

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique



Université ABDERRAHMANE. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme :

Master en Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème:

**AMÉLIORATION DES PERFORMANCES D'UN SYSTÈME
ÉOLIEN CONNECTÉ AU RÉSEAU**

Présenté par :

Mr. SOLTANA Smail

Mr. LOUBAR Amine

Encadré par :

Pr. Mme S. BELAID

Année universitaire 2021-2022

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Dieu avant tout, car c'est lui qui nous a donné force, patience et volonté pendant toutes ces années.

Au début, nous tenons à remercier notre promotrice

Pr Mme S. BELAID, pour son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifestée.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, à travers ce mémoire nous remercions tous les enseignants du Département génie électrique qui ont contribué à notre formation.

Smail, Amine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon support de vie ; mes très chers parents qui ont sacrifié toutes leurs forces pour assurer ma réussite et qui m'ont soutenu durant toutes mes études, en particulier, pour leur soutien moral.

À mes deux sœurs

À mon petit frère Adem

À ma fiancée Mlle Amira qui

m'a aidé et soutenu pendant

tout le long de ce travail.

À mes deux oncles

Kader et Aissa

À mon binôme Amine.

Smail SOLTANA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mon père et à ma mère qui ont sacrifié
toute leur vie à m'offrir des conditions
d'études exemplaire, et qui ont veillé
sur moi et m'encourager dans tout ce que j'ai
entrepris.*

*Avec toute ma gratitude pour toutes ces
années de sacrifices et encouragement.*

A mes sœurs,

*A mon cher ami d'enfance Oussama,
A mon binôme Smail qui a su me supporter.*

Amine Loubar.

Sommaire

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I	
I.1 Introduction	4
I.2 Le vent.....	4
I.3 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	4
I.4 L'énergie électrique éolienne	5
I.4.1 Impact sur l'environnement	5
I.5 Présentation des éoliennes.....	6
I.5.1 Éoliennes à axe vertical.....	7
I.5.2 Éoliennes à axe horizontal.....	7
I.5.3 Avantages et inconvénients de chaque type de turbine.....	8
I.6 Caractéristiques technologiques des éoliennes	9
I.6.1 Mât	9
I.6.2 Nacelle.....	10
I.6.3 Rotor.....	10
I.6.4 Moyeu.....	10
I.6.5 Pales	11
I.7 Principe de fonctionnement.....	11
I.7.1 Fonctionnement à vitesse fixe	11
I.7.2 Fonctionnement à vitesse variable	11
I.8 Les différents systèmes de conversion d'énergie éolienne	12
I.8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone	12
I.8.2 Machine synchrone	13

I.8.3	Structure retenue pour notre étude	14
I.9	Conclusion.....	14
Chapitre II	16
II.1	Introduction	16
II.2	Modélisation de la chaine de conversion éolienne étudiée	16
II.2.1	Modélisation de la vitesse de vent.....	16
II.2.2	Formule de Betz	17
II.2.3	Modélisation de la turbine éolienne	18
II.2.4	Modélisation du générateur synchrone à aimant permanent	20
II.3	Modélisation de convertisseur statique côté machine (redresseur)	24
II.4	Modélisation de bus continu	26
II.5	Modélisation du convertisseur statique côté réseau (onduleur)	27
II.6	Modélisation du filtre	27
II.7	Modélisation du réseau électrique.....	28
II.8	Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	28
II.8.1	Méthode de recherche du point maximum de puissance.....	29
II.8.2	Contrôle MPPT sans asservissement de vitesse.....	30
II.9	Conclusion.....	31
Chapitre III	32
III.1	Introduction	32
III.2	Commande vectorielle.....	32
III.2.1	Commande vectorielle à MLI	32
III.2.2	Principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent ..	33
III.3	Principe de la commande DPC.....	36
III.3.1	Calcul de la position angulaire (θ_n) :	37
III.4	Étude d'une DPC classique avec une table à six secteurs (DPC6)	37
III.4.1	Description du système	37
III.4.2	Régulation de la tension continue	38

III.4.3	Table de commutation	38
III.5	Simulation numérique	39
III.5.1	Résultats de simulation sur la DPC à six secteurs (DPC6)	39
III.6	Étude d'une DPC classique avec une table à douze secteurs (DPC12)	52
III.6.1	Description du système	52
III.6.2	Table de commutation	52
III.6.3	: Résultats de simulation sur la DPC à 12 secteurs (DPC12).....	54
III.7	Étude comparative	60
III.8	Conclusion.....	60
Chapitre IV	61
IV.1	Introduction	61
IV.2	Application de la logique floue dans la technique DPC.....	61
IV.3	Variables floues et fonctions d'appartenances.....	62
IV.3.1	Table de commutation floue.....	64
IV.4	Résultat de simulation	65
IV.5	Etude comparative	67
IV.6	Conclusion.....	67
Conclusion Générale	69

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Evolution de la puissance du parc éolien mondial.	05
Figure I.2	Eolienne à axe vertical.	07
Figure I.3	Eolienne à axe horizontal	08
Figure I.4	Constitution d'une éolienne.	09
Figure I.5	Eolienne à Vitesse fixe.	11
Figure I.6	Aérogénérateur à vitesse variable.	12
Figure I.7	Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable	13
Figure I.8	système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.	13
Figure I.9	Structure du système éolienne retenue pour notre étude	14

Chapitre II

Figure II.1	Système éolien basé sur la MSAP connectée au réseau.	16
Figure II.2	Tube de courant autour d'une éolienne.	17
Figure II.3	Entrées–sorties du modèle de la voile éolienne.	18
Figure II.4	Courbe caractéristique de la turbine éolienne $C_p(\lambda)$.	18
Figure II.5	Modèle dynamique de l'éolienne.	19
Figure II.6	Schéma représentatif de la MSAP à modéliser.	21
Figure II.7	Transformation triphasée- diphasée.	23
Figure II.8	Schéma de principe du convertisseur statique coté machine.	25
Figure II.9	Schéma équivalent pour le circuit bus continu.	26
Figure II.10	Circuit de l'onduleur relié au réseau électrique.	27
Figure II.11	Schema électrique du filter.	27
Figure II.12	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.	29
Figure II.13	Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.	30
Figure II.14	Schémas bloc de la turbine éolienne avec la commande MPPT.	32

Chapitre III

Figure III.1	Commande vectorielle de la MSAP.	33
---------------------	----------------------------------	----

Figure III.2	Schema du couplage.	34
Figure III.3	Découplage par compensation et régulation	35
Figure III.4	Configuration globale de la commande PDC classique	36
Figure III.5	Principe des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.	37
Figure III.6	Régulation de la tension continue.	38
Figure III.7	Profil de la vitesse du vent normal pour la DPC (6)	39
Figure III.8	Evolution de la vitesse mécanique pour la DPC (6)	40
Figure III.9	Evolution de la puissance turbine éolienne pour la DPC(6)	40
FigureIII.10	Evolution du couple électromagnétique pour la DPC (6)	41
FigureIII.11	Allure courant iq pour la DPC à (6)	41
FigureIII.12	Allure courant id pour la DPC (6).	42
FigureIII.13	Evolution de la puissance active (P) de la DPC (6).	42
FigureIII.14	Evolution de la puissance réactive (Q) de la DPC (6).	43
FigureIII.15	Allure de la tension du bus continue Vdc de la DPC (6).	43
FigureIII.16	Evolution des courants injectés i (a,b,c) au réseau et (b) leur zoom	44
FigureIII.17	Allure du courant ira avec l'analyse THD de la DPC (6) .	45
FigureIII.18	Profil de la vitesse du vent variable de la DPC (6).	46
FigureIII.19	Evolution de la vitesse mécanique pour des vitesses variable du vent de la DPC (6).	46
FigureIII.20	Evolution de la puissance éolienne pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).	47
Figure III.21	Evolution du couple électromagnétique pour des Vitesses variables du vent de la DPC (6).	47
Figure III.22	Allure courant iq pour des vitesses variables de la DPC (6)	48
Figure III.23	Allure courant id pour des vitesses variables du vents de la DPC (6)	48
Figure III.24	Evolution de la puissance active (P) envoyée au réseau pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).	49
Figure III.25	Évolution de la puissance réactive (Q) envoyée au réseau pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).	49
Figure III.26	Allure de tension du bus continue Vdc de la DPC (6) pour des vitesses variables du vent	50
Figure III.27	Evolution des courants ia,, injectés au réseau et (b) leur Zoom pour des	50-

	vitesse variables du vent de la DPC (6).	51
Figure III.28	Allure du courant ira avec analyse THD de la DPC (6) pour des vitesses variables du vent .	51
Figure III.29	Plan (α , β) divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension	53
Figure III.30	Allure de la puissance active (P)de la DPC (12)	53
Figure III.31	Allure de la puissance réactive (Q) de la DPC (12)	54
Figure III.32	Allure de tension du bus continu Vdc de la DPC (12)	54
Figure III.33	(a) Allure des courants $i_{a,}$, injectés au réseau et (b) leur zoom de la DPC (12)	55
Figure III.34	Allure du courant ira avec l'analyse de le THD	56
Figure III.35	Évolution de la puissance active (P)de la DPC (12)pour des vents variables	56
Figure III.36	Evolution de la puissance réactive(Q) de la DPC (12) pour des vents variables	57
Figure III.37	Allure et de tension de bus continu Vdc de la DPC à 12 secteurs des vents variables	57
Figure III.38	(a) Evolutionnds courants i(a,b,c) injectés au réseau et (b) leur zoom de la DPC (12) à vent variable	58
Figure III.39	Allure du courant Ia et la tension Vra du réseau de la DPC (12) à vent variable	59
Figure III.40	Allure du courant ira avec l'analyse de le THD de la DPC (12).	59

ChapitreIV

FigureIV.1	Variables d'entrées et de sortie d'une table de commutation floue.	61
FigureIV.2	Configuration globale de la commande DPC avec sélection floue	62
FigureIV.3	Fonctions d'appartenances pour les erreurs des puissances actives Δp .	62
FigureIV.4	Fonctions d'appartenances pour les erreurs des puissances réactives Δq	63
FigureIV.5	Fonctions d'appartenances pour la position du vecteur θ .	63
FigureIV.6	Fonctions d'appartenances pour la variable de sortie V_i .	64
FigureIV.7	Evolution de la puissance active Pres de la DPC floue.	65
FigureIV.8	Evolution de la puissance réactive Qesde la DPC floue.	66

FigureIV.9	Allure de la tension Vdcde la DPC floue.	66
FigureIV.10	Allure du courant ira avec l'analyse de le THD de la DPC floue.	67

Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et vertical.	8 -9
Tableau (III.1)	Table de commutation de la DPC à 6 secteurs.	38
Tableau (III.2)	Table de commutation de la DPC à 12 secteurs.	52
Tableau (III.3)	Taux de distorsions harmoniques obtenus	60
Tableau (IV.1)	Table de commutation floue	64
Tableau (IV.2)	Taux de distorsions harmoniques obtenus.	67

Liste des symboles

m	La masse d'air en mouvement(Kg).
V_v	Vitesse du vent en(m/s).
C_p	Coefficient de puissance.
λ	Vitesse spécifique.
P_{mt}	Puissance mécanique théorique en(Watt).
P_m	Puissance mécanique en(Watt).
P_{eol}	Puissance éolienne en(Watt).
$(C_p)_{opt}$	Coefficient de puissance optimale
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale.
P_{opt}	Puissance optimale récupérée par la turbine en(Watt)
V_{v-opt}	Vitesse du vent optimal en (m/s)
C_{opt}	Couple optimal deμ la turbine éolienne en (N.m)
ρ	Densité volumique du l'air en(Kg/m ³).
β	Angle décalage (degré °)
S	La surface balayée par les pales en(m ²).
R	Rayon d'une pale de la turbine en(m).
Ω_t	La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine en (rad/s). Ct
	Couple de la turbine éolienne en (N.m).
J	Moment inertie ramené sur l'arbre de la génératrice en(Kg.m ²).
C_{mec}	Couple mécanique de la turbine en(N.m).
f	Coefficient de frottement.
P	Nombre de paire de pôles de la génératrice.
$[V]_{abc};[V]_{dq}$	Tensions statoriques de la MSAP dans le repère réel et de park respectivement

$[I]_{abc}; [I]_{dq}$	Courants statoriques de la MSAP dans le repère réel et de park respectivement
$[\varphi]_{abc}; [\varphi]_{dq}$	Flux magnétiques statoriques de la MSAP dans le repère réel et de park respectivement.
R_s	Résistance des phases statoriques en(Ω).
S_p	Erreur de puissance active
S_q	Erreur de puissance réactive
$[L_{ss}]$	Matrice inductance propre et mutuelle statorique.
$[\varphi_f]$	Vecteur du flux créé par les aimants permanents.
M	Inductance magnétisant en(H).
L_s	Inductance propre en(H).
Θ	Position mécanique du rotor.
$[R]_{abc}$	Résistance des enroulements statoriques(Ω).
$L_d; L_q$	Inductance dans l'axe directe et quadratique respectivement en(H).
ω_r	La vitesse de rotation du rotor en(rad/s).
$[e_f]_{abc}$	La force électromotrice produit dans les trois phases en(N).
C_m	Couple mécanique de la machine en(N.m).
C_{em}	Couple électromagnétique en(N.m).
$P(\theta)$	Matrice de park.
$P(\theta)^{-1}$	Matrice inverse de park.
C_r	Couple résistant en(N.m).
Ω_r	Vitesse mécanique du rotor de la GSAP en(rad/s).
V_d	Tension sur l'axe direct
V_q	Tension sur l'axe quadratique
I_d	Courant sur l'axe direct
I_q	Courant sur l'axe quadratique
P_a	Puissance absorbée en(Watt).
$I_d; I_q$	Courant direct et quadratique respectivement en(A).
P_{mec}	Puissance mécanique en(Watt).

