

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع :/م/ 2021

Mémoire de Master

Présenter par :

Ghemame Fahem

Bellout Abderazak

Filière: ELECTROTECHNIQUE

Spécialité: Electrotechnique Industrielle

Un Control intelligente hybride basé sur DPC pour DFIG connecté au réseau avec une fréquence de commutation fixe utilisant la stratégie MPPT

Déposé le 19 /09/ 2024

Jury composé de :

Ameziane	Sadek	UAMO, Bouira	Encadreur
Bensafia	Yassine	UAMO, Bouira	Examineur
Aissaouni	Salim	UAMO, Bouira	président



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Bouira le : ...19/09/2024 à 22:00.....

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné(e), l'enseignant (e) :Mr: AMEZIANE Sadek.....

Encadreur des étudiants (es) :

1-.....Ghemame Fahem.....

2-.....Bellout Abderazak.....

Spécialité :El.....

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master dont la thématique est:

UN CONTROLE INTELLIGENT BASE SUR DPC POUR LES CONNEXIONS AU RESEAU D'UNE DFIG.

Signature du rapporteur

Mr. Ameziane Sadek



Dédicace

Après avoir terminé cette tâche, j'exprime ma gratitude envers ALLAH, le tout-puissant, pour m'avoir accordé la santé et la volonté de l'accomplir.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers mon superviseur, le Pr. AMEZIANE SADEK, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de notre étude et de la réalisation de ce travail.

J'exprime également ma gratitude envers les membres du jury pour avoir accepté de juger et d'évaluer notre travail.

J'exprime également ma gratitude envers, mon collègue B.ABD EREZZAK et mes professeurs, mes parents, mes frères, mes sœurs et mes chers amis pour leur soutien et leurs efforts.

Ghemame fahem

Dédicace

Après avoir terminé cette tâche, j'exprime ma gratitude envers ALLAH, le tout-puissant, pour m'avoir accordé la santé et la volonté de l'accomplir.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers mon superviseur, le Pr. AMEZIANE SADEK, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de notre étude et de la réalisation de ce travail.

J'exprime également ma gratitude envers les membres du jury pour avoir accepté de juger et d'évaluer notre travail.

J'exprime également ma gratitude envers, mon collègue G.fahem et mes professeurs, mes parents, mes frères, mes sœurs et mes chers amis pour leur soutien et leurs efforts.

Belout Abd Erazak

Remerciements

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du département des Sciences et des Sciences appliquées de l'université de Brouira.

Nous remercions chaleureusement le docteur ameziane sadek, qui a joué le rôle de Directeur de ce mémoire. En exprimant notre gratitude pour son soutien constant et le temps précieux qu'il a consacré à notre travail. Sans ses précieux conseils, ses encouragements et son engagement, nous n'aurions pas pu accomplir cette tâche.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude sincère envers tous les membres du jury pour leur intérêt porté à notre travail.

Finalement, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة النمذجة والتحكم والمحاكاة لنظام طاقة الرياح على أساس مولد غير متزامن مزدوج التغذية (GADA) متصل مباشرة بالشبكة عن طريق الجزء الثابت ويدفعه الدوار بواسطة محولين ثابتين . الفكرة هي تنفيذ نظام تحكم منفصل عن GADA لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات . تم تحليل نوعين من التحكم في النواقل من أجل التحكم المستقل في القدرة النشطة والمتفاعلة : التحكم في النواقل، استنادًا إلى المنظمين التقليديين من نوع PI . لقد اخترنا إستراتيجيتين للتحكم DPC-C و DPC-SVM. سمحت لنا نتائج المحاكاة ل GADA بالحكم على جودة التحكم الذي يتميز بغياب التجاوز مقارنة بالتعليمات ويضعف التذبذبات العابرة وأوقات الاستجابة القصيرة .بالإضافة إلى ذلك، فإن تردد التبديل متغير ويصعب التحكم فيه بسبب استخدام أجهزة التحكم في الخلفية .أكدت نتائج المحاكاة لعنصر التحكم DPC-SVM التحسن في الأداء ومزايا التحكم في تردد التبديل . لقد مكنت هذه الامتيازات من تقليل التوافقيات (THD) في نظام تحويل طاقة الرياح لدينا .

الكلمات المفتاحية GADA : التحكم الشعاعي، منظم PI ، طاقة الرياح، DPC-C ، DPC-SVM ، THD

Résumé :

Dans cette thèse, nous examinons la modélisation, le contrôle et la simulation d'un système d'énergie éolienne qui utilise la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui est connectée directement au réseau par son stator et qui est pilotée par son rotor par deux convertisseurs statiques.

L'objectif est de mettre en place un système de contrôle séparé de la GADA afin de garantir une qualité d'énergie améliorée et de rendre le système insensible aux perturbations. Le contrôle indépendant de la puissance active et réactive a été analysé en utilisant deux types de contrôle vectoriel : la Commande vectorielle, qui repose sur des régulateurs classiques de type PI.

Trois stratégies de commande ont été sélectionnées : MPPT, DPC-C et DPC-SVM. Grâce à la simulation de la GADA, nous avons pu évaluer la qualité de la commande, qui se distingue par l'absence de déviation par rapport aux instructions, ainsi que par des oscillations transitoires faibles et des temps de réponse courts.

De plus, il est difficile de contrôler la fréquence de commutation en raison de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis. Les performances améliorées et les bénéfices liés à la maîtrise de la fréquence de commutation ont été confirmés par les résultats de la simulation de la commande DPC-SVM.

Mot clés : GADA, commande vectorielle, régulateur PI, énergie éolienne, MPPT, DPC-C , DPC-SVM,

Abstract :

In this thesis, a double-fed asynchronous generator (GADA) that is powered by two static converters and has its rotor directly linked to the network is the basis for the modeling, control, and simulation of a wind energy system.

To improve power quality and make the system less susceptible to disruptions, a control system that is disconnected from GADA is intended to be put into place. For the separate regulation of active and reactive power, two forms of vector control have been examined: vector control, which uses traditional regulators of the PI type

Three control strategies MPPT, DPC-C and DPC, SVM have been selected. The GADA simulation results enabled us to assess the control quality, which is defined by the lack of overshoot in relation to the instructions, as well as by the transient oscillations' weakness and quick reaction times. Furthermore, when hysteresis controllers are used, the switching frequency is unpredictable and challenging to regulate.

The benefits and performance gain of regulating the switching frequency were validated by the DPC-SVM control simulation results.

Keywords: vector control, wind energy, PI regulator, DPC-C, DPC-SVM, THD, and GADA.

Table des Matières

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I.....	3
État de l'art de l'énergie éolienne	3
I.1 : Introduction :	4
I.2 : Historique :	4
I.3 : Définition de l'énergie éolienne :	5
I.4 : Les Principaux composants d'une éolienne :	6
I.5 : Le Système de Conversion Éolien (SCE) :	8
I.6 : Principes de fonctionnement des éoliennes :	8
I.7 : La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :	9
I.8 : Les différents types aérogénérateurs 'éolienne' :	10
I.8.1. Axe vertical (VAWT) :	10
I.8.2. Axe horizontal (HAWT) :	14
I.8.3. Comparaison :	16
I.9. Classement des éoliennes :	17
I.9.1. Eolienne à vitesse fixe :	17
I.9.2. Eolienne à vitesse variable :	18
I.10. Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne :	19
I.10.1. Génératrice synchrone couplée au réseau :	19
I.10.2. Génératrice asynchrone connectée au réseau:	20
I.10.3. Génératrice asynchrone à double alimentation GADA :	22
I.11. CONCLUSION:	23

Chapitre II

Chapitre II	24
Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	24
II.1. Introduction :	25
II.2 Description sur le système étudié :	25
II.3. Modélisation de la turbine éolienne:	26
II.3.1. Loi de Betz :	26
II.3.2. Production d'énergie mécanique :	28

II.4. Modèle du vent :	29
II.5. MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE DE L'EOLIENNE	30
II.6. Modélisation de a turbine :	31
II.7. Modélisation du multiplicateur:	34
II.8. Equation de l'arbre mécanique:	35
II.9. Graphe informationnel causal du modèle de la turbine:	35
II.10. Stratégie de la commande de la turbine :	37
II.11. Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :	38
II.11.1. Bilan des puissances :	38
II.12. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :	39
II.12.1. Principe général :	39
II.12.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :	41
II.13. les résultats obtenus.	46
II.14. Interprétation les résultats.	47
II.15.conclusion.	48

Chapitre III

Chapitre III	49
La modélisation de la MADA	49
III.1. Introduction :	50
III.2. PRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA):	50
III.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION:	51
III.4. Mode fonctionnement de la MADA:	52
III.5. Fonctionnement en mode génératrice:	53
III.5.1. Fonctionnement en Mode génératrice Hypo-Synchrone:	54
III.5.3. Fonctionnement en mode moteur:	55
III.5. Avantages et Inconvénients de la MADA :	57
III.6. Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA);	57
III.7. Constitution de la GADA :	58
III.7.1. Stator :	58
III.7.2. Rotor bobiné :	59
III.7.3. Principe de fonctionnement :	59
III.7.4. Les applications de la GADA:	60
1. Énergie éolienne	60

2. Hydroélectricité.....	60
3. Systèmes hybrides de production d'énergie.....	61
4. Récupération d'énergie des flux industriels.....	61
5. Systèmes de pompage (pompes hydrauliques).....	61
6. Systèmes de ventilation industrielle.....	61
7. Applications maritimes (énergie des vagues) :.....	61
III.7.5. Les avantages de la GADA:.....	62
III.7.6. Les inconivientes:.....	62
III.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA):.....	62
III.8.1. Hypothèses simplificatrices La machine asynchrone à double alimentation (MADA) : ..	63
III.9. Modélisation de la MADA dans des référentiels diphasés :.....	66
III.10. Couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :.....	68
III.11. Choix de référentiel :.....	68
III.11.1. .Référentiel lié au stator:.....	68
III.11.2. Référentiel lié au rotor :.....	68
III.11.3. Référentiel lié au champ tournant :.....	69
III.12. Modèle de la MADA dans le repère de PARK sous forme d'état:.....	69
III.13. Association convertisseur- machine.....	71
III.14. Alimentation de la machine par onduleur:.....	71

Chapitre IV

Commande directe de puissance (DPC) de la MADA.....	74
IV.1. Introduction :.....	75
IV.2. Histoire de la DPC :.....	75
IV.3. THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE :.....	75
IV.4. PRINCIPE GENERAL DE LA DPC CLASSIQUE (DPC-C) :.....	76
IV.5. DPC-C de la MADA :.....	77
IV.6. Estimation de la puissance active et réactive :.....	77
IV.7. Secteurs du Flux rotorique :.....	77
IV.8. Choix des comparateurs à hystérésis :.....	78
IV.9. Elaboration de la table de commutation :.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.10. COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE LA MADA :.....	79
IV.11. Résultats de simulation :.....	80
IV.12. Interprétation des résultats.	80
IV.14.1. introduction :.....	81
IV.14.2. Principe de la MLI vectorielle SVM :.....	81

IV.14.2. Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM) :	84
IV.14.3. Calcul des temps de commutation :.....	85
III.15.DPC-SVM de la MADA :	86
IV.15.1. Boucles internes de régulation des courants rotoriques	87
IV.16. Résultats de simulation :	89
IV.17. Interprétations des résultats :.....	90
IV.18. Conclusion :	91
Conclusion générale :	91
Références bibliographié :.....	93

Liste des figures :

Figure I.1: Différentes sources d'énergies renouvelables	4
Figure I.2 : L'énergie éolienne entre le passé et le futur	5
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique de vent	6
Figure I.4 : Les éléments principaux d'une éolienne.....	7
Figure I.5 : schéma de conversion de l'énergie éolienne	8
Figure I.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	9
Figure I.7: La capacité mondiale installée en GW	10
Figure I.8: Diagramme de types d'éoliennes.....	10
Figure I.9 : Eolienne a axes verticale	11
Figure I.10: L'éolienne à axe vertical de type Savonius.	12
Figure I.11 : Les éoliennes de type Darrieus (RAPIN 2014)	12
Figure I.12: Exemples Darrieus Constructions VAWT.....	13
Figure I.13 : Exemples des constructions (Darrieus de type H) et Savonius	13
Figure I.14 : éolienne a axe horizontal	14
Figure I.15 : Turbines éoliennes en amont et en aval.....	15
Figure I.16 : éolienne a vitesse fixe.....	18
Figure I.17 : éolienne fonctionnant a vitesse variable.....	19
Figure I.18 : Connexion directe d'une machine synchrone au réseau	19
Figure I.19 : Machine asynchrone connectée au réseau électrique.	21
Figure I.20 : Topologie de raccordement au réseau utilisant une MADA.....	22

Chapitre II:

Figure II.1 : Système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une GADA.	25
. Figure II.2 : théorie de Betz : schéma de principe.....	27
Figure II.3 : Coefficient de puissance.....	27
Figure II.4 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [12].....	28
Figure II.5 : Puissances théoriques disponibles pour un type d'éolienne donnée [16].....	29
Figure II.6 : Simulation du profil de a vitesse du vent appliqué à la turbine [17].	30
Figure II.7 : systeme mécanique de l'eolienne [18].	30
Figure II.8 : modèle mécanique simplifié de la turbine.....	31
Figure II.9 : Schéma de la turbine éolienne (aérogénérateur) [18].....	32
Figure II.10 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).	33
Figure II.11 : modèle de la turbine [19].	34
Figure II.12 : Modélisation du Multiplicateur [20].	34
Figure II.13 : Graphe informationnel causal du modèle de la turbine [21]	36
Figure II.14 : Schéma bloc d'une turbine éolienne [21].....	36
Figure II.15 : Caractéristiques vitesse et puissance d'une éolienne [9].....	37
Figure II.16 : Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5 MW.	38
Figure II.17 : Diagramme de conversion de puissance.	38
Figure II.18 : Stratégies de commande de la turbine étudiée.	39
Figure II.19 : GIC du modèle de la turbine et de son dispositif de contrôle de la vitesse en boucle fermée.....	40
Figure II.20 : Fonctionnement optimal de la turbine.....	41

Figure II.21 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	41
Figure II.22 : Maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	42
Figure II.23 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	43
Figure II.24 : Coefficient aérodynamique C_p en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	44
Figure II.25 : Résultats de simulation de la turbine sans MPPT.	45
Figure II.26 : Résultats de simulation de la turbine avec MPPT.	46

Chapitre III.

Figure III.1 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation [30].	50
Figure III.2 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	51
Figure III.3 : Modes opérationnels caractéristiques de la DFIM.....	52
Figure III.4 : Système de conversion éolienne à base de la MADA [12].	53
Figure III.5 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice	53
Figure III.6 : Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone.....	54
Figure III.7 : Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone	54
Figure III.8 : Fonctionnement en mode moteur avec un onduleur.	55
Figure III.9 : Fonctionnement en mode moteur avec un cyclo-convertisseur	55
Figure III.10 : Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs et un bus continu commun....	56
Figure III.11 : Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs avec deux bus continus.....	56
Figure III.12 : Fonctionnement en mode moteur avec deux cyclo-convertisseurs.....	56
Figure III.13 : Système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une GADA.....	58
Figure III.14 : constitution de la génératrice asynchrone [29].....	58
Figure III.15 : stator d'une génératrice asynchrone triphasé.	59
Figure III.16 : Rotor bobiné	59
Figure III.17 : configuration du système de conversion d'énergie éolienne GADA (un seul générateur) en utilisant le convertisseur back-to-back [31].	60
Figure III.18 : Représentation schématique du modèle d'une MADA.....	63
Figure III.19 : MADA avec des bagues collectrices	63
Figure III.20 : Représentation simplifié de la MADA.....	63
Figure III.21 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	67
Figure III.22 : Système d'alimentation d'une machine asynchrone à double alimentation.	72
Figure III.23 : Redresseur triphasé à diodes.	73

Chapitre IV:

Figure IV.1 : Configuration de la DPC-C de la MADA.....	76
Figure IV.2 : Les six secteurs du flux rotorique	78
Figure IV.3 : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive.	78
Figure IV.4 : Modèle simplifié de la génératrice à double alimentation (GADA).	79
Figure IV.5 : Résultats de simulation de la turbine avec MADA commandée en DPC.	80
Figure IV.6 : États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension.	82
Figure IV.7 : Représentation des vecteurs de tension dans le repère $(\alpha-\beta)$	82
Figure IV.8 : Décomposition d'un vecteur de tension de référence V_{r_ref}	83
Figure IV.9 : Séquence d'application des vecteurs sur une période T_e	85
Figure IV.10 : Boucle de régulation des courants [1].	88

Figure IV.11 : Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA.	89
Figure IV.12 : Résultats de simulation de la turbine avec MADA commandée intelligemment (MPPT) en DPC.	90

Liste de tableaux :

Tableau I.1 : classification des éoliennes selon la puissance	6
Tableau I.2: les catégories des éoliennes selon leur puissance.....	16
Tableau I.3: la comparaison entre les deux types d'éoliennes.	16
Tableau I.4: Avantages et inconvénients du SCEE basé sur la Génératrice synchrone	20
Tableau I.5: avantages et inconvénients du SCEE basé sur MAS connectée au réseau électrique.	21
Tableau I.6:résume les points forts et les points faibles du SCEE basé sur la MADA	57

Chapitre IV :

Tableau IV.7:Table de sélection des vecteurs optimaux	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 8:Calcul des Tensions rotorique	84
Tableau IV.9 :Identification du secteur	85

Liste de symboles :

C_p : Le coefficient de puissance (-)

λ : Vitesse réduite ou rapport de vitesse (-)

λ_{opt} : Vitesse réduite optimale (-)

β : Angle de calage des pales de la turbine ($^\circ$)

C_t : Le cople mécanique de l'arbre lente (N.m)

C_m : le cople mécanique de la MADA (N.m)

Ω_t : La vitesse de rotation de turbine (tr/min)

Ω_m : La vitesse de rotation de la MADA (tr/min)

C_{em} : Le cople électromagnétique de la MADA(N.m).

C_f : cople résistant de frottement(N.m).

K : constant positive

K_i : le gain intégral du contrôle dans les puissances statorique

K_p : le gain proportionnel du contrôle dans les puissances rotorique

f : Le coefficient de frottement dans le couplage mécanique

J : l'inertie totale ramenée du la génératrice ($kg.m^2$)

G : le gain de multiplicateur.

g : le glissement

R_s : résistance statorique(Ω)

L_s : l'inductance propre a coté statorique(H).

R_r : Résistance a coté rotorique(Ω).

L_m : l'inductance propre a coté rotorique(H).

M : Inductance magnétisante (H).

M_s : l'inductance mutuelle ente les phases de statorique (H)

M_r : l'inductance mutuelle ente les phases de rotorique (H)

M_{sr} : L'inductance mutuelle stator ramenée au rotor (H).

M_{rs} : L'inductance mutuelle rotor ramenée au stator (H)

V_{sabc}, V_{rabc} : Les tensions triphasées statoriques et rotoriques (V)

i_{sabc}, i_{rabc} : Les courants triphasés statoriques et rotoriques (A)

Φ_{sabc}, Φ_{rabc} : Les flux triphasés à travers les enroulements statoriques et rotoriques (wb)

p : Nombre de pair de pôles (-)

Θ : est l'angle entre l'axe rotorique A_r et l'axe statorique A_s ($^\circ$)

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A_r et l'axe direct u ($^\circ$)

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a_s et l'axe direct u ($^\circ$)

ω_r : Pulsation des courants rotorique (rd/s)

ω_s : Pulsation des courants statorique (rd/s)

ω_n : la vitesse angulaire nominale de la machine (rd/s)

ω_m : Pulsation du rotor de la MADA (rd/s)

f_r et f_s : Frequence des courant rotorique et statorique (Hz)

V_s et V_r : Tension simple statorique et rotorique (V)

V_{sd}, V_{sq} : Les tensions triphasées statoriques exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (V)

V_{rd}, V_{rq} : Les tensions triphasées rotorique exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (V)

I_r : la valeur efficace des courants rotorique de la MADA (A)

I_s : valeur efficace des courants statoriques de la MADA (A)

i_{sd}, i_{sq} : Les courants triphasés statoriques exprimé dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (A)

i_{rd}, i_{rq} : Les courants triphasés rotorique exprimée dans le repère de Park respectivement sur les axes d et q (A)

ϕ_{sn} : est le flux statorique nominal (wb)

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statorique dans le repère de Park sur les axes d et q (wb)

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotorique dans le repère de Park sur les axes d et q (wb)

$\Phi_{ra}, \Phi_{r\beta}$: Flux rotorique diphasé dans le repère (α, β) (wb)

$\Phi_{sa}, \Phi_{s\beta}$: Flux statorique diphasé dans le repère (α, β) (wb)

σ : Coefficient de dispersion de Blondel (-)

P_s : La puissance active statorique (W)

P_r : La puissance active rotorique (W)

Q_s : La puissance réactive statorique (VAR)

P_{s-ref} : La puissance active statorique de référence (W)

Q_{s-ref} : La puissance réactive statorique de référence (VAR)

H_p : Hystérisis de la puissance active (-)

H_Q : Hystérisis de la puissance réactive (-)

ABREVIATIONS :

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

MPPT : Maximum power point tracking, Algorithme d'extraction du maximum de puissance

CCM : Convertisseur coté MADA

CCR : Convertisseur coté réseau

DPC : Direct Power Control, Commande direct en puissance

DC : Réseau à courant continue

THD : Total Harmonic Distortion

SVM : Spase vector modulation : Commande par la technique de modulation vectorielle

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée.

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte.

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction générale :

L'électricité a évolué. Un élément indispensable pour l'humanité. Effectivement, l'accès à l'électricité assure une qualité accrue de vie (hygiène, santé, éducation, etc.) et constitue un facteur clé de développement économique. L'industrialisation rapide de dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électrique (chauffage, climatisation, lavage, médical, informatique, etc.) ont entraîné une demande mondiale croissante en énergie électrique.

Afin de satisfaire cette demande, les pays industrialisés utilisent de manière massive les centrales nucléaires. L'avantage de cette source d'énergie est qu'elle ne pollue pas l'atmosphère, contrairement aux centrales thermiques. Mais le danger d'un accident nucléaire et le traitement et l'enfouissement des déchets nucléaires sont des défis majeurs qui font de cette énergie moins intéressante pour les générations à venir.

L'énergie mondiale est principalement produite à partir de combustibles tels que le bois, le charbon, le pétrole et le gaz, ainsi que de centrales à uranium pour la production d'électricité. L'exploitation de ces différentes sources, à travers des centrales nucléaires, hydrauliques et thermiques, a des impacts significatifs, notamment en termes de changement climatique et d'accidents nucléaires. Ces inconvénients ont poussé les chercheurs en génie électrique à rechercher de nouvelles sources d'énergie propre, se tournant vers les énergies dites "renouvelables" comme l'énergie éolienne, qui s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂.

Le potentiel de l'énergie éolienne est important, non pas pour remplacer complètement les sources d'énergie existantes, mais pour répondre à la demande croissante. Après des siècles de changements et des recherches avancées au cours des dernières décennies, plusieurs pays se sont résolument tournés vers l'énergie éolienne.

Cette énergie, qui tire parti d'une ressource naturelle inépuisable, est aujourd'hui au cœur de nombreuses stratégies de transition énergétique à travers le monde. Les progrès technologiques ont permis aux éoliennes de devenir de plus en plus efficaces et fiables,

Contribuant ainsi à l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial.

Nous avons consacré notre mémoire à examiner comment améliorer les performances de la commande DPC d'une centrale éolienne utilisant une GADA. (Génératrice Asynchrone à Double Alimentation). Nous nous concentrons sur une commande intelligente de type DPC (Direct Power Control) pour les connexions au réseau électrique d'une DFIG (Doubly-Fed Induction Generator). Le but est de contrôler la puissance active et réactive de manière optimale. La présentation de ce travail sera organisée en trois chapitres détaillés ci-après.

- Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous commençons par une définition approfondie de cette source d'énergie renouvelable, suivie d'une revue historique, des premiers moulins à vent aux éoliennes modernes. Nous examinons ensuite

Introduction Générale

l'exploitation mondiale de l'énergie éolienne, en détaillant les composants essentiels des aérogénérateurs et leur fonctionnement. Le chapitre explique également les principes de conversion de l'énergie du vent en électricité et présente les différents types d'éoliennes, en analysant leurs avantages, inconvénients et applications. Ce chapitre fournit une vue d'ensemble complète, préparant le terrain pour les développements technologiques et les innovations explorés dans les chapitres suivants.

- Le deuxième chapitre se concentre sur la chaîne de conversion du système éolien utilisant un Générateur à Accord Dynamique Actif (GADA). Nous présentons en détail le système GADA, ses caractéristiques et son fonctionnement, et abordons la modélisation des différents composants du système éolien, y compris l'onduleur. Le chapitre se termine par une discussion sur la stratégie de commande basée sur la méthode de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la production d'énergie.

_ Le troisième chapitre est dédié à la modélisation du Modèle d'Analyse Dynamique Avancé (MADA) dans les systèmes éoliens. Il présente le MADA, ses objectifs et son importance, puis détaille les aspects techniques et les méthodes de modélisation des dynamiques complexes. Le chapitre explore les approches et outils de simulation utilisés pour optimiser les performances, et examine les résultats des simulations ainsi que leurs implications pour l'amélioration des systèmes éoliens.

_ Le chapitre quatre la première partie sera contient la présentation de la commande de control classique DPC (Direct Power Control). L'objectif est de gérer directement la puissance active et réactive de la DFIG à l'aide du convertisseur CCM. Deux comparateurs à hystérésis alimentent ce dernier, avec les entrées représentant les erreurs instantanées obtenues en comparant les valeurs de référence et estimées de la puissance active et réactive, ce qui correspond à la DPC classique (DPC-C).

- Dans la deuxième partie de quatrième chapitre , nous allons associer le DPC à la technique de modulation vectorielle (SVM) afin d'améliorer les performances de la commande directe de puissance. Le DPC-SVM se distingue de la commande traditionnelle en utilisant une modulation vectorielle, garantissant ainsi un fonctionnement à fréquence de commutation constante pour le convertisseur CCM.

- Finalement, nous examinerons les résultats des commandes, DPC-C et DPC-SVM.

Chapitre I

État de l'art de l'énergie éolienne

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

I.1 : Introduction :

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses, avec un potentiel pratiquement illimité, mais que son comportement est souvent imprévisible. Cependant, les avancées récentes dans les domaines des éoliennes à vitesse variable, de l'électronique de puissance et des techniques de contrôle avancées ont permis d'améliorer la maîtrise de la production de puissance de ces générateurs éoliens. L'évolution a entraîné une compétitivité croissante de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie traditionnelles.

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse approfondie de l'état actuel de l'énergie éolienne, en mettant en lumière les avancées technologiques récentes et leurs implications pour l'avenir de cette industrie. En examinant de près ces développements, nous pourrions mieux comprendre comment l'énergie éolienne continue de jouer un rôle crucial dans le paysage énergétique mondial et comment elle peut contribuer à une transition vers une économie plus durable.

Au cours des dernières années, le progrès et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une augmentation notable. La recherche d'alternatives durables pour la production d'électricité est devenue un enjeu majeur, suscitant des discussions dans de nombreux secteurs et à l'échelle mondiale. De nombreux documents scientifiques témoignent de cet intérêt croissant pour les énergies renouvelables comme solution aux défis énergétiques actuels [1].

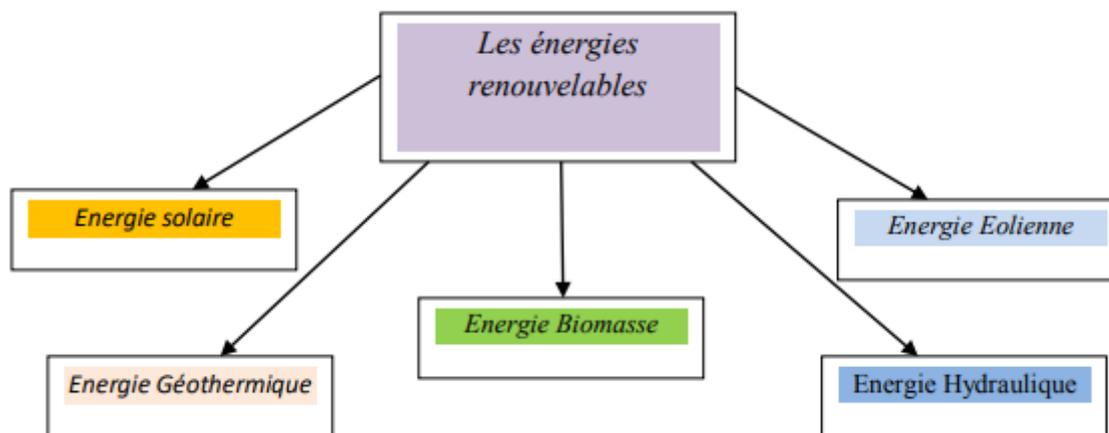


Figure I.1: Différentes sources d'énergies renouvelables [1].

I.2 : Historique :

Le vent, en tant que source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles. Il servait à la propulsion des navires il y a environ 3000 ans et à l'entraînement des moulins à vent, avec environ 200 000 moulins en Europe au milieu du 19ème siècle.

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie sur Terre. Pendant plusieurs siècles, le vent a été utilisé pour la propulsion des navires, constituant presque la

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

seule source d'énergie pour ces derniers jusqu'à l'invention du moteur à vapeur par James Watt au XVIIIe siècle.

L'histoire nous apprend qu'au VIIe siècle avant J.C., l'empereur de Babylone, Hammourabi, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne. Trois siècles avant J.C., l'Égyptien Héron d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales destinée à des applications mécaniques.

