèle de la turbine éolienne.....	53

Figure 3-4 Classification des régimes opérationnels d'une éolienne à vitesse variable .	54
Figure 3-5 Courbes de puissance de la turbine selon la vitesse de rotation pour diverses vitesses de vent, à angle de calage maximal ( $\beta_{max}$ ).....	55
Figure 3-6 Schéma de la régulation MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.	57
Figure 3-7 illustre respectivement le profil de vent et le coefficient de puissance $C_p$ ..	58
Figure 3-8 Évolution du couple et de la vitesse de rotation de la turbine éolienne .....	58
Figure 3-9 Exprimer la puissance de la turbine avec la puissance de référence. ....	59
Figure 4-1 Quadrants de fonctionnement de fonctionnement de la MADA en modes moteur et génératrice .....	65
Figure 4-2 Schéma de la transformation de Park .....	70
Figure 4-3 Les tensions statoriques et rotoriques d'alimentations.....	77
Figure 4-4 Les courants statoriques et rotoriques de la MADA. ....	77
Figure 4-5 les flux quadrature et direct, et les puissance active et réactive. ....	78
Figure 5-1 Schéma fonctionnel simplifié de la MADA utilisé pour le contrôle des puissances $P_{set}$ $Q_S$ .....	85
Figure 5-2 Diagramme fonctionnel de la commande directe de la machine asynchrone à double alimentation. ....	87
Figure 5-3 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée appliquée à la MADA.....	88
Figure 5-4 Établissement des angles pour de transformations Park. ....	89
Figure 5-5 Architecture de la boucle de régulation des courants rotorique. ....	89
Figure 5-6 Architecture de la boucle de régulation des puissances statoriques.....	90
Figure 5-7 Onduleur de tension a deux niveaux. ....	92
Figure 5-8 Principe de commande en MLI <i>triangulosinusoidale</i> .....	95
Figure 5-9 La Commande directe en puissances de la MADA.....	97

Figure 5-10 La Commande indirecte en boucle fermée en puissances de la MADA.....	98
Figure 5-11 Commande directe des puissance active et réactive +60% de $R_s$ et $R_r$ ....	100
Figure 5-12 Commande indirecte BF des puissance active et réactive +60% de $R_s$ et $R_r$ . .....	100
Figure 5-13 Commande directe des puissance active et réactive -40% de $L_s$ , $L_m$ et $L_r$ .....	100
Figure 5-14 Commande indirecte BF des puissance active et réactive -40% de $L_s$ , $L_m$ et $L_r$ .....	101
Figure 6-1 Architecture globale d'un système éolien à MADA relié au réseau par un onduleur bipolaire.....	104
Figure 6-2 Modèle du filtre dans le repère abc .....	105
Figure 6-3 Représentation en blocs de la régulation des courants dans le repère $dq$ ...	107
Figure 6-4 Connexion du convertisseur côté réseau au réseau électrique à travers un filtre RL .....	108
Figure 6-5 Schéma bloc de la stratégie de commande de la liaison côté réseau.....	112
Figure 6-6 illustre le profil de vent et le coefficient de puissance $C_p$ . .....	113
Figure 6-7 Puissance active et réactive statorique. .....	113
Figure 6-8 Courants statoriques .....	114
Figure 6-9 Courants rotoriques .....	114
Figure 6-10 La tension de bus et le glissement .....	115

### Liste des symboles

$\theta$	Décalage angulaire entre les enroulements statoriques et rotoriques	[Rad]
$\theta_s$	Décalage angulaire entre le repère de Park et la phase statorique	[Rad]
$\theta_r$	Décalage angulaire entre le repère de Park et la phase rotorique	[Rad]
$\omega_s$	Vitesse angulaire statorique	[Rad/s]
$\omega_r$	Vitesse angulaire rotorique	[Rad/s]
$\omega_m$	Vitesse angulaire mécanique	[Rad/s]
$\rho$	La densité de l'air	[ $-$ ]
$\lambda$	La vitesse spécifique de la turbine	[ $-$ ]
$\beta$	Inclinaison des pales de l'éolienne par rapport au plan de rotation	[Deg]
$\varphi_s, \varphi_r$	Flux magnétiques traversant respectivement les enroulements du stator et du rotor.	[Wb]
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Composantes directe et quadrature du flux statorique	[Wb]

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Composantes directe et quadrature du flux rotorique	[Wb]
$G$	Le rapport du multiplicateur de vitesse	[ $-$ ]
$p$	Le nombre de paires de pôles	[ $-$ ]
$J_t$	Le moment d'inertie de la turbine	$\frac{Kg}{m^2}$
$J_g$	Le moment d'inertie de générateur	$\frac{Kg}{m^2}$
$R$	Longueur mesurée du centre du rotor jusqu'au bout d'une pale	[M]
$P_T$	La puissance de l'éolienne	[M]
$P_{Max}$	La puissance maximale de L'éolienne	[W]
$P(\theta)$	Transformation linéaire appliquée aux systèmes triphasés	[ $-$ ]
$V$	Vitesse moyenne du vent observée sur une durée spécifique	[M/s]
$v$	Vitesse de vent de la turbine	[M/s]
$g$	Écart relatif entre la vitesse de rotation du champ statorique et celle du rotor	[ $-$ ]

$\gamma$	Coefficient de réduction appliqué au rotor de la turbine.	[-]
$C_p$	Le coefficient de puissance d'éolienne	[-]
$C_{pmax}(\lambda, \beta)$	Le coefficient de puissance maximale	[-]
$C_c(\lambda, \beta)$	Le coefficient de couple	[-]
$\lambda_{opt}$	La vitesse spécifique optimale de la turbine	[-]
$f_g$	Le coefficient des frottements visqueux de générateur	[N.m]
$s$	L'opérateur de LAPLACE	[Rad/s]
$C_g$	Le couple mécanique sur l'arbre de la MADA	[N.m]
$M$	La masse d'air qui traverse l'éolienne	[Kg]
$\Omega_t, \Omega_g$	La vitesse de rotation de la turbine et générateur	[Rad/s]
$C_{em}, C_r$	Le couple électromagnétique et résistant	[N.m]
$K_a$	Le gain de régulateur de vitesse	[-]
$\Omega^*$	La vitesse de référence	[Rad/s]
$R_s, R_r$	La résistance statorique et rotorique	[ $\Omega$ ]

$L_s, L_r$ et $L_m$	Les inductance statorique, rotorique et mutuelle respectivement.	[H]
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}$ et $\varphi_{sc}$	Les flux statoriques des phases $a, b$ et $c$ respectivement	[Wb]
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}$ et $\varphi_{rc}$	Les flux rotoriques des phases $a, b$ et $c$ respectivement	[Wb]
$M_s, M_r$	La mutuelle inductance des champs magnétiques générés entre les enroulements statoriques et rotoriques	[H]
$M_{sr}, M_{rs}$	Les inductances mutuelles stator-rotor	[H]
$I_{sd}, I_{sq}$	Les courants statoriques respectivement direct et quadrature	[A]
$I_{rd}, I_{rq}$	Les courants rotoriques respectivement direct et quadrature	[A]
$V_{sd}, V_{sq}$	Les tensions statoriques respectivement direct et quadrature	[V]
$V_{rd}, V_{rq}$	Les tensions rotoriques respectivement direct et quadrature	[V]

$P_s$	La puissance statorique active	[W]
$Q_s$	La puissance statorique réactive	[VAR]
$P_{s-ref}$	La puissance de référence active statorique	[W]
$Q_{s-ref}$	La puissance de référence réactive statorique	[VAR]
$P_{mac}$	La puissance transittée par le convertisseur coté rotor	[W]
$P_c$	La puissance de condensateur	[W]
$P_{res}$	La puissance transittée par le convertisseur coté réseau	[W]
$V_{sabc}, V_{rabc}$	Les tensions des phases <i>a, b et c</i> statoriques et rotoriques respectivement	[V]
$K_i, K_p$	Les gains de régulateur intégral et proportionnelle	[ $-$ ]
$V_{dc}$	La tension de bus continu	[V]
$V_{ao}, V_{bo} \text{ et } V_{co}$	Les tensions de l'entrée de convertisseur coté rotor	[V]
$V_{an}, V_{bn} \text{ et } V_{cn}$	Les tensions de sortie de convertisseur coté rotor	[V]
$m_f$	Rapport entre la fréquence de la porteuse et la fréquence du signal modulant	[ $-$ ]

$f_p$	Fréquence de base du signal porteur avant modulation	[Hz]
$f_r$	Fréquence du signal d'entrée qui module la porteuse	[Hz]
$r$	Proportion entre l'amplitude du signal modulant et celle du signal porteur	[ $\cdot$ ]
$V_r$	Amplitude maximale du signal modulant appliquée	[V]
$V_p$	Amplitude maximale du signal porteur avant modulation	[V]
$V_{a-on}, V_{b-on}$ et $V_{c-on}$	Tensions de sortie instantanées du convertisseur côté réseau pour les phases abc	[V]
$V_{a-res}, V_{b-res}$ et $V_{c-res}$	Tensions de référence du réseau électrique pour les phases abc	[V]
$R_f$	Résistance de filtre passif	[ $\Omega$ ]
$L_f$	Inductance de filtre passif	[H]
$I_{abc\ res}$	Composantes des courants triphasés injectés dans le réseau électrique par le convertisseur côté réseau.	[A]
$I_{dres-ref}, I_{qres-ref}$	Composantes de référence des courants dans le repère direct (d) et quadrature (q) côté réseau	[A]

$I_{mac}$	Énergie active transférée par le convertisseur rotorique	[A]
$I_{res}$	Courant modulé par le convertisseur côté réseau	[A]
$I_c$	Courant traversant le condensateur du bus continu	[A]
$C$	Capacité du condensateur de liaison en courant continu	[F]
$CCM$	Convertisseur côté machine.	[ - ]
$CCR$	Convertisseur côté réseau.	[ - ]
$MADA$	Machine asynchrone à double alimentation.	[ - ]
$MPPT$	Recherche du point de puissance maximum	[ - ]
$FTBF$	La fonction de transfert en boucle fermée.	[ - ]

## **CHAPITRE 1 - INTRODUCTION**

### **1.1 Problématique**

Dans le monde entier, le défi quotidien consiste à répondre à la demande énergétique croissante dans le secteur de l'électricité. Nous cherchons à réduire considérablement la dépendance aux énergies de source fossile, se caractérisant à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables. Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique s'acharnent à diversifier leur bouquet énergétique plus spécialement par une énergie propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne[1] [2].

En 2022, le monde a traversé une série d'événements majeurs qui ont profondément remis en question les paradigmes établis. L'inflation a atteint des niveaux inédits depuis les années 1970, principalement en raison de la hausse des prix des matières premières. L'invasion de l'Ukraine par la Russie a mis en lumière la dépendance mondiale aux combustibles fossiles, soulignant les vulnérabilités en matière de sécurité énergétique. Face à ces défis, de nombreux gouvernements ont pris des mesures pour garantir l'accessibilité de l'énergie, en exploitant toutes les sources disponibles, y compris le charbon, le gaz et le nucléaire, tout en accélérant le développement des énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie éolienne, bien que longtemps négligée, a connu un regain d'intérêt significatif depuis les années 1990, devenant une composante essentielle des stratégies énergétiques durables à travers le monde[2][3].

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est largement utilisée dans les éoliennes terrestres à vitesse variable en raison de ses avantages économiques et techniques. Elle permet un fonctionnement efficace sur une plage de vitesses d'environ  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, ce qui améliore l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne. Les convertisseurs statiques associés à la MADA sont dimensionnés pour ne traiter qu'une fraction de la puissance nominale de la machine, généralement entre 20 et 30 %, réduisant ainsi les coûts et les pertes énergétiques. Cette configuration offre une solution plus économique comparée à d'autres technologies, telles que les machines synchrones à aimants permanents. En résumé, la MADA combine des avantages économiques, grâce à des convertisseurs de puissance réduite, et des performances techniques, avec une plage de fonctionnement étendue, ce qui en fait une solution privilégiée pour la production d'énergie éolienne terrestre [4].

## 1.2 Objectif

Ce travail a pour objectif de concevoir et d'analyser une chaîne de conversion d'énergie éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA), en passant par l'étude détaillée de chacun de ses sous-systèmes.

Dans un premier temps, une modélisation de la turbine éolienne a été réalisée, permettant d'évaluer la conversion de l'énergie du vent en puissance mécanique. Cette partie a été suivie de la modélisation dynamique de la MADA, exprimée dans le repère de Park, afin de préparer la mise en œuvre des lois de commande.

Deux stratégies de commande vectorielle ont ensuite été étudiées (la commande directe et la commande indirecte en boucle fermée). Ces approches ont permis d'assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive à travers le rotor de la MADA.

Une attention particulière est portée sur l'intégration d'un système éolien au réseau électrique. Cela a impliqué l'utilisation d'un convertisseur bidirectionnel constitué de deux onduleurs à deux niveaux, reliés par un bus continu. La régulation de la tension de ce bus et le contrôle de l'injection de puissance vers le réseau ont été abordés à travers la modélisation des convertisseurs et la mise en place de boucles de contrôle en courant.

Enfin, une intégration complète du système éolien a été effectuée. Une simulation globale en boucle fermée, utilisant la commande vectorielle indirecte en boucle fermée, a permis de valider l'ensemble de l'approche. Les résultats obtenus ont mis en évidence le passage du mode moteur au mode génératrice, le comportement du glissement, ainsi que la qualité de l'injection de puissance dans le réseau.

### 1.3 Méthodologie

Dans ce mémoire, nous avons suivi une démarche progressive pour modéliser et analyser une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le travail a débuté par une étude de l'état de l'art des systèmes éoliens, afin de comprendre les technologies existantes et les avancées actuelles dans le domaine.

Par la suite, la turbine éolienne a été modélisée, en intégrant une stratégie MPPT pour maximiser l'énergie captée du vent. Ensuite, une modélisation complète de la MADA a été développée dans le repère de Park, ce qui a permis d'exprimer les équations dynamiques nécessaires à la commande.

Deux types de commande vectorielle ont ensuite été étudiés : la commande directe et la commande indirecte en boucle fermée. Les deux stratégies ont été simulées, ce qui a permis de les comparer en termes de performance et de stabilité.

Enfin, l'ensemble de la chaîne éolienne a été connecté au réseau électrique, en tenant compte des convertisseurs et de la régulation du bus continu. Une simulation globale a été réalisée afin de valider les performances du système et de tirer des conclusions sur la qualité de l'injection d'énergie dans le réseau.

## CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

### 2.1 Introduction

À travers les siècles, les éoliennes ont captivé l'imagination humaine par leur capacité à convertir la force du vent en énergie électrique. Aujourd'hui, dans le contexte du changement climatique et de la nécessité de transition vers des sources d'énergie durables, les éoliennes occupent une place majeure dans notre paysage énergétique mondial.

Ce chapitre offre un aperçu d'évolution historique des éoliennes et explore le contexte actuel des énergies éoliennes. Nous examinerons ensuite les principes de fonctionnement des éoliennes, nous présenterons une analyse détaillée de la structure et des composants des éoliennes. Accompagnée d'une étude comparative des différents types disponibles sur le marché, mettant en évidence leurs caractéristiques et applications spécifiques.

Ainsi qu'une étude comparative des différents types d'éoliennes disponibles sur le marché, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs applications spécifiques.

### 2.2 Histoire de l'énergie éolienne

L'histoire de l'exploitation du vent à des fins énergétiques remonte à environ 5 000 ans, avec les premières traces de voiles sur les embarcations. L'utilisation de la force du vent remonte à plusieurs siècles. Les premières structures similaires aux éoliennes

modernes ont été développées en Perse bien avant notre ère, puis ont connu une large diffusion en Europe durant le Moyen Âge. À cette époque, elles servaient principalement à des tâches mécaniques comme le broyage des grains, au même titre que les moulins à eau. Exploiter le vent pour produire une énergie mécanique utile ne pose pas de difficulté majeure, tant que les conditions de vent sont favorables et que les installations sont conçues pour résister aux fortes rafales (Figure 2.1) [4, 5].



Figure 2-1 Ensemble de moulins alignés dans les polders de Leidschendam, aux Pays-Bas [5].

Vers 1891, l'ingénieur danois Poul la Cour conçoit l'un des premiers prototypes d'éolienne capable de produire de l'électricité. Aux USA, une éolienne bipale de 1,25 MW est testée en 1941 dans le Vermont. En France, dès 1929, la compagnie CEM conçoit une éolienne bipale de 20 m de diamètre. Dans les années 1950-60 un aérogénérateur tripale de 30 m avec une génératrice synchrone de 800 kW fut développée et testée, suivie d'un modèle bipale de 35 mètres couplé à une génératrice asynchrone de 1 MW. Toutefois, à cause du faible coût des énergies fossiles et de l'irrégularité du vent, l'intérêt pour

l'éolien a diminué pendant plusieurs années. Ce n'est qu'à partir de la crise pétrolière de 1973 que les recherches sur les aérogénérateurs ont repris de l'élan. En 1978, une machine tripale de 54 m de diamètre pour une puissance de 2 MW avait été installée au Danemark, pays qui va largement développer ces technologies [5].



Figure 2-2 Parc éolien Californie (début des années 80) [6].

Dans les années 80 la Californie mène la première expérience à grande échelle, le « Wind-rush », avec des turbines de 55 kW avec des avantages fiscaux. Le parc éolien passe de 144 machines 7MW en 1981, à 4687 machines 386 MW en 1985. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, en raison de leurs faibles ressources énergétiques classiques, conservant aujourd'hui une avance mondiale significative [6].

### 2.3 État actuel des éoliennes

En 2022, une capacité mondiale additionnelle de 77,6 GW de nouvelle énergie éolienne a été intégrée aux réseaux électriques, portant la capacité éolienne installée totale à 906 GW. Cela a entraîné un taux de croissance cumulatif d'une année sur l'autre de 9%. De plus, la capacité éolienne offshore a atteint un total de 57 GW à la fin de l'année. L'année 2022 a vu une intensification de l'engagement envers les objectifs d'énergie renouvelable, catalysée par l'importance des crises environnementales et énergétiques à l'échelle mondial. Les nouvelles cibles incluent spécifiquement le doublement de la capacité éolienne d'ici 2030 [3] [7].

Bien que les nouvelles installations terrestres aient diminué de 5% en 2022, c'était toujours la troisième année la plus élevée de l'histoire en termes d'ajout. Après une année record en 2021 avec plus de 21 GW connectés au réseau, la nouvelle capacité éolienne offshore mise en service l'année dernière est passée à 8,8 GW, faisant de 2022 la deuxième année la plus élevée.

L'Asie-pacifique a perdu 3% de parts de marché l'année dernière par rapport à 2021. La Chine demeure le principal acteur du marché éolien mondial, représentant à elle seule 81 % des nouvelles installations réalisées en 2022. L'Europe, quant à elle, occupe la deuxième place et a battu des records dans l'installation d'éoliennes terrestres la même année, faisant passer sa part de marché de 19 % en 2021 à 25 % en 2022.

L'Amérique de Nord est restée en troisième position mais a perdu 2% de parts de marché en raison d'une croissance plus lente aux États-Unis. Avec une année record

d'installation au Brésil, l'Amérique latine (LATAM) a augmenté sa part de marché en 2022 à 1%.

L'Afrique et le Moyen-Orient ont connecté 453 MW de puissance éolienne en 2022, le chiffre le plus bas depuis 2013.

Les cinq principaux marchés mondiaux pour 2022 étaient la Chine, les États-Unis, le Brésil, l'Allemagne et la Suède. Ensemble ils représentaient 11% des installations mondiales l'année dernière, soit une baisse collective de 3,7% par rapport à 2021 [3].

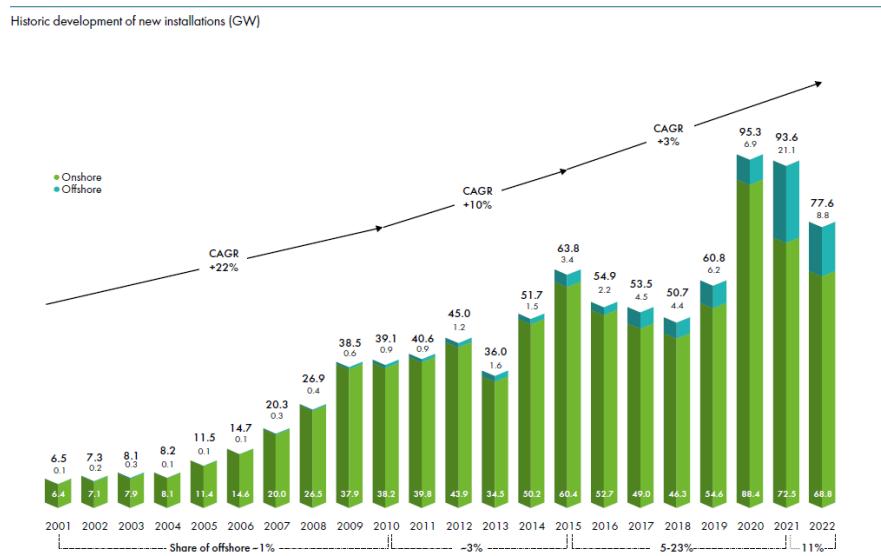


Figure 2-3 Évolution de la capacité nouvelle mondiale de l'énergie éolienne de 2001 à 2022 [3].

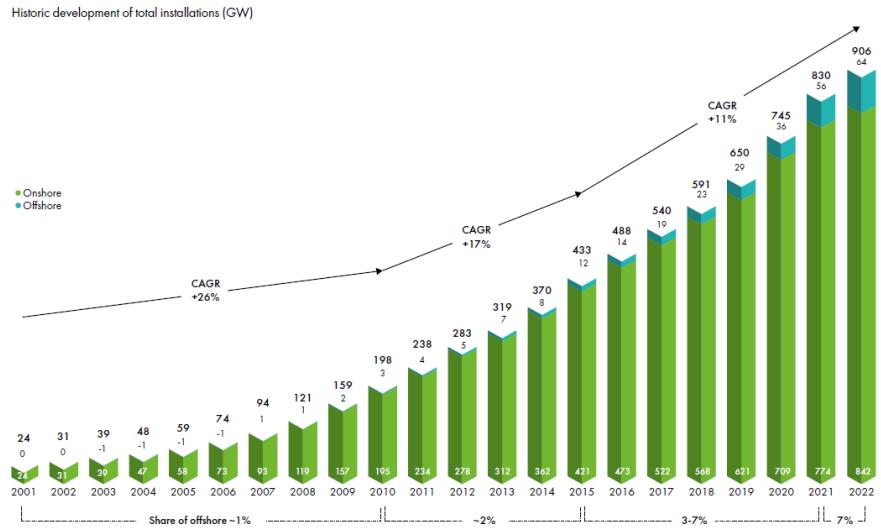


Figure 2-4 Évolution de la capacité totale mondiale de l'énergie éolienne de 2001 à 2022 [3].

