

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكتروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté par

KRARROUBI LAKOUAS Mohammed Elamin

&

HAOUAME Ahmed Amine

**Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique
option Machine électrique**

Thème

**Etude et simualtion de contrôle de la
production d'énergie éolienne**

Proposé par : Mme KHEMICI LATIFA

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir donné la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'étude.

Nous remercions sincèrement notre encadreur Mme KHEMICI Latifa pour avoir d'abord Accepter ce thème proposer et diriger ce modeste travail et pour son continuel suivi et continu tout au long de la réalisation et la correction de ce mémoire. Elle nous a présenté un excellent exemple de la compétence scientifique, discipline et générosité.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

En fin de compte, nous ne pourrions pas terminer ces remerciement sans remercier nos familles et tous nos amis, remerciez-les pour leur aide et leur compréhension, Leurs encouragements et leur soutien Apporté dans notre processus d'apprentissage.

Dédicaces

A ma maman,

La personne qui a sacrifié de tout pour faire de moi ce que je suis maintenant.

A mon papa,

A celui qui a fait de moi un homme.

A ma tante,

Qui est toujours à mes côtés.

A toutes mes sœurs

A tous mes amies et mes collègues,

A tous mes enseignants,

Et avec une sincère fidélité et un profond amour que je vous dédie ce modeste travail.

Mohammed Elamin.

Dédicaces

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

A l'être le plus cher de notre vie, Ma mère.

A celui qui nous a fait de nous des hommes, Mon père.

A mes chers frères et sœurs.

Ahmed Amine.

Résumé :

Dans le domaine éolien, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente bien des avantages, Ceci est possible en raison de sa capacité à fournir la puissance à tension et à fréquence constantes tandis que la vitesse du rotor varie, ce qui permet une meilleure capture du vent, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

L'objectif est de contrôler la vitesse et le couple par la MADA. Une synthèse est faite à partir des contrôleurs classiques PI, puis MPPT.

La sensibilité élevée de la MADA vis-à-vis des défauts électriques fait apparaître de nombreuses difficultés en termes de respect des spécifications imposées par les opérateurs des réseaux électriques. Un contrôle et une stratégie de protection sont proposés pour le système MADA équipé d'un circuit de protection contre les défauts importants du réseau.

Les mots clés : éolienne, MADA, commande indirecte, creux de la tension.

ملخص:

في مجال الرياح، تتميز الآلة غير المتزامنة ثنائية التغذية بالعديد من المزايا، وهذا ممكن بسبب قدرتها على توفير الطاقة بجهد وتردد ثابتين بينما تتغير سرعة الدوار، مما يسمح بالتقاط أفضل للرياح، بالمقارنة مع توربينات الرياح ذات السرعة الثابتة.

الهدف هو التحكم في السرعة وعزم الدوران التي يولدها MADA. يتكون التركيب من وحدات تحكم PI الكلاسيكية، ثم MPPT.

تثير الحساسية العالية لـ MADA فيما يتعلق بالأعطال الكهربائية العديد من الصعوبات من حيث الامتثال للمواصفات التي يفرضها مشغلو الشبكات الكهربائية. تم اقتراح إستراتيجية التحكم والحماية لنظام MADA المجهز بدائرة حماية ضد أعطال الشبكة الكبيرة

. الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح، الآلة غير المتزامنة، التحكم غير المباشر، تراجع الجهد.

NOMENCLATURES

Liste des symboles

Les principales notations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Ω_s : la vitesse statorique de la MADA

ω_s : la pulsation électrique des grandeurs statoriques .

P : le nombre de paires de pôles

f_s : Fréquence statorique

f_r : Fréquence rotorique

g : le glissement

Ω_r : la vitesse rotorique de la MADA

ω_r : la pulsation électrique des grandeurs rotoriques.

θ : la position angulaire du rotor par rapport au stator.

f : Fréquence de la MADA

\underline{V} : Tension de stator fournie

\underline{V}' : Tension de rotor fournie

\underline{I}_s : Courant du stator

\underline{I}_r' : Courant du rotor

\underline{E}'_s : la force électromotrice induite dans le stator

\underline{E}_{rs} : la force électromotrice induite dans le rotor

R_s : Résistance du stator (Ω)

R_r' : Résistance du rotor (Ω)

L_m : Inductance mutuelle (H)

$L_{\sigma s}$: Inductance de fuite du stator (H)

$L'_{\sigma r}$ Inductance de fuite du rotor (H)

N_s, N_r : Enroulements du stator et rotor, nombre de tours par phase.

u : Rapport de transformateur.

P_s et Q_s : La puissance active et réactive au stator respectivement.

P_r et Q_r : La puissance active et réactive au rotor respectivement.

P_{cu-s} et P_{cu-r} : Les pertes de cuivre au stator et rotor respectivement

P_{mec} : La puissance mécanique.

T_{em} : Le couple électromagnétique.

$V_{\alpha s}$, $V_{\beta s}$, $V_{\alpha r}$ et $V_{\beta r}$: Tension statorique et rotorique exprimée dans le repère de CLARCK respectivement sur les axes $\alpha - \beta$.

$\vec{\varphi}_{\alpha s}$, $\vec{\varphi}_{\beta s}$, $\vec{\varphi}_{\alpha r}$ et $\vec{\varphi}_{\beta r}$: Le flux statorique et rotorique exprimée dans le repère de CLARCK respectivement sur les axes $\alpha - \beta$.

V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} : Tension statorique et rotorique exprimée dans le repère de PARCK respectivement sur les axes $d - q$.

$\vec{\varphi}_{ds}$, $\vec{\varphi}_{qs}$, $\vec{\varphi}_{dr}$ et $\vec{\varphi}_{qr}$: Le flux statorique exprimée dans le repère de PARCK respectivement sur les axes $d - q$.

$V_{\alpha f}$, $V_{\beta f}$: Tension de filtre de côté réseaux dans le repère de CLARCK respectivement sur les axes $\alpha - \beta$.

V_{df} , V_{qf} : Tension de filtre de côté réseaux dans le repère de PARCK respectivement sur les axes $d - q$.

V_g : Tension du réseau/grid.

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

T_{load} : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

P_v : La puissance du vent.

P_t : La puissance aérodynamique.

T_t : Le couple aérodynamique.

p : Nombre de paire de pôle.

s : Opérateur de LAPLACE

MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation.

GADA: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

Sommaire :

<i>Introduction générale</i>	1
<i>1 Introduction</i> :	4
<i>1.1 Energie éolienne</i>	4
<i>1.2.1 Introduction</i> :	4
<i>1.2.2 Définition</i> :	4
<i>1.2.3 Historique et exploitation mondiale</i> :	5
<i>1.2 Les types des éoliennes</i> :	8
<i>1.2.1 Eolienne à axe vertical</i> :	9
<i>1.2.1.1 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical</i>	10
<i>1.2.2 Eolienne à axe horizontal</i> :	10
<i>1.2.2.1 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale</i>	11
<i>1.3 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal</i> :	12
<i>1.4 Constituants de l'éolienne</i> :	12
<i>1.5 Les Systèmes De Conversion Eoliens (SCE)</i> :	15
<i>1.6 Conclusion</i> :	16
<i>2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation</i>	17
<i>2.1 Introduction</i>	17
<i>2.2 Les équations électriques</i> :	17
<i>2.3 Flux de puissance et modes de fonctionnement</i> :	20
<i>2.4 Courbes de couple représentatives en régime permanent</i>	23
<i>2.5 Mise en équations de la MADA</i>	23
<i>2.5.1 Modèle $\alpha\beta$</i> :	24
<i>2.5.2 Modèle D-Q</i>	28
<i>2.6 Modélisation dynamique du système côté réseaux</i>	29
<i>2.6.1 Modèle $\alpha\beta$</i> :	29
<i>2.6.2 Modèle d-q</i> :	30
<i>2.7.1 Aérodynamique des Éoliennes</i>	32
<i>2.7.2 Modèle Aérodynamique</i>	34
<i>2.8.1 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI- PWM)</i> :	34
<i>2.8.2 MLI-PWM sinusoïdal avec injection de troisième harmonique</i> :	36
<i>2.9 Modélisation du convertisseur</i>	39
<i>2.9.1 Modélisation du redresseur</i> :	39
<i>2.9.2 Modélisation de l'onduleur</i> :	40
<i>2.10 Conclusion</i> :	42

3	<i>Stratégie de commande du MADA base à éolienne</i>	43
3.1	<i>Introduction</i>	43
3.2	<i>Analyse en régime permanent</i>	43
3.3	<i>Réglage du régulateur PI à l'aide d'un système équivalent du second ordre</i>	45
3.4	<i>Stratégie de la commande MPPT de MADA pour éolienne</i>	47
3.4.1	<i>Zones de contrôle de la vitesse des turbines :</i>	47
3.4.2	<i>Stratégie de commande e des points de puissance maximum</i>	48
3.4.3	<i>La commande de vitesse indirect</i>	49
3.5	<i>Comprendre la perte de commande pendant le creux de tension</i>	50
3.5.2	<i>Fonctionnement sous tension de réseau asymétrique</i>	53
3.6	<i>Conclusion :</i>	55
4	<i>Résultats de simulation</i>	56
4.1	<i>Resultats d'analyse en regime permanant</i>	56
4.1.1	<i>Interprétation des résultats</i>	57
4.2	<i>Résultats de simulation par régulateur PI et MPPT</i>	58
4.2.1	<i>Interprétation des résultats</i>	59
4.3	<i>Analyse des creux de tension symétriques</i>	60
4.3.1	<i>Interprétation des résultats</i>	60
4.4	<i>Analyse des creux de tension asymétriques</i>	61
4.4.1	<i>Interprétation des résultats</i>	61
4.5	<i>Résultats de simulation modèle analytique du GADA</i>	62
4.5.1	<i>Interprétation des résultats</i>	62
4.6	<i>Conclusion</i>	63
	<i>Conclusion générale</i>	64
	<i>Annex</i>	66
	<i>Bibliographie</i>	73

Figure chapitre 01:

Figure 1- 1: Exploitation mondiale de l'énergie éolienne selon GWEC (Global Wind Energy Council) [6]	6
Figure 1- 2: Evolution de la puissance du parc éolien mondial selon GWEC (Global Wind Energy Council) [6]	7
Figure 1- 3: Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne selon GWEC [6].	8
Figure 1- 4: Les différentes formes d'éoliennes Darius.	9
Figure 1- 5: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieux.....	9
Figure 1- 6: L'éolienne « amont » et « aval ».....	11
Figure 1- 7: Constitution d'une éolienne tripale	12
Figure 1- 8: Principaux organes du système de conversion éolien	15
Figure 1- 9: Systèmes de génération d'énergie électrique à partir de sources d'énergie variable	16

Figure chapitre 02:

Figure 2- 1: Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA.	18
Figure 2- 2: Circuit électrique équivalent en régime stationnaire monophasé du DFIM avec paramètres du rotor, courant et tensions réduits au stator.....	19
Figure 2- 3: Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du DFIM référé au stator.....	20
Figure 2- 4: Diagramme de phase en mode générateur à $Q_s > 0$ d'un DFIM multi-mégawatts, (a) $g > 0$ et (b) $g < 0$	20
Figure 2- 5: Quatre modes de fonctionnement quadrants du DFIM en fonction de la puissance active.....	22
Figure 2- 6: Équivalent Thevenin circuit électrique en régime permanent du MADA (DFIM).....	23
Figure 2- 7: représente la schématisation de la MADA triphasé	24
Figure 2- 8: Modèle du DFIM dans le référentiel $\alpha - \beta$	25
Figure 2- 9: Différents cadres de référence pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA.	26
Figure 2- 10: Modèle du DFIM dans le référentiel d-q	29
Figure 2- 11: Modèle du DFIM dans le référentiel $\alpha - \beta$ en coordonnées stationnaires.	29
Figure 2- 12: d-q Modèle du système latéral de grille en coordonnées stationnaires.	30
Figure 2- 13: Alignement avec l'axe d du vecteur spatial de tension de réseaux.....	31
Figure 2- 14: Schéma de l'écoulement du fluide à travers un actionneur en forme de disque.....	32
Figure 2- 15: Schéma de bloc d'un modèle d'éolienne à vitesse variable.....	33
Figure 2- 16: Les tensions de sortie du convertisseur à deux niveaux avec PWM sinusoïdal $m_f=20$, $m_a=0.9$	35
Figure 2- 17: Diagramme fonctionnel simplifié du MLI.....	36
Figure 2- 18: Injection de troisième harmonique au signal de référence, pour l'augmentation d'amplitude de la composante fondamentale.....	37

Figure 2- 19: : (a)Schéma fonctionnel pour l'injection simplifiée de troisième harmonique. (b) Signal injecté résultant et référence de tension, avec génération simplifiée de troisième harmonique	38
Figure 2- 20: Tensions de sortie du convertisseur à deux niveaux avec PWM sinusoïdal $m_f=20$, $m_a=0.9$ avec injection de troisième harmonique.....	39
Figure 2- 21: : Représenté redresseur triphasé.....	40

Figure chapitre 03:

Figure 3- 1: Système équivalent de second ordre de la commande de courant en boucle fermée avec régulateurs PI.....	46
Figure 3- 2: Système équivalent en boucle fermée de ω avec (T_{load} considérée égale à zéro).....	47
Figure 3- 3: Stratégie de contrôle des éoliennes basée sur quatre régions de vitesse.	48
Figure 3- 4: Etude de stabilité autour d'un point de la courbe de puissance maximale ..	49
Figure 3- 5: Schéma fonctionnel général de la stratégie de contrôle de vitesse indirecte	49
Figure 3- 6: (a) Circuit équivalent du DFIM pour l'analyse des creux de tension et (b) Diagramme vectoriel spatial en sous-synchronisme en mode générateur	51
Figure 3- 7: : Analyse des défauts (a) courant rotorique et (b) flux statorique	51
Figure 3- 8: Evolution des grandeurs du vecteur spatial depuis le premier instant où la tension statorique est réduite jusqu'à l'état stationnaire atteint au creux	52
Figure 3- 9: (a) Système équipé d'une protection triphasée à pied de biche CC et (b) circuit équivalent monophasé du système lorsque le pied de biche est activé	52
Figure 3- 10: Déséquilibre causé par un défaut entre phases de type creux C : (a) diagramme de phase et (b) tensions abc	53
Figure 3- 11: Schéma de principe de la double commande.	54
Figure 3- 12: Décomposition de séquence.....	55

Figure chapitre 04:

Figure 4- 1: : (a) 'évolution du couple électromagnétique et (b) : représente les puissances active et réactive délivrées par le rotor et le stator	56
Figure 4- 2: : montre la tension et le courant du rotor ; c'est-à-dire l'amplitude de la tension et du courant du convertisseur côté rotor. et la tension et le courant du stator	56
Figure 4- 3: Réponse en régime permanent du système simulé avec une vitesse de rotor de 152.38 rad/sec.....	58
Figure 4- 4: Représenté le couple, I_s , I_r , V_s , I_g . Par PI.....	58
Figure 4- 5: représente ensemble des résultats (vitesse, couple, courant) par MPPT	59
Figure 4- 6: analyse des défauts de creux de tension symétrique	60
Figure 4- 7: analyse des défauts de creux de tension asymétrique	61

La liste du tableau :

Tableau 1- 1: classification des éoliennes selon la puissance	5
Tableau 1- 2 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical	10
Tableau 1- 3: Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale	11
Tableau 1- 4: Les constituants d'une éolienne	13
Tableau 2- 1: liste d'expressions simples et utiles	22
Tableau 3- 1: les grandeurs en régime permanent avec la référence Q_s	44
Tableau 3- 2: les grandeurs en régime permanent avec la référence i_{dr}	45

Introduction générale

Dès sa première existence sur la terre, l'homme a une relation avec l'énergie. En fait, il était et continue toujours à chercher des sources d'énergie pour satisfaire ses besoins qui ne cessent de se croître d'un jour à l'autre.

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...)
[1]

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, CO₂.

Le vent est la source d'énergie éolienne et sa protection de l'environnement est meilleure que les sources d'énergie conventionnelles telles que les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire. Le vent est une source d'énergie très économique et sa puissance varie selon l'emplacement, l'heure, le climat et la saison. L'énergie éolienne est non polluante, irrégulière et difficile à contrôler. Selon l'emplacement, la vitesse moyenne du vent, la direction et l'intensité du vent peuvent être prédites. L'utilisation de l'énergie éolienne n'a pas d'effets nocifs sur l'environnement, ce qui en fait une source d'énergie propre et une véritable alternative aux problèmes de gestion des déchets nucléaires et d'émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes offrent également à plus de 2 milliards de personnes isolées la possibilité ultime d'obtenir de l'électricité et, à long terme, elles peuvent réaliser de réelles économies grâce à l'augmentation de la consommation d'énergie.

Malheureusement, ils ne sont pas accessibles partout, surtout dans les lieux naturels protégés. De plus, le bruit qu'ils faisaient et leur esthétique dérangeaient certains résidents. C'est une future source d'énergie dont le potentiel n'a pas encore été pleinement exploité.

Un grand intérêt est porté aux énergies renouvelables et développement durable par plusieurs équipes de recherches. Ainsi, le développement des éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables vu les avantages que présente ce mode de production tel que :

- La diminution du coût par rapport à des rendements d'échelle intéressants.
- La surface occupée au sol est peu importante.
- C'est une énergie renouvelable, durable, naturelle et propre.

La commande de ces derniers est indispensable pour garantir le bon fonctionnement, et donc un bon rendement. En automatique, un modèle mathématique nominal est la base de la synthèse d'une loi de commande, il est simplifié de façon à négliger quelques dynamiques du système et considérer que les valeurs des paramètres du modèle sont égales à leurs valeurs nominales, donc il ne prend pas en compte toute la complexité du système. De ce fait, le modèle est considéré comme une approximation qui donne recours à une étape d'approbation et de validation à posteriori de la loi de commande ; c'est ce qu'on appelle l'analyse de la robustesse. Ce dernier contribue à la normalisation et la systématisation du processus de synthèse d'un asservissement à travers le maintien du comportement du système face aux fluctuations et perturbations internes ou externes.

Au cours des deux dernières décennies il y a eu de nombreux progrès technologiques dans l'industrie éolienne, qui ont fait d'elle une source d'énergie plus fiable et plus rentable.

En jours actuels, la production d'énergie éolienne est commercialisable et les systèmes de puissance sont de plus en plus pénétrables en cette dernière.

Notre travail consiste à équilibrer une petite éolienne a axe horizontale déjà réalisée, la mettre en œuvre en effectuant des essais expérimentaux, nous avons ainsi simulé sur MATLAB Simulink toute l'installation ensuite nous avons comparé les résultats.

Pour entamer cette étude, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres, résumés comme suit :

Le premier chapitre contient quelques notions fondamentales sur l'énergie éolienne. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes, et leur constitution. Nous avons abordé les différentes définitions des constituants qui rentrent en jeu ainsi que les différentes zones de fonctionnement et le système de sécurité mécanique mis en place.

Le second chapitre est consacré à la modélisation dynamique. On développera la Modélisation de la MADA dans le repère de Park $d-q$ et Clark $\alpha -\beta$, en décrivent la modélisation aérodynamique. Notamment les expressions donnant le couple électromagnétique et la vitesse de rotation de la Machine.

Le troisième chapitre est consacré à donner un aperçu sur le principe de la commande ainsi qu'un aperçu sur la Stratégie de la commande des turbines à base de la MADA, analyse en régime permanent et réglage de régulateur PI et MPTT (stratégie de commande indirect de la vitesse).

Finalemnt nous exposerons les résultats de simulation lors du fonctionnement de la commande étudié dans chapitre 3, et nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Chapitre 1 :
Etat de l'Art.

1 Introduction :

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine. Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables, son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors du cycle de l'eau (qui permet l'hydroélectricité), le vent (énergie éolienne), l'énergie des vagues et des courants sous-marins (énergie hydrolienne) etc. Durant ces dernières décennies, les chercheurs et scientifiques ont porté une attention considérable aux énergies renouvelables : éoliennes et photovoltaïques. La technologie éolienne et photovoltaïque (PV) fait partie d'une nouvelle famille de petites centrales de production d'électricité à faibles émissions de carbone arrivant à une certaine maturité technologique, elle s'avère être une solution de plus en plus fiable pour répondre aux besoins en électricité.

Avant d'entamer une étude technique des centrales éoliennes et photovoltaïque, il est préférable de s'entourer d'un état d'art approprié à chaque type de ces centrales (éoliennes et photovoltaïque).

Dans ce chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

1.1 Energie éolienne

1.2.1 Introduction :

L'énergie éolienne, considérée comme source non polluante, est une des options les plus durables parmi les possibilités futures. En fait, les capteurs éoliens sont classés par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. L'utilisation de l'énergie éolienne n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle un potentiel alternatif au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards des personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie de la consommation croissante en énergie

1.2.2 Définition :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne [2].

Chapitre 1 : Etat de l'Art.

Cette conjonction mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre d'ampleur, soit accompli par le médiateur d'un multiplicateur dans le cas inverse. Enfin il existe différents modèles d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des foyers isolés.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

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

Le tableau ci-dessous classe les turbines selon la puissance et le diamètre de leur hélice. [3]

Eolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

Tableau 1- 1: classification des éoliennes selon la puissance

1.2.3 Historique et exploitation mondiale :

L'énergie du vent a été exploitée au début partout dans le monde, depuis l'histoire enregistrée. Il existe certaines preuves que l'énergie éolienne a dirigé des embarcations le long du fleuve du Nil autour de « 5000 avant JC ». L'utilisation du vent pour fournir la puissance mécanique est venue un peu plus tard dans l'antiquité en « 200 avant JC ». De simples moulins à vent ont commencé le pompage de l'eau en Chine et des moulins à axe vertical avec voiles de roseaux tissés ont moulu le grain dans le Moyen-Orient. Les Européens ont eu l'idée d'utiliser l'énergie éolienne des Perses, qu'ils ont introduits dans l'Empire romain en « 250 après JC ».

Cependant, les premiers moulins à vent concrets ont été faits en Afghanistan autour du « 7ème » siècle, depuis, la technologie s'est améliorée jusqu'à la fin du « 11ème » siècle, les gens au Moyen-Orient ont largement utilisé des moulins à vent pour la production alimentaire. Les Hollandais ont raffiné le moulin à vent et l'ont adapté pour le drainage des lacs et des marais en « 1300 après JC » [4].

L'énergie éolienne joue un rôle économique important jusqu'au début « 19ème » du siècle. Ensuite, ce rôle diminue par suite de l'accroissement rapide de l'utilisation des énergies fossiles. Toutefois au « 20ème » siècle, s'appuyant sur les progrès de l'aérodynamique, certaines tentatives de réalisation de nouvelles machines sont faites. Aux États-Unis, en ex-URSS, en Angleterre et en France

Chapitre 1 : Etat de l'Art.

par Électricité de France autour de 1960, des éoliennes puissantes, jusqu'à « 1000kw » environ, ont été essayées. Malgré des résultats encourageants, c'est de nouveau l'abandon, le pétrole bon marché se substituant à toutes les autres formes d'énergie. L'augmentation brutale du prix du pétrole relance l'énergie éolienne. La crainte de n'utiliser qu'une seule énergie, dont l'approvisionnement peut être aléatoire, les idées écologiques orientent certains pays vers cette forme inépuisable et nationale. Des progrès importants dans l'aérodynamique, l'arrivée de nouveaux matériaux vont permettre d'exploiter ce gisement mondial estimé à « 4TWh » à partir de nouvelles machines fiables et diminuer le prix de l'énergie produite, qui ne devient plus marginale dans certains pays comme le Danemark ou certaines contrées comme la Californie. [5]

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante : +30% par an en moyenne depuis 10 ans (+31.8% en 2009). En 2009, de nouvelles capacités éoliennes ont été installées plus de « 37000MW » dans le monde et les « 100000 MW » installées ont été dépassées, début 2010. L'éolien représente désormais 340 millions de MWh de production électrique par an, soit 2% de la consommation totale d'électricité dans le monde en. Les experts du « GWEC » (conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, conduisant à un parc installé de près de «200000 MW » en « 2010 »et « 409 000 MW » en 2014. [5]

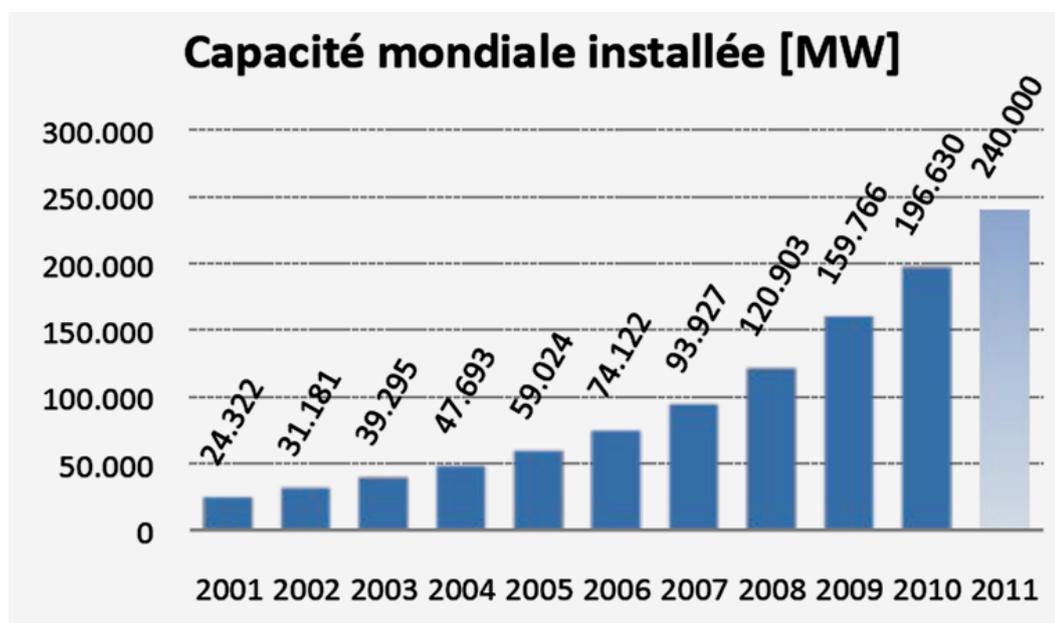


Figure 1- 1: Exploitation mondiale de l'énergie éolienne selon GWEC (Global Wind Energy Council) [6]

Et selon la dernière étude effectuée Le parc éolien mondial a une puissance installée de près de 651 GW à fin 2019. Il a compté pour environ 5,3% de la production mondiale d'électricité en 2019.

Chapitre 1 : Etat de l'Art.