Au VIIe siècle, les Perses utilisaient des éoliennes rudimentaires à axe vertical pour irriguer les terres cultivées et moudre le grain.

Ce type de moulin à vent s'est répandu dans le monde arabe et, par la suite, les croisés les ont ramenés en Occident. Initialement, les systèmes éoliens étaient utilisés pour le pompage de l'eau (POLDER), mais au XVIe siècle, ils ont été adaptés à d'autres fonctions, comme la coupe du bois. Ce n'est qu'en 1890, au Danemark, que les éoliennes ont été utilisées pour produire de l'énergie électrique [2].



Figure I.2 : L'énergie éolienne entre le passé et le futur [3].

I.3 : Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. Ce processus se réalise principalement à travers un Système de Conversion d'Énergie Éolienne (SCEE), qui convertit cette énergie en une forme électrique utilisable. L'éolienne, qui constitue le cœur du SCEE, capte l'énergie du vent via ses pales rotatives, entraînant un générateur électrique, généralement asynchrone ou synchrone. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en électricité, qui est conditionnée par un système de conversion de puissance pour être compatible avec les exigences du réseau électrique.

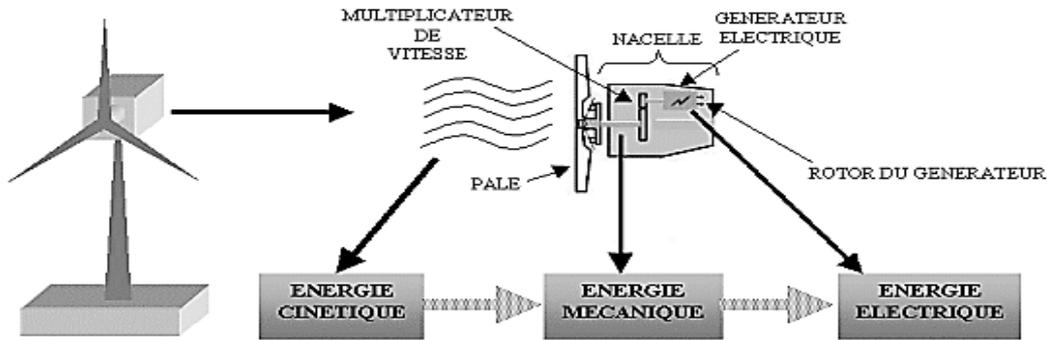


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique de vent [4].

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et en corrélation saisonnière. En hiver, lorsque la demande en énergie électrique est la plus élevée, la moyenne des vitesses des vents est souvent également plus élevée. De plus, cette énergie ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Cependant, elle est aléatoire dans le temps et son captage reste complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 mètres pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

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 de chaque type de l'éolienne [5].

Tableau I.1 : classification des éoliennes selon la puissance [5].

Eolienne	Diameters de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 kw
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kw à 1 mw
grande	46 m au plus	1 mw au plus

I.4 : Les Principaux composants d'une éolienne :

Différentes configurations d'aérogénérateurs peuvent présenter des disparités significatives. Cependant, une éolienne « traditionnelle » est généralement composée de trois composants principaux :

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

- **Le mât** : En général, il est recommandé d'utiliser un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique afin d'éviter toute perturbation près du sol. Cependant, la quantité de matériaux utilisés constitue un coût considérable et il est nécessaire de restreindre le poids. En général, il est préférable de choisir un mât qui est légèrement plus grand que le diamètre du rotor de l'aérogénérateur (par exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80m de hauteur).
- **La nacelle** : collective de tous les composants mécaniques nécessaires pour connecter le rotor éolien au générateur électrique : arbres lents et rapides, roulements, multiplicateur. Différent du frein aérodynamique, le frein à disque permet d'interrompre le système en cas de surcharge. En général, le générateur est une machine synchrone ou asynchrone, ainsi que des systèmes hydrauliques ou électriques qui orientent les pales (pour éviter les perturbations aérodynamiques) et la nacelle (pour maintenir la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). De plus, il y a le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne qui suivent.
- **Le rotor** : constitué par la combinaison des pales dans leur moyeu. Les éoliennes pour la production d'électricité ont généralement un nombre de pales variant de 1 à 3, avec le rotor tripale (concept danois) étant le plus couramment utilisé car il offre un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [4].
- **Les rotors à vitesse fixe** : Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont souvent équipées d'un système d'orientation de la pale qui permet à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner dans le voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans électronique de puissance. Ce système combine donc une simplicité et un coût abordable.
- **Les rotors à vitesse variable** : Il est fréquent que les prix soient plus abordables car le système d'orientation des pales est simplifié, voire supprimé (la société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Cependant, il est essentiel d'avoir une interface électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge. Les pales sont principalement distinguées par leur forme qui influencera les performances aérodynamiques et les matériaux utilisés (aujourd'hui, les matériaux composites comme la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont largement utilisés car ils allient légèreté et résistance mécanique). [4].

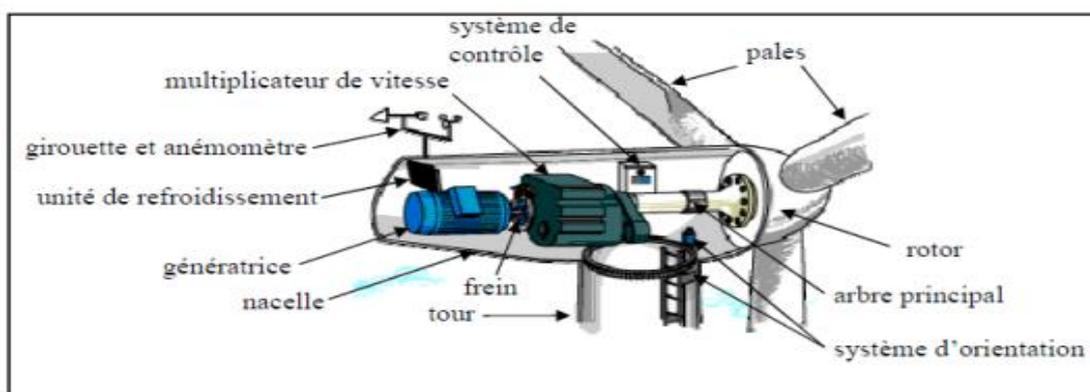


Figure I.4 : Les éléments principaux d'une éolienne.

I.5. Le Système de Conversion Éolien (SCE) :

Un Système de Conversion d'Énergie Éolienne (SCEE) est un ensemble intégré de technologies et de dispositifs conçu pour capturer l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique utilisable.

Le SCEE est une composante cruciale des infrastructures énergétiques modernes, facilitant la production d'électricité propre à partir du vent, une ressource renouvelable. Il joue un rôle vital dans la démunitions des émissions de gaz à effet de serre et la transition vers un système énergétique durable, tout en posant des défis techniques en matière de gestion de l'intermittence et de l'intégration au réseau.

Se compose d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne via un multiplicateur. Il inclut également un système de commande, un convertisseur statique, un transformateur et se connecte à un réseau électrique, comme illustré dans la figure [4].

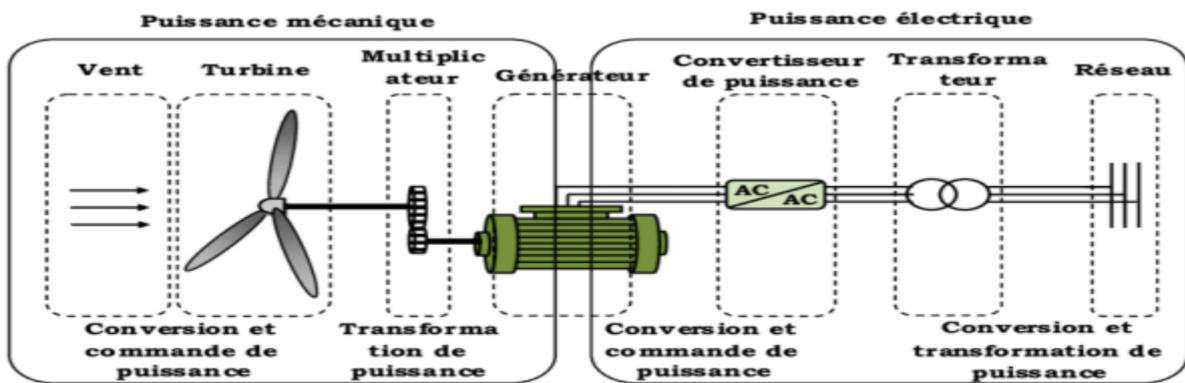


Figure I.5 : schéma de conversion de l'énergie éolienne [6].

I.6 : Principes de fonctionnement des éoliennes :

Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche, ses pales tournent. Le rotor (hélice) est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur, le mât varie entre 10 et 100 m de hauteur. Le rotor comporte souvent 3 pales, mesurant entre 5 et 90 m de diamètre. Pour faire tourner l'hélice, il faut une vitesse minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner quand le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif [7].

Les éoliennes opèrent selon un principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, qui se déroule en deux étapes. Tout d'abord, au niveau de la turbine, une partie de l'énergie cinétique du vent est captée et convertie en énergie mécanique. Ensuite, cette énergie mécanique est transmise au générateur, où elle est transformée en énergie électrique qui peut ensuite être intégrée dans le réseau électrique. Il est important de noter que dans ce processus,

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

il y a une nécessité de conversion et de transmission régulières de l'énergie, car le stockage direct de l'électricité produite par les éoliennes est limité et coûteux. Ainsi, la principale option de stockage réside dans l'inertie de la turbine, au prix d'une accélération et d'une décélération.

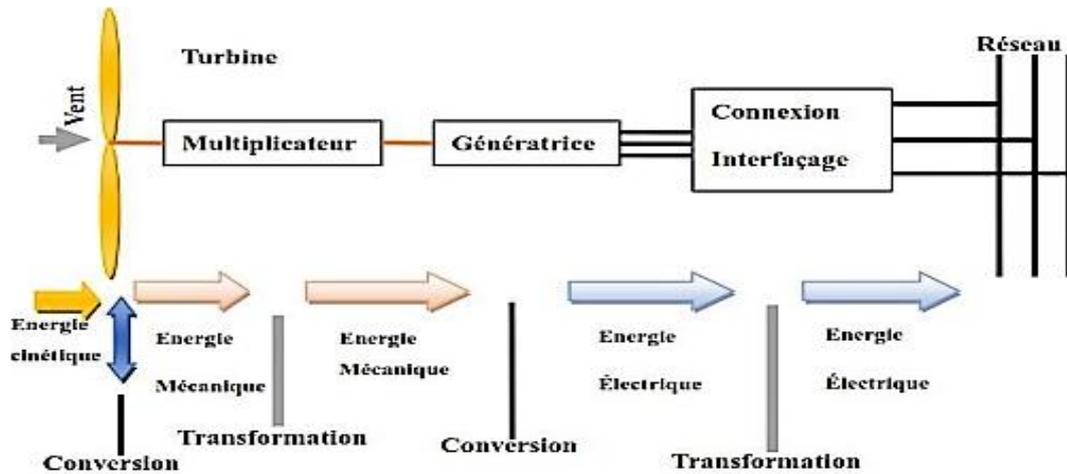


Figure I.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne [8].

I.7 : La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

L'année 2022 a marqué la troisième meilleure performance jamais enregistrée en matière de nouvelles capacités éoliennes, avec 78 GW ajoutés à l'échelle mondiale.

La capacité mondiale installée a atteint 906 GW, ce qui correspond à une croissance annuelle de 9%.

En 2023, il est prévu que plus de 100 GW de nouvelles capacités seront ajoutées à l'échelle mondiale pour la première fois. D'après GWEC Market Intelligence, on prévoit une augmentation annuelle de 15 %.

La recherche de marché de GWEC prévoit l'implémentation de 680 GW de nouvelles capacités au cours des cinq prochaines années (2023-2027), ce qui représente une moyenne annuelle de 136 GW. Jusqu'en 2030, les perspectives sont encore positives, avec 143 GW supplémentaires prévus d'ici la fin de la décennie, soit 13 % de plus que les prévisions antérieures. À l'origine, l'installation de 1078 GW était prévue entre 2022 et 2030, mais cette estimation a été modifiée à 1221 GW pour 2023-2030.

En 2022, ces deux marchés représentaient ensemble 71 % des installations mondiales, enregistrant une baisse collective de 3,7 % par rapport à 2021. Cette diminution est principalement due à la perte de part de marché combinée des deux principaux marchés mondiaux, la Chine et les États-Unis, qui ont perdu 5 % par rapport à l'année précédente. C'est la seconde année consécutive que ces deux pays perdent de leur part de marché. [9].

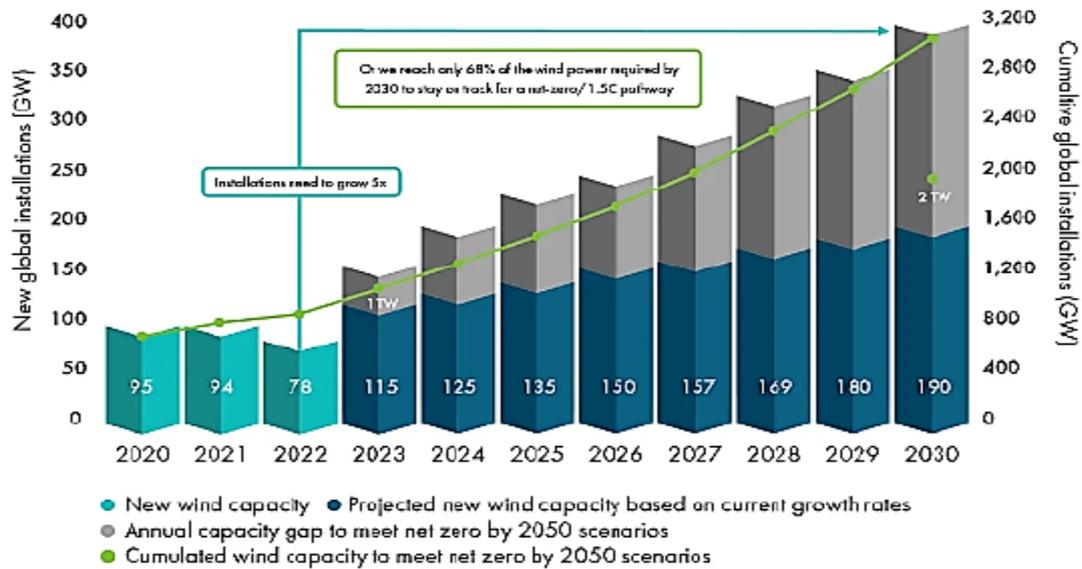


Figure I.7: La capacité mondiale installée en GW [9].

I.8 : Les différents types aérogénérateurs 'éolienne' :

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne, on classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles:

- Les turbines éoliennes à axe vertical (VAWT).
- Les turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) [2].

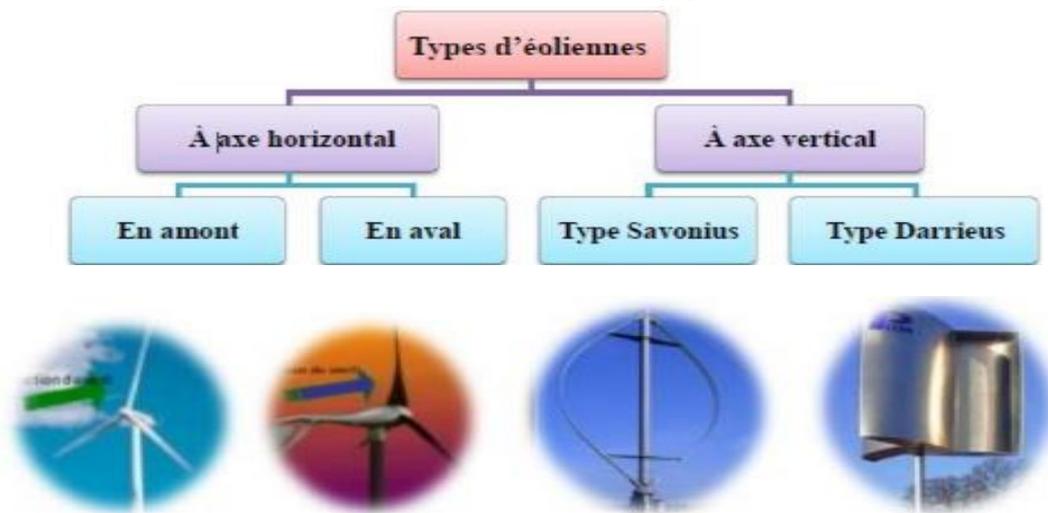


Figure I.8: Diagramme de types d'éoliennes [10].

I.8.1. Axe vertical (VAWT) :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures à axe vertical produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches, il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication génératrices) au niveau de sol facilitant ainsi les interventions de maintenance, de revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées de démarrage et le mat souvent très lourd subit des fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal.

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisés, puisque les contraintes mécaniques au niveau du sol occupent plus d'espace [7].

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier [3].

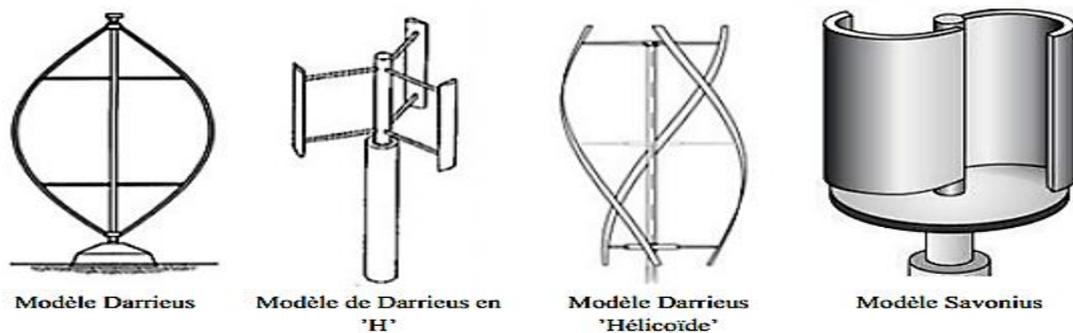


Figure I.9 : Eolienne à axes verticale [6].

De nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontal. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles :

1.8.1.1 : Le rotor de SAVONIUS :

Le rotor de SAVONIUS (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle". Ce type aérogénérateur utilise la traînée est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s.

Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison [3].

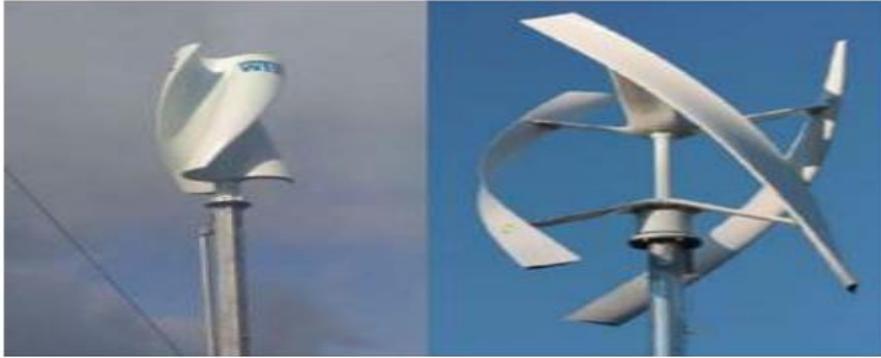


Figure I.10: L'éolienne à axe vertical de type Savonius [2].

1.8.1.2 Le rotor de DARRIEUS :

L'éolienne DARRIEUS tient son nom de l'ingénieur français Georges Jean Marie DARRIEUS qui déposa le brevet de cette invention aux États-Unis d'Amérique le 1 octobre 1926 et l'obtint le 8 décembre 1931.

Est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales, qui fonctionnent selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande. Lorsqu'elle démarre sa vitesse de rotation peut être importante puisque la vitesse du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances importantes (4 MW, installée au Canada en 1987), n'a pas connu de développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée ce qui incite à le prendre en considération dans ses futures recherches [2].

Toutefois, Ce type d'éoliennes permet de fournir une grande quantité d'énergie, Telle que Les éoliennes de type Darrieus (Georges Darrieus) peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elles ne peuvent pas démarrer toutes seules. Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépasse que très rarement 500kW en raison de leurs grandes sensibilités [3].



Figure I.11 : Les éoliennes de type Darrieus (RAPIN 2014) [2].

I.8.1.1.1 Les Avantages l'éolienne a axe vertical :

- Machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, fort couple de démarrage, construction simple (Savonius), tourne à faible vitesse (donc peu bruyante).
- Leur axe vertical offre une révolution symétrique, ce qui leur permet de fonctionner dans n'importe quelle direction du vent sans nécessiter d'orientation du rotor.
- La structure verticale offre la possibilité de fixer directement le multiplicateur, le générateur et les équipements de commande au sol.
- Leur design est facile, solide et demande peu d'entretien.
- Elles produisent peu de bruit.

I.8.1.1.2 Les inconvénients d'éolienne a axe vertical :

- En raison de leur architecture verticale, ils doivent être utilisés avec un vent proche du sol, ce qui les rend moins puissantes en raison de l'influence du relief.
- Elles ont une performance inférieure à celle des éoliennes à axe horizontal.
- Pour les installer au sol, il est nécessaire d'utiliser des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, ce qui leur permet d'occuper une surface supérieure à celle des éoliennes à tour. Guidages mécaniques, notamment le palier bas qui doit supporter le poids de l'ensemble de la turbine. Il existe principalement trois technologies Vawt (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieux classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius.
- Touts ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.



Figure I.12: Exemples Darrieux Constructions VAWT



Figure I.13 : Exemples des constructions (Darrieux de type H) et Savonius [10].

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

La structure la plus courante des éoliennes à variation cyclique d'incidence est celle de Darrius (un ingénieur français qui a déposé le brevet au début des années 30). Leur mécanisme repose sur le fait qu'un profil placé dans un flux d'air présentant des angles différents est soumis à des forces de direction et d'intensité différentes. En conséquence, ces forces créent un couple moteur qui provoque la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [10].

I.8.2. Axe horizontal (HAWT) :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à mono-pale, bipale, tripale ou multi-pales face ou sous le vent. D'une part elles sont caractérisées par leur capture du vent en hauteur, donc plus forte et plus régulière qu'au voisinage du sol, ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage car le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle. D'autre part ces éoliennes ont un coût de construction très élevé, en effet l'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident [3].



Figure I.14 : éolienne à axe horizontal [7].

Une éolienne mono-pale est plus abordable car elle nécessite une quantité moindre de matériaux. Toutefois, il est essentiel d'avoir un contre poids et ce genre d'éolienne n'est pas très couramment utilisé en raison de cela. Il est nécessaire d'équiper les rotors bipales d'un rotor basculant afin d'éviter que l'éolienne ne subisse des chocs trop intenses à chaque passage d'une pale de rotor devant la tour. Donc, afin de résoudre ces problèmes, la plupart des éoliennes installées ou à venir sont de type tripales. Ces dernières sont plus résistantes

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

car la charge aérodynamique est assez homogène et ont actuellement le coefficient de puissance le plus élevé, tel que deux types d'éolienne à axe horizontal existent :

Amont : En direction de la nacelle, le vent souffle sur le devant des pales, les pales étant rigides, et le rotor est orienté en fonction de la direction du vent grâce à un dispositif.

Aval : Le vent frappe l'arrière des pales depuis la nacelle. Le rotor est à la fois souple et auto-orientable. [11].

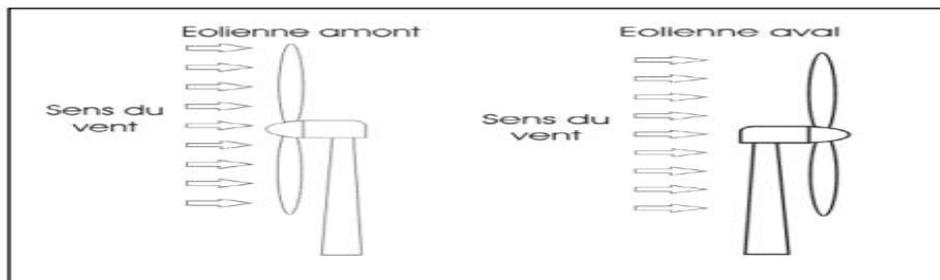


Figure I.15 : Turbines éoliennes en amont et en aval [11].

Il est toujours nécessaire d'orienter les pales des éoliennes à axe horizontal en fonction de la direction du vent. Ainsi, il y a des systèmes qui orientent la nacelle en fonction de cette direction. La disposition en amont de la turbine est la plus couramment employée en raison de sa simplicité, et offre de meilleurs résultats pour les puissances élevées, étant donné que les efforts de manœuvre sont moins importants et offre une stabilité accrue. [11].

I.8.2.1. Les avantages des éoliennes à axe horizontal incluent :

- La disposition du générateur et des dispositifs de contrôle dans la nacelle, située au sommet de la tour, élimine le besoin d'ajouter un local pour ces équipements.
- Elles ont un impact au sol beaucoup plus faible que les éoliennes à axe vertical.
- Grâce à leur design, ils permettent de capter le vent à un niveau supérieur, ce qui le rend plus fort et plus cohérent que celui capturé au niveau du sol.
- Elles offrent un rendement élevé.

I.8.2.2. Les inconvénients des éoliennes à axe horizontal sont les suivants :

- Les coûts de construction sont extrêmement élevés.
- Elles nécessitent des renforcements car elles résistent moins que les éoliennes à axe vertical. Par exemple, les zones exposées à des vents forts, ont utilisés des haubans pour renforcer l'ancrage, aussi installé un frein sur le coté du rotor.
- La mise en place de ces éoliennes entraîne des bruits.
- Les composants mécaniques et le générateur sont situés en hauteur, ce qui rend l'accès et la maintenance plus complexes et coûteux.

Les éoliennes peuvent être classées aussi en trois catégories selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau suivant:

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

Tableau I.2: les catégories des éoliennes selon leur puissance

Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12m	< 40 Kw
moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
grande puissance	> 46 m	> 1 MW

I.8.3. Comparaison :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie à grande échelle en raison de leur meilleure efficacité, tandis que les éoliennes à axe vertical sont plus adaptées pour des applications à petite échelle ou dans des environnements plus complexes comme les villes :

Le tableau présente en résumé les atouts et les inconvénients de chaque type de turbine. Les Eoliennes à axe horizontal (EAH) sont utilisées pour les applications à grande puissance.

Tableau I.3: la comparaison entre les deux types d'éoliennes.

Types de Turbines	Avantages	Inconvénient
Eoliennes à Axe Horizontal(EAH)	Un taux de conversion d'énergie élevé. Accès à un vent plus intense Décrochage et calage permettent de réguler la puissance en cas de vent supérieur aux limites nominales.	L'installation nécessite un coût élevé, un matériau très rigide qui doit supporter le poids de la nacelle. Des câbles plus étendus du sommet de la tour jusqu'au sol. Systèmes de guidage nécessaires
Eoliennes à Axe Vertical (EAV)	Le coût d'installation est moins élevé et la maintenance est plus aisée car elle se trouve à proximité de la surface. Autonomie du fonctionnement en fonction du vent. Approprié un bâtiment.	Rendement inférieur Une forte fluctuation du couple et de fortes vibrations mécaniques. Il existe des solutions limitées pour réguler les rafales de vent.

I.9. Classement des éoliennes :

Les éoliennes, en tant que technologies clés de la production d'énergie renouvelable, se déclinent en différentes catégories selon plusieurs critères. Ces classifications permettent de mieux comprendre leurs applications, performances et limites.

On peut également distinguer les turbines éoliennes en turbines à vitesse fixe ou en turbines à vitesse variable.

I.9.1. Eolienne à vitesse fixe :

Ces dernières sont les premières à avoir été élaborées, tournent à une vitesse relativement constante. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est en fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice, conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du dégrade une fois la vitesse de vent change.

La mise en service des premières éoliennes de grande puissance était basée sur l'emploi d'une machine asynchrone à cage directement connectée au réseau électrique, imposant ainsi sa fréquence (50 Hz) aux générateurs statorique.

Cette machine fonctionne généralement sous l'action d'un multiplicateur et sa vitesse est à peu près constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales (contrôle du pas). Afin de garantir la marche du générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation du MAS soit supérieure à celle de la synchronisation (glissement négatif). La vitesse de rotation de la machine est maintenue constante grâce au système de contrôle du pas, qui l'entraîne à travers un multiplicateur avec un glissement inférieur à 1% [3].

I.9.1.1 Avantage :

- Simple, robuste, fiable.
- Faible coût de construction et maintenance.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Technologie éprouvée.

I.9.1.2 Inconvénients :

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau [3].
- Efficacité limitée par rapport aux variations du vent.
- Manque de flexibilité pour s'adapter aux conditions de vent
- Risques de surcharge du réseau
- Bruit et vibrations plus élevés

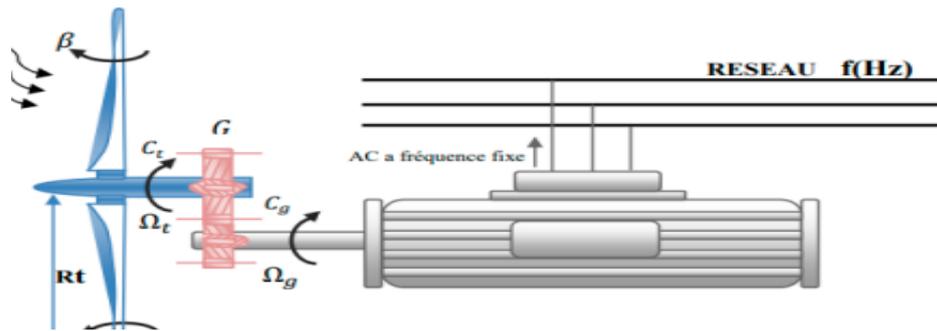


Figure I.16 : éolienne à vitesse fixe [9].