S_i	Etats des interrupteurs du convertisseur statique.
$[U]_{abc}$	Tensions composées du convertisseur en (V).
$[V_n]_{abc}$	Tensions simple du convertisseur en(V).
I_{dc}	Courant du bus continu en(A).
I_{ond}	Courant de l'onduleur en(A).
V_{dc}	Tension du bus continu en (V).
C	Capacité du condensateur(F).
$[V_{ond}]_{123}$	Tensions simples de l'onduleur en(V).
L_f	Inductance du filtre en(H).
R_f	Résistance du filtre en(Ω).
i_{abc}	Les courants traversants le filtre(A).
$[V_r]_{abc}$	Tensions du réseau électrique en(V).
I_{d-ref}	Courant direct de référence en(A).
I_{q-ref}	Courant quadratique de référence en(A).
$(V_\alpha, V_\beta; I_\omega, I_\beta)$	Tensions et courants injectes au réseau respectivement.
ΔH	Largeur de la bande hystérésis.
P_{res}	Puissance active injectée au réseau en (Watt).
Q_{res}	Puissance réactive injectée au réseau en(VAr).

Liste des abréviations

DC : Direct courant

AC : Alternatif courant.

f.é.m : force électromagnétique

VAWT : vertical axe wind turbine

HAWT : horizontal axe wind turbine

MPPT : Extraction du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

GSAP : Générateur synchrone à aimants permanents.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion.

THD : taux de distorsion des harmoniques

DPC : Contrôle directe de puissance (Direct Power Control).

PI : Régulateur proportionnel-intégral.

EP : Electronique de puissance.

Introduction générale

L'Augmentation de la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, en raison de la croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive des réserves non renouvelable (les hydrocarbures, l'énergie nucléaire, ...) conduira certainement à l'épuisement total de ces ressources sans compter danger de ce processus sur l'environnement. Afin d'assurer un développement durable, tout en laissant un environnement viable aux générations futures, l'utilisation des énergies renouvelables est cruciale, ce qui a le potentiel de garantir la satisfaction globale.

Dans ce contexte, le recours à d'autres types de ressources d'énergie propre dites renouvelables est donc inévitable et devient plus qu'une nécessité pour le progrès de l'humanité. Ces énergies sont issues du solaire, de la biomasse, de la géothermie, du marémotrice, de l'hydraulique et de l'éolien [1]. Ces énergies renouvelables jouent un rôle important dans la protection de l'environnement.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le bon fonctionnement des aérogénérateurs et leur insertion dans la production électrique [2].

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement augmente l'efficacité énergétique, réduit les charges mécaniques et améliore la qualité de l'énergie électrique produite à partir des commandes robustes. Ces algorithmes permettent de contrôler à tout moment la vitesse de rotation de l'éolienne.

Une éolienne convertit l'énergie du vent en énergie mécanique, ce qui fait tourner la turbine. L'énergie qui s'enroule dans la turbine est le résultat d'une éolienne convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Le système sera ensuite relié à un générateur électrique. Avant d'installer un système éolien pour répondre à un besoin spécifique, il est important de connaître la quantité d'énergie que le système produira en fonction du climat à cet endroit. Le dépôt d'énergie éolienne peut varier selon la saison, le mois, l'année et même le jour, il est donc crucial de tenir compte de tous les types de temps avant d'installer un tel système.

Parmi les différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique. La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple élevé et une inertie très faible. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et une meilleure contrôlabilité, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone [03].

Des commandes assez laborieuses ont été mises au point pour réaliser un contrôle découplé de la machine synchrone, la commande vectorielle à MLI, la commande DPC classique (direct power control) contrôle direct de puissance. Ces stratégies de commande ont fait preuves mais qui n'étaient pas sans inconvénients. De ce fait, beaucoup de recherches ciblent à développer les performances de cette stratégie de commande. Or simultanément, des nouvelles techniques dites intelligentes ont été dévoilées et sont de plus en plus réclamées dans des applications d'entraînement à vitesse variable de moyenne puissance, telle que la théorie de la logique floue.

Notre travail a pour but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique obtenue à partir d'un système éolien connecté au réseau. Il comporte quatre chapitres et une conclusion générale sera suivis.

Dans le premier chapitre, nous présentons brièvement les généralités de l'énergie renouvelable telles que solaire, éolien, biomasse, géothermique, etc. Ensuite un état de l'art sur les systèmes de conversion éolienne. Nous évoquons les différentes technologies éoliennes usuellement utilisées dans le domaine des énergies renouvelables, ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

Le deuxième chapitre nous allons modéliser toute la chaîne de conversion éolienne composé d'une turbine éolienne associée à une génératrice synchrone à aimants permanents (MSAP), connectée au réseau à travers des convertisseurs statiques (onduleur MLI, redresseur MLI), d'un bus continu et d'un filtre RL. Puis on abordera la stratégie de la commande et l'algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance (MPPT).

Le troisième chapitre se déroulera sur deux parties. En premier lieu, nous présenterons la commande vectorielle à MLI ainsi que son principe de fonctionnement général. En seconde lieu nous exposerons la commande DPC classique basée sur une table de commutation qui sera conclue à partir de l'étude des variations des puissances instantanées active et réactive. S'en suivra différentes simulations avec différents paramètres pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (Turbine, redresseur, onduleur, filtres, réseau) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés d'une manière cohérente sur logiciel MATLAB /SIMULINK.

Le chapitre quatre décrira le principe de l'association de la logique floue au concept de contrôle direct de puissance pour l'amélioration des performances de compensation active des harmoniques en utilisant des convertisseurs statiques. La dernière partie de ce chapitre sera consacré pour une étude comparative entre les (DPC) classiques et la floue. Ainsi des résultats de simulation seront présentés.

On terminera notre projet par une conclusion générale récapitulative sur tout le travail et les références bibliographiques utilisées.

CHAPITRE

1

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

La consommation mondiale d'énergie électrique a connu une augmentation énorme ces dernières années. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, font que l'énergie éolienne devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages, l'absence de toute pollution et la disponibilité à grandes quantités en tout point du globe terrestre.

L'énergie éolienne est probablement l'une des sources d'énergie les plus anciennes. Cette énergie propre et renouvelable a toujours existé elle peut être utilisée de multiples façons grâce à la conservation de l'énergie mécanique : le vent sert alors à déplacer des véhicules (voiliers ou yachts de plage), à pomper de l'eau (moulins à Majorque, pomper des éoliennes pour irriguer ou abreuver le bétail) ou à faire tourner les meules des moulins. En transformant en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides, etc...). Soit en produisant de l'électricité. Les éoliennes sont ensuite connectées à des générateurs pour générer du courant continu ou du courant alternatif.

Dans ce Chapitre, nous allons d'abord fournir une description générale des énergies renouvelables, puis divers concepts d'éoliens et différents générateurs éoliens ont été discutés.

I.2 Le vent

Le vent est en fait la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces, à l'origine de mouvements d'air.

Dans un premier temps, il faut savoir que le vent est indissociable du soleil. En effet, c'est grâce à ce dernier que les principaux mouvements d'air peuvent avoir lieu [4]. Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme. Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé, ce qui crée un déplacement des particules de l'air et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner [5].

I.3 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

La préoccupation de l'épuisement des réserves de pétrole, de l'augmentation de la pollution de l'environnement et du changement climatique, a conduit à la recherche de sources d'énergie propres et durables. Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie éolienne est une source d'énergie prometteuse, qui gagne actuellement de plus en plus d'attention dans le monde [6].

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.- C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les Chinois ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau [7].

Depuis les années 90, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. Ces éoliennes servent à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon. La figure (I.1) montre une prévision du marché mondial du petit éolien à l'horizon 2020 [8].

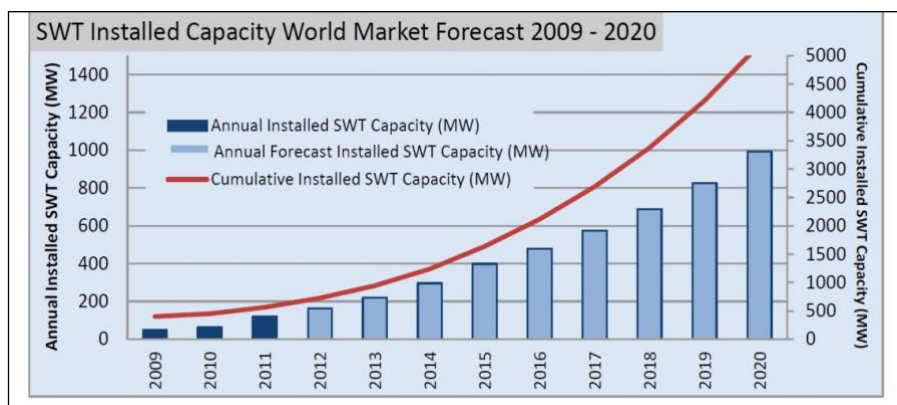


Figure I.1: Evolution de la puissance du parc éolien mondial [9].

Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux États-Unis mais augmentèrent en Europe, ce qui a permis un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et la Danemark. Le marché mondial passa d'une puissance moyenne de 200MW/an en 1990 à 5500MW/an en 2001 [10].

En 2006, l'Algérie a décidé d'acquérir la technologie éolienne en implantant le premier parc éolien à Tindouf d'une capacité de 50 MW et un autre à Adrar d'une capacité de 10 MW.

I.4 L'énergie électrique éolienne

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme.

I.4.1 Impact sur l'environnement

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchet. De plus, elle rembourse sa dette énergétique. Par contre, elle a un impact sur l'avifaune, le bruit et le paysage.

L'éolien a quelques inconvénients : [11]

- ✚ L'impact visuel qui reste un thème subjectif. Selon les enquêtes réalisées en Europe, la perception d'une éolienne n'est pas négative et varie selon le type de paysage initial, de la disposition (la disposition en ligne est préférable), de la quantité, de la taille des machines, du nombre de pales. Dans tous les cas une étude paysagère est indispensable lors du montage du projet.
- ✚ Le bruit d'une éolienne a une double source : la première, d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle (génératrice, etc.) et la seconde, d'origine aérodynamique, liée à la rotation des pales. Le bruit mécanique a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. Les mesures montrent que le bruit d'une éolienne est très limité, 50 dB à 150 m (équivalent au bruit dans un bureau), 45 dB à 200 m et imperceptible à 400 m. Dans la plupart des cas, le bruit du vent couvre celui des éoliennes.
- ✚ L'impact sur les oiseaux. Les éoliennes peuvent avoir un effet négatif de deux façons :
 - Des collisions au niveau du mât, des pales, des câbles électriques,
 - Des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

Avantages de l'éolien :

- ✓ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.
- ✓ Une énergie renouvelable : Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ Une énergie sans risque : Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- ✓ Une énergie qui n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne réduit de 0.8 à 0.9 tonnes les émissions de CO₂ produites chaque année en comparaison de la production d'électricité avec le charbon ou le diesel.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces de pollution.