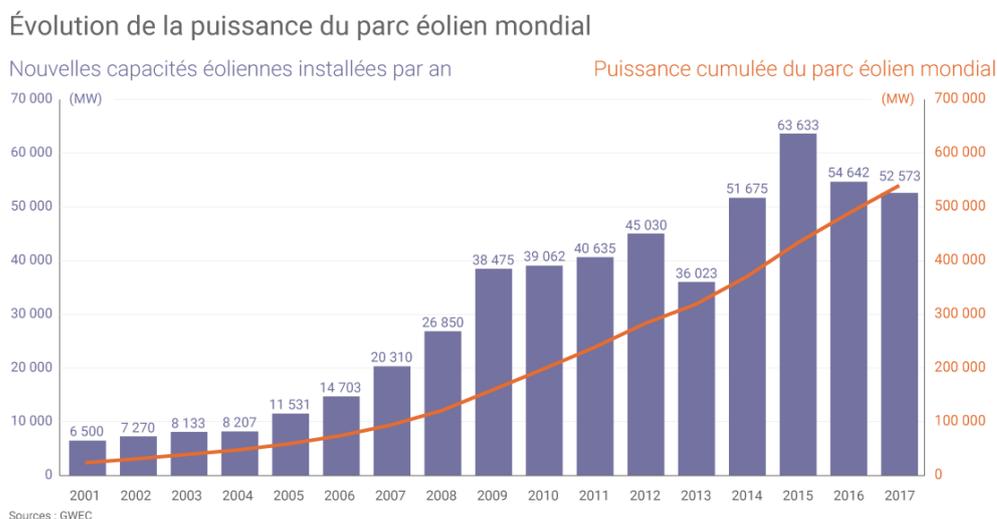


Figure 1- 2: Evolution de la puissance du parc éolien mondial selon GWEC (Global Wind Energy Council) [6]

Les pays les plus exploitants d'énergie éolienne ce sont la Chine et les États-Unis qui disposent des plus grands parcs éoliens dans le monde, avec respectivement 229,6 GW et 105,4 GW installés à fin 2019. Ensuite l'Allemagne, leader européen de l'éolien (et mondial jusqu'en 2009) avec 53,9 GW installés. Si on rapporte les capacités éoliennes à la superficie et la population des principaux pays développant cette filière, le Danemark figure en revanche à la première place.

L'Europe a longtemps dominé le marché mondial de l'énergie éolienne mais la puissance installée de son parc éolien est désormais inférieure de 20% à celle du parc éolien chinois (donnée à fin 2019).

L'histogramme de la figure (1.2) représente cette exploitation.

L'exploitation d'énergie éolienne en Afrique trouve une très faible contribution mondiale, les deux pays les plus exploitants sont : l'Égypte et le Maroc. Le premier avec une capacité totale de production de 430 MW (enregistrée à la fin 2008) avec un taux de croissance annuel de 17.8%, tandis que le Maroc produit environ 253 MW. Selon le conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), une contribution de l'Algérie dans ce domaine reste à révéler [W(4)].

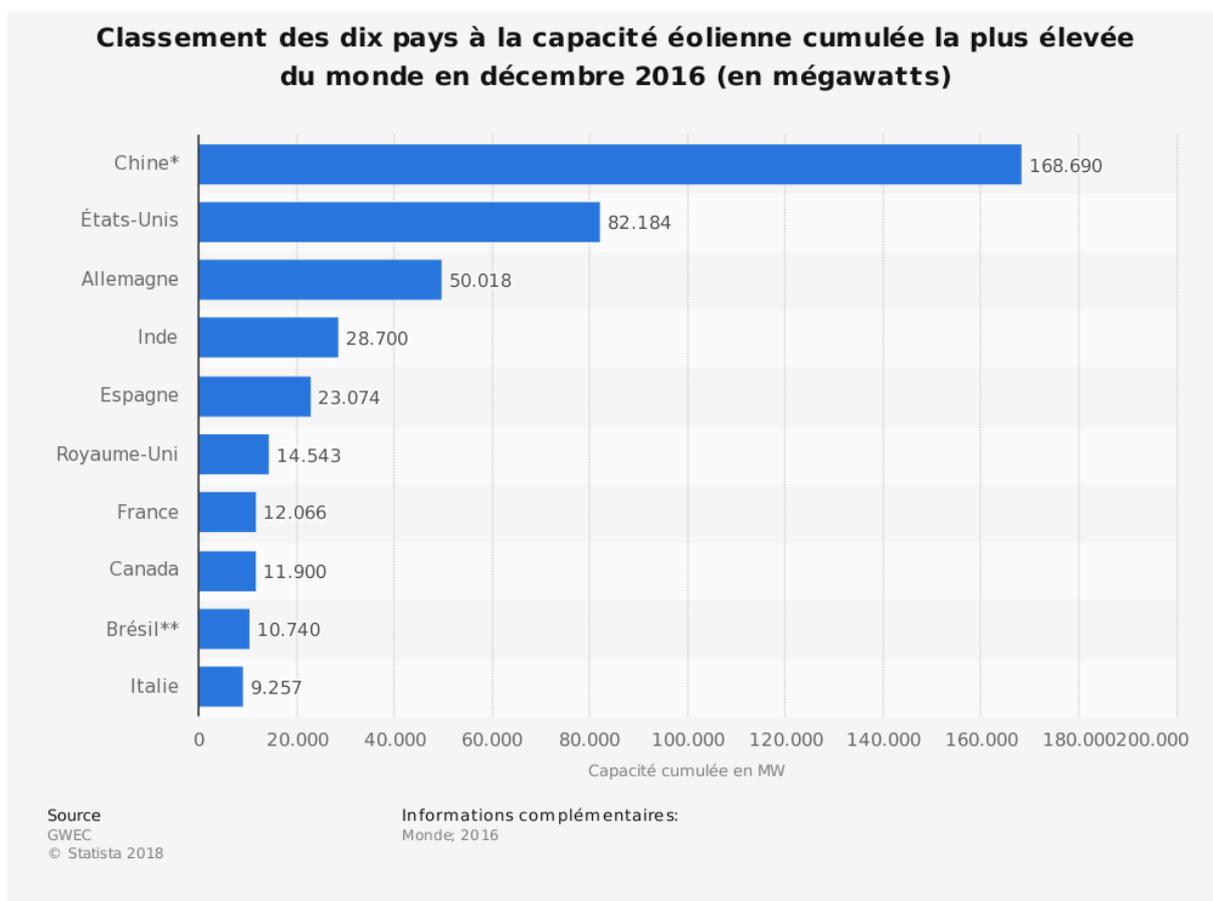


Figure 1- 3: Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne selon GWEC [6].

1.2 Les types des éoliennes :

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses.

- Les éoliennes à axe horizontal.
 - Les éoliennes domestiques.
 - Les éoliennes à axes verticaux
 - Les hydroliennes.
 - Eolienne de pompage.
- ❖ On distingue deux grands types d'éoliennes :
- ✓ Les éoliennes à axe vertical
 - ✓ Les éoliennes à axe horizontal

1.2.1 Eolienne à axe vertical :

Ce type d'éolienne est principalement érigé près du sol ce qui signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain ou aux bâtiments en amont de la machine).

Ces paramètres vont réduire grandement l'efficacité de l'éolienne. [7]

-Eoliennes de type Darius:

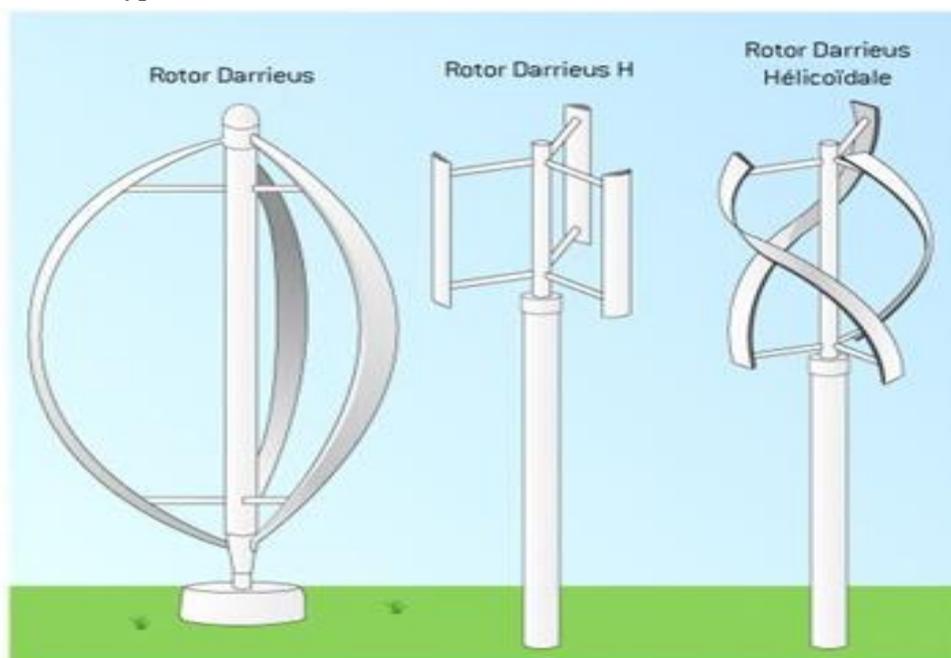


Figure 1- 4: Les différentes formes d'éoliennes Darius.

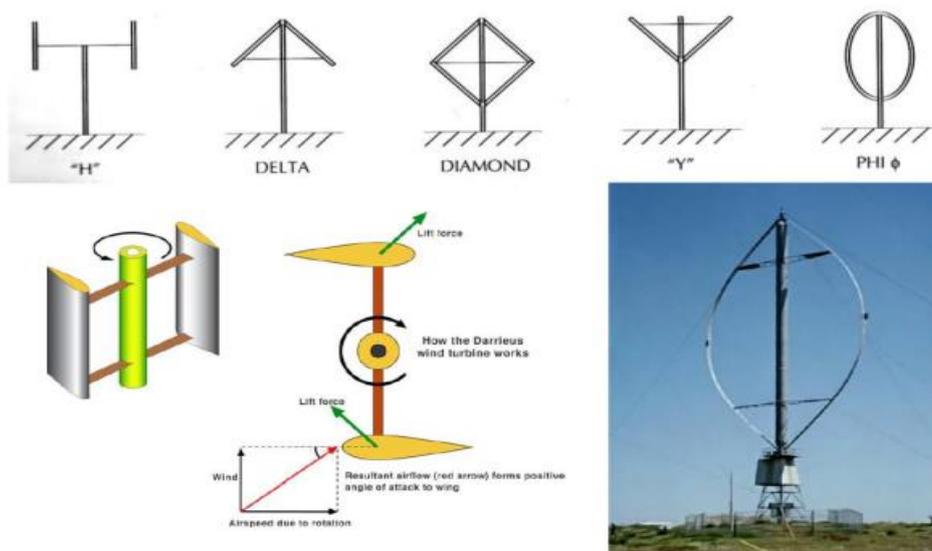


Figure 1- 5: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieux.

1.2.1.1 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical sont présentés dans le tableau Ici dessous [8] :

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none">• La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.• Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.• Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	<ul style="list-style-type: none">• Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.• La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief• Leurs implantations au sol exigent l'utilisation des pales, donc occupent une surface plus importante que l'éolienne à tour

Tableau 1- 2 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical

1.2.2 Eolienne à axe horizontal :

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Deux types de configuration sont regroupés sous la terminologie HAWT (horizontal axis Wind turbine) : les éoliennes « amont » et « aval ». Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients.

Le principal intérêt de la formule « aval » est que la machine peut s'orienter naturellement en lacet (autour de l'axe vertical de la tour). En effet, en inclinant les pales vers l'arrière, elles forment en rotation un cône : la surface latérale virtuelle ainsi créée fait alors office de gouvernail. Par ailleurs, dans la configuration aval, la tour perturbe fortement l'écoulement de l'air (effet dit de masque) : les pales, qui passent dans ce sillage, subissent à chaque tour des efforts répétés, source de vibrations et de fatigue. On doit alors modifier l'attache des pales au sein du moyeu pour que le rotor se comporte dans son ensemble comme un balancier et absorbe ces perturbations.

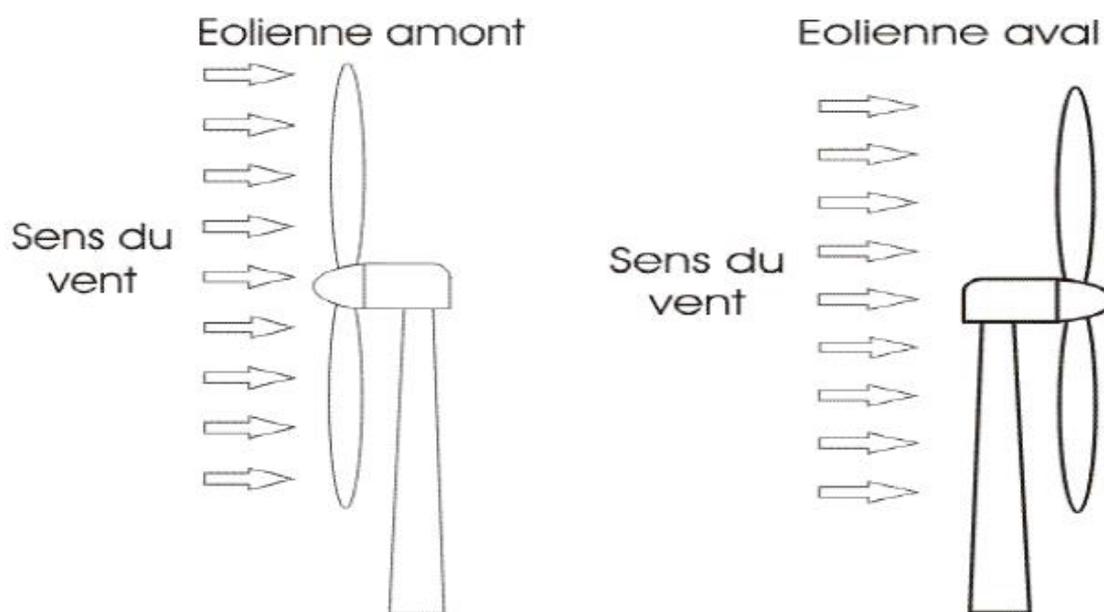


Figure 1- 6: L'éolienne « amont » et « aval »

1.2.2.1 Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale sont présentés dans le tableau ci-dessous [8] :

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> • Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical. • Cette structure capte le vent en hauteur donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage de sol. • Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûte de construction très élevée. • L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Tableau 1- 3: Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale

1.3 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal :

Une éolienne est un dispositif permettant d'utiliser l'énergie du vent. Elle convertit l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique. Elle est composée de pâles en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Les éoliennes sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et pour le pompage d'eau, et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

Exposons les définitions des deux termes suivants, qui seront plus ou moins rencontrés au fil de l'avancement de ce mémoire, données par « l'association Française de Normalisation » [9].

- ❖ AEROMOTEUR (ou Eolienne) : Moteur rotatif actionné par le vent.
- ❖ AEROGENERATEUR : Groupe constitué par une génératrice électrique entraînée par un aéromoteur.

1.4 Constituants de l'éolienne :

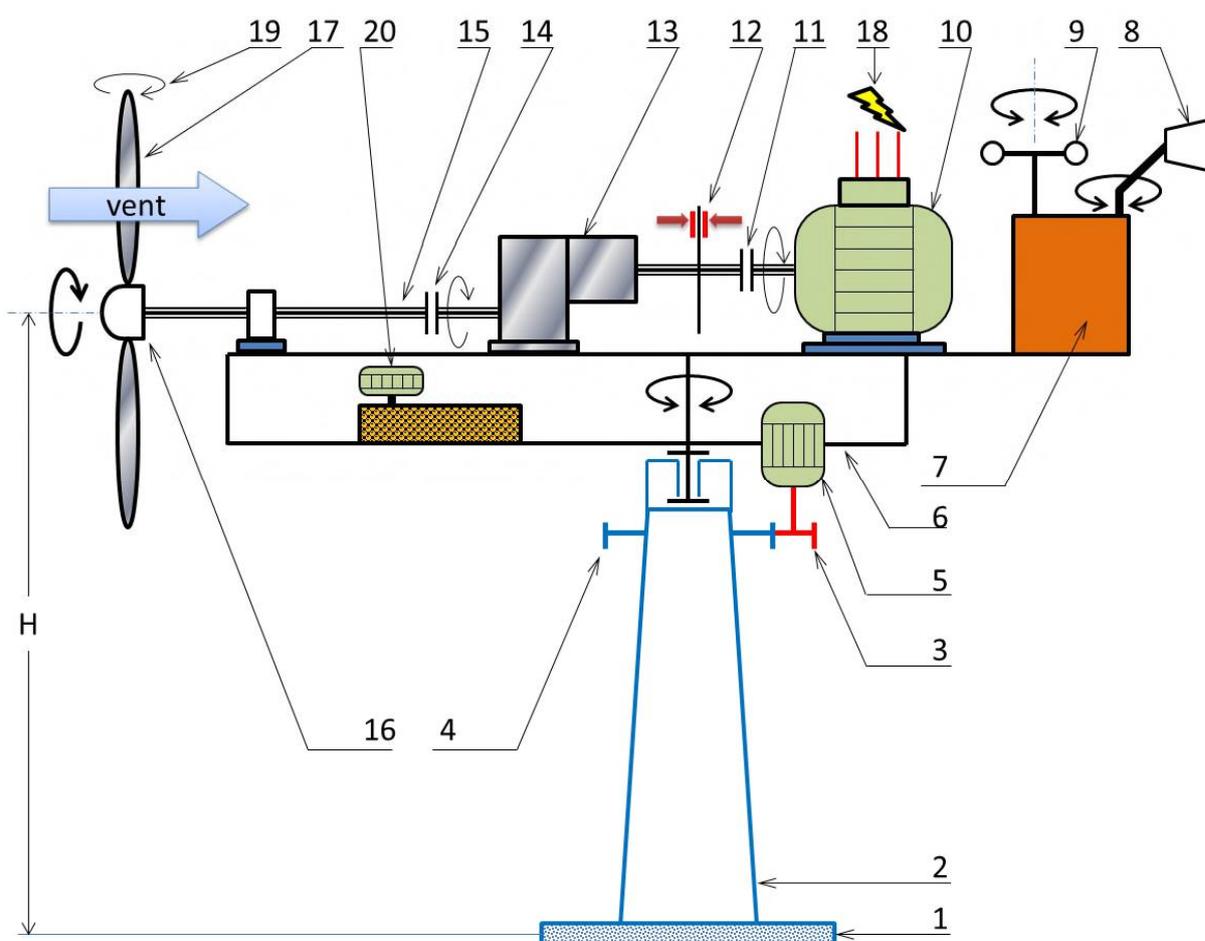


Figure 1- 7: Constitution d'une éolienne tri-pale

Chapitre 1 : Etat de l'Art.

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité central	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	L'alternateur	20	Groupe hydraulique

Tableau 1- 4: Les constituants d'une éolienne

- 1- **La fondation** : c'est généralement conçu en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne
- 2- **La tour (le mat)** : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccords nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.
- 3- **Pignon d'entraînement de la nacelle** : il s'agit de courroie de transmissions
- 4- **Roue dentée liée à la tour** : c'est un disque d'acier comportant des dents à sa périphérie
- 5- **Le système de direction** : est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.
- 6- **La nacelle** : contient les principales composantes d'une éolienne, comme le multiplicateur et la génératrice. À l'avant de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.

Chapitre 1 : Etat de l'Art.

- 7- **L'armoire de couplage au réseau électrique** : transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.
- 8- **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.
- 9- **L'anémomètre** : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.
- 10- **L'alternateur** : machine électromécanique fournissant des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation
- 11- **L'arbre rapide** : tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.
- 12- **Le frein** : permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.
- 13- **Le multiplicateur** : relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation. La génératrice : est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique. L'arbre lent : son rôle est de relier le moyeu du rotor au multiplicateur.
- 14- **Le rotor** : (les pales et le moyeu). Il tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.
- 15- **L'arbre lent** ou arbre primaire relie au multiplicateur qui tourne lentement
- 16- **Le moyeu** : est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.
- 17- **Les pales** : les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.
- 18- **Un réseau électrique** c'est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique
- 19- **Système de régulation du pas des pales** : Le principe est de **modifier l'angle des pales** par rapport au vent de manière à diminuer la vitesse de rotation des pales par une moindre prise au vent

- 20- **Groupe hydraulique** : Le groupe hydraulique central fournit la pression requise pour les composants hydrauliques comme des freins, le système pitch, les grues de service et le rotor lock

1.5 Les Systèmes De Conversion Eoliens (SCE) :

Le SCE est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. Selon la figure (I.1), il est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

Face au problème de la source d'énergie aléatoire, deux approches sont possibles (Figure 1-8) : la Génération à Vitesse Constante (GVC, cas A), et la Génération à Vitesse Variable (GVV, cas B). Dans le premier cas (GVC) une machine génératrice classique est directement connectée au réseau, et donc la plage de vitesse possible reste limitée aux alentours de la vitesse synchrone, qui est constante et imposée par le réseau [10].

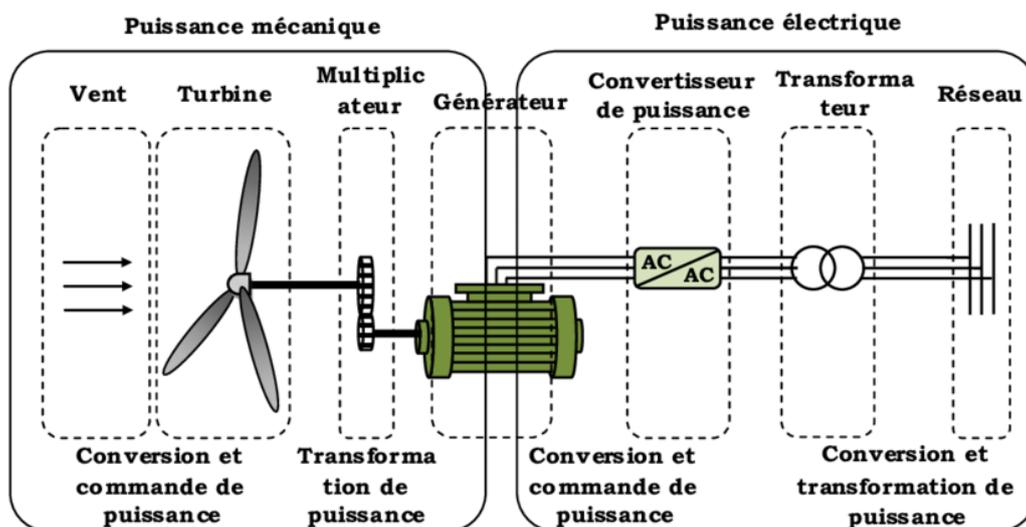


Figure 1- 8: Principaux organes du système de conversion éolien

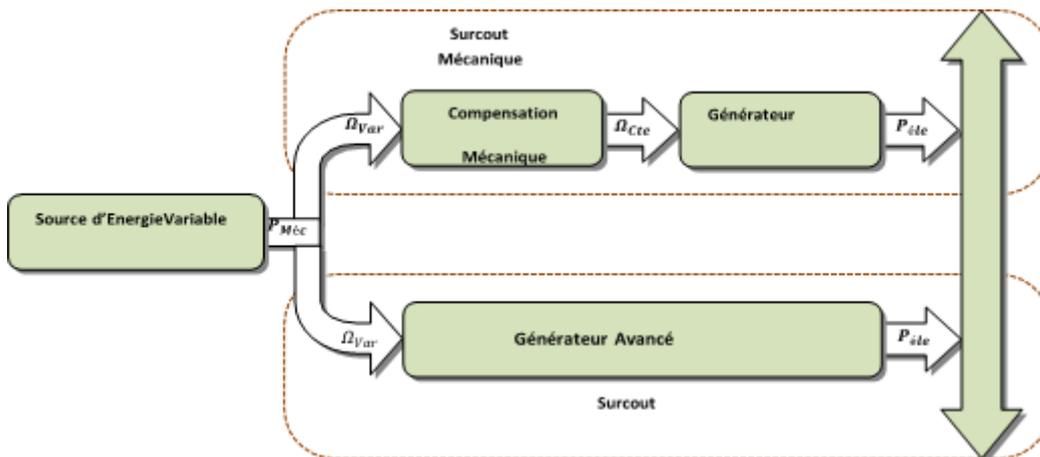


Figure 1- 9: Systèmes de génération d'énergie électrique à partir de sources d'énergie variable

1.6 Conclusion :

Durant ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements, leur avantage et leur inconvénient et des notions fondamentales sur l'aérogénérateur à axe horizontal, on était évoqué en passant par les différentes zones de fonctionnements avec la régulation mécanique.

Chapitre 01 :

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

2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

2.1 Introduction

La modélisation du moteur asynchrone est une étape importante de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie logiciel ont permis Modélisez efficacement et envisagez l'optimisation du moteur.

Dans ce chapitre on présentera le modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ainsi qu'aérodynamique des éoliennes.

L'étude de la simulation de modèle se fera dans le repère parck d-q et clarck α - β .

2.2 Les équations électriques :

La MADA est une machine à courant alternatif, elle se compose d'un stator qui est la partie fixe, et d'un rotor de forme cylindrique qui est la partie mobile.

Les courants statoriques créent un champ tournant à la vitesse :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (2.1)$$

De manière analogue les courants rotoriques produisent un champ tournant à la vitesse :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (2.2)$$

La vitesse angulaire de la MADA est donnée par :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (2.3)$$

$$\text{Et } \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.4)$$

La relation qui relie la fréquence statorique et rotorique est :

$$f_s = f_r + pf \quad (2.5)$$

Le glissement g est donné par l'expression suivante :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (2.6)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

Ayant atteint ce point, la figure 2.1 montre le circuit équivalent à le régime permanent d'une MADA (DFIM). C'est un modèle idéalisé dans lequel une seule phase du stator et du rotor est représenté. En raison de la symétrie dans la machine, les deux autres phases sont modélisées comme sensiblement égales.

On a supposé que la machine est symétrique et équilibrée dans sa structure et que l'aimantation est linéaire. Comme indiqué précédemment, on suppose que les enroulements statoriques sont alimentés par des tensions triphasées directement à partir de réseaux, tandis que le rotor est également alimenté par des tensions triphasées mais indépendantes des tensions statoriques. Le représentant de la plupart électrique ampleur et les paramètres du modèle sont comme suit :

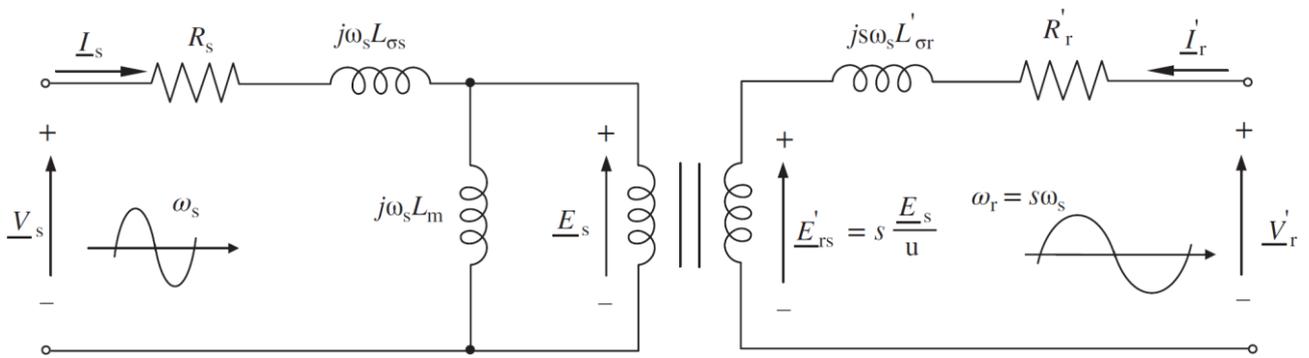


Figure 2- 1: Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du MADA.