I.9.2. Eolienne à vitesse variable :

À l'heure actuelle, les éoliennes de grande puissance opèrent à des vitesses différentes. La vitesse variable fait référence à la différence de vitesse entre la vitesse de la turbine et la fréquence du réseau électrique.

La principale caractéristique de leurs pales est leur forme, qui déterminera les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont fabriquées. Ces dispositifs à vitesse variable offrent à la fois une meilleure récupération d'énergie, une diminution des dépenses du système mécanique, une réduction du bruit et une amélioration de la qualité de l'énergie générée. [3].

La vitesse de rotation de l'éolienne doit pouvoir être réglée pour maximiser sa puissance de sortie par rapport au vent. L'objectif est de créer un générateur dont la fréquence est constante et la vitesse varie. Les générateurs à variable vitesse ont la capacité de fonctionner à différentes vitesses de vent, ce qui permet de générer une puissance maximale tout en diminuant la pollution sonore. Le suivi de puissance maximale consiste à régler le système de manière à ce que l'éolienne tourne à sa puissance maximale à chaque vitesse de vent.

I.9.2.1 Les avantages :

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Fort rendement de conversion d'énergie.
- Moins de contraintes mécaniques
- Meilleure efficacité énergétique

I.9.2.2 Les inconvénients :

- Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs.
- Contrôle du système plus compliqué [3].
- Risque de pannes accru
- Dépendance aux convertisseurs

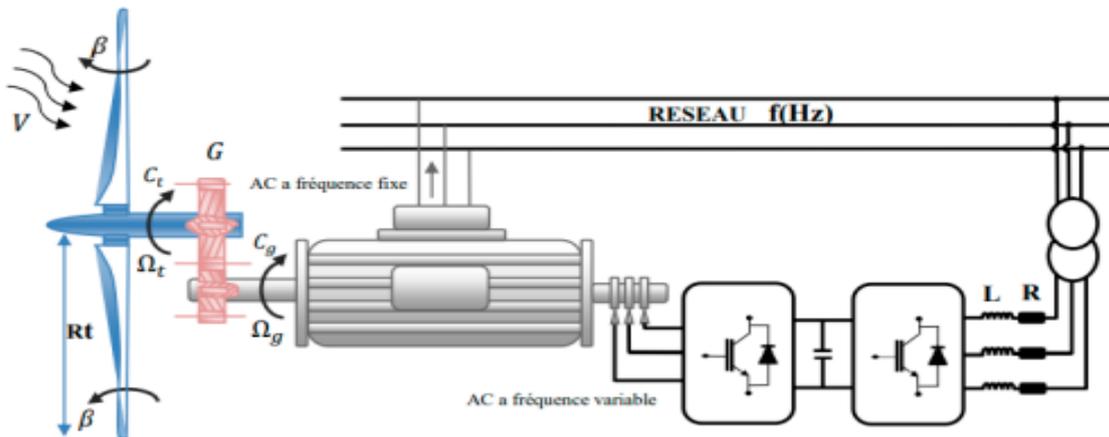


Figure I.17 : éolienne fonctionnant a vitesse variable [9].

I.10. Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne :

Il existe Trois types de génératrices peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable :

- La génératrice synchrone ;
- La génératrice asynchrone à cage ;
- La génératrice asynchrone à double alimentation GADA

I.10.1. Génératrice synchrone couplée au réseau :

La génératrice synchrone peut être soit une génératrice à rotor bobiné (Wound Rotor Synchronous Generator, WRSG), soit une génératrice à aimant permanent (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG), cette dernière étant la plus largement utilisée dans l'industrie des éoliennes. Le convertisseur de puissance est dimensionné en fonction de la puissance du générateur, avec un fonctionnement similaire à celui du système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) (voir Figure 1.17).

Le côté machine du convertisseur permet de réguler la vitesse de rotation sur une large plage, tandis que le côté réseau assure le transfert de la puissance active vers le réseau, tout en cherchant à minimiser la consommation de puissance réactive.

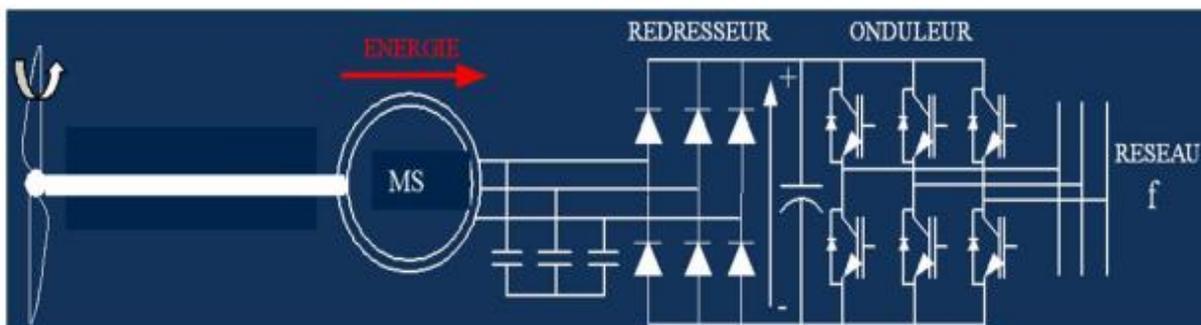


Figure I.18 : Connexion directe d'une machine synchrone au réseau [12].

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

Le PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) est largement reconnu dans la littérature scientifique comme une solution efficace pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE), en raison de sa propriété d'auto-excitation, permettant un fonctionnement à haut facteur de puissance et un rendement élevé .

Contrairement à d'autres types de génératrices, le PMSG ne nécessite pas d'alimentation externe pour l'excitation, celle-ci étant assurée par des aimants permanents.

Le stator d'un PMSG est bobiné, tandis que le rotor est équipé de pôles à aimants permanents. Grâce à son pôle saillant, le PMSG peut fonctionner à basse vitesse, éliminant ainsi la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, un avantage significatif dans les SCEE, étant donné que le multiplicateur est un composant critique et vulnérable dans les systèmes éoliens. De plus, un PMSG multipolaire à entraînement direct de grand diamètre peut également être utilisé pour atteindre les mêmes performances.

Cependant, la nature synchrone du PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) peut poser des défis lors du démarrage, de la synchronisation et de la régulation de la tension. De plus, ces génératrices nécessitent un système de refroidissement adéquat, car les matériaux magnétiques utilisés sont sensibles à la température et peuvent perdre leurs propriétés magnétiques sous l'effet de températures élevées [13].

L'absence de régulation naturelle de la tension, due à l'utilisation d'aimants permanents, impose également l'ajout de convertisseurs électroniques pour maintenir un contrôle stable de la tension et de la fréquence.

Tableau I.4: Avantages et inconvénients du SCEE basé sur la Génératrice synchrone

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;• Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse ;• Absence du multiplicateur de vitesse	<ul style="list-style-type: none">• Coût assez élevé à cause des aimants qui sont en terres rares ;• Dimensionnement pour une puissance nominale des éléments semi-conducteurs ;• Machine encombrante pour son grand diamètre.

I.10.2. Génératrice asynchrone connectée au réseau:

La Figure : I-18 illustre le dispositif de base. Cette configuration permet un fonctionnement à vitesse variable sans limites théoriques. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et convertie en tension continue. L'onduleur, en suivant un fonctionnement classique, Par la suite, il permet de fournir une tension alternative de fréquence fixe, en accord avec celle du réseau, avec un facteur de puissance unitaire.

Chapitre I : L'Etat de l'art de l'énergie éolienne

L'éolienne peut fournir une puissance maximale en fonction de sa puissance nominale. Les convertisseurs employés sont conçus pour prendre en charge l'ensemble de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Cependant, ces convertisseurs entraînent un coût considérable et engendrent des pertes importantes (jusqu'à 3 % de la puissance nominale de la machine), ainsi que des perturbations qui impactent le rendement et la qualité de l'énergie générée.

La présence de capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine, cette énergie ne pouvant être fournie par le réseau en raison de la nature unidirectionnelle du redresseur. Ce dernier peut éventuellement être remplacé par un redresseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) basé sur des IGBT, dont la structure est similaire à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de la puissance réactive devient contrôlable et peut être orienté du bus continu vers la machine, tandis que le transfert de la puissance active reste identique à celui d'un redresseur simple. Cependant, cette solution augmente le coût et la complexité de mise en œuvre du dispositif. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont soumis à des dV/dt élevés, ce qui peut réduire leur durée de vie [14].

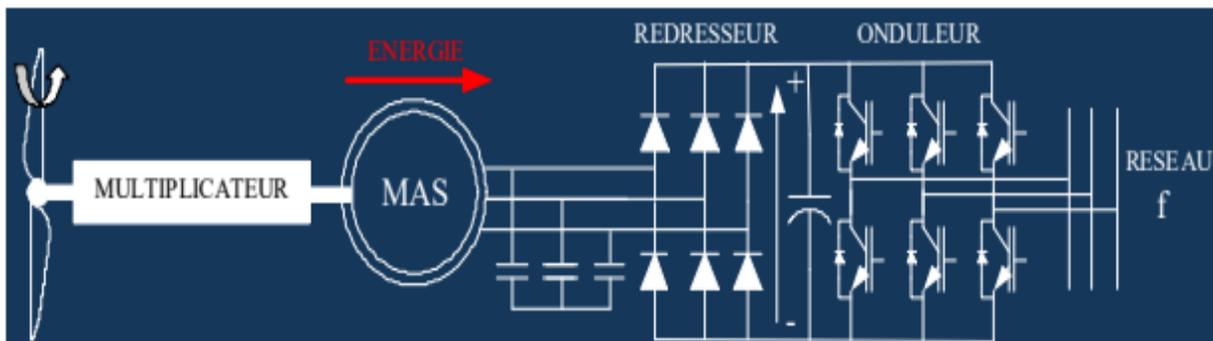


Figure I.19 : Machine asynchrone connectée au réseau électrique [12].

Tableau I.5: avantages et inconvénients du SCEE basé sur MAS connectée au réseau électrique.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">Machine standard ;Machine robuste ;Faible coût	<ul style="list-style-type: none">Puissance extraite non optimisée ;Non-gestion de la puissance réactive du générateur ;Coût élevé de la maintenance du multiplicateur ;Insertion d'un gradateur pour une reprise progressive lors d'un démarrage.

I.10.3. Génératrice asynchrone à double alimentation GADA :

I.10.3.1. Structure du SCEE basé sur la GADA :

Le SCEE basé sur un générateur asynchrone à double alimentation (GADA) (Doubly Fed Induction Generator (DFIG)) (figure 1.16), également connu sous le nom de SCEE amélioré à vitesse variable, est actuellement le plus utilisé par l'industrie des éoliennes.

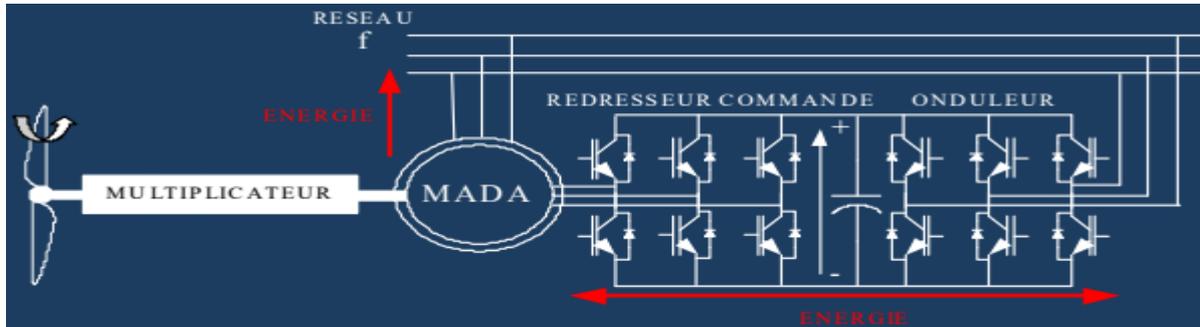


Figure I.20 : Topologie de raccordement au réseau utilisant une MADA [12].

La génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est une génératrice à rotor bobiné (WRIG) dont les enroulements statoriques sont directement connectés au réseau triphasé à fréquence constante, tandis que les enroulements du rotor sont reliés à un convertisseur de puissance AC-AC. Le terme "doublement alimenté" se réfère au fait que la tension statorique provient du réseau, tandis que la tension rotorique est contrôlée par le convertisseur de puissance.

Ce système autorise un fonctionnement à différentes vitesses sur une large plage de temps, bien que limitée, où le comportement du générateur est principalement déterminé par le convertisseur d'électronique de puissance et ses contrôleurs.

Le convertisseur électronique de puissance se compose de deux convertisseurs IGBT : l'un côté rotor et l'autre côté réseau, reliés par une liaison à courant continu (DC). Le principe fondamental est que le convertisseur côté rotor régule le générateur en termes de puissance active et réactive, tandis que le convertisseur côté réseau contrôle la tension de la liaison DC et maintient un facteur de puissance élevé.

Le stator fournit en permanence de l'énergie au réseau. Le rotor, selon le point de fonctionnement, injecte de l'énergie dans le réseau en mode hyper-synchrone (glissement négatif) ou absorbe de l'énergie du réseau en mode hypo-synchrone (glissement positif). Dans les deux cas, le flux de puissance dans le rotor est approximativement proportionnel au glissement. La taille du convertisseur n'est donc pas déterminée par la puissance totale du générateur, mais par la plage de variation de la vitesse sélectionnée, qui est généralement de $\pm 30\%$ autour de la vitesse synchrone [15].

I.11. CONCLUSION:

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter une revue complète de l'énergie éolienne, en détaillant les différents éléments qui composent la chaîne de conversion d'énergie et en examinant les technologies et structures des éoliennes existantes tel que nous avons abordé l'énergie éolienne de manière générale, on a exposé sa description, son historique, les diverses formes d'éoliennes, les systèmes d'extraction d'énergie éolienne et la capacité énergétique éolienne. Ensuite, nous avons prouvé que l'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus couramment utilisées à travers le monde en raison de son coût abordable et de sa facilité d'utilisation.

Ainsi, dans le seconde chapitre, nous nous attèlerons à modéliser la turbine et le multiplicateur de vitesse d'éolienne puis es avantages et inconvénients des systèmes mécaniques de régulation ainsi que des génératrices utilisées ont été analysés, avec une attention particulière portée sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Ce choix technologique s'inscrit dans une démarche visant à optimiser l'exploitation des éoliennes en fonction des variations de la vitesse du vent, tout en garantissant une production électrique de haute qualité, une amélioration du rendement énergétique, ainsi qu'une meilleure stabilité du système.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1. Introduction :

La modélisation consiste à créer les équations mathématiques qui décrivent le fonctionnement d'un système physique en se basant sur des hypothèses. Dans ce chapitre, nous représentons chaque composant de ce système de conversion éolienne, comme la turbine éolienne, la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur, dans les différents points de repères. Ensuite, nous examinerons la modélisation de l'onduleur.

La turbine éolienne, en tant que premier élément de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est soumise à des conditions variées et à des turbulences atmosphériques. Sa modélisation permet de mieux comprendre son comportement dynamique en fonction des variations de vitesse et de direction du vent, et de maximiser l'efficacité de la conversion énergétique. Plusieurs modèles, allant des modèles aérodynamiques simples aux modèles avancés basés sur la mécanique des fluides, sont utilisés pour prédire les performances d'une turbine.

Le multiplicateur de vitesse, quant à lui, est un élément mécanique crucial permettant de transmettre l'énergie mécanique générée par la turbine à l'alternateur avec une vitesse adéquate. Les multiplicateurs convertissent la faible vitesse de rotation des pales en une vitesse plus élevée adaptée aux besoins du générateur. Leur modélisation est essentielle pour étudier les pertes mécaniques, l'usure des composants, et pour optimiser leur conception afin d'assurer une efficacité de transmission maximale.

II.2 Description sur le système étudié :

Le système de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable le plus couramment utilisé est celui basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce système est entraîné par une turbine à calage variable et piloté via le rotor à l'aide de deux convertisseurs de puissance bidirectionnels fonctionnant en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ce type de système est privilégié en raison des nombreux avantages qu'il offre dans le domaine de la conversion d'énergie éolienne (voir Figure) [1].

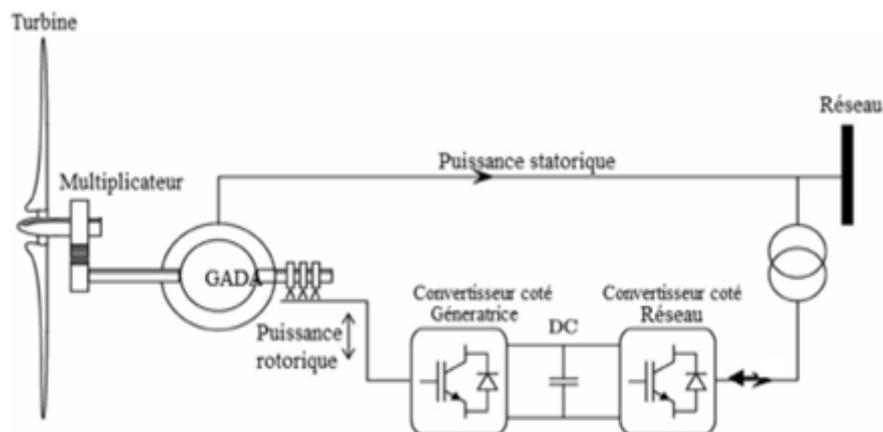


Figure II.1 : Système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une GADA.

Dans une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), les enroulements du stator sont directement connectés au réseau, tandis que les enroulements du rotor sont reliés au réseau via un convertisseur dos à dos (back-to-back) à l'aide de bagues collectrices. Ce convertisseur dos à dos comprend deux parties : un convertisseur côté machine (CCM) et un convertisseur côté réseau (CCR), reliés entre eux par un condensateur de liaison DC. Le principal objectif du CCR est de maintenir une variation minimale de la tension dans le circuit intermédiaire. Grâce au contrôle du CCM, il est possible de réguler le couple, la vitesse de la GADA, ainsi que sa puissance active et réactive aux bornes du stator. Étant donné que les convertisseurs dos à dos peuvent fonctionner en mode bidirectionnel, la GADA peut opérer en mode vitesse hypo synchrone ou hyper-synchrone. La plage de vitesse de la GADA est d'environ $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme [20].

II.3. Modélisation de la turbine éolienne:

II.3.1. Loi de Betz :

Selon la loi de Betz, une éolienne ne peut pas produire d'énergie mécanique. plus de 59 % de l'énergie cinétique du vent. Cette limite théorique, formulée pour la première fois en 1929 par Albert Betz, est un principe fondamental en aérodynamique des éoliennes.

Dans le schéma représenté par la figure, un tube de courant entoure une éolienne à axe horizontal.

La vitesse du vent avant l'aérogénérateur est notée (V_1), tandis que la vitesse après l'éolienne est notée (V_2).

Soit : $(V_1 + V_2) / 2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

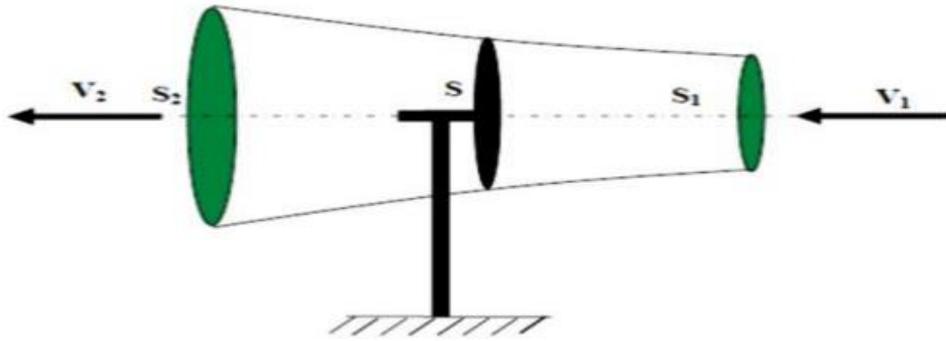
$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II. 1}).$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II. 2}).$$

Soit en remplaçant m par son expression dans : (II.1).

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II. 3}).$$



. Figure II.2 : théorie de Betz : schéma de principe [14].

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II. 4}).$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)^2}{4} \quad (\text{II. 5}).$$

En illustrant la caractéristique correspondant à l'équation précédente (Figure), on constate que le coefficient de puissance (C_p), également connu sous le nom de ratio P_m/P_{mt} , atteint un maximum de $16/27$, soit $0,59$. La limite théorique, appelée limite de Betz, détermine la puissance maximale qui peut être extraite pour une vitesse de vent spécifique.

Toutefois, cette limite n'est jamais réellement atteinte, et chaque éolienne est caractérisée par son propre coefficient de puissance, qui est exprimé en fonction du rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

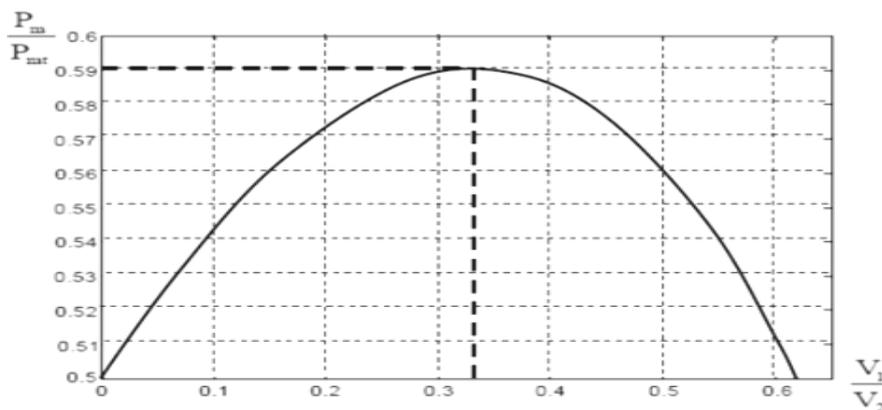


Figure II.3 : Coefficient de puissance.

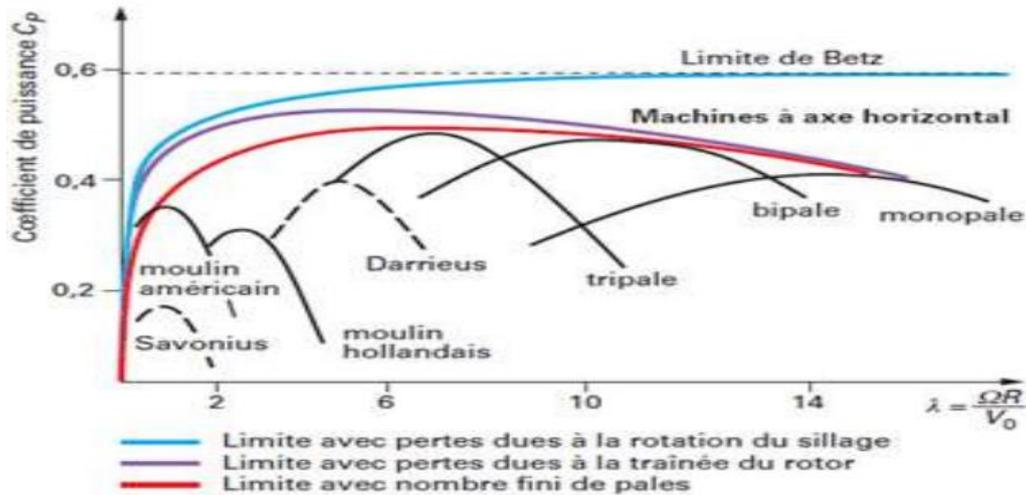


Figure II.4 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [12].

Les éoliennes à faible vitesse sont équipées d'un grand nombre de pales, généralement entre 20 et 40. En raison de leur inertie élevée, leur diamètre est habituellement de 8 mètres. Lorsque la vitesse augmente, le coefficient de puissance de ces éoliennes (Figure I-8) atteint rapidement sa valeur maximale, mais diminue aussi rapidement par la suite.

En revanche, les éoliennes à haute vitesse sont beaucoup plus courantes et sont presque exclusivement utilisées pour la production d'énergie électrique.

Elles sont généralement équipées de 1 à 3 pales fixes ou orientables, permettant de contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 mètres pour les éoliennes de plusieurs mégawatts.

Parmi ces modèles, les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles offrent un bon compromis entre la réduction des vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II-2) atteint des valeurs élevées et diminue lentement avec l'augmentation de la vitesse. Elles fonctionnent rarement à des vitesses de vent inférieures à 3 m/s.

II.3.2. Production d'énergie mécanique :

La puissance mécanique P_m disponible sur l'induit d'un aérogénérateur est exprimée en combinant les équations (2.1), (2.4) et (2.5), [4] :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II. 6}).$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (\text{II. 7}).$$

Chapitre II : LA modélisation de la chaîne de conversion d'éolienne

Avec Ω_1 : représente la vitesse de rotation avant le multiplicateur et R représente le rayon de l'aérogénérateur.

La puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'induit du générateur est exprimée par le multiplicateur de vitesse G :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II. 8}).$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques indiquant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur à différentes vitesses de vent (FIG 5) [4].

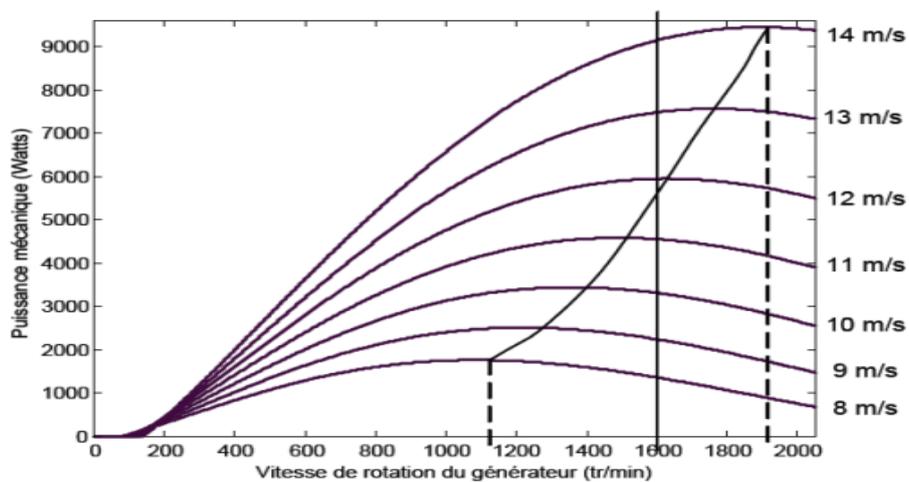


Figure II.5 : Puissances théoriques disponibles pour un type d'éolienne donnée [16].

Au regard de ces caractéristiques, il est clair que si l'éolienne, et par conséquent la génératrice, fonctionne à une vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min comme indiqué sur la Figure 5), les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas pleinement exploités. Pour optimiser le transfert de puissance et atteindre le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra être capable de fonctionner dans une plage de vitesses comprise entre 1100 et 1900 tr/min dans cet exemple [16].

II.4. Modèle du vent :

Le modèle de vent est une représentation mathématique ou physique utilisée pour décrire les variations de la vitesse et de la direction du vent dans le temps et l'espace. Ce modèle est essentiel pour simuler les conditions réelles auxquelles une éolienne est exposée et pour évaluer ses performances. Il prend en compte plusieurs facteurs, tels que les rafales, les turbulences, les gradients de vitesse en fonction de l'altitude (profil vertical) et les fluctuations saisonnières. Les modèles de vent sont utilisés dans les études de conception, d'optimisation et de contrôle des éoliennes afin d'améliorer la production d'énergie et la stabilité du système, tout en tenant compte des contraintes environnementales [21].

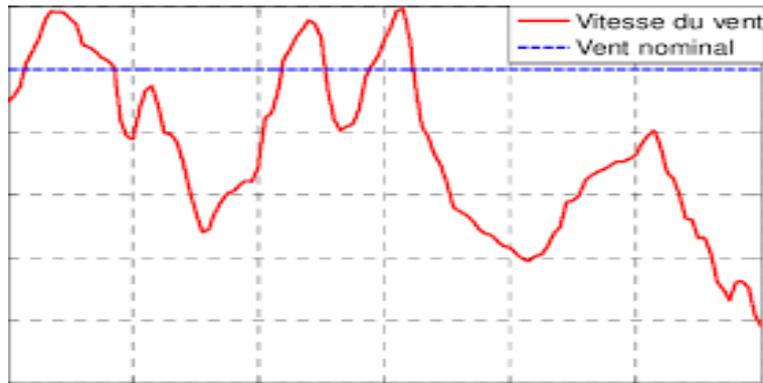


Figure II.6 : Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine [17].

II.5. MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE DE L'EOLIENNE :

La partie mécanique de la turbine étudiée comporte trois pales orientables de longueur R , elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, Cet arbre est relié à un multiplicateur de gain G , qui permet d'augmenter la vitesse de rotation nécessaire pour entraîner une génératrice électrique [18].