I.5 Présentation des éoliennes

Il existe deux familles d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [12].

I.5.1 Éoliennes à axe vertical

Actuellement, la recherche est en cours dédiée aux systèmes d'éoliennes à axe vertical pour la production d'électricité, Surtout dans les gammes de puissance faible et moyenne (quelques dizaines de watts jusqu'à dizaines de kilowatts). Les surfaces effectives du rotor se déplacent dans la direction du vent, plutôt que perpendiculairement à lui. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation des pales (Figure 1.2). Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [13].



Figure I.2 :Eolienne à axe vertical [14].

I.5.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, sont son rendement élevé et son faible rapport coût puissance. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. [15]

Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol et presque parallèle au courant de vent. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées.



Figure I.3 : Éolienne à axe horizontal [16].

I.5.3 Avantages et inconvénients de chaque type de turbine

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des éolien à axe horizontal et vertical [17].

Type des turbines	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à axe Horizontal (HAWT)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Un bon rendement. ✓ Capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol. ✓ Moins chères que les éoliennes verticales à puissance maximale égale. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. ✓ Font beaucoup de bruit. ✓ Moins sécuritaires pour les oiseaux car elles tournent à haute vitesse.

<p>Eoliennes à axe vertical (VAWT)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coût de construction moins important ✓ Production de l'électricité dans n'importe quelle direction du vent. ✓ Accessibilité la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rendement faible. ✓ Vibrations relativement élevées parce que le flux d'air près du sol crée un écoulement turbulent.
---	--	--

I.6 Caractéristiques technologiques des éoliennes

La plupart des éoliennes installées dans le monde sont des éoliennes à axe horizontal à trois pales. Nous présentons dans la figure (I.5) un schéma descriptif de la structure interne d'une éolienne avec ces principaux éléments.

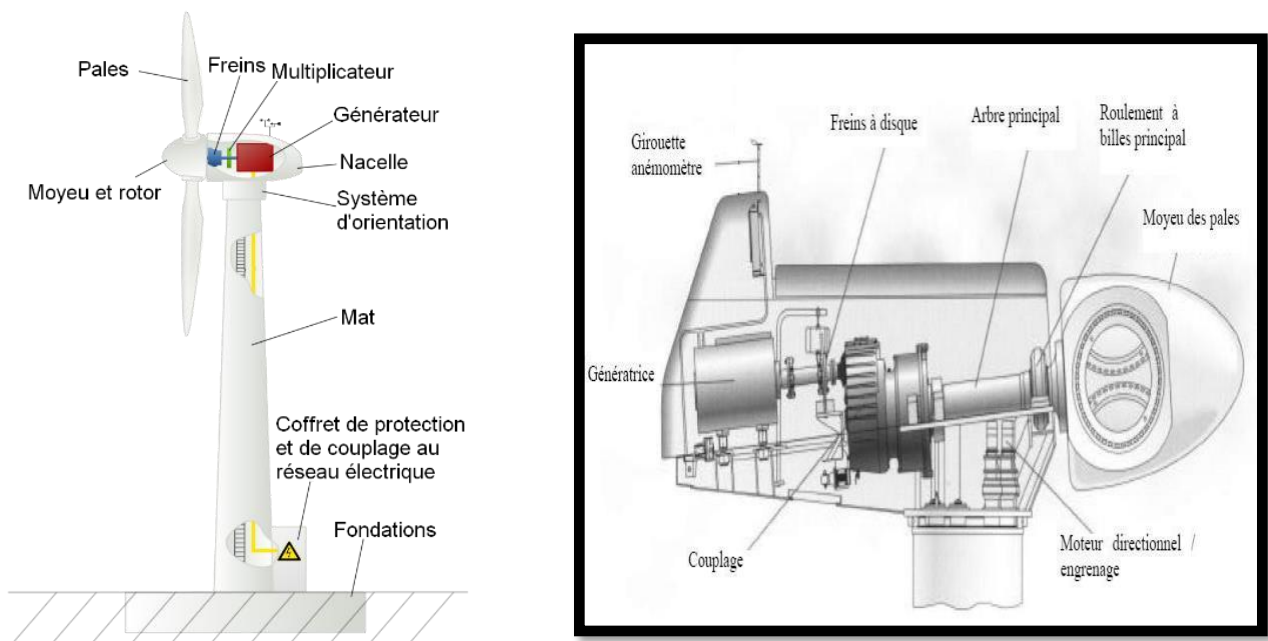


Figure I.4 : Constitution d'une éolienne [18].

I.6.1 Mât

Le rôle du mât, pylône ou tour est d'une part de supporter l'ensemble rotor et nacelle afin que les pales ne touchent pas le sol, et d'autre part de placer le rotor à une hauteur convenable pour

maximiser le rotor hors le gradient de vent qui se produit près du sol, améliorant ainsi la captation d'énergie.

La tour cylindrique est une structure en acier de 60 à 100 mètres de haut, à l'intérieur de laquelle se trouvent une échelle d'accès et des câbles électriques pour le raccordement au réseau.

I.6.2 Nacelle

Il est situé au sommet de la tour et couvre l'ensemble de l'installation de production d'électricité : multiplicateur, générateur(s), systèmes de freinage et d'orientation de l'éolienne, et tous les dispositifs automatisés pour contrôler toutes les fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte sur laquelle sont fixés tous ces éléments.

I.6.3 Rotor

Fait tourner le mécanisme d'entraînement et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois. Le rotor ne tourne pas trop vite. C'est le diamètre des pales qui détermine la quantité d'électricité produite par le système. L'éolienne compte habituellement deux ou trois pales, le rotor à trois pales réduit les contraintes mécaniques que subit le système, mais son coût est plus élevé [19].

- **Les rotors à pas variable** : le mécanisme est presque idéal, car on optimise la vitesse de rotation et la puissance (presque constante), en fonction du vent disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux [20].
- **Les rotors à pas fixe** : ralentir automatiquement à partir d'une certaine vitesse. La conception des pales conduit à un effet aérodynamique qui réduit l'efficacité du rotor. Cette technologie entraîne néanmoins une variation plus importante des vitesses du rotor et exige de réguler davantage le courant de sortie [20]. En outre, par vents forts, et bien que la turbine ralentisse, les pales, toujours face au vent, exercent de fortes pressions sur la nacelle et le mât.

Dans la suite de ce paragraphe nous présenterons les différents composants d'une éolienne.

I.6.4 Moyeu

Il s'agit généralement d'une pièce en acier coulé, à ailettes sur flasques standards, et montée sur l'arbre multiplicateur libre. Les éléments finis sont utilisés dans sa conception. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui est de forme aérodynamique.

I.6.5 Pales

Le rotor, et tout particulièrement les pales, constituent la partie mécanique la plus importante de l'éolienne. L'efficacité globale de l'aérogénérateur dépend fortement de celle-ci [17]. Plusieurs éléments caractérisent ces dernières tels que : la longueur, la largeur, le profil, le matériau et le nombre.

I.7 Principe de fonctionnement

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable.

I.7.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Le schéma de l'éolienne à vitesse fixe est illustré dans la figure (I.5). Le système de génération à vitesse fixe utilise un générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG) qui est directement connecté au réseau via un transformateur élévateur. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Un SCIG fonctionne dans une plage de vitesse très étroite autour de la vitesse synchrone. Cette vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice et indépendamment de la vitesse du vent [21-22].

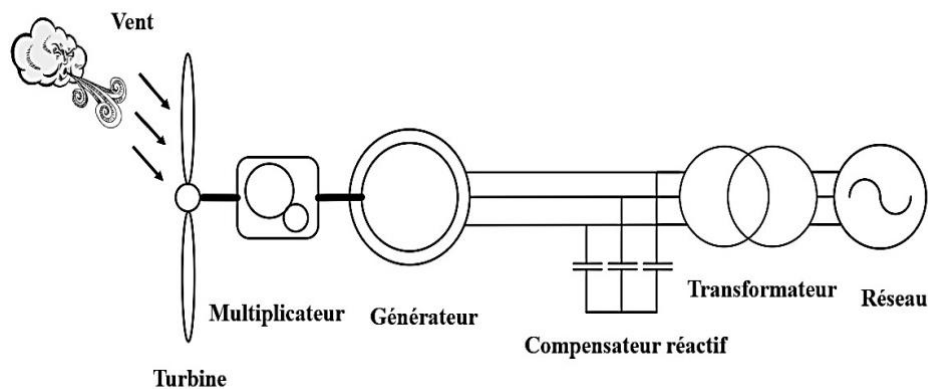


Figure I.5: Eolienne à vitesse fixe [23].

I.7.2 Fonctionnement à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont largement utilisées de nos jours. En effet, ces dernières contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent faible ou bien fort vitesse (figure I.7), l'éolienne fonctionne à puissance maximale [23-24].

Actuellement, les éoliennes à vitesse variable de grande puissance sont plus largement utilisées. Leurs principaux avantages par rapport aux vitesses fixes sont :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour même les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être facilement converti ;
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente ;
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent ;

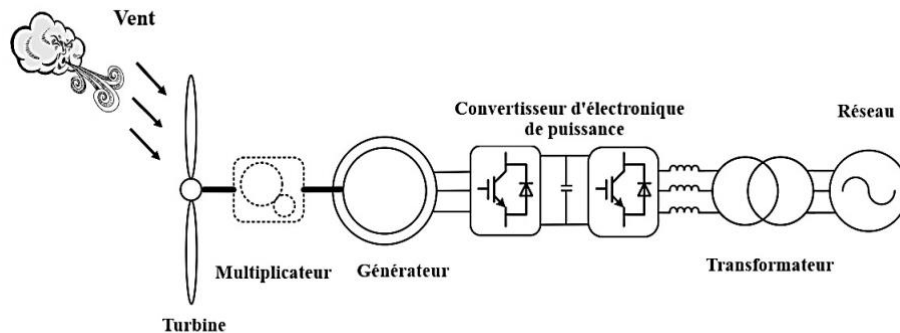


Figure I.6: Aérogénérateur à vitesse variable [23].

I.8 Les différents systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe de nombreux types de générateurs sur le marché pour les éoliennes à vitesse fixe ou variable qui nécessitent des caractéristiques très spécifiques.

Le choix du générateur est important. Pour une application éolienne, il existe principalement trois types de machines utilisées [21] :

- ✓ Machine asynchrone à cage ;
- ✓ Machine synchrone ;
- ✓ Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.

I.8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

L'utilisation des machines Asynchrones (figure I.7) est largement répandue dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Il existe trois types de Machine Asynchrone pouvant être couplés avec une éolienne : Machine Asynchrone à rotor bobine, Machines Asynchrones à double alimentation et Machines Asynchrones à cage d'écureuil. La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues rend la machine à cage d'écureuil tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [25].

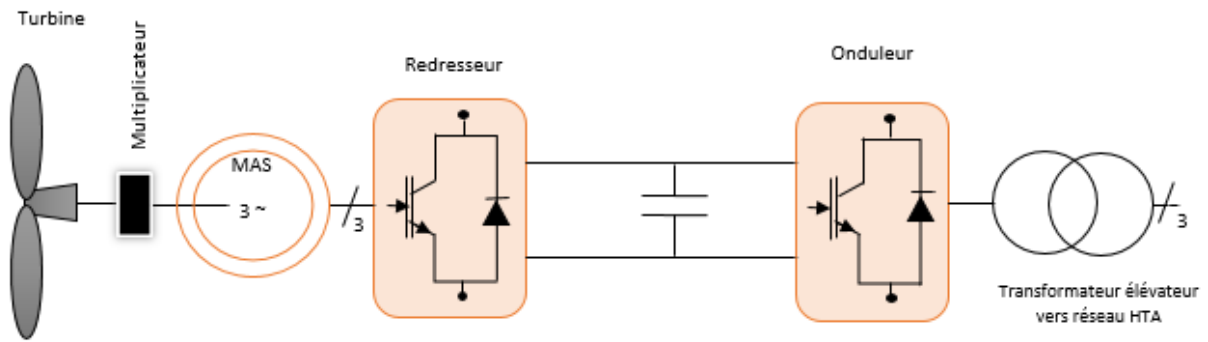


Figure I.7 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à fréquence variable.