La relation entre le stator et le rotor tourne par la phase est donnée par le coefficient u :

$$u = \frac{N_s}{N_r} \quad (2.7)$$

Certaines variations constructives peuvent affecter ce coefficient, tandis que la fem du stator et du rotor induits sont liés par :

$$E_{rs} = g \cdot \frac{E'_s}{u} \quad (2.8)$$

On notera que la relation des amplitudes dépend du glissement (ou vitesse de rotation), alors que pour le cas particulier où $u=1$ et la machine est à l'arrêt ($g=1$), la fem du stator et du rotor induits sont égaux.

En général, pour faciliter l'analyse, ce circuit est modifié en un équivalent réduit au stator, renvoi des grandeurs et des paramètres du rotor au stator au moyen des équivalences suivantes :

$$R_r = R'_r \cdot u^2 \quad L_{\sigma r} = L'_{\sigma r} \cdot u^2 \quad \underline{I}_r = \frac{I'_r}{u} \quad \underline{V}_r = V'_r \cdot u \quad \underline{E}_{rs} = \underline{E}'_{rs} \cdot u \quad (2.9)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

La notation adoptée indique les grandeurs et paramètres réels du rotor avec l'exposant premier ('), tandis que ceux réduits par le stator sont sans l'exposant premier ('). Ceci nous fournit le circuit de phase équivalent de la figure 2.2.

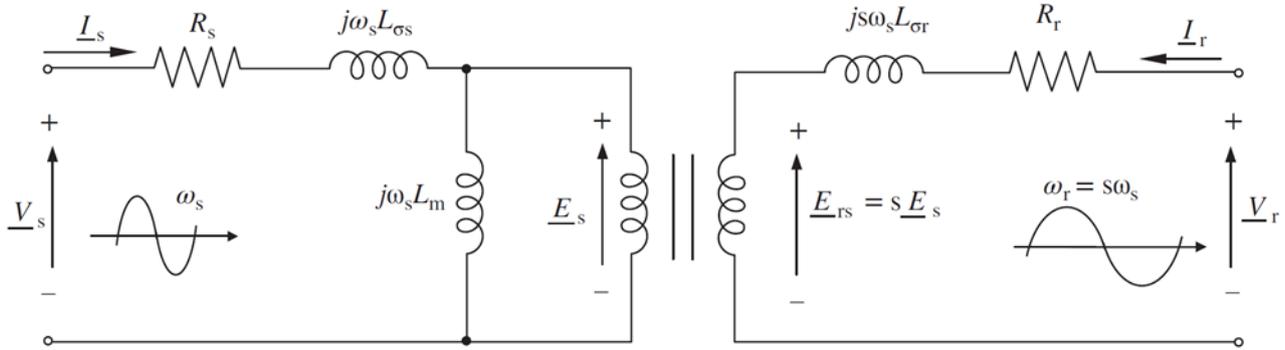


Figure 2- 2: Circuit électrique équivalent en régime stationnaire monophasé du DFIM avec paramètres du rotor, courant et tensions réduits au stator

Pour une analyse pratique, il est plus pratique que les circuits stator et rotor présentent les mêmes fréquences. Ainsi, le circuit de rotor est "converti" à la fréquence statorique f_s simplement en faisant :

$$\underline{V}_r - g\underline{E}_s = (R_r + jg\omega_s L_{\sigma r})\underline{I}_r \Rightarrow \frac{V_r}{g} - \underline{E}_s = \left(\frac{R_r}{g} + j\omega_s L_{\sigma r}\right)\underline{I}_r \quad (2.10)$$

Par conséquent, le circuit équivalent final est obtenu en renvoyant le rotor au stator, comme le montre la figure 2.3, où toutes les grandeurs sont de la même fréquence.

Les équations électriques de ce circuit équivalent en régime permanent, y compris les flux statoriques et rotoriques, sont résumées comme suit :

$$\underline{V}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{\sigma s} \underline{I}_s + j\omega_s L_m (\underline{I}_s + \underline{I}_r) \quad (2.11)$$

$$\frac{V_r}{g} = \frac{R_r}{g} \underline{I}_r + j\omega_s L_{\sigma r} \underline{I}_r + j\omega_s L_m (\underline{I}_s + \underline{I}_r) \quad (2.12)$$

Fluxe :

$$\underline{\varphi}_s = L_m (\underline{I}_s + \underline{I}_r) + L_{\sigma s} \underline{I}_s = L_s \underline{I}_s + L_m \underline{I}_r \quad (2.13)$$

$$\underline{\varphi}_r = L_m (\underline{I}_s + \underline{I}_r) + L_{\sigma r} \underline{I}_r = L_m \underline{I}_s + L_r \underline{I}_r \quad (2.14)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

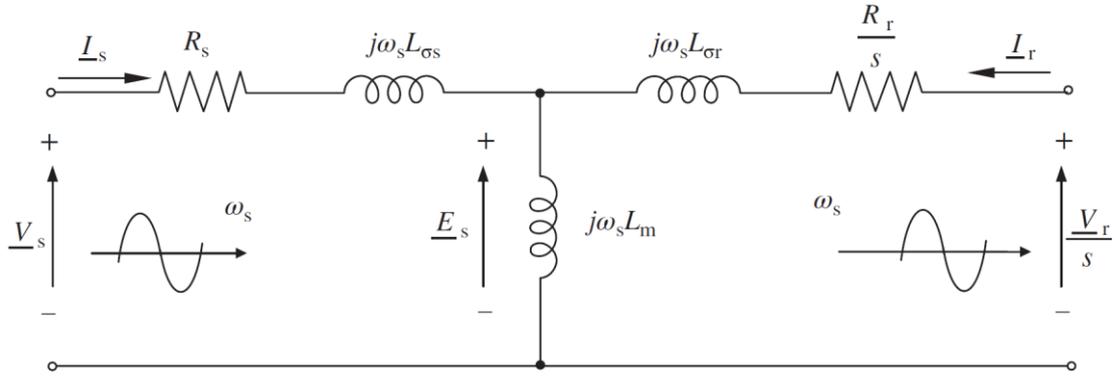


Figure 2- 3: Circuit électrique équivalent monophasé en régime permanent du DFIM référencé au stator

Où $L_s = L_m + L_{\sigma s}$ étant l'inductance du stator et $L_r = L_m + L_{\sigma r}$ étant l'inductance du rotor. À partir de toutes ces équations électriques, il est possible de dériver le diagramme de phasor pour n'importe quelle condition de fonctionnement de la machine. La figure 2.4 illustre un exemple de DFIM de plusieurs mégawatts fonctionnant à des vitesses subsynchrones et hypersynchrones.

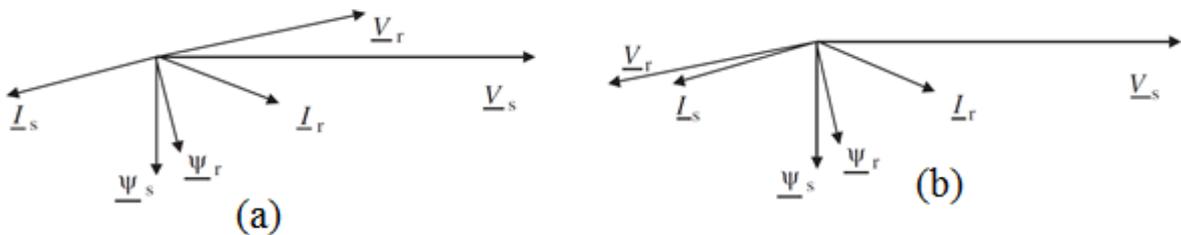


Figure 2- 4: Diagramme de phase en mode générateur à $Q_s > 0$ d'un DFIM multi-mégawatts, (a) $g > 0$ et (b) $g < 0$

2.3 Flux de puissance et modes de fonctionnement :

Le bilan de base de la puissance active du MADA révèle qu'en adoptant une convention moteur, l'addition de la puissance active du stator P_s et de la puissance active du rotor P_r , est égale à la puissance mécanique dans l'arbre P_{mec} moins les pertes de cuivre dans le stator et le rotor ($P_{cu-s} = 3R_s|I_s|^2$ et $P_{cu-r} = 3R_r|I_r|^2$) :

$$P_s + P_r = P_{cu-s} + P_{cu-r} + P_{mec} \quad (2.15)$$

Les valeurs positives de P_s et P_r sont interprétées comme la puissance absorbée par la machine, alors qu'une valeur positive de P_{mec} signifie la puissance mécanique développée par le moteur à

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

travers l'arbre. Par conséquent, le rendement de la machine particulière au fonctionnement du moteur ou du générateur peut être calculée selon ces formules suivantes :

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_s + P_r} \text{ if } P_{mec} > 0 \quad \eta = \frac{P_s + P_r}{P_m} \text{ if } P_{mec} < 0 \quad (2.16)$$

D'autre part, les puissances actives du stator et du rotor, ainsi que les puissances réactives, peuvent être calculées par les formules classiques suivantes :

$$P_s = 3 \operatorname{Re}\{\underline{V}_s \underline{I}_s^*\} \quad P_r = 3 \operatorname{Re}\{\underline{V}_r \underline{I}_r^*\} \quad (2.17)$$

$$Q_s = 3 \operatorname{Im}\{\underline{V}_s \underline{I}_s^*\} \quad Q_r = 3 \operatorname{Im}\{\underline{V}_r \underline{I}_r^*\} \quad (2.18)$$

Par conséquent, en substituant les équations de tension du stator et du rotor (2.11) – (2.12) dans les expressions de puissance (2.17–2.18), il est possible de développer des expressions de puissance montrant leur dépendance aux paramètres, aux courants et au glissement de la machine :

$$P_s = 3R_s |\underline{I}_s|^2 + 3\omega_s L_m \operatorname{Im}\{\underline{I}_s \underline{I}_r^*\} \quad P_r = 3R_r |\underline{I}_r|^2 - 3g\omega_s L_m \operatorname{Im}\{\underline{I}_s \underline{I}_r^*\} \quad (2.19)$$

$$Q_s = 3\omega_s L_s |\underline{I}_s|^2 + 3\omega_s L_m \operatorname{Re}\{\underline{I}_r \underline{I}_s^*\} \quad Q_r = 3g\omega_s L_r |\underline{I}_r|^2 + 3g\omega_s L_m \operatorname{Re}\{\underline{I}_s \underline{I}_r^*\} \quad (2.20)$$

Cependant, par définition, le couple électromagnétique développé dans l'arbre est égal à :

$$P_{mec} = T_{em} \Omega_m = T_{em} \frac{\omega}{p} \quad (2.21)$$

Ainsi, en substituant dans cette expression, des équations équivalentes de puissance (2.19) et une expression de couple qui dépend des paramètres et des courants de la machine peuvent être trouvées :

$$T_{em} = 3p L_m \operatorname{Im}\{\underline{I}_r \underline{I}_s^*\} \quad (2.22)$$

Ainsi, en substituant dans cette expression, on peut trouver des équations de puissance équivalentes (2.19) et une expression de couple qui dépend des paramètres et des courants de la machine :

$$\begin{aligned} T_{em} &= 3p \frac{L_m}{L_s} \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}_s \underline{I}_r^*\} = 3p \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}_s \underline{I}_s^*\} = 3p \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}_r \underline{I}_r^*\} \\ &= 3 \frac{L_m}{L_r} p \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}_r \underline{I}_s^*\} = 3 \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p \operatorname{Im}\{\underline{\varphi}_r^* \underline{\varphi}_s\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

Où. De plus, en négligeant les pertes de cuivre dans les équations de puissance active (2.19), il est possible de développer des expressions de puissance approximatives, qui peuvent simplement relier la puissance, le couple et la vitesse de la machine. Ces expressions simples sont résumées dans le tableau 2.1 et peuvent être utiles pour effectuer des calculs rapides. Il faut souligner que la relation entre la tension du stator et du rotor y est également présentée, ce qui est approché en négligeant la chute de tension dans les résistances du stator et du rotor et les inductances de fuite des équations (2.14) et (2.15). On remarque qu'en supposant une tension statorique V_s constante grâce à une connexion directe au réseau, l'amplitude nécessaire de la tension rotorique dépend principalement du glissement ou de la vitesse.

Par conséquent, il est possible de distinguer quatre combinaisons possibles de couple (positif ou négatif) et de vitesse (sous-synchronisme et hypersynchronisme), qui conduisent aux quatre modes de fonctionnement quadrants du DFIM [11], comme illustré sur la figure 2.5. Notez que ce n'est qu'en hypersynchronisme, lorsque le glissement est négatif, que les puissances actives du stator et du rotor présentent un signe équivalent :

$P_s + P_r \cong P_m$ $\frac{V_r}{V_s} \approx g $ $P_{mec} = T_{em} \frac{\omega_m}{\rho}$	$P_r \cong -gP_s$ $P_s \cong T_{em} \frac{\omega_s}{\rho}$	$P_{mec} \cong (1 - g)P_s$ $P_r \cong \frac{\omega_r}{p}$
----------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------

Tableau 2- 1: liste d'expressions simples et utiles

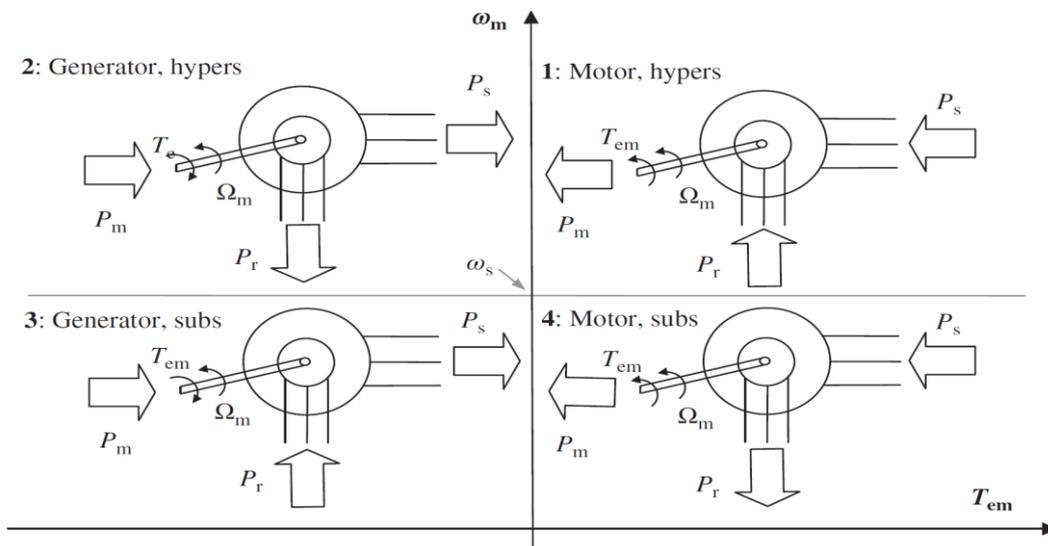


Figure 2- 5: Quatre modes de fonctionnement quadrants du DFIM en fonction de la puissance active

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

2.4 Courbes de couple représentatives en régime permanent

Il est intéressant de développer davantage le circuit de la figure 2.3, en dérivant le circuit de Thevenin équivalent aux points XY, comme illustré sur la figure 2.6. De cette manière, il est possible de calculer facilement le courant rotorique et, par conséquent, d'obtenir une expression compacte du couple électromagnétique en régime permanent.

Premièrement, sachant que la puissance mécanique P_{mec} peut être obtenue en calculant la puissance en éléments avec dépendance au glissement du circuit équivalent, on a $|\underline{V}_r| = \frac{1-g}{g} |\underline{I}_r| \cos(\varphi) + R_r \frac{1-g}{g} |\underline{I}_r|^2$ puis en divisant par la vitesse, on obtient le couple.

$$|\underline{I}_r| = \frac{\left| \left(\frac{V_s}{g} \right) - (V_{th}) \right|}{\sqrt{(R_{th} + R_r/g)^2 + \omega_s^2 (X_{th} + X_{\sigma r})^2}} \Rightarrow T_{em} = \frac{3p}{g\omega_s} [R_r |\underline{I}_r|^2 - |\underline{V}_r| |\underline{I}_r| \cos(\varphi)] \quad (2.24)$$

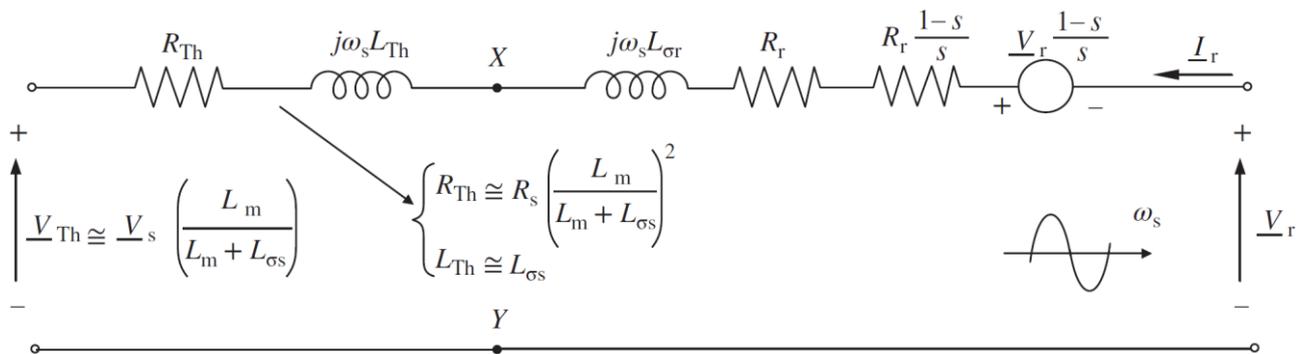


Figure 2- 6: Équivalent Thevenin circuit électrique en régime permanent du MADA (DFIM)

2.5 Mise en équations de la MADA

La modélisation de la MADA est établie sous des hypothèses simplificatrices qui sont généralement les suivantes [12]:

- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température.
- On néglige le phénomène de la saturation.
- Entrefer constant.
- Effet des encoches est négligé.
- L'inductance de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.

Nous pouvons schématiser la MADA comme montre la figure (2.7). Elle est munie de six enroulements [13]:

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

- Le stator est formé de trois enroulements fixes décalés dans l'espace de 120° et traversés par trois courants variables
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° . Ces enroulements sont court-circuités et la tension à leurs bornes est nulle.

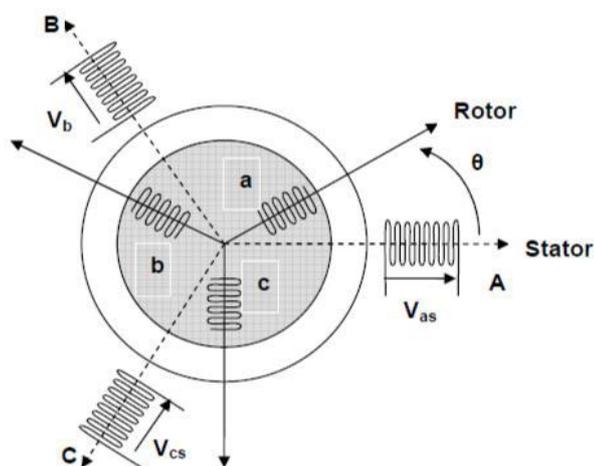


Figure 2- 7: représente la schématisation de la MADA triphasé

2.5.1 Modèle $\alpha\beta$:

Dans le développement du modèle dynamique $\alpha\beta$ du DFIM, la théorie des vecteurs spatiaux est appliquée aux équations électriques de base de la machine et, comme dans le modèle en régime permanent considéré, la machine est supposée à la fois idéale et linéaire. La figure 2.9 montre les trois différents cadres de référence rotatifs utilisés pour développer des modèles vectoriels spatiaux du DFIM.

Le référentiel statorique ($\alpha - \beta$) est un référentiel fixe, le référentiel rotor (D-Q) tourne à ω_m et le référentiel synchrone (d-q) tourne à ω_s . Les indices "s", "r" et "a" sont utilisés pour indiquer qu'un espace vectoriel est une référence au stator, au rotor et aux référentiels synchrones, respectivement. En utilisant la transformation de rotation directe et inverse, un vecteur d'espace peut être représenté dans n'importe laquelle de ces trames. [2]

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

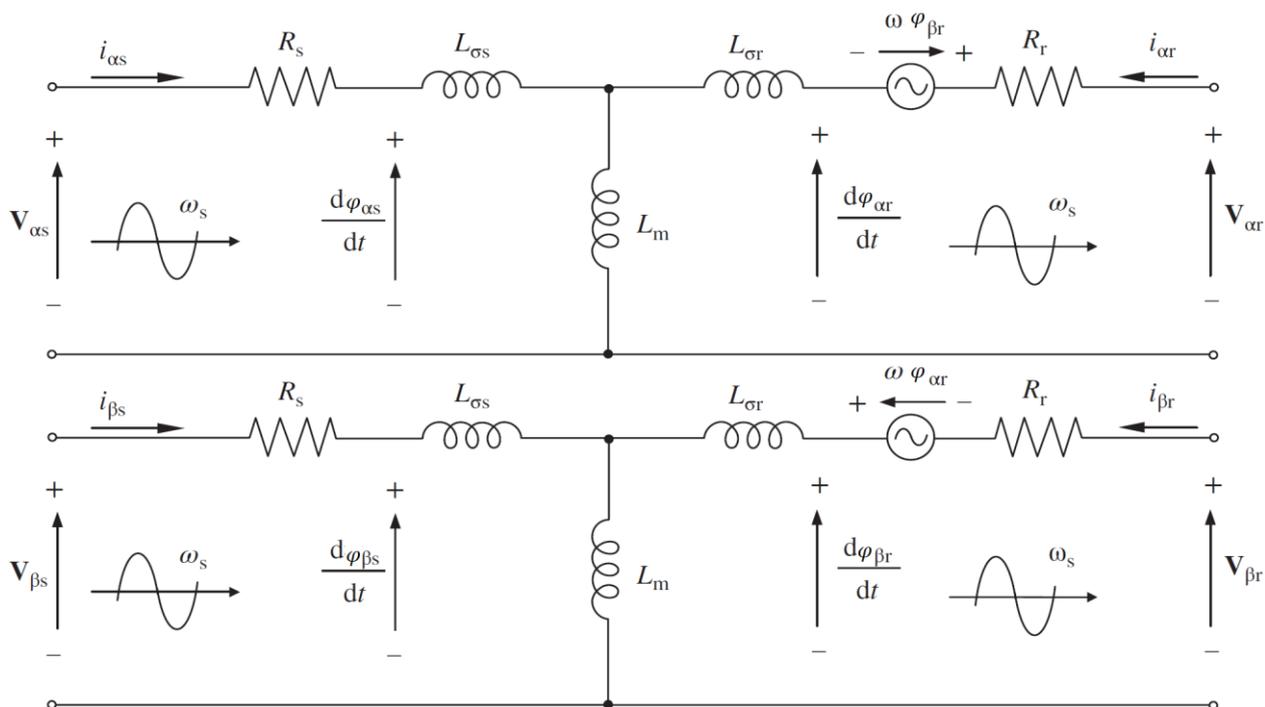


Figure 2- 8: Modèle du DFIM dans le référentiel $\alpha-\beta$

Par conséquent, les trois bobines du stator et du rotor séparément, en utilisant la théorie des vecteurs spatiaux, peuvent être représentées par deux bobines stationnaires $\alpha \beta$ pour le stator et deux bobines tournantes D-Q pour le rotor, fournissant les équations de tension suivantes :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \end{cases} \quad (2.25)$$

Où

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

Avec :

$[V_s]$: vecteur des tensions des trois phases statoriques.	$[R_s]$: vecteur des résistances statoriques.
$[V_r]$: vecteur des tensions des trois phases rotoriques.	$[R_r]$: vecteur des résistances rotoriques.
$[i_s]$: vecteur des courants qui traversent les trois phases statoriques.	$[\varphi_s]$: vecteur des flux totalisés traversant les enroulements statoriques.
	$[\varphi_r]$: vecteur des flux totalisés traversant les enroulements rotoriques.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

$[i_r]$: vecteur des courants qui traversent les trois phases rotoriques.

Si les deux équations de tension sont représentées dans le référentiel stationnaire ($\alpha \beta$), alors l'équation du rotor doit être multipliée par $e^{j\theta_m}$, ce qui donne l'ensemble d'équations suivant :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \Rightarrow \begin{cases} [V_{\alpha s}] = [R_s][i_{\alpha s}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\alpha s}] \\ [V_{\beta s}] = [R_s][i_{\beta s}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\beta s}] \end{cases} \quad (2.26)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] - j\omega \varphi_r \Rightarrow \begin{cases} [V_{\alpha r}] = [R_{\alpha r}][i_{\alpha r}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\alpha r}] + \omega \varphi_{\beta r} \\ [V_{\beta r}] = [R_{\beta r}][i_{\beta r}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{\beta r}] - \omega \varphi_{\alpha r} \end{cases} \quad (2.27)$$

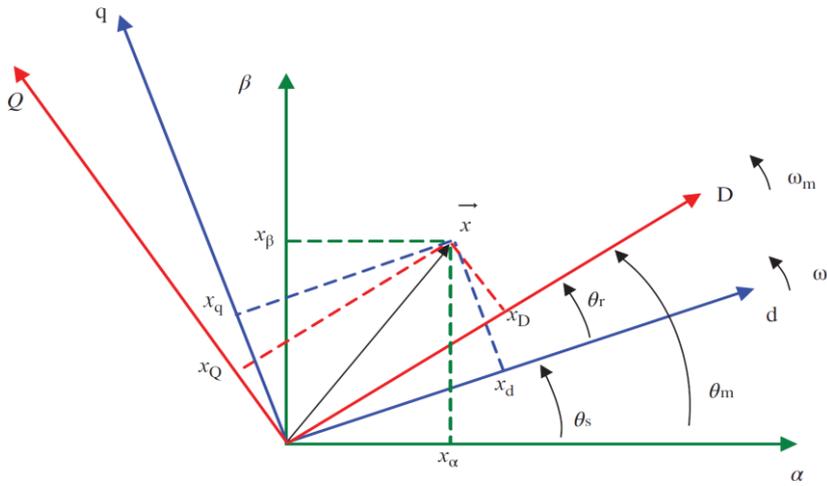


Figure 2- 9: Différents cadres de référence pour représenter les vecteurs spatiaux du MADA.

De manière similaire, il est possible de dériver les expressions de flux statorique et rotor sous forme de vecteur spatial dans un référentiel stationnaire :

$$\vec{\varphi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \Rightarrow \begin{cases} \vec{\varphi}_{\alpha s} = L_s \vec{i}_{\alpha s} + L_m \vec{i}_{\alpha r} \\ \vec{\varphi}_{\beta s} = L_s \vec{i}_{\beta s} + L_m \vec{i}_{\beta r} \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\vec{\varphi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \Rightarrow \begin{cases} \vec{\varphi}_{\alpha r} = L_m \vec{i}_{\alpha s} + L_r \vec{i}_{\alpha r} \\ \vec{\varphi}_{\beta r} = L_m \vec{i}_{\beta s} + L_r \vec{i}_{\beta r} \end{cases} \quad (2.29)$$

Par conséquent, à partir de l'ensemble des équations dérivées, le circuit équivalent α - β est développé comme représenté à la figure 2.8. Il existe un circuit équivalent pour chaque coordonnée α - β , dans lequel toutes les grandeurs de tension, de courant et de flux sont sinusoïdales avec une fréquence de ω_s .