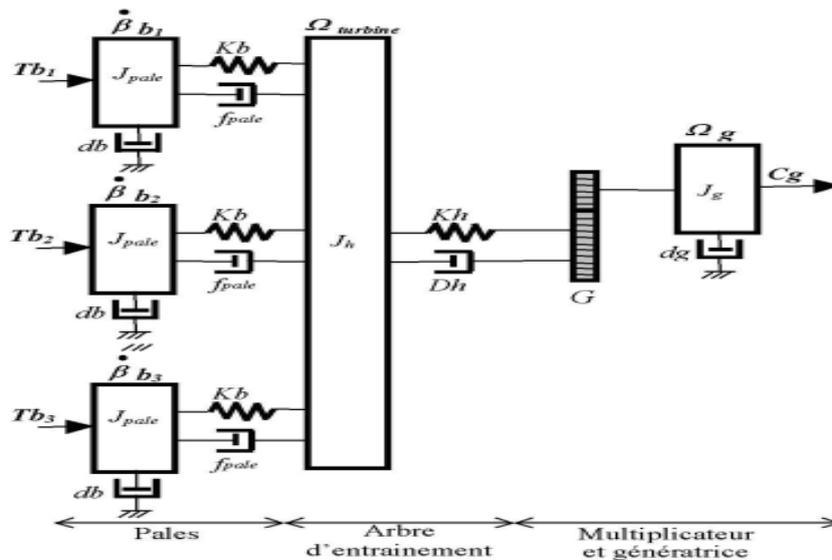


Figure II.7 : système mécanique de l'éolienne [18].

Les trois pales sont considérées de conception est possèdent donc:

- Le meme enertie J_{pale} .
- La meme elasticité KB .
- Le meme coefficient de frottement par rapport a l'air db .
- Ces pales sont orientables et presentent toutes un meme coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notes $\beta b_1, \beta b_2,$

βb_3 chaque pales recoit une force TB_1, TB_2, TB_3 qui La vitesse de vent appliquée pour détermine la caractéristique de l'arbre d'entrainement des pales.

- Son inertie J_h .
- Son elasticité Kh
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh de rotor la génératrice possède :
- Une inertie J_g .
- Un coefficient de frottement d_g
- Ce rotor transmet un couple entrainent (C_g) à la génératrice électrique est tune à une vitesse note Ω_{mec}

Si la vitesse de vent est répartie de manière uniforme sur toutes les pales, cela entraîne une égalité de toutes les forces de poussée ($TB_1=TB_2=TB_3$). Ainsi, il est possible de considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. D'après la conception aérodynamique des pales, il est important de prendre en compte leur coefficient de frottement par rapport à l'air (d_b). Et très limité et peut être négligé, de la même manière, étant donné la faible vitesse de la turbine, les pertes par frottement sont minimales par rapport aux pertes par frottement de la génératrice. Il en résulte un modèle mécanique avec deux masses, comme illustré dans la figure ci-dessous, ce qui assure la validité.

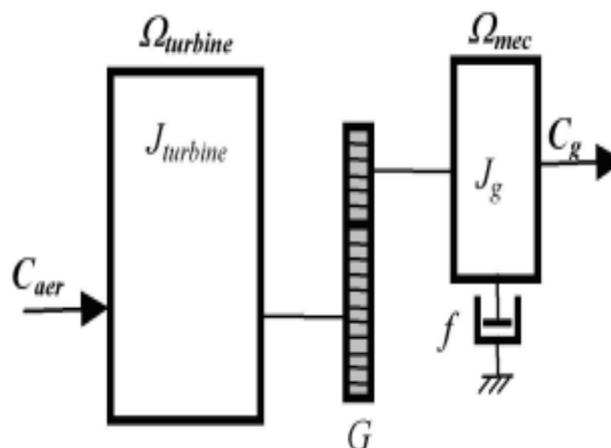


Figure II.8 : modèle mécanique simplifié de la turbine

II.6. Modélisation de a turbine :

L'ensemble du système de l'aérogénérateur doit être représenté dans le modèle de la turbine éolienne, y compris ses interactions mécaniques et électriques. La turbine éolienne, symbolisée par **R**, est composée de pales de grande longueur qui captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie mécanique. Cette énergie est ensuite transmise à un multiplicateur de vitesse **G**, qui adapte la vitesse de rotation lente de la turbine à une vitesse plus élevée, adaptée au fonctionnement de la génératrice. La génératrice convertit alors l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce modèle permet d'analyser et de simuler le

Chapitre II : LA modélisation de la chaîne de conversion d'éolienne

comportement global de l'aérogénérateur sous différentes conditions de vent et de charge pour optimiser sa performance énergétique [18].

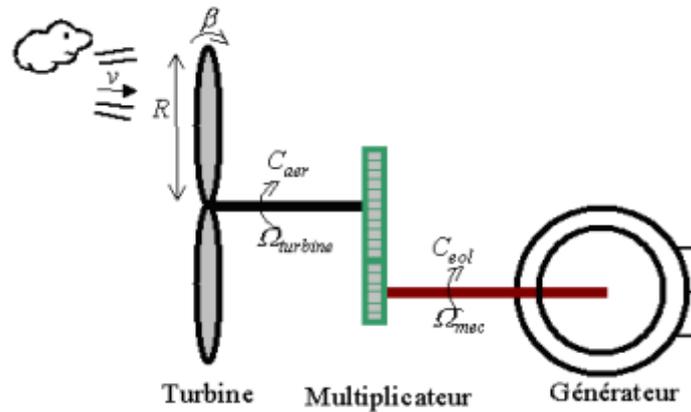


Figure II.9 : Schéma de la turbine éolienne (aérogénérateur) [18].

La turbine est un dispositif qui transforme l'énergie éolienne en énergie mécanique.

Sa puissance est déterminée par [19].

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II. 9}).$$

Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par :

$$Ct = \frac{1}{2} \Omega_{turbine} C_p \rho S V^3 \quad (\text{II. 10}).$$

• $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

• ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.225 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C).

• S : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est égale à la longueur de la pale : $S = \pi R_t^2$ (II. 11).

• V : est la vitesse de vent en m/s.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors:

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II. 12}).$$

Chapitre II : LA modélisation de la chaîne de conversion d'éolienne

Le coefficient représente de puissance C_p le rendement aerodynamique de la turbine eolienne. Il depende de la caractéristique de la turbine.

La figure II.8 Elle illustre la fluctuation des coefficients du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse à laquelle les pales de la vitesse sont liées.

$$\lambda = \frac{R.\Omega_{turbine}}{V} \quad (\text{II. 12}).$$

Tq: $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine:

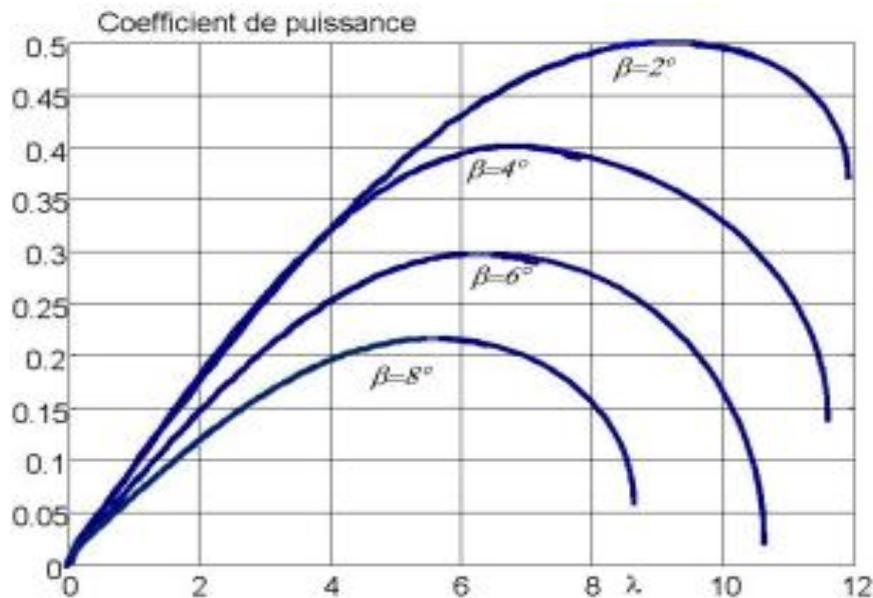


Figure II.10 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).

Le coefficient de puissance C_p utilisé pour la turbine dans cette étude est [19] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.05 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.03(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II. 13}).$$

On naissant la vitesse de la turbine le couple aérodynamique est donc directement déterminer par:

$$C_{aer} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{\Omega_{turbine}} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II. 14}).$$

L'application de ces équations permet d'obtenir le schéma de principe de la turbine représenté à la (Figure II.10).

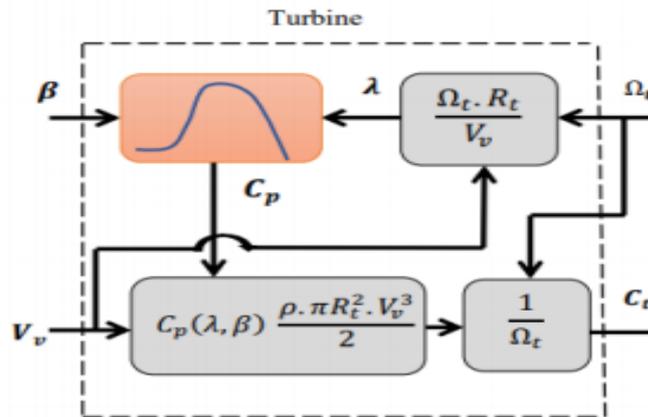


Figure II.11 : modèle de la turbine [19].

II.7. Modélisation du multiplicateur:

En utilisant un facteur de conversion G , le multiplicateur de vitesse convertit l'énergie cinétique du rotor de l'éolienne (à vitesse lente) en énergie cinétique du rotor du générateur (à vitesse rapide).

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II. 15}).$$

Le couple mécanique de la turbine est divisé par le rapport de multiplication G pour obtenir le couple mécanique appliqué à l'induit du générateur:

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II. 16}).$$

$\Omega_{turbine}$: Représente la vitesse de la turbine et Ω_{mec} est la vitesse mécanique de rotation du générateur.

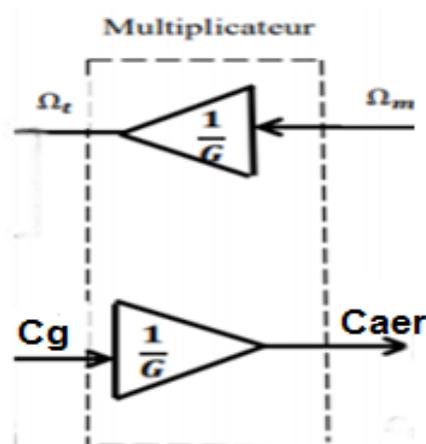


Figure II.12 : Modélisation du Multiplicateur [20].

II.8. Equation de l'arbre mécanique:

On représente la masse de la turbine éolienne en utilisant une inertie $J_{turbine}$ qui inclut la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

Selon le modèle mécanique, l'inertie totale J est calculée en prenant en compte l'inertie de la turbine qui se déplace sur le rotor de la génératrice ainsi que l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II. 17}).$$

Il convient de souligner que l'inertie du rotor de la génératrice est extrêmement faible par rapport à l'inertie de la turbine sur axe. Pour donner un exemple, une éolienne Vesta de 2 MW a une pale de 39 mètres de long et pèse 6,5 tonnes.

L'équation de base de la dynamique permet de calculer comment la vitesse mécanique évolue en fonction du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II. 18}).$$

Où:

J : représenter l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.

Les éléments à prendre en compte dans ce couple mécanique comprennent le couple électromagnétique C_{em} généré par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g .

Où:

J est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mes} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 19}).$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II. 20}).$$

II.9. Graphe informationnel causal du modèle de la turbine:

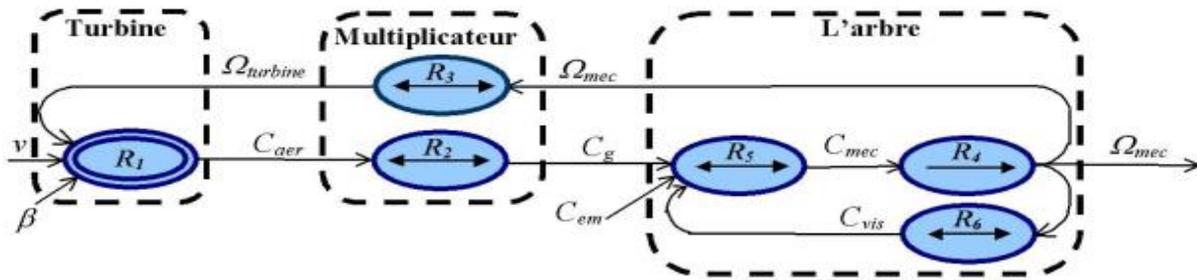


Figure II.13 : Graphe informationnel causal du modèle de la turbine [21]

Les principes de cause à effet des grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine sont illustrés dans ce graphe. Le multiplicateur est utilisé pour générer le couple aérodynamique relation (II. 14).

La vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine sont les inputs de la turbine. Selon les relations (II. 15) et (II. 16), le modèle du multiplicateur convertit la vitesse mécanique et le couple à aérodynamique en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur. La dynamique de la vitesse mécanique est représentée par le modèle de l'arbre, qui utilise deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

Selon le GIC, il est possible de réguler la vitesse de la turbine en agissant sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice par action, on considère que la vitesse du vent est une perturbation de ce système.

La figure II.14 présente le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine, qui peut être facilement déduit du GIC.

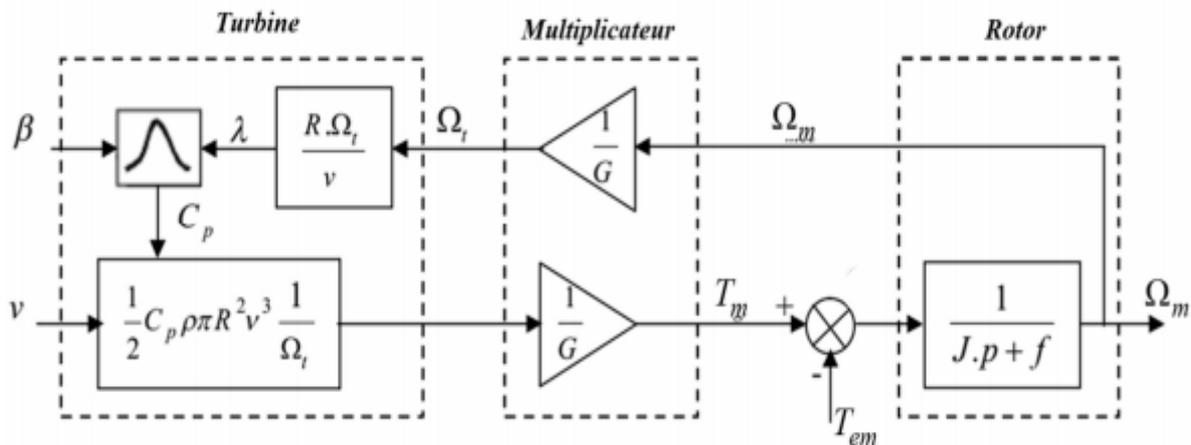


Figure II.14 : Schéma bloc d'une turbine éolienne [21].

II.10. Stratégie de la commande de la turbine :

Comme il est illustré sur la (Figure II.14), on distingue quatre (04) zones principales de Fonctionnement.

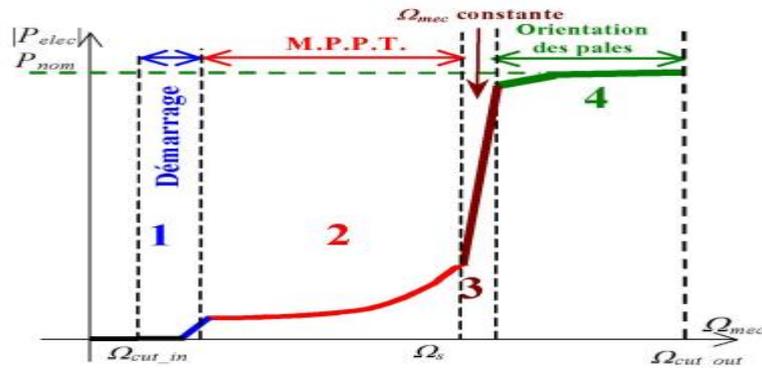


Figure II.15 : Caractéristiques vitesse et puissance d'une éolienne [9].

Zone1 : Il s'agit de la zone de démarrage de la machine, elle commence à fonctionner lorsque la vitesse mécanique atteint un maximum. La vitesse mécanique de la génératrice a été utilisée pour démarrer l'éolienne.

Zone2 : A partir d'une vitesse seuil spécifique de la génératrice (qui correspond à un glissement de 30%), un algorithme de contrôle est mis en place pour extraire le maximum de puissance du vent (MPPT). La puissance électrique augmente rapidement lorsque l'angle de décalage à Sava est maintenu à son minimum, ce qui correspond au maximum du coefficient de puissance.

Zone3 : Dans cette région, la turbine tourne à une vitesse constante, ce qui entraîne des niveaux de puissance du générateur élevés, pouvant atteindre jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Après avoir atteint la puissance nominale P_{nom} , on restreint la puissance générée en utilisant un système d'orientation pôle. (Angelo Control), c'est le contrôle du pitch.

Dans ce qui suit, notre attention se porte sur la zone 2 qui vise à optimiser l'énergie électrique extraite.

Dans la réalité, la transition de la zone 2 à la zone 4 est un peu spécifique. Effectivement, le couple électromagnétique C_{em} est responsable du contrôle de la vitesse de rotation en zone 2 et, en zone 4, c'est la puissance qui doit être régulée par le dispositif d'orientation des pales. La dynamique du système d'orientation des pales est beaucoup plus lente que celle de la machine électrique. De cette manière, une régulation lente de l'angle de calage peut entraîner une augmentation de la vitesse de rotation limite lors d'une rafale qui se produit pendant un fonctionnement entre les zones 2 et 4. Dans cette situation, il est pertinent de développer une méthode qui permettrait de prévoir l'action du dispositif d'orientation en ajustant le couple électromagnétique de manière à réguler la vitesse de rotation dans cette zone 3 intermédiaire. On explique maintenant la conception des dispositifs de commande pour chaque zone de fonctionnement.

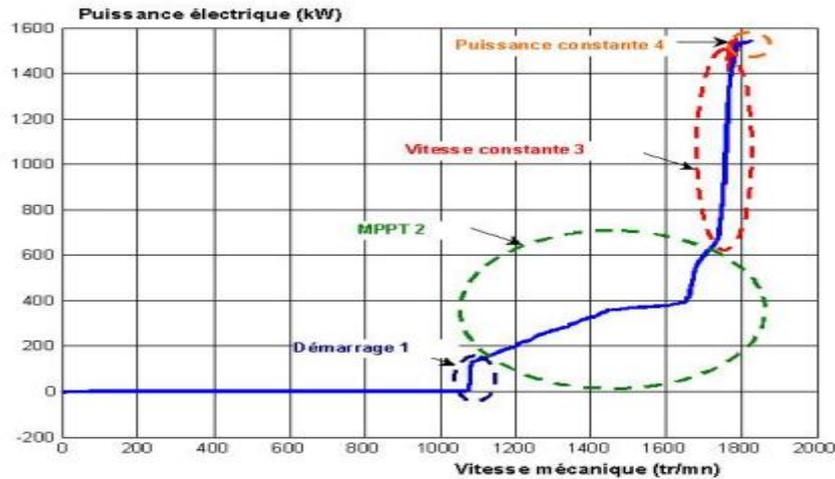


Figure II.16 : Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5 MW.

II.11. Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :

II.11.1. Bilan des puissances :

La puissance captée par la turbine éolienne est évaluée par l'équation. Il est principalement possible de maximiser cette puissance en ajustant le coefficient C_p . L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance en fonction de la vitesse de la génératrice (ou du ratio de vitesse λ). Il faut donc élaborer des systèmes de contrôle qui permettent d'optimiser la puissance électrique produite (donc le couple) en adaptant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence, peu importe la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. La puissance aérodynamique P_{aer} réduite des pertes (représentées par les frottements visqueux) est directement convertie en puissance électrique en régime permanent (voir figure 2.18).

$$P_{elec} = P_{aer} - pertes \quad (II. 21)$$

Le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est représenté par la puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et qui se manifeste sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}).

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II. 22)$$

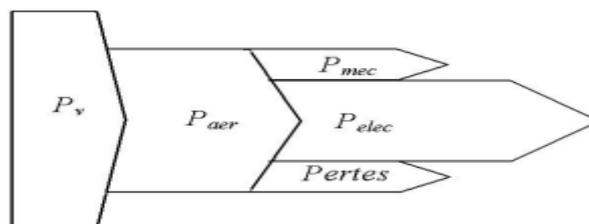


Figure II.17 : Diagramme de conversion de puissance.

Dans cette section, nous exposerons diverses méthodes de régulation du couple électromagnétique (et par conséquent de la puissance électromagnétique convertie) dans le but de modifier la vitesse mécanique de manière à optimiser la puissance électrique produite. On appelle ce principe le Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et il correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. Deux catégories de structures de commande sont identifiées et sont expliquées à présent (II.17) :

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



Figure II.18 : Stratégies de commande de la turbine étudiée.

II.12. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

II.12.1.Principe général :

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Le G.I.C. de la figure II.13 montre clairement que les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em - ref} \quad (\text{II. 23})$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés.

Comme expliqué dans la partie 2.3.4, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (\text{II. 24})$$

Le modèle de la turbine se simplifie en inversant la relation causale propre à l'inertie, ce qui permet d'obtenir une première structure de commande (figure II.19).

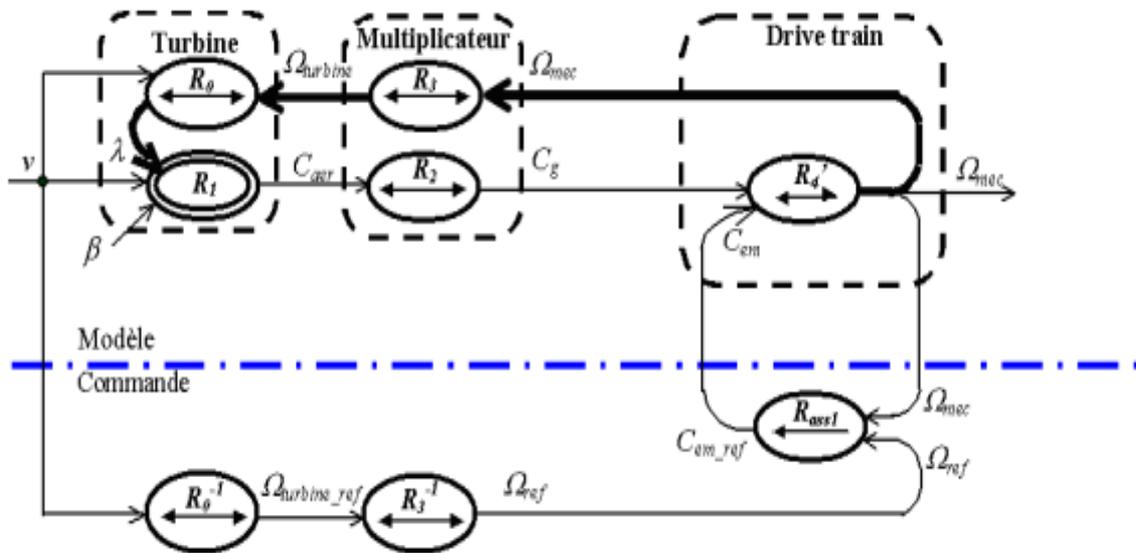


Figure II.19 : GIC du modèle de la turbine et de son dispositif de contrôle de la vitesse en boucle fermée.

Le principe de cette structure de commande est de régler le couple qui se produit sur l'arbre de la turbine afin de fixer sa vitesse à une cible. Afin d'accomplir cela, les règles d'inversion du G.I.C. exigent l'utilisation d'un asservissement de la vitesse (comme le système Opte speed du constructeur Vestas par exemple). La relation (II. 17) est causale.

Le couple électromagnétique de référence $C_{em} - ref$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em} - ref = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II. 24)$$

$-C_{ass}$: représente le régulateur de vitesse $-\Omega_{ref}$: représente la vitesse mécanique de référence.

La vitesse de référence est déterminée par la vitesse à laquelle la turbine doit être fixée $(\Omega_{turbine} - ref)$ afin d'optimiser la puissance extraite. En considérant le bénéfice du multiplicateur, on obtient donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine} - ref \quad (II. 25)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda C C p_{max}$ (à β constant et égal à 2°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p (figure II.19).

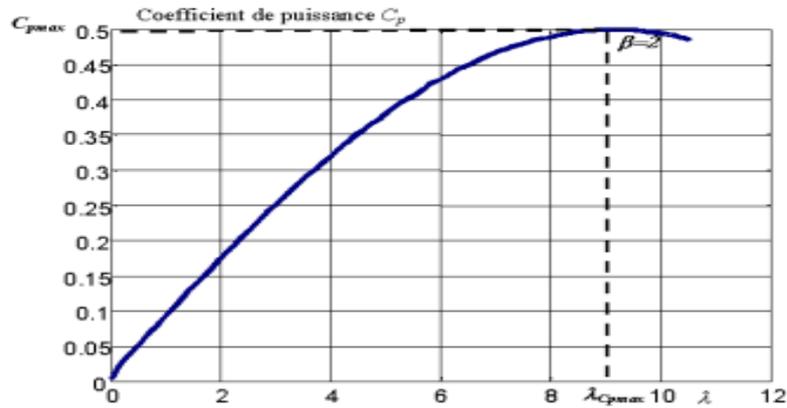


Figure II.20 : Fonctionnement optimal de la turbine

Elle est obtenue à partir de l'inversion de l'équation : (II.12)

$$\Omega_{turbine} - ref = \frac{\lambda C_{p_{max}} \cdot v}{R} \quad (II. 26)$$

Conception du correcteur de vitesse L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

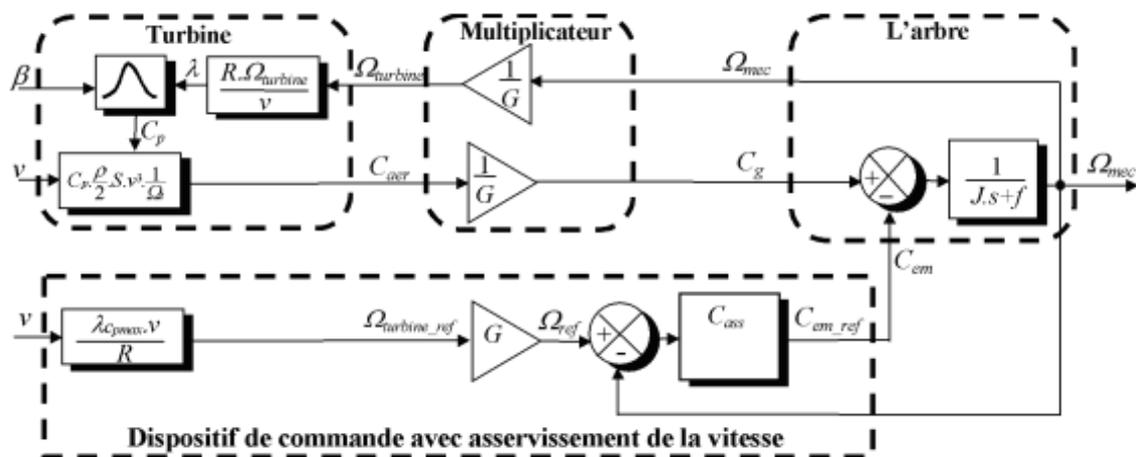


Figure II.21 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

Il est possible de prendre en compte différentes technologies de correcteurs pour l'asservissement de la vitesse. Deux types de régulateur le correcteur (Proportionnel Integral et le correcteur Proportionnel Intégral à avance de phase).

II.12.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

Dans la réalité, il est difficile d'obtenir une mesure précise de la vitesse du vent. Cela est dû à deux raisons :

Chapitre II : LA modélisation de la chaîne de conversion d'éolienne

- L'anémom est placé après le rotor de la turbine, ce qui entraîne une erreur dans la mesure de la vitesse du vent.
- Ensuite, étant donné l'importance du diamètre de la surface balayée par les pales (généralement 70 mètres pour une éolienne de 1,5 MW), il y a une variation significative du vent en fonction de la hauteur où se trouve l'anémom être. L'utilisation d'un seul anémom entraîne donc l'utilisation d'une mesure locale de la vitesse du vent, ce qui ne correspond pas à sa valeur moyenne qui se manifeste sur toutes les pales. Une mesure incorrecte de la vitesse entraîne donc inévitablement une diminution de la puissance captée en fonction de la méthode d'extraction

L'hypothèse de cette deuxième structure de commande est que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent.

Ainsi, en utilisant l'équation dynamique de la turbine, on peut obtenir l'équation statique qui représente le régime permanent de la turbine :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 27})$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul.

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} \approx 0$), on obtient

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II. 28})$$

Le chemin informationnel représenté en gras est utilisé pour obtenir l'architecture du dispositif de commande inhérent à cette technique (figure II.22).