I.8.2 Machine synchrone

Le terme Machine synchrone comprend toutes les machines dont la vitesse du rotor est égale à la vitesse du champ magnétique tournant. Pour réaliser cette opération, le champ magnétique du rotor est généré par des aimants soit par un circuit d'excitation. Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Contrairement aux machines synchrones elles peuvent être directement couplé avec les turbines éoliennes.

I.8.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ces machines sont constituées d'un rotor qui comporte des bobines qui sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Ces machines synchrones à rotor bobiné sont classées en deux types : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants. La machine à pôles lisses à une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants à un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance [24]. Cette machine possède deux inconvénients, la nécessité d'un circuit d'excitation indépendant qui est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau et un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor (figure I.8).

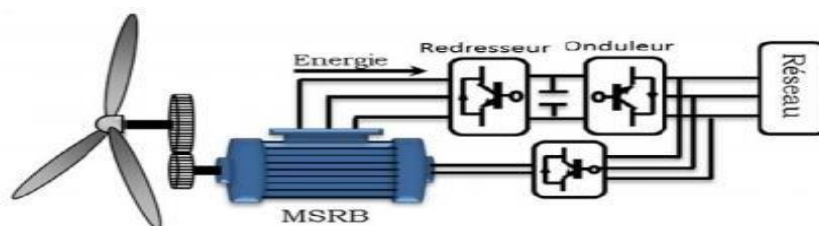


Figure I.8: Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.

I.8.2.2 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De par son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de perte de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais.

Les éoliennes à base de MSAP, sont caractérisées par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission direct) offre un couple massif suffisant

pour garantir l'entraînement de la machine, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisqu'il n'y a que des hélices qui sont en mouvement. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé.

A) Avantages de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) : [26].

- ✓ Un Bon rendement.
- ✓ Un facteur de puissance élevé.
- ✓ Un taux de défaillance minime par rapport aux autres machines.

I.8.3 Structure retenue pour notre étude

Notre système est composé d'une turbine avec une génératrice synchrone à aimants permanents, de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) qui assurent le contrôle du système, d'un bus DC et d'un filtre RL.

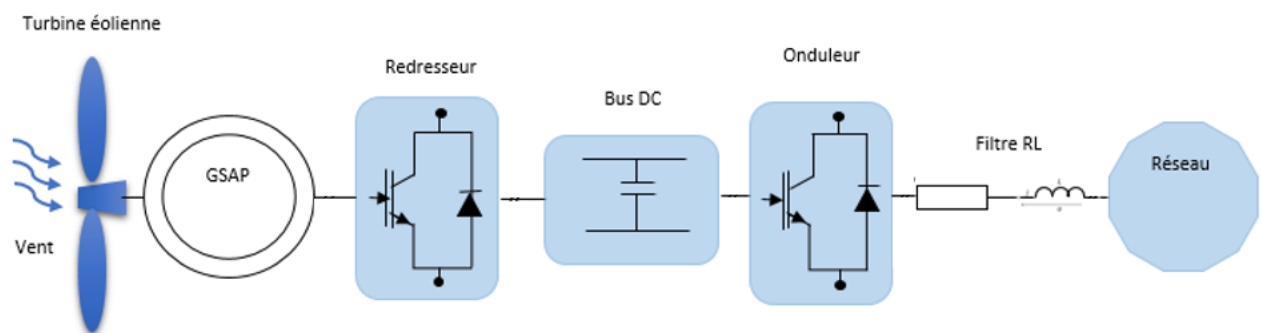


Figure I.9 : Structure du système éolien retenue pour notre étude.

I.9 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présentés quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis un bref aperçu sur les différents types des éoliennes, ainsi que Les machines électriques utilisées pour la conversion d'énergie éolienne.

Dans l'ensemble, le secteur de l'énergie éolienne est en phase de développement et nécessite des recherches supplémentaires sur le débit d'air et la vitesse du vent, en mettant l'accent sur les nouvelles technologies pour optimiser l'efficacité énergétique.

Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation de toute la chaîne de conversion éolienne à base de la machine synchrone à aimants permanents.

CHAPITRE

2

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, l'angle de calage des pâles β .

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne associée à une génératrice synchrone à aimants permanents connectée au réseau à travers des convertisseurs statiques (onduleur MLI, redresseur MLI), d'un bus continu et d'un filtre RL.

II.2 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne étudiée

Le schéma du système complet est illustré sur la (Figure II.1).

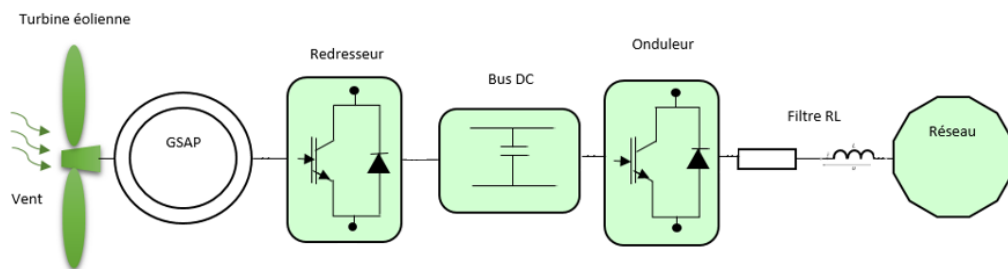


Figure II.1 : Système éolien basé sur la MSAP connectée au réseau.

II.2.1 Modélisation de la vitesse de vent

Le vent est la principale source d'énergie pour faire fonctionner les éoliennes, c'est pourquoi il est nécessaire de comprendre son modèle mathématique. Cela peut être une simple loi exponentielle ou utiliser des distributions spectrales et spatiales très complexes pour expliquer sa phénoménologie turbulente. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps : $V_v = (t)$.

II.2.2 Formule de Betz

La formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par l'unité de temps (seconde) [27].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 2.2, sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit V_{12} [27].

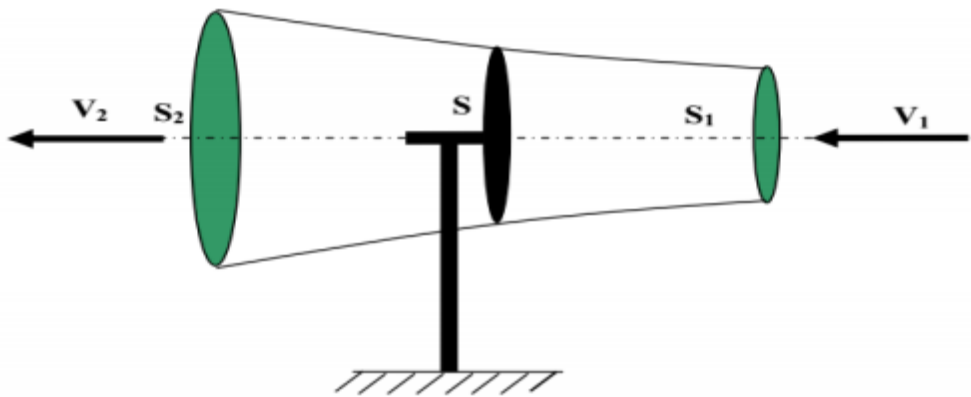


Figure II.2 : Tube de courant autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

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

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) :

$$P_{mt} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression (équation I.1)

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

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

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

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

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

II.2.3 Modélisation de la turbine éolienne

Une éolienne est un élément tridimensionnel aux formes complexes, en mouvement et immergé dans un flux d'air. Il est cependant important que le modèle en question décrive la vraie dynamique mécanique de la voilure et pas seulement un comportement quasi-statique. Un modèle qui reflète le comportement dynamique global d'une éolienne à axe horizontal est sélectionné. Une courbe de coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de pointe sera utilisée.

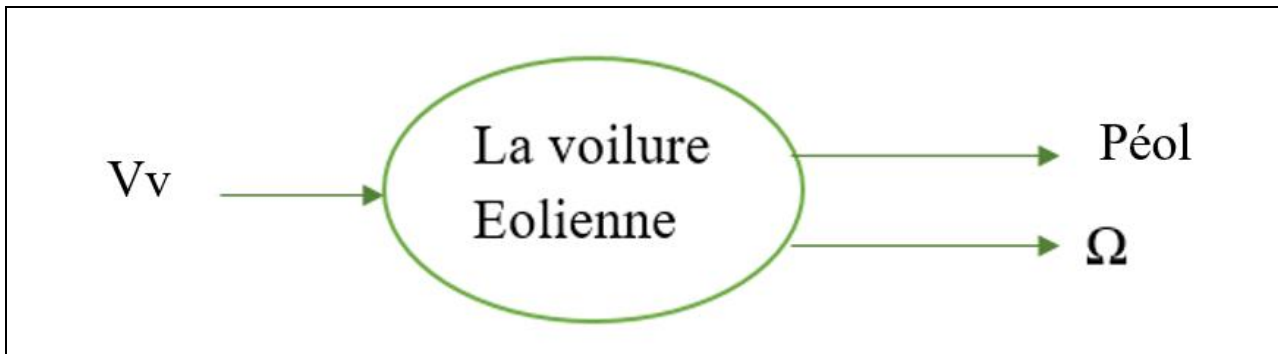


Figure II.3 : Entrées– Sorties du modèle de la voilure éolienne.

- Caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure :

La courbe caractéristique de la voilure utilisée pour l'étude du système est présentée sur la (figure II.4). Les points remarquables de cette courbe sont :

$$C_p^{opt} = 0.475 ; \lambda_{opt} = 7.34$$

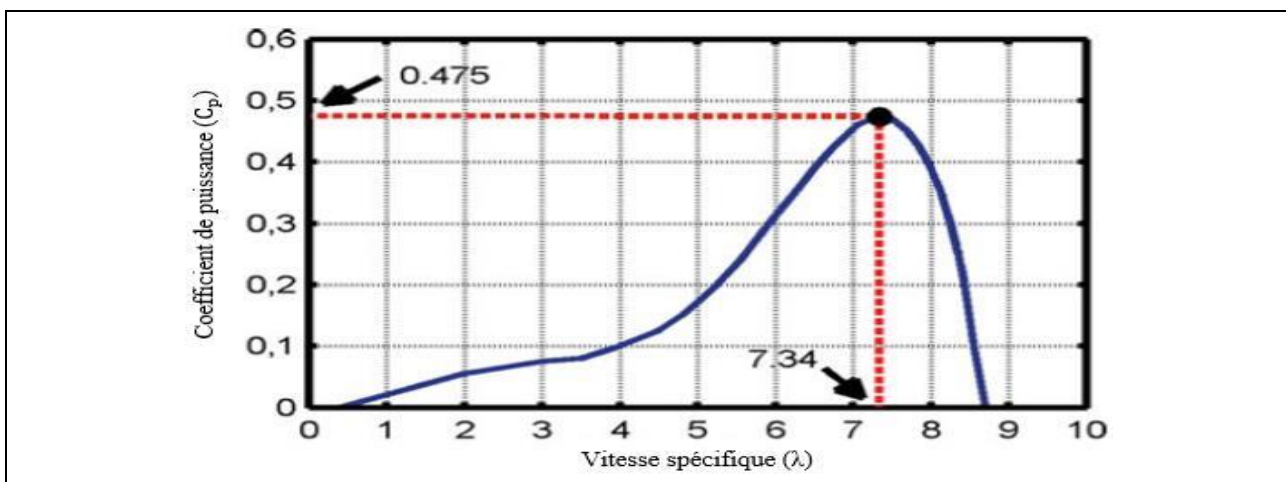


Figure II.4 : Courbe caractéristique de la turbine éolienne $C_p(\lambda)$ [28].

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

ρ : La densité du vent en. [Kg/m³].

S : La surface balayé par les pales de l'éolienne [m²].

V_v : Vitesse du vent [m/s].