D'autre part, les puissances actives et réactives des côtés stator et rotor peuvent être calculées selon les équations suivantes :

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{\alpha s}i_{\alpha s} + V_{\beta s}i_{\beta s}) \quad P_r = \frac{3}{2}(V_{\alpha r}i_{\alpha r} + V_{\beta r}i_{\beta r}) \quad (2.30)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{\beta s}i_{\alpha s} - V_{\alpha s}i_{\beta s}) \quad Q_r = \frac{3}{2}(V_{\beta r}i_{\alpha r} - V_{\alpha r}i_{\beta r}) \quad (2.31)$$

Alors que le couple électromagnétique, créé par la MADA, peut être calculé par les expressions équivalentes suivantes :

$$T_{em} = \frac{3}{2}PIm\{\vec{\varphi}_r \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2}P(\varphi_{\beta r}i_{\alpha r} - \varphi_{\alpha r}i_{\beta r}) \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_r} \{\vec{\varphi}_s \vec{i}_r^*\} = \frac{3}{2}PIm\{\vec{\varphi}_s^* \vec{i}_s\} \\ &= \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_r} \{\vec{\varphi}_r^* \vec{i}_s\} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} PIm\{\vec{\varphi}_r^* \vec{\varphi}_s\} = \frac{3}{2}L_m PIm\{\vec{i}_s \vec{i}_r^*\} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Où

$$\sigma = 1 - L_m^2/L_s \cdot L_r$$

Ainsi, en réorganisant les expressions (2.26) – (2.29), nous pouvons développer plusieurs représentations d'espace d'état du DFIM, qui sont utiles, par exemple, à des fins de simulation ou d'analyse. L'expression suivante montre l'un d'eux dans lequel le vecteur espace état est composé des flux stator et rotor :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{\varphi}_s \\ \vec{\varphi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_r}{\sigma L_r} + j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\varphi}_s \\ \vec{\varphi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{V}_s \\ \vec{V}_r \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

En développant cette dernière expression dans les composantes ab, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha s} \\ \varphi_{\beta s} \\ \varphi_{\alpha r} \\ \varphi_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{-R_r}{\sigma L_r} & \omega \\ 0 & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \omega & \frac{-R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha s} \\ \varphi_{\beta s} \\ \varphi_{\alpha r} \\ \varphi_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{\alpha r} \\ v_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Par conséquent, en ajoutant l'équation de mouvement mécanique qui décrit le comportement de la vitesse du rotor :

$$T_{em} - T_{load} = j \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.36)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

T_{load} : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

2.5.2 Modèle D-Q

Le modèle vectoriel spatial du MADA peut également être représenté dans un cadre en rotation synchrone. A cet effet, en multipliant les expressions de tension (2.25) par $e^{-j\theta_s}$ et $e^{-j\theta_r}$, respectivement, on obtient les équations de tension d-q:

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] + j\omega_s\varphi_s \Rightarrow \begin{cases} [V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{ds}] + j\omega_s\varphi_{qs} \\ [V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{qs}] + j\omega_s\varphi_{ds} \end{cases} \quad (2.37)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] + j\omega_r\varphi_r \Rightarrow \begin{cases} [V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{dr}] + j\omega_r\varphi_{qr} \\ [V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{qr}] + j\omega_r\varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.38)$$

De même, les flux donnent :

$$\vec{\varphi}_s = L_s\vec{i}_s + L_m\vec{i}_r \Rightarrow \begin{cases} \vec{\varphi}_{ds} = L_s\vec{i}_{ds} + L_m\vec{i}_{dr} \\ \vec{\varphi}_{qs} = L_s\vec{i}_{qs} + L_m\vec{i}_{qr} \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\vec{\varphi}_r = L_s\vec{i}_s + L_m\vec{i}_r \Rightarrow \begin{cases} \vec{\varphi}_{dr} = L_s\vec{i}_{ds} + L_r\vec{i}_{dr} \\ \vec{\varphi}_{qr} = L_s\vec{i}_{qs} + L_r\vec{i}_{qr} \end{cases} \quad (2.40)$$

Par conséquent, à partir des équations ci-dessus, le circuit électrique équivalent en d-q est obtenu, comme le montre la figure 2.10. Cependant, cette représentation de modèle avec des expressions équivalentes de puissance et de couple comme dans le modèle $\alpha\beta$, ainsi que le modèle de simulation informatique, peuvent être développées plus avant.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

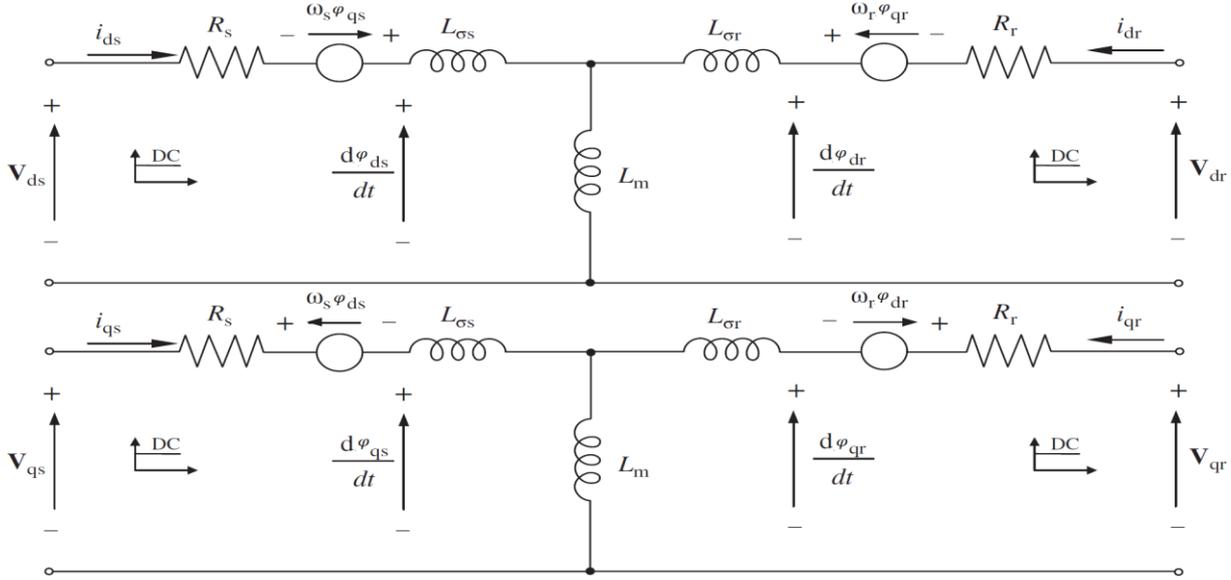


Figure 2- 10: Modèle du DFIM dans le référentiel d - q

2.6 Modélisation dynamique du système côté réseaux

2.6.1 Modèle $\alpha\beta$:

$$v_{\alpha f} = R_f i_{\alpha g} + L_f \frac{di_{\alpha g}}{dt} + v_{\alpha g} \quad (2.41)$$

$$v_{\beta f} = R_f i_{\beta g} + L_f \frac{di_{\beta g}}{dt} + v_{\beta g} \quad (2.42)$$

$$v_f = R_f i_g + L_f \frac{di_g}{dt} + v_g \quad (2.43)$$

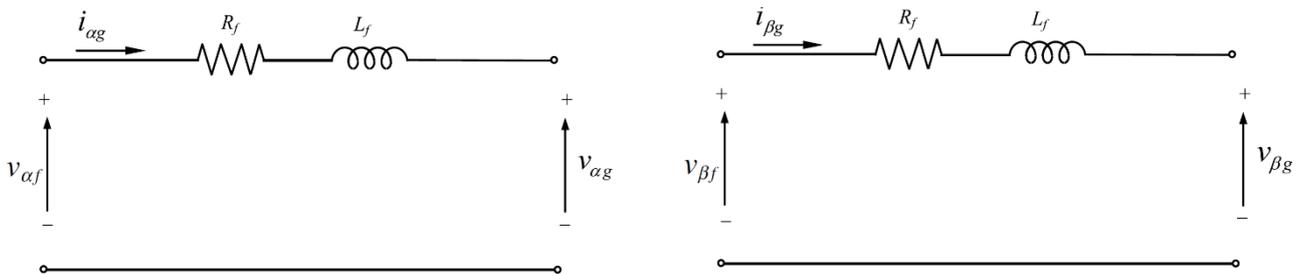


Figure 2- 11: Modèle du DFIM dans le référentiel α - β en coordonnées stationnaires.

$$\vec{v}_f^s = v_{\alpha f} + jv_{\beta f} \quad (2.44)$$

$$\vec{v}_g^s = v_{\alpha g} + jv_{\beta g} \quad (2.45)$$

$$\vec{i}_g^s = i_{\alpha g} + ji_{\beta g} \quad (2.46)$$

2.6.2 Modèle d-q :

De la même manière, en multipliant l'équation (2.42) par $e^{-j\theta}$ à partir des expressions $\alpha - \beta$ les expressions dq sont également dérivées (cadre tournant) :

$$\vec{v}_f^s \cdot e^{-j\theta} = R_f \vec{i}_g^s e^{-j\theta} + L_f \frac{d\vec{i}_g^s}{dt} e^{-j\theta} + \vec{v}_g^s e^{-j\theta} \quad (2.47)$$

$$\vec{v}_f^a = R_f \vec{i}_g^a + L_f \frac{d\vec{i}_g^a}{dt} + \vec{v}_g^a + j\omega_a L_f \vec{i}_g^a \quad (2.48)$$

Avec des composants dq,

$$\vec{v}_f^a = v_{\alpha f} + jv_{\beta f} \quad (2.49)$$

$$\vec{v}_g^a = v_{\alpha g} + jv_{\beta g} \quad (2.50)$$

$$\vec{i}_g^a = i_{\alpha g} + ji_{\beta g} \quad (2.51)$$

Par conséquent, en décomposant en composantes dq, les équations de base pour l'orientation vectorielle sont obtenues :

$$v_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + v_{dg} - \omega_a L_f i_{qg} \quad (2.52)$$

$$v_{dq} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + v_{qg} - \omega_a L_f i_{dg} \quad (2.53)$$

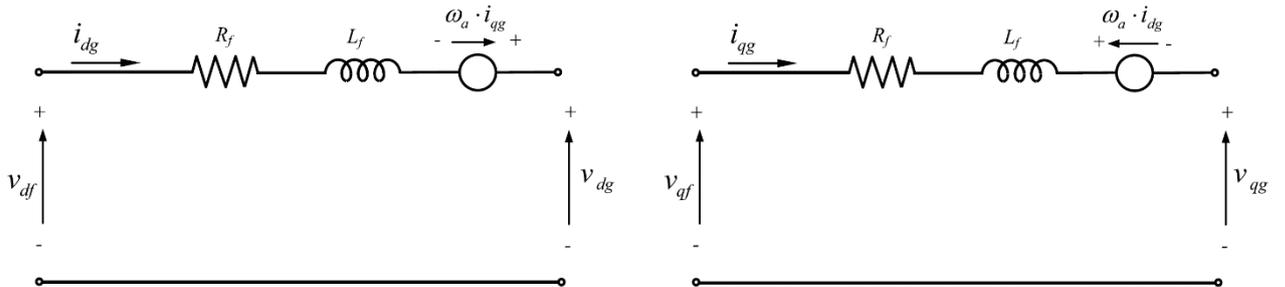


Figure 2- 12: d-q Modèle du système latéral de grille en coordonnées stationnaires.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

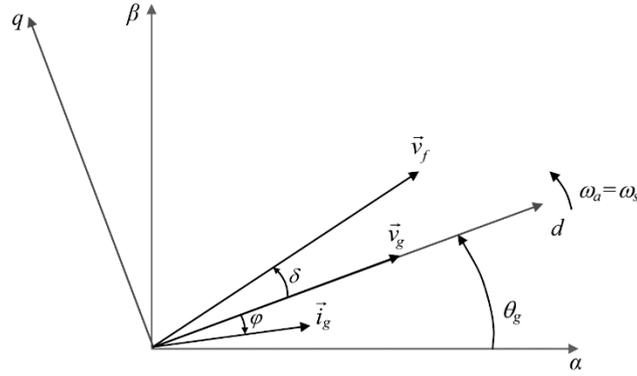


Figure 2- 13: Alignement avec l'axe d du vecteur spatial de tension de réseaux

Pour calculer les es termes constants on a :

$$v_{dg} = |\vec{v}^a| \quad (2.54)$$

$$v_{qg} = 0 \quad (2.55)$$

$$\omega_a = \omega_s \quad (2.56)$$

Cet alignement de tension de réseau simplifie non seulement légèrement les équations de tension du système, mais réduit également les calculs de puissance active et réactive. Ainsi, si l'on calcule les puissances actives et réactives totales échangées avec le réseau, on trouve

$$P_g = \frac{3}{2} \text{Re}\{\vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^*\} = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \quad (2.57)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} \text{Im}\{\vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^*\} = \frac{3}{2} (v_{qg} i_{dg} + v_{dg} i_{qg}) \quad (2.58)$$

En considérant les relations (2.53) et (2.54), le calcul de puissance peut être simplifié à :

$$P_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} = \frac{3}{2} |\vec{v}^a| i_{dg} \quad (2.59)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} v_{dg} i_{qg} = -\frac{3}{2} |\vec{v}^a| i_{qg} \quad (2.60)$$

Les besoins en termes constants se réduisent facilement à partir des équations (2.59) et (2.60) :

$$K_{Pg} = \frac{1}{\frac{3}{2} v_{dg}} \quad (2.61)$$

$$K_{Qg} = \frac{1}{-\frac{3}{2} v_{dg}} \quad (2.62)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

2.7.1 Aérodynamique des Éoliennes

La théorie du disque actionneur est basée sur l'application du bilan énergétique et de l'équation de Bernoulli pour expliquer le processus d'extraction de l'énergie cinétique du vent d'une manière très simple. Le vent du rotor de récupération d'énergie est considéré comme un disque poreux, ce qui entraîne une diminution du débit d'air, entraînant un saut de pression de surface sur le disque et une déviation du flux d'air en aval (Figure 2-14).

La théorie des impulsions est utilisée pour étudier le comportement des éoliennes et formuler certaines hypothèses. En supposant que l'air soit incompressible, le mouvement du fluide est stable et la variable étudiée a la même valeur dans une partie donnée de la conduite d'air. [14]

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique dans le vent traversant à une vitesse V_v , surface A_1 , est exprimée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A_1 V_v^3 \quad (2.63)$$

Où ρ est la densité de l'air.

L'éolienne peut récupérer qu'une partie de ce pouvoir :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R_{ra}^2 V^3 C_p \quad (2.64)$$

Où R_{ra} est le rayon de l'éolienne et C_p est le coefficient de puissance, un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité de l'éolienne dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

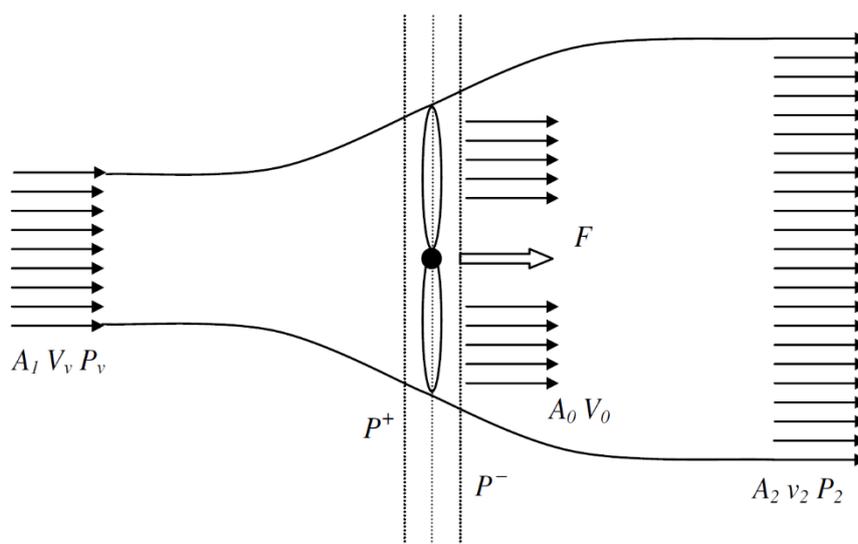


Figure 2- 14: Schéma de l'écoulement du fluide à travers un actionneur en forme de disque.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

Pour une éolienne, ce coefficient est fonction de la vitesse du vent, la vitesse de rotation de l'éolienne, et l'angle de tangage. C_p est souvent donnée en fonction du rapport de vitesse de pointe, λ , défini par :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad (2.65)$$

Où R est la longueur des pales (rayon du rotor de la turbine) et Ω_t est la vitesse angulaire du rotor.

La valeur maximale théorique de C_p est donnée par la limite de Betz :

$$C_{p_theo_max} = 0.593 = 59.3\% \quad (2.66)$$

Le couple rotor est obtenue à partir de la puissance reçue et de la vitesse de rotation de la turbine :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\rho\pi R^2 V_v^3}{2\Omega_t} C_p = \frac{\rho\pi R^3 V_v^2}{2\lambda} C_p = \frac{\rho\pi R^3 V_v^2}{2} C_t \quad (2.97)$$

Où C_t est le coefficient de couple. Les coefficients de puissance et de couple sont liés par l'équation :

$$C_p(\lambda) = \lambda \cdot C_t(\lambda) \quad (2.68)$$

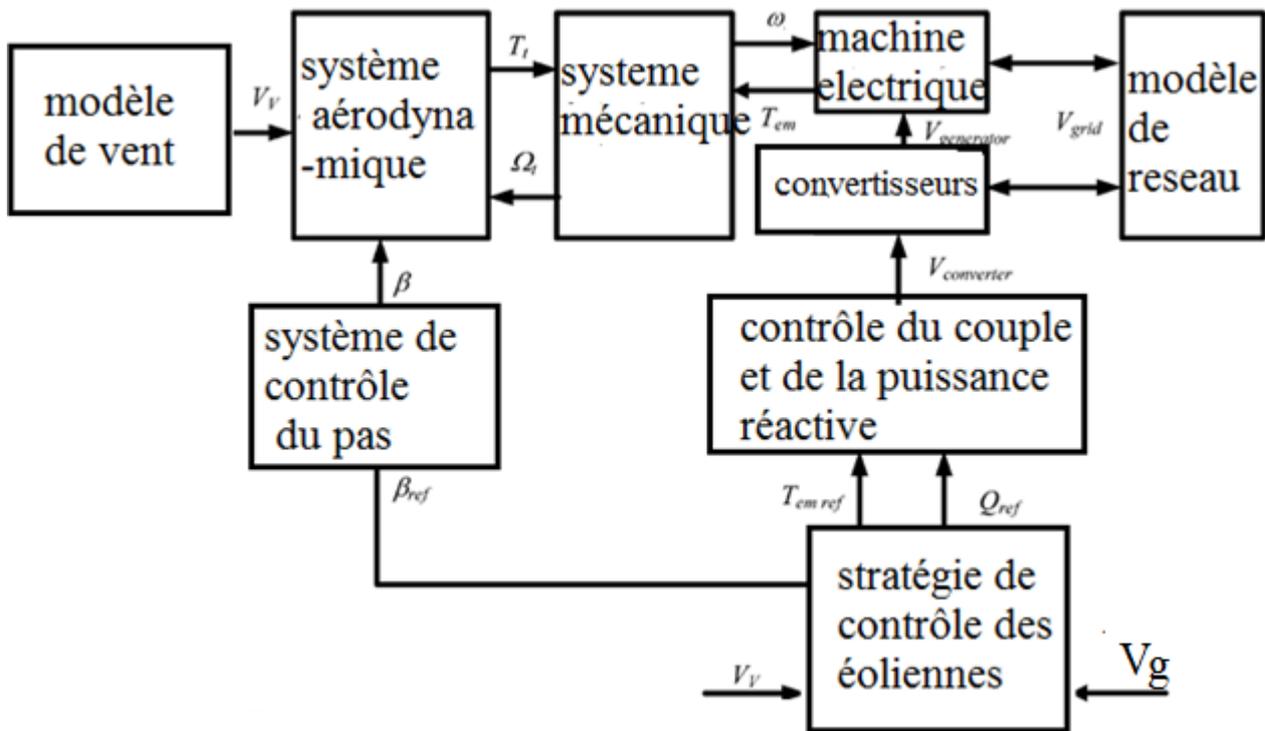


Figure 2- 15: Schéma de bloc d'un modèle d'éolienne à vitesse variable.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

2.7.2 Modèle Aérodynamique

Le modèle aérodynamique représente l'extraction de puissance du rotor, en calculant le couple mécanique en fonction du flux d'air sur les pales. La vitesse du vent peut être considérée comme la vitesse moyenne du vent incident sur la zone balayée par les pales dans le but d'évaluer le couple moyen dans l'essieu basse vitesse.

Le couple généré par le rotor a été défini par l'expression suivante :

$$T_t = \frac{\rho \pi R^3 v_f^2}{2} C_t \quad (2.69)$$

La façon la plus directe d'exprimer le couple et le coefficient de puissance C_p consiste à utiliser des expressions analytiques en fonction du rapport de pas de pointe (λ) et Angle de calage des pales (β). Une expression commune qui s'adapte facilement aux différentes turbines :

$$C_p = k_1 \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3 \beta - k_4 \beta^{k_5} - k_6 \right) (e^{k_7/\lambda_i}) \quad (2.70)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + k_8} \quad (2.71)$$

Et le ratio de vitesse :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v_f} \quad (2.72)$$

2.8 Génération d'impulsions des Interrupteurs Commandés :

Les commandes d'ordre pour les semi-conducteurs contrôlés du convertisseur à deux niveaux peuvent être générées selon différentes lois appelées « Modulation ». Cette section présente certaines des techniques de modulation les plus couramment utilisées.

- Technologie de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI-PWM)
- Technologie de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI-PWM) avec injection de troisième harmonique
- Technologie de modulation vectorielle spatiale (SVM)

Afin de simplifier la recherche de modulation des convertisseurs généraux à deux niveaux, les sous-indices liés aux convertisseurs côté grille ou rotor : S_a, S_b et S_c sont éliminés des symboles des commandes de contrôle. Par conséquent, tout dans cette section peut être appliqué à la fois aux convertisseurs côté rotor et côté réseau. [14]

2.8.1 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI- PWM) :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

l'onduleur (niveau -puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension a haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur. Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désires), la vectorielle et la modulation a bande d'hystérésis.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement. [15]

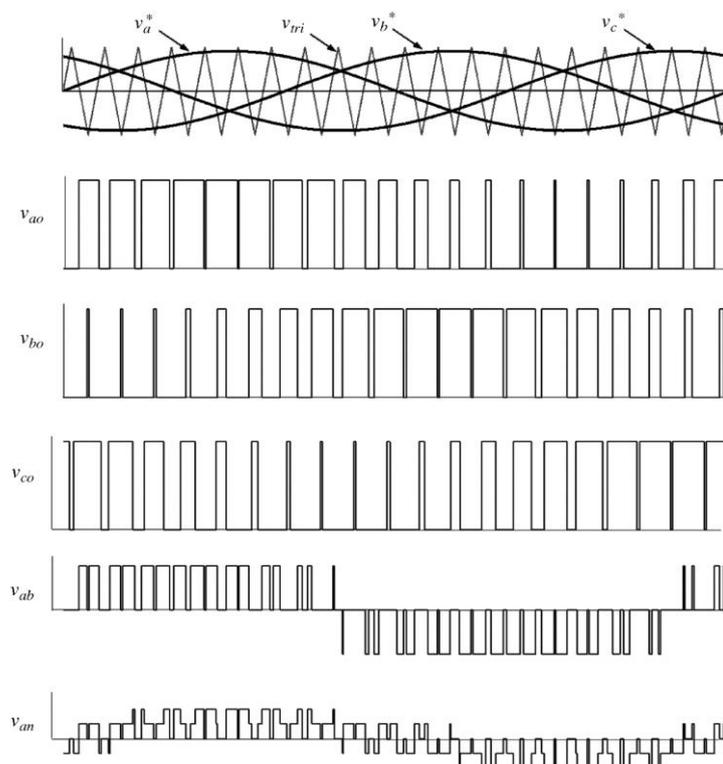


Figure 2- 16: Les tensions de sortie du convertisseur à deux niveaux avec PWM sinusoidal
 $m_f=20, m_a=0.9$

Les relations entre les amplitudes et les fréquences des signaux nécessitent les indices suivants :

1. Indice de modulation de fréquence (m_f). La relation entre la fréquence du signal triangulaire et le signal de référence peut être exprimée sous la forme :

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{ref}} \quad (2.73)$$

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

2. Indice de modulation d'amplitude (m_a). La relation entre l'amplitude du signal de référence et le signal triangulaire peut être exprimée sous la forme :

$$m_a = \frac{|V^*|}{|V_{tri}|} \quad (2.74)$$

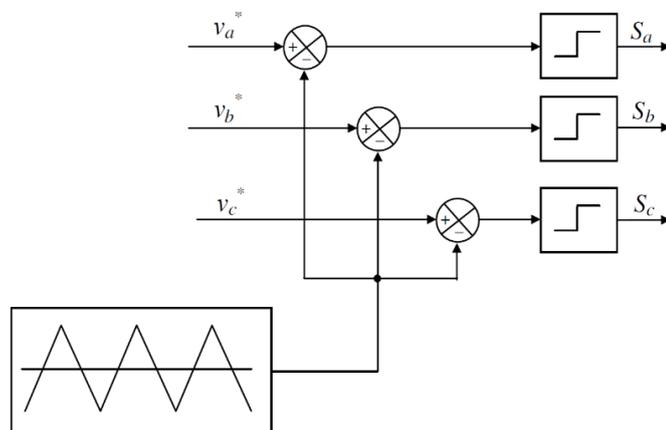


Figure 2- 17: Diagramme fonctionnel simplifié du MLI

2.8.2 MLI-PWM sinusoïdal avec injection de troisième harmonique :

La technologie PWM sinusoïdale permet différentes modifications pour obtenir plusieurs améliorations spécifiques. Dans ce cas, l'augmentation de l'amplitude de tension de sortie maximale réalisable a été étudiée. Par conséquent, en ajoutant simplement le signal de troisième harmonique à chaque signal de référence, une augmentation significative de l'amplitude peut être obtenue à la tension de sortie sans perte de qualité, comme le montre la figure 2-18. [16]

Il est à noter que l'amplitude du signal de référence généré par l'addition de la troisième harmonique (V_3) et de la première harmonique (V_1) est inférieure à la première harmonique. En sortie, l'amplitude obtenue à partir du premier harmonique est égale à l'amplitude du premier harmonique de référence. Veuillez également noter que la troisième harmonique n'est pas visible à la tension de sortie.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