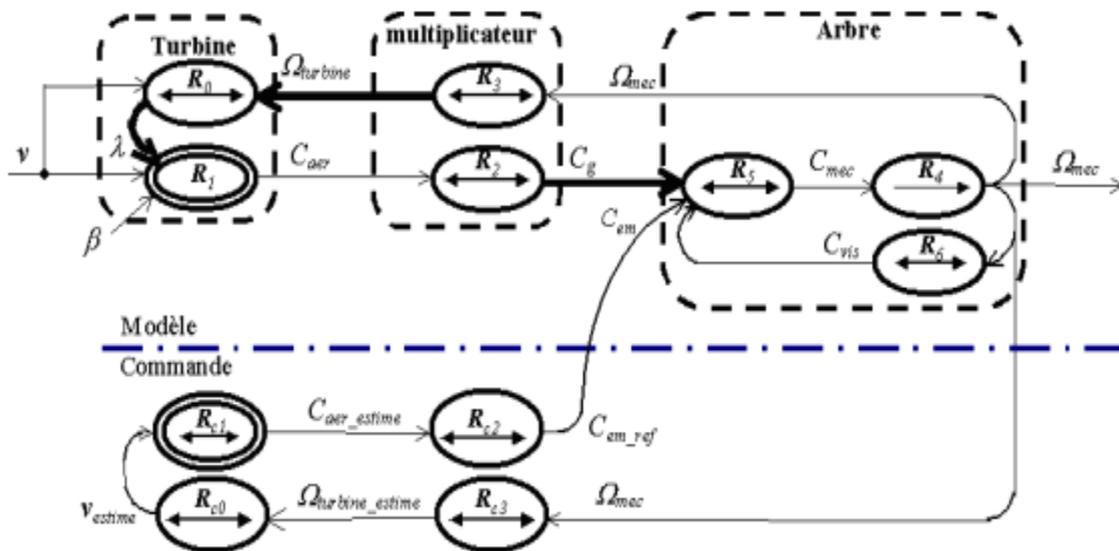


Figure II.22 : Maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

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

$$C_{em - ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (\text{II. 29})$$

Chapitre II : LA modélisation de la chaîne de conversion d'éolienne

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation (II.14) :

$$C_{aer-estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{C_{aer-estimé}} \cdot V_{estimé}^3 \quad (II. 30)$$

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

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II. 31)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (II.32).

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (II. 32)$$

En regroupant ces quatre équations (II. 28), (II. 29), (II. 30), (II. 31), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II. 33)$$

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

$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II. 34)$$

Avec :

$$A = \frac{C_p}{\lambda C_{pmax}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{1}{G^3} \quad (II. 35)$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la (figure II.22).

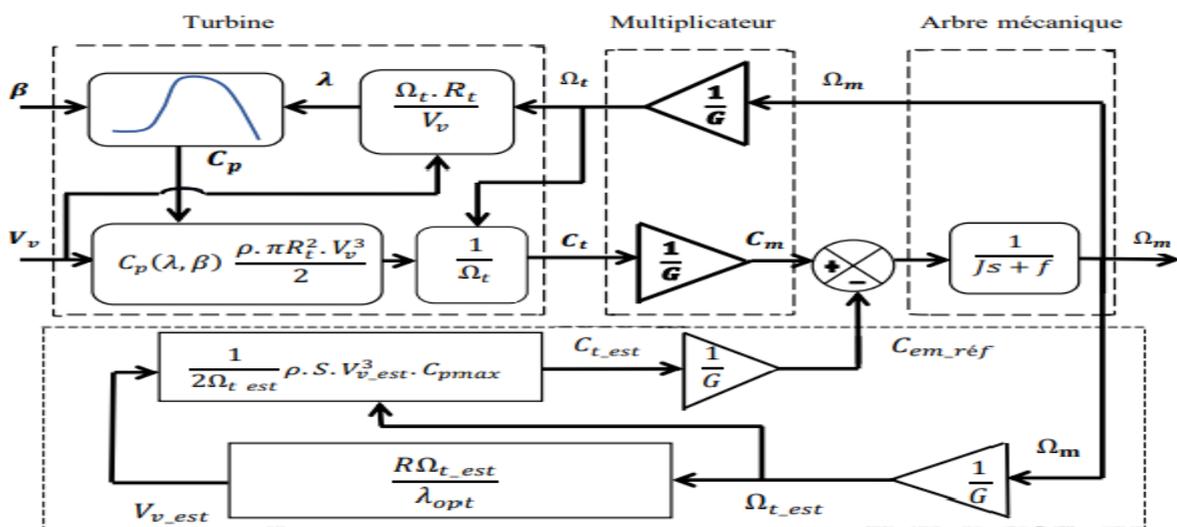


Figure II.23 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

Résultats obtenus :

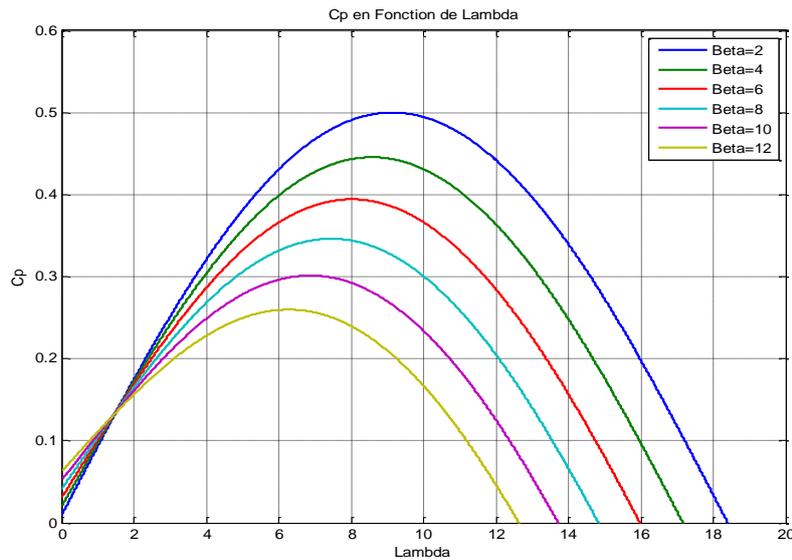


Figure II.24 : Coefficient aérodynamique C_p en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ

Interprétation de résultat :

La figure (II.24) présente la courbe du coefficient de performance aérodynamique C_p en fonction du rapport de vitesse de la turbine λ , pour plusieurs valeurs de l'angle de calage des pales β . Les simulations ont été réalisées sous Simulink -Matlab en utilisant un modèle de turbine éolienne, afin d'étudier l'impact des variations de β sur la performance de la turbine.

Tel qu'on observe que dans l'angle de calage faible ($\beta=2^\circ$), le coefficient de performance C_p atteint une valeur très élevée, alors l'exploitation d'énergie éolienne sera augmentée, mais dans les autres angles de calage fort comme ($\beta=12^\circ$) en remarque que le CP est diminué ce qui limiter l'efficacité de la conversion éolienne en électricité.

Les résultats obtenus confirment que l'angle de calage β joue un rôle crucial dans la performance de la turbine éolienne. Pour maximiser le coefficient de performance et, par conséquent, l'énergie extraite du vent, il est nécessaire de choisir un β optimisé en fonction des conditions de vent et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Un calage trop important des pales, comme on peut le voir avec $\beta=12^\circ$, conduit à une sous-performance, alors qu'un angle modéré autour de $\beta=2$ semble être le plus efficace.

Sans MPPT :

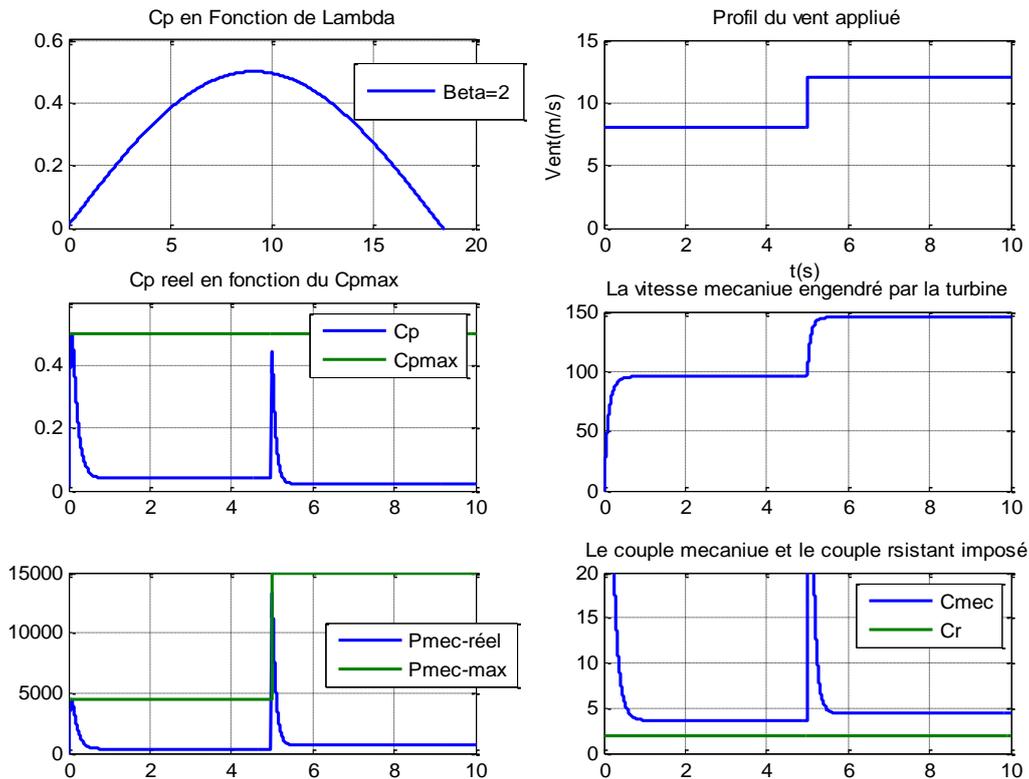


Figure II.25 : Résultats de simulation de la turbine sans MPPT.

Interprétation des résultats :

Les résultats de cette figure(II.25) illustrent la performance d'une turbine éolienne fonctionnant sans la stratégie de contrôle MPPT, c'est-à-dire sans ajustement en temps réel de sa vitesse de rotation.

Les variations importantes observées dans la puissance de sortie montrent que la turbine ne s'adapte pas efficacement aux variations de la vitesse du vent. Sans MPPT, la turbine tourne à une vitesse fixe, souvent non optimale, ce qui se traduit par une capture d'énergie sous-optimale.

L'absence de régulation adéquate entraîne une réduction globale du rendement énergétique, ce qui peut entraîner une augmentation du coût de production par unité d'énergie.

De plus, les oscillations fréquentes observées pourraient engendrer une usure prématurée des composants mécaniques, comme les pales et les multiplicateurs, dus à un fonctionnement dans des conditions non idéales.

Avec MPPT :

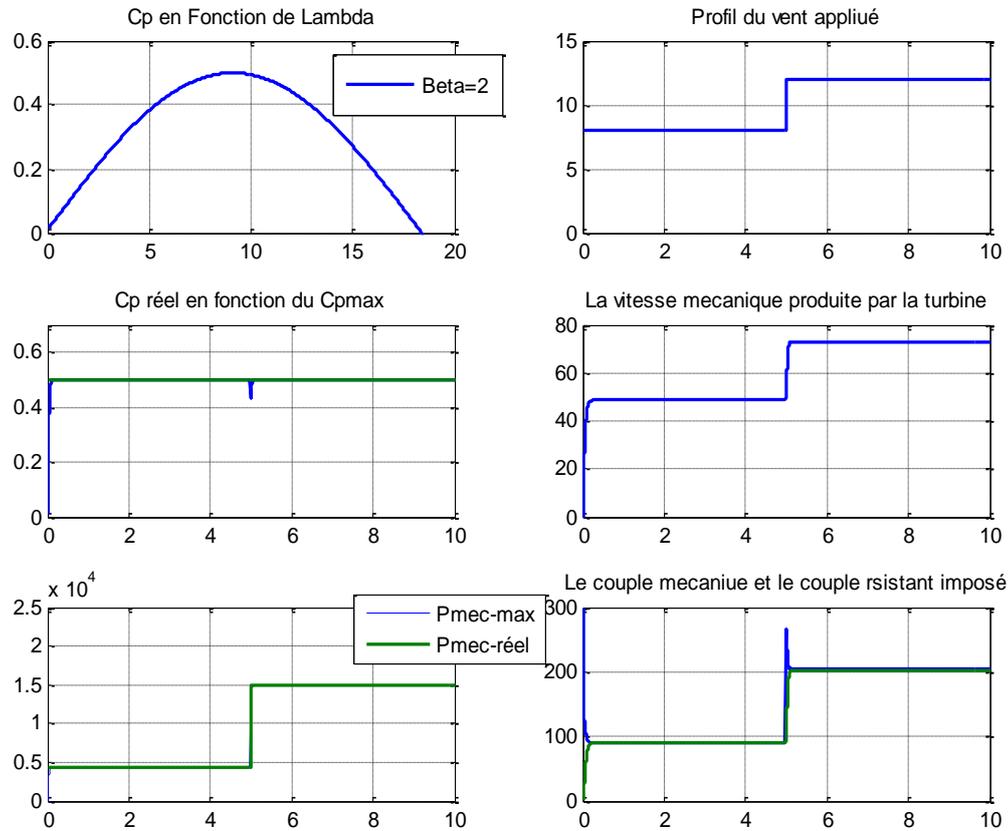


Figure II.26 : Résultats de simulation de la turbine avec MPPT.

II.13. Interprétation des résultats :

Cette figure présente les résultats obtenus en intégrant le contrôle MPPT, dont l'objectif est d'ajuster la vitesse de rotation de la turbine pour maintenir un fonctionnement optimal malgré les variations de la vitesse du vent.

Grâce au MPPT, la turbine ajuste sa vitesse de manière dynamique, ce qui permet d'atteindre et de maintenir un point de fonctionnement proche de λ , où la puissance extraite est maximale.

Les résultats montrent une nette amélioration de la puissance de sortie par rapport au fonctionnement sans MPPT, avec une stabilité accrue. Cela reflète l'efficacité de la stratégie MPPT pour maximiser la capture d'énergie.

En outre, la réduction des fluctuations et des oscillations dans la puissance délivrée montre que le système fonctionne de manière plus stable, ce qui diminue les risques d'usure prématurée des composants mécaniques.

IV.14. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté un aperçu général des systèmes éoliens et des différentes machines utilisées. Ensuite, l'accent a été mis sur la modélisation de la turbine éolienne et du multiplicateur de vitesse. En tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices, nous avons développé un modèle dynamique qui décrit le comportement de ces composants. Cette modélisation vise à mieux comprendre leur interaction avec l'ensemble du système éolien, en particulier leur influence sur la MADA.

Les résultats obtenus montrent l'importance du couplage entre la turbine, le multiplicateur et les puissances active et réactive dans le système éolien global.

Chapitre 03

La modélisation de la MADA

II.1. Introduction :

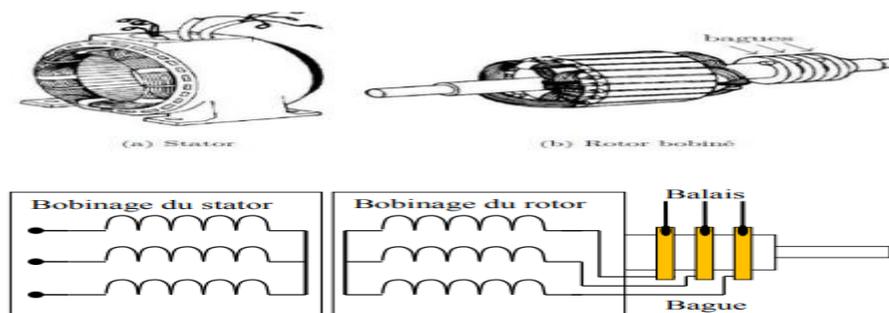
L'intérêt croissant pour la Gestion Active de la Demande d'Énergie (GADA) s'explique par son rôle stratégique dans l'optimisation des systèmes énergétiques modernes, en particulier dans un contexte de transition énergétique. Face à l'augmentation de la part des énergies renouvelables, comme l'éolien et le solaire, qui sont de nature intermittente et imprévisible, la GADA permet de mieux aligner la consommation d'énergie sur la disponibilité de l'offre. Ce processus contribue non seulement à la stabilité des réseaux électriques, mais aussi à une utilisation plus efficace des ressources énergétiques.

En ce qui concerne les énergies renouvelables. Effectivement, dans le secteur éolien, la GADA offre de nombreux bénéfices pour des applications moteur, en particulier lorsqu'elle est alimentée par deux convertisseurs, en particulier pour des applications de grandes puissances. De plus, elle offre de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans être démagnétisé, ainsi que de bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur mécanique de vitesse, etc. De plus, grâce à sa double alimentation, la GADA propose différentes options pour ajuster le mode de fonctionnement de la génératrice. Avant de commencer la modélisation et la commande de notre système, il est nécessaire de réaliser un état de l'art des travaux concernant la MADA structures et commandes. Dans cette optique, il est essentiel de commencer par présenter une description de la génératrice.

III.2. PRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA):

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a fait sa première apparition en 1899. Il ne s'agit pas d'une nouvelle conception, mais plutôt d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné, alimentée par ces deux enroulements. Son stator est similaire à celui des machines triphasées classiques, qu'elles soient asynchrones ou synchrones.

Contrairement aux rotors en cage d'écureuil, qui sont formés de barres enfoncées dans des encoches d'un empilement de tôles, le rotor de la MADA se compose de trois enroulements connectés en étoile, dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices. Ces bagues sont en contact avec des balais qui frottent lors de la rotation de la machine.



Dans cette machine, les enroulements statorique sont alimentés directement par le réseau électrique, tandis que les enroulements rotorique sont alimentés via un convertisseur de fréquence. Il est également possible que les deux enroulements, statorique et rotorique, soient alimentés par deux onduleurs autonomes, une configuration souvent rencontrée en pratique.

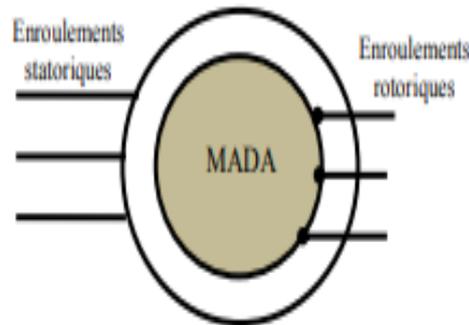


Figure III.2 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

III.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION:

Pour assurer un bon fonctionnement de la machine asynchrone en régime permanent, il est essentiel que les vecteurs des forces magnétomotrices (fmm) du stator et du rotor restent immobiles l'un par rapport à l'autre dans l'espace. Étant donné que le vecteur résultant des fmm des enroulements statorique tourne avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et que le rotor tourne à une vitesse ω_r , pour respecter cette condition, il est nécessaire que le vecteur des fmm des enroulements rotorique tourne, par rapport au rotor, à une vitesse ω_{gl} telle que [22].

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s g \quad (\text{III.1}).$$

Si la vitesse de rotation de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les deux vecteurs tournent dans le même sens. En revanche, si la vitesse de la machine dépasse la vitesse de synchronisme, les vecteurs se déplacent dans des sens opposés.

Par ce que la relation du vecteur résultat des fmms par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $g = \frac{f_{ro}}{f}$ c'est à dire :

$$f_{ro} = f g. \quad (\text{III.2}).$$

Étant donné la capacité de la MADA à fonctionner en tant que génératrice ou moteur à des vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il est possible de distinguer quatre modes opérationnels distincts, comme le montre la figure (1.3).

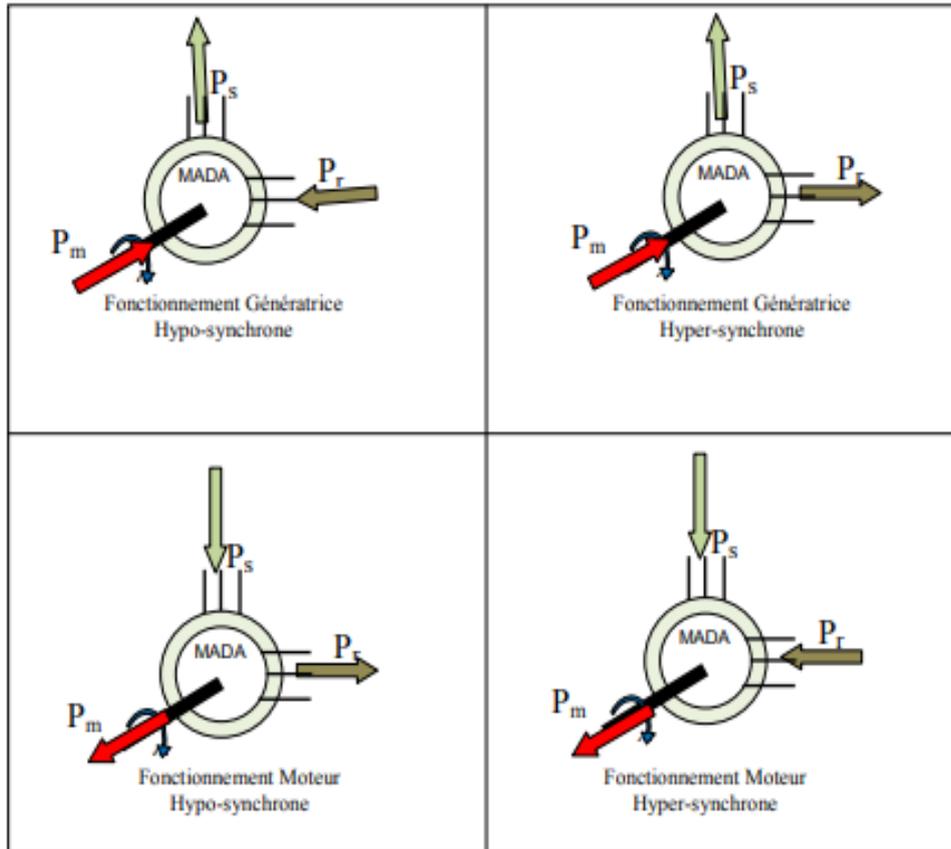


Figure III.3 : Modes opérationnels caractéristiques de la DFIM

Dans cette étude, P_s , P_r et P_m sont les puissances du stator, du rotor et la puissance mécanique respectivement.

III.4. Mode fonctionnement de la MADA:

La MADA peut fonctionner en moteur ou en générateur, tout comme la machine asynchrone classique, mais la principale distinction réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui détermine le mode de fonctionnement moteur ou générateur.[23] En effet, une cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être un moteur et au-dessus pour être un générateur. Le champ magnétique à l'intérieur de la machine est contrôlé par la commande des tensions rotoriques, ce qui permet de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme tant en mode moteur que en mode générateur. Nous allons exposer de manière chronologique ces divers modes de fonctionnement.

La littérature témoigne de l'importance accordée à la MADA. En tant que génératrice, la MADA offre de nombreux bénéfices dans le domaine des énergies renouvelables : le convertisseur associé à l'armature rotorique. La MADA alimentée par deux convertisseurs offre de bonnes performances pour certaines applications motrices avec des puissances élevées : fonctionnement en survitesse sans démagnétisation, ainsi que des performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse.

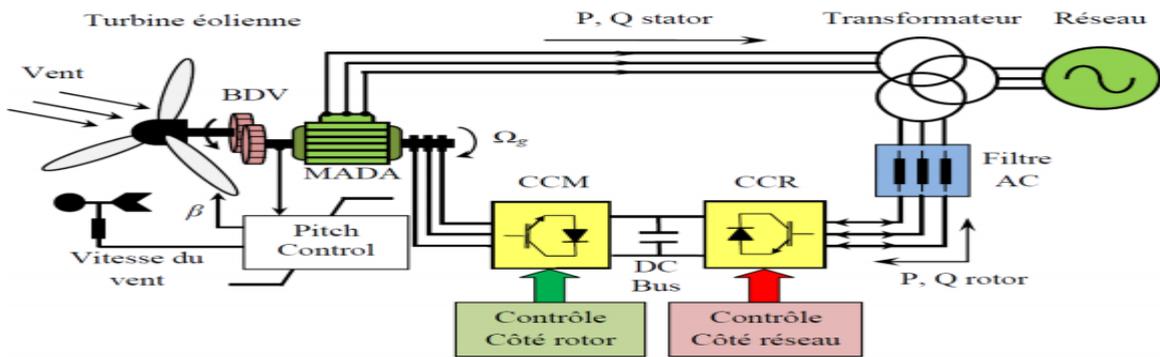


Figure II.4 : Système de conversion éolienne à base de la MADA [12].

III.5. Fonctionnement en mode génératrice:

En raison de l'engouement croissant pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA connaissent une croissance considérable, et de nombreuses publications soutiennent cette tendance. Il est largement étudié dans le domaine de la production d'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne, et les sujets abordés sont très divers :

- Étude, limites de fonctionnement et stabilité de la MADA
- La qualité de l'énergie fournie ainsi que la qualité des courants et des tensions, en particulier en cas de défauts dans le réseau.
- Options pour contrôler la MADA, qu'elle soit équipée d'un capteur de vitesse et de position.
- Calcul de la taille du convertisseur au rotor

Un stator connecté au réseau ou sur une charge autonome. Il est essentiel de l'examiner en raison de la quantité considérable de travaux réalisés et de la diversité des sujets traités (modélisation, commande à vitesse variable, sécurité de fonctionnement, etc.). Assiste cette évolution. La Figure [24] illustre la configuration, qui est couramment utilisée dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec une MADA.

Cela implique d'alimenter le rotor à l'aide d'un convertisseur et de connecter directement le stator au réseau.

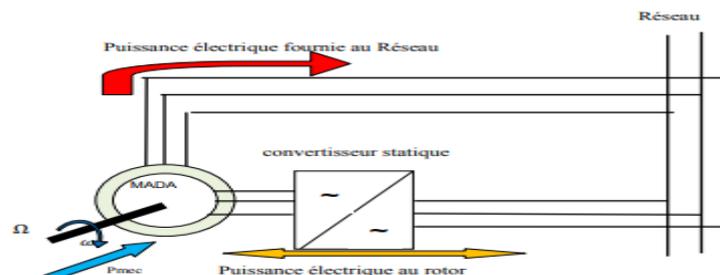


Figure III.5 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

La régulation des tensions rotoriques permet généralement de contrôler le champ magnétique à l'intérieur de la machine, ce qui permet de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme.

III.5.1. Fonctionnement en Mode génératrice Hypo-Synchrone:

Selon la figure III.7, le stator fournit la puissance au réseau. Le rotor absorbe alors la puissance de glissement. Le fonctionnement générateur est donc inférieur à la vitesse de synchronisation. Ce mode de fonctionnement ne peut pas être utilisé par la machine asynchrone à cage classique.

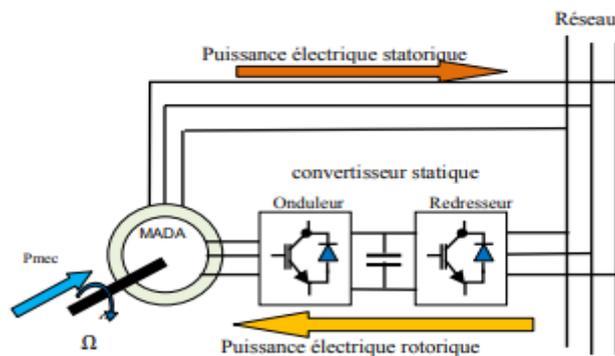


Figure III.6 : Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone

III.5.2 Fonctionnement en Mode génératrice Hyper-Synchrone :

Selon la figure III.6, on observe que le stator fournit la puissance au réseau, tandis que la puissance de glissement est récupérée par le rotor pour être réinjectée dans le réseau. Il y a donc un processus générateur supérieur à la vitesse de synchronisation. Ce fonctionnement peut être utilisé par la machine asynchrone à cage classique, mais dans cette situation, la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

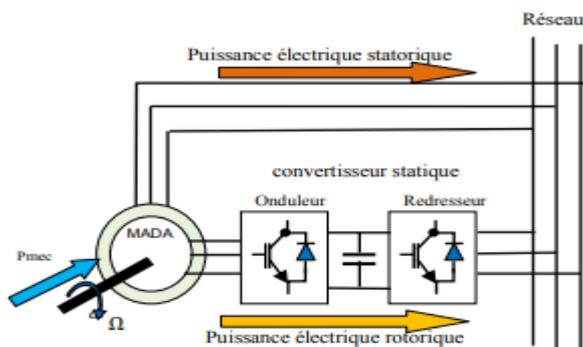


Figure III.7 : Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone

III.5.3. Fonctionnement en mode moteur:

La première application de la machine asynchrone à double alimentation était de fonctionner en tant que moteur sur une large plage de variation de vitesse. Grâce à l'utilisation d'une MADA, il est possible de modifier la vitesse par action en ajustant la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ainsi, ce dispositif sera économique lorsque les convertisseurs sont placés entre le rotor et le réseau en réduisant leurs dimensions d'environ 70% [25].

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [26], La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines. La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime. Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...) La MADA offre plusieurs possibilités de configuration avec l'association des convertisseurs de puissance, tout dépend essentiellement du domaine d'application de la MADA. D'après la littérature, il existe plusieurs configurations de fonctionnement[27].

La configuration 01 :

Stator relié au réseau, Rotor alimenté par un convertisseur. La figure III.9 illustre le fonctionnement de cette variante en moteur. Effectivement, le stator est connecté au réseau triphasé avec une fréquence et une tension constantes, tandis que le rotor est connecté à un onduleur ou à un cyclo-convertisseur. Cette solution entraîne une diminution significative de la puissance du convertisseur [28].

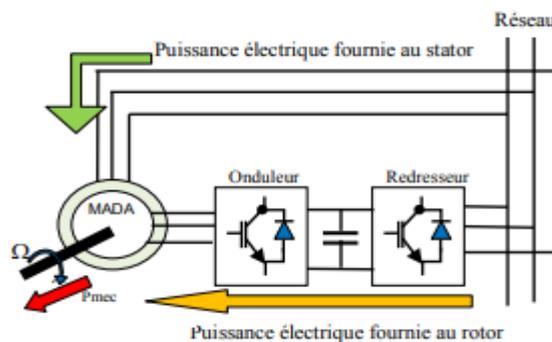


Figure III.8 : Fonctionnement en mode moteur avec un onduleur.