A partir de cette puissance, une équation de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse de la turbine éolienne $\Omega(t)$:

$$C_{méc} \Omega_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Avec } \Omega_t = \frac{V_v}{R} \cdot \lambda \text{ et } S = \pi \cdot R^2$$

En remplaçant la vitesse de la turbine et la surface balayé par les pales de l'éolienne, par leurs expressions dans l'équation (II.3), on aura l'expression finale du couple de la turbine :

$$C_{méc} = \frac{1}{2} \lambda \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 V_v^2 \quad (\text{II.4})$$

Le couple mécanique vu par la machine synchrone diffère du couple éolien car il faut tenir compte de l'inertie de l'éolienne et du frottement visqueux qui caractérisent la construction de l'éolienne. Cela peut être traduit en termes mathématiques en utilisant l'équation suivante :

$$C_t = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega + C_{méc} \quad (\text{II.5})$$

$$\Omega_t = \frac{(C_t - C_{méc})}{(f + p \cdot j)} \quad (\text{II.6})$$

Où j et f représentent l'inertie et le frottement de l'éolienne, et P est l'opérateur de Laplace, respectivement. A partir de ces deux équations, on peut représenter le modèle dynamique de l'éolienne par le schéma suivant (Figure II.5)

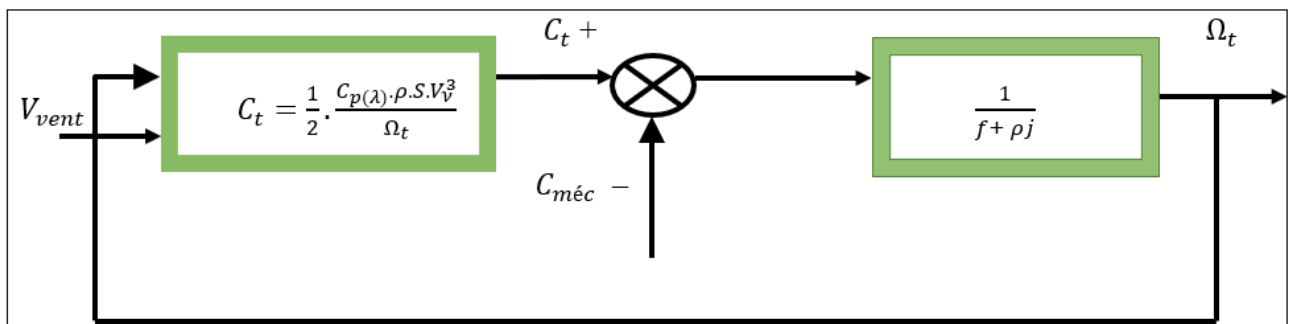


Figure II.5 : Modèle dynamique de l'éolienne.

II.2.4 Modélisation du générateur synchrone à aimant permanent

L'utilisation d'aimants permanents est considérée comme une véritable révolution dans le domaine de la conversion électromécanique ; (ex. manico, samarium cobalt, fer bore néodyme...), ce qui permet de les utiliser comme inducteurs dans des machines synchrones offrant ainsi de nombreux avantages : induction à haute saturation, faible démagnétisation, masse volumique élevée, stockage d'énergie maximal supérieur à celui des autres appareils

Les machines synchrones à aimants permanents sont intéressantes pour être utilisées en génératrice en conjonction avec une éolienne et surtout pour des applications autonomes et isolées, ce qui est notre cas. Afin d'obtenir une formule plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, sa modélisation mathématique sera développée sur la base d'hypothèses simplifiées.

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- Les f.é.m. sont à répartition sinusoïdale.
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable.
- L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.

II.2.4.1 Mise en équation de la MSAP

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q dans le repère classique, il y'a trois axes (a_s , b_s et c_s) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine [29].

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la (figure II.6) suivante :

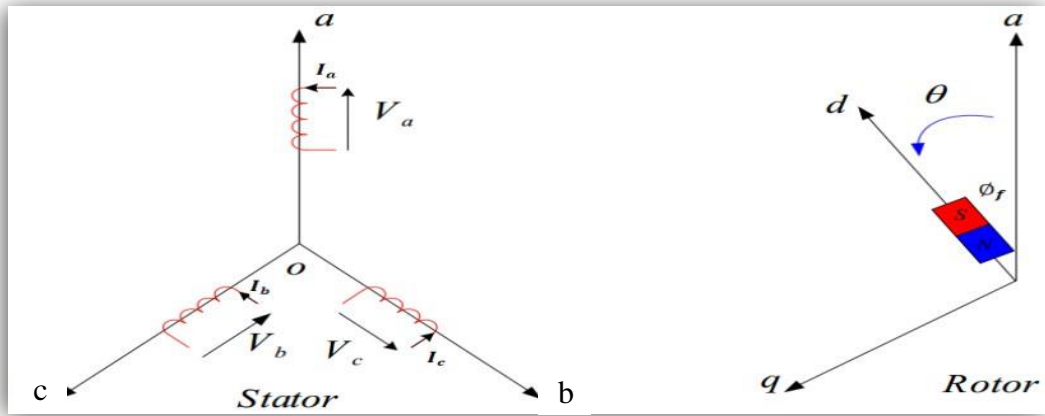


Figure II.6 : Schéma représentatif de la MSAP à modéliser.

a) Équations électriques

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

On peut aussi l'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$[V_a \ V_b \ V_c]$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : La résistance des phases statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

b) Équations des flux magnétiques

Les équations des flux s'écrivent :

$$[\varphi]_{abc} = [L_{ss}] \cdot [i]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II.9})$$

$[L_{ss}]$: Matrice inductance (propre et mutuelle statoriques)

$[\varphi_f]$: Vecteur du flux créé par les aimants permanents

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s1}(\theta)] \quad (\text{II.10})$$

Le rotor étant supposé lisse, les inductances ne dépendent pas de sa position car l'entrefer est constant durant la rotation, ce qui impose la négligence de la matrice. $[L_{s1}(\theta)]$ La matrice $[L_{ss}]$

devient :

$$[L_{SS}] = [L_{S0}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Et : } \begin{cases} L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s \\ M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_s \end{cases}$$

Donc le système (II.11) devient

$$[L_{SS}] = [L_{S0}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

L'expression des flux dans les trois phases « a, b, c » est donnée par :

$$\begin{cases} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{cases} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} + \begin{cases} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En remplaçant les expressions des flux total (II.13) dans le système (II.7) on obtient :

$$\begin{cases} V_a \\ V_b \\ V_c \end{cases} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} + \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} + \frac{d}{dt} \begin{cases} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Sous la forme matricielle :

$$[v]_{abc} = [R_s][i]_{abc} + [L_{SS}] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + \frac{d}{dt} [\varphi_f]_{abc} \quad (\text{II.15})$$

$[\varphi_f]_{abc}$: Représente le vecteur des flux créés par l'aimants permanents à travers les enroulements statoriques.

$$\text{Et pour } \frac{d\varphi_{fa}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = e_{fa} \cdot \omega_r \quad (\text{II.16})$$

Avec e_{fa} : Représente la force électromotrice produite dans la phase statorique « a ».

ω_r : La vitesse de rotation du rotor en (rad/sec).

$$[v]_{abc} = [R_s] \cdot [i]_{abc} + [L_{SS}] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + \omega_r \cdot [e_f]_{abc} \quad (\text{II.17})$$

II.2.4.2 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la MSAP, on applique un changement de repère. Ce changement s'effectue grâce à une transformation mathématique, qui transforme les trois bobines statoriques déphasées de $(2\pi/3)$ en deux bobines fictives équivalentes diphasées de $(\pi/2)$ et situées sur le rotor (Figure II.7).

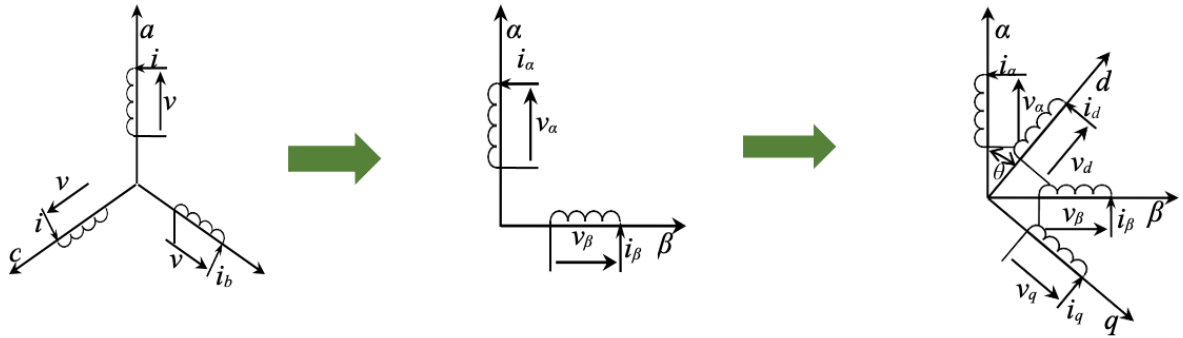


Figure II.7 Transformation triphasée- diphasée.

a) Équations électriques

En appliquant la transformation de Park au système (II.7) on aura le modèle global suivant :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][V_{abc}] = [P(\theta)][R_s][i_{abc}] + [P(\theta)]\frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.18})$$

Après la simplification le système (II.18) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d - \omega_r \varphi_q + \frac{d\varphi_d}{dt} \\ V_q = R_s i_q + \omega_r \varphi_d + \frac{d\varphi_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

b) Équations magnétiques

A l'aide de la transformation de Park appliqué au système d'équation (II.9), on passe à partir des grandeurs statoriques réelles $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ et i_a, i_b, i_c à leur composantes φ_d, φ_q et i_{sd}, i_{sq}

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

c) Équations du couple électromagnétique

La puissance électrique absorbée par la machine est exprimée par :

$$P_a = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{II.21})$$

Le développement de cette expression donne les différents termes, qui correspondent aux pertes à effet Joule, à la puissance électromagnétique emmagasinée dans les bobinages et la puissance mécanique converti.

En remplaçant (II.19) dans l'expression (II.21) on obtient :

$$P_a = \frac{3}{2} \left(R_s i_d^2 - \omega_r \varphi_q i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} i_d + R_s i_q^2 + \omega_r \varphi_d i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right) \quad (\text{II.22})$$

$$P_a = \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q - \omega_r (i_q \varphi_d - i_d \varphi_q) \right) \right) \quad (\text{II.23})$$

L'équation de la puissance mécanique est donnée par :

$$P_{\text{mec}} = \frac{3}{2} p \Omega_r (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II.24})$$

L'équation du couple électromagnétique est donc :

$$C_{\text{em}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\Omega_r} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II.25})$$

Comme notre machine est considéré à pôles lisses, ce qui signifie que $L_q = L_d$

$$\begin{cases} C_{\text{em}} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \varphi_f] \\ C_{\text{em}} = \frac{3}{2} p \cdot \varphi_f \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Le modèle global de la machine MSAP convention moteur s'écrit :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{di_q}{dt} i_q + \omega_r (L_d \cdot i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \omega_r \frac{L_q}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \omega_r \frac{L_d}{L_q} i_d - \frac{1}{L_q} \varphi_f \omega_r + \frac{V_q}{L_d} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En convention génératrice les sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park sont inversés [29], on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r (L_d \cdot i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation.

II.3 Modélisation de convertisseur statique côté machine (redresseur)

Un redresseur est un convertisseur statique capable de convertir l'énergie d'une source alternative en une source continue. Il existe plusieurs combinaisons, et le choix se fait en fonction des performances recherchées. Dans notre cas, nous ne nous intéressons qu'aux redresseurs à trois bras indépendants, portant chacun deux interrupteurs. Un commutateur se compose d'un IGBT et d'une diode en parallèle, comme illustré à la figure (II.8). Les deux convertisseurs utilisés dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne étant structurellement similaires, il suffit d'en modéliser un seul.