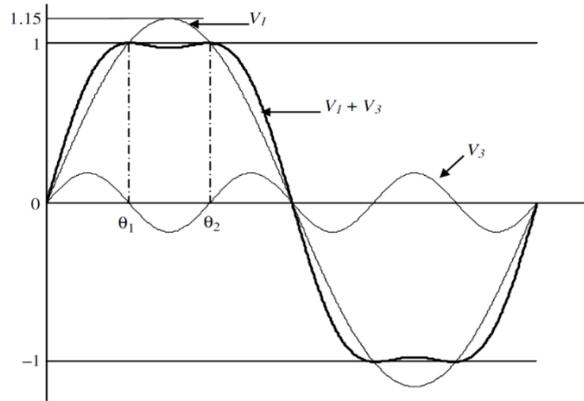


Figure 2- 18: Injection de troisième harmonique au signal de référence, pour l'augmentation d'amplitude de la composante fondamentale

Par contre, le signal de référence prend deux maxima à $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ et $\theta_2 = \frac{2\pi}{3}$. Les équations du premier et du troisième harmonique sont données

$$V_1 = V_{1max} \sin \theta \quad (2.75)$$

$$V_3 = V_{3max} \sin(3\theta) \quad (2.76)$$

Ainsi, lorsque $\theta_1 = \frac{\pi}{3}$ le premier harmonique de la tension de sortie (ligne vers neutre) prend la valeur $\frac{V_{bus}}{2}$. En substituant dans l'équation (2.66), on trouve :

$$\frac{V_{bus}}{2} = V_{1max} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (2.77)$$

Par conséquent, l'amplitude du premier harmonique donne :

$$V_{1max} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{bus}}{1.73} \quad (2.78)$$

Dans ce cas, l'indice de modulation d'amplitude est toujours défini comme dans l'équation (2.29); cependant, comme la référence est composée de l'addition de deux signaux (composante fondamentale et troisième harmonique injectée), ma se réfère uniquement à la composante fondamentale.

$$m_a = \frac{|V^*|}{|V_{tri}|} \quad (2.79)$$

Grâce à l'injection de troisième harmonique, quelle que soit la zone de surmodulation, l'amplitude de tension de sortie fondamentale maximale pouvant être obtenue est de $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$.fois celle du PWM traditionnel. Par conséquent, l'indice de modulation d'amplitude peut être étendu à :

Région de modulation linéaire :

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

$$0 \leq m_a \leq 1.15 \quad (2.80)$$

Pour chaque référence de phase, l'injection de troisième harmonique est égale :

$$V_{1max} \sin(\omega t) + V_{3max} \sin(\omega t) \quad (2.81)$$

$$V_{1max} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\right) + V_{3max} \sin(\omega t) \quad (2.82)$$

$$V_{1max} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\right) + V_{3max} \sin(\omega t) \quad (2.83)$$

Une procédure simple pour injecter la troisième harmonique est donnée par l'expression :

$$V_3 = -\frac{\max\{V_a^*, V_b^*, V_c^*\} + \min\{V_a^*, V_b^*, V_c^*\}}{2} \quad (2.84)$$

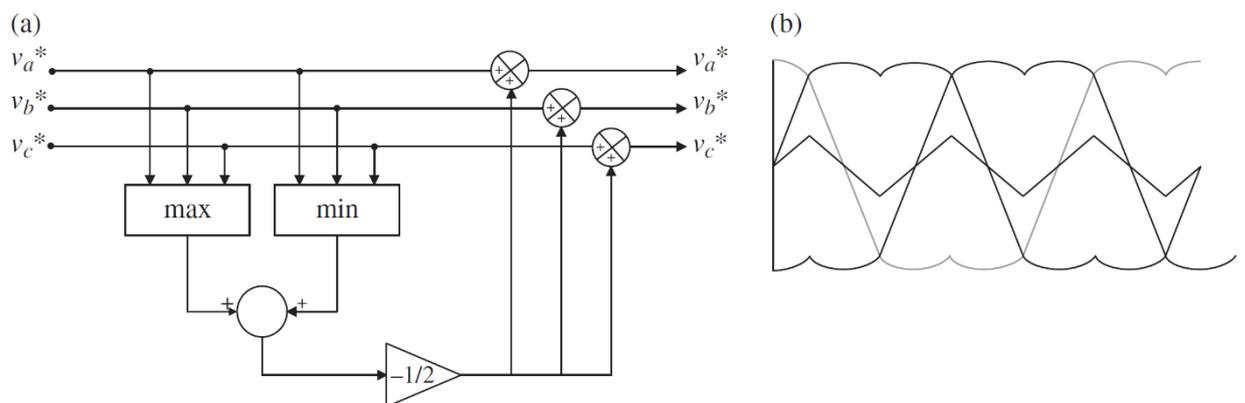


Figure 2- 19: : (a)Schéma fonctionnel pour l'injection simplifiée de troisième harmonique. (b) Signal injecté résultant et référence de tension, avec génération simplifiée de troisième harmonique

Le schéma fonctionnel de la mise en œuvre est illustré à la figure 19-a. Notez que, avec cette procédure, non seulement la troisième harmonique est injectée, puisque le signal ajouté résultant prend une forme triangulaire, comme illustré sur la figure 19-b.

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

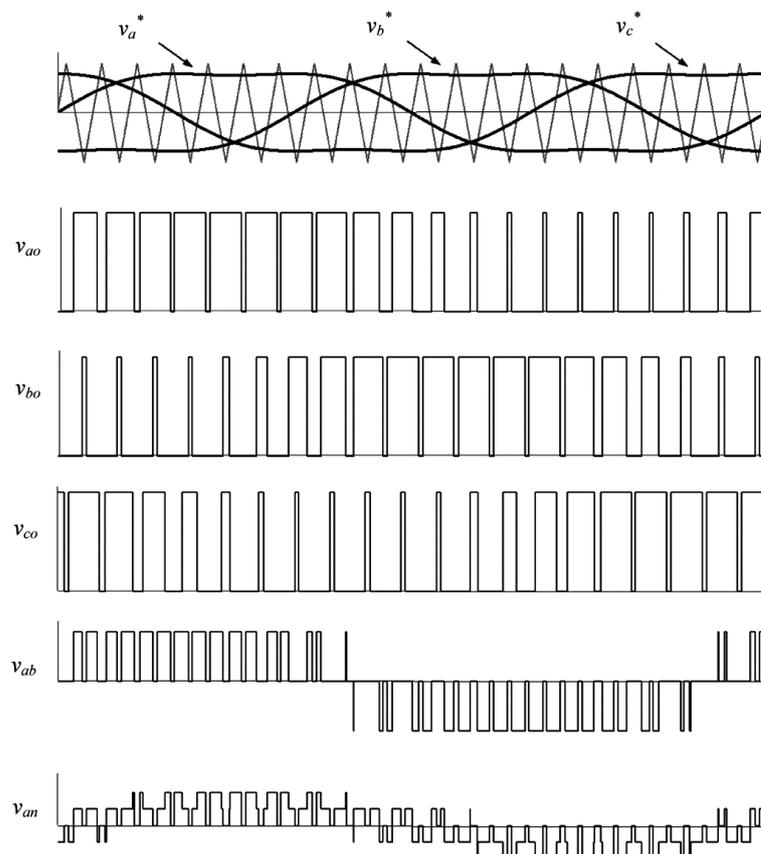


Figure 2- 20: Tensions de sortie du convertisseur à deux niveaux avec PWM sinusoïdal $m_f=20$, $m_a=0.9$ avec injection de troisième harmonique

2.9 Modélisation du convertisseur

2.9.1 Modélisation du redresseur :

Le redresseur MLI est simplement un onduleur de tension utilisé à l'envers permet de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (comme un redresseur à diodes), mais en absorption sinusoïdale de courant, donc à facteur de puissance unitaire [17]. Il est construit à base des composants semi-conducteurs bidirectionnels (conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles) et commandés à l'ouverture et à la fermeture, tels que les IGBTs pour de petites puissances et moyennes puissances ou les GTOs pour les grandes puissances [18]. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage. Celui du côté continu a une double fonction, le stockage d'énergie et le filtrage de la tension continue, c'est des condensateurs qui assurent ces fonctionnalités [19].

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

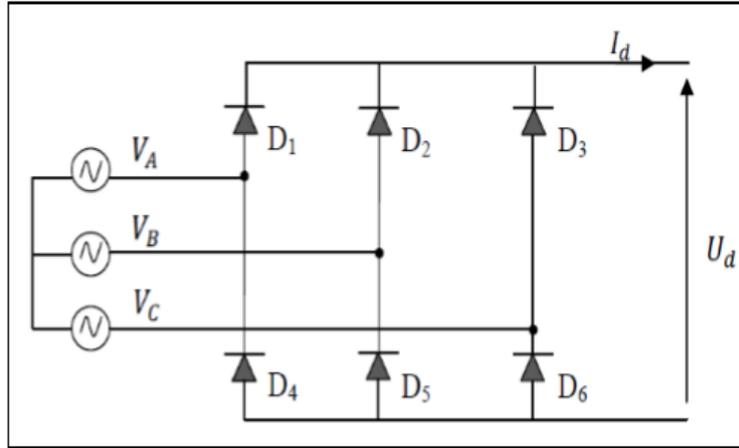


Figure 2- 21: : Représenté redresseur triphasé

Si nous considérons l'expression des tensions simples de la forme suivante :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(\omega t) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\right) \end{cases} \quad (2.85)$$

$$U(t) = \max\{V_a, V_b, V_c\} + \min\{V_a, V_b, V_c\} \quad (2.86)$$

2.9.2 Modélisation du l'onduleur :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables. Après redressement, la tension filtrée V_{busf} est appliquée à l'onduleur. Il est le cœur de l'organe de commande de la MADA et peut être considéré comme un amplificateur de puissance.

Les couples d'interrupteurs (K_{11} et K_{12}), (K_{21} et K_{22}) (K_{31} et K_{32}) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes ($D_{i(i=1,2,,6)}$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande ($S_{i(i=a,b,c)}$)

- $S_i = 1$, Le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$, Le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phases $V_{in(a,b,c)}$ en fonction des signaux de commande S_i :

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

$$V_{in(a,b,c)} = S_i V_{bus} - \frac{V_{bus}}{2} \quad (2.87)$$

Les trois tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} et sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « 0 ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{0b} \\ V_{bc} = V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{0c} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{0a} \end{cases} \quad (2.88)$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif (MADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (2.89)$$

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.90)$$

La substitution de (2.88) dans (2.89) nous donne :

$$V_{n0} = -\frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (2.91)$$

En remplaçant (2.91) dans (2.89) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (2.92)$$

L'utilisation de l'expression (2.84) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{bus}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.93)$$

Avec V_{a0} , V_{b0} et V_{c0} comme les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si, V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert donnée par :

Chapitre 02 : Modélisation de la machine à MADA (asynchrone à double alimentation)

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

2.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une étude de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sur deux repère (α - β / d-q).

Basent sur cette étude on a pu constater le flux de puissance, les modes de fonctionnement et les courbes de couples en régimes permanent de la machine à MADA.

Après des recherches approfondies, nous avons découvert l'aérodynamique des éoliennes et leurs modèles, leur surface et leurs stratégies indirectes pour contrôler la vitesse des turbines.

Enfin, il y a une petite analyse de la modélisation du redresseur et de l'onduleur

Chapitre 03 :
Synthèse des lois de commande
appliquées à la MADA

3 Stratégie de commande du MADA base à éolienne.

3.1 Introduction

Le développement des techniques de commande à vitesse variable rend nécessaire la modélisation du moteur électrique d'une façon précise pour pouvoir simuler son comportement et notamment pour élaborer les fonctions de transfert nécessaires à sa commande.

Dans cette partie nous engageons dans une vue d'ensemble des principes de contrôle et des stratégies de contrôle des turbines basées sur MADA, l'analyse en régime permanent et l'ajustement des régulateurs PI et MPTT. Ainsi que retrouver les creux de tension.

3.2 Analyse en régime permanent

Dans cette section, le modèle d-q du DFIM est davantage exploité afin de calculer les grandeurs les plus intéressantes de la machine en régime permanent [11]

Par conséquent, en supposant qu'au moyen de la commande, le DFIM va devoir fonctionner à des demandes, à savoir T_{em} , m et Q_s , la tâche consiste à déduire les amplitudes électriques restantes de la machine en régime permanent, telles que les courants stator et rotor, pouvoirs et glissement. Cette analyse peut être utile, par exemple, pour déduire la meilleure stratégie de magnétisation en termes de rendement et calculer le courant rotorique nécessaire à un point de fonctionnement donné pour dimensionner le convertisseur électronique de puissance. Par conséquent, dans un premier temps, il est nécessaire de calculer l'amplitude du flux statorique de la machine. En supposant un régime permanent et un alignement du flux statorique avec l'axe d, il est possible d'obtenir l'ensemble suivant de cinq équations. A partir de ces cinq équations exactes, il est facile de calculer le flux statorique :

$$\left. \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s |\vec{\varphi}_s| \\ Q_s = \frac{3}{2} \omega_s |\vec{\varphi}_s| i_{ds} \\ T_{em} = \frac{3}{2} p |\vec{\varphi}_s| i_{ds} \\ |\vec{v}_s|^2 = v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \end{array} \right\} \Rightarrow |\vec{\varphi}_s| = \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = \omega_s^2 \\ B = \frac{4}{3} R_s T_{em} \omega_s - |\vec{v}_s|^2 \\ C = \left[\frac{2}{3} \frac{R_s}{L_m} \right]^2 \left[\left(\frac{Q_s}{\omega_s} \right)^2 + \left(\frac{T_{em}}{p} \right)^2 \right] \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Notez que seuls les paramètres de la machine, ainsi que la tension statorique, le couple et la puissance réactive statorique, sont nécessaires. Ainsi, une fois le flux obtenu, les grandeurs restantes peuvent être calculées à partir des équations présentées dans les sections précédentes. La procédure est détaillée dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Chapitre 03 : Synthèse des lois de commande appliquées à la MADA

De manière alternative, si au lieu de la référence Q_s et i_{ds} . On pose $Q_s = 0$ la procédure de calcul en régime permanent est légèrement modifiée :

$$|\vec{\varphi}_s| = L_m \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \Rightarrow \begin{cases} A = \omega_s^2 L_m^2 \\ B = \frac{4}{3} R_s T_{em} \omega_s - |\vec{v}_s|^2 \\ C = \left[\frac{2}{3} \frac{R_s}{L_m} \right]^2 \left[\left(\frac{Q_s}{\omega_s} \right)^2 + \left(\frac{T_{em}}{p} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (3.2)$$

Procédure pour dériver les grandeurs en régime permanent avec la référence Q_s	
Courant statorique	$i_{ds} = \frac{Q_s}{\frac{3}{2} \omega_s \vec{\varphi}_s } \quad i_{qs} = \frac{T_{em}}{\frac{3}{2} p \vec{\varphi}_s } \quad i_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}$
Courant rotorique	$i_{dr} = \frac{ \vec{\varphi}_s - L_s i_{ds}}{L_m} \quad i_{qr} = \frac{-L_s i_{qs}}{L_m} \quad i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2}$
Voltage statorique	$v_{ds} = R_s i_{ds} \quad v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \vec{\varphi}_s \quad v_s^2 = v_{ds}^2 + v_{qs}^2$
Voltage rotorique	$v_{dr} = R_r i_{dr} - L_r \omega_r i_{qr} - L_r \omega_r i_{qs} \quad v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \omega_r i_{dr} + L_r \omega_r i_{ds}$ $\sqrt{v_r^2} = v_{dr}^2 + v_{qr}^2$
Flux statorique	$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad \varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2}$
Flux rotorique	$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad \varphi_r = \sqrt{\varphi_{dr}^2 + \varphi_{qr}^2}$
Puissance statorique	$P_s = \frac{3}{2} (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 + \omega_s \vec{\varphi}_s i_{qs}) \quad Q_s = 0 \quad S = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2}$
Puissance rotorique	$P_r = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad Q_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \quad S = \sqrt{P_r^2 + Q_r^2}$
Puissance mécanique	$P_{mec} = T_{em} \frac{\omega}{p}$
Rendement	Moteur : $\frac{P_m}{P_s + P_r}$ Génératrice : $\frac{P_s + P_r}{P_m}$

Tableau 3-1: les grandeurs en régime permanent avec la référence Q_s

On pose $i_{ds} = 0$ la procédure de calcul en régime permanent est légèrement modifiée :

$$|\vec{\varphi}_s| = L_m \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \Rightarrow \begin{cases} A = \omega_s^2 L_m^2 + \left(\frac{R_s L_m}{L_s} \right) \\ B = \frac{4}{3} R_s T_{em} \omega_s - |\vec{v}_s|^2 \\ C = \left[\frac{2}{3} \frac{R_s}{L_m} \right]^2 \left[\left(\frac{Q_s}{\omega_s} \right)^2 + \left(\frac{T_{em}}{p} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (3.3)$$

Procédure pour dériver les grandeurs en régime permanent avec la référence i_{dr}	
Courant statorique	$i_{ds} = \frac{Q_s}{\frac{3}{2}\omega_s \vec{\varphi}_s }$ $i_{qs} = \frac{T_{em}}{\frac{3}{2}p \vec{\varphi}_s }$ $i_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}$
Courant rotorique	$i_{dr} = \frac{ \vec{\varphi}_s L_s i_{ds}}{L_m}$ $i_{qr} = \frac{2}{3} \frac{T_{em}L_s}{pL_m \vec{\varphi}_s }$ $i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2}$
Voltage statorique	$v_{ds} = R_s i_{ds}$ $v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \vec{\varphi}_s $ $v_s^2 = v_{ds}^2 + v_{qs}^2$
Voltage rotorique	$v_{dr} = R_r i_{dr} - L_r \omega_r i_{qr} - L_r \omega_r i_{qs}$ $v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \omega_r i_{dr} + L_r \omega_r i_{ds}$ $\sqrt{v_r^2} = v_{dr}^2 + v_{qr}^2$
Flux statorique	$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$ $\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$ $\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2}$
Flux rotorique	$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$ $\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$ $\varphi_r = \sqrt{\varphi_{dr}^2 + \varphi_{qr}^2}$
Puissance statorique	$P_s = \frac{3}{2} (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 + \omega_s \vec{\varphi}_s i_{qs})$ $Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs})$ $S = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2}$
Puissance rotorique	$P_r = \frac{3}{2} (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr})$ $Q_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr})$ $S = \sqrt{P_r^2 + Q_r^2}$
Puissance mécanique	$P_{mec} = T_{em} \frac{\omega}{p}$
Rendement	Moteur : $\frac{P_m}{P_s + P_r}$ Génératrice : $\frac{P_s + P_r}{P_m}$

Tableau 3- 2: les grandeurs en régime permanent avec la référence i_{dr}

3.3 Réglage du régulateur PI à l'aide d'un système équivalent du second ordre

Au lieu d'utiliser l'annulation pôle-zéro, les caractéristiques dynamiques de la boucle de commande de courant peuvent être approximées par un système du second ordre. Par conséquent, en dérivant la fonction de transfert en boucle fermée, à partir du schéma fonctionnel, nous obtenons l'équation dans la coordonnée d :

$$R_r i_{dr} + \sigma L_s \frac{di_{dr}}{dt} = (k_{pi} + \int k_{ii} dt) \cdot (i_{dr}^* - i_{dr}) \quad (3.4)$$

En utilisant la transformée de Laplace :

$$R_r i_{dr} + s(\sigma L_s) i_{ds} + (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}) i_{dr} = (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s}) i_{dr}^* \quad (3.5)$$

On obtient la fonction de transfert du second ordre suivante :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{s k_{pi} + k_{ii}}{s^2(\sigma L_r) + s(R_r + k_{pi}) + k_{ii}} \quad (3.6)$$

Les résultats pour le courant de l'axe q :

$$\frac{i_{qr}(s)}{i_{qr}^*(s)} = \frac{sk_{pi} + k_{ii}}{s^2(\sigma L_r) + s(R_r + k_{pi}) + k_{ii}} \quad (3.7)$$

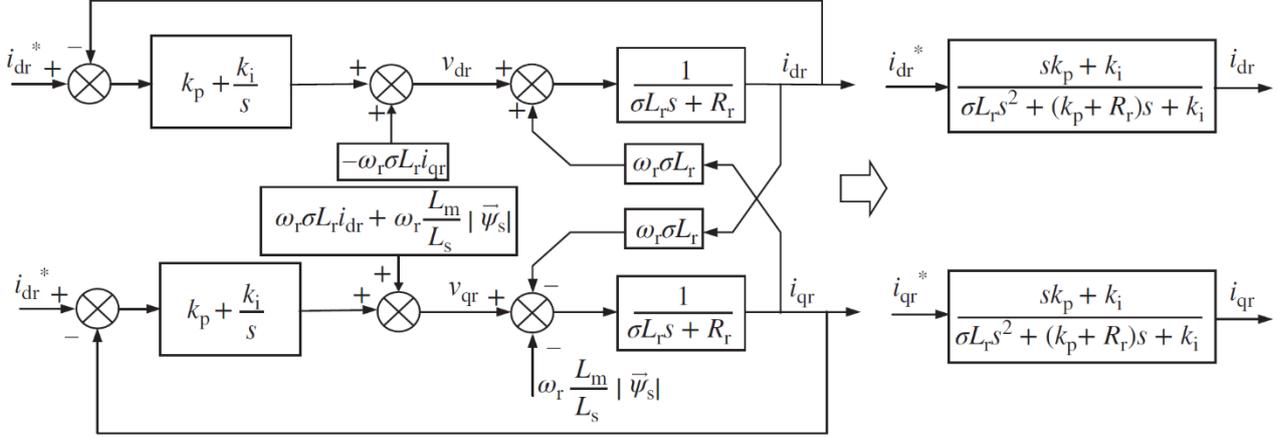


Figure 3- 1: Système équivalent de second ordre de la commande de courant en boucle fermée avec régulateurs PI

Ainsi, les dénominateurs en boucle fermée des équations (3.6) et (3.7) sont appariés à un dénominateur du second ordre :

$$s^2(\sigma L_r) + s(R_r + k_{pi}) + k_{ii} \equiv s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.8)$$

ω_n étant la fréquence propre et ξ l'amortissement. Ainsi, en développant le dénominateur du système en boucle fermée, on obtient :

$$s^2 + s\left(\frac{R_r + k_{pi}}{\sigma L_r}\right) + \frac{k_{ii}}{\sigma L_r} \equiv s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.9)$$

Ce qui signifie que les valeurs k_{pi} et k_{ii} sont :

$$k_{pi} = \sigma L_r 2\xi\omega_n - R_r \quad (3.10)$$

$$k_{ii} = \sigma L_r \omega_n^2 \quad (3.11)$$

Les pôles du système en boucle fermée (ω_n) peuvent être choisis par le concepteur pour être x fois plus rapides que les pôles en boucle ouverte $\frac{\sigma L_r}{R_r}$

$$\xi = 1 \text{ et } \omega_n = \frac{x}{\frac{\sigma L_r}{R_r}} \quad (3.12)$$

Et pour déterminer k_p et k_i de système on a :

$$\frac{\omega(s)}{\omega^*(s)} = \frac{sk_p + k_i}{s^2\left(\frac{J}{P}\right) + sk_p + k_i} \quad (3.13)$$

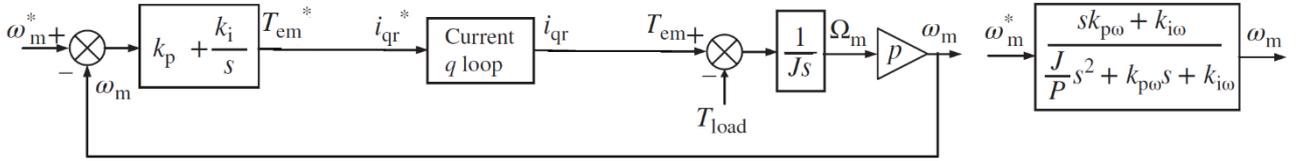


Figure 3- 2: Système équivalent en boucle fermée de ω avec (T_{load} considérée égale à zéro)

$$s^2 \left(\frac{J}{P} \right) + sk_p + k_i \equiv s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

$$\Rightarrow s^2 + \left(\frac{sPk_p}{J} \right) + \left(\frac{Pk_i}{J} \right) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.14)$$

Ce qui signifie que les valeurs k_p et k_i sont :

$$k_p = \frac{2J\omega_n}{P} \quad (3.15)$$

$$k_i = \frac{J\omega_n^2}{P} \quad (3.16)$$

Aussi pour déterminer k_{pg} et k_{ig} de réseaux, on obtient :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{sk_{pg} + k_{ig}}{s^2(L_g) + s(R_g + k_{pg}) + k_{ig}} \quad (3.17)$$

$$k_{pg} = L_g 2\xi\omega_n - R_g \quad (3.18)$$

$$k_{ig} = L_g \omega_n^2 \quad (3.19)$$

3.4 Stratégie de la commande MPPT de MADA pour éolienne

3.4.1 Zones de contrôle de la vitesse des turbines :

L'objectif principal est d'extraire le maximum d'énergie du vent, de maintenir l'éolienne dans un mode de fonctionnement sûr (puissance, vitesse et couple inférieurs aux limites) et de réduire les contraintes mécaniques sur la transmission. Les zones de fonctionnement de commande de turbine utilisées dans le développement de ce travail sont illustrées à la Fig. 3-3 et se compose de quatre zones de fonctionnement [14] où quatre zones sont affichées :

1. Limitation de la zone de vitesse minimale de fonctionnement.
2. Zone MPPT en fonctionnement à charge partielle pour un fonctionnement à vitesse variable jusqu'à ce que la vitesse nominale soit atteinte.
3. La vitesse maximale en fonctionnement à charge partielle.

4. Fonctionnement à pleine charge avant L'objectif des contrôleurs proposés est de réguler le fonctionnement de l'éolienne afin qu'elle fonctionne dans sa deuxième zone de fonctionnement, ce qui permettra d'obtenir la surveillance de puissance maximale.

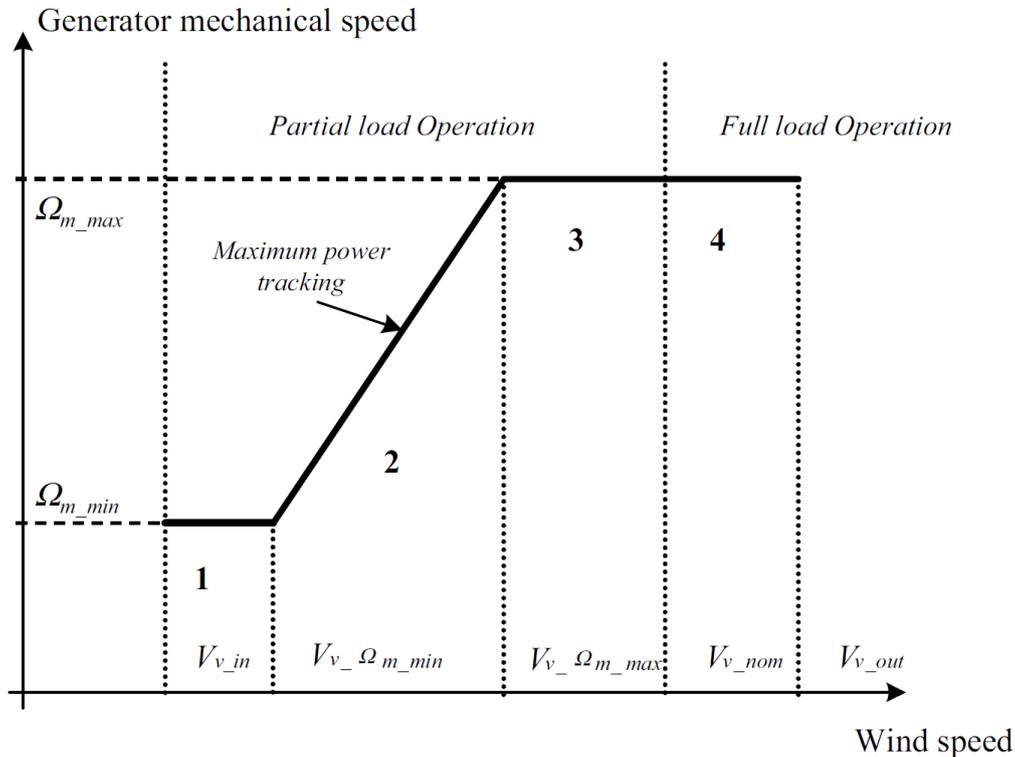


Figure 3- 3: Stratégie de contrôle des éoliennes basée sur quatre régions de vitesse.