#### 2.4 Statistiques actuelles concernant l'énergie éolienne à l'échelle mondiale.

Tableau 2-1 - Bilan des ajouts annuels et de la capacité globale connectée au réseau entre 2021 et 2022 [3].

MW, onshore	Nouvelle installation 2021	Total installation 2021	Nouvelle installation 2022	Total installation 2022
Total onshore	72499	773818	68816	841898
Amérique	19243	189582	14829	204134
Afrique, Moyen-Orient	1809	9359	349	9708
Asie	37352	365887	36970	402852
Europe	14095	208991	16667	225204
MW, offshore	Nouvelle installation 2021	Total installation 2021	Nouvelle installation 2022	Total installation 2022
Total onshore	21106	55549	8771	64320
Amérique	0	42	0	42
Afrique, Moyen-Orient	17788	27695	6311	34006
Asie	3317	27812	2460	30272

## 2.5 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se répartissent généralement en deux types principaux : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

### 2.5.1 Éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical figurent parmi les premières technologies développées pour la production d'électricité. Bien que plusieurs configurations aient été testées au fil des années, seules deux d'entre elles ont été réellement industrialisées : le rotor Savonius et le rotor Darrieus. Leur principal avantage réside dans la simplicité d'accès aux composants de commande et au générateur, ces derniers étant généralement situés près du sol [2] [8] [9].

#### ➤ Le rotor de Savonius :

Le rotor Savonius, conçu en 1931 par l'ingénieur finlandais S.J. Savonius, repose sur le principe de la traînée différentielle. Ce phénomène résulte d'une différence de pression entre les deux faces des pales, concave et convexe, exposées à l'écoulement de l'air. Bien que ces rotors soient moins rapides que ceux utilisant la portance aérodynamique, ils ont l'avantage de démarrer à de faibles vitesses de vent. Ils génèrent un couple mécanique élevé mais irrégulier, ce qui justifie souvent leur association avec des rotors de type Darrieus pour faciliter le démarrage. Grâce à leur simplicité de construction, ils sont particulièrement utilisés pour des applications comme le pompage d'eau, notamment dans les régions en développement [10].

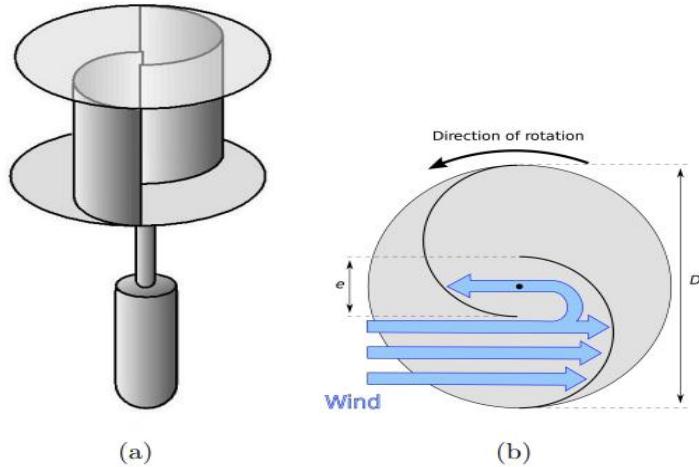


Figure 2-1 Exemple d'éolienne à traîner différentielle de type Savonius [9].

➤ **Le rotor de Darrieus :**

Il se compose de plusieurs pales biconvexes, généralement au nombre de deux ou trois, montées d'une manière symétrique et solide reliées entre elles, effectuant une rotation autour d'un axe vertical [8]. Le rotor de Darrieus fonctionne par portance aérodynamique, en s'appuyant sur le principe de la variation cyclique de l'incidence des pales. Un profil position dans un flux d'air à différents angles subit des forces de différentes intensités et directions.

La résultante de ces forces crée un couple moteur, qui assure la rotation du dispositif.

Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est quasiment nul, ce qui signifie qu'une petite turbine Savonius est souvent ajoutée sur son axe pour faciliter le démarrage [9].

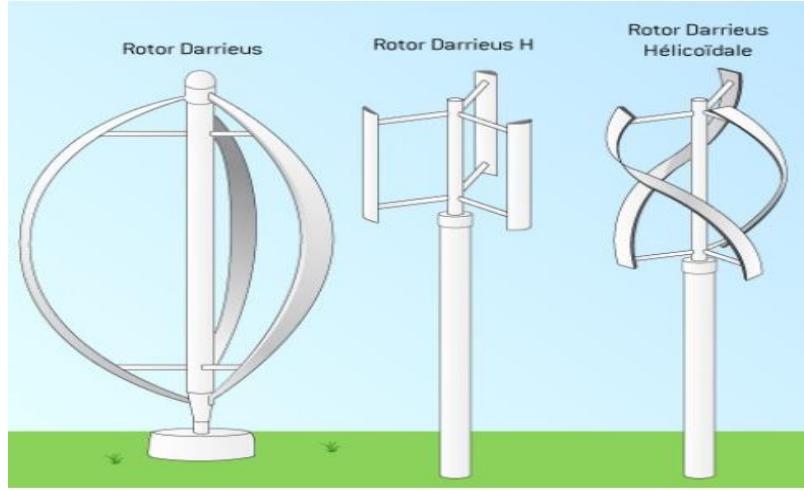


Figure 2-2 Éoliennes de type Darrieus[11].

➤ **Les avantages des éoliennes à axe vertical :**

Les éoliennes à axe vertical présentent plusieurs avantages notables, notamment[2, 8].

- ✓ La conception à axe vertical présente l'avantage de permettre l'installation du multiplicateur, de la génératrice et des appareils de commande directement au sol.
- ✓ L'absence d'un dispositif d'orientation du rotor permet à la structure de tourner en réponse au vent, sans dépendre d'une direction spécifique.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et demande peu d'entretien.

➤ **Les inconvénients des éoliennes à axe vertical :**

En dépit de leurs avantages, les éoliennes à axe vertical sont néanmoins sujets aux inconvénients suivants[12].

- ✓ Une efficacité limitée avec des fluctuations importantes de la puissance.
- ✓ Occupation d'une surface plus importante que celle nécessaire pour les niveaux de puissance élevé.

- ✓ La Nécessité d'un démontage complet des éoliennes pour procéder au remplacement du palier principal du rotor.

### 2.5.2 Éoliennes à axe horizontal

Il s'agit du modèle prédominant dans la conception de la technologie éolienne, caractérisé par des éoliennes commerciales à axe horizontal, équipées de deux à trois pales. Ce modèle est largement reconnu pour ses performances optimales en termes d'aérodynamisme et de stabilité géométrique[13].

Le fonctionnement de son système s'appuie sur le concept de portance aérodynamique, les pales étant conçues de manière analogue à celles des ailes d'avion (figure 2.7). Le mouvement du flux d'air sur les pales entraîne la rotation du rotor de l'équipement [2] [14].



Figure 2-7 Modèle d'éolienne à axe horizontal équipé de trois pales [12].

➤ **Les avantages des éoliennes à axe horizontal :**

- ✓ Leur poids réduit contribue à une économie de coûts.
- ✓ La rotation plus rapide est attribuée à un multiplicateur présentant un rapport de multiplication moins important ce qui résulte en une structure plus légère et des pertes minimisées.
- ✓ Son faible couple de démarrage lui permet d'être opérationnel même lorsque la vitesse du vent est relativement basse.

➤ **Les inconvénients des éoliennes à axe horizontal :**

- ✓ Le coût de construction est considérablement très élevé.
- ✓ L'équipement est situé en haut de la tour, ce qui complique toute intervention en cas d'incident.

Malgré ses désavantages, cette configuration reste la plus couramment adoptée de nos jours. Toutefois, les structures à axe vertical continuent d'être utilisées pour générer de l'électricité dans des régions isolées ce type d'éolienne convient bien aux applications permanentes telles que le chargement de batteries. Dans la suite de notre travail, nous concentrerons sur la structure prédominante et hautement performante, à savoir celle à axe horizontal avec trois pales à pas variable.

## **2.6 Constitution d'une éolienne moderne**

La figure 2.8 présente la configuration électromécanique d'une éolienne moderne de type Nordox à axe horizontal équipée d'un multiplicateur de vitesse [15].

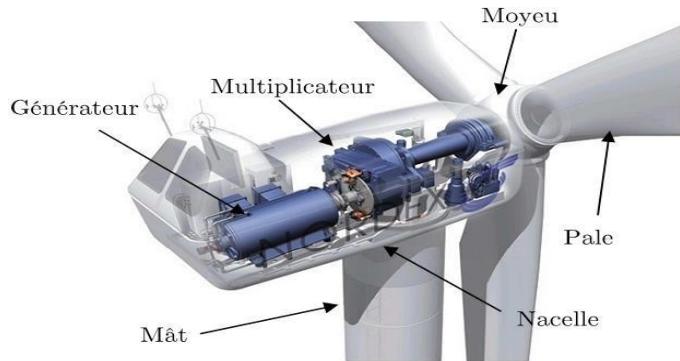


Figure 2-8 Constitution d'une éolienne de type-NORDEX [15].

- **La tour:** Composée du mât, structure verticale qui supporte l'éolienne. Généralement de forme conique, il mesure entre 50 et 130 mètres de haut et un diamètre de 4 à 7 mètres [15].
- **La nacelle:** Boîtier situé au sommet de mât, qui abrite les composants principaux, tels que le générateur, le système de commande et les mécanismes de rotation. L'accès à la nacelle se fait par une échelle ou un monte-charge situé à l'intérieur du mât [15].
- **Les pales :** Il s'agit des éléments rotatifs fixés au moyeu de la nacelle. En général au nombre de trois, leur fonction principale est de capter l'énergie cinétique du vent et de la transformer en mouvement de rotation. En moyenne peuvent mesurer chacune 25 à 60 m de longueur et elles tournent à des vitesses variables [15].

## 2.7 Méthodes de contrôle au niveau du générateur électrique

Le contrôle au niveau de la génératrice est crucial pour maximiser l'efficacité du captage d'énergie éolienne, surtout lors de vents faibles ou moyens. La connexion directe ou indirecte au réseau offre une flexibilité dans la gestion de l'énergie produite [16].

Les générateurs asynchrones restent les plus couramment utilisés dans l'industrie éolienne. Toutefois, une tendance récente montre une adoption croissante des générateurs synchrones, en particulier dans les systèmes à entraînement direct, sans multiplicateur de vitesse, ainsi que dans les installations autonomes [2].

### 2.7.1 Système à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe constituent une étape fondamentale dans l'évolution technologique de cette filière. Elles utilisent principalement des générateurs asynchrones à cage, fonctionnant en hyper-synchronisme, c'est-à-dire à une vitesse légèrement supérieure à la vitesse synchrone. Cette particularité les rend idéales pour les turbines à décrochage aérodynamique, où le maintien d'une vitesse de rotation constante est essentiel pour garantir un fonctionnement optimal [2].

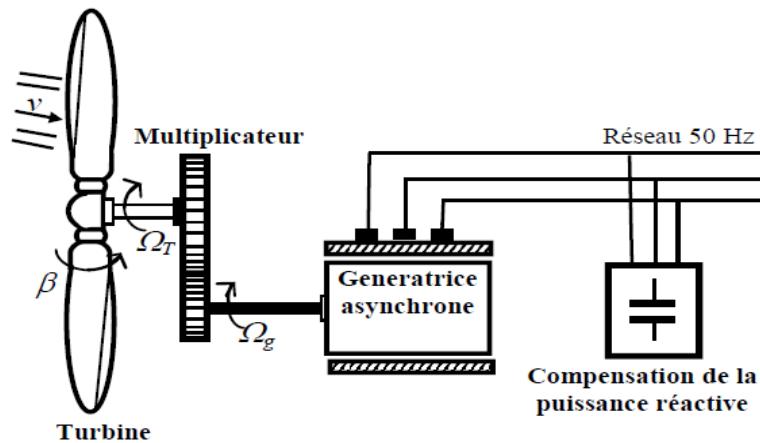


Figure 2-9 Système à vitesse fixe [17].

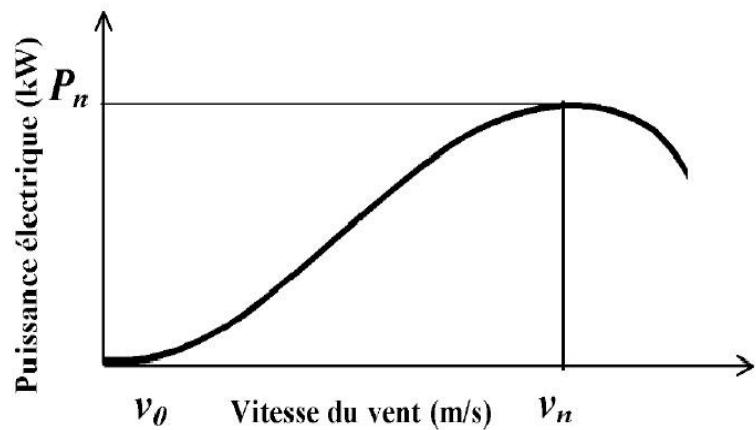


Figure 2-10 Caractéristique d'une éolienne à vitesse fixe avec décrochage aérodynamique [18].

L’association d’une batterie de condensateurs est nécessaire pour compenser la puissance réactive nécessaire à la machine asynchrone à cage (figure 2-9). La conception des éoliennes à vitesse fixe est étroitement liée aux caractéristiques aérodynamique et mécaniques, avec des temps de réponse dans la gamme des dizaines de millisecondes. Ainsi, en cas de rafales de vent, des variations rapides et substantielles de la puissance électrique générée peuvent être observées [17].

- **Avantage :**

- ✓ Construction de machine simple, robuste et leur coût abordable.
- ✓ Peu au pas d’interface électronique de puissance.
- ✓ La simplicité de son système de contrôle [2].

- **Inconvénient :**

- ✓ Le besoin d’un dispositif externe consommant de l’énergie réactive pour assurer la magnétisation de stator.
- ✓ Maîtrise limitée sur la puissance active générée.
- ✓ Des contraintes importantes sur la machine en raison de sa difficulté à réguler la vitesse de rotation de manière précise [2, 17].

### 2.7.2 Système à vitesse variable

Le choix des éoliennes à vitesse variable est également justifié par leur aptitude à maximiser le rendement énergétique. En permettant à la turbine de s’adapter dynamiquement à la variabilité des conditions de vent, les éoliennes à vitesse variable

pouvant maintenir un rendement élevé sur une plage plus large de vitesses de vent. Cela contribue à maximiser la production d'énergie, même dans des conditions de vent changeantes. L'utilisation des convertisseurs statiques et de systèmes de commande avancés permet de réguler effectivement la vitesse de la turbine, améliorant ainsi la réponse aux fluctuations du vent et la stabilité des réseaux [19].

En se référant aux graphiques de la figure 2-11, on observe qu'à chaque vitesse de vent correspond à une valeur particulière de la vitesse de rotation de la machine, conduisant à une puissance aérodynamique maximale [12].

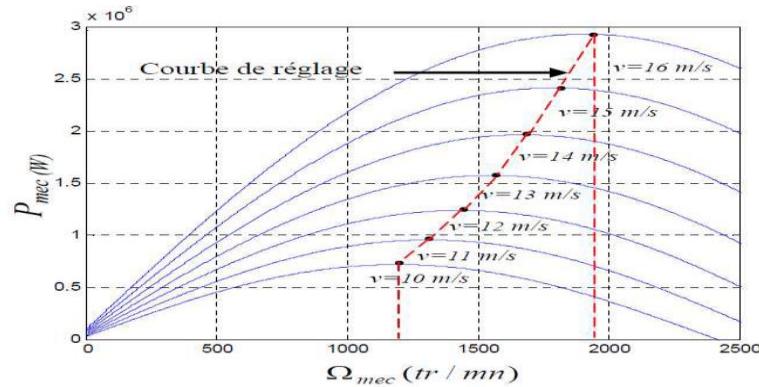


Figure 2-11 Évolution de la puissance disponible en fonction des conditions de vent au niveau de la turbine [20].

- **Avantage :**

- ✓ Minimiser la contrainte sur les pièces mécaniques d'une éolienne peut étendre sa durabilité.
- ✓ Exploiter des rapports de vitesse adaptatifs sur une plage étendue de vitesses de vent pour maximiser la capture d'énergie éolienne, optimisant ainsi l'utilisation des vents disponibles.

- ✓ Grâce à la boîte de vitesses, les pertes dues aux frottements sont atténuées, ce qui favorise une production plus efficace.
- ✓ Le pilotage de la puissance réelle et réactive destinée au réseau électrique [20, 21].

- **Inconvénient :**

- ✓ La production de courants et de tensions à fréquence variable requiert l'utilisation d'un convertisseur de puissance.
- ✓ Requiert une stratégie de régulation avancée. [20, 21].

Dans la figure 2.12, on observe comment le coefficient de puissance  $C_p$  varie selon  $\lambda$  pour différentes configurations d'éoliennes.

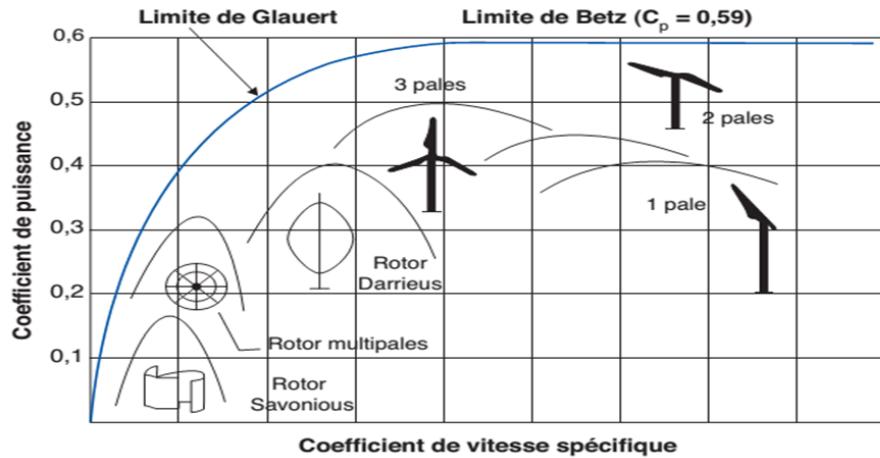


Figure 2-3 Comparaison du coefficient de puissance selon le type d'éolienne [13].

#### 2.7.2.1 Architecture de conversion utilisant une GSAP

Les éoliennes équipées d'un générateur asynchrone à rotor bobiné requièrent l'utilisation de bagues collectrices, de balais et d'un multiplicateur de vitesse, ce qui

engendre des coûts de maintenance importants, en particulier pour les installations en mer exposées à des conditions salines [22]. Pour minimiser ces inconvénients, certains fabricants développent des éoliennes avec des générateurs synchrones à grand nombre de paires de pôles, directement reliés à la turbine, éliminant ainsi l'utilisation d'un multiplicateur. Lorsque la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais devient superflu. Cependant, cette structure présentée à la Fig. 2-13 nécessite des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice lors de sa connexion au réseau [23].

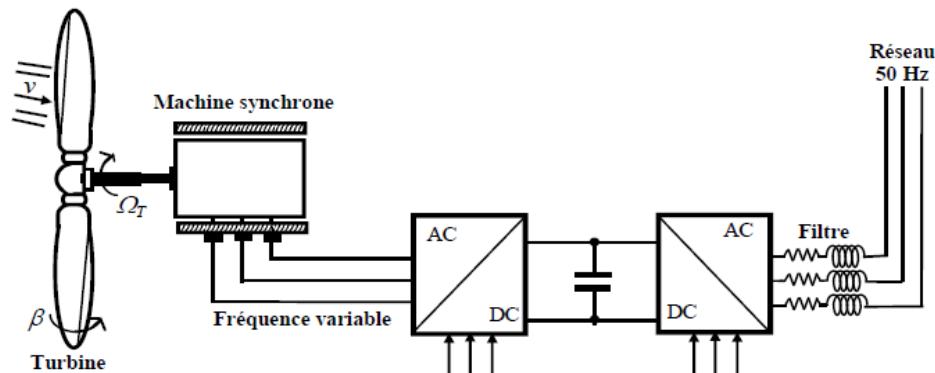


Figure 2-4 Structure d'une éolienne utilisant une machine synchrone à nombre élevé de paires de pôles [17].

- **Avantages :**

- ✓ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.
- ✓ Puissance extraite optimisée.
- ✓ Connexion de la machine au réseau plus facile à gérer.
- ✓ Absence du boîte de vitesse [2, 23]

- **Inconvénients :**

- ✓ Machine particulière, caractérisée par plusieurs paires de pôles donc volumineuse et présentant un grand diamètre.
- ✓ Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.
- ✓ Le coût de la machine très élevé[2, 23]

#### **2.7.2.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone à double alimentation (MADA):**

Ce modèle spécifique d'éoliennes utilise une machine asynchrone à rotor bobiné qui présente une configuration où le stator de la génératrice est directement lié au réseau, tandis que l'enroulement rotorique triphasé équipé des bagues collectrices connecté au réseau via une interface électronique de puissance. La majorité des éoliennes disponibles sur le marché sont équipées d'une interface électronique composée de deux convertisseurs de tension à interrupteurs commandés. Ces derniers peuvent fonctionner aussi bien en mode redresseur qu'en mode onduleur, selon les besoins du système. Cette configuration s'est imposée comme la solution dominante, en raison de ses nombreux avantages en matière de performance et de flexibilité. Des fabricants de renom tels que NORDEX et VESTAS l'intègrent couramment dans la conception de leurs éoliennes haut de gamme. Cette structure permet une gestion efficace de la puissance tout en utilisant une électronique de puissance dimensionnée à seulement 30 % de la puissance nominale de la machine [2] [24].

Les convertisseurs reliés au circuit électrique du rotor de ces éoliennes permettent un contrôle autonome de la puissance active et réactive, offrant ainsi une gestion indépendante de ces deux composantes [12, 22].