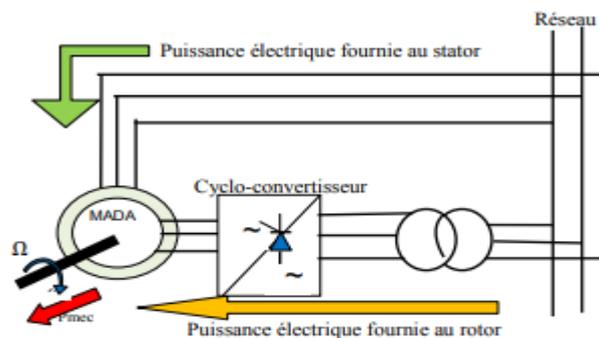


Figure III.9 : Fonctionnement en mode moteur avec un cyclo-convertisseur

LA Configuration II:

MADA alimentée par deux convertisseurs Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes [CHA10] : Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun comme représenté sur la figure III.9.

Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs comme représentés à la figure III.10.

- Deux cyclo-convertisseurs comme le montre la figure III.10.

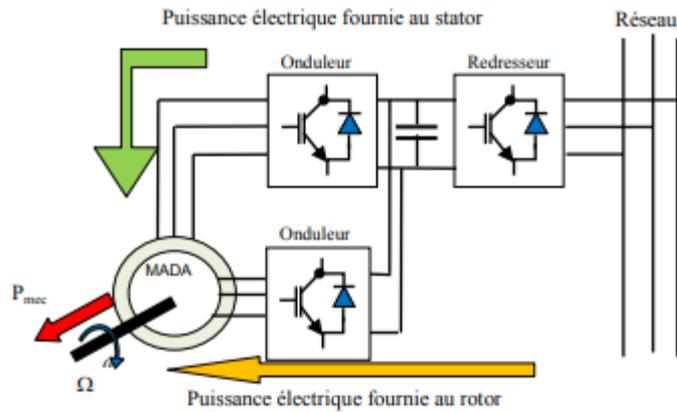


Figure III.10 : Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs et un bus continu commun

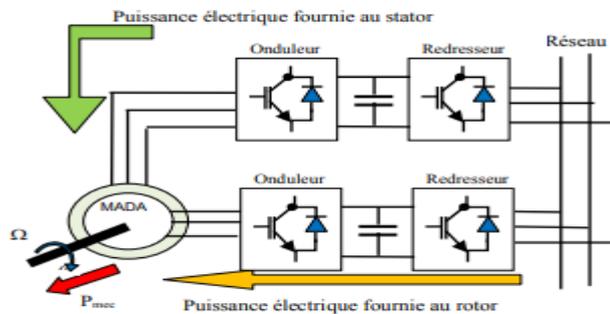


Figure III.11 : Fonctionnement en mode moteur avec deux onduleurs avec deux bus continus

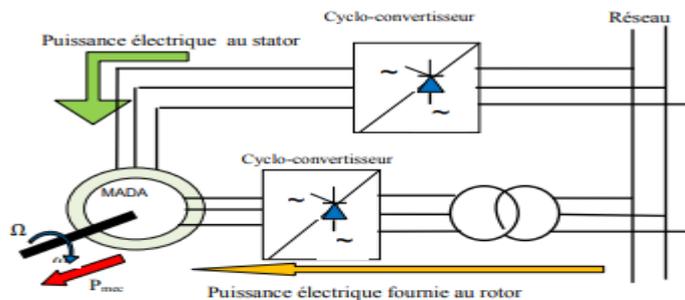


Figure III.12 : Fonctionnement en mode moteur avec deux cyclo-convertisseurs

III.5. Avantages et Inconvénients de la MADA :

Tableau **Erreur ! Utilisez l'onglet Accueil pour appliquer 0 au texte que vous souhaitez faire apparaître ici.**6:résume les points forts et les points faibles du SCEE basé sur la MADA

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;• Fonctionnement à vitesse variable sur une plage de vitesse tournant à $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme ;• Dimensionnement autour de 25% de la puissance nominale des convertisseurs statiques ;• Machine standard	<ul style="list-style-type: none">• Existence d'un multiplicateur ;• Commande complexe ;• Réduction de la robustesse (existence balai/collecteur) ;• Présence d'oscillations mécaniques réduites par un contrôle adéquat ;• Sensibilité aux défauts électriques.

III.6. Eolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA);

Dans cette configuration, le stator de la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) est directement couplé au réseau, tandis que le convertisseur de puissance gère le flux d'énergie à travers le circuit rotorique (Figure I.25). La commande du redresseur permet de réguler le fonctionnement de la génératrice en imposant une tension adaptée aux enroulements du rotor, optimisant ainsi la conversion d'énergie. Simultanément, la commande de l'onduleur assure la stabilité en maintenant une tension constante au niveau du bus continu, garantissant ainsi un flux de puissance régulier entre la machine et le réseau.

Cette configuration permet également de contrôler la puissance réactive injectée ou absorbée par la machine, contribuant à la régulation de la tension du réseau. Par ailleurs, elle offre une plus grande flexibilité dans la gestion de la vitesse de rotation, ce qui améliore l'efficacité globale du système.

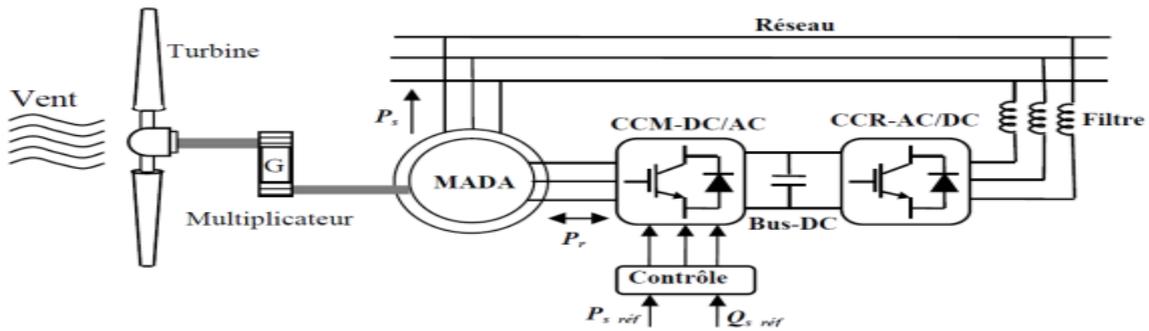


Figure III.13 : Système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une GADA.

III.7. Constitution de la GADA :

La génératrice asynchrone, également appelée machine à induction, est un type de génératrice électrique couramment utilisé dans les systèmes de production d'énergie, notamment dans les éoliennes. Sa structure comprend plusieurs éléments essentiels :

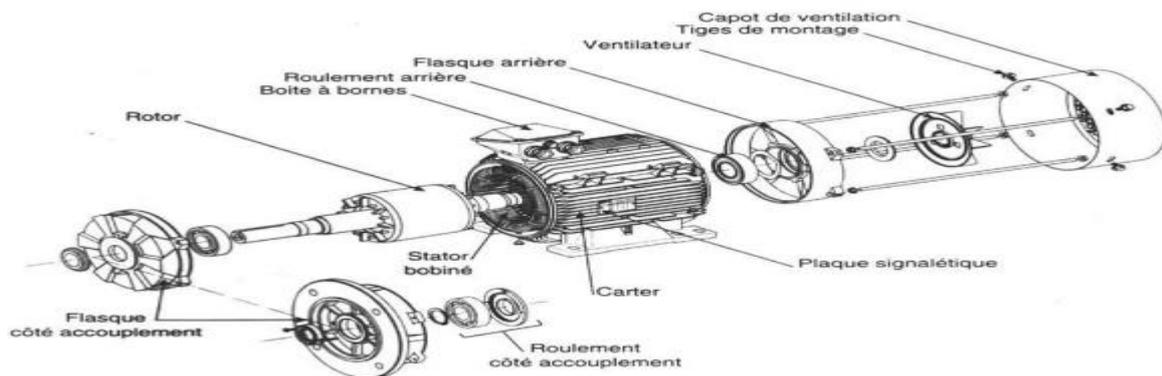


Figure III.14 : constitution de la génératrice asynchrone [29].

III.7.1. Stator :

Le stator est la partie fixe d'une machine électrique, qu'il s'agisse d'un moteur ou d'une génératrice. Dans le cas d'une génératrice asynchrone, il est constitué d'un ensemble de bobinages, généralement disposés en plusieurs phases (généralement trois), qui sont insérés dans des encoches situées autour de la circonférence intérieure du stator. Ces bobinages, alimentés par un courant alternatif, créent un champ magnétique tournant qui interagit avec le rotor pour produire de l'électricité.

Le rôle principal du stator est de générer un champ magnétique nécessaire à l'induction de courants dans le rotor. C'est donc un élément clé dans la conversion d'énergie électrique ou mécanique.



Figure III.15 : stator d'une génératrice asynchrone triphasé.

Le rotor est la partie mobile d'une machine électrique, telle qu'un moteur ou une génératrice, qui tourne à l'intérieur du stator. Dans une génératrice asynchrone, il peut être de deux types principaux :

III.7.2. Rotor bobiné :

Ce rotor est équipé de bobinages, similaires à ceux du stator, qui sont connectés à des résistances ou des dispositifs de contrôle à travers des bagues collectrices. Ce type de rotor permet un contrôle plus fin des performances de la machine.



Figure III.16 : Rotor bobiné

Le rotor, en interaction avec le champ magnétique tournant créé par le stator, subit une force électromagnétique qui provoque sa rotation. Dans une génératrice asynchrone, la vitesse de rotation du rotor est légèrement inférieure à celle du champ magnétique du stator, phénomène appelé glissement, d'où le terme "asynchrone".

III.7.3. Principe de fonctionnement :

Les grandes machines électriques à double alimentation utilisées dans l'industrie sont principalement des machines triphasées à rotor bobiné. Bien que leurs principes de fonctionnement soient bien établis depuis des décennies, leur utilisation à grande échelle ne s'est généralisée que récemment, principalement en raison de l'essor des technologies éoliennes. Le générateur asynchrone à double alimentation (GADA) peut fonctionner aussi bien en mode sous-synchrone (vitesse du rotor inférieure à la vitesse synchrone) qu'en mode

super-synchrone (vitesse du rotor supérieure à la vitesse synchrone), offrant ainsi une plage de fonctionnement d'environ 30 % autour de la vitesse synchrone.

Le principal avantage du GADA dans les éoliennes réside dans sa capacité à maintenir une amplitude et une fréquence de tension de sortie essentiellement constantes, alignées sur les valeurs du réseau, indépendamment de la vitesse du rotor de l'éolienne. Cela permet au GADA de se connecter directement au réseau électrique en courant alternatif tout en restant synchronisé en permanence.

Parmi ses autres avantages, le GADA peut également contrôler la puissance réactive transmise au réseau à partir du rotor, contribuant ainsi à la stabilité de la tension et à la correction du facteur de puissance au point de couplage commun (PCC). La variation de la vitesse du vent est gérée en ajustant la fréquence des tensions et des courants alternatifs appliqués aux enroulements du rotor, permettant ainsi un contrôle efficace de la vitesse du rotor [30].

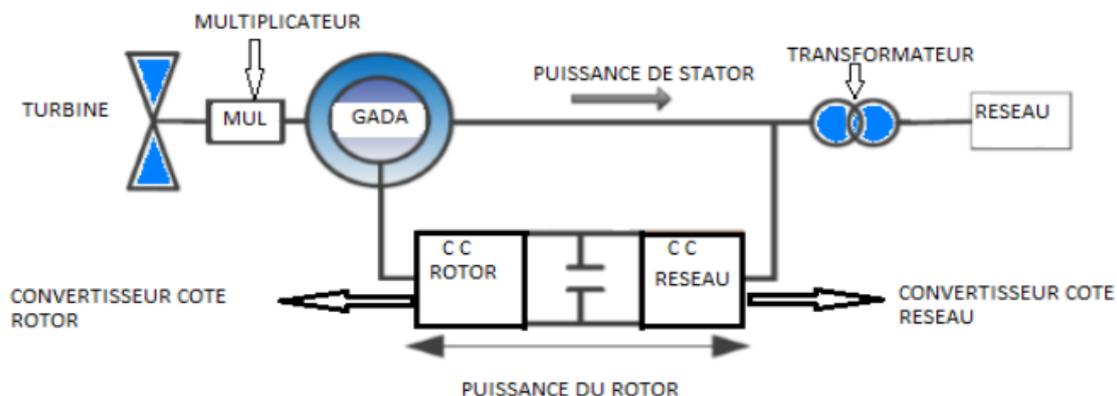


Figure III.17 : configuration du système de conversion d'énergie éolienne GADA (un seul générateur) en utilisant le convertisseur back-to-back [31].

III.7.4. Les applications de la GADA:

Le Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) est utilisé dans diverses applications, principalement dans les systèmes nécessitant une gestion efficace de la production d'énergie avec des sources variables. Voici les principales applications du GADA :

1. Énergie éolienne

- Application principale du GADA, il est largement utilisé dans les éoliennes modernes pour sa capacité à fonctionner sur une plage de vitesses variables, optimisant ainsi la production d'énergie en fonction des variations de la vitesse du vent. Le GADA permet de maintenir une tension et une fréquence stables tout en s'adaptant aux fluctuations du vent, ce qui en fait un choix idéal pour les fermes éoliennes connectées au réseau électrique.

2. Hydroélectricité

- Bien que moins couramment utilisé que dans l'éolien, le GADA peut également être appliqué dans les systèmes hydroélectriques à petite échelle où le débit d'eau est variable. Cela permet de générer de l'énergie à des vitesses variables du rotor, offrant ainsi une flexibilité similaire à celle observée dans les systèmes éoliens.

3. Systèmes hybrides de production d'énergie

- Le GADA est parfois utilisé dans des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire. Dans ces systèmes, il aide à gérer la production d'énergie fluctuante en ajustant la vitesse de rotation en fonction des conditions météorologiques.

4. Récupération d'énergie des flux industriels

- Dans certaines industries, le GADA peut être utilisé pour la récupération d'énergie à partir de flux de gaz ou de liquides à vitesse variable. Cela permet de générer de l'électricité à partir de sources d'énergie résiduelles tout en optimisant les performances à différentes vitesses de flux.

5. Systèmes de pompage (pompes hydrauliques)

- Les systèmes de pompage à vitesse variable, notamment ceux utilisés dans les stations de pompage pour l'irrigation ou les infrastructures hydrauliques, peuvent utiliser des GADA pour optimiser la consommation d'énergie en fonction de la demande, réduisant ainsi les coûts énergétiques.

6. Systèmes de ventilation industrielle

- Dans certaines installations industrielles, les ventilateurs et les systèmes de ventilation nécessitant un contrôle précis de la vitesse peuvent être équipés de GADA. Cela permet d'adapter la vitesse du moteur aux besoins réels du processus, améliorant l'efficacité énergétique.

7. Applications maritimes (énergie des vagues) :

- Dans les projets de production d'énergie à partir des vagues, le GADA peut être utilisé pour gérer les variations de puissance dues à la nature irrégulière des vagues, de manière similaire à son utilisation dans les éoliennes pour gérer les fluctuations du vent.

Ces applications tirent toutes parti de la capacité du GADA à fonctionner de manière efficace à des vitesses variables, tout en maintenant une connexion stable au réseau électrique et en contribuant à la stabilité de celui-ci.

III.7.5. Les avantages de la GADA:

- Le GADA permet une large plage de fonctionnement, couvrant des vitesses sous-synchrones et super-synchrones. Cela permet de s'adapter aux variations du vent, optimisant ainsi la production d'énergie
- Le stator du GADA est directement connecté au réseau électrique, ce qui permet de maintenir une tension et une fréquence de sortie constantes, indépendamment de la vitesse du rotor.
- Les convertisseurs d'énergie utilisés avec un GADA ne traitent qu'une partie de la puissance totale (environ 30 %), ce qui réduit les coûts et les pertes par rapport aux systèmes qui nécessitent des convertisseurs plus dimensionnés.
- Le GADA peut contrôler la puissance réactive transmise au réseau, contribuant à la stabilité de la tension et à la correction du facteur de puissance au point de couplage commun (PCC), ce qui est bénéfique pour le réseau électrique
- Grâce à sa capacité à gérer les variations de vent, le GADA est particulièrement adapté aux éoliennes modernes, où la gestion de la vitesse du rotor est cruciale pour maximiser l'efficacité énergétique.

III.7.6. Les inconvénients :

- Le système nécessite des convertisseurs et un contrôle sophistiqué pour gérer la connexion rotor-réseau, augmentant ainsi la complexité de l'installation et de la maintenance.
- Étant directement connecté au réseau, le GADA est sensible aux perturbations de celui-ci, telles que les variations de fréquence et de tension, nécessitant des dispositifs de protection supplémentaires
- Le GADA est moins performant lorsque la puissance dépasse sa limite nominale, car la plage de fonctionnement est limitée à environ 30 % autour de la vitesse synchrone. Cela peut entraîner une limitation de la production d'énergie dans des conditions de vent très fort.
- Les convertisseurs statiques utilisés entre le rotor et le réseau doivent être dimensionnés correctement, ce qui augmente la complexité et les coûts en cas de défaillance ou d'usure.
- En raison de la complexité des composants (convertisseurs, contrôleurs, etc.), la maintenance peut être plus coûteuse et nécessiter une expertise technique spécifique.

III.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA):

Le dispositif asynchrone à double alimentation est composé de trois bobines statoriques, ainsi que de trois bobines rotoriques décalées entre elles par un angle de $2\pi/3$ similaire à celui du stator. Le stator et le rotor sont les deux parties principales de cette machine asynchrone (Figure III.18).

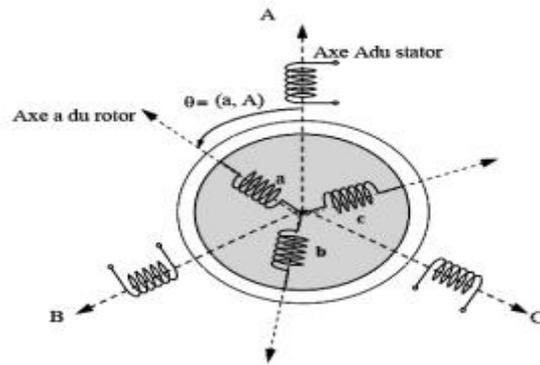


Figure III.18 : Représentation schématic du modèle d'une MADA.

Au sein de la cavité de la machine, le rotor tourne et est séparé du stator par un entrefer. En général, les enroulements rotoriques sont généralement assemblés en forme d'étoile et sont reliés à trois bagues sur lesquelles des balais glissent.

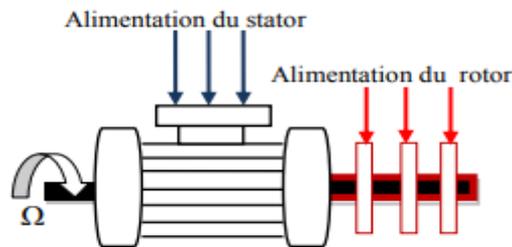


Figure III.19 : MADA avec des bagues collectrices

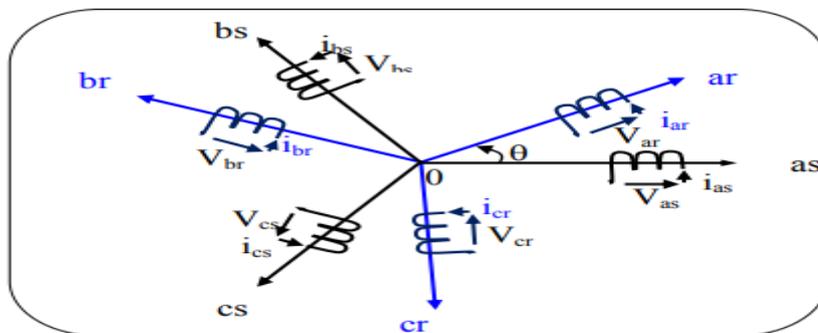


Figure III.0.20 : Représentation simplifié de la MADA.

as, bs, cs : phases du stator; ar , br , cr: phases du rotor.

III.8.1. Hypothèses simplificatrices La machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Il est extrêmement difficile de se prêter à une analyse en prenant en compte sa configuration précise en raison de la répartition de ses enroulements et de sa géométrie propre. Ainsi, pour établir un modèle simple, il est nécessaire de formuler certaines

hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses sont : la machine est construite de manière symétrique équilibrée, à la fois au rotor et au stator.

Le rotor ω est bobiné, les bobinages sont triphasés au stator et au rotor, et possèdent P paires de pôles. Le circuit magnétique est supposé être parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme étant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire). Les champs magnétiques de chaque bobinage sont répartis de manière sinusoïdale le long de l'entrefer, qui est d'une épaisseur et d'une perméabilité constante, ce qui signifie que l'effet d'encoche est ignoré. Les différentes résistances des enroulements ne changent pas en fonction de la température ω .

Le circuit magnétique n'est pas saturé et sa perméabilité constante est supposée, ce qui est essentiel pour considérer les flux comme une fonction linéaire des courants. La force magnétomotrice générée par chaque phase statorique et rotorique est considérée comme étant à répartition sinusoïdale. L'épaisseur de l'entrefer est constante et l'effet d'encoche est ignoré. Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique. L'hystérésis et les courants de Foucault entraînent des pertes ferromagnétiques minimales, tandis que les pertes mécaniques sont également minimales. Ces hypothèses ont des répercussions : Les tensions propres entre les enroulements du stator sont inchangées.

- Les flux propres entre les enroulements rotoriques restent inchangés.
- Il existe une variation des inductances mutuelles entre les enroulements statorique et rotorique.
- Les flux propres entre les enroulements rotoriques restent inchangés.

III.8.1.1. Equations électrique de la MADA:

En tenant compte les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statorique et rotorique qui décrivent le fonctionnement de la machines s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \\ [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \end{array} \right. [V_r] \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \\ [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{III.4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{III.5})$$

Rs, Rr: Résistances des enroulements statorique et rotorique:

III.8.1.2. Equations magnétiques:

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][\varphi_r] \\ [\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][\varphi_s] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \\ [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{III.7})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \\ [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{III.8})$$

Sachant que :

$[R_s]$, $[R_r]$: Sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$[L_s]$, $[L_r]$: Sont les matrices des inductances propres statorique et rotorique.

$[M_{sr}], [M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_s], [M_r]$: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \text{(III.9).}$$

III.8.1.3. Equations mécaniques de la machine:

L'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor. Cette équation est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_v \Omega = C_{em} - C_r \text{(III.10)}$$

Avec : J : est le moment d'inertie du rotor de la machine en $(kg.m^2)$.

Ω_r : est la vitesse angulaire mécanique du rotor (rd/s), $\Omega = \omega p$, tel que :

P : est le nombre de paires de pôles

ω : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor

f_v : est le coefficient de frottement en $(N.m.s/rd)$

C_{em} : est le couple électromagnétique en $(N.m)$

C_r : est le couple résistant en $(N.m)$.

III.9. Modélisation de la MADA dans des référentiels diphasés :

On considère que chaque enroulement triphasé du stator et du rotor peut être représenté par un enroulement diphasé équivalent grâce à la transformation de Park. Ainsi, chaque enroulement diphasé est représenté par deux bobinages identiques disposés sur des axes en quadrature. Cette transformation permet de simplifier les relations entre les flux et les courants, ainsi qu'entre les tensions et les flux, en réduisant le nombre de variables à traiter.

La transformation de Park consiste à convertir un système triphasé d'axes a, b, c en un système équivalent diphasé d'axes d, q, tout en créant la même force magnétomotrice (f.m.m.). La composante homopolaire, quant à elle, sert à équilibrer le système transformé sans participer à la création de la f.m.m., et peut être choisie orthogonale au plan dq. Le passage d'un système triphasé à un système diphasé repose sur la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices équivalentes, ce qui permet de conserver les puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles. Cela permet également d'exprimer le couple électromagnétique dans le repère diphasé, qui reste invariant pour la machine réelle.

La Figure III.22 illustre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. L'objectif de ce changement de repère est de simplifier l'écriture des équations de la machine pour en faciliter l'exploitation. Dans cette étude, nous avons utilisé la transformation de Park.

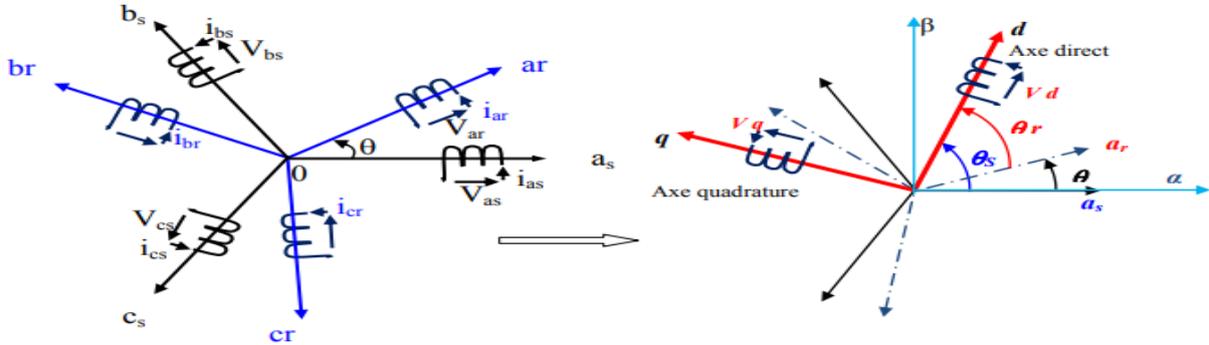


Figure III.21 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

Avec :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q)

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

II.3.1. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q) : Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_a \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_a \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système en (d, q) :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

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

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

$M = 3 / 2 l_m$: Inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

III.10. Couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

Il est nécessaire d'intégrer l'équation du mouvement (II.7) dans le système d'équations différentielles modélisant la machine afin d'analyser les phénomènes transitoires tels que le démarrage, le freinage et la variation de la charge avec une vitesse rotorique variable.

La relation suivante donne la forme générale du couple électromagnétique d'une MADA modélisée dans le repère de Park :

$$C_{em} = \frac{3PM}{2L_s} (\varphi_{dr}\varphi_{qs} - \varphi_{qr}I_{ds}) = \frac{3}{2}P(\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{ds}) \quad (III.13)$$

III.11. Choix de référentiel :

Il est conseillé de sélectionner un système d'axes de référence qui permet d'obtenir le système différentiel le plus simple possible, car le résultat final dépend du choix du système de coordonnées. Il est observé que le calcul peut varier en complexité. D'autres axes peuvent être obtenus à partir du système d'axe (d, q) qui sont des cas spécifiques. Ensuite, les composantes homopolaires sont supposées nulles. L'analyse du comportement dynamique des machines électriques peut généralement être effectuée en se basant sur la transformation de Park pour divers référentiels. On sélectionne le référentiel en fonction du phénomène à étudier et des simplifications qu'il offre. Trois catégories de référentiels présentent un intérêt concret

III.11.1. Référentiel lié au stator:

Dans ce cas, ($\omega_a=0$). Ce système est β On désigne également ce référentiel sous le nom de système d'axes (α), qui est employé pour analyser les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [2].

Les équations électriques de la machine deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (III.14)$$

au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.15)$$

III.11.2. Référentiel lié au rotor:

Dans ce cas, le système d'axes (d,q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse ($\omega_a=\omega_r$). Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans

les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [2].

Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent :

Au stator :

au rotor :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.16)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (III.17)$$

III.11.3. Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel, également connu sous le nom de système d'axes (X, Y), évolue à la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire ($\omega_a = \omega_s$). Les formules électriques se transforment en :

Au stator :

au rotor :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (III.18)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases}$$

(III.19)

Avec :

$$C_{em} = \frac{3PM}{2L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega + C_r \quad (III.20)$$

En régime permanent, cette dernière représentation fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales. Ce choix est essentiel pour concevoir le contrôle vectoriel par orientation du flux, et les modèles d'action sont basés sur la position du référentiel par rapport aux différents axes de flux. Le contrôle vectoriel est généralement effectué en utilisant le référentiel lié au champ tournant, car les grandeurs deviennent continues.