3.4.2 Stratégie de commande e des points de puissance maximum

L'objectif du contrôle de vitesse est de suivre la voie de l'extraction de puissance maximale. De nombreuses approches sont suggérées pour contrôler l'éolienne en charge en suivant la voie d'extraction de puissance maximale. Cela peut être accompli en utilisant la nature dynamique de stabilité de la variation de la vitesse d'éolienne pour la courbe de puissance maximale de la figure 3.1 en considérant l'électromagnétique comme référence.

En vérifiant le modèle d'éolienne, on peut montrer que l'éolienne est stable en tout point de la courbe de puissance maximale, comme le montre la figure 3-4. Cela signifie que pour chaque variation de vitesse près d'un certain point sur la courbe de puissance maximale, la variation de vitesse revient naturellement à son point de fonctionnement. Compte tenu de cette caractéristique d'équilibre, si le couple de la turbine est contrôlé par une technique qui suit la courbe de puissance, le couple peut être supporté sur la courbe de puissance maximale en réponse aux variations du vent. Par exemple, la variation de la vitesse s'exécute au point (a) de la courbe illustrée à la figure 3-4.

Lorsque la vitesse du vent passe de V_{v1} à V_{v2} , le point de fonctionnement devient (b) et le couple de la turbine devient T_{t-b} . La commande MPPT fournit le couple T_{em} correspondant à la courbe de puissance maximale (point c), qui est inférieure à T_{t-b} . Cela fait augmenter la vitesse de la turbine jusqu'à ce qu'elle atteigne le point de stabilité (c). [14] [20]

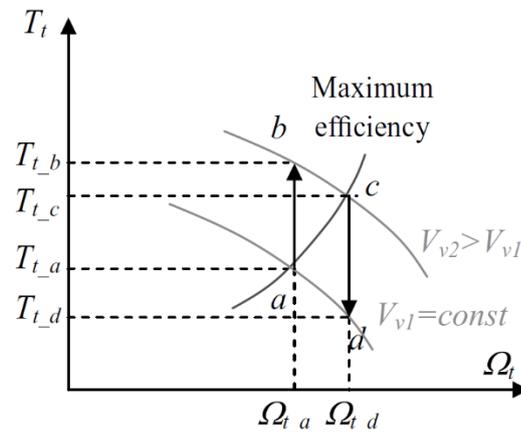


Figure 3- 4: Etude de stabilité autour d'un point de la courbe de puissance maximale

3.4.3 La commande de vitesse indirect

La stratégie de contrôle de vitesse indirecte est basée sur la relation entre le couple électromagnétique T_{em} et la vitesse angulaire Ω_t . Cependant, en raison de l'inertie impliquée, la relation entre le couple électromagnétique et la vitesse angulaire n'a pas de relation dynamique directe. Cela entraînera une réponse beaucoup plus lente du système car le couplage mécanique n'a pas été annulé [14]. La commande indirecte de la vitesse modifie le courant de trame d-q pour contrôler le dos à dos du convertisseur afin de permettre la contrôlabilité de l'angle de glissement, ce qui affectera également la vitesse et le couple du générateur. Le plan à mettre en œuvre est illustré à la figure 3.5

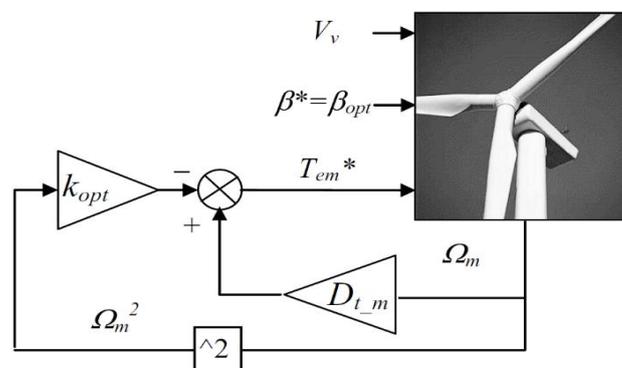


Figure 3- 5: Schéma fonctionnel général de la stratégie de contrôle de vitesse indirecte

Chapitre 03 : Synthèse des lois de commande appliquées à la MADA

Lorsque la turbine fonctionne au point de puissance maximum,

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad C_p = C_{p_max} \quad \text{et} \quad C_t = C_{t_opt} \quad (3.20)$$

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est alors donné par :

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_t^2 C_{p,max}}{\lambda^2_{opt} \lambda_{opt}} \quad (3.21)$$

C'est :

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda^3_{opt}} \Omega_t^2 C_{p,max} = K_{opt_t} \Omega_t^2 \quad (3.22)$$

Où

$$K_{opt_t} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda^3_{opt}} C_{p,max} \quad \text{et } K_{opt_t} \text{ est la constante optimale.}$$

3.5 Comprendre la perte de commande pendant le creux de tension

3.5.1 Les creux de tension symétriques

Les creux de tension est appelée chute soudaine de la tension du réseau, causée par des événements imprévus ou des défauts qui se produisent dans le réseau. Lorsque le stator MADA voit directement un creux de tension, il est nécessaire d'analyser le comportement du flux statorique pour comprendre les difficultés engendrées par les interférences provoquées par la chute. Par conséquent, en combinant les expressions (2.26) et (2.29) et en supprimant le courant statorique, les expressions intéressantes suivantes sont obtenues :

$$\frac{d\vec{\varphi}_s^s}{dt} = \vec{v}_s^s - \frac{R_s}{L_s} \vec{\varphi}_s^s + R_s \frac{L_m}{L_s} \vec{i}_r^s \quad (3.23)$$

À partir des expressions (2.26)–(2.29), il est possible d'obtenir l'équation suivante, qui conduit au circuit illustré à la figure 3.6a :

$$\vec{v} = \frac{L_m}{L_s} (\vec{v}_s^r - j\omega \vec{\varphi}_s^r) + \left[R_r + \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^2 R_s \right] - r \vec{i}_r^r + \sigma L_r \frac{d}{dt} \vec{i}_r^r \quad (3.24)$$

On peut voir que le courant rotorique est établi en fonction des tensions statorique et rotorique, du flux statorique (qui dépend également du courant rotorique) et des résistances et inductances équivalentes. Par conséquent, le diagramme vectoriel spatial à vitesse subsynchrone est tel que représenté sur la figure 3.6b. La somme des termes dominants.

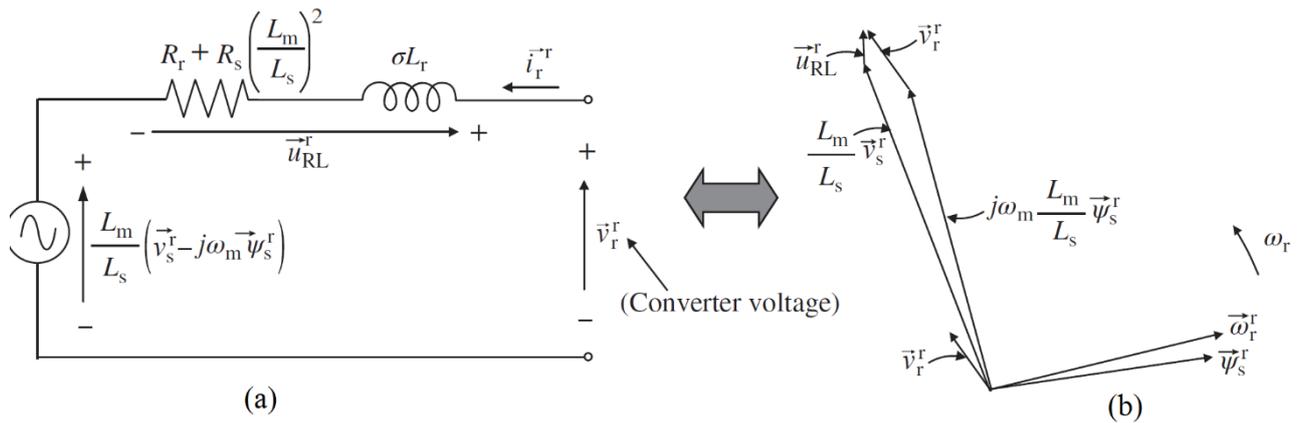


Figure 3- 6: (a) Circuit équivalent du DFIM pour l'analyse des creux de tension et (b) Diagramme vectoriel spatial en sous-synchronisme en mode générateur

Ainsi, lorsque la machine fonctionne à un moment donné en régime permanent et que le creux soudain de tension statorique se produit, le changement soudain de la tension statorique doit s'accompagner d'un changement soudain de tension rotorique afin d'éviter une augmentation élevée du courant rotorique. A noter qu'étant donné que le flux statorique décroît lentement (plusieurs cycles selon les machines), comme le montre la figure 3.7, la tension rotorique requise sera plus élevée qu'en régime permanent, en raison de la perturbation causée par le creux de tension. Ceci est illustré graphiquement à la figure 3.8.

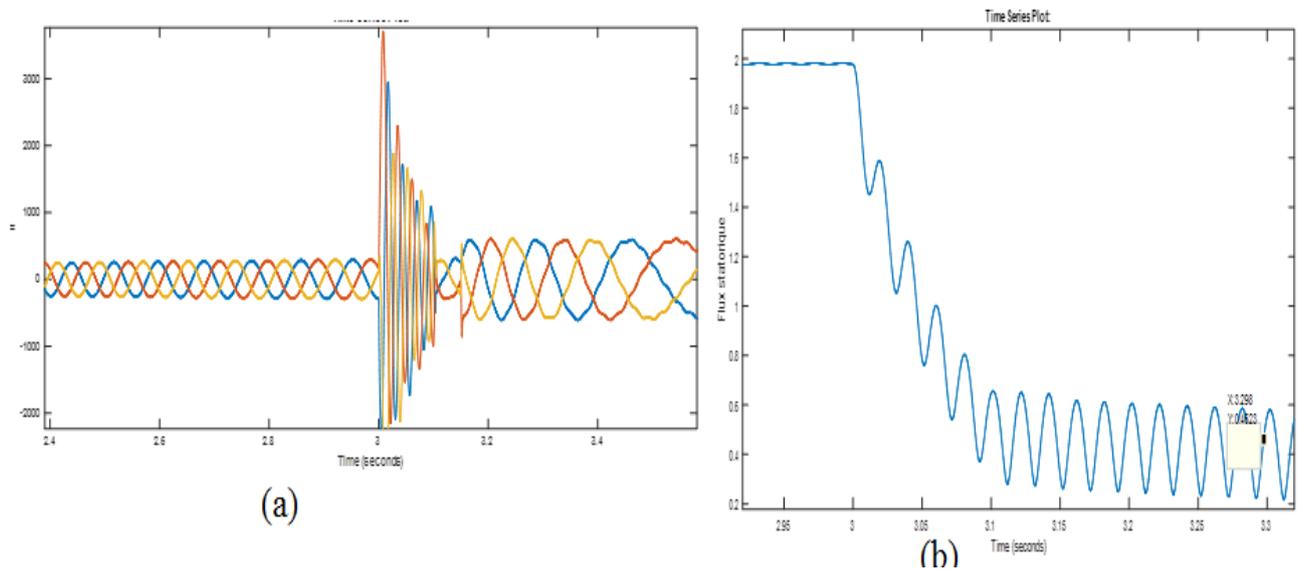


Figure 3- 7: : Analyse des défauts (a) courant rotorique et (b) flux statorique

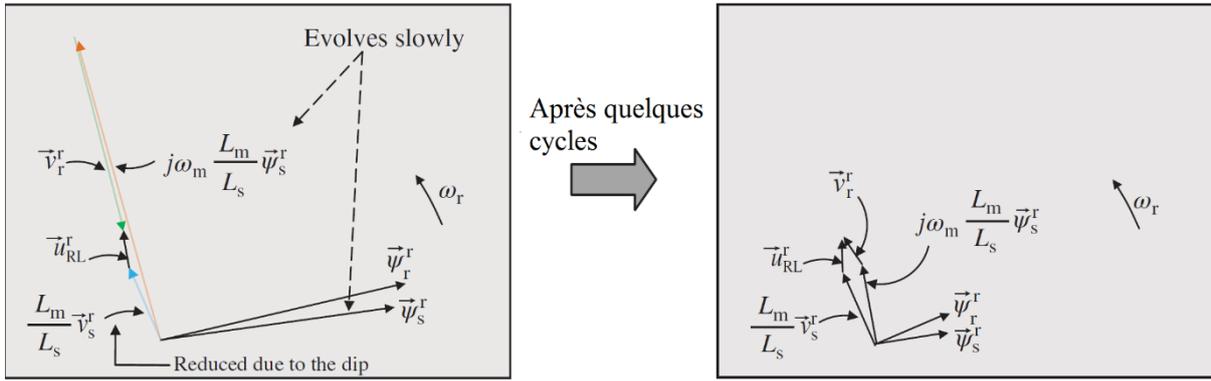


Figure 3- 8: Evolution des grandeurs du vecteur spatial depuis le premier instant où la tension statorique est réduite jusqu'à l'état stationnaire atteint au creux

Il y a généralement une courte période où le contrôle est perdu, ce qui produit normalement des surintensités au stator et au rotor de la machine, jusqu'à ce que le flux atteigne un niveau auquel la tension disponible du convertisseur peut garantir le contrôle de la machine. Comme dit précédemment, afin de protéger le système contre les surintensités provoquées par la perte de contrôle, une protection à pied de biche est activée qui accélère simultanément l'évolution du flux, tout en essayant le plus rapidement possible, de reprendre le contrôle avec le convertisseur. Voir la figure 3-9.

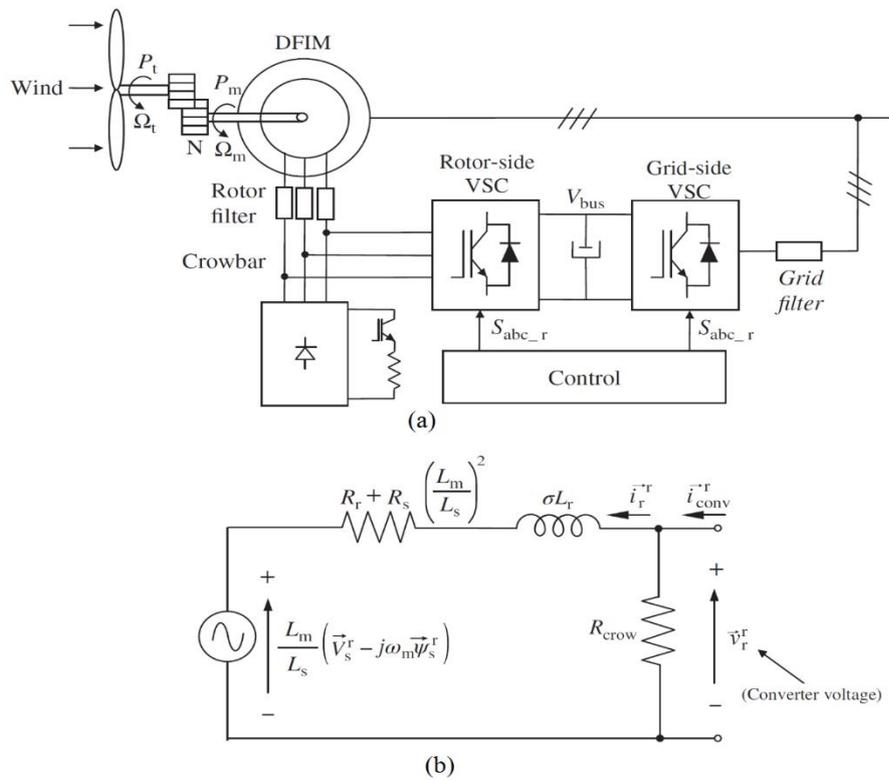


Figure 3- 9: (a) Système équipé d'une protection triphasée à pied de biche CC et (b) circuit équivalent monophasé du système lorsque le pied de biche est activé

3.5.2 Fonctionnement sous tension de réseau asymétrique

Une tension déséquilibrée affecte directement le fonctionnement du MADA. Si d'autres mesures ne sont pas prises, ses performances seront réduites, telles que l'oscillation du couple et l'échange déséquilibré du courant statorique.

La figure 3.10 ne montre qu'un exemple de déséquilibre de tension causé par un défaut entre phases dans le réseau. Le phénomène de déséquilibre peut être étudié par décomposition séquentielle. Par conséquent, une tension déséquilibrée signifie qu'il existe une séquence positive et une séquence négative.

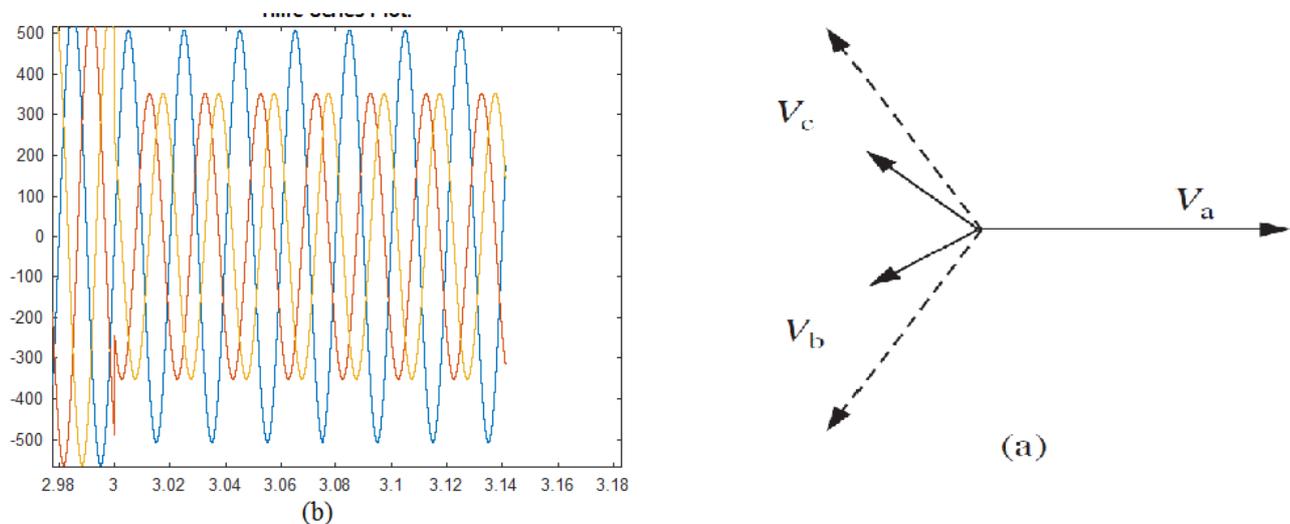


Figure 3- 10: Déséquilibre causé par un défaut entre phases de type creux C : (a) diagramme de phase et (b) tensions abc

La plupart des problèmes causés par le déséquilibre peuvent être surmontés en introduisant un nombre précis de séquences négatives dans la référence de courant du rotor. De cette façon, la référence actuelle est l'addition de deux séquences : l'une est synchronisée avec la séquence positive de la tension du réseau, et l'autre est synchronisée avec la séquence négative. Afin de s'assurer que les deux séquences sont bien régulées, chaque séquence doit être contrôlée indépendamment.

La boucle d'asservissement d'origine est remplacée par deux boucles d'asservissement : la première fonctionnée dans le référentiel de rotation avant et l'autre fonctionne dans le référentiel de rotation inverse. Ce principe de commande est appelé technologie de la commande vectorielle double. La figure 3.11 illustre la commande vectoriel double du MADA.

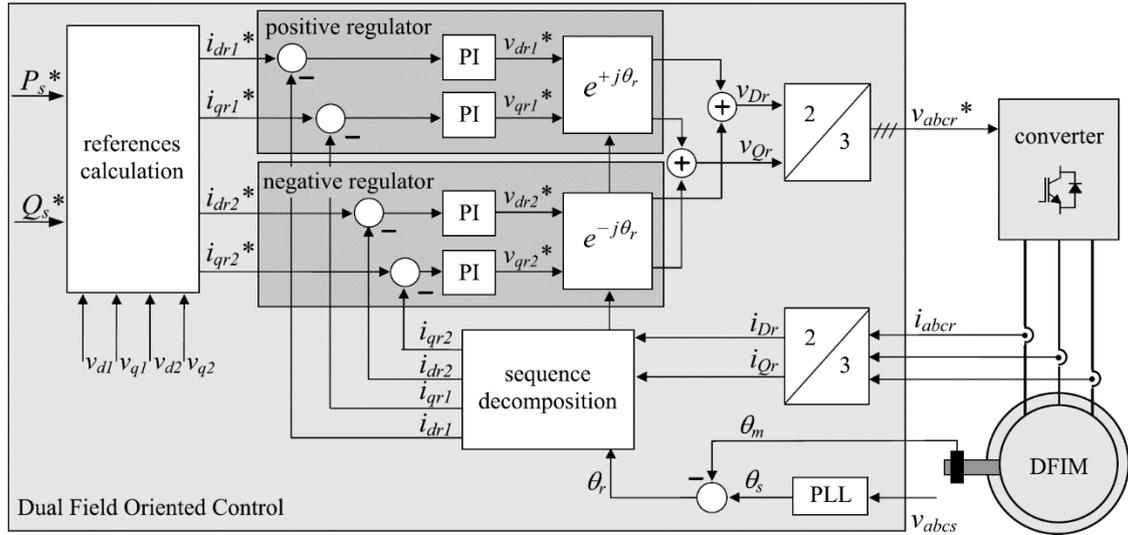


Figure 3- 11: Schéma de principe de la double commande.

Pour cette commande nous utilisons :

- Courants de rotor équilibrés : En fait, cette stratégie est très similaire au contrôle vectoriel de base, qui ne fonctionne qu'avec une séquence positive. La seule différence est que maintenant la séquence négative est explicitement ramenée à zéro au moyen du contrôleur de courant négatif.

$$\begin{Bmatrix} i_{dr1} \\ i_{qr1} \\ i_{dr2} \\ i_{qr2} \end{Bmatrix} = -\frac{2 L_s}{3 L_m} \frac{1}{v_{d1}^2 + v_{q1}^2} \begin{Bmatrix} v_{d1} & v_{q1} \\ v_{q1} & -v_{d1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{s0} \\ Q_{s0} \end{Bmatrix} + \frac{1}{\omega_s L_s} \begin{Bmatrix} v_{q1} \\ -v_{d1} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

La décomposition de séquence et la commande à double vecteur elle-même nécessitent l'estimation de l'angle θ_r . C'est dans la figure B.1, en utilisant la même PLL. Voir l'annexe.

Cette tâche est représentée graphiquement dans la Figure 3.12. Lors de la décomposition et de l'utilisation de la transformation rotationnelle, des oscillations au double de la fréquence apparaissent qu'il faut supprimer pour obtenir une performance acceptable des boucles. Ceci peut être réalisé en utilisant des filtres coupe-bande, des filtres passe-bas. Cette figure (a) est pour convertisseur côté rotor et (b) est pour convertisseur côté réseau.

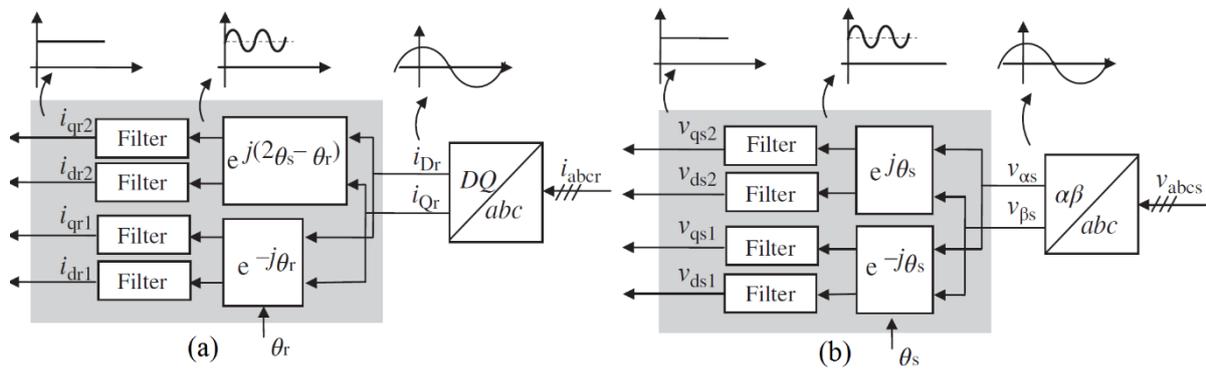


Figure 3- 12: Décomposition de séquence

3.6 Conclusion :

Dans cette partie, nous introduisons la synthèse des lois de contrôle appliquées à MADA en spécifiant des stratégies de contrôle pour les machines MADA basées sur le vent, telles que l'analyse en régime permanent et en utilisant un système équivalent du second ordre pour ajuster les régulateurs PI.

Et aussi une présentation à la stratégie de contrôle MADA MPPT pour les éoliennes, comme la zone de commande.

A la fin une petite analyse pour comprendre les pertes incontrôlables lors de la baisse de tension du réseau et le fonctionnement sous le déséquilibre de tension du réseau.

Chapitre 04 :
Résultats de simulation

4 Résultats de simulation

4.1 Résultats d'analyse en régime permanent

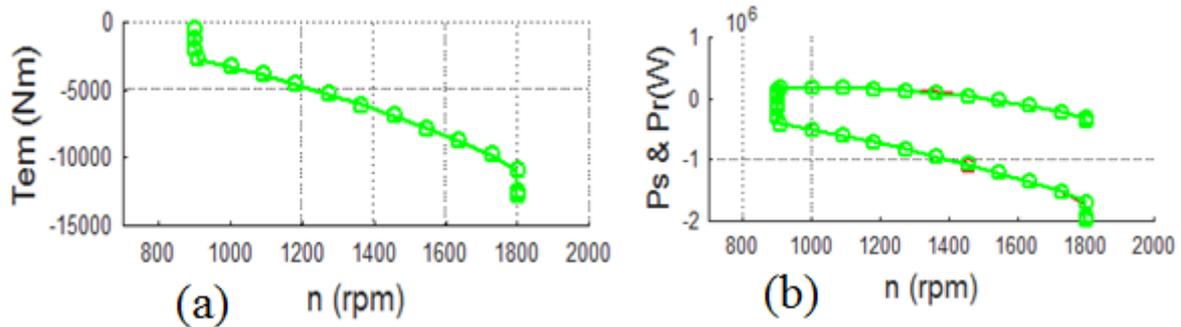


Figure 4- 1: : (a) 'évolution du couple électromagnétique et (b) : représente les puissances active et réactive délivrées par le rotor et le stator

Sur cette figure 4-1(a) : nous pouvons voir le couple électromagnétique du générateur, Le couple augmente au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente et donc la vitesse de la turbine jusqu'à ce qu'elle arrive à cette valeur nominale.