- Fonctionnant à fréquence variable, le convertisseur côté machine (CCM) assure la régulation du couple électromagnétique, ce qui agit à la fois sur la puissance active produite et sur la puissance réactive échangée avec le stator.
- Le convertisseur côté réseau (CCR) leur rôle principal est de réguler la tension de bus continu, garantissant ainsi les échanges de puissance active entre le rotor et le réseau. De plus, il offre la possibilité de régler la puissance réactive générée.

La configuration globale de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est illustrée dans la figure 2-14.

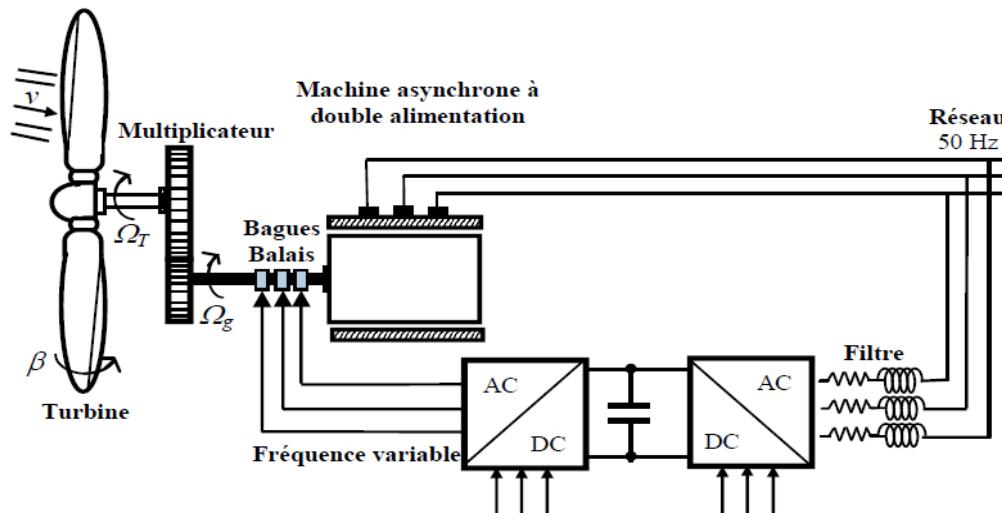


Figure 2-5 Schéma d'une éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA)[17].

- **Avantages**

- ✓ La réduction des coûts de l'onduleur résulte du dimensionnement précis des convertisseurs, optimisé pour une plage de puissance environ 25 à 30% de la puissance nominale de la machine [13].
- ✓ Connexion au réseau plus facile à gérer, et la puissance extraite optimisée.
- ✓ Électronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ( $P_N$ ).
- ✓ Les pertes associées aux convertisseurs statiques sont déduites, contribuant ainsi une amélioration du rendement de système de génération [8, 19].

#### **Inconvénients:**

- ✓ La boîte de vitesses nécessite un entretien régulier.
- ✓ Le système de commande est particulièrement complexe et peut engendrer des oscillations mécaniques.
- ✓ L'utilisation de bagues collectrices est indispensable, ce qui implique une maintenance périodique [8, 13].

Dans ce mémoire, notre étude se focalise sur cette architecture, qui fera l'objet d'une analyse approfondie dans les chapitres suivants.

## **2.8 La conversion aérodynamique des énergies éoliennes**

La mission principale d'un système éolien est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, selon les lois de la mécanique et de l'aérodynamique.

### 2.8.1 La théorie de BETZ

Le modèle théorique de l'aérogénérateur à axe horizontal a été formulé par le physicien Albert Betz [25], qui part du principe que la turbine éolienne est placée dans un flux d'air en mouvement continu d'une vitesse  $V$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $v$ . La production d'énergie ne peut s'effectuer que par la conversion de l'énergie cinétique. La vitesse  $v$  est nécessairement inférieure à  $V$ , ce qui entraîne un élargissement de la veine de fluide traversant le générateur éolien.

Soit donc  $V$  la vitesse d'air en amont, vitesse d'air en aval et  $V'$  la vitesse au travers de  $S$ , la section balayée par les pales de l'éolienne tel qu'illustré dans la figure 2-15 et  $M$  la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation d'énergie cinétique de l'air  $\Delta_E$  est :

$$\Delta_E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V^2 - v^2) \quad (2.1)$$

La puissance extraite par l'éolienne, notée  $P$  s'exprime par la relation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V^2 - v^2) \quad (2.2)$$

Avec  $\rho$  la densité d'air.

En outre, la force que le vent exerce sur le rotor, notée  $F$  s'exprime selon la relation suivante :

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V - v) \quad (2.3)$$

On peut écrire :

$$P = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V - v) \quad (2.4)$$

En comparant les équations (2.2) et (2.4), on obtient :

$$V' = \frac{V + v}{2} \quad (2.5)$$

On aura :

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V^2 - v^2) \cdot (V - v) \quad (2.6)$$

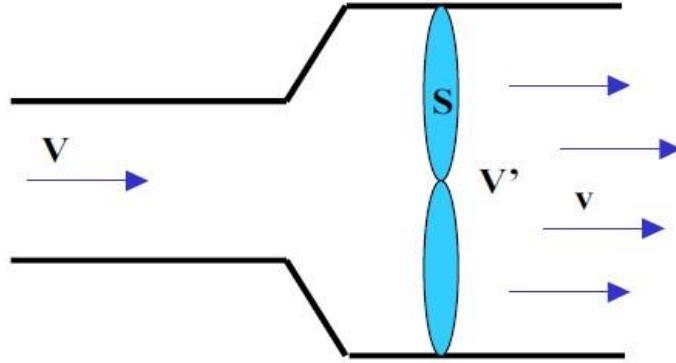


Figure 2-15 Schéma de principe illustrant la théorie de Betz [25].

La puissance de l'éolienne atteint son maximum lorsque la dérivée  $\frac{dP}{dv}$  s'annule, ce qui se produit lorsque la vitesse  $v$  est égale à un tiers de la vitesse du vent  $V$  à ce moment-là, la puissance générée est maximale.

$$P = P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.7)$$

On peut donc déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir  $\nu = \frac{V}{3}$ , on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse de vent amont  $V = \nu$ .

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \nu^3 \cdot C_p \quad (2.8)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  caractérise l'efficacité d'une éolienne à convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Il dépend de plusieurs facteurs, notamment de la vitesse du vent en amont  $\nu_{vent}$ , du nombre de pales, de leur angle d'inclinaison (calage), ainsi que de leur vitesse de rotation.

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de retracer brièvement l'évolution de l'énergie éolienne, de présenter son état actuel dans le monde, et de classifier les éoliennes selon leur axe de rotation et leur mode de fonctionnement.

L'accent a été mis sur les éoliennes à axe horizontal, qui dominent aujourd'hui le marché grâce à leur efficacité. Les principaux types de générateurs, tels que les machines synchrones et asynchrones, ont également été abordés.

Enfin, les bases théoriques de la conversion aérodynamique, notamment la limite de Betz, ont été introduites pour préparer la modélisation détaillée présentée dans les chapitres suivants.

## CHAPITRE 3 - MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE

### 3.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'étudier le comportement dynamique de la turbine éolienne en vue de développer un modèle mathématique représentatif. Cette modélisation s'inscrit dans le cadre d'une chaîne de conversion intégrant une machine asynchrone à double alimentation (MADA), et servira de base à son intégration dans la suite du travail [13, 26].

### 3.2 Modélisation de la turbine :

Pour modéliser la turbine, nous utiliserons plusieurs hypothèses simplificatrices, qui sont largement les plus reconnues. Ces hypothèses incluent [19].

- Chaque pale est fabriquée selon le même profil, garantissant une répartition équilibrée des efforts
- Elles sont également orientables et possèdent toutes un coefficient de frottement uniforme par rapport au point de fixation.
- Le vent est supposé agir de manière uniforme sur toutes les pales, générant des forces de poussée égales sur chacune d'elles.
- Le frottement entre les pales et l'air est négligé dans l'analyse.

- Étant donné la faible vitesse de la turbine, les pertes par frottement sont également négligeables.
- Les pertes associées à la turbine sont négligeables par rapport à celles générées du côté de la génératrice.

### 3.2.1 La puissance aérodynamique

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu que la puissance éolienne du vent  $P_T$  est exprimée par la relation (2.8) de la façon suivante :

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p \quad (3.1)$$

Le paramètre  $C_p$  exprime la capacité de l'éolienne à extraire l'énergie du vent, donc représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Ce paramètre caractéristique de l'aérogénérateur dans la limite théorique égale  $16/27 = 0.593$  (limite de Betz) est une fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de calage  $\beta$  et est appelé coefficient de puissance.

On définit la vitesse spécifique  $\lambda$  appelée également le ratio de la vitesse de bout de pâle comme étant le rapport de la vitesse tangentielle périphérique ( $\Omega_T \cdot R$ ) sur la vitesse instantanée du vent  $v$  comme suite [19, 26].

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_T}{v} \quad (3.2)$$

$R$  : Le rayon de l'air balayé par les pales.

$\Omega_T$  : la vitesse de rotation de la turbine.

En déduire l'expression du couple éolienne à partir de l'expression (3.1) :

$$P_T = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^3 v^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (3.3)$$

On définit le coefficient de couple par :

$$C_c = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

La modélisation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse spécifique et de l'angle de calage des pales fait l'objet de nombreuses approches dans la littérature. Ces formulations sont souvent dérivées des données expérimentales spécifiques à un modèle de turbine donné, ce qui limite leur application à des configurations particulières.

En effet, le comportement aérodynamique varie d'une turbine à l'autre, et les fabricants communiquent rarement les détails techniques nécessaires à une modélisation précise [24].

Nous avons retenu une expression du coefficient de puissance adaptée à notre modèle de simulation [2] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left( C_2 \cdot \frac{1}{A} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{A}} + C_6 \cdot \lambda \quad (3.5)$$

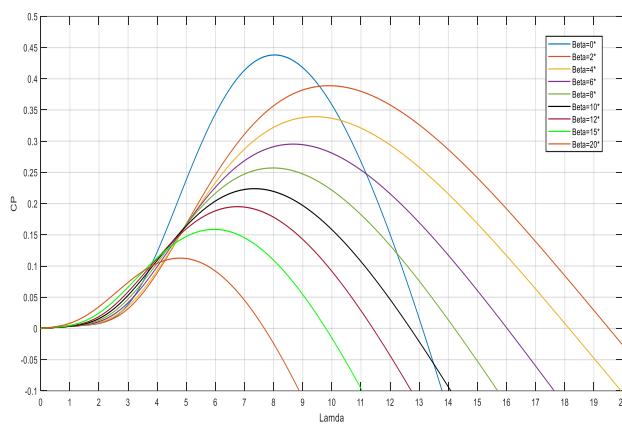
Avec :

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.6)$$

Les coefficients  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  et  $C_6$  sont liés à la turbine considérée. Le cas exposé ci-dessus concerne une turbine ayant une puissance nominale de 300 KW.

Table 3-1 - Caractéristiques de la turbine.

Coefficient	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
Valeur	0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

Figure 3-1 Courbes du coefficient aérodynamique  $C_p(\lambda, \beta)$  selon  $\lambda$  pour divers angles d'orientation  $\beta$ .

### 3.3 Modèle mécanique de la turbine

La turbine comprend trois pales orientables de longueur  $R$ . Elles sont fixées à travers un moyeu sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ , qui entraîne une génératrice à double alimentation (MADA). Dans notre cas, certaines hypothèses simplificatrices ont été retenues afin de faciliter la modélisation du système[4].

- **Hypothèses simplificatrices :**

- ✓ On suppose que les pales sont identiques et soumises à une vitesse de vent uniforme
- ✓ Les trois pales sont modélisées comme un seul ensemble mécanique.
- ✓ D'un point de vue aérodynamique, les pales sont supposées avoir un coefficient de frottement avec l'air très faible, pouvant être négligé, d'autant plus que la vitesse de la turbine est très faible.
- ✓ Le coefficient de frottement air-pale est estimé négligeable en raison de sa faible valeur.

Grace à ces hypothèses, un modèle mécanique comportant deux masses est élaboré selon la configuration illustrée à la figure 3-2.

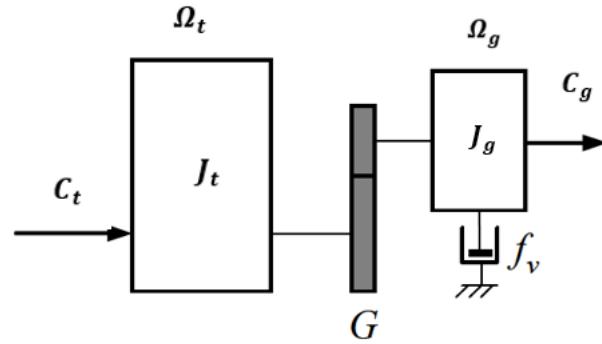


Figure 3-2 Schéma simplifié du modèle mécanique de la turbine éolienne [4].

Le multiplicateur agit comme un convertisseur mécanique qui ajuste la vitesse de rotation lente de la turbine à la vitesse rapide de la MADA (figure 3-2). Sous l'hypothèse d'un multiplicateur idéal, où les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors décrit à l'aide des deux équations suivantes.

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (3.7)$$

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t \quad (3.8)$$

D'après la figure 3-2, l'équation de la dynamique mécanique sur l'arbre peut être formulée comme suit :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (3.9)$$

Grace à l'utilisation de ce modèle mathématique de la turbine, nous sommes en mesure de développer un schéma bloc pour contrôler l'éolienne qui est décrite dans la figure 3-3.

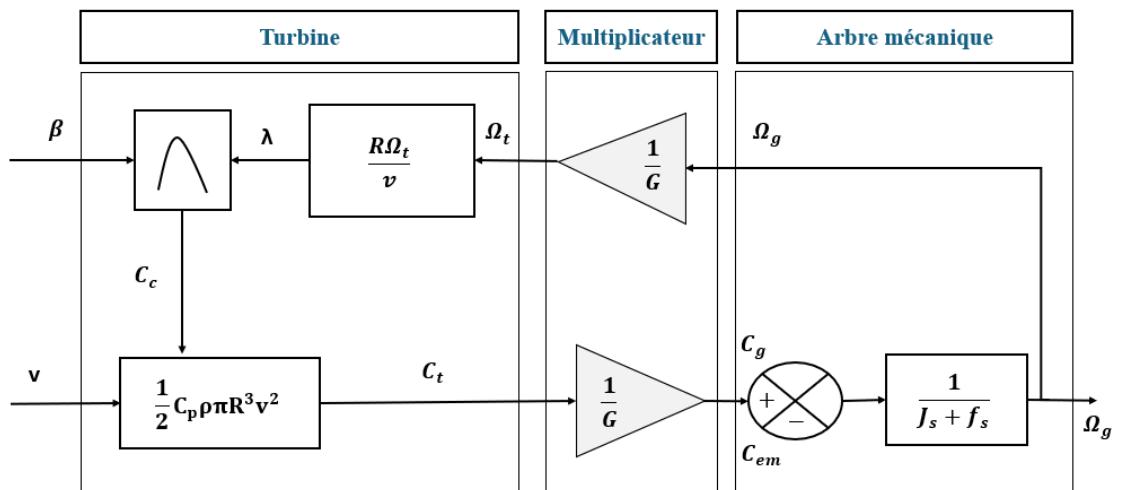


Figure 3-3 Schéma fonctionnel du modèle de la turbine éolienne [20].

### 3.3.1 Les Zones du fonctionnement de l'éolienne

La figure 3-4 décrit la relation entre la turbine éolienne et la puissance captée du vent par la turbine en fonction de la vitesse du vent [26] [2] [19].

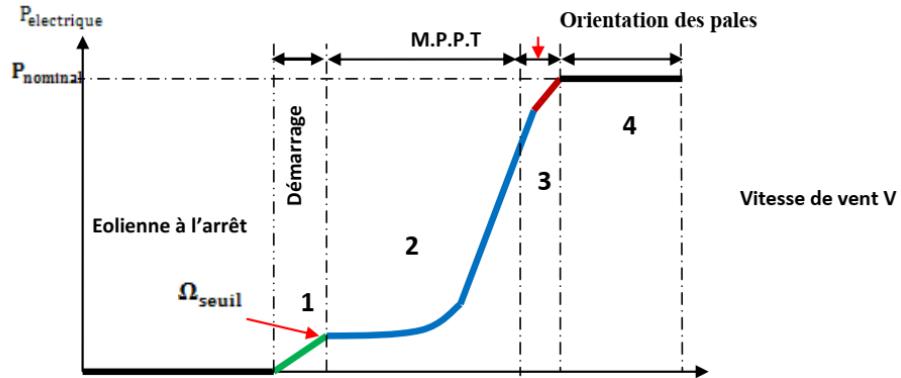


Figure 3-4 Classification des régimes opérationnels d'une éolienne à vitesse variable [8].

- **Zone I :** L'éolienne reste inactive à de faibles vitesses de vent et n'entre en production qu'à partir d'une vitesse mécanique minimale requise.
- **Zone II** Dans cette zone, la vitesse du vent est dite intermédiaire, se situant entre la vitesse de démarrage et la vitesse nominale de l'éolienne. L'objectif principal de la commande dans cette plage de fonctionnement est de maximiser la puissance captée, en suivant le point de puissance maximale MPPT. Dans ces conditions, la turbine fonctionne avec un coefficient de puissance optimal.
- **Zone III:** Il s'agit d'une zone de transition entre le fonctionnement à charge partielle et la charge nominale. Lorsque la vitesse du vent devient suffisante pour atteindre la puissance nominale, la commande vise alors à la maintenir constante, malgré les variations de vent. Cela est assuré par le réglage de l'angle de calage des pales (commande de pitch) ou par des stratégies de limitation du couple.
- **Zone IV :** Cette zone correspond aux vents forts. Lorsque la vitesse du vent dépasse un seuil critique, l'éolienne est arrêtée par mesure de sécurité afin de

protéger ses composants mécaniques et électriques. La commande met alors le système hors service.

### 3.3.2 Contrôle en charge partielle

Dans la zone II, correspondant au fonctionnement à charge partielle d'une éolienne à vitesse variable, la commande vise principalement à maximiser l'énergie captée du vent. Comme mentionné précédemment le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  dépend de la manière non linéaire du rapport de vitesse  $\lambda$  (vitesse spécifique) et de l'angle de calage des pales  $\beta$ . Cette fonction présente un unique maximum, note  $C_{opt}$  ( $\lambda_{opt}, \beta=0$ ), le rotor peut fournir une puissance aérodynamique maximal uniquement pour le  $C_{opt}$  [26].

Comme on peut constater sur la figure suivante :

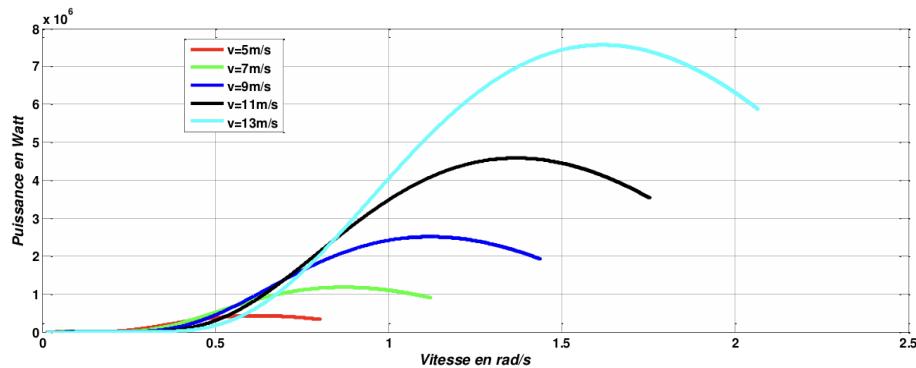


Figure 3-5 Courbes de puissance de la turbine selon la vitesse de rotation pour diverses vitesses de vent, à angle de calage maximal ( $\beta_{max}$ ).

Afin d'extraire la puissance maximale ( $P_{max}$ ), il est nécessaire de maintenir la vitesse de la génératrice à sa valeur optimale. Celle-ci est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega_{t\ max} = \frac{\lambda_{opt} V_{vent}}{R} \quad (3.10)$$

### 3.4 Stratégie de commande de la turbine avec et sans asservissement

Deux approches principales de commande sont généralement identifiées pour optimiser la puissance captée par la turbine [4] [14]:

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

Dans notre cadre, nous nous intéressons à la deuxième approche de la vitesse mécanique, la nature variable du vent entraîne des fluctuations continues dans la puissance extraite par la turbine éolienne. Pour maximiser cette puissance à tout instant, cette stratégie MPPT repose sur la commande du couple afin de suivre la vitesse de rotation correspondant au rendement électromécanique maximal développé par la machine en suivant une référence qui maximise la puissance extraite. Ainsi, le couple de la machine est égal à une valeur de référence liée au point de fonctionnement optimal [19].

$$C_{em} = C_{em}^* \quad (3.11)$$

En utilisant la dynamique de la vitesse mécanique, cette stratégie définit une vitesse de rotation de référence  $\Omega^*$  correspondant à la vitesse optimale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle le coefficient de puissance  $C_p$  est maximal.

$$C_{em} = K_a \cdot (\Omega^* - \Omega_{mec}) \quad (3.12)$$

Avec :

$K_a$ : Le gain du régulateur de vitesse.

$\Omega^*$ : La vitesse de référence.

Selon équation (3.2), la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_t = \frac{v\lambda}{R} \quad (3.13)$$

La vitesse de référence du la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient  $C_{pMax}$  de puissance maximale peut se déduire à partir de l'équation (3.13) :

$$\Omega^* = \frac{v\lambda_{opt}}{R} \quad (3.14)$$

Le schéma principal de la stratégie de régulation avec asservissement de la vitesse de rotation est présenté à la figure 3.6. Il illustre le principe du contrôle MPPT basé sur la régulation de la vitesse mécanique afin d'optimiser l'extraction de la puissance du vent.