III.12. Modèle de la MADA dans le repère de PARK sous forme d'état:

Afin d'obtenir le modèle complet de la MADA, les expressions des flux sont remplacées dans les équations de tension. Quatre équations électriques peuvent être obtenues en fonction des éléments des courants et/ou des flux statorique et rotorique. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park est obtenu en associant l'équation mécanique aux quatre équations électriques, ce qui peut être représenté sous la forme d'état suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = Ax + Bu \quad (III.21)$$

Le référentiel associé aux champs tournants est sélectionné, le modèle de la machine MADA alimentée en Tension est représenté par les équations électriques précédentes et l'équation mécanique. En prenant en compte les courants statorique et rotorique comme variables d'état, après avoir remplacé ces variables dans les équations précédentes, ce système se présente sous forme matricielle d'état de la manière suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = Ax + Bu \quad (III.22)$$

Avec :

$$\begin{cases} x = [I_{ds} & I_{qs} & I_{dr} & I_{qr}]^T \\ u = [V_{ds} & V_{qs} & V_{dr} & V_{qr}]^T \end{cases} \quad (III.23)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega + \omega_s & \frac{R_r M}{\sigma L_s} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega \\ -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\frac{1}{\sigma} \omega + \omega_s \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega & \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & \frac{1}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

Ou :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega + \omega_s & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega \\ -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega & \frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\frac{1}{\sigma} \omega + \omega_s \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega & \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} & \frac{1}{\sigma} \omega - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 p\Omega + \omega_s & a_3 & a_4 p\Omega \\ -a_2 p\Omega - \omega_s & a_1 & -a_4 p\Omega & a_3 \\ a_5 & -a_6 p\Omega & a_5 & a_8 p\Omega + \omega_s \\ a_6 p\Omega & a_5 & a_8 p\Omega + \omega_s & a_7 \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & b_2 \\ b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Avec:

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: coefficient de dispersion:

$$a_1 = -\frac{R_s}{\sigma L_s} a_2 = -\frac{(1-\sigma)}{\sigma} a_3 = -\frac{R_r M}{\sigma L_s L_r} a_4 = -\frac{M}{\sigma L_s} a_5 = -\frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} a_6 = -\frac{M}{\sigma L_r},$$

$$a_7 = -\frac{R_r}{\sigma L_r} a_8 = \frac{1}{\sigma} b_1 = \frac{1}{\sigma L_s} b_2 = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} b_3 = \frac{1}{\sigma L_r}$$

(III.28)

III.13. Association convertisseur- machine:

Les machines asynchrones peuvent être réglées avec succès par des convertisseurs statiques de fréquence qui effectuent une double conversion en utilisant le courant continu. La conversion de l'énergie continue vers l'alternative est assurée par l'onduleur en tension. La popularité de cette application est élevée dans le domaine de la conversion d'énergie continu alternative. On peut utiliser l'onduleur à une fréquence fixe ou variable afin de modifier la vitesse des machines électriques (MLI : Modulation de Largeurs d'Impulsion ou PWM : Modulation de Largeurs d'Impulsion). Les interrupteurs peuvent être commandés soit à l'ouverture ou à la fermeture (Fréquence fixe) ou à l'ouverture et à la fermeture (MLI) en fonction de leur utilisation.

III.14. Alimentation de la machine par onduleur:

L'alimentation de la machine est assurée par un ensemble composé d'un redresseur, d'un filtre RLC et d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI). Pour faire fonctionner une machine asynchrone, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, allant du branchement direct sur le réseau aux variateurs de vitesse, en passant par les démarreurs. Un variateur de vitesse peut avoir plusieurs objectifs, notamment :

- Obtenir des performances optimales dans diverses phases de fonctionnement : fonctionnement à différentes vitesses, suivi de profils dynamiques, maintien d'une vitesse constante malgré des variations du couple de charge, etc.
- Prolonger la durée de vie des moteurs à induction en contrôlant les niveaux de courant dans les enroulements.
- Réduire la consommation énergétique.

Dans les sections précédentes, plusieurs configurations de commande pour une machine asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable ont été abordées. Dans ce travail, nous étudierons l'association d'une machine asynchrone à rotor bobiné avec un système d'alimentation à fréquence variable pour le stator et le rotor. La Figure 2.5 illustre le schéma de principe de la MADA à vitesse variable. Ce système comprend deux alimentations à fréquence variable, l'une pour le stator et l'autre pour le rotor. Les deux alimentations sont identiques, à l'exception de l'alimentation rotorique qui intègre un transformateur abaisseur.

Chaque alimentation comporte trois éléments principaux :

- Un redresseur triphasé à diodes double alternance ;
- Un filtre passe-bas passif (L, C) ;
- Un onduleur de tension à MLI.

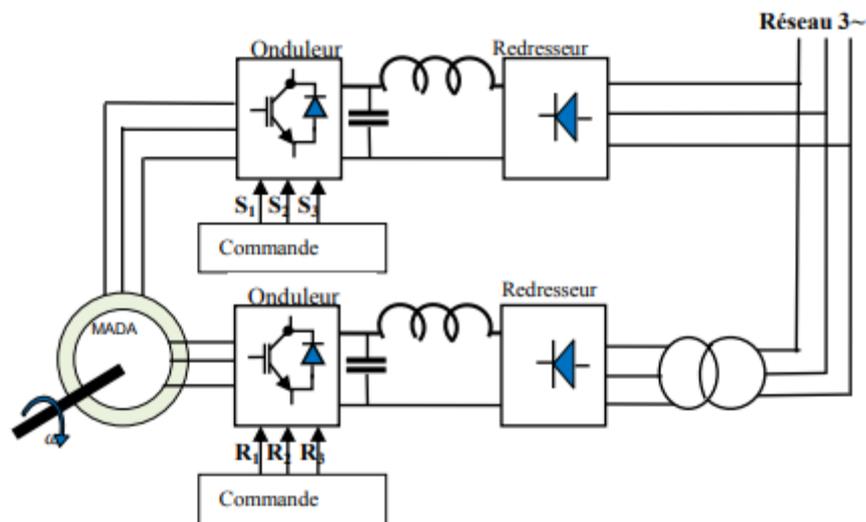


Figure III.22 : Système d'alimentation d'une machine asynchrone à double alimentation.

II.5.2. Modélisation du redresseur:

Les convertisseurs de l'électronique de puissance, appelés redresseurs, garantissent la conversion alternative -continue. Ils sont alimentés en courant continu par une source de tension alternative, ce qui permet d'alimenter le récepteur branché à leur sortie. Le pont triphasé à diodes est utilisé pour alimenter un système de tension sinusoïdale triphasée, comme illustré dans la figure III.23.

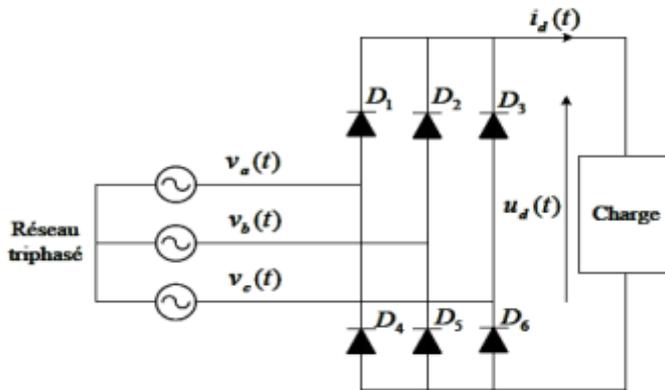


Figure III.23 : Redresseur triphasé à diodes.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord abordé une description générale des systèmes éoliens, en passant en revue les différentes machines disponibles. L'accent a ensuite été mis sur la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation (GADA). En partant de certaines hypothèses simplificatrices, nous avons élaboré un modèle dynamique qui nous a permis de mieux comprendre le comportement de la GADA. À l'aide de la transformation de Park, la machine triphasée a été convertie en une machine biphasée équivalente, ce qui a facilité l'analyse. Les résultats obtenus ont révélé un couplage important entre les puissances active et réactive, démontrant l'impact de la GADA dans un système éolien.

Chapitre IV :
***Commande directe de
puissance (DPC) et la
commande vectorielle de la
MADA***

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV. Commande directe de puissance (DPC) de la MADA :

IV.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude de la Commande Directe de Puissance (DPC), une technique de contrôle largement utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie, notamment pour les génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) connectées aux réseaux électriques. La DPC se distingue par sa capacité à réguler directement la puissance active et réactive sans nécessiter de modulation du signal ou de transformations complexes. Cette approche, développée initialement pour les systèmes à base de convertisseurs, a démontré une efficacité accrue dans le contrôle dynamique des systèmes éoliens, en particulier dans les contextes où la réactivité et la robustesse sont primordiales.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer en détail le principe de la DPC, ses avantages par rapport aux autres stratégies de contrôle, ainsi que son implémentation dans les systèmes à GADA. Une analyse approfondie des algorithmes utilisés pour cette commande sera également présentée, tout en mettant en avant les défis liés à l'amélioration des performances, tels que la réduction des ondulations de couple et l'optimisation de la qualité de puissance. Cette étude permettra de mieux comprendre comment la DPC peut être adaptée pour répondre aux exigences croissantes de stabilité, de rendement énergétique et de conformité aux codes de raccordement des réseaux électriques modernes.

IV.2. Histoire de la DPC :

En raison de la grande similitude entre une machine électrique alimentée par un onduleur de tension triphasé et un redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, une technique de contrôle similaire au DTC a été développée, connue sous le nom de Commande Directe de Puissance (DPC: Direct Power Control). Pour la première fois en 1998, T. Neghouchi a présenté cette méthode afin de contrôler directement les puissances instantanées active et réactive du redresseur à MLI triphasé, sans utiliser de capteurs de tension réseau. Cette méthode vise principalement à assurer un prélèvement de courants sinusoïdaux tout en préservant un facteur de puissance unitaire, en contrôlant de manière distincte les puissances active et réactive.

IV.3. THEORIE DE LA COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE :

Le passage de la commande vectorielle à la commande directe de couple et de flux (DTC) se caractérise par une simplification importante de l'algorithme de commande. Cependant, on peut se demander pourquoi la commande directe des puissances active et réactive (DPC) n'a pas été développée avant la DTC. En effet, si l'algorithme de commande a été considérablement simplifié avec la DTC, il en est de même pour la transition vers la DPC. Cette nouvelle approche de commande repose sur les mêmes principes vectoriels que ceux régissant la DTC, mais avec une différence clé : au lieu de contrôler des composantes

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

estimées à partir des paramètres de la machine, la DPC se concentre exclusivement sur l'échange des puissances actives et réactive entre la machine et sa source d'alimentation.

De plus, les puissances instantanées peuvent être calculées sans avoir recours à des transformations de référentiels en rotation, ce qui rend inutile la connaissance de l'angle de position des phases rotoriques. Comme les puissances sont directement calculées à partir des courants et de la tension, il n'est plus nécessaire de connaître les paramètres de la machine, ce qui est une caractéristique aussi surprenante que les performances obtenues avec cette méthode.

Il convient de rappeler que l'augmentation du couple à vitesse constante entraîne une augmentation de la puissance consommée par la machine. Une puissance positive est absorbée en mode moteur, tandis qu'elle devient négative en mode génératrice. Cette relation s'applique également en mode génératrice, où une augmentation du couple réduit la puissance générée par la machine (en augmentant la puissance positive). En remplaçant simplement le contrôle du couple par celui de la puissance active, et le flux par la puissance réactive, on obtient un système de commande directe des puissances active et réactive. Toutefois, une difficulté majeure subsiste : le calcul de l'angle du flux rotorique. À cet égard, la commande directe des puissances active et réactive offre un moyen robuste de déterminer le secteur du flux rotorique.

IV.4.PRINCIPE GENERAL DE LA DPC CLASSIQUE (DPC-C) :

La structure générale de la Commande Directe de Puissance Classique (DPC-C), utilisant une table de commutation prédéfinie, appliquée au convertisseur triphasé côté machine (CCM), est représentée à la figure (IV.1). Cette approche est similaire à celle du Contrôle Direct de Couple (DTC). Cependant, au lieu de contrôler le couple et le flux rotorique, ce sont les puissances actives et réactive statoriques qui sont les variables régulées. Le principe de la DPC repose sur la sélection d'une séquence d'ordres de commutation (S_a , S_b , S_c) des semi-conducteurs du CCM, en se basant sur une table de commutation. La sélection est effectuée à partir des erreurs (εP_s et εQ_s) entre les références des puissances active et réactive (P_s^* et Q_s^*) et les valeurs réelles (P_s et Q_s), calculées par deux comparateurs à hystérésis H_P et H_Q respectivement. De plus, la sélection prend en compte le secteur (ou zone) dans lequel se trouve le vecteur de flux rotorique.

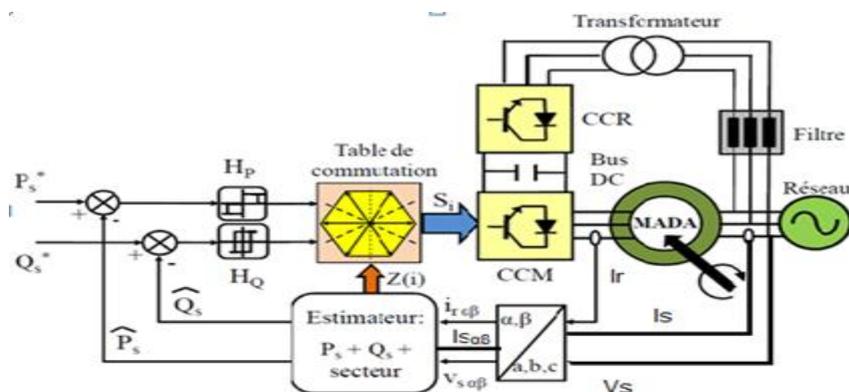


Figure IV.1 : Configuration de la DPC-C de la MADA.

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV.5. DPC-C de la MADA :

Dans tous les secteurs, pour obtenir une table de commutation qui permet de contrôler simultanément les puissances active et réactive, il est nécessaire d'analyser les fluctuations causées par l'application de chaque vecteur de commande sur les puissances, et ce, pendant toute la durée de la tension rotorique. Il est essentiel que les vecteurs de commande choisis dans la table de commutation limitent l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive en même temps.

IV.6. Estimation de la puissance active et réactive :

La puissance active P_s et réactive Q_s sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis.

Les valeurs mesurées des puissances statoriques sont estimées à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = (V_s \alpha I_{s\alpha} + V_s \beta I_{s\beta}) \\ Q_s = (V_s \beta I_{s\alpha} - V_s \alpha I_{s\beta}) \end{cases} \quad (IV.1)$$

L a transformation directe de Concordia est utilisée pour passer du repère (a, b, c) au repère (α , β) (voir annexe B).

La stratégie MPPT est utilisée pour générer la puissance de référence P_s^* (voir figure IV.1). Par la suite, on comparera ces deux valeurs de puissance active et réactive réelles avec les valeurs de référence P_s^* et Q_s^* , Ensuite, on introduira les différences entre les valeurs réelles et de référence dans deux comparateurs à hystérésis.

IV.7. Secteurs du Flux rotorique :

Les expressions du flux rotorique (voir chapitre II équation II.26) dans le repère $\alpha\beta$ s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{cases} \quad (IV.2)$$

L'angle du flux rotorique est donné par :

$$\delta = \text{Arctan} (\Phi_{r\beta} / \Phi_{r\alpha}) \quad (IV.3)$$

La position du flux rotorique dans le plan $\alpha\beta$ sera déterminée grâce à cet angle.

Le plan complexe $\alpha\beta$ est divisé en six zones angulaires Z_i ($i = 1, \dots, 6$), comme illustré dans la figure (IV.2). Ces secteurs peuvent être identifiés grâce à la relation suivante :

$$-\pi/6 + (i - 1) \pi/3 \leq Z(i) < \pi/6 + (i - 1) \pi/3 \quad (IV.4).$$

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

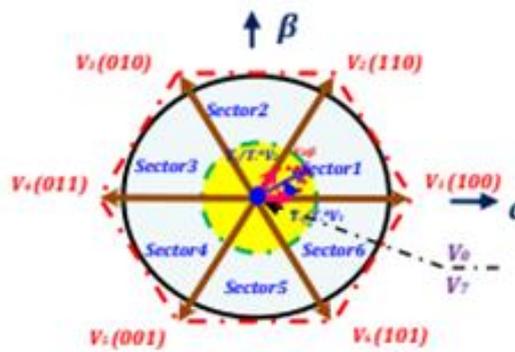


Figure IV.2 : Les six secteurs du flux rotorique

IV.8. Choix des comparateurs à hystérésis :

La solution la plus simple et la mieux adaptée pour la régulation des puissances est le choix d'un correcteur à hystérésis à trois niveaux pour la puissance active (P_s) et à deux niveaux pour la puissance réactive (Q_s). Ces outils de comparaison (figure IV.2) permettent de gérer efficacement les échanges de puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens, tout en assurant un fonctionnement optimal aussi bien en mode hypo-synchrone qu'en mode hyper-synchrone. Cette configuration garantit une réactivité élevée et un contrôle précis, essentiel pour maintenir la stabilité du système en présence de variations de charge et de vent.

La DPC appliquée à la MADA repose sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique qui minimise les écarts entre les valeurs mesurées et celles de référence. Ces erreurs sont ensuite maintenues dans les limites des bandes d'hystérésis, permettant un contrôle direct des puissances. De plus, la robustesse de cette méthode permet d'atténuer les oscillations indésirables et d'assurer une meilleure intégration au réseau, même dans des conditions de fonctionnement fluctuantes. Cela en fait une solution particulièrement adaptée aux exigences des systèmes éoliens modernes.

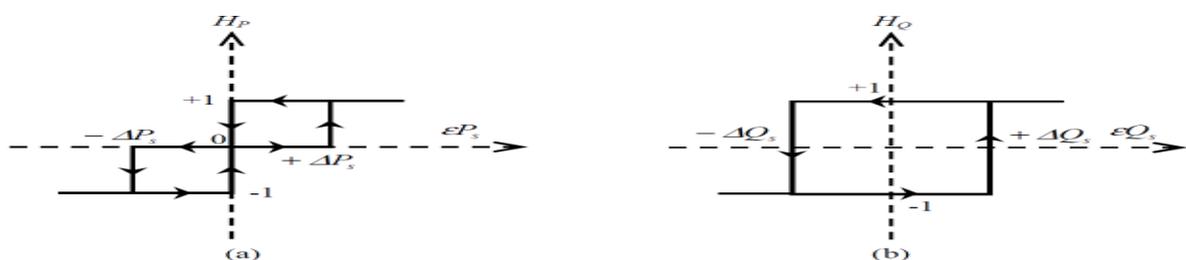


Figure IV.3 : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive.

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur les puissances active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter :

$$\text{Si } \epsilon Q_s \geq \Delta Q_s \quad \Rightarrow \quad H_Q = 1$$

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

Si $\epsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \Rightarrow HQ = -1$

Si $\epsilon P_s \geq \Delta P_s \Rightarrow HP = 1$

Si $-\Delta P_s \leq \epsilon P_s \leq \Delta P_s \Rightarrow HP = 0$

Si $\epsilon P_s \leq -\Delta P_s \Rightarrow HP = -1$

Le principal inconvénient des comparateurs analogiques est que la fréquence d'échantillonnage varie. Cependant, il est possible de résoudre ce problème en utilisant des comparateurs discrets. Ainsi, on ne maintient pas les fluctuations des puissances dans la bande d'hystérésis, mais on utilise un temps d'échantillonnage fixe.

IV.9. COMMANDE DIRECTE DE PUISSANCE DE LA MADA :

Dans cette section, le modèle de la MADA peut être décrit par les équations d'état suivantes dans le repère synchronisé dont l'axe d est aligné avec le vecteur du flux statorique ($\phi_{sd} = \phi_s$) et $\phi_{sq} = 0$

En négligeant les résistances des phases du stator, la tension statorique s'exprimera par :

$$V_{sd} = 0 \quad \text{et} \quad V_s = 0 \cong \omega_s * \phi_s$$

Nous obtenons un contrôle de puissance découplé, où la composante transversale i_{rq} du courant rotorique contrôle la puissance active. La puissance réactive est imposée par la composante directe i_{rd} comme le montre la figure :

$$P_s = -V_s * \frac{Lm}{Ls} * i_{rq} \tag{IV.5.}$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s * L_s} - V_s * \frac{Lm}{Ls} * i_{rd} \tag{IV.6.}$$

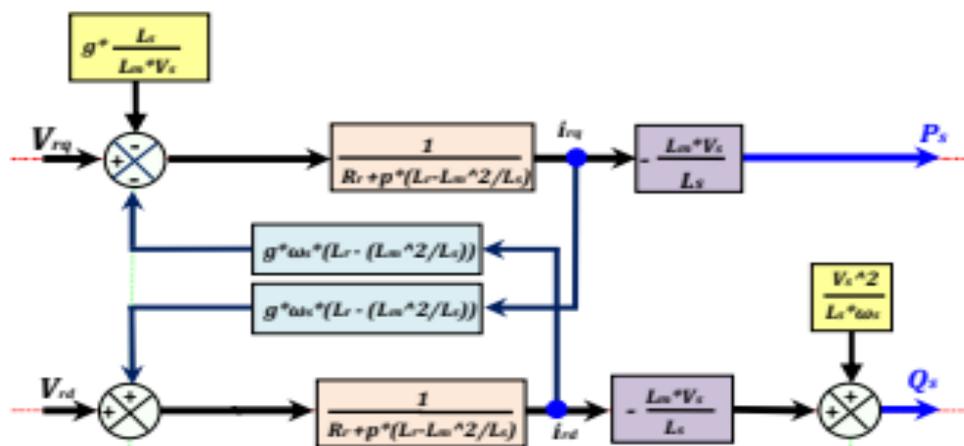


Figure IV.4 : Modèle simplifié de la génératrice à double alimentation (GADA).

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV.10. Résultats de simulation :

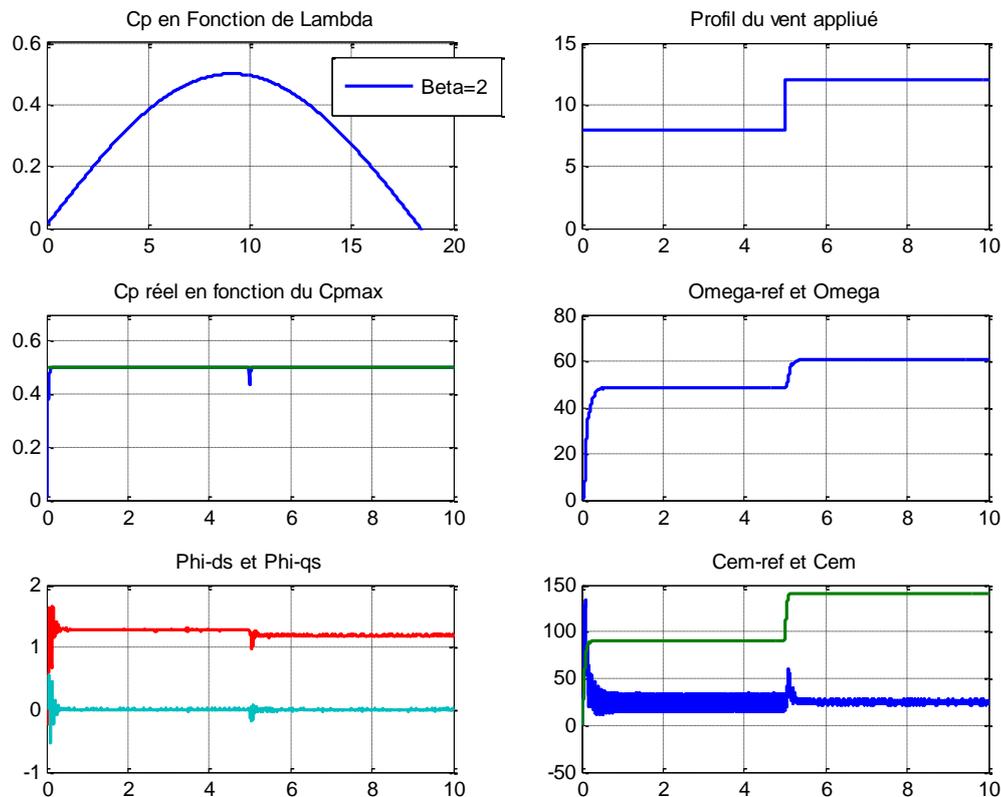


Figure IV.5 : Résultats de simulation de la turbine avec MADA commandée en DPC.

IV.11. Interprétation des résultats :

Cette figure présente la performance et le contrôle, en mettant en avant la relation entre la vitesse du vent, la performance du système, et les réponses mécaniques et électriques.

On observe que ce pouvoir est actif car il a une connaissance générale du bloc MPPT avec une dynamique très rapide et des harmoniques par rapport au DPC-C.

Les résultats obtenus de l'analyse spectrale des courants de la stratégie DPC-montrent un système de contrôle robuste, capable de s'adapter aux variations brusques de la vitesse du vent, même s'il y a des transitoires notables dans la réponse mécanique et électrique. Le système ajuste la vitesse mécanique, le couple et les flux électriques pour maximiser le coefficient de performance (C_p), tout en suivant une référence de contrôle définie. Bien que des perturbations se produisent immédiatement après chaque variation de la vitesse du vent, le système parvient à se stabiliser rapidement, illustrant une bonne réactivité et robustesse face aux conditions changeantes.

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV.12. Amélioration de la DPC par la modulation vectorielle (SVM) :

IV.12.1.introduction :

Dans le domaine de la commande des systèmes de conversion d'énergie, la Commande Directe de Puissance (DPC) a démontré son efficacité en régulant directement les puissances active et réactive des génératrices asynchrones à double alimentation (GADA). Cependant, malgré ses nombreux avantages, la DPC présente certaines limitations, notamment en termes de qualité de l'alimentation et de dynamique de réponse, dues à la présence d'ondulations et de variations abruptes dans les signaux de commande.

Pour pallier ces inconvénients, l'intégration de la Modulation Vectorielle (SVM, pour Space Vector Modulation) dans le cadre de la DPC représente une avancée significative. La SVM, qui est une technique de modulation avancée, permet d'améliorer la qualité de la tension délivrée par le convertisseur et de réduire les ondulations du courant. En utilisant la SVM, il est possible de réaliser une meilleure gestion des vecteurs de tension, d'optimiser la performance dynamique et de diminuer les pertes dans le système de conversion.

Ce chapitre explore les synergies entre la DPC et la SVM, en mettant en évidence comment la modulation vectorielle peut affiner la commande directe de puissance. Nous examinerons les principes de fonctionnement de la SVM, ses avantages en termes de réduction des harmonies et d'amélioration de la qualité de l'alimentation, ainsi que l'impact de cette intégration sur les performances globales du système. L'objectif est de démontrer comment la combinaison de ces techniques peut mener à des systèmes de contrôle plus robustes, plus efficaces et mieux adaptés aux exigences modernes des réseaux électriques.

IV.13.1.Principe de la MLI vectorielle SVM :

Un algorithme numérique est utilisé pour moduler la largeur d'impulsion vectorielle, ce qui permet d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur qui génère un vecteur tension de sortie qui se rapproche le plus possible du vecteur tension de référence, le concept de MLI vectorielle implique de projeter le vecteur de tension rotorique souhaité sur les deux vecteurs de tension adjacents, qui correspondent à deux états de commutation du convertisseur côté rotor (Figure IV.6).

En raison de l'existence de trois composantes booléennes dans le vecteur de commande de l'onduleur V_r , chaque composante peut être de niveau 0 ou 1, il y a huit vecteurs de commande différents. En utilisant le modèle simplifié équivalent où chaque bras est représenté par un interrupteur bipolaire, on établit les différentes configurations possibles de l'onduleur.

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

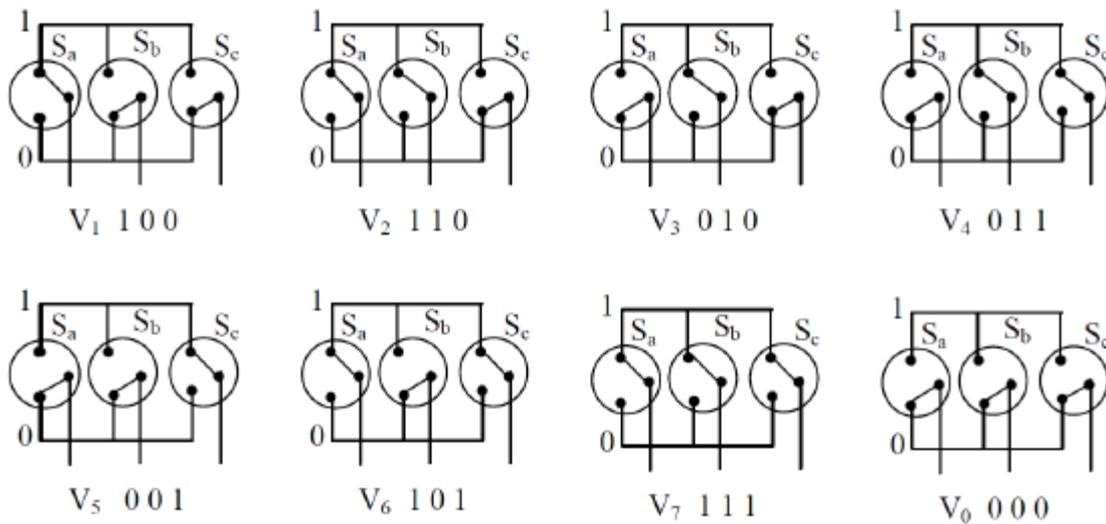


Figure IV.6 : États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension.

Six vecteurs spatiaux non nuls sont définis par les huit états, ce qui limite les six secteurs $Z(i)$ ($i=1,\dots,6$), ainsi que deux états de pause dans le plan (α - β r) (voir figure IV.2). La relation suivante illustre les vecteurs des tensions :

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i=1,\dots,6 \\ 0 & i = 0,7 \end{cases} \quad (IV.7).$$

Ces projections permettent de calculer les temps de commutation souhaités en utilisant deux états de commutation non nuls du convertisseur. Si nous prenons en compte les temps T_i et T_{i+1} , il est nécessaire que leur somme soit inférieure à la période de commutation du convertisseur, T_e . Afin de maintenir une fréquence de commutation stable, on applique un état nul au convertisseur CCM pendant une période supplémentaire à T_e . On calcule globalement et approxime un vecteur de tension de référence V_{r_ref} sur une période de modulation T_e en utilisant un vecteur de tension moyen V_{r_moy} . Ce dernier est obtenu en utilisant les vecteurs de tension adjacents ainsi que les vecteurs nuls V_0 et V_7 . Le diagramme présente les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs.