La figure 4-1(b) : On voit que la machine fonctionne en génératrice, les puissances actives du stator sont toujours négatives ; en fonctionnement subsynchrone, la puissance du rotor est positive (le rotor est alimenté par le réseau).

Cependant, en mode hypersynchrone, le stator et le rotor fournissent de la puissance active au réseau (tous deux prennent des valeurs négatives).

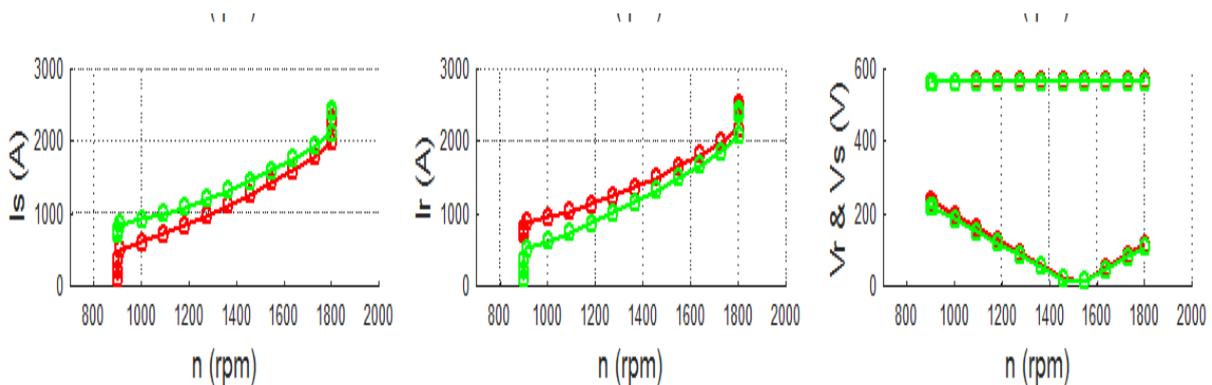


Figure 4- 2: : montre la tension et le courant du rotor ; c'est-à-dire l'amplitude de la tension et du courant du convertisseur côté rotor. et la tension et le courant du stator

Le courbe V_r : nous pouvons voir que l'amplitude de la tension du rotor est minimale près de la vitesse de synchronisme, tandis qu'en fonctionnement subsynchrone et hypersynchrone, la tension augmente.

Chapitre 04 : Résultats de simulation

Le courbe I_r : nous pouvons voir que lorsque le couple électromagnétique augmente, le courant rotorique augmente car le couple électromagnétique est contrôlé par la composante en quadrature du courant rotorique.

Le courbe V_s : Nous pouvons voir que la tension du stator est directement connectée au réseau. C'est toujours constant.

Le courbe I_s : Le courant statorique augmente au fur et à mesure que le couple de la machine augmente. La raison en est que ce courant est directement lié au couple électromagnétique du fait que la machine est magnétisée du côté rotor.

4.1.1 Interprétation des résultats

En utilisant cette technique, nous pouvons vérifier les performances du système dans le régime permanent.

On prend un point aléatoire de la figure 1 de le couple électromagnétique.

A l'axe de vitesse on a $V= 1455.122$ et sur l'axe du couple on a $T_{em}= -6902$

Le couple électromagnétique régime permanent est de $-6902(N.m)$ ce qui est très proche de la valeur de référence.

Le pic de I_s sur la figure 4.3 est équivalent à la valeur de la figure 4.2. Par conséquent, il est conclu à partir des résultats obtenus que le système fonctionne correctement et suit la conception du fabricant. Enfin, les valeurs de et sont validées à l'aide

Le couple électromagnétique régime permanent est de $-6902(N.m)$ ce qui est très proche de la valeur de référence.

Le pic de I_s sur la figure 4.3 est équivalent à la valeur de la figure 4.2. Par conséquent, il est conclu à partir des résultats obtenus que le système fonctionne correctement et suit la conception du fabricant. Enfin, les valeurs de et sont validées.

$$\sqrt{v_{dr}^2 + v_{dr}^2} = \sqrt{10^2 + 30^2} = 31.66v$$

Chapitre 04 : Résultats de simulation

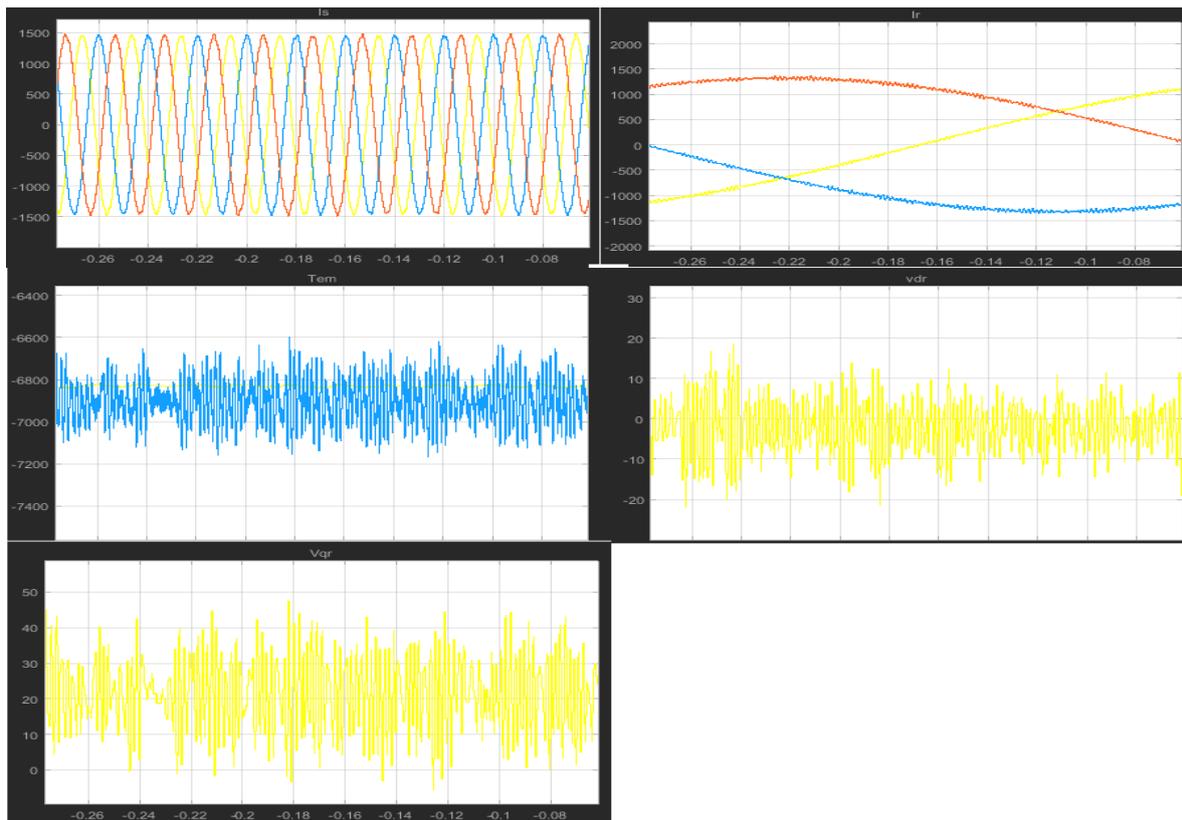


Figure 4- 3: Réponse en régime permanent du système simulé avec une vitesse de rotor de 152.38 rad/sec.

4.2 Résultats de simulation par régulateur PI et MPPT

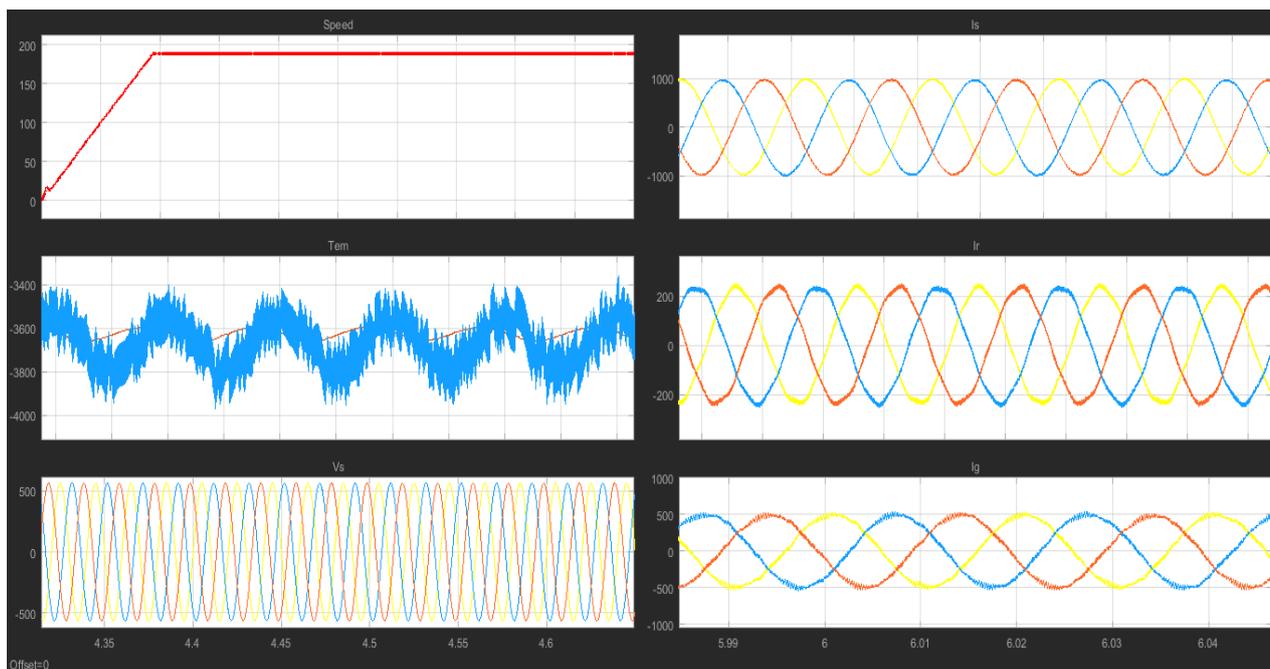


Figure 4- 4: Représenté le couple, I_s , I_r , V_s , I_g . Par PI

Chapitre 04 : Résultats de simulation

D'après les résultats graphiques obtenus, nous pouvons clairement voir que la vitesse a augmenté rapidement.

Il nous montre une diminution significative de la valeur de la tension et du courant. Cela est dû à la diminution du couple électromagnétique et n'a pas atteint la valeur requise., qui a une relation avec le courant rotorique et statorique.

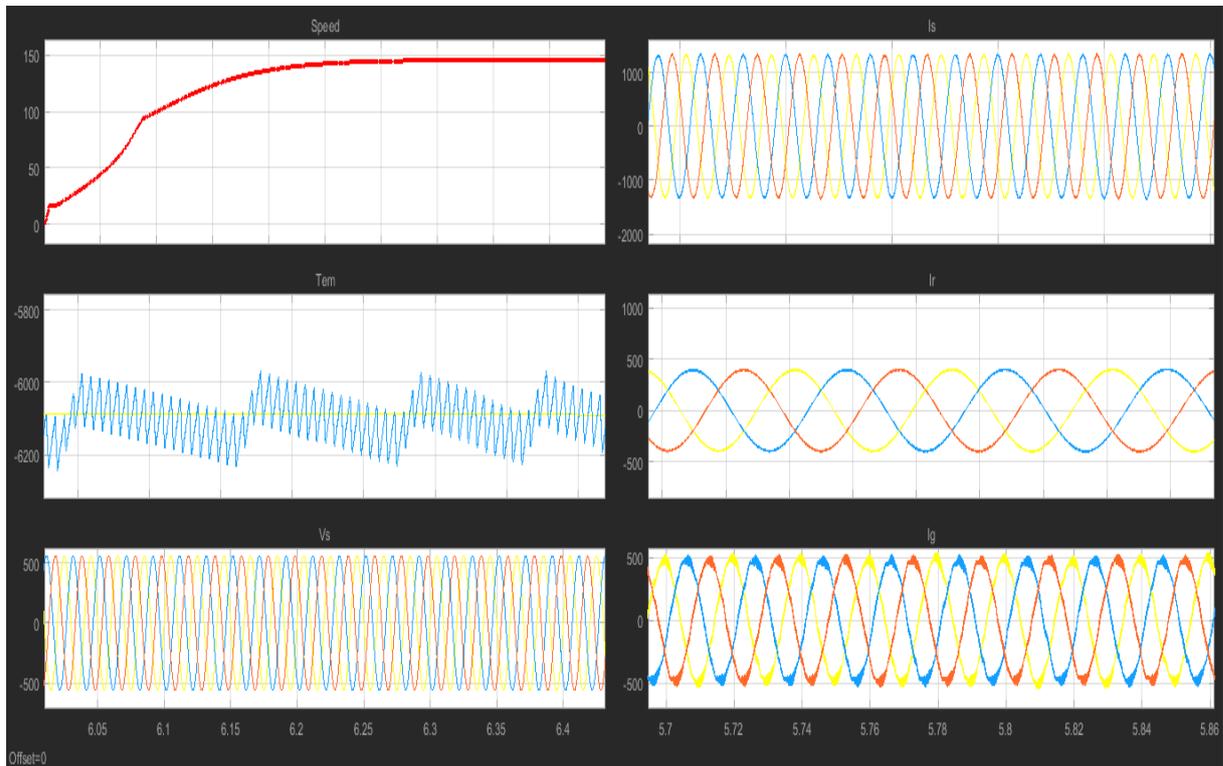


Figure 4- 5: représente ensemble des résultats (vitesse, couple, courant) par MPPT

Contrairement à la première partie de cet exemple, nous avons remarqué que par rapport au modèle PI, la reprise de vitesse est un peu plus lente et par contre le courant, la tension et le couple augmentent plus énorme.

4.2.1 Interprétation des résultats

La commande de vitesse indirect (MPPT) est conçue pour forcer le couple aérodynamique à suivre la courbe de puissance maximale en réponse aux variations du vent, tandis que la commande pour boucles de courant est conçue pour contrôler le convertisseur côté rotor. Le régulateur PI a été conçu pour contrôler les composants de courant du rotor. Les paramètres de gain des coefficients k_p and k_i du régulateur PI, et ont été ajustés jusqu'à ce que les valeurs de performance souhaitées soient obtenues. Cependant, la conception MPPT n'a pas pu satisfaire les performances système requises en tant que temps de stabilisation.

4.3 Analyse des creux de tension symétriques

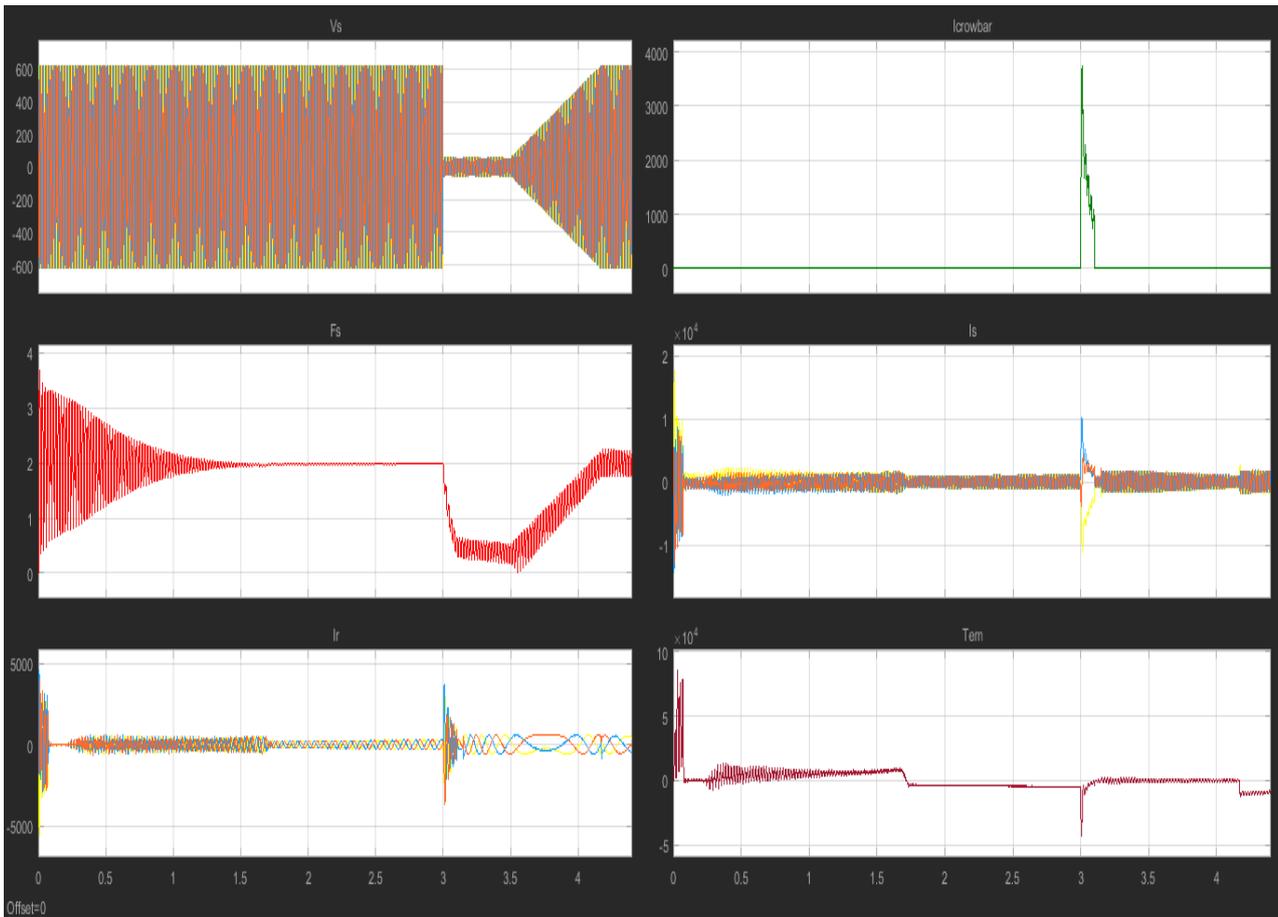


Figure 4- 6: analyse des défauts de creux de tension symétrique

On peut remarquer que lorsque le creux de tension soudaine se produit, le flux statorique ne peut pas évoluer vers son état stable final aussi rapidement que la tension statorique. Le terme du courant rotorique peut accélérer la décroissance du flux (avec des courants rotoriques en contre-phase par rapport au flux statorique).

4.3.1 Interprétation des résultats

Afin de protéger le système contre les surintensités provoqués par la perte de contrôle, une protection à pied de biche est activée qui accélère simultanément l'évolution du flux.

Après quelques cycles, le nouvel état d'équilibre peut être similaire à celui du moment précédant le creux, mais avec des amplitudes d'amplitude inférieure en raison de la diminution de la tension statorique, ce qui conduit également à une T_{em} plus faibles.

4.4 Analyse des creux de tension asymétriques

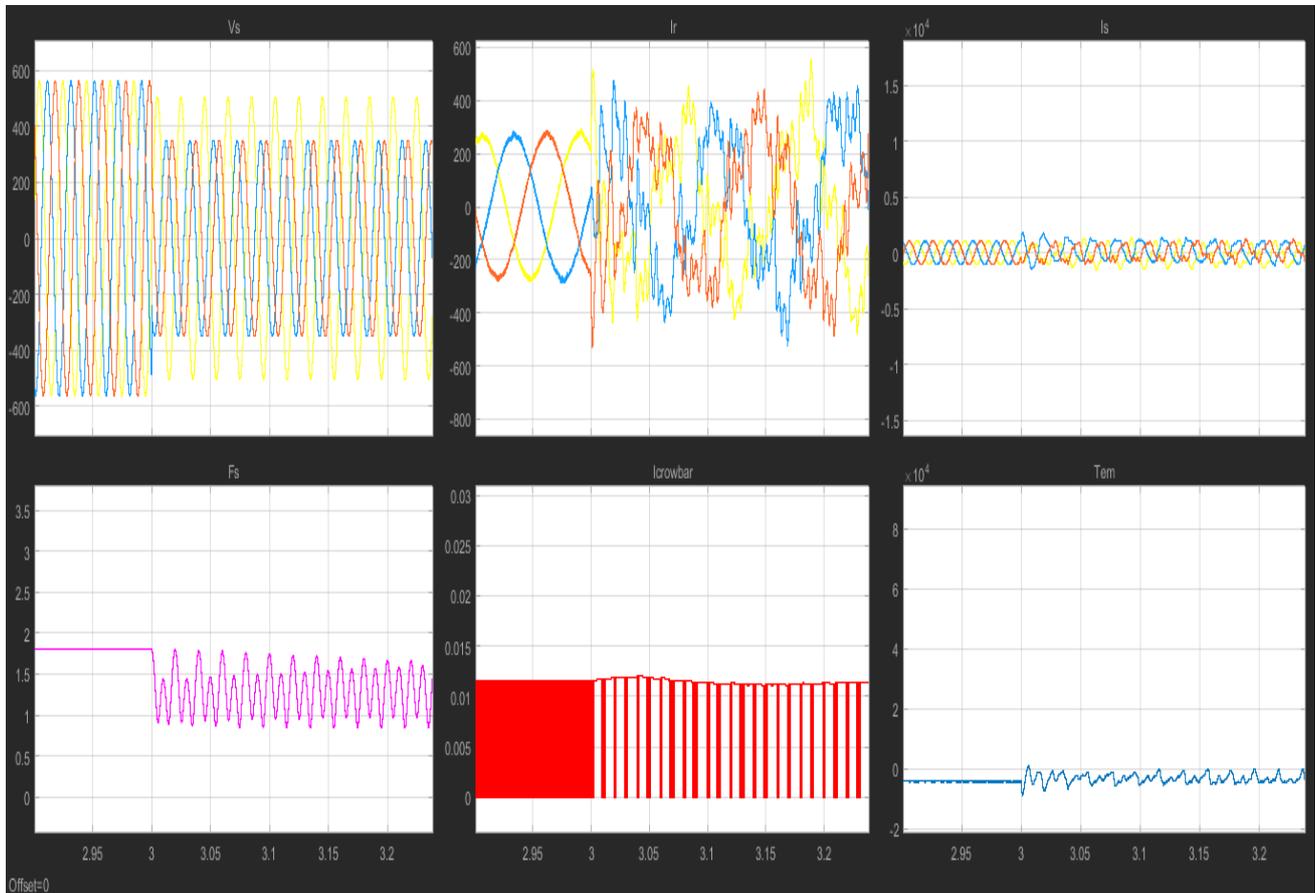


Figure 4- 7: analyse des défauts de creux de tension asymétrique

La figure 4-7 représente les défauts causés par les creux de tension asymétrique.

Le système est stable, mais une fois que les creux de la tension asymétrique se produit au niveau de la tension du stator, elle montre une perturbation du flux statorique et une augmentation du courant rotorique et statorique avec une diminution du couple magnétique lorsque le pied de biche est rapidement alimenté.

4.4.1 Interprétation des résultats

Comme l'exigent les codes du réseau, afin de fournir une capacité de passage en basse tension, l'éolienne doit rester connectée pendant le creux de tension ; par conséquent, le pied de biche doit être activé et désactivé sans déconnecter le DFIM du réseau. De cette façon, la séquence des événements qui se produisent généralement lors de creux de tension sévères peut être résumée comme suit :

Chapitre 04 : Résultats de simulation

1. Le DFIM génère de l'électricité en régime permanent à un point de fonctionnement spécifique.

2. Lorsque le creux de tension se produit, il s'écoule quelques jusqu'à ce que la commande de l'éolienne détecte le creux. Ainsi, pendant cette période, le système ne peut pas garantir le contrôle et, en général, il y a une forte élévation des courants à travers le convertisseur rotorique, ce qui provoque également une augmentation de la tension du bus continu.

3. Une fois le creux détecté, le pied de biche est activé rapidement, ce qui démagnétise la machine. Le convertisseur du rotor est inhibé, le gardant en sécurité et garantissant que tout le courant du rotor circule à travers le pied de biche. Selon la conception de la machine, le temps pendant lequel le pied de biche est actif peut aller de plusieurs cycles.

4. Une fois que le flux a diminué et que la tension du convertisseur disponible peut contrôler la machine, le pied de biche est déconnecté et le convertisseur du rotor est à nouveau activé. En général, comme à ce moment le flux n'a pas été totalement amorti, il est préférable de contribuer à la stabilisation totale du flux statorique en injectant des courants rotoriques démagnétisant par asservissement. En même temps, comme l'exigent les codes du réseau, il est possible de fournir progressivement de la puissance réactive à travers le stator en augmentant la composante de courant rotorique correspondante d . Cette situation durera jusqu'à ce que la tension du réseau soit progressivement rétablie, que le défaut soit éliminé et que le fonctionnement normal reprenne.

4.5 Résultats de simulation modèle analytique du GADA

Cette figure 4.8 ci-dessous nous travaillons avec une vitesse du vent de 8,5 m/s.

Nous pouvons voir la comparaison du modèle, sa comparaison de la référence de couple (modèle DFIG) avec l'analyse de couple (modèle DFIM). Aussi même modèle avec I_s et I_r . Les deux modèles sont très approximatifs.

4.5.1 Interprétation des résultats

À l'aide des équations 2.36 et 2.35, nous avons permis de simuler des analyses. Pour le couple, le courant statorique et le rotor, voir l'annexe. Afin d'assurer la fonctionnalité de la machine asynchrone à double alimentation.

Les résultats indiqués sur la figure 4.8 montrent que la machine est dans son état de fonctionnement prévu.