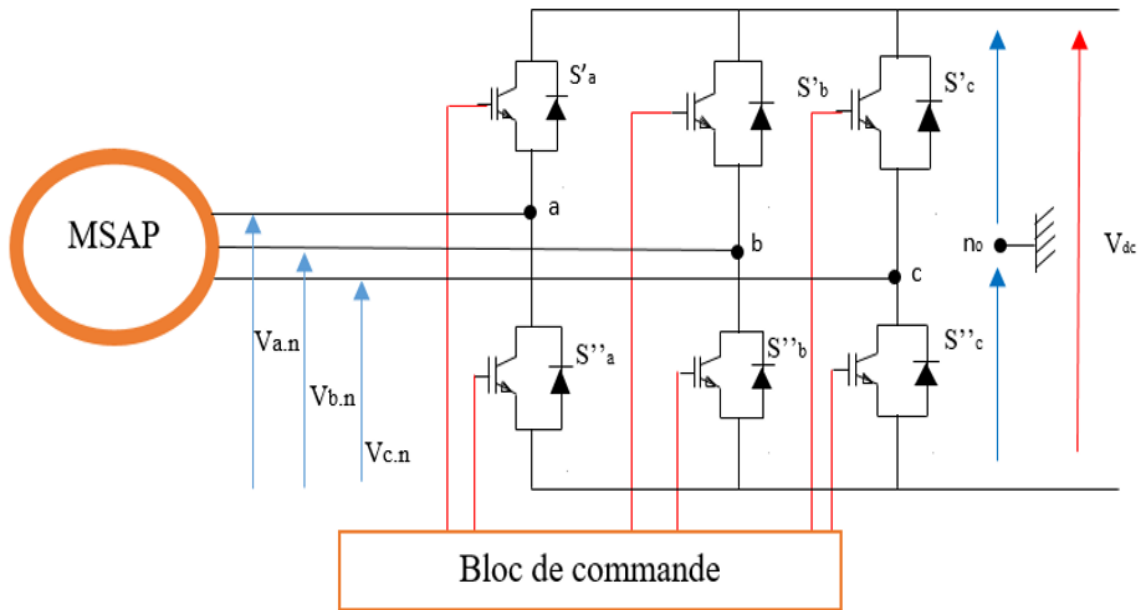


Figure II.8 : Schéma du convertisseur statique coté machine.

Le redresseur est commandé à partir des grandeurs logiques $s_i' = (i = a, b, c)$, on appelle T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

- Si $S_i' = +1$ alors T_i est fermé et T_i' est ouvert.
- Si $S_i' = -1$ alors T_i est ouvert et T_i' est fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions V_{in_0} en fonction des signaux de commande $S_i' = (i = a, b, c)$ Et en tenant compte du point fictif n_0 représenté sur la (figure II.6).

$$\begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Soit « n », le point neutre du côté alternatif (MSAP), alors les trois tensions composées U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En exprimant les tensions précédentes par rapport au point milieu n_0

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

En considérant un système triphasé équilibré ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V_{an0} = \frac{1}{3}(2V_{an0} - V_{bn0} - V_{cn0}) \\ V_{bn0} = \frac{1}{3}(-V_{an0} + 2V_{bn0} - V_{cn0}) \\ V_{cn0} = \frac{1}{3}(-V_{an0} - V_{bn0} + 2V_{cn0}) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant (II.30) dans (II.34) on obtient les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande S_i ($i = a, b, c$) et on aboutit au modèle mathématique du convertisseur :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

II.4 Modélisation de bus continu

Le bus continu est un élément de stockage d'énergie, l'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif. Le circuit électrique du bus continu est donné par la (figure II.9).

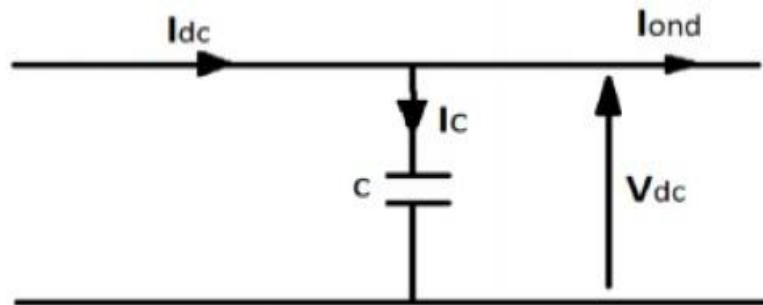


Figure II.9 Schéma équivalent pour le circuit bus continu.

A partir de la (figure II.9) on peut écrire l'équation suivant :

$$I_c = I_{dc} - I_{ond} \quad (\text{II.36})$$

La tension V_{dc} est une fonction du courant I_c

$$I_c = C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

C : La capacité du condensateur

II.5 Modélisation du convertisseur statique côté réseau (onduleur)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente. C'est la fonction inverse d'un redresseur.

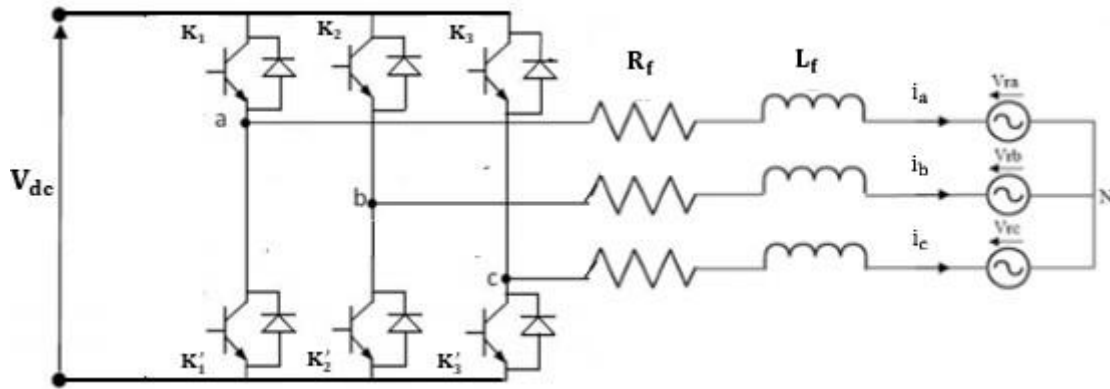


Figure II.10 : Circuit de l'onduleur relié au réseau électrique.

S_i Est l'état de l'interrupteur K_i tel que :

$$\begin{cases} S_i = 1 & \text{si } K_i \text{ fermé} \\ S_i = 0 & \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

Les tensions simples s'expriment en fonction des fonctions logiques sont données par :

$$\begin{cases} V_{ond1} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \\ V_{ond2} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_b - S_a - S_c) \\ V_{ond3} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot (2 \cdot S_c - S_a - S_b) \end{cases} \tag{II.38}$$

Et le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{ond} = S_a \cdot I_a + S_b \cdot I_b + S_c \cdot I_c \tag{II.39}$$

II.6 Modélisation du filtre

IL s'agit d'un filtre passif série (R, L) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (figure II.9) [30].

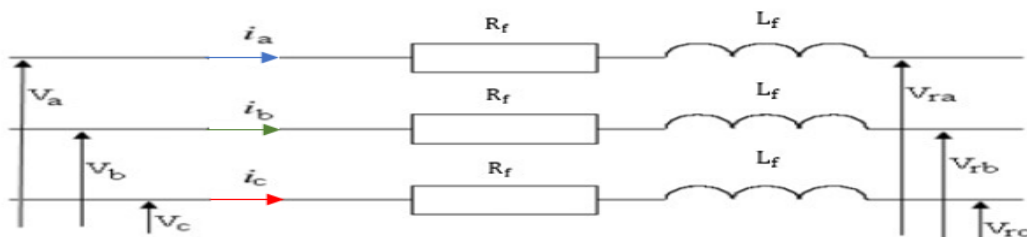


Figure II.11: Schéma électrique du filtre [30].

La modélisation du filtre est comme suit :

$$\begin{cases} V_a = R_f \cdot i_a + L_f \frac{di_a}{dt} + V_{ra} \\ V_b = R_f \cdot i_b + L_f \frac{di_b}{dt} + V_{rb} \\ V_c = R_f \cdot i_c + L_f \frac{di_c}{dt} + V_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

II.7 Modélisation du réseau électrique

Un circuit triphasé reçoit trois tensions sinusoïdales de même fréquence et déphasées de 120° . Un système triphasé est dit en équilibre lorsqu'il est composé de trois grandeurs de même valeur efficace (ou amplitude). La tension triphasée du réseau électrique s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} V_{ra} = V_m \sin(\omega_t) \\ V_{rb} = V_m \sin(\omega_t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{rc} = V_m \sin(\omega_t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Relations pour un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2}V_{\text{eff}} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{\text{eff}} = \sqrt{3}V_e \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

II.8 Stratégie de commande de la turbine éolienne

Il existe quatre zones opérationnelles principales qui peuvent être distinguées, comme la montre la figure (II.10).

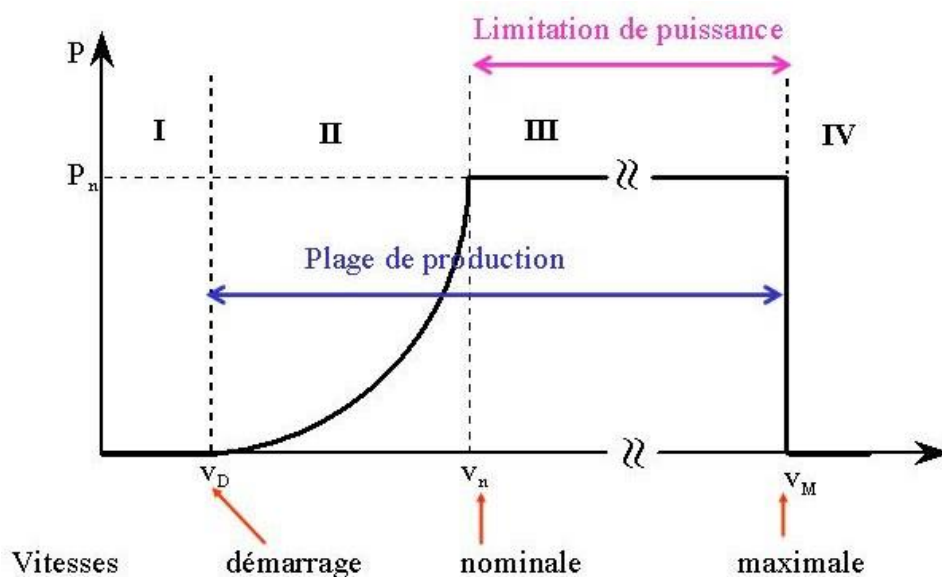


Figure II.12 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Zone I : La vitesse du vent est trop faible par rapport à la vitesse nominale $V_{vent} \ll V_n$. La turbine peut tourner, mais la quantité d'énergie qu'elle peut capter est négligeable ($P_m=0$), donc aucune loi de commande n'est utilisée dans cette zone.

Zone II : La vitesse du vent atteint une vitesse minimale de démarrage de $V_{dém}$, après quoi l'éolienne commence à fournir de l'énergie. Selon les constructeurs, $V_{dém}$ varie entre 2 et 4 m/s pour les éoliennes de forte puissance jusqu'à ce que le vent atteigne la valeur nominale V_n , qui correspond à la puissance mécanique nominale P_{mn} et à la vitesse de rotation n . Dans ce cas, une stratégie de contrôle sera développée pour contrôler le couple électromagnétique de la machine afin de réguler la vitesse de rotation pour maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous le nom de principe MPPT. Deux types de contrôle peuvent être distingués [31,32].

- ✓ Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- ✓ Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Dans cette zone L'angle de calage des pâles β est maintenu constant à sa valeur minimale ($\beta=0^\circ$).

Zone III : correspond à des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale, pour lesquelles la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale afin de maintenir la puissance P_m fournie par la turbine égale à la puissance nominale P_n , en orientant les pâles de la turbine afin de réduire le rendement de la turbine (augmentation de l'angle de calage des pales).

Zone IV : Pour éviter les dommages lorsque le vent atteint sa V_{max} maximale, les pales de la turbine sont drapées ($=90^\circ$) pour éviter tout dommage.

Nous nous intéressons particulièrement à la zone II, où l'extraction de l'énergie électrique Maximal (MPPT sans conservation de vitesse) est Suggérée, sachant que dans cette zone L'angle de calage des pâles β est maintenu constant à sa valeur minimale ($\beta=0^\circ$).

II.8.1 Méthode de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de puissance idéale d'une éolienne est fortement non linéaire. Pour chaque vitesse de vent, le système doit déterminer la puissance maximale, ce qui revient à déterminer la meilleure vitesse de rotation.