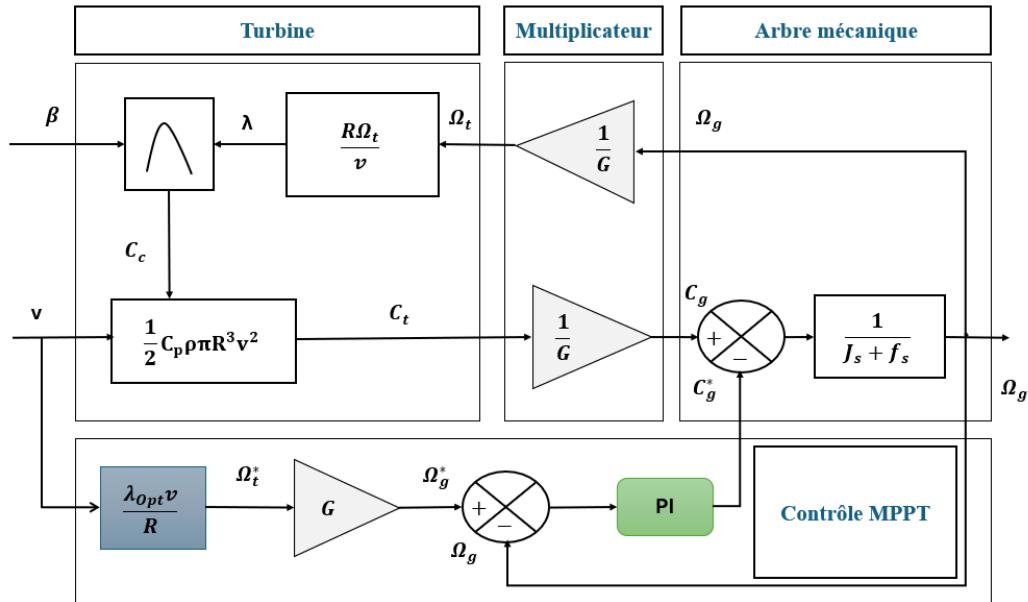


Figure 3-6 Schéma de la régulation MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation [20].

### 3.5 Résultats de simulation :

Les figures suivantes présentent l'évolution temporelle des principales grandeurs caractéristiques du système :

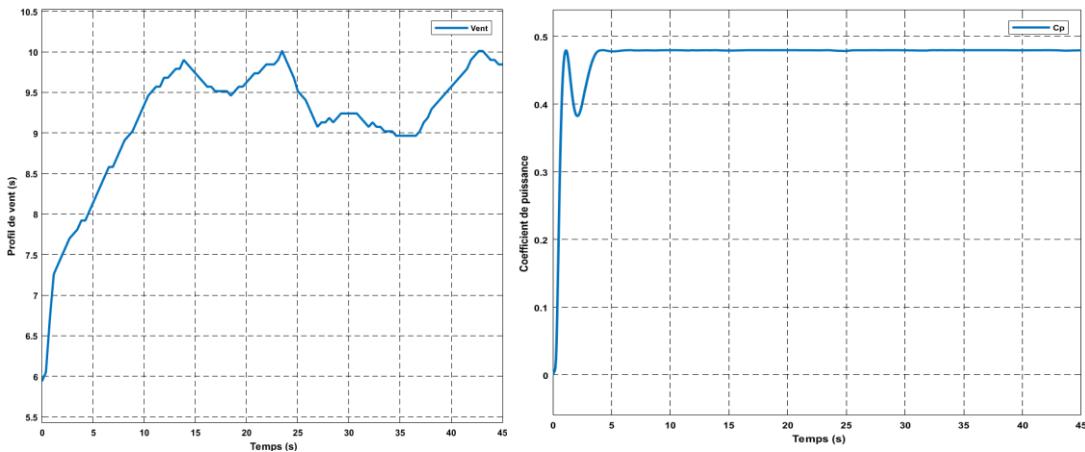


Figure 3-1- a) Profil de vent; b) Le coefficient de puissance  $C_p$ .

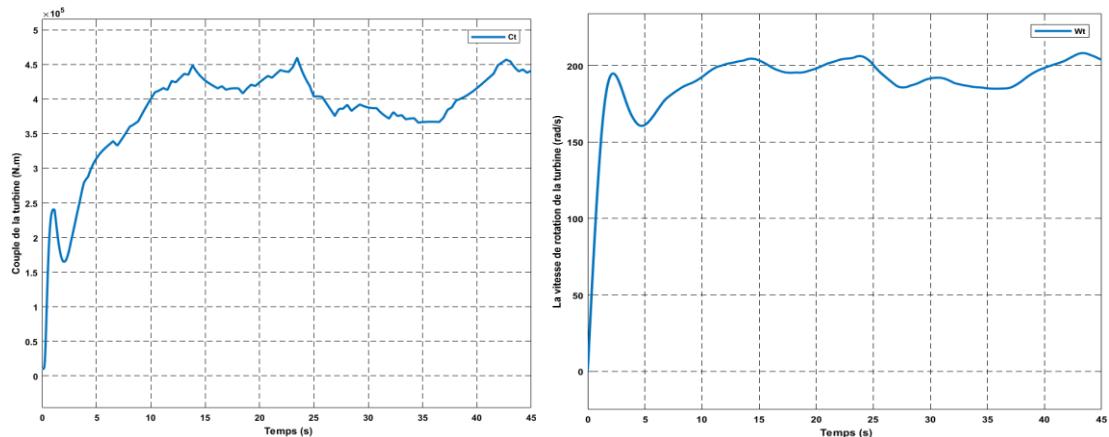


Figure 3-2- a) Évolution du couple; b) Évolution de la vitesse de rotation de la turbine éolienne.

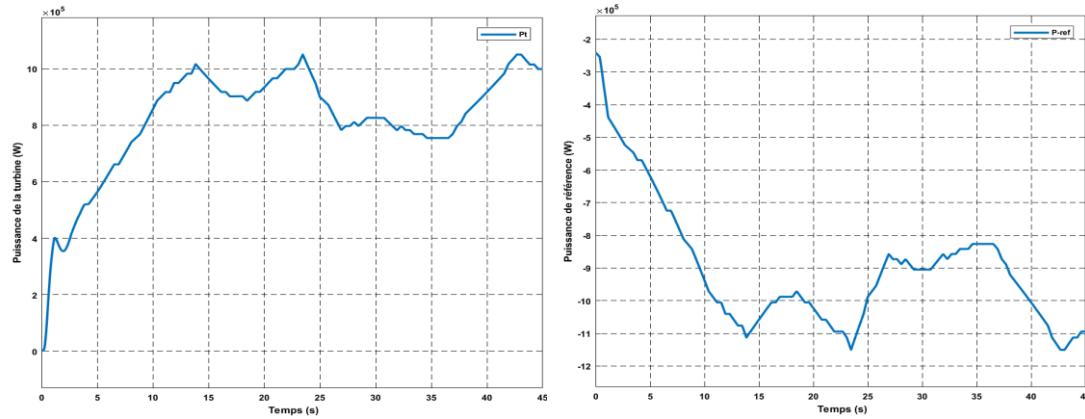


Figure 3-3- a) Évolution de la puissance de la turbine; b) Évolution de la puissance de référence.

Les résultats obtenus montrent que le système de commande MPPT, basé sur un régulateur PI, offre de bonnes performances dynamiques et statiques. Le système assure une poursuite efficace de la vitesse de rotation de référence, avec un temps de réponse rapide et une stabilité satisfaisante, même en présence de variations significatives de la vitesse du vent.

On observe que:

- La vitesse du vent (Figure 3-7-a) varie entre 6 m/s et plus de 10 m/s durant la simulation, ce qui simule un scénario réaliste de fonctionnement sous des conditions climatiques changeantes.
- Le coefficient de puissance  $C_p$  (Figure 3-7-b) reste stable autour de 0.47, ce qui est très proche de la valeur optimale attendue (0.48), indiquant une extraction efficace de l'énergie éolienne.

- La (Figure 3-8-a) illustre que le couple électromagnétique s'ajuste dynamiquement en réponse aux variations de vent, avec des oscillations naturelles mais des valeurs stables comprises entre  $3.5 * 10^5$  et  $5.5 * 10^5 Nm$ .
- La vitesse de rotation du générateur (Figure 3-8-b) suit correctement la consigne (non affichée directement), atteignant, après une phase transitoire brève, une valeur quasi-stationnaire autour de 200 rad/s.
- La puissance aérodynamique (Figure 3-9-a) atteint un maximum d'environ 100 kW, en suivant fidèlement les variations de la vitesse du vent.
- Enfin, la puissance de référence (Figure 3-9-b) et la puissance réelle présentent des profils très proches, ce qui témoigne d'une bonne qualité de régulation et de suivi de consigne.

### 3.6 Conclusion

Les résultats obtenus à travers les simulations démontrent l'efficacité de la stratégie MPPT appliquée à une éolienne de 1.5 MW, en utilisant un régulateur PI pour l'asservissement de la vitesse de rotation. L'objectif principal de cette commande, qui est de maximiser la puissance extraite du vent quelles que soient les conditions climatiques, a été pleinement atteint.

Les différentes courbes présentées (vitesse du vent, vitesse de rotation, couple, puissance, coefficient  $C_p$ , etc.) ont permis de mettre en évidence la bonne dynamique du système.

En particulier, la vitesse de rotation du générateur suit fidèlement la consigne correspondant au point de fonctionnement optimal. La puissance aérodynamique produite évolue en cohérence avec les variations de la vitesse du vent, et le coefficient de puissance reste stable autour de 0.47, très proche de sa valeur maximale théorique (0.48), pour un rapport de vitesse optimal  $\lambda_{opt} = 8.1$ .

La commande MPPT s'est montrée robuste et performante, assurant un suivi rapide et précis du point de puissance maximale, tout en maintenant la stabilité du système. Le régulateur PI mis en œuvre permet d'assurer une régulation de qualité, avec un temps de réponse rapide et une atténuation efficace des fluctuations liées aux variations du vent.

En somme, la stratégie MPPT adoptée se révèle à la fois performante et bien adaptée à l'exploitation optimale de l'énergie éolienne, tout en garantissant un fonctionnement stable et sécurisé de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un contexte de vent variable.

## **CHAPITRE 4 - MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION**

### **4.1 Introduction**

Dans le cadre de notre étude, la génératrice asynchrone à double alimentation MADA a été choisie comme solution technologique pour la conversion de l'énergie éolienne. Ce choix s'explique par plusieurs avantages importants, notamment sa capacité à fonctionner en régime de vitesse variable permettant une meilleure adaptation aux fluctuations du vent ; un bon rendement énergétique sur une large plage de vitesses; et une réduction significative des coûts d'électronique de puissance grâce à l'utilisation d'un convertisseur partiel, alimentant uniquement le rotor. Ces caractéristiques font de la MADA une solution particulièrement adaptée aux exigences des systèmes éoliens modernes. Ce choix technologique s'aligne également avec les recommandations de la littérature scientifique, qui privilégie les approches intégrant à la fois des critères techniques, économiques et environnementaux, dans une logique de transition énergétique durable [27].

### **4.2 Structure, principe et modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)**

#### **4.2.1 Description et principe de fonctionnement**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) possède un stator triphasé similaire à celui d'une machine asynchrone classique à cage d'écureuil, tandis que son

rotor est équipé d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais).

Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique, en raison de ce système bagues/balais.

Dans une machine asynchrone à double alimentation (MADA), le stator est directement connecté au réseau électrique. Cette connexion permet la génération d'un champ magnétique tournant au sein du circuit magnétique de la machine, dont l'intensité dépend du courant statorique, du nombre de spires des enroulements et des caractéristiques magnétiques du matériau utilisé [28].

Lorsque le rotor entre en rotation, ce champ statorique induit une force électromotrice (fem) dans les enroulements du rotor. Ce dernier, étant bobiné, peut être alimenté indépendamment par un convertisseur de fréquence via un système de bagues et de balais [29].

Cette double alimentation « côté stator et côté rotor » permet une commande séparée de la puissance active et de la puissance réactive échangées avec le réseau électrique, ce qui confère à la MADA une grande flexibilité d'exploitation, notamment dans les applications de production éolienne [4].

#### **4.2.2 Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) se distingue par sa capacité à fonctionner de manière bidirectionnelle, en mode moteur ou générateur, en fait une

solution flexible et performante, indépendamment de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse synchrone. Cette flexibilité résulte de sa configuration particulière : le stator est directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est alimenté par un onduleur. Cette architecture permet un contrôle dynamique et indépendant du flux rotorique, rendant possible une large plage de fonctionnement autour de la vitesse synchrone.

Contrairement à la machine asynchrone à cage classique, dont le mode de fonctionnement dépend uniquement du glissement (et donc de la vitesse), la MADA permet une gestion plus souple du flux magnétique via le rotor. Ainsi, la machine peut fonctionner en hypo-synchronisme (vitesse inférieure à la vitesse synchrone) ou en hyper-synchronisme (vitesse supérieure à la vitesse synchrone), aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [19] [30] [31].

- **Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone (quadrant 1) :**

Lorsque la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse synchrone, le réseau alimente le stator en puissance active, tandis que la puissance de glissement transite par le rotor via l'onduleur. Contrairement à la machine à cage, cette énergie n'est pas dissipée mais réinjectée, améliorant ainsi le rendement global.

- **Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone (quadrant 2) :**

Dans ce cas, la vitesse dépasse celle du synchronisme. La machine reste en fonctionnement moteur, alimentée majoritairement par le stator, avec une contribution possible du rotor. Ce mode s'observe dans certaines applications industrielles à vitesse variable ou dans les phases transitoires des systèmes éoliens.

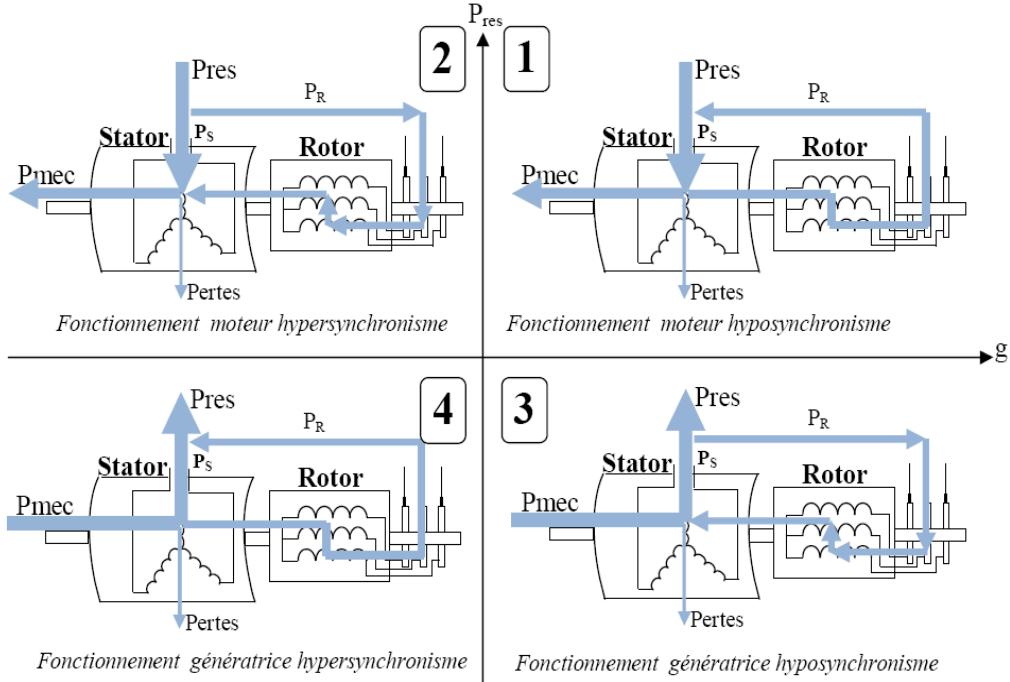


Figure 4-1Quadrants de fonctionnement de fonctionnement de la MADA en modes moteur et génératrice [20].

- **Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone (quadrant 3):**

À vitesse inférieure au synchronisme, l'énergie est injectée via le stator, tandis que la puissance de glissement est gérée par l'onduleur. Ce mode est adapté aux vitesses de vent modérées.

- **Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone (quadrant 4) :**

À vitesse supérieure au synchronisme, la machine injecte l'énergie par le stator et le rotor, optimisant ainsi le rendement et assurant une bonne flexibilité de commande, notamment pour les éoliennes à vitesse variable.

### 4.3 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Pour analyser le comportement de la MADA, il est nécessaire d'établir un modèle mathématique décrivant son évolution temporelle. Ce modèle repose sur des équations différentielles qui expriment les relations entre les grandeurs électriques de la machine, dérivées directement des équations de Maxwell.

#### 4.3.1 Hypothèses simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [28, 32, 33] :

- Le circuit magnétique est supposé non saturé, ce qui permet de considérer les flux comme des fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est considéré comme parfaitement feuilleté, ce qui conduit à négliger les courants induits de Foucault.
- Les effets thermiques sont supposés négligeables, leur impact sur le comportement de la machine n'étant pas pris en compte dans cette étude.
- La densité de courant est supposée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, ce qui implique une absence d'effet de peau.
- Seule la première harmonique d'espace de la distribution de la force magnétomotrice générée par chaque phase est prise en compte.
- La machine est supposée parfaitement symétrique au niveau des trois phases, éliminant ainsi tout déséquilibre électrique.

- On suppose que les inductances propres du stator et du rotor ne varient pas au cours du fonctionnement.
- Les frottements mécaniques secs et turbulents sont négligés, permettant de considérer un fonctionnement mécanique idéal.

#### 4.4 Équations électriques et mécaniques de la MADA :

##### 4.4.1 Équations des tensions :

Les équations électriques de la MADA s'écrivent sous la forme suivante [31] [34] :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Où  $R_s$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

##### 4.4.2 Équations des Flux :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (4.2)$$

Avec :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}; L_{rr} = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

Où  $L_s$  et  $L_r$  représentent respectivement les inductances propres des enroulements statoriques et rotoriques.

Où  $M_s$  et  $M_r$  représentent respectivement les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}]$  Représente la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor et donne par :

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

Avec :

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  Ce sont des inductance mutuelle stator-rotor.

$M_{max}$  Est la mutuelle max entre la phase statorique et la phase rotorique.

En remplaçant l'équation (4.2) dans l'équation (4.1), on obtient le système d'équations suivant, qui décrit le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]] \end{cases} \quad (4.3)$$

#### 4.4.3 Équation mécanique:

L'expression du couple électromagnétique de la machine est donnée par l'équation suivante [28, 35]:

$$C_{em} = p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} L(M_{sr}) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

D'autre part, l'équation de mouvement est la suivante :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (4.5)$$

Avec

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine.

$C_r$  : Le couple résistant.

$f_r$  : Le coefficient de frottement visqueux de la machine.

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'axe de la machine.

$J$  : L'inertie des parties tournantes.

#### 4.5 La transformation de Park

La machine asynchrone a des équations compliquées dans le repère  $abc$  parce que les inductances changent même si la vitesse est stable. La transformation de Park sert à passer du repère  $abc$  à un repère  $dq0$ , ce qui rend les équations plus simples. Ce changement permet d'enlever les variations des inductances avec le temps et de rendre la matrice d'impédance  $L_m$  indépendante de la vitesse du rotor.

Cette transformation permet de choisir l'orientation du repère  $dq0$  comme on veut. On peut l'orienter par rapport au stator, au rotor ou au champ tournant [36].

La figure 4-2 illustre comment les tensions, courants ou flux dans le repère triphasé  $abc$  sont transformés dans le repère  $dq0$ , ce qui permet de simplifier l'analyse de la machine asynchrone.

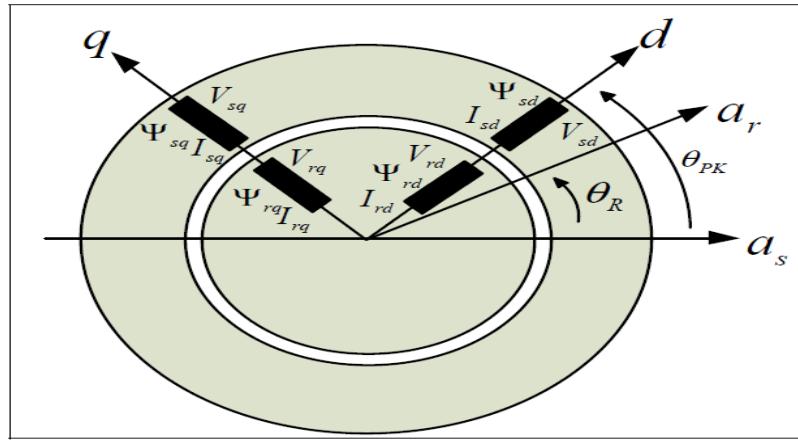


Figure 4-2 Schéma de la transformation de Park [36].

La matrice définissant la transformation de Park est la suivante[37] [13]:

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Pour repasser au repère triphasé  $abc$ , on applique l'inverse de la transformation de Park, donnée par la matrice inverse suivante :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

L'angle  $\theta_s$  est celui utilisé pour la transformation de Park des grandeurs statoriques, tandis que  $\theta_r$  est celui utilisé pour les grandeurs rotoriques. La transformation de Park permet de relier ces deux angles avec la relation suivante[38] [19]:

$$\theta_r = \theta_s - \theta_{sr} \quad (4.8)$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \omega_r = \omega_s - \omega_{sr} \\ \omega_{sr} = \frac{d\theta_{sr}}{dt} \end{cases} \quad (4.9)$$

#### 4.5.1 Équations des tensions :

En appliquant la transformation de Park à l'équation (4.1) et puis en multipliant par  $[P(\theta_s)]$  du côté stator et par  $[P(\theta_s - \theta_{sr})]$  du côté rotor, on obtient, après simplification, le résultat suivant [2] [14, 39]:

$$\begin{cases} [V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] [\varphi_{sdq}] \\ [V_{rdq}] = [R_r] \cdot [I_{rdq}] + [P(\theta_s - \theta_{sr})] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s - \theta_{sr})] [\varphi_{rdq}] \end{cases} \quad (4.10)$$

Étant donné que :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta_s - \theta_{sr})] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s - \theta_{sr})] = \frac{d(\theta_s - \theta_{sr})}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Nous pouvons écrire

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Et :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega_{sr}) \\ (\omega_s - \omega_{sr}) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  Sont les composantes des flux statoriques et rotoriques dans le repère  $dq$

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$ , composantes des tensions statoriques et rotoriques dans le repère  $dq$ .

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$ , composantes des courants statoriques et rotoriques dans le repère  $dq$ .

$L_s, L_r$  et  $L_m$ , respectivement les inductances du stator, du rotor et d'induction mutuelle.

$\omega_s$  La pulsation statorique.

$\omega_r$  La pulsation rotorique.

$\omega_{sr}$  ou  $\omega_m$  La pulsation mécanique.