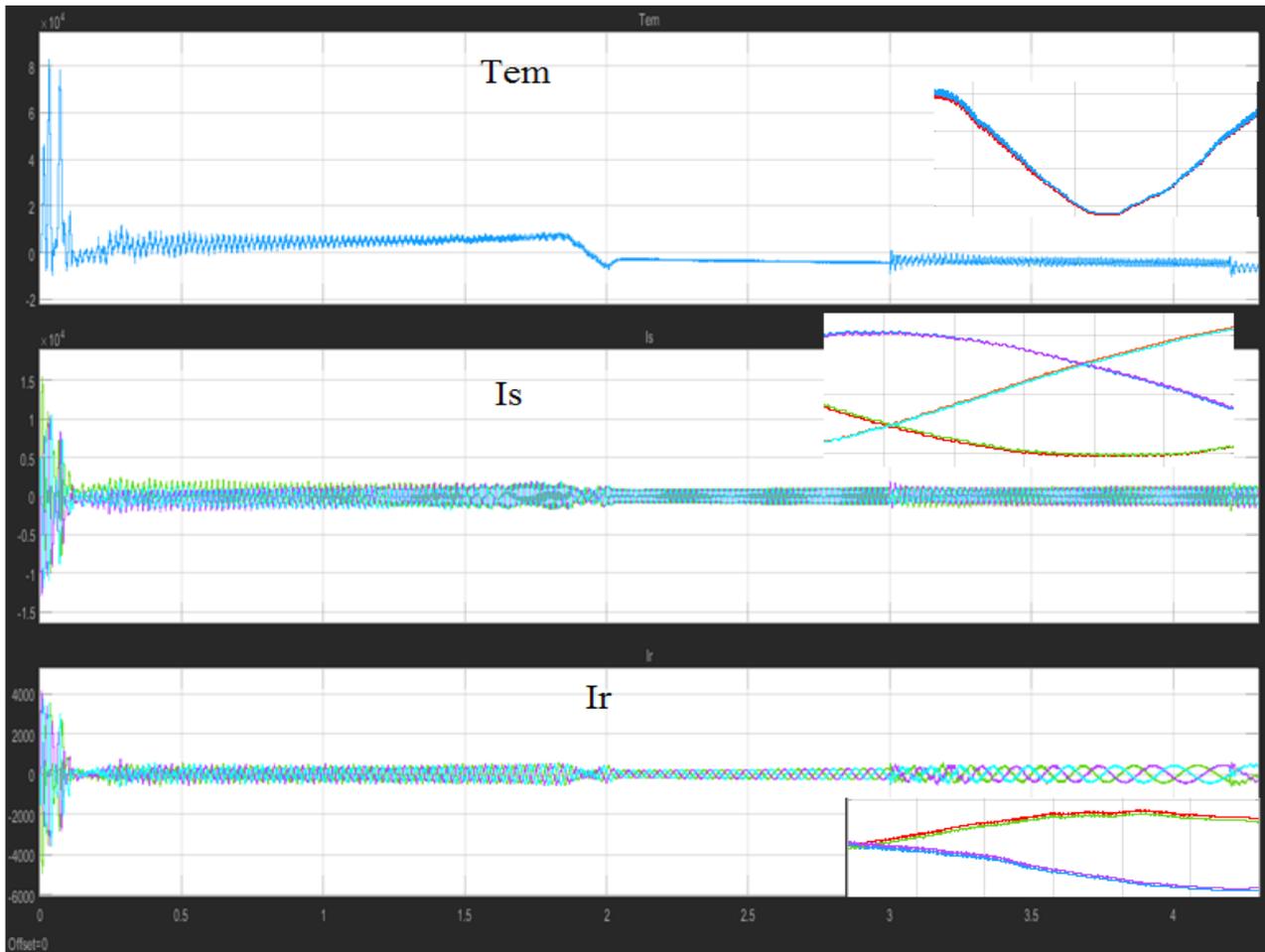


Figure 4- 8: Représenté le couple, I_s , I_r

4.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé les résultats de simulation des stratégies de commande étudiés dans les parties précédentes, et elle a été suivie aussi des commentaires qui résument les résultats obtenus et des explications.

Donc on peut ce résumé que chaque technique possède ses propres bases. Comme 1^{er} technique nous avons utilisé des régulateurs de type proportionnel intégral (PI) qui assure des bonnes performances dynamiques et statiques et une meilleure poursuite de la trajectoire dans le cas du système invariable dans le temps. Mais il faut signaler que le régulateur PI ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes en général, les variations paramétriques de la machine.

D'un autre par le MPPT contrôle le courant et la tension à la sortie et aussi donne un couple électromagnétique élevé.

Donc dans notre étude de simulation on tient à utiliser le régulateur MPPT vu ces caractéristiques possédées.

Conclusion générale

L'exploitation des énergies renouvelables prend, jour après jour, une place de plus en plus importante dans notre quotidien, en particulier, l'utilisation des systèmes photovoltaïques et éoliens, voire, hybrides.

Les travaux de cette thèse nous permettent d'étudier et d'analyser l'éolienne autonome dont le but principal est de contrôler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement de générateur en système autonome.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des notions importantes de la technologie éolienne, état de l'art des énergies renouvelables appropriées et une généralité sur l'éolienne ainsi que les avantages, les inconvénients de l'énergie éolienne et celle des machines. et aussi une petite notion de base sur la commande des aérogénérateurs où nous avons fait une synthèse des différentes études réalisées dans de différents articles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons entamé l'étude de la modélisation de la MADA à partir des équations mathématiques dans le repère d-q et Clark α , β . la modélisation et la simulation du système éolienne a été fait sur le logiciel Simulink (MATLAB). Cette modélisation a pour objectif l'élaboration des lois de commande pour assurer un bon contrôle des puissances statoriques actives et réactives, la vitesse et le couple on évite les erreurs et avec une qualité satisfaisante de rapidité et de stabilité.

Le troisième chapitre, expose la commande de la machine asynchrone à double alimentation dont le principe est d'avoir un contrôle du couple électromagnétique. Pour se faire, nous nous sommes basés sur l'utilisation des régulateurs PI et MPPT.

Les deux techniques utilisées servent à améliorer les performances du système et d'apporter des ajouts favorables à la commande, Ces deux techniques ont été appliquées avec succès et ont donné de bons résultats en termes de suivi maximum puissance, par MPPT et temps de réponse et dépassement par régulateur PI.

Dans la dernière partie de cette thèse nous avons exposé les résultats obtenus de la simulation après l'étude qui a été faite. D'après les résultats de la comparaison obtenus entre les deux techniques nous avons conclu que le régulateur PI est plus efficace dans la machine utilisée afin de donner une augmentation de vitesse et de stabilité mais ça diminue le couple électromagnétique donc on a préféré d'utiliser la technique de régulateur MPPT qui aide à obtenir une valeur maximale du couple. Le pied de biche protège également contre les chutes de tension, ce qui maintient les bonnes performances de la machine.

A la fin de ce mémoire, nous souhaitons que ce modeste mémoire soit utile et bénéfique pour tout lecteur.

ANNEX

Annex

Annex A :

Les composantes $\alpha\beta$ du vecteur spatial peuvent être calculées à partir des grandeurs abc comme suit :

$$x_\alpha = R_e\{\vec{x}\} = \frac{2}{3}\left(x_a - \frac{1}{2}x_b - \frac{1}{2}x_c\right)$$

$$x_\beta = I_m\{\vec{x}\} = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_b - x_c)$$

Ces deux dernières expressions sont communément représentées sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Avec la matrice T souvent appelée la transformation directe de Clarke :

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

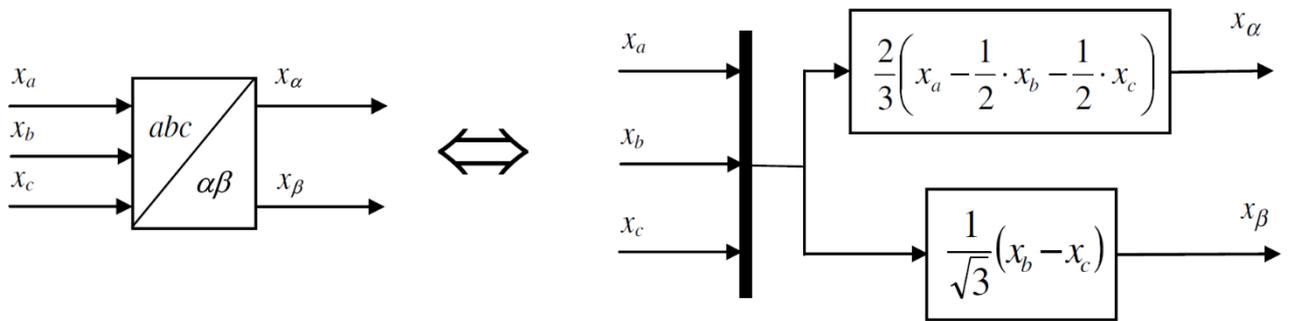


Figure A-1: $\alpha\beta$ Calcul des composants à partir des composants abc

De plus, la transformation inverse de Clarke donne la relation inverse :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

ANNEX

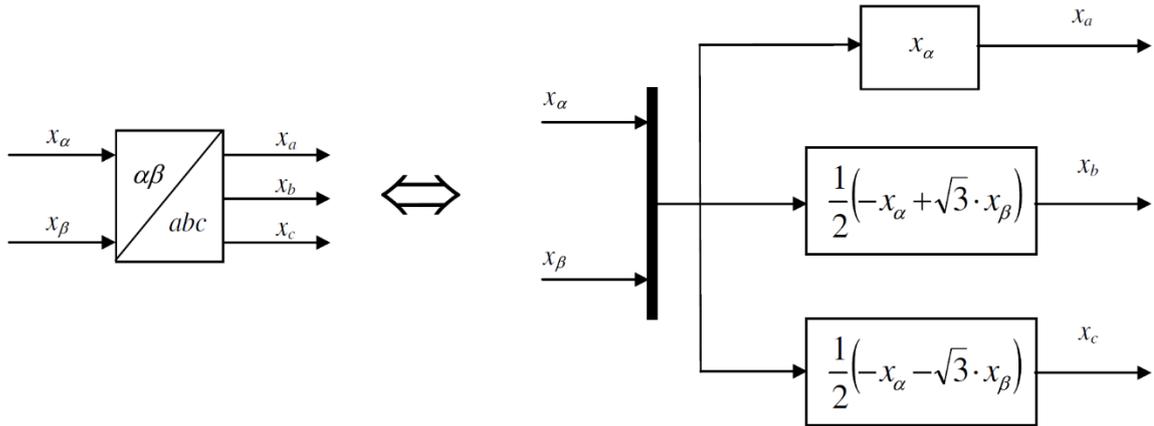


Figure A- II: abc Calcul des composants à partir des composants $\alpha\beta$

Transformations vers différents référentiels :

Afin d'indiquer que le vecteur spatial fait référence à un système de référence spécifique, un symbole en exposant est introduit. Il existe trois normes différentes :

1. Le cadre de référence du stator ($\alpha\beta$) : Aligné avec le stator, la vitesse de rotation du cadre est nulle (stationnaire) et le vecteur spatial auquel il se réfère tourne à la vitesse synchrone des ω_s .

$$\vec{x}^s = x_\alpha + jx_\beta$$

L'exposant s désigne les vecteurs spatiaux référés au référentiel du stator.

2. Le cadre de référence du rotor (D-Q) : Aligné avec le rotor, la vitesse de rotation du cadre est la vitesse angulaire électrique du rotor ω , et le vecteur spatial auquel il fait référence tourne à la vitesse de glissement ω_r .

$$\vec{x}^r = x_D + jx_Q$$

L'exposant r désigne les vecteurs spatiaux rapportés au référentiel du rotor.

3. Le cadre de référence synchrone (d-q) : La vitesse de rotation du système de coordonnées est la vitesse synchrone à laquelle le vecteur spatial auquel il se réfère ne tourne pas, c'est-à-dire que les parties réelle et imaginaire restent inchangées.

$$\vec{x}^a = x_d + jx_q$$

L'exposant a désigné des vecteurs spatiaux se rapportant au cadre de référence synchrone. Voir la figure 2-9

ANNEX

Pour référencer des vecteurs spatiaux dans différents référentiels, la transformation rotationnelle est utilisée. Ainsi, par exemple, pour transformer des coordonnées $\alpha\beta$ en coordonnées D-Q, l'opération suivante est utilisée :

$$\vec{x}^r = \begin{bmatrix} x_D \\ x_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

Nous utilisons M comme transformation rotationnelle directe :

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

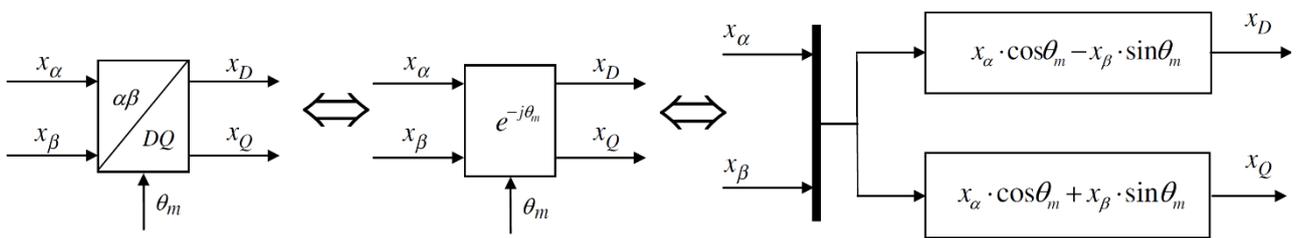


Figure A- III: Calcul des composants D-Q à partir des composants $\alpha\beta$

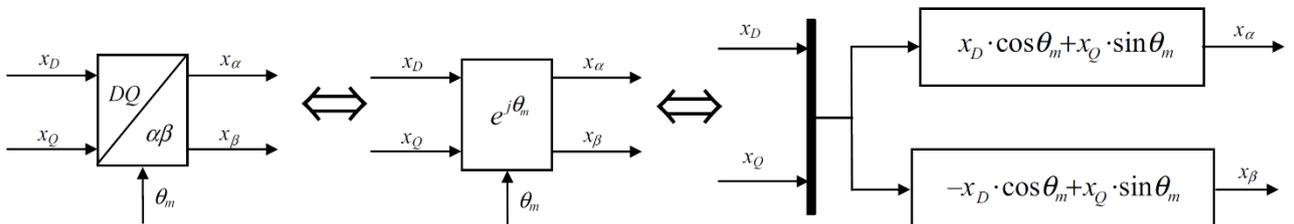


Figure A- IV: Calcul des composants $\alpha\beta$ à partir des composants D-Q.

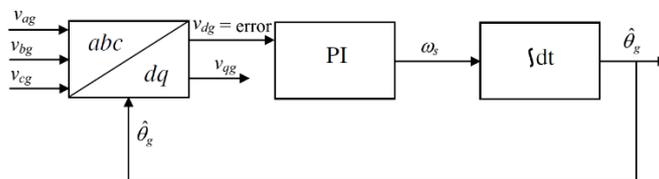


Figure A- V: Schéma fonctionnel de la structure PLL classique

Une simple boucle à verrouillage de phase (PLL) peut être utilisée pour effectuer la synchronisation du réseau de tension du stator, offrant une robustesse à l'estimation et un rejet des petites perturbations ou harmoniques.

ANNEX

Annex B :

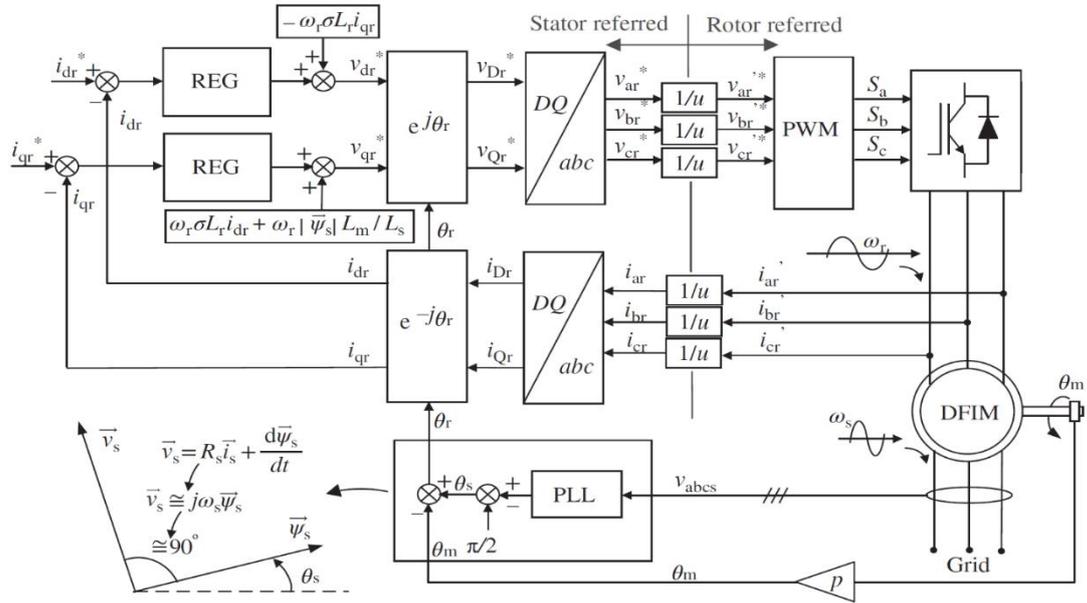


Figure B- 1: Boucles de régulation de courant du DFIM

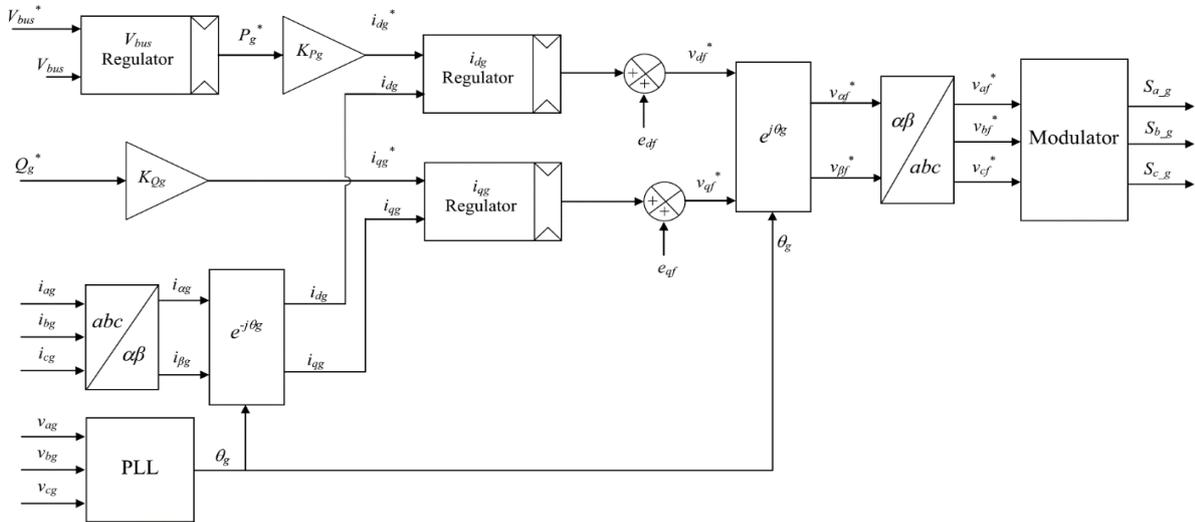


Figure B- 2: Schéma fonctionnel de la commande de la tension du réseau

ANNEX

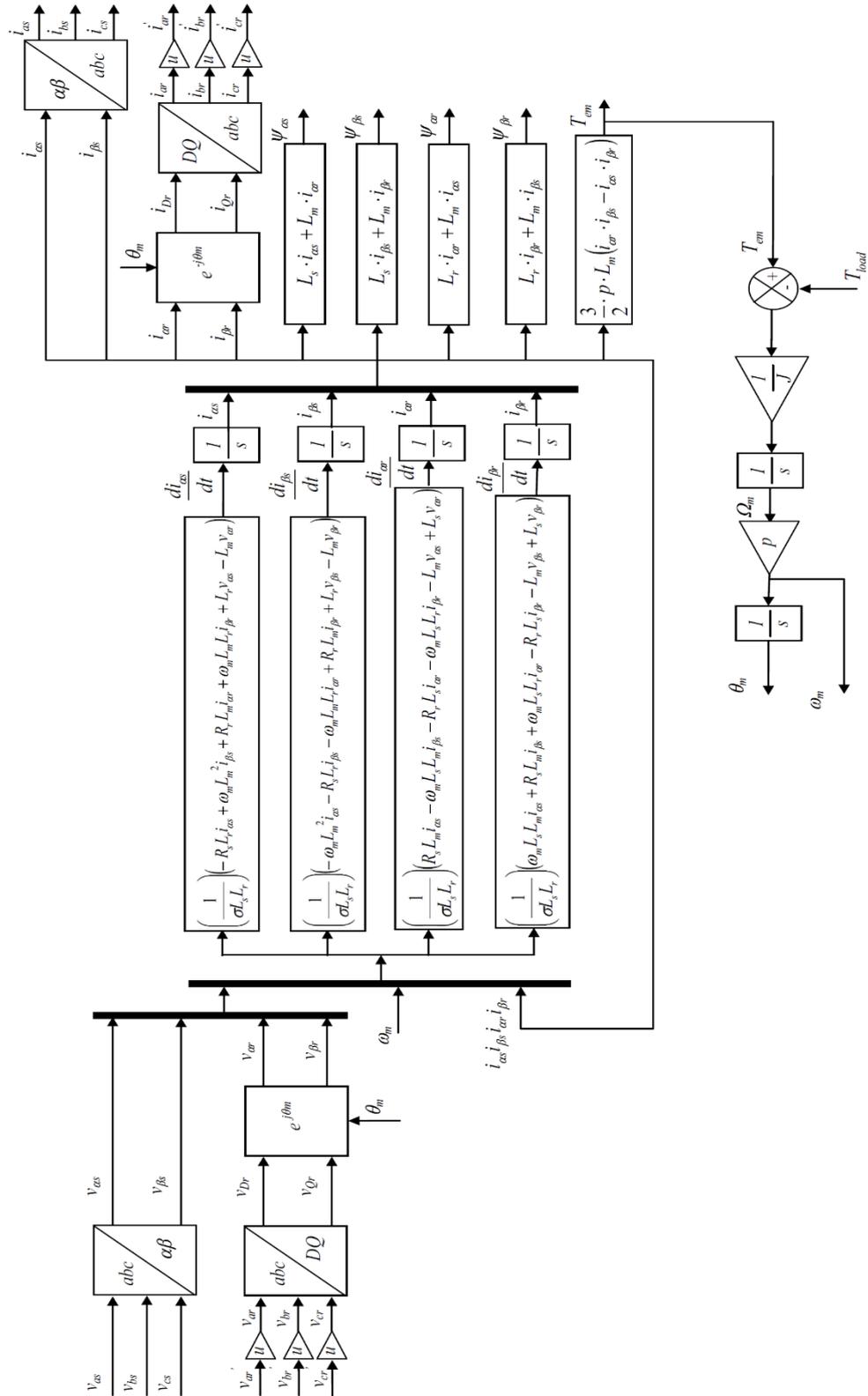


Figure B- 3: Schéma fonctionnel de simulation du DFIM.

ANNEX

Annex C :

I Paramètres de la GADA :

Caractéristique	Valeur	Description
Vitesse nominale (tr/min)	1500	La vitesse synchrone à 50 Hz
Puissance nominale (MW)	2	Puissance active triphasée nominale du stator
Tension nominale statorique (V)	690	Tension nominale du stator entre phases
Courant nominale rotorique (A)	1760	Courant statorique nominal de chaque phase
Couple électromagnétique K (N.m)	12.7	Couple nominal en mode générateur ou moteur
Couplage	Étoile	
P	2	Pair de pole
Tension nominale rotorique (V)	2070	Tension nominale rotorique
u	0.34	
R_s (mΩ)	2.6	Résistance statorique
$L_{\sigma s}$ (mH)	0.087	Inductance de fuite du stator
L_m (mH)	2.5	Inductance magnétisante
R'_r (mΩ)	26.1	Résistance du rotor
L'_r (mH)	0.783	Inductance de fuite du rotor
R_r (mΩ)	2.9	Résistance rotorique rapportée au stator
$L_{\sigma r}$ (mH)	0.087	Inductance de fuite du rotor rapportée au stator
L_s (mH)	2.587	Inductance statorique : $L_s = L_m + L_{\sigma s}$
L_r (mH)	2.587	Inductance du rotor : $L_r = L_m + L_{\sigma r}$
J	127	Interie
D	0.001	Amortissement
V bus (V)	1150	

II Paramètres de la turbine :

Paramètres	Valeur	Unités
Rayon	42	m
Multiplicateur de la vitesse	100	-----
Densité de l'air	1.225	-----
Rapport de la vitesse λ_{opt}	7.2	-----
Coefficient de puissance maximal C_{pmax}	0.44	Kg/m ³

ANNEX

III Courbe de puissance de l'éolienne :

Vitesse du vent	La puissance 10 ⁵
0.0000	0
0.5556	0
1.1111	0
1.6667	0
2.2222	0
2.7778	0
3.3333	0
3.8889	0.0472
4.4444	0.1097
5.0000	0.1815
5.5556	0.2568
6.1111	0.3418
6.6667	0.443
7.2222	0.5642
7.7778	0.7046
8.3333	0.8667
8.8889	1.0518
9.4444	1.2616
10.0000	1.4976
10.5556	1.7613
11.1111	2.0534
11.6667	2.3513
12.222	2.4024
12.7778	2.4024
13.3333	2.4024
13.8889	2.4024
14.4444	2.4024
15.0000	2.4024

Bibliographie

- [1] H. Demirdjian, «Les combustibles fossiles : formation, composition et réserves,» 2015. [En ligne]. Available: <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-organique/synthese-et-retrosynthese/les-combustibles-fossiles-formation>.
- [2] K. FERKOUS, Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne, Université Mantouri ,Constantine, 2009.
- [3] M. Ivan, Modélisation et Réalisation d'une Chaîne de Conversion Eolienne Petite Puissance, Laboratoire D'électronique de Montpellier (LEM), 2004.
- [4] [En ligne]. Available: <http://www.energierenouvelable.org> .
- [5] [En ligne]. Available: <http://windenergyfacts.eu/brief-history-of-wind-energy.html>.
- [6] [En ligne]. Available: <http://www.windustry.fr/node/259>.
- [7] [En ligne]. Available: <https://www.comptoireolien.fr/les-differents-types-d-eoliennes/index.html>.
- [8] M. A. KADRI, Etude numérique de l'écoulement d'aire à travers une éolienne Darriuesde type H à pale NACA 4412, université de Ouargla : Mémoire de Master académique , 2015.
- [9] H. Camblong, Thèse de doctorat en Automatique :Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans lagénération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers: Centre de Bordeaux, 2003.
- [10] F. POZA LOBO, Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable, These doctorant, poly grenoble: Ins Nat , 2003.
- [11] Y. Lang, B. Wu , N. Zargari et S. Kouro, Power Conversion and Control of Wind Energy Systems, John Wiley & Sons,Inc, 2011.
- [12] K.Boureguig, *Synthèse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) destinée à l'énergie éolienne*, Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2009.
- [13] S. F.Bensid, ,, " *Le Contrôle vectoriel d'une machine asynchrone alimentée par convertisseur matriciel indirect*"" , thèse de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [14] A. Gonzalo, L. Jesu's, R. Miguel A., M. Luis et I. Grzegorz, Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, ohnWiley&Sons, 2011.

- [15] B. Hamane, «Contrôle robuste d'aérogénérateur», Mémoire de magister, Université d'Oran., 2012.
- [16] A. Milicua et A. Gonzalo, *Power Electronics and Electric Drives*, John Wiley & Sons, Ltd., 2017.
- [17] H. Tédjini, Y. Meslem et M. Rahli, «"Contrôle non linéaire avancé du redresseur MLI», *ACTA Electrotechnica*, vol. 49, n° 13, 2008.
- [18] B. M'hamed, «Commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberonnage supercapacités d'un véhicule électrique», Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2003.
- [19] A. Bouafia, «"Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI», Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2010.
- [20] A. Ibrahim, E. Solomin et A. Miroshnichenko, «Control Strategy for Maximum Power Point Tracking», chez *International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2018.
- [21] K. Sul, *Control of Electric Machine Drive Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [22] R. H. Monfared M, «Design and experimental verification of a dead beat power», *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 418-425, 2012.
- [23] J. Rodriguez , J. Dixon, J. Espinoza et P. Lezana, «PWM regenerative rectifiers: state of the art», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, pp. 5-22, 2005.