Le schéma de la figure (II.13) représente les courbes caractéristiques de l'éolienne en termes de puissance et de vitesse de rotation. Chaque courbe correspond à une certaine vitesse du vent. La somme de ces sommets, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe de puissance optimale définie par :

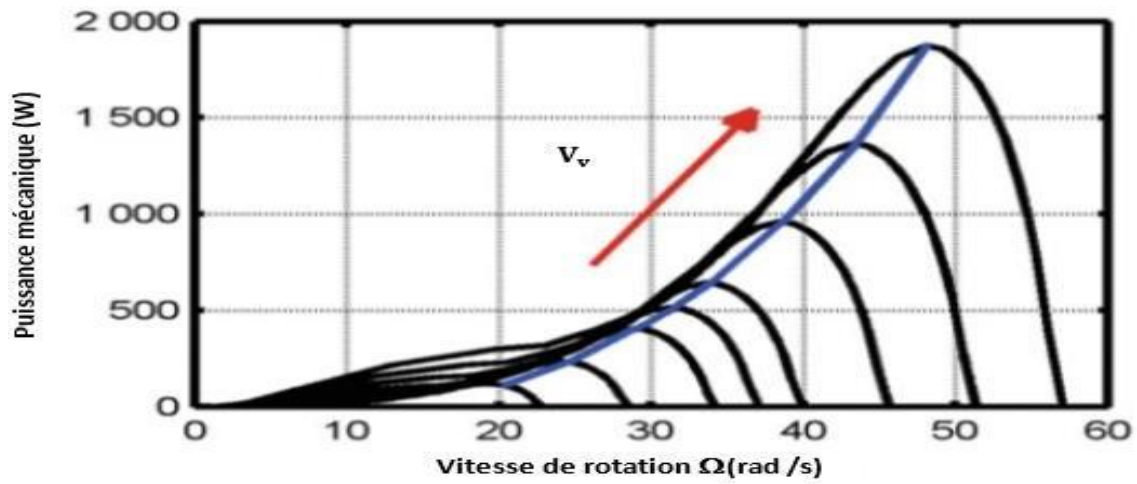


Figure II.13 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot V_v^3 \quad (\text{II.43})$$

Un suivi parfait de cette courbe est nécessaire pour un fonctionnement optimal du système éolien. Pour atteindre cet objectif, une commande connue sous le nom de Maximum Power Point Tracking (MPPT) qui correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande est de contrôler le couplage électromagnétique afin de réguler la vitesse mécanique et de maximiser la puissance électrique générée.

Dans ce travail, nous nous supposant que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Pour s'assurer que l'éolienne est dans le meilleur état possible, il suffit de suivre la courbe de puissance idéale.

II.8.2 Contrôle MPPT sans asservissement de vitesse

Cette méthode repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et donc la vitesse de rotation de la turbine, varie beaucoup à régime constant [29]. De ce fait, le couple aérodynamique optimale ramené sur l'arbre du générateur est déterminé par l'expression :

$$C_{opt} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot V_v^2}{2 \cdot \lambda_{opt}} \quad (\text{II.44})$$

Une estimation de la vitesse du vent est fréquemment utilisée. La vitesse de rotation de la turbine étant connue, la vitesse du vent peut être calculée à l'aide de l'équation de vitesse spécifique si dessous.

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V_v} \quad (\text{II.45})$$

Nous. Pouvons déduire l'expression de la vitesse du vent:

$$V_{v-opt} = \frac{\Omega_t \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II.46})$$

En remplace l'expression (III.4) dans (III.2) on aura

$$C_{opt} = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot R^5 \cdot C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.47})$$

On constate que le couple aérodynamique idéal est proportionnel au carré de la vitesse de fonctionnement du rotor.

$$C_{opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.48})$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot R^5 \cdot C_p^{opt}(\lambda_{opt})}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (\text{II.49})$$

Le système décrit dans la (figure II.12) ci- dessous permet de modéliser le fonctionnement de la turbine à l'aide de l'algorithme MPPT.

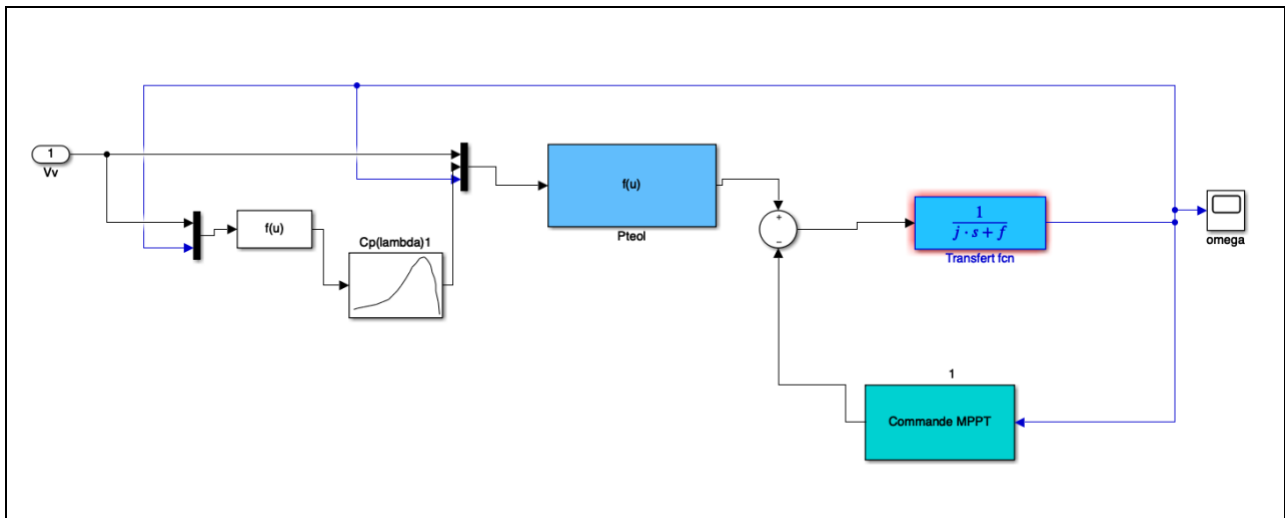


Figure II.14 : Schémas bloc de la turbine éolienne avec la commande MPPT.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des différents éléments qui composent une chaîne de conversion éolienne pour comprendre son fonctionnement, puis nous avons présenté un modèle mathématique de chaque élément qui compose la chaîne, en commençant par la turbine éolienne et en terminant par le raccordement au réseau. La stratégie de commande de la turbine éolienne dit le contrôle MPPT permet l'extraction du point de puissance maximale. Dans les chapitres suivants, nous nous concentrerons sur les techniques de contrôle telles que le contrôle

vectorel du GSAP et l'application de la technologie DPC classique et la DPC améliorée pour contrôler le convertisseur côté réseau.

CHAPITRE

3

Contrôle de la chaîne de conversion éolienne

III.1 Introduction

Après avoir présenté et modéliser la chaîne du système éolienne, nous présenterons dans ce chapitre les différentes commandes appliquées à ce système afin d'optimiser ses performances.

Au cours de ces dernières années, des travaux de recherche importants ont été menés sur les stratégies de contrôle des convertisseurs MLI triphasés. Ces stratégies proposées peuvent être classées selon l'utilisation des régulateurs de boucle de courant ou de régulateurs de puissances actives/réactives.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons la commande vectorielle à MLI ainsi que son principe de fonctionnement général. Dans la deuxième partie nous exposerons la commande DPC classique basée sur une table de commutation. Cette dernière est obtenue à partir de l'étude des variations des puissances instantanées active et réactive, assurant un contrôle simultané et précis de ces dernières. Nous considérons deux tables de commutation : Une à douze (12) secteurs et l'autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous mènerons une étude comparative des performances.

III.2 Commande vectorielle

Introduite par Blaschke en 1972, L'objectif de la commande vectorielle des machines triphasé est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique [33]. Cette méthode n'a été largement utilisée qu'au début des années 80, lorsque les progrès de la technologie des semi - conducteurs de puissance et de la microélectronique ont permis son utilisation dans les variateurs industriels modernes [34]. Cependant, cette commande présente une faible robustesse face aux variations paramétriques, qu'ils varient au cours du fonctionnement. La commande vectorielle peut être schématisée par la figure (III.1) si dessous.

III.2.1 Commande vectorielle à MLI

La méthode MLI vectorielle est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur ou redresseur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoïdale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise [35].

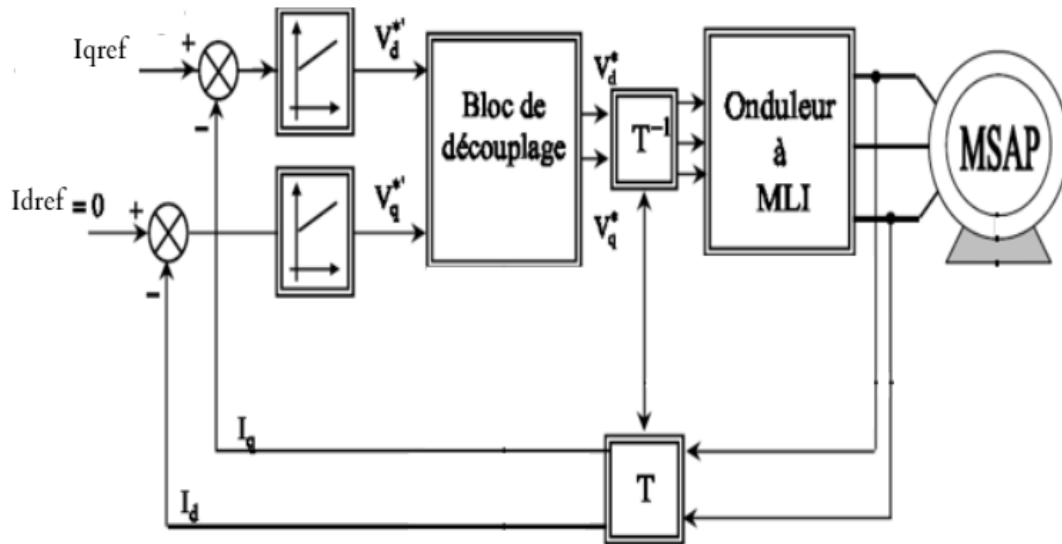


Figure III.1 : Commande vectorielle de la MSAP.

III.2.2 Principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Par conséquent, ceci permet d'orienter le flux du stator pour contrôler de manière indépendante le couple électromagnétique. Puisque le principal flux de la MSAP est généré par des aimants, la solution la plus simple pour une machine synchrone à aimants permanents est de maintenir le courant direct $I_{d_{ref}}$ nul et le courant statorique sera réduit à une seule composante I_q ou ($I_s = I_q$) et le courant d'axe quadratique de référence (I_{q-ref}) est déterminé en fonction du couple de référence généré par l'algorithme MPPT, qui nous permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em-ref} = \frac{3}{2} p \Phi_f I_{q_{ref}} \quad (\text{III. 1})$$

$$I_{q_{ref}} = \frac{2 C_{em-ref}}{3 p \Phi_f} \quad (\text{III. 2})$$

Notons aussi que l'annulation du courant $I_{d_{ref}}$ provoque une réduction du courant statorique, ce qui permet à la machine de fonctionner dans la zone de non-saturation et de minimiser les pertes joules.

III.2.2.1 Découplage

Le modèle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_r i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_q i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes « d » et « q », on est donc amené à implanter un découplage. La figure suivante représente le couplage entre l'axe « d » et « q »:

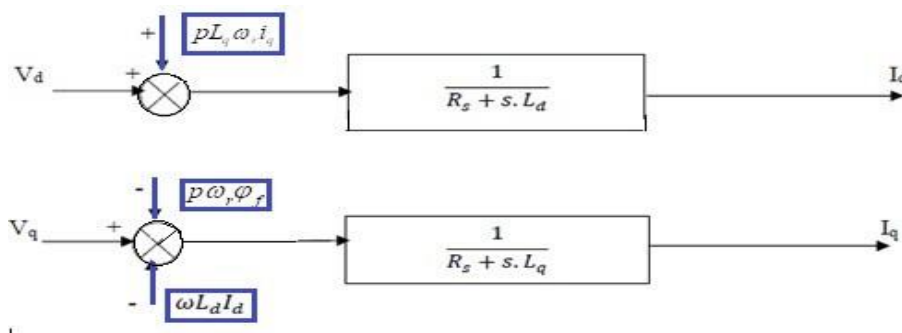


Figure III.2 : Schéma du découplage.