#### 4.5.2 Équations des flux :

En appliquant la transformation de Park à l'équation (4.2), l'équation des flux devient

$$\begin{aligned} [\varphi_{sdq}] &= [P(\theta_s)][L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)][I_{sdq}] + [R_s][I_{sdq}] + \\ &[P(\theta_s)][L_{rs}][P^{-1}(\theta_s)][I_{rdq}] \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} [\varphi_{rdq}] &= [P(\theta_r)][L_{rr}][P^{-1}(\theta_r)][I_{rdq}] + [R_r][I_{rdq}] + \\ &\quad [P(\theta_r)][L_{sr}][P^{-1}(\theta_r)][I_{rdq}] \quad (5.14) \end{aligned}$$

Les expressions des flux (4.13) et (4.14) deviennent alors [29] :

L'expression des flux statoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

L'expression des flux rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = I_s - M_s \\ L_r = I_r - M_r \\ L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (4.17)$$

En exploitant les équations (4.11) et (4.12) pour les grandeurs statoriques et rotoriques, avec les flux exprimés par les équations (4.15) et (4.16), on obtient la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega_{sr}) L_m & R_r & -(\omega_s - \omega_{sr}) L_r \\ (\omega_s - \omega_{sr}) L_m & 0 & (\omega_s - \omega_{sr}) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Donc on peut écrire :

$$[V] = [A][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] \quad (4.19)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 [V] &= \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \\
 [A] &= \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega_{sr}) L_m & R_r & -(\omega_s - \omega_{sr}) L_r \\ (\omega_s - \omega_{sr}) L_m & 0 & (\omega_s - \omega_{sr}) L_r & R_r \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

#### 4.5.3 Équations de couple électromagnétique :

D'après les équations (4.19) nous peuvent écrire la puissance électromagnétique instantanée sous forme [2] [29].

$$\begin{aligned}
 [P_{em}] &= [(V_{as}I_{as} + V_{bs}I_{bs} + V_{cs}I_{cs})] + [(V_{ar}I_{ar} + V_{br}I_{br} + V_{cr}I_{cr})] \\
 &= [V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq}] + [V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq}]
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

En remplaçant les tensions par leurs valeurs dans l'équation (4.20) et après simplification, on obtient l'équation suivante.

$$[P_{em}] = \omega_s(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) + (\omega_s - \omega_{sr})(\varphi_{rd}I_{rq} - \varphi_{rq}I_{rd}) \tag{4.21}$$

En utilisant les expressions des flux (4.15) et (4.16), on constate que :

$$(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) = -(\varphi_{rd}I_{rq} - \varphi_{rq}I_{rd})$$

D'un autre côté :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

D'où :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd})$$

$$\begin{aligned}
&= p \cdot L_m (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \\
&= p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \\
&= -p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq})
\end{aligned} \tag{4.22}$$

#### 4.6 Sélection du Référentiel Adapté pour la Modélisation de la MADA

Dans la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), trois choix de référentiels sont possibles, chacun étant adapté en fonction des objectifs spécifiques de l'application envisagée [2].

- **Référentiel lié au rotor**

Ce référentiel est particulièrement adapté à l'analyse des régimes transitoires, dans lesquels la vitesse de rotation du rotor est supposée constante. Il est défini par la relation suivante :

$$\omega_r = 0 \Rightarrow \omega_s = \omega_{sr} = \frac{d\theta_{sr}}{dt}$$

- **Référentiel lié au stator**

Dans ce repère, les grandeurs de la machine sont exprimées par rapport au stator, ce qui leur confère des caractéristiques similaires à celles du réseau électrique. Ce référentiel, souvent appelé *référentiel stationnaire*, est défini par la relation suivante :

$$\omega_s = 0 \Rightarrow \omega_r = -\omega_{sr} = -\frac{d\theta_{sr}}{dt}$$

- **Référentiel lié au champ tournant :**

Bien qu'il n'allège pas les équations de la machine, ce référentiel reste pertinent pour notre étude, puisqu'il est centré sur la dynamique du champ tournant.

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \Rightarrow \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_{sr} = g\omega_s$$

Avec :  $g$  étant la vitesse de glissement.

L'équation (4.18) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -g\omega_s L_m & R_r & -g\omega_s L_r \\ g\omega_s L_m & 0 & g\omega_s L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

#### 4.7 Résultats de simulation :

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation d'une MADA de 300 kW.

La machine est entraînée à une vitesse de 1500 tr/min et alimentée directement par deux sources de tension triphasées idéales :

- La première source alimente le stator avec une tension de fréquence 50 Hz et d'amplitude  $V_s = 398\sqrt{2}\text{V}$ .

- La seconde source alimente le rotor avec une tension d'amplitude  $V_r = 22V$  et de fréquence égale à la fréquence rotorique  $g\omega_s$ .

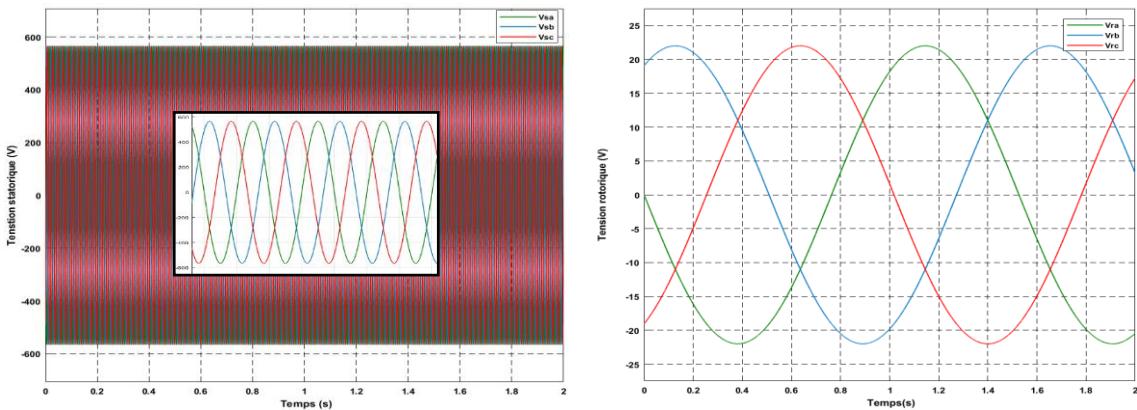


Figure 4-3 Les tensions statoriques et rotoriques d'alimentations.

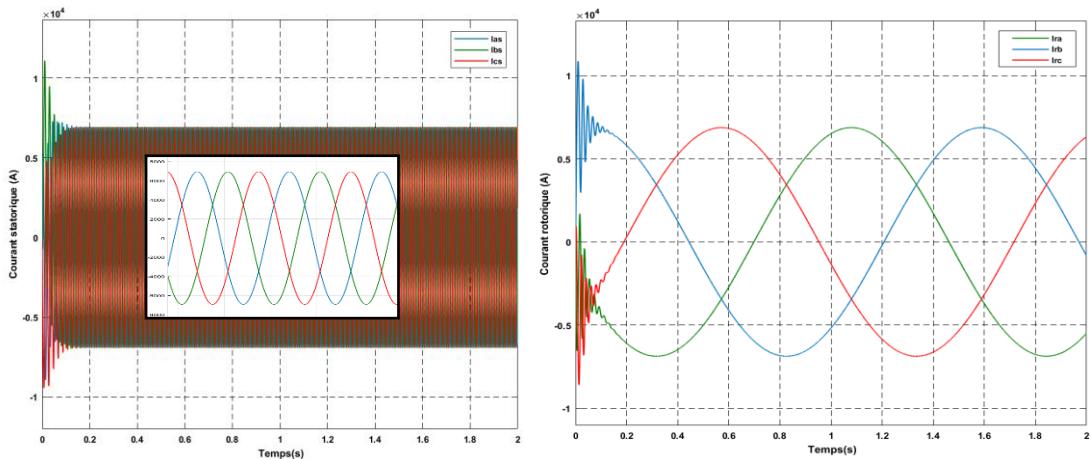


Figure 4-4 Les courants statoriques et rotoriques de la MADA.

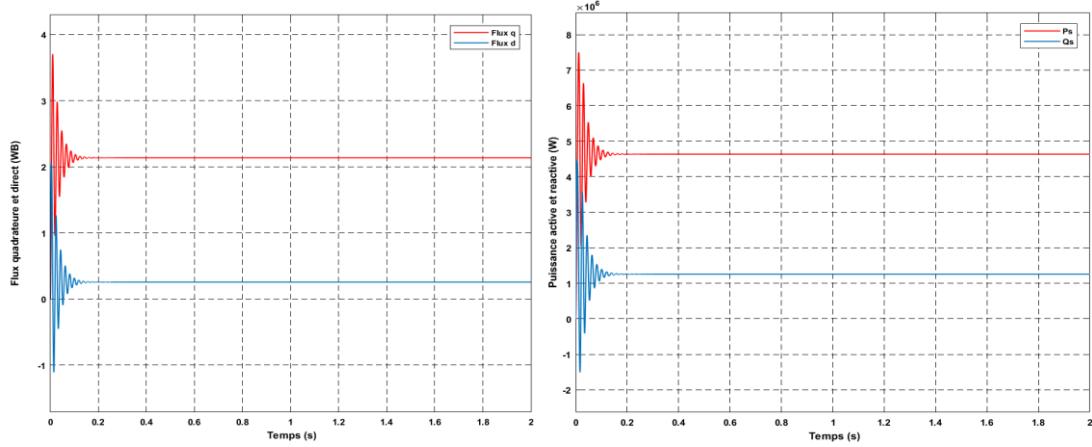


Figure 4-5 Les flux quadrature et direct, et les puissance active et réactive.

#### 4.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en tenant compte des différentes équations électriques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. L'objectif était de décrire avec précision le comportement dynamique de la MADA dans des conditions de fonctionnement réalistes, sans introduire de stratégie de commande externe.

Ce chapitre ouvre la voie à des analyses plus approfondies dans les chapitres suivants. Les résultats obtenus confirment la robustesse du modèle développé et permettent d'envisager, dans les prochaines étapes, l'intégration d'une commande vectorielle directe et indirecte pour optimiser les performances de la machine.

## **CHAPITRE 5 - COMMANDE DES PUISSANCES ACTIVES ET RÉACTIVES DE LA MADA**

### **5.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de deux stratégies de commande vectorielle en puissance appliquées à la machine asynchrone à double alimentation (MADA), la commande directe et la commande indirecte en boucle fermée. Ces techniques sont largement utilisées dans le domaine des systèmes de conversion d'énergie, notamment pour leur capacité à contrôler indépendamment la puissance active et réactive.

L'objectif est d'analyser le comportement de la MADA en utilisant ces deux approches de commande vectorielle, tout en intégrant un onduleur côté réseau. L'étude vise à évaluer les performances de la machine dans différentes conditions de fonctionnement. Pour assurer une comparaison équitable entre les deux stratégies, les simulations ont été effectuées avec les mêmes profils d'échelons de puissance.

Enfin, des essais de robustesse seront effectués en faisant varier certains paramètres de la machine, tels que les résistances et les inductances, afin d'examiner la sensibilité de chaque commande aux variations des conditions réelles de fonctionnement.

### **5.2 Principe fondamental de la commande vectorielle de la MADA**

L'objectif de la commande vectorielle est de contrôler la machine asynchrone de manière similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante, où il existe

un découplage naturel entre la grandeur qui commande le flux, à savoir le courant d'excitation, et celle qui est liée au couple, à savoir le courant d'induit. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide en termes de couple [40].

Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'une des équations du couple électromagnétique est donnée par[29] :

$$C_{em} = -p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad (5.1)$$

### 5.3 Sélection du référentiel pour la modélisation en repère diphasé.

Comme cela a été abordé précédemment, l'analyse se fait dans le référentiel d-q choisi ici comme étant lié au champ tournant produit par le stator. En considérant que le flux statorique  $\varphi_s$  est aligné avec l'axe d, l'expression devient [29]:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s, \varphi_{sq} = 0 \quad (5.2)$$

Donc l'équation de couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{L_r} \varphi_{sd} I_{rq} \quad (5.3)$$

En rappelant le système d'équations différentielles que l'on a vue dans le chapitre 4 (4.10) et (4.11) qui décrit le comportement de la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - g \omega_s \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + g \omega_s \varphi_{rd} \end{cases} \quad (5.4)$$

Avec le vecteur flux statorique  $\varphi_s$  est aligné avec l'axe d :  $\varphi_{sd} = \varphi_s, \varphi_{sq} = 0$  ces équations deviennent plus simples et s'écrivent comme suit [41] [31] [29]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - g \omega_s \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + g \omega_s \varphi_{rd} \end{cases} \quad (5.5)$$

Si la résistance statorique par phase  $R_s$  est supposée négligeable, le vecteur de la tension statorique présente alors une avance de quadrature par rapport au vecteur de flux statorique et on peut écrire [42] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - g \omega_s \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + g \omega_s \varphi_{rd} \end{cases} \quad (5.6)$$

De la même façon pour les flux et l'on trouve [39] :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (5.7)$$

En se basant sur les équations (5.6) et (5.7), il est possible de réécrire l'expression du couple électromagnétique de façon explicite, comme suit :

$$C_{em} = -p \frac{L_m V_s}{L_r \omega_s} I_{rq} \quad (5.8)$$

À partir de l'équation des flux (5.7), les relations reliant les courants statoriques aux courants rotoriques peuvent être formulées comme suit [29] :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{sq} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (5.9)$$

#### 5.4 Établissement des relations entre les puissances statoriques et les courants rotoriques

Les expressions des puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone, formulées dans un repère diphasé quelconque, sont données par les relations suivantes [29]:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (5.10)$$

Avec l'hypothèse simplificatrice introduite dans équations (5.6)  $V_{sd} = 0$  les équations de la puissance active et réactive s'expriment alors comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (5.11)$$

L'insertion de l'équation (5.9) dans l'équation (5.11) conduit à :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (5.12)$$

La substitution de  $\varphi_s$  selon (5.6), permet d'écrire :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (5.13)$$

En tenant compte du repère adopté ainsi que des hypothèses simplificatrices, et en supposant que l'inductance de magnétisation  $L_m$  est constante, le modèle obtenu établit un lien entre la puissance active et le courant rotorique selon l'axe  $q$  ainsi qu'entre la puissance réactive et le courant rotorique selon l'axe  $d$ , avec une valeur proche de  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  imposée par le réseau [29].

## 5.5 Établissement des relations entre les tensions et les courants rotoriques

En substituant les expressions des flux rotoriques dans les équations (5.7), on arrive aux relations suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (5.14)$$

En injectant les expressions des flux rotoriques tirées des équations (5.13) dans les équations de tension rotorique (5.5), on obtient de nouvelles expressions

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (5.15)$$

Où  $g$  désigne le glissement de la machine asynchrone, calculé selon : [42] :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (5.16)$$

À partir des équations (5.13) et (5.14), on peut représenter le schéma de commande des puissances active et réactive.

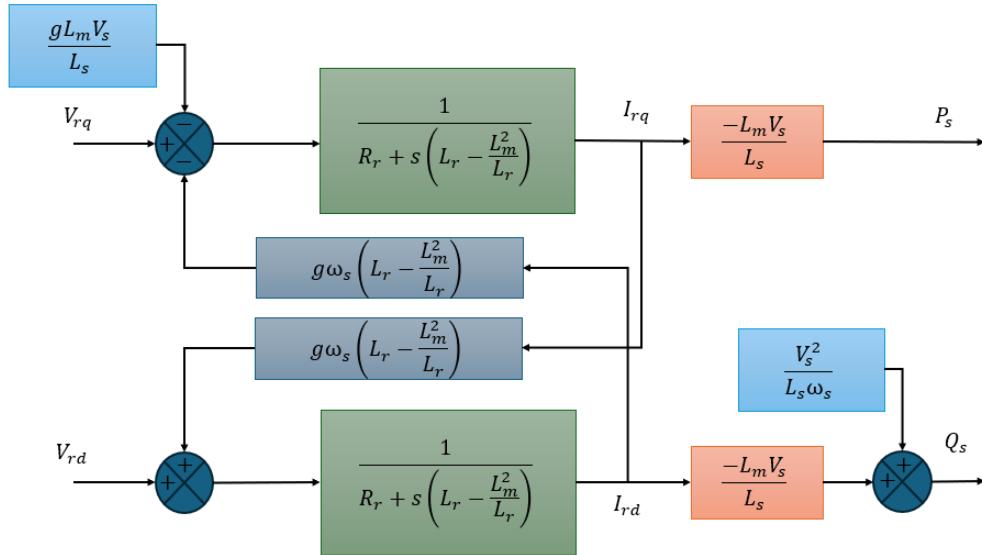


Figure 5-1 Schéma fonctionnel simplifié de la MADA utilisé pour le contrôle des puissances  $P_s$  et  $Q_s$  [39].

Dans la figure 5.1, on remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert de premier ordre. Par ailleurs, la faible valeur du glissement  $g$  facilite l'implémentation de la commande vectorielle, les effets de couplage étant relativement faibles.

La commande en puissance de cette machine peut être réalisée selon deux stratégies principales : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte. [30].

## 5.6 Commande des puissances actives et réactives

### 5.6.1 Commande directe des puissances

En régime permanent, les termes contenant les dérivées des courants rotoriques diphasés s'annulent. Nous pouvons donc écrire l'équation (5.14) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (5.17)$$

L'analyse de l'équation (5.16) permet de constater que les composantes diphasées des tensions  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont nécessaires pour piloter les courants rotoriques. Les interactions entre les axes direct et quadrature influencent également le comportement de la commande, de la forme  $\left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)$  qui reste généralement faible. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permet de compenser ces termes de couplage [29].

En revanche, le terme  $g \frac{L_m V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence est significative, car elle introduit une erreur de traînage.

Le contrôle du système devra donc être conçu de manière à compenser cette erreur pour assurer un fonctionnement optimal de la machine, donc en peut commander d'une manière directe et indépendante les axes  $d$  et  $q$  chacun via son propre régulateur (figure 5.2).

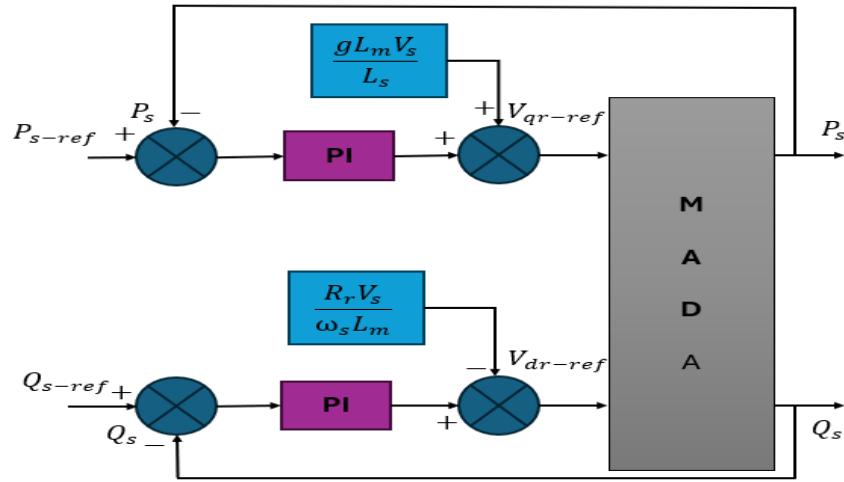


Figure 5-2 Diagramme fonctionnel de la commande directe de la machine asynchrone à double alimentation.

### 5.6.2 Commande indirecte en boucle fermée des puissances

Dans cette approche, le découplage est effectué à la sortie des régulateurs de courant rotorique à l'aide d'un retour d'état du système. Cela permet un réglage précis des puissances. La stratégie adoptée repose sur une commande en cascade, où chaque axe dispose d'une régulation de la puissance et du courant rotorique. Cette structure permet de contrôler séparément les composantes  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  ainsi que les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$ , le tout en boucle fermée [43].

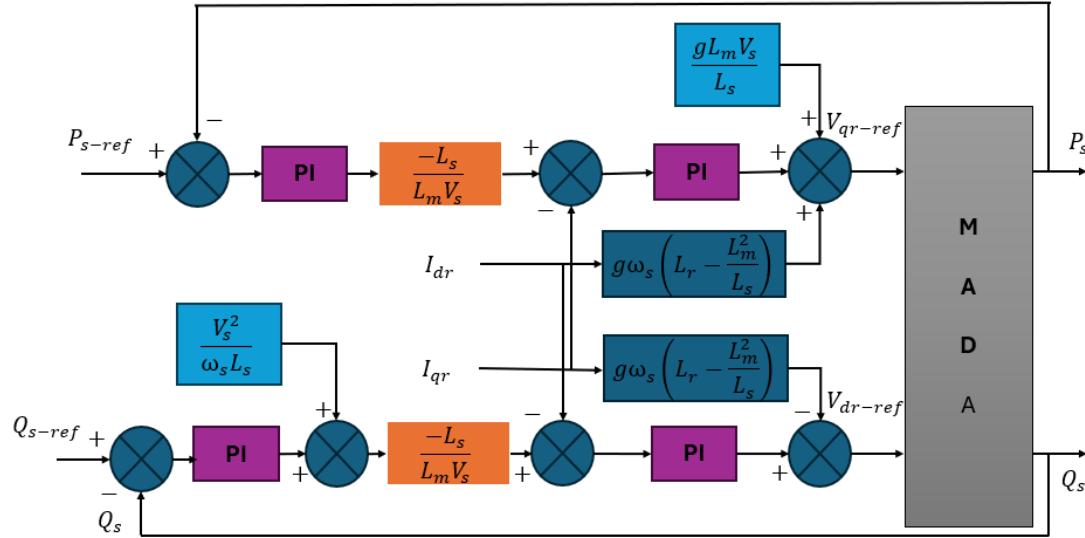


Figure 5-3 Schéma bloc de la commande vectorielle indirekte en boucle fermée appliquée à la MADA.

### 5.6.3 Établissement des angles pour des transformations

Pour déterminer l'angle de transformation de Park  $\theta_{sr}$  associé aux grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à mesurer les tensions statoriques, à les projeter dans un repère diphasé, puis à extraire la phase  $\theta_s$  que forme le vecteur tension avec l'axe de la première phase statorique. Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe  $d$ , il suffit alors de retrancher  $\frac{\pi}{2}$  à cet angle. Cette approche est fiable à condition que les tensions statoriques soient stables en fréquence, avec peu de fluctuations, pour assurer une mesure précise. Le rotor forme un angle  $\theta_m$  avec la phase  $A$  du stator. Ainsi, l'angle  $\theta_r$  requis pour effectuer les transformations des grandeurs rotoriques, est donné par  $\theta_{sr} - \theta_m$ . La détermination de ces angles repose sur la mesure des tensions statoriques ainsi qu'un capteur de vitesse sont indispensables [29].