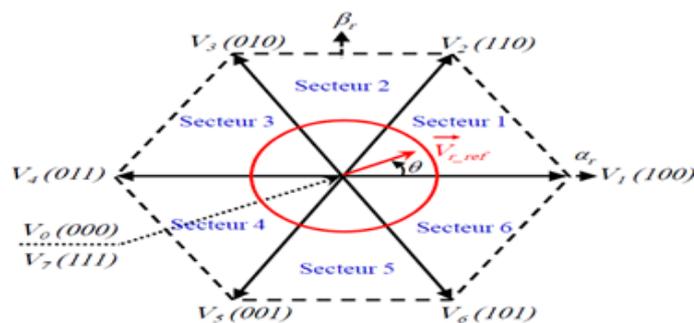


Figure IV.7 : Représentation des vecteurs de tension dans le repère (α - β)

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

Le cas où le vecteur référence est situé dans le secteur 1 est illustré dans la figure (IV.8) où V1 et V2 sont les vecteurs adjacents. La SVM, également appelée MLI vectorielle, implique de projeter le vecteur de tension rotorique de référence souhaité sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondants V1 et V2. Si nous considérons les temps d'application de ces vecteurs comme T1 et T2, tandis que T0 correspond au temps d'application des vecteurs nuls, il est nécessaire que leur somme soit inférieure à la période de commutation du CCM.

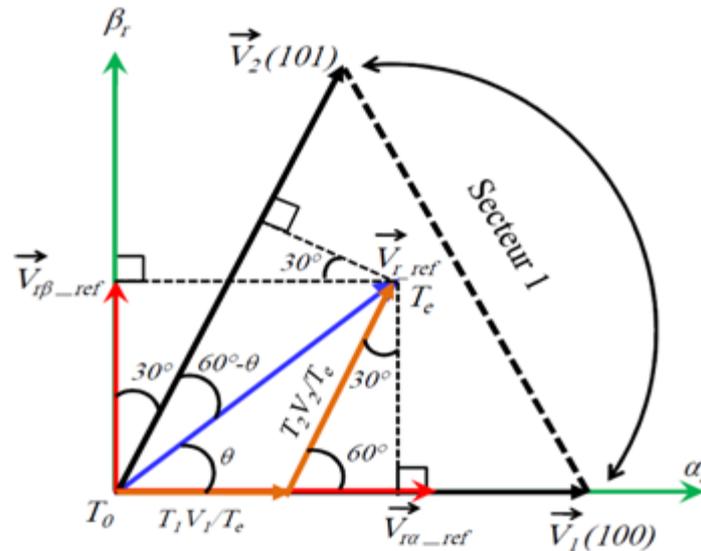


Figure IV.8 : Décomposition d'un vecteur de tension de référence V_{r_ref} .

Dans le cas du secteur 1 (Figure IV.3), le vecteur de tension référence moyen est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{r_ref} T_e = T_0 V_0 + T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_e = T_0 + T_1 + T_2 \end{cases} \quad (IV.8).$$

Où Le terme

"Te" : désigne la période de transition ;

T1 : Durée de mise en œuvre du vecteur V1 ;

T2 : Durée de mise en œuvre du V2 ;

T0 : Délai de mise en œuvre de la séquence de roue libre.

Lorsque le vecteur V_{r_ref} est initialement coïncidé avec le vecteur V1, deux séquences sont actives. On applique la séquence correspondant au vecteur V1 pendant la durée T1 et on applique la séquence de roue-libre pendant la durée T0. Lorsque la durée T2 est nulle, la séquence correspondant au vecteur V2 est inactive. À mesure que le vecteur V_{r_ref} se déplace depuis le vecteur V1 vers le vecteur V2, T1 diminue tandis que T2 augmente. Lorsque le vecteur V_{r_ref} s'approche du vecteur V2, T1 sera nul et T2 sera au maximum..

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV.13.2. Les étapes de la réalisation d'une MLI vectorielle (SVM) :

IV.13.2.1. Détermination de vectrices tensions de références :

En utilisant le modèle de l'onduleur à deux niveaux (équation II.41, chapitre II), il est possible de déterminer les tensions entre les bornes des enroulements de la machine. La transformation directe de Concordia (voir annexe B) sera utilisée pour obtenir ces tensions dans le repère (α - β), ce qui, pour les huit vecteurs de commutation du CCM, donnera les résultats du tableau (IV.1).

Tableau IV. 7: Calcul des Tensions rotorique

S_a	S_b	S_c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ra}	$V_{r\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	0
1	1	0	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{2U_{DC}}{3}$	$-\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{U_{DC}}{3}$	$-\frac{2U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{3}$	$\frac{U_{DC}}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

IV.14.2.2. Détermination des secteurs :

Le secteur est calculé en fonction de la position du vecteur V_{r_ref} dans le plan complexe (α - β), telle que cette position représente la phase θ du vecteur suivante :

$$\theta = \arctan \left(\frac{V_{ref(\beta)}}{V_{ref(\alpha)}} \right) \quad (IV.9).$$

Le tableau (IV.2) détermine le secteur $Z(i)$ avec ($i=1, \dots, 6$) pour les différentes angles θ :

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

Tableau IV.8 : Identification du secteur

θ	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi$	$\pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi$
Z(i)	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5	Secteur 6

IV.14.3. Calcul des temps de commutation :

On sélectionne l'ordre dans lequel les configurations correspondantes aux vecteurs V_i et V_{i+1} ainsi qu'au vecteur V_0 ou V_7 sont mises en place pendant la période de modulation afin que tous les interrupteurs d'un même demi-pont aient un état identique au centre et aux deux extrémités de la période, et que l'état des interrupteurs soit symétrique par rapport au milieu de la période de modulation (voir figure IV.4). (K_0 est un coefficient allant de 0 à 1).

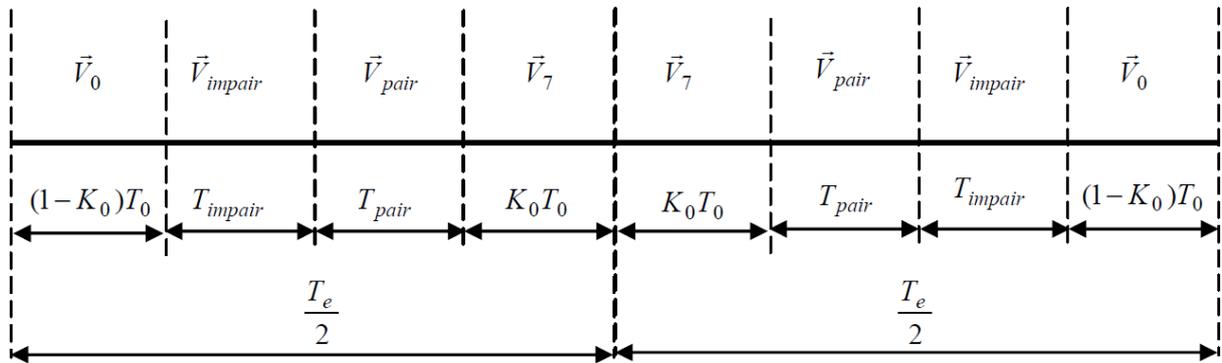


Figure IV.9 : Séquence d'application des vecteurs sur une période T_e .

Les trois rapports cycliques nécessaires sont donnés par :

$$\begin{cases} t_{a\ on} = (T_e - (T_i + T_{i+1})) / 2 \\ t_{b\ on} = t_{a\ on} + T_i \\ t_{c\ on} = t_{b\ on} + T_{i+1} \end{cases} \quad (IV.10).$$

Dans la figure IV.3, les temps d'application des vecteurs pour chaque secteur sont donnés par les relations trigonométriques suivantes : [7].

$$\begin{cases} T_i = \frac{3T_e|V_{ref}|}{2U_{DC}} \left(\cos(\theta - \theta_i) - \frac{\sin(\theta - \theta_i)}{\sqrt{3}} \right) \\ T_{i+1} = \frac{3T_e|V_{ref}|}{U_{DC}} \frac{\sin(\theta - \theta_i)}{\sqrt{3}} \\ T_0 = t_{c\ on} = t_{b\ on} + T_{i+1} \end{cases} \quad (IV.11).$$

$$\theta_i = i \frac{\pi}{3} \quad (IV.12).$$

Dans cette section, nous allons effectuer le calcul des temps de commutation des interrupteurs dans le secteur 1 de l'hexagone des tensions (figure IV.3). Il est possible d'obtenir le temps de commutation des interrupteurs dans chacun des six secteurs de

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

l'hexagone en effectuant un calcul similaire pour chaque secteur. L'ordre des successions des configurations correspondant aux vecteurs V_i et V_{i+1} , ainsi qu'aux vecteurs V_0 et V_7 , est indiqué dans le tableau C.1 de l'annexe D pendant la période de modulation T_e .

$$t_{a\ on} = \frac{T_0}{4} t_{a\ off} = \frac{3T_0}{4} + T_1 + T_2 \quad (IV.13).$$

$$t_{b\ on} = \frac{T_0}{4} t_{b\ off} = \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + T_2 \quad (IV.14).$$

$$t_{c\ on} = \frac{T_0}{4} + \frac{T_1}{2} t_{c\ off} = \frac{3T_0}{4} + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} \quad (IV.15).$$

L'état de chaque interrupteur peut être déterminé par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \text{Si } t_{a\ on} \leq t \leq t_{a\ off}, \text{ alors } S_a = 1, \text{ sinon } S_a = 0 \\ \text{Si } t_{b\ on} \leq t \leq t_{b\ off}, \text{ alors } S_b = 1, \text{ sinon } S_b = 0 \\ \text{Si } t_{c\ on} \leq t \leq t_{c\ off}, \text{ alors } S_c = 1, \text{ sinon } S_c = 0 \end{cases}$$

III.15.DPC-SVM de la MADA :

On reprend les expressions des puissances statoriques (équation II.29 chapitre II) :

$$\begin{cases} P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (IV.16).$$

En alignant le flux statorique Φ_s avec l'axe « d » du repère de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \Rightarrow \Phi_s = \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 \Rightarrow 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (IV.17).$$

Par la suite, on tire les expressions des courants statoriques en fonction des courants rotorique comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (IV.18).$$

A partir des équations du flux (IV.9), les expressions des tensions statoriques (II.24) du chapitre II deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s * \Phi_s \end{cases} \quad (IV.19).$$

En remplaçant les expressions (IV.10) et (IV.11) dans (IV.8), les expressions des puissances statorique en fonction des courants rotorique s'écrivent comme suit :

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} + \frac{V_s^2}{L_s M S} \end{cases} \quad (\text{IV.20}).$$

De même :

$$\begin{cases} P_s^* = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr}^* \\ Q_s^* = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr}^* + \frac{V_s^2}{L_s M S} \end{cases} \quad (\text{IV.21}).$$

Enfin :

$$\begin{cases} i_{qr}^* - i_{qr} = (P_s^* - P_s) \frac{-L_s}{V_{SM}} \\ i_{dr}^* - i_{dr} = (Q_s^* - Q_s) \end{cases} \quad (\text{IV.22}).$$

Afin d'obtenir les tensions de référence V_{dr}^* et V_{qr}^* , on reprend les équations (II.25) et (II.26) du chapitre II comme suit :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r (\sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s}) \end{cases} \quad (\text{IV.23}).$$

Avec :

$$\omega_r = (\omega_s - \omega), \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\text{IV.24}).$$

IV.15.1. Boucles internes de régulation des courants rotorique :

Les termes de couplage entre les deux axes d et q sont présents dans le système (IV.15). En conséquence, il est impossible d'utiliser directement les régulateurs traditionnels linéaires. Toutefois, une méthode de linéarisation est utilisée, qui consiste à ramener les courants du même axe sur le même côté de l'équation de la manière suivante [1].

$$\begin{cases} R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} = V_{dr} + \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} = V_{qr} - \omega_r (\sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s}) \end{cases} \quad (\text{IV.25}).$$

Les régulateurs linéaires sont utilisés pour contrôler les courants comme le montre la figure (IV.6), dans cette dernière on donne :

$$\begin{cases} \sigma_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r S i_{dr} \\ \sigma_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r S i_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.26}).$$

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

On obtient par la suite un système d'équations linéaires dont les tensions rotorique directes et inverses sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{dr}^* = \sigma_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr}^* = \sigma_{qr} + \omega_r \left(\sigma L_r i_{dr} + \frac{M \phi_{ds}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (IV.27).$$

La mise en place d'une boucle interne du courant revêt une importance capitale pour assurer la protection de la MADA. Grâce à une saturation facilement insérée, elle permet de restreindre les courants rotoriques, comme illustré dans la figure (IV.5). [1]

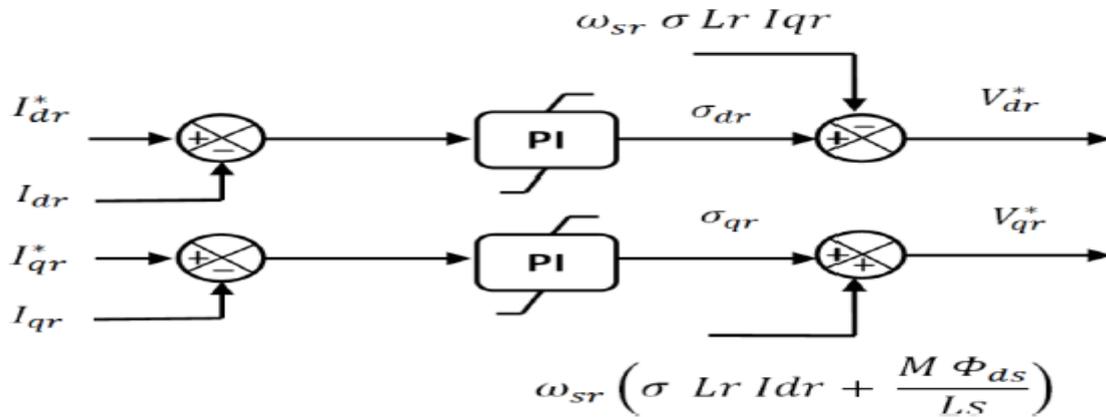


Figure IV.0.10 : Boucle de régulation des courants [1]

La boucle de régulation du courant i_{dr} à partir de l'équation (IV.16) est la suivante :

$$V_{dr}^* = R_r i_{dr} + \sigma L_r p i_{dr} = (R_r + \sigma L_r S) i_{dr} \quad (IV.28).$$

$$V_{dr}^* = (k_{dp} V_{dr}^* = (k_{dp} + \frac{k_{di}}{s})(i_{dr}^* - i_{dr}) \quad (IV.29).$$

$$(R_r + \sigma L_r P) i_{dr} = (K_{dp} + \frac{K_{di}}{s}) i_{dr}^* - (K_{dp} + \frac{K_{di}}{s}) i_{dr} \quad (IV.30).$$

Les fonctions de transfert entre les courants rotorique de référence et les courants mesurés sont données par : [1]

$$\frac{i_{dr}}{i_{dr}^*} = \frac{PK_{dp} + K_{di}}{P^2 \sigma L_r + P(R_r + K_{dp}) + K_{di}} \quad (IV.31).$$

$$\frac{i_{qr}}{i_{qr}^*} = \frac{PK_{dp} + K_{di}}{P^2 \sigma L_r + P(R_r + K_{dp}) + K_{di}} \quad (IV.32).$$

Par analogie avec la forme générale d'une fonction de transfert du deuxième ordre on trouve :

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

$$\begin{cases} K_{dp} = 2\xi\omega_n \sigma Lr - Rr \\ K_{di} = \omega_n \sigma Lr \end{cases} \quad (IV.33).$$

Une fois que nous avons obtenu les tensions V_{dr}^* et V_{qr}^* , nous utilisons la transformée de Park inverse, puis la transformée de Concordia, afin d'obtenir $V_{r\alpha}^*$ et $V_{r\beta}^*$, qui seront les entrées de la SVM.

On peut observer le schéma global de commande DPC-SVM appliqué sur le convertisseur côté machine (rotor) dans la figure.

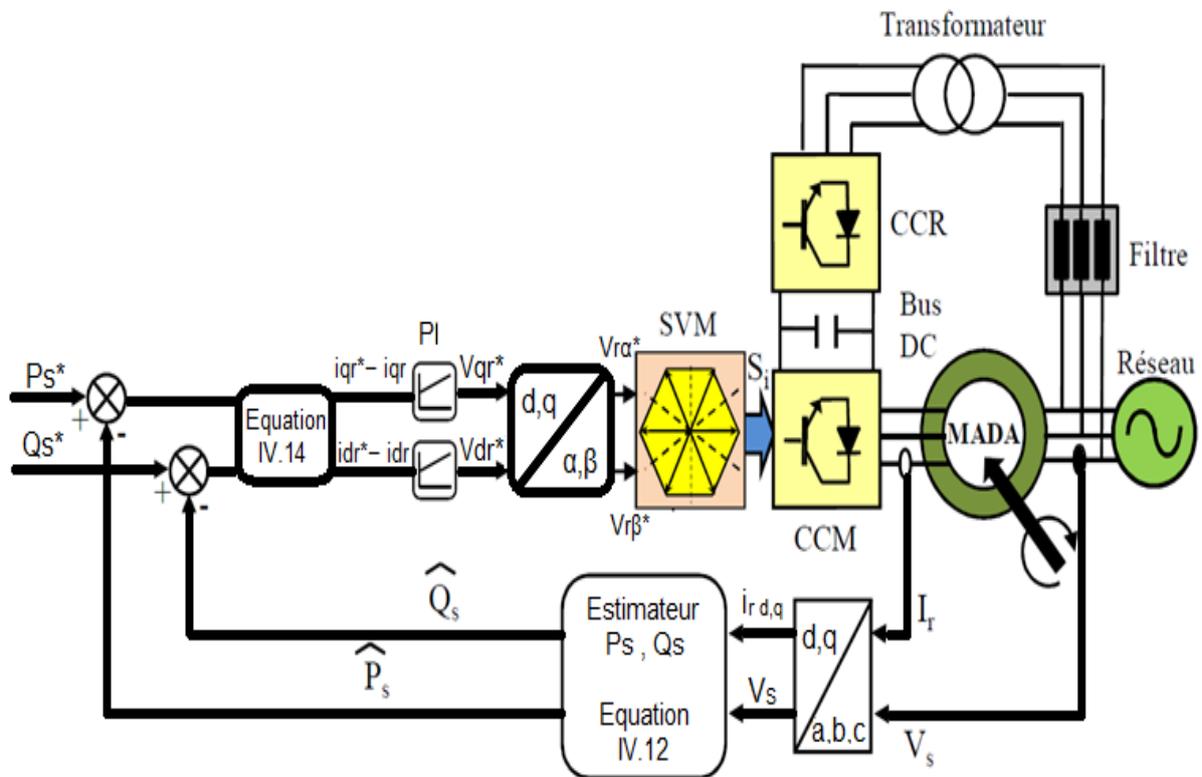


Figure IV.11 : Schéma bloc de la structure de contrôle DPC-SVM appliquée à la MADA.

IV.16. Résultats de simulation :

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

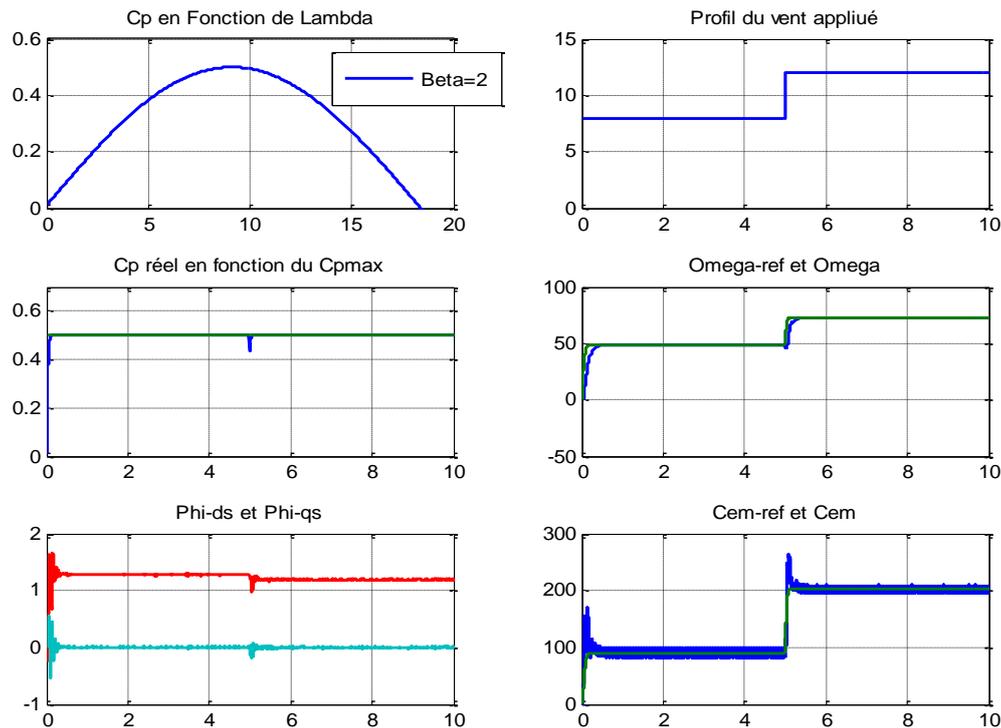


Figure IV. 12 : Résultats de simulation de la turbine avec MADA commandée intelligemment (MPPT) en DPC.

IV.17. Interprétations des résultats :

Ces résultats montrent que la DPC-SVM garantit une meilleure qualité de la forme d'onde du courant rotorique, dont le taux de distorsion harmonique

Ces Les résultats de la simulation montrent les performances élevées du développement DPC-SVM. Les objectifs, pour éviter la minimisation des pulsations de puissances et des harmoniques de cours présenté par la commande DPC-C. Exposé les résultats obtenus de l'analyse spectrale des courants de la stratégie DPC-montre un système de contrôle robuste, capable de s'adapter aux variations brusques de la vitesse du vent, même s'il y a des transitoires notables dans la réponse mécanique et électrique. Le système ajuste la vitesse mécanique, le couple et les flux électriques pour maximiser le coefficient de performance (C_p), tout en suivant une référence de contrôle définie. Bien que des perturbations se produisent immédiatement après chaque variation de la vitesse du vent, le système parvient à se stabiliser rapidement, illustrant une bonne réactivité et robustesse face aux conditions changeantes.

Chapitre IV : La commande directe (DPC) et la commande vectorielle (SVM) de la MADA

IV.18. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons démontré l'impact de la loi de contrôle de la DPC sur la distinction entre la puissance active et la puissance réactive du MADA. La structure simple du DPC classique (DPC-C) permet d'obtenir des performances dynamiques élevées. Son objectif est de résoudre de manière concrète les problèmes de solidité et de dynamique rencontrés dans la configuration de commande vectorielle.

Pour établir la fréquence de commutation des interrupteurs du convertisseur côté MADA « CCM » et diminuer les fluctuations des puissances et les harmoniques des courants transmis par la MADA au réseau électrique, on a utilisé la technique MLI vectorielle (SVM) en collaboration avec la DPC. Suite aux résultats des simulations, il a été constaté que le DPC-SVM propose une solution en évitant les désavantages classiques du DPC (DPC-C).

Ainsi, cette stratégie de contrôle a atteint son objectif commun, à savoir : collecter les courants sinusoïdaux, tout en diminuant le taux harmonique et en assurant un facteur de puissance unitaire avec un contrôle séparé des puissances active et réactive. Finalement, il est possible de conclure que cette méthode (DPC-SVM) a considérablement amélioré les performances.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Notre étude visait à examiner le contrôle direct de puissance (DPC) utilisé pour un générateur à double alimentation relié à une turbine éolienne, dans le but d'optimiser les performances et d'obtenir la puissance maximale disponible.

Les concepts fondamentaux et les généralités sur les systèmes éoliens ont été étudiés dans la première partie de ce mémoire, ainsi que les différentes configurations possibles de ces systèmes. Nous avons exposé en détail le fonctionnement et le processus des turbines éoliennes afin de poser les fondations de notre étude.

Au cours du chapitre suivant, nous avons réalisé une simulation de la turbine éolienne, en allant de la conversion de l'énergie éolienne à la modélisation du multiplicateur. Il a été observé que les éoliennes à marche lente sont équipées de nombreuses pales, allant de 20 à 40, et que leur inertie élevée nécessite généralement une réduction du diamètre à environ 8 mètres. Lorsque la vitesse augmente, leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale, mais diminue aussi rapidement par la suite. En ce qui concerne les éoliennes à marche rapide, elles sont beaucoup plus courantes et presque toutes sont destinées à la production d'électricité. En général, elles sont équipées d'une à trois pales, qui peuvent être fixes ou orientables afin de réguler la vitesse de rotation.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une étude ainsi que la modélisation et la simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), qui offre des avantages notables pour le fonctionnement à vitesse variable, par rapport aux autres structures de conversion éolienne utilisant des machines électriques.

La commande vectorielle appliquée à la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) a été examinée dans le quatrième chapitre. Nous avons examiné la commande directe et la méthode du flux orienté, qui est largement utilisée dans le contrôle de la GADA.

Références bibliographié :

[1] BACHIRI Nariman et AINANA Achouak « Simulation de Dispatching Combiné Economique Environnemental (CEED) en Présence d'une Source à Energie Renouvelable (SER) », MÉMOIRE master en Énergies Renouvelables, CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA, 24/06/2020.

[2] NAIDJA Meriem « MODELISATION NUMERIQUE 3D DE L'ECOULEMENT AUTOUR D'UN ROTOR D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL», mémoire MASTER En Génie Mécanique, université Mohamed Boudiaf Msila, 2021 / 2022.

[3] Boubekeur Asmaa et Boukourdane Randa « ETUDE ET MODELISATION D'UNE CHAINE EOLIENNE A BASE D'UNE MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANANTS (MSAP) », MÉMOIRE Master, CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA, 09/06/2020.

[4] Frédéric POITIERS « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE »Thèse de Doctorat Electronique et Génie Electrique, l'Université de Nantes, 19 décembre 2003.

[5] Abdelkarim CHEMIDI et Analyse, « modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, 2014/2015.

[6] OBEID Mohammed Amin et OBEID Houari et CHADLI Soumia, « Étude et modélisation d'une MADA pour une application dans un système de conversion d'énergie éolienne», mémoire master, CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA, institue des sciences et technologies, 16/06/2021.

[7] Ziraoui Salah Eddine «Modélisation et étude d'un système d'énergie Éolienne relié au réseau», Mémoire master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2017.

[8] A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse Doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

Références Bibliographié

- [9] FOUNDI Youcef et SALEMI Mohammed «Simulation et étude d'une commande directe de puissance (DPC) de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée dans un système éolien», mémoire master en commande électrique, Université Ahmed Draïa Adrar, 2022/2023.
- [10] Dr. BENAMARA Nabil «L'Energie Eolienne», mémoire master 2 énergie recevables, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes, 2021/2022.
- [11] Abdelkarim CHEMIDI« Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme», thèses de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, 2014/2015.
- [12] Mr. RACHED Bouchaib, « CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION DSP IN THE LOOP DES ALGORITHMES DE COMMANDE AVANCÉE D'UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE ÉOLIEN À BASE D'UNE GADA CONNECTÉ AU RÉSEAU», Thèse de Doctorat, Automatique, Électrotechnique et Électronique, UNIVERSITÉ HASSAN 1er SETTAT maroc , 13/01/2022.
- [13] N. R. Babu and P. Arulmozhivarman, «“Wind Energy Conversion Systems - a Technical Review», vol. 8, no. 4, pp. 493–507, 2013
- [14] Brice Beltran, «Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation: Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur», Université de Bretagne occidentale - Brest, Jul, 2010.
- [15] A. Gaillard, «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service», ” Université Henri Poincaré - Nancy 1, Apr,2010.
- [16] Khelfat Lotfi, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée», MEMOIRE DE MASTER, Electrotechnique Option : Electronique de Puissance, université BADJI MOKHTAR_ANNABA/juin 2017.
- [17] M. M. A. HAMZA, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation apport des techniques de l'intelligence artificielle», thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2010.
- [18] Salma EL AIMANI «MODELISATION DE DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'EOLIENNES INTEGREES DANS UN RESEAU DE MOYENNE TENSION», thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE, 06/12/2004.

Références Bibliographié

- [19] Brice Beltran, «Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur», Université de Bretagne occidentale - Brest, Jul, 2010.
- [20] Mohamed BOUAMRANE, «Commande DPC d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Application à L'énergie Éolienne», Mémoire de master 02 Electrotechnique, École nationale Polytechnique/2019.
- [21] M. M. A. HAMZA, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation apport des techniques de l'intelligence artificielle,», thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2010.
- [22] R. Abdessemed, M. Kadjouj, « Modélisation des Machines Electriques », Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [23] N. Hamadi, « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à aimant permanent », thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algerie, 2013.
- [24] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [25] E. Tremblay, « Contribution à la commande de l'éolienne a MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique », M. ING, ETS (QC), Montréal, Canada, Janvier 2009.
- [26] G. Abdenour, G. Said, «Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA », Mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2017.
- [27] Y. IBRAHIM, « Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabse Sidi bel-abbés, Algérie, novembre 2019.
- [28] B. Ali, H. Abdel Moumene, S. yahya Naji, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à double alimentation (MADA)», Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.

Références Bibliographié

[29] Mr. R. Hachelaf, « Modélisation et Identification d'une génératrice asynchrone (GADA) », mémoire de master machine électrique, université Saad dahlab blida , 2017/2018.

[30] ZERAOULIA SABIR « ETUDE ET SIMULATION D'UNE INSTALATION EOLIENNE A BASE D'UNE GADA », mémoire master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2021.

[31] Tarek Masaud << MODELING, ANALYSIS, CONTROL AND DESIGN APPLICATION GUIDELINES OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR (DFIG) FOR WIND POWER APPLICATIONS >> mémoire de doctorat De partment of Electrical Engineering & Computer Science, Golden, Colorado.