Avec :

III.2.2.2 Découplage par compensation

Avec :

$$\begin{cases} E_d = pL_q\omega_r i_q \\ E_q = p\omega_r(L_q i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

A partir des deux équations précédentes, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - E_d \\ V_q = V_{q1} + E_q \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)I_q \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

Les courants “ I_d ” et “ I_q ” sont maintenant découplés. Le courant I_d ne dépend que de V_{d1} et I_q ne dépend que de V_{q1} , leurs expressions sont données par les équations suivantes:

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{(R_s + sL_d)} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{(R_s + sL_q)} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Le contrôle des courants (I_d et I_q) consiste à réguler ces courants à partir des grandeurs de référence (désirées) par des régulateurs. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous. La référence du courant direct I_{dref} est imposée nulle afin de minimiser les pertes joules. Les références des courants I_{dref} et I_{qref} sont comparées séparément avec les courants réels de la machine I_d et I_q et les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI.

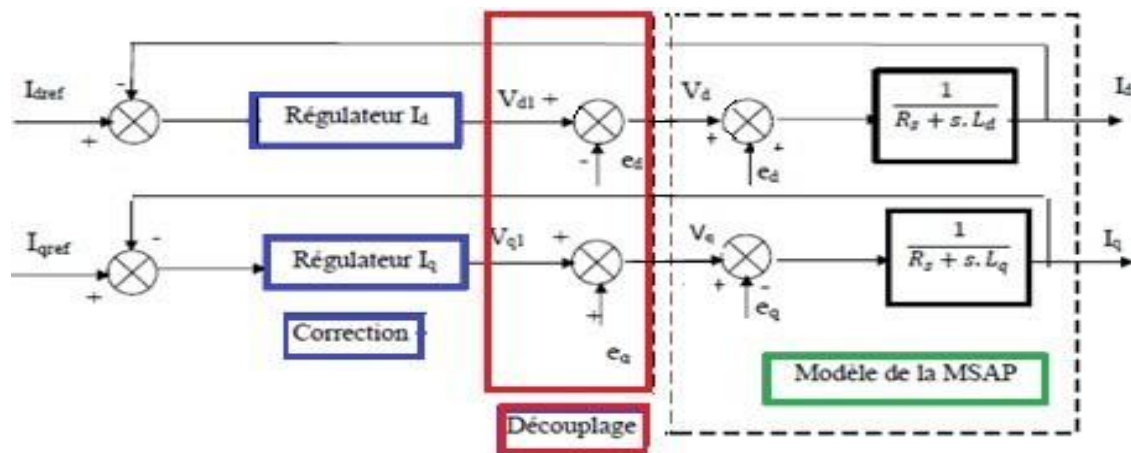


Figure III.3 : Découplage par compensation et régulation des courants.

III.2.2.3 Dimensionnement des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes (d, q), la régulation des courants sur l'axe "d" et "q" est faite par une seule boucle.

- **Régulateur du courant I(d-q) :**

La fonction de transfert du régulateur PI est :

$$G_r(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III. 8})$$

- **Régulateur du courant Iq :**

$$\begin{cases} K_{pq} = \frac{3L_q}{\tau_q} \\ K_{iq} = \frac{3R_s}{\tau_q} \end{cases} \quad \text{avec : } \tau_q = \frac{L_q}{R_s} \quad (\text{III. 9})$$

• Régulateur du courant i_d :

$$\begin{cases} K_{pd} = \frac{3L_d}{\tau_d} \\ K_{id} = \frac{3R_s}{\tau_d} \end{cases} \quad \text{avec : } \tau_d = \frac{L_d}{R_s} \quad (\text{III. 10})$$

III.3 Principe de la commande DPC

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur les erreurs numérisées S_p , S_q des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux comme illustré sur la figure (III.5), aussi bien que sur la position angulaire du vecteur tension estimé. En fonction de la valeur de cette position, le plan (α - β) est divisé en douze ou bien en six secteurs ou on doit associer à chaque secteur un état logique du redresseur [36]. La référence de la puissance active est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectué [37].

La configuration de la DPC classique est illustrée sur la figure (III.4) :

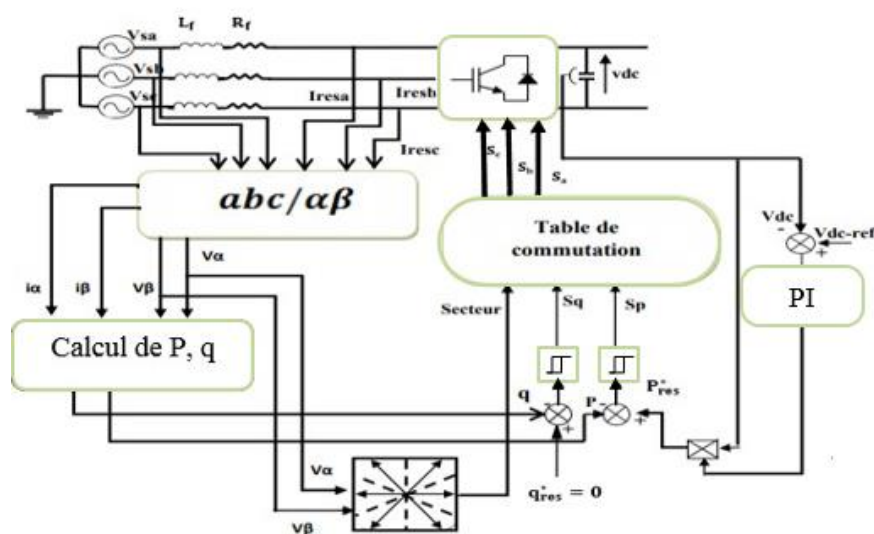


Figure III.4 : Configuration globale de la commande DPC classique.

Les erreurs de suivi de référence des puissances instantanées active et réactive, introduites dans deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux, permettent d'établir deux sorties logiques S_p et S_q qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (P ou q) et l'état "0" pour une diminution,

❖ Pour la puissance instantanée active :

$$\text{Si } \Delta P > H_p \Leftrightarrow S_p = 1$$

$$\text{Si } -H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta P}{dt} > 0 \Rightarrow S_p = 0$$

$$\text{Si } -H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ et } \frac{d\Delta P}{dt} < 0 \Rightarrow S_p = 1$$

$$\text{Si } \Delta P < -H_p \Rightarrow S_p = 0$$

❖ Pour la puissance instantanée réactive :

$$\text{Si } \Delta q > H_q \Rightarrow S_q = 1$$

$$\text{Si } -H_q \leq \Delta q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta q}{dt} > 0 \Rightarrow S_q = 0$$

$$\text{Si } -H_q \leq \Delta q \leq H_q \text{ et } \frac{d\Delta q}{dt} < 0 \Rightarrow S_q = 1$$

$$\text{Si } \Delta q < -H_q \Rightarrow S_q = 0$$

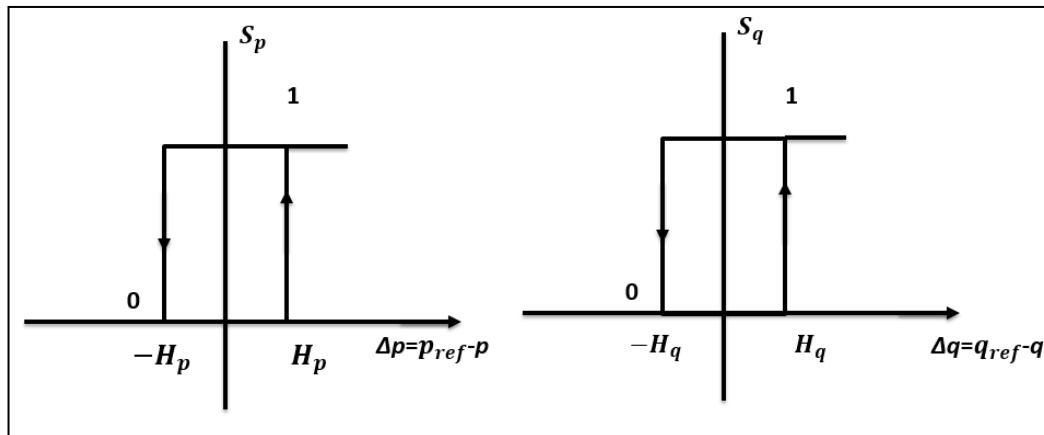


Figure III.5 : Principe des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

On sait que le calcul de la puissance active P est un produit scalaire entre les tensions et les courants, alors que la puissance réactive q peut être calculée par un produit vectoriel entre eux :

$$P_{\text{res}} = V_{\alpha} \cdot I_{\alpha} + V_{\beta} \cdot I_{\beta} \quad (\text{III. 11})$$

$$Q_{\text{res}} = V_{\beta} \cdot I_{\alpha} - V_{\alpha} \cdot I_{\beta} \quad (\text{III. 12})$$

III.3.1 Calcul de la position angulaire (θ_n) :

Le calcul de cette position nécessite la connaissance des composantes V_{α} et V_{β} , qui peuvent être calculées à partir de la transformation de Concordia qui va assurer le passage des tensions du réseau du plan triphasé abc vers le plan stationnaire α - β :

$$\theta = \arctan \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right) \quad (\text{III. 13})$$

III.4 Étude d'une DPC classique avec une table à six secteurs (DPC6)

III.4.1 Description du système

La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle se basant sur la position du vecteur de la tension de la source et des erreurs des puissances active et réactive.

Le système de commande est constitué de deux boucles : la boucle interne des puissances réglée par une table de commutation et la boucle externe de tension ou est implanté le régulateur PI fournissant à sa sortie la référence de la puissance active.

Notons que La référence de la puissance réactive est fixée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire.

III.4.2 Régulation de la tension continue

La régulation de la tension continue est assurée par un régulateur de type *PI*. Ce dernier corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. Le produit du courant continu de référence avec la tension continue (V_{dc}) donne la puissance active de référence (P_{ref}) [38].

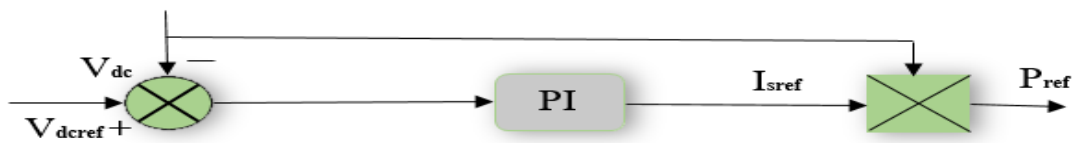


Figure III.6 : Régulation de la tension continue.

III.4.3 Table de commutation

Les signaux d'erreur numérisés et la position angulaire sont introduits dans une table de commutation dans laquelle sont mémorisés tous les états de commutation S_p et S_q du convertisseur qui prennent l'état "1" pour une augmentation de la variable contrôlée (P ou Q) et l'état "0" pour une diminution. La largeur de la bande d'hystérésis a une influence sur la performance du filtre actif parallèle en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

Tableau (III.1) : Table de commutation de la DPC a 6 secteurs [39].

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)	V0 (000)	V7 (111)
1	0	V5 (001)	V6 (101)	V1 (100)	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)
0	1	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)	V6 (101)	V1 (100)
0	0	V1 (100)	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)	V6 (101)

Pour cette table, les coordonnées stationnaires sont divisées en 6 secteurs, peuvent être numériquement exprimés comme suit :

$$(n - 2) \frac{\pi}{3} \leq \theta_n \leq (n - 1) \frac{\pi}{3}, n = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{III. 14})$$

III.5 Simulation numérique

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus par simulation avec le logiciel MATLAB/SIMULINK sur la chaîne de conversion éolienne connecté au réseau qui est composé d'une turbine éolienne à axe horizontal, des convertisseurs d'électronique de puissance connecté au réseau à travers un filtre RL. Afin d'extraire la puissance maximale de la turbine éolienne nous avons appliqué l'algorithme MPPT à cette dernière. Ensuite on à appliquer une commande vectorielle MLI pour le redresseur coté machine. Une commande directe de puissance (DPC classique) appliquée au convertisseur coté réseau.

Différentes simulations ont été