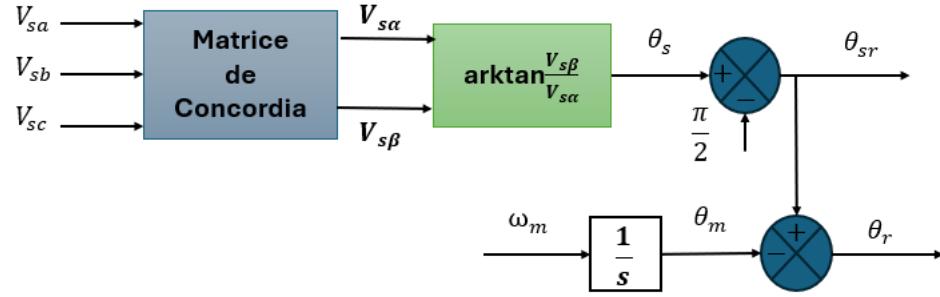


Figure 5-4 Établissement des angles pour de transformations Park [29].

#### 5.6.4 Synthèse des régulateurs PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour contrôler la MADA en mode génératrice, est facile et rapide à mettre en œuvre, tout en offrant des performances satisfaisantes [30]. C'est pourquoi nous l'avons choisi pour notre étude globale du système de génération éolien.

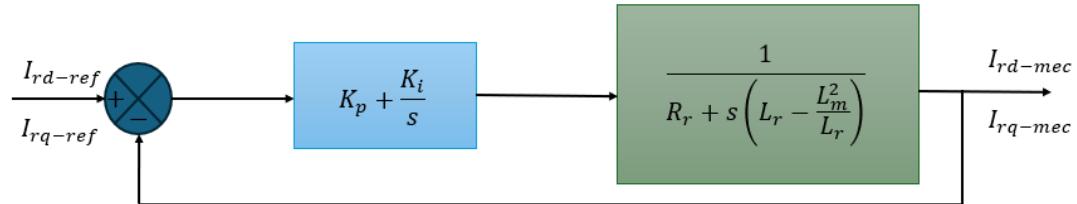


Figure 5-5 Architecture de la boucle de régulation des courants rotoriques.

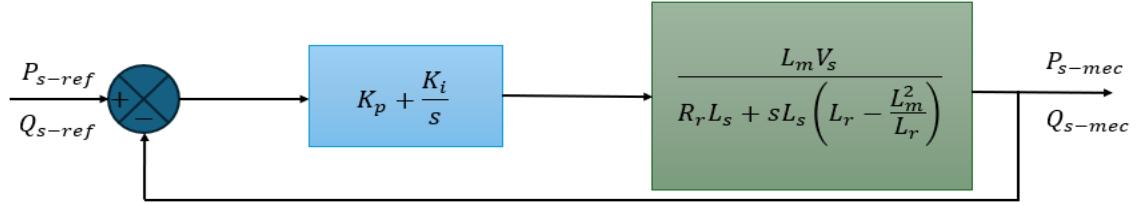


Figure 5-6 Architecture de la boucle de régulation des puissances statoriques.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO), incluant les régulateurs, s'exprime comme suit [30] :

$$FTBO = \left( \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{L_s \left( L_r - \frac{L_m}{L_s} \right)}}{s + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{L_m}{L_s} \right)}} \right) \quad (5.18)$$

La méthode de compensation des pôles est utilisée pour la synthèse du régulateur, dans le but de supprimer le zéro de la fonction de transfert. Cela nous amène à l'égalité suivante :

$$\left( \frac{K_i}{K_p} \right) = \left( \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{L_m}{L_s} \right)} \right) \quad (5.19)$$

Il faut noter que la compensation des pôles n'est réellement efficace que lorsque les paramètres de la machine sont correctement identifiés, puisque les gains en sont directement issus.  $K_i$ ,  $K_p$  dépendent directement de ces paramètres. En cas de divergence entre les paramètres réels et ceux utilisés pour la synthèse, la compensation perd de son

efficacité. Lorsque les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit alors :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{L_m V_s}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{s} \quad (5.20)$$

Ce qui donne, en boucle fermée, l'expression suivante :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r s} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m V_s} \quad (5.21)$$

Le terme  $\tau_r$  désigne ici la constante de temps du système. Il est désormais possible d'exprimer les gains  $K_i$  et  $K_p$  des correcteurs en fonction des paramètres de la machine ainsi que du temps de réponse souhaité.

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m V_s}, \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{L_m V_s} \quad (5.22)$$

### 5.7 Modélisation de l'alimentation côté rotor de la MADA

Dans cette section, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur côté machine (CCM). Ce dernier intervient particulièrement lors du fonctionnement en mode génératrice de la MADA, c'est-à-dire lorsque l'éolienne fournit de l'énergie au réseau électrique. Dans ce cas, le CCM opère en tant qu'onduleur. Il occupe une place centrale dans l'architecture du système d'alimentation, car il assure le transfert efficace de l'énergie entre la machine et le réseau [44].

### 5.7.1 Modèle de l'onduleur :

Le rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux, constitué de dispositifs semi-conducteurs commandés aussi bien à l'ouverture qu'à la fermeture. Cet onduleur comprend six interrupteurs électroniques, que nous considérerons comme parfaits dans le cadre de cette étude.

Il peut être défini à l'aide de trois grandeurs de commande booléennes, correspondant respectivement aux signaux de commande des trois bras de l'onduleur  $S_f$  ( $f = a, b, c$ ) [31] [19].

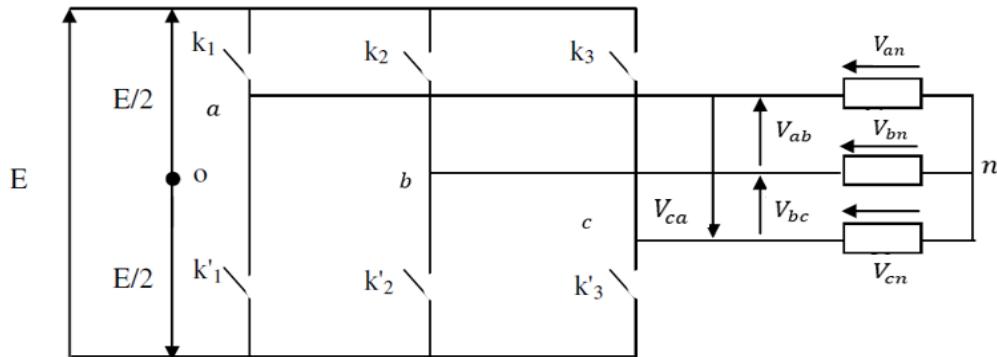


Figure 5-7 Onduleur de tension à deux niveaux [45].

- Lorsque  $S_f = 1$ , cela correspond à la position où l'interrupteur situé en haut est fermé, tandis que celui du bas est ouvert.
- Lorsque  $S_f = 0$ , cela correspond à la position où l'interrupteur situé en haut est ouvert, tandis que celui du bas est fermé.

Dans ces conditions, il est possible d'exprimer les tensions  $V_{fn}^{abc}$  en fonction des signaux de commande  $S_f$  qui définissent l'état des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (5.23)$$

Soit n le point neutre du côté rotor de la MADA donc on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (5.24)$$

À l'équilibre des tensions, il en résulte que la somme des tensions de phase par rapport au point neutre est nulle, soit :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (5.25)$$

À partir des équations (5.24) et (5.25), on obtient l'expression suivante :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (5.26)$$

En remplaçant l'équation (5.26) dans l'équation (5.24), on obtient l'expression suivante :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (5.27)$$

L'utilisation de l'expression (5.27) permet d'établir les équations instantanées des tensions de phase (ou tensions simples) en fonction des grandeurs de commande de l'onduleur [45].

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Soient  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  les tensions d'entrée de l'onduleur, et  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  les tensions de sortie de cet onduleur. Le fonctionnement de l'onduleur peut être modélisé à l'aide d'une matrice de transfert  $A$ , telle que :

$$A = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

### 5.7.2 Commande par MLI :

Les techniques appelées Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) sont utilisées pour commander les convertisseurs statiques. Ces méthodes de commande tirent parti des capacités de commutation à haute fréquence des composants électroniques. Grâce à cela, on peut injecter dans la MADA des courants avec une faible distorsion harmonique. Cela facilite le filtrage et permet d'utiliser des filtres de plus petite taille. Finalement, cela permet de produire une énergie de meilleure qualité [19].

Cette technique consiste à transformer une tension de référence (appelée modulante), généralement sinusoïdale et issue du niveau commande, en une tension en créneaux successifs produite à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Sur le plan électronique,

le principe repose sur la comparaison entre la modulante et une porteuse, qui est une tension de commutation à haute fréquence.

Le rapport entre la fréquence de la porteuse (souvent triangulaire ou en dents de scie) et celle de la modulante représente un compromis. En effet, un bon choix de ce rapport permet à la fois de réduire efficacement les harmoniques indésirables et de garantir un bon rendement de l'onduleur [45].

Il existe plusieurs techniques de modulation, parmi lesquelles on retrouve, la modulation naturelle, la modulation optimisée (visant à éliminer certaines harmoniques), la modulation vectorielle, et la modulation à bande d'hystérésis. Dans le cadre de notre travail, nous avons choisi d'utiliser la technique de MLI naturelle, qui repose sur la comparaison entre deux signaux figure 5-8.

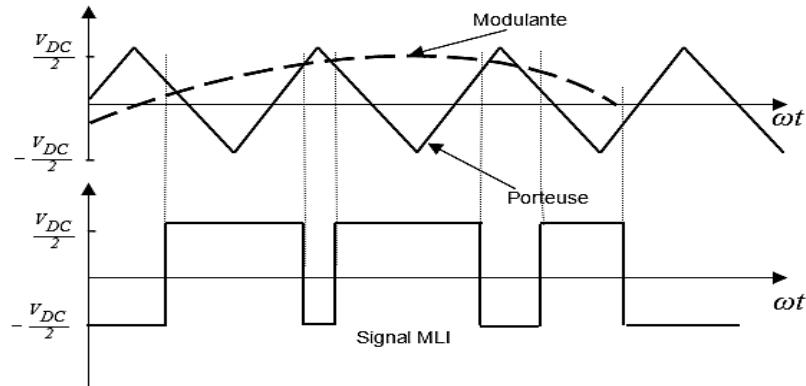


Figure 5-8 Principe de commande en MLI *triangulosinusoidale* [45].

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres principaux :

- L'indice de modulation en fréquence  $m_f$  qui définit le rapport entre la fréquence de la porteuse  $f_p$  et celle du signal de référence  $f_r$  soit :

$$m_f = \frac{f_p}{f_r} \quad (5.30)$$

- Le taux de modulation  $r$  (aussi appelé indice de modulation en amplitude ou rapport cyclique), représente le rapport entre l'amplitude de la modulante  $V_r$  et la valeur crête de la porteuse  $V_p$  soit :

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (5.31)$$

## 5.8 Résultats de simulation

Pour étudier le fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) de  $300kW$ , une simulation a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats ont été obtenus en appliquant des lois de commande sur la puissance active et réactive pour les deux commande directe et indirecte. Le modèle utilisé repose sur les équations dérivées de la transformation de Park, exprimées dans le référentiel lié au champ tournant. Ce champ tourne à vitesse constante, tandis que le rotor est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux.

La machine est entraînée à une vitesse fixe de  $1500 \text{ tr}/\text{min}$  et est connectée au réseau avec une tension sinusoïdale parfaite de  $398V$ . Afin d'évaluer les performances de la commande, des échelons de puissance active et réactive sont appliqués, tout en maintenant la vitesse constante. Le premier échelon concerne la puissance active, avec une variation de  $-24 \text{ kW}$  appliquée à  $t = 0.5s$ . Ensuite, un échelon de puissance réactive de  $-12kVAR$  à

$t = 1s$ , suivi d'un retour à une puissance réactive nulle  $t = 1.5s$ , Ces variations permettent de suivre la réponse dynamique de la machine et de valider la capacité de la commande à suivre les consignes.

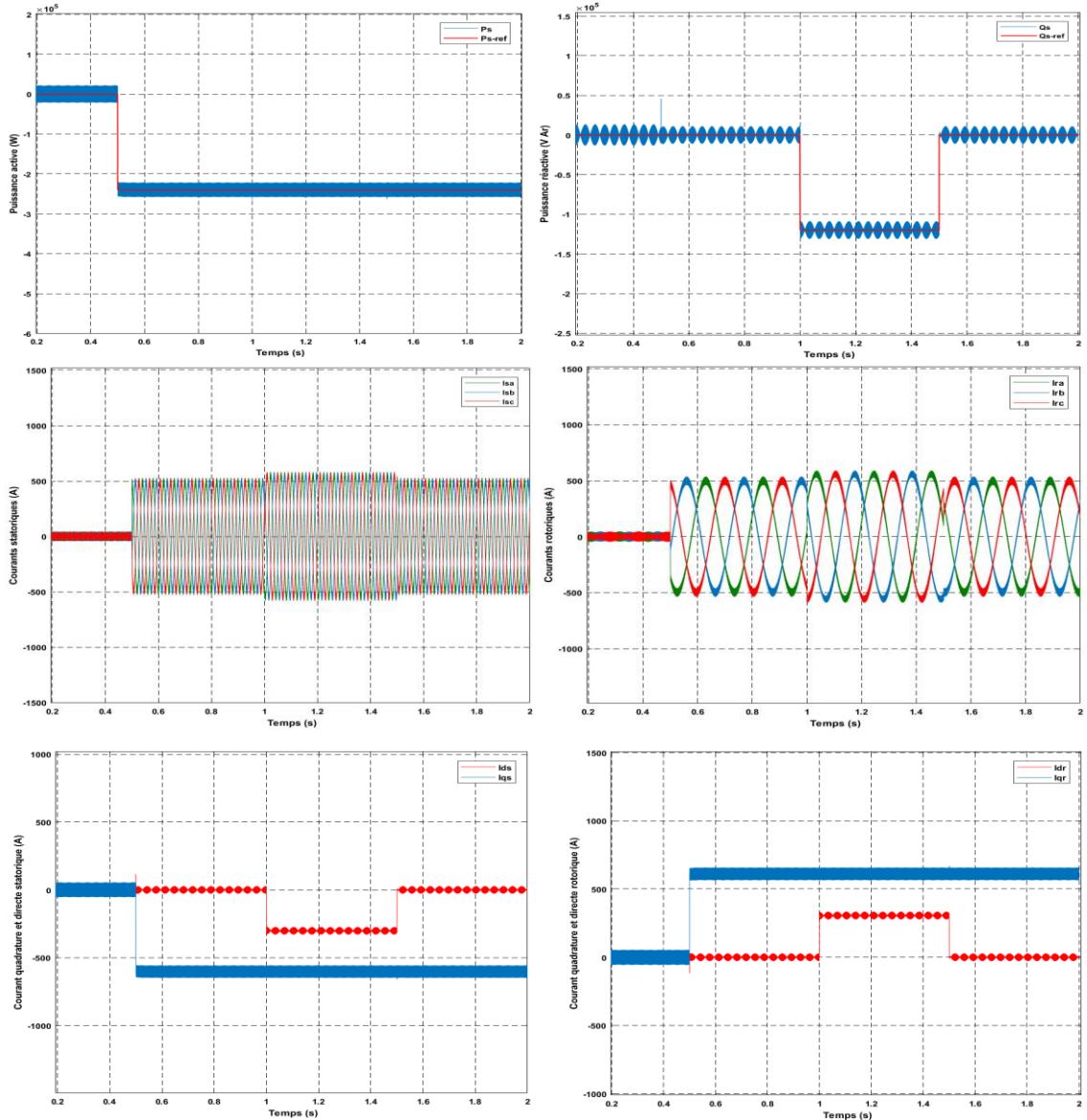


Figure 5-9 La Commande directe en puissances de la MADA.

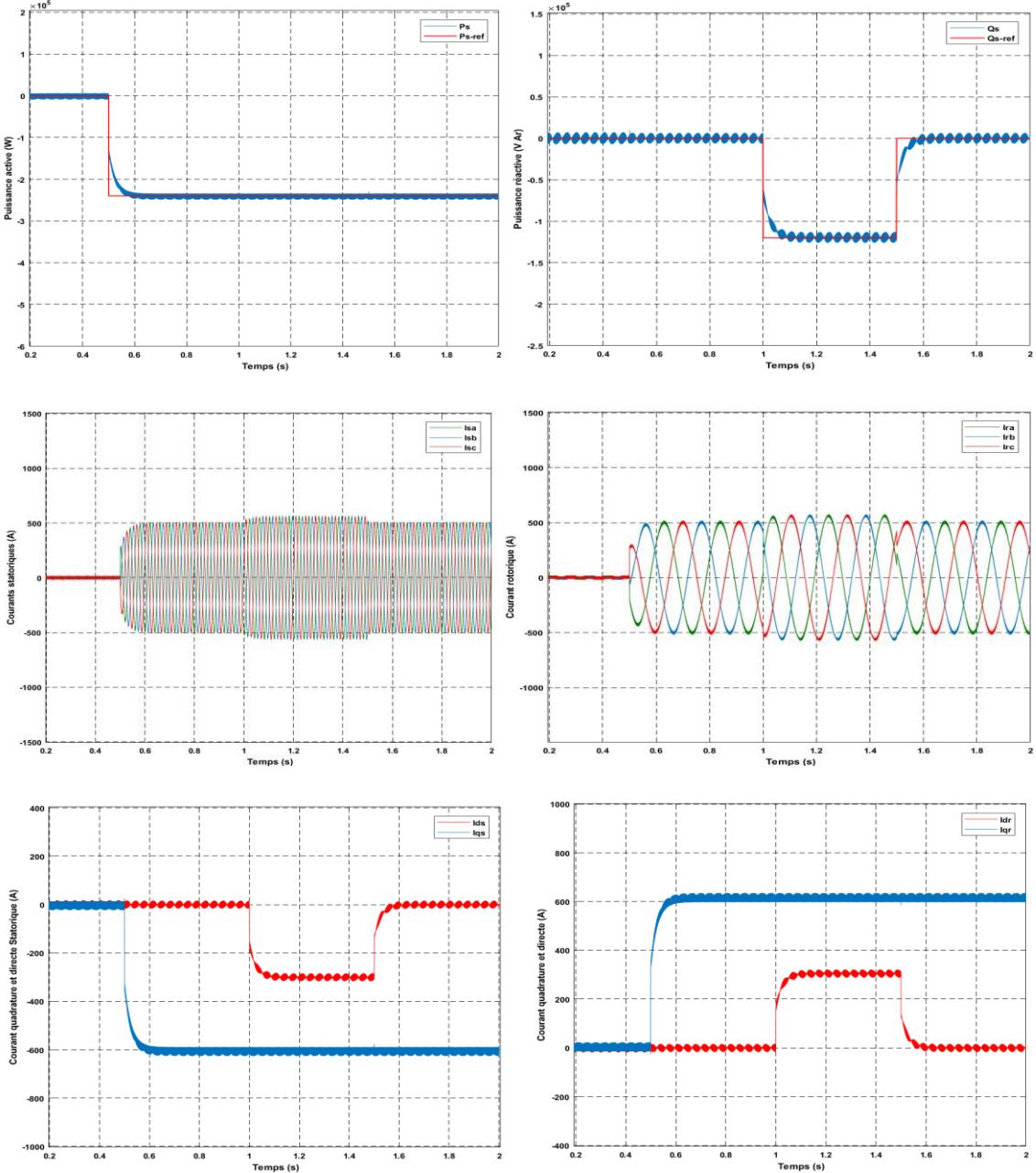


Figure 5-10 La Commande indirecte en boucle fermée en puissances de la MADA.

Les résultats obtenus pour les deux stratégies de commande, directe et indirecte en boucle fermée, démontrent clairement l'efficacité de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En effet, dans les deux cas, les

échelons de puissance ont bien suivi les consignes imposées, confirmant ainsi la performance et la précision des régulateurs PI mis en œuvre. De plus, les fluctuations de puissance ont été efficacement compensées. Ces résultats valident donc l'intérêt de la commande vectorielle, qu'elle soit directe ou indirecte, pour assurer un fonctionnement optimal et stable de la MADA.

### **5.9 Test de robustesse**

Dans le but d'analyser la robustesse des deux types de commande vectorielle (directe et indirecte boucle fermée), nous avons choisi de faire varier certains paramètres de la machine. En effet, lors de la conception des régulateurs, les paramètres de la machine sont supposés constants. Cependant, dans la réalité, ces paramètres peuvent changer en raison de divers phénomènes physiques, tels que l'échauffement des enroulements, la saturation des inductances ou encore la saturation des circuits magnétiques. Pour cette étude, deux essais ont été réalisés, pour cette analyse, nous avons conservé les mêmes conditions de simulation que celles utilisées précédemment, en particulier les mêmes échelons de puissance :

- Premier essai : Échauffement des résistances

Afin de simuler l'échauffement des enroulements statoriques et rotoriques, les valeurs des résistances ont été augmentées de 60 %.

- Le deuxième essai : Saturation magnétique

Pour reproduire un effet de saturation des circuits magnétiques, les inductances ont été diminuées de 40 %.

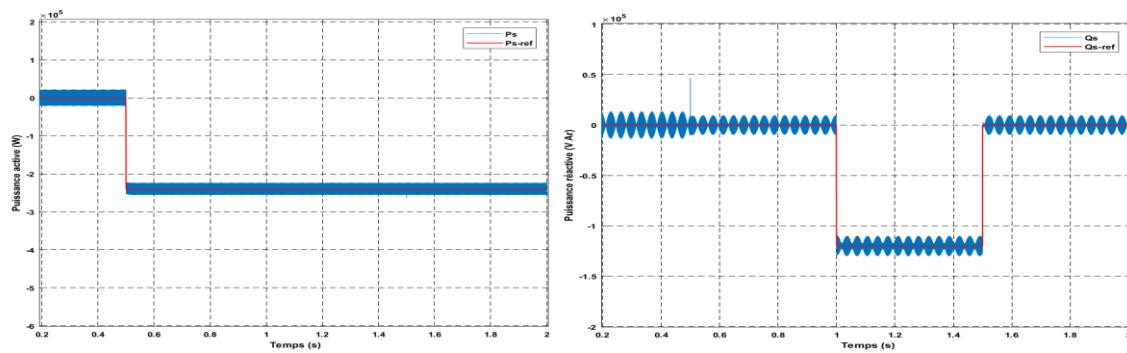


Figure 5-11 Commande directe des puissance active et réactive +60% de  $R_s$  et  $R_r$ .

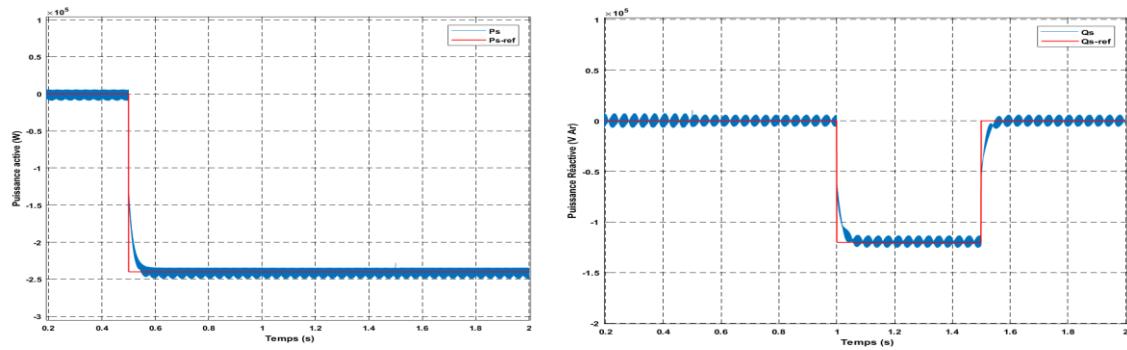


Figure 5-12 Commande indirecte BF des puissance active et réactive +60% de  $R_s$  et  $R_r$ .

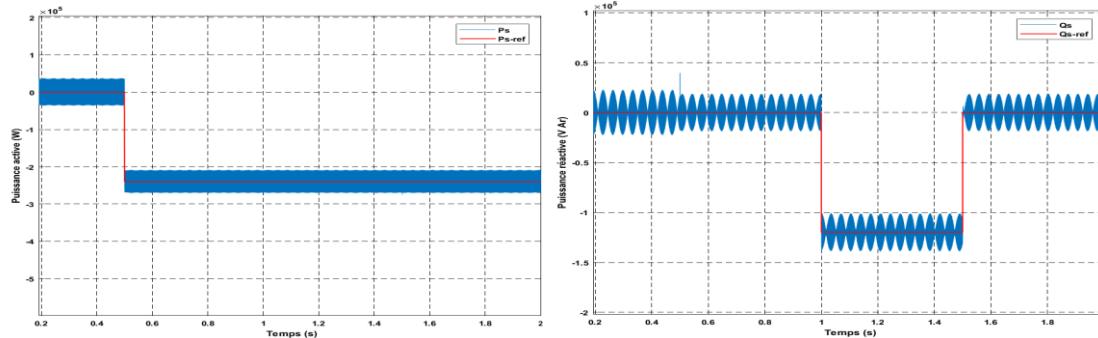


Figure 5-13 Commande directe des puissance active et réactive -40% de  $L_s$ ,  $L_m$  et  $L_r$ .

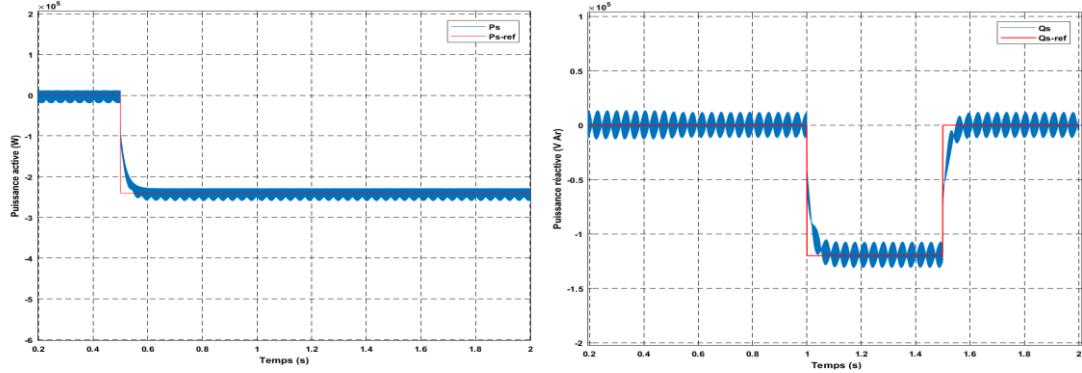


Figure 5-14 Commande indirecte BF des puissances active et réactive -40% de  $L_s$ ,  $L_m$  et  $L_r$ .

D'après les essais de robustesse effectués avec des variations importantes des paramètres de la machine MADA mettent en évidence des différences notables entre les deux stratégies de commande vectorielle.

Dans la commande directe, les résultats montrent une sensibilité accrue aux variations de résistances (+60 % de  $R_s$  et  $R_r$ ) et d'inductances (-40 % de  $L_s$ ,  $L_m$  et  $L_r$ ). En effet, les courbes de puissance active et réactive présentent des oscillations marquées et des temps de stabilisation plus longs. Ces perturbations traduisent une perte de précision du suivi des consignes et une dégradation des performances dynamiques, révélant ainsi une faiblesse de la commande directe face à l'évolution des paramètres du système.

En revanche, la commande indirecte en boucle fermée présente une meilleure capacité d'adaptation. Les courbes obtenues montrent un suivi fidèle des consignes, avec des oscillations réduites et un temps de réponse rapide. Cette stabilité relative, même en présence de fortes variations de  $R_s$  et  $R_r$ ,  $L_s$ ,  $L_m$  et  $L_r$ , démontre une meilleure tolérance aux incertitudes du modèle.

## 5.10 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons développé et analysé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), la commande directe et la commande indirecte en boucle fermée. On a constaté que la commande directe bien que plus simple à mettre en œuvre, n'offre pas les mêmes performances que la commande indirecte, notamment en termes de précision et de stabilité.

Les résultats obtenus dans des conditions nominales ont montré que les deux stratégies assurent un bon suivi des consignes de puissance. Cependant, les tests de robustesse effectués en fin de chapitre, en introduisant des variations importantes sur les paramètres de la machine, ont mis en évidence les limites de la commande directe face aux perturbations. La commande indirecte en boucle fermée a démontré une meilleure stabilité et une plus grande capacité d'adaptation.

Ainsi, dans la suite de notre travail, nous allons nous appuyer sur la commande indirecte en boucle fermée pour la modélisation complète de l'éolienne, dans le but d'assurer un fonctionnement optimal et robuste du système.

## CHAPITRE 6 - COMMANDE ET ASSERVISSMENT DE LA CHAINE ÉOLIENNE À BASE DE MADA

### 6.1 Introduction

Ce chapitre complète l'étude menée des différentes étapes précédemment développées dans ce mémoire, portant sur la modélisation, la commande et l'intégration d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Après une étude approfondie des composantes de la chaîne éolienne, notamment la partie aérodynamique (pales, turbine), la chaîne de transmission mécanique ainsi que le modèle de la machine électrique, deux approches de commande vectorielle (directe et indirecte) ont été étudiées, simulées et comparées.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'architecture globale de la chaîne de conversion éolienne, intégrant l'ensemble des sous-systèmes étudiés, et de détailler le couplage au réseau électrique à l'aide d'un onduleur à deux niveaux, commandé par une modulation SPWM (Sinusoïdal Pulse Width Modulation). L'accent sera mis sur la stratégie de commande adoptée afin d'assurer une injection de puissance efficace, stable et conforme aux exigences du réseau, la modélisation globale constitue une étape essentielle pour valider la cohérence et les performances du système proposé, depuis la captation de l'énergie mécanique par la turbine jusqu'à sa conversion en énergie électrique injectée dans le réseau.

## 6.2 Structure globale du système

Dans cette partie, nous présentons l'architecture générale de la chaîne de conversion éolienne à base de MADA, intégrant tous les sous-systèmes modélisés précédemment. Le système complet se compose de la turbine éolienne, de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), du convertisseur côté rotor, du bus continu, du convertisseur côté réseau, et enfin de l'interface de connexion au réseau électrique.

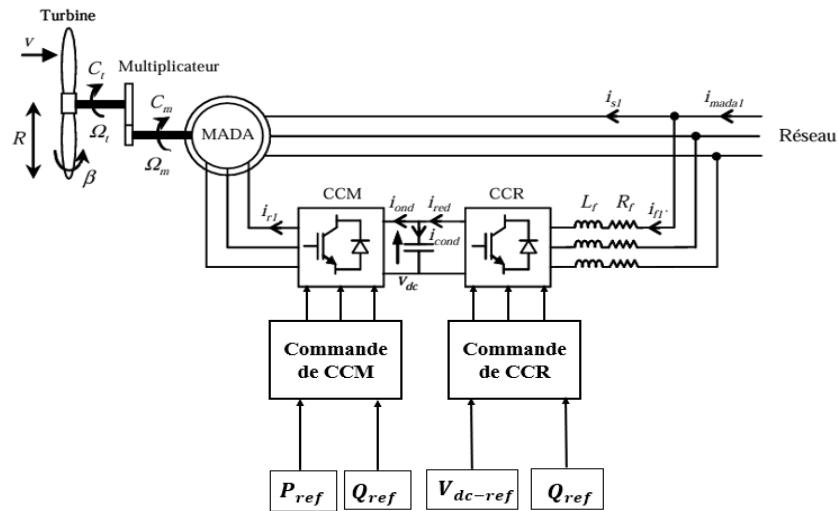


Figure 6-1 Architecture globale d'un système éolien à MADA relié au réseau par un onduleur bipolaire [4].

Le convertisseur rotorique permet de contrôler la puissance échangée entre le rotor et le réseau, tandis que le convertisseur côté réseau assure l'injection de puissance dans le réseau et la régulation de la tension du bus continu [38].

### 6.3 Régulations de la liaison rotor-réseau via le bus continu

#### 6.3.1 Modélisation du filtre

Afin de déterminer les paramètres des régulateurs de courant, il est nécessaire de modéliser la connexion de l'éolienne au réseau électrique. Cette liaison est réalisée à travers un filtre de type RL, comme illustré à la figure (6.2). Ce filtre joue un rôle essentiel en atténuant les harmoniques générés par le convertisseur et en assurant un couplage progressif entre le système éolien et le réseau.

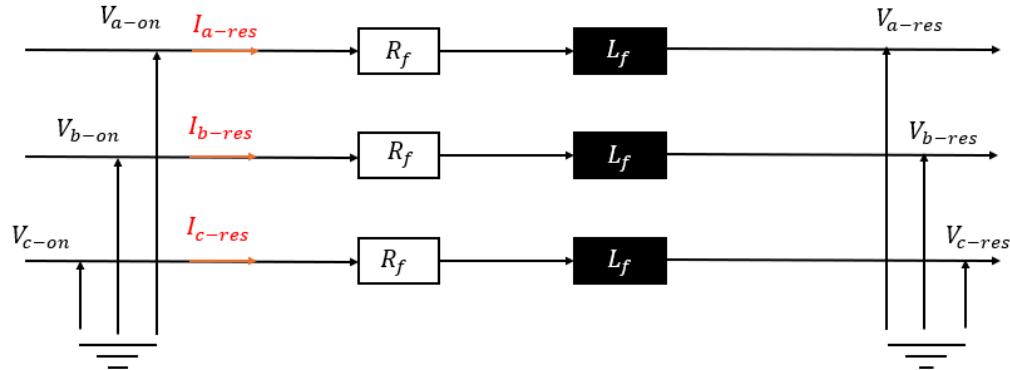


Figure 6-2 Modèle du filtre dans le repère abc [26].

On peut écrire

$$\begin{cases} V_{a-on} = R_f I_{a-res} + L_f \frac{dI_{a-res}}{dt} + V_{a-res} \\ V_{b-on} = R_f I_{b-res} + L_f \frac{dI_{b-res}}{dt} + V_{b-res} \\ V_{c-on} = R_f I_{c-res} + L_f \frac{dI_{c-res}}{dt} + V_{c-res} \end{cases} \quad (6.1)$$

Avec

$V_{a-on}, V_{b-on}$  et  $V_{c-on}$  Tension à la sortie de l'onduleur.

$V_{a-res}$ ,  $V_{b-res}$  et  $V_{c-res}$  Tension de réseau électrique.

$R_f$ ,  $L_f$  Filtre triphasé.

$I_{a-res}$ ,  $I_{b-res}$  et  $I_{c-res}$  Courants injectés au réseau électrique.

En appliquant la transformation de Park en obtient :

$$\begin{cases} V_{d-on} = R_f I_{d-res} + L_f \frac{dI_{d-res}}{dt} - L_f I_{q-res} \omega_{res} + V_{d-res} \\ V_{q-on} = R_f I_{q-res} + L_f \frac{dI_{q-res}}{dt} + L_f I_{d-res} \omega_{res} + V_{q-res} \end{cases} \quad (6.2)$$

Avec la tension aux bornes du filtre et donnée par [2].

$$\begin{bmatrix} V_{bd} \\ V_{bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d-on} - V_{d-res} \\ V_{q-on} - V_{q-res} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

En mettant l'équation (6.2) dans (6.3) donne:

$$\begin{bmatrix} V_{bd} \\ V_{bq} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{d-res} \\ I_{q-res} \end{bmatrix} + L_f \cdot S \begin{bmatrix} I_{d-res} \\ I_{q-res} \end{bmatrix} + L_f \omega_r \begin{bmatrix} -I_{q-res} \\ I_{d-res} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

On pose :

$$\begin{cases} -L_f \omega_r I_{q-res} = E_q \\ L_f \omega_r I_{d-res} = E_d \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{bd} - E_q = V_{d-reg} \\ V_{bq} - E_d = V_{q-reg} \end{cases}$$

On aura :

$$\begin{cases} V_{d-reg} = R_f I_{d-res} + L_f \cdot S \cdot I_{d-res} \\ V_{q-reg} = R_f I_{q-res} + L_f \cdot S \cdot I_{q-res} \end{cases} \quad (6.5)$$

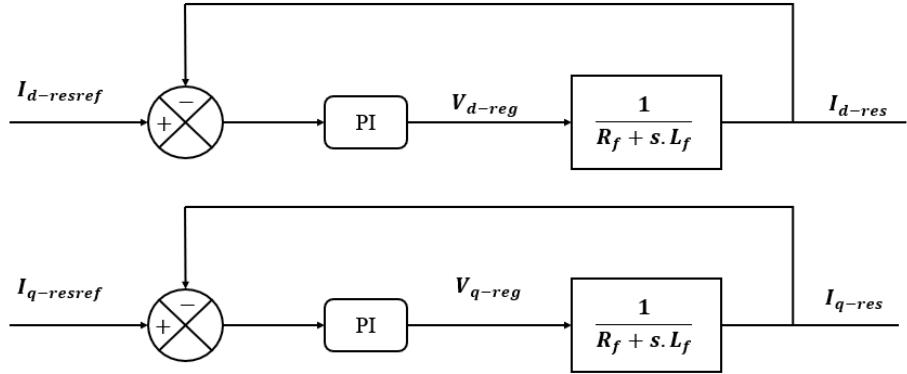


Figure 6-3 Représentation en blocs de la régulation des courants dans le repère  $dq$  [26].

### 6.3.2 Modélisation de Convertisseur côté réseau (CCR)

Dans cette section, nous présentons la modélisation du convertisseur côté réseau (CCR), utilisé pour injecter la puissance dans le réseau électrique et réguler la tension du bus continu. Il convient de noter que nous travaillons ici avec le même type d'onduleur à deux niveaux que celui utilisé côté rotor (CCM), et que l'ensemble de l'analyse est effectué dans le repère de Park.

Par conséquent, le recours à un onduleur multiniveau ne présente pas d'intérêt particulier dans ce contexte, puisque la transformation en repère  $dq$  permet déjà d'obtenir un comportement lissé et continu des grandeurs électriques, facilitant la commande vectorielle et la régulation des courants. La figure suivante illustre la liaison du convertisseur côté réseau avec le réseau électrique, mettant en évidence la présence du filtre RL qui joue un rôle crucial dans l'atténuation des harmoniques générés par le convertisseur.

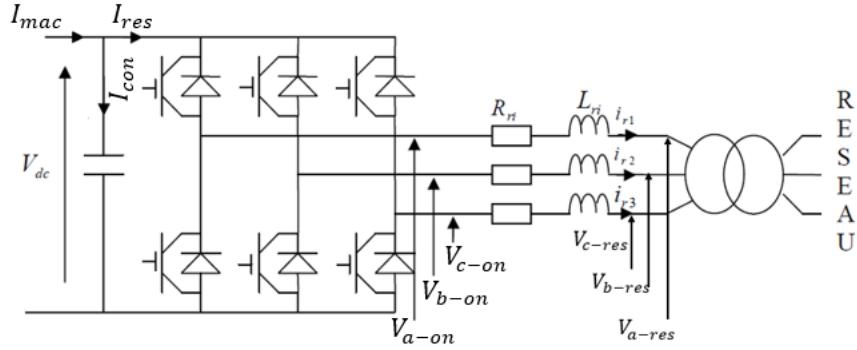


Figure 6-4 Connexion du convertisseur côté réseau au réseau électrique à travers un filtre RL [46].

### 6.3.3 Régulation de la tension du bus continu

La régulation de la tension du bus continu est généralement assurée par une boucle de contrôle externe, qui agit sur la référence de courant à injecter dans le condensateur afin de maintenir une tension stable [46].

En règle générale, les pertes dans les convertisseurs sont supposées négligeables afin de simplifier le modèle de régulation. Ainsi, pour garantir un équilibre énergétique au niveau du bus continu, on utilise directement la puissance mécanique de référence comme consigne anticipée de puissance active à injecter vers le réseau [47].

L'évolution de la tension du bus continu peut être décrite à partir de la charge ou décharge du condensateur situé entre les deux convertisseurs. En supposant que le condensateur est idéal, sa tension varie selon le courant qui le traverse [38].

Ainsi, le courant dans le condensateur s'écrit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = ic \quad (6.6)$$

Ce courant  $ic$  résulte de la différence entre le courant fourni par le convertisseur côté machine et celui absorbé par le convertisseur côté réseau, soit :

$$ic = i_{mac} - i_{res} \quad (6.7)$$

Avec

$C$  Est la capacité du condensateur.

$V_{dc}$  La tension du bus continu.

$ic$  Le courant qui traverse le condensateur.

$i_{res}$  Courant modulé par le convertisseur côté réseau.

$i_{mac}$  Courant modulé par le convertisseur côté machines.

Le bus continu peut être modélisé à l'aide de la fonction de transfert suivante :

$$\frac{V_{dc}}{i_c} = \frac{1}{C \cdot s} \quad (6.8)$$

A partir de l'équation 6.7 en multipliant par la tension de bus continu on obtient [2] :

$$P_c = P_{mac} - P_{res} \quad (6.9)$$

Tel que :

$P_{mac} = V_{dc}I_{mac}$  : la puissance transittée par le convertisseur coté rotor.

$P_c = V_{dc}I_c$  : la puissance emmagasinée dans le condensateur.

$P_{res} = V_{dc}I_{res}$  : la puissance transitée par le convertisseur coté réseau.

En négligeant les pertes dans le filtre R-L, la référence de la puissance qui doit être transitée par le convertisseur côté réseau sera donnée par :

$$P_{res} = P_{mac} - P_c \quad (6.10)$$

### 6.3.4 Contrôle des courant côté réseau

L'injection de la puissance dans le réseau électrique impose le respect de certaines normes, notamment celles définies par l'IEEE pour les systèmes distribués. À cet effet, la norme IEEE Std 1547-2018 définit les exigences essentielles d'interconnexion entre les ressources énergétiques distribuées et le réseau électrique [50].

Les puissances active et réactive transitant par le système sont données par l'équation suivante [48] :

$$\begin{cases} P = V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \\ Q = V_{dr}I_{dr} - V_{qr}I_{qr} \end{cases} \quad (6.11)$$

À partir de ces relations, il est possible de réguler les courants du côté réseau en imposant des références pour la puissance active  $P_{res-ref}$  et la puissance réactive  $Q_{res-ref}$  [49] :

$$\begin{cases} V_{resq} \cdot P_{res-ref} = V_{resd} \cdot V_{resq} \cdot I_{resd-ref} + V_{resq}^2 \cdot I_{resq-ref} \\ V_{resd} \cdot Q_{res-ref} = V_{resq} \cdot V_{resd} \cdot I_{resd-ref} - V_{resd}^2 \cdot I_{resd-ref} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$\begin{cases} V_{resd} \cdot P_{res-ref} = V_{resd}^2 \cdot I_{resd-ref} + V_{resd} \cdot V_{resq} \cdot I_{resd-ref} \\ V_{resq} \cdot Q_{res-ref} = V_{resq}^2 \cdot I_{resd-ref} - V_{resq} \cdot V_{resd} \cdot I_{resd-ref} \end{cases} \quad (6.13)$$

À partir de ces deux équations, on détermine les courants de référence à imposer au réseau, définis par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} I_{resd-ref} = \frac{P_{res-ref} \cdot V_{resd} + Q_{res-ref} \cdot V_{resq}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \\ I_{resq-ref} = \frac{P_{res-ref} \cdot V_{resq} - Q_{res-ref} \cdot V_{resd}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \end{cases} \quad (6.14)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu, tandis que, la puissance réactive est ajustée par la composante en quadrature, assurant ainsi un pilotage distinct des flux de puissance active et réactive. Le régulateur veille également à la stabilité de la tension du bus continu, tout en garantissant que les courants injectés soient sinusoïdaux, avec une amplitude et une fréquence identique à celles du réseau. Dans ce contexte, une puissance réactive nulle peut être imposée ( $Q_{res-ref} = 0$ ) [48].

À partir des équations établies précédemment, le système de commande côté réseau peut être représenté sous forme de schéma bloc. Ce schéma met en évidence la régulation indépendante des composantes *d* et *q* des courants injectés, permettant de contrôler, respectivement, la tension du bus continu et la puissance réactive échangée avec le réseau (Figure 6.5).

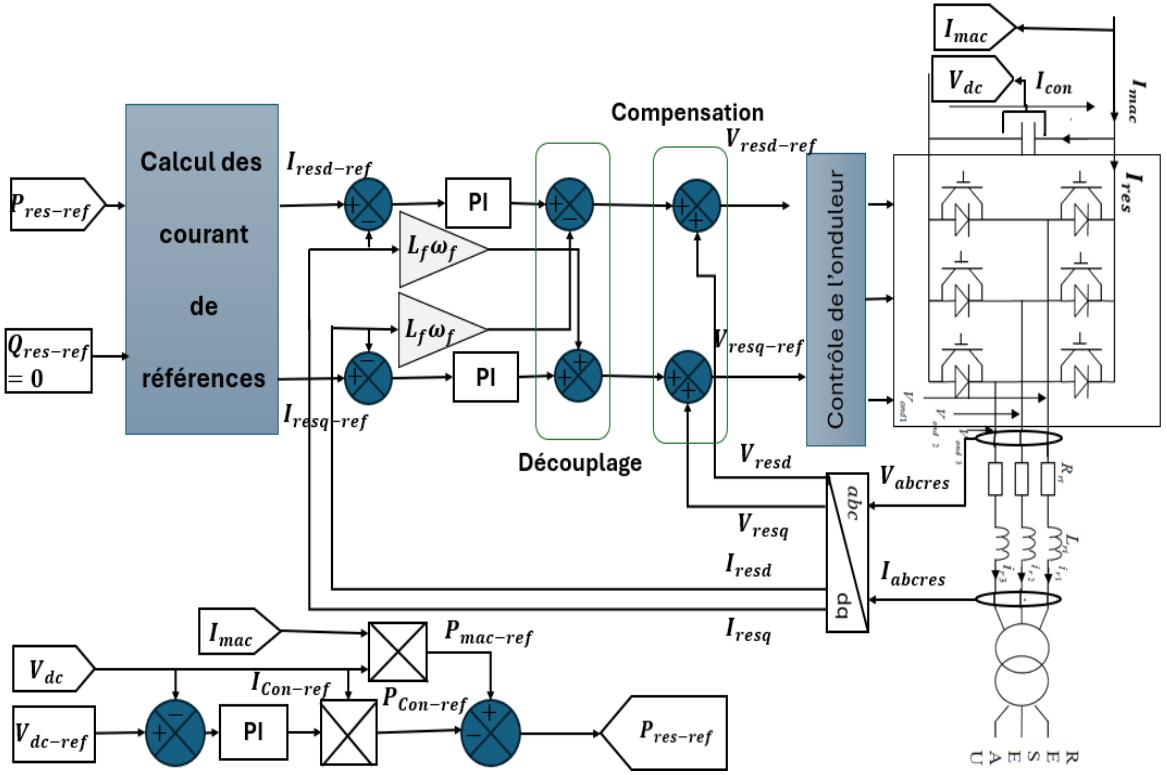


Figure 6-5 Schéma bloc de la stratégie de commande de la liaison côté réseau [49].

#### 6.4 Résultats de simulation

La chaîne éolienne a été testée à l'aide d'un profil de vent variable, permettant de mettre en évidence les deux modes de fonctionnement de la machine : le mode moteur et le mode génératrice. De plus, la machine a été connectée à un réseau de grande puissance afin de simuler des conditions réalistes de fonctionnement. Les résultats obtenus à partir de cette chaîne sont présentés dans les figures suivantes.

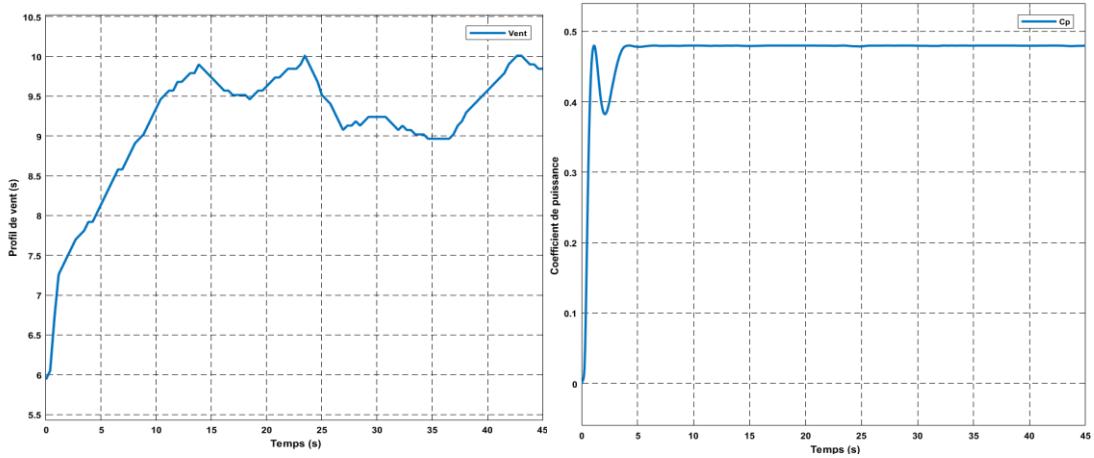


Figure 6-6 Profil de vent et le coefficient de puissance  $C_p$ .

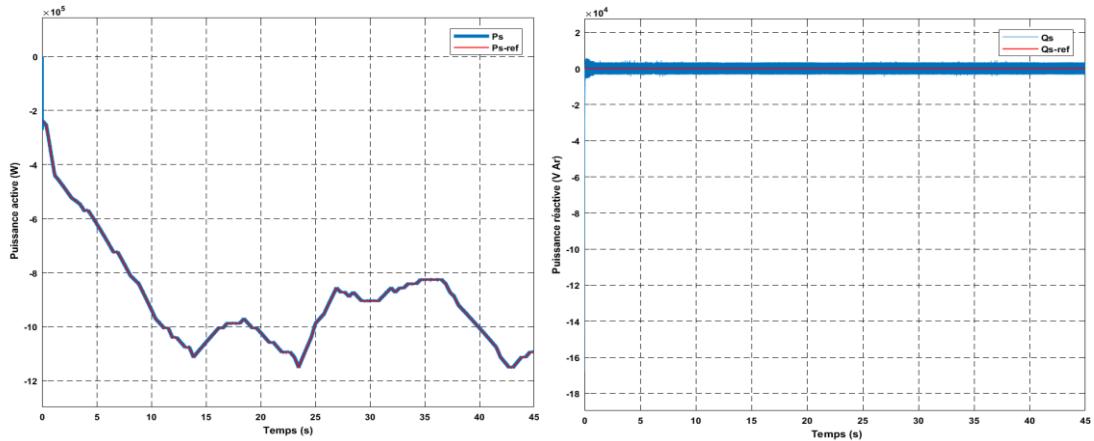


Figure 6-7 Puissance active et réactive statorique.

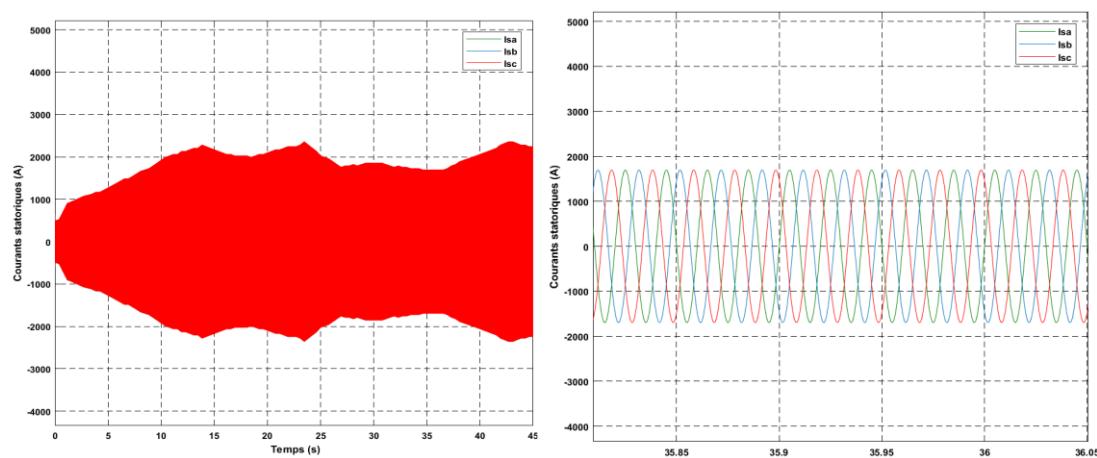


Figure 6-8 Courants statoriques

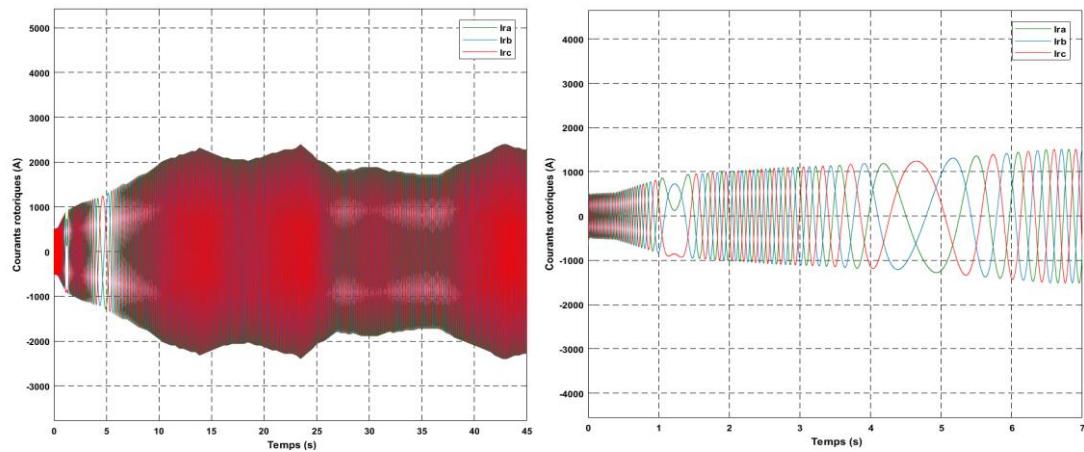


Figure 6-9 Courants rotoriques

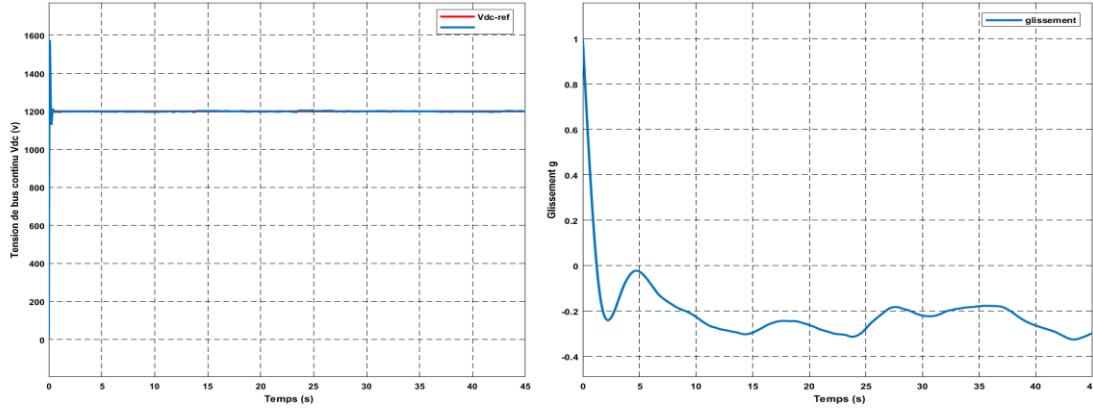


Figure 6-10 La tension de bus et le glissement.

## 6.5 Conclusion

La commande vectorielle indirecte en boucle fermée a été utilisée dans ce chapitre, dans le cadre d'une chaîne de conversion éolienne équipée d'une machine asynchrone à double alimentation. Ce travail avait pour but de maîtriser efficacement les échanges de puissance avec le réseau électrique, tout en assurant une réponse stable et rapide du système.

Les réponses obtenues par simulation valident la justesse du fonctionnement du système. À  $t = 1$  s, la vitesse du rotor dépasse la vitesse synchrone, entraînant le passage de la MADA en mode génératrice et amorçant l'injection de puissance dans le réseau qui est objectif central de la conversion éolienne.

À  $t = 4$  s, la réduction du couple mécanique entraîne une baisse de la vitesse rotorique, rendant le glissement presque nul. Cette condition affecte la performance du contrôle, surtout dans la régulation du courant rotorique pour assurer un bon transfert de puissance.

Toutefois, le système conserve une tension de bus continu stable et maintient l'injection d'énergie au réseau, quoique de manière réduite.

L'analyse des courbes obtenues montre que la puissance injectée dans le réseau est régulée. Les transitions des courant sont fluides et maîtrisées. La commande indirecte en boucle fermée permet de suivre efficacement les consignes, tout en gardant un bon équilibre énergétique dans le système.

En résumé, la stratégie de commande vectorielle indirecte en boucle fermée s'est montrée efficace pour contrôler la MADA dans un système éolien connecté au réseau. Elle permet d'assurer une injection de qualité, de stabiliser la tension du bus continu, et de s'adapter aux différentes conditions de fonctionnement.

## CHAPITRE 7 - CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a porté sur la conception et la mise en œuvre d'une chaîne de conversion éolienne, intégrant une machine asynchrone à double alimentation (MADA), dans l'objectif de proposer une solution performante pour la production d'électricité renouvelable et son intégration au réseau. L'étude a été structurée en plusieurs étapes successives et complémentaires, permettant une analyse détaillée de chacun des sous-systèmes de la chaîne.

Dans un premier temps, une attention particulière a été portée sur la modélisation de la turbine éolienne. Un modèle aérodynamique a été élaboré, basé sur le coefficient de puissance  $C_p$ , en fonction du rapport de vitesses et de l'angle de calage. Une stratégie MPPT a ensuite été appliquée pour ajuster dynamiquement la vitesse de rotation de la turbine, en fonction des variations du vent, dans le but d'extraire un maximum d'énergie.

La deuxième phase s'est focalisée sur la modélisation dynamique de la MADA, exprimée dans le repère de Park. Ce cadre a permis de représenter fidèlement les comportements électriques et mécaniques de la machine, et a servi de fondement pour l'élaboration des lois de commande vectorielle.

Deux approches de commande ont été mises en œuvre et analysées : la commande directe, plus simple à implémenter mais plus sensible aux variations des paramètres du système, et la commande indirecte en boucle fermée, qui s'est révélée plus robuste et efficace. Ces deux techniques ont été testées sous l'environnement MATLAB/Simulink,

avec des échelons de puissances active et réactive différents. Les résultats ont montré que la commande indirecte boucle fermée présente une meilleure stabilité et une plus grande résistance aux perturbations.

Une autre partie importante du travail a été consacrée à l'injection de l'énergie dans le réseau. Celle-ci a été réalisée à l'aide d'un onduleur à deux niveaux, piloté par une modulation de type SPWM. Un système de régulation externe a été conçu afin d'assurer la stabilité de la tension du bus continu, tout en générant la référence de courant nécessaire à l'injection.

Le système de commande côté réseau a permis de garantir que les courants injectés respectent les exigences du réseau en termes de forme d'onde, de synchronisation et de qualité de l'énergie fournie.

Enfin, les perspectives envisagées pour ce travail concernent l'intégration de convertisseurs multiniveaux. Ces derniers pourraient contribuer à une amélioration significative de la qualité des signaux injectés, à une réduction des harmoniques, et à une optimisation du rendement global du système. L'introduction des stratégies de commande avancées, telles que les techniques prédictives ou les réseaux de neurones, serait également une piste prometteuse pour renforcer les performances dans des environnements plus complexes.

En résumé, ce projet fournit une base solide pour le développement de systèmes éoliens performants et fiables, connectés au réseau, tout en tenant compte des aspects liés à la durabilité, à l'efficacité énergétique et à la stabilité de fonctionnement. Il s'inscrit ainsi

dans une dynamique de progrès des connaissances dans le domaine du génie électrique appliqué aux énergies renouvelables, et ouvre des perspectives intéressantes pour des recherches futures orientées vers les systèmes de conversion de nouvelle génération.

## RÉFÉRENCES

- [1] B. Robyns *et al.*, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *J3Ea*, vol. 5, p. 003, 2006.
- [2] S. Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », M.Sc.A., École Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC), « *Global Wind Report* », rapport, mars 2023. [En ligne]. Disponible : <https://gwec.net/global-wind-report-2023/>. [Consulté le 01 avril 2024].
- [4] A. Gaillard, « 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, Université Henri Poincaré – Nancy 1, Nancy, France, 2010.
- [5] H. Horsin Molinaro et B. Multon, *Énergie électrique : génération photovoltaïque*, ENSPS – École Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://ensps.unistra.fr>. [Consulté le 03 avril 2024].
- [6] B. Multon *et al.*, *État de l'art des aérogénérateurs*, Paris : NOVELECT-ECRIN, 2002, ISBN 2-912154-8-1.
- [7] H. Holttinen et B. H. Jørgensen, « *IEA Wind TCP Annual Report 2022 – Executive Summary* », IEA, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://iea-wind.org>. [Consulté le 23 mars 2024].
- [8] O. Moussa, « Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais », Mémoire de master, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2020.
- [9] A. Mirecki, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse, 2005.
- [10] P. Jaohindy, « Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : modélisation du couple production/bâtiment », Thèse de doctorat, Université de la Réunion, La Réunion, France, 2012.
- [11] M. Donnay, Q. Lallemand, P. Chatelain, B. Dehez, E. De Jaeger et H. Jeanmart, « Conception d'un aérogénérateur à axe vertical fabricable par des techniques de prototypage rapide », Mémoire de maîtrise, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique, 2016.
- [12] L. Riachy, « Contribution à la commande d'un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques », Thèse de doctorat, Normandie Université, Caen, France, 2017.
- [13] A. Berhail, « Commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC, Canada, 2020
- [14] B. Hamane, « Commande robuste d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel », These

- de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC, Canada, 2018.
- [15] A. Bourzami, « Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue », Thèse, 2019.
  - [16] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 2010.
  - [17] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique : apports des convertisseurs multiniveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Université de polytechnique d'alger, Alger, Algérie, 2011.
  - [18] V. Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France, 2008.
  - [19] Y. Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse, 2015.
  - [20] I. Abderrahim, « Amélioration de la qualité d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecté au réseau électrique », Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada, 2015.
  - [21] D. Guérette, « Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, QC, Canada, 2010.
  - [22] Y. Wang, « Évaluation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes à l'échelle du système électrique : application à un cas insulaire », Thèse de doctorat, École centrale de Lille, Lille, France, 2012.
  - [23] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, École doctorale Sciences pour l'ingénieur, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007
  - [24] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France, 2005.
  - [25] V. Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, France, 2004.

- [26] D. Ikni, « Production d'énergie marine : intégration de la production éolienne offshore dans un bouquet énergétique décentralisé », Thèse, Université du Havre, Le Havre, France, 2014.
- [27] A. Kumar *et al.*, « A review of multi-criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 596–609, 2017
- [28] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff et S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 2<sup>e</sup> éd., Hoboken, NJ: Wiley, 2002.
- [29] F. Poitiers, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome – machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [30] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy I, Nancy, France, 2006.
- [31] R. Rouabhi, « Étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation : application à l'énergie éolienne », Thèse, 2018.
- [32] G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo et G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*, Chichester, Royaume-Uni: John Wiley & Sons, 2011
- [33] T. Ayoub, « Analyse et commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada, 2013.
- [34] C.-M. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- [35] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Berlin: Springer Science & Business Media, 2001.
- [36] R. Defontaines, « Étude et simulation de la MADA », Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada, 2012.
- [37] A. Chaiba, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2010.
- [38] S. Muller, M. Deicke et R. W. De Doncker, « Doubly fed induction generator systems for wind turbines », *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, 2002.
- [39] N. Taib, B. Metidji et T. Rekioua, « Performance and efficiency control enhancement of wind power generation system based on DFIG using three-level sparse matrix converter », *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, no. –, pp. 287–296, 2013.

- [40] L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone : utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy I, Nancy, France, 1999.
- [41] Y. Djeriri et A. Meroufel, « Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels d'une MADA intégrée à un système éolien », in *6th International Conference on Electrical Engineering*, 2010, pp. 33–37.
- [42] K. Ouari, T. Rekioua et M. Ouhrouche, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer », *ISA Transactions*, vol. 53, no. 1, pp. 76–84, 2014.
- [43] N. Mekkaoui, « Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2005.
- [44] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drives*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1986.
- [45] M. M. A. Hamza et M. N. Kais, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2010.
- [46] M. P. Kaźmierkowski, R. Krishnan et F. Blaabjerg, *Control in Power Electronics: Selected Problems*, San Diego, CA: Academic Press, 2002.
- [47] L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse, Université de Lille, Lille, France, 2004.
- [48] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, Lille, France, 2004.
- [49] F. Merrahi, « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) », Mémoire de maîtrise, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [50] IEEE Standard Association, *IEEE Std 1547-2018 – Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, IEEE Standards, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html>. [Consulté le 1 mars 2025].

### Annexe A– Paramètres de simulation

Tableau A-1 – Paramètres de la turbine

Paramètre	Valeur	Unité
$C_{pMax}$	0.48	[ $\cdot$ ]
$\lambda_{opt}$	8.1	[ $\cdot$ ]
$P_n$	$3e^6$	[W]
$J_g$	$2e^5$	[Kg.m $^2$ ]
$J_t$	$30e^6$	[Kg.m] $^2$
$f$	0.001	[N.m.s/rad]
$G$	90	[ $\cdot$ ]
$R_t$	35.25	[m]
$J$	$J_t + J_g$	Kg.m $^2$
$V_{dc}$	1200	[V]
$C$	$15e^{-3}$	[F]
$R_f$	0.002	[ $\Omega$ ]
$L_f$	$5e^{-3}$	[H]

Tableau A-2 - Paramètres de la machine

Paramètre	Valeur	Unité
$R_s$	0.012	[Ω]
$R_r$	0.021	[Ω]
$L_s$	0.0137	[H]
$L_r$	0.0136	[H]
$L_m$	0.0135	[H]
$P_n$	$3e^6$	[W]
$V_n$	398	[V]
$p$	2	[-]

Tableau A-3 - Paramètres du régulateur

Commande	Directe			Indirect boucle fermée	
Grandeurs	Puissances		Puissances	Courants	
$K_p$	7.5749e-04		7.5749e-05	0.2971	
$K_i$	0.0535		0.0054	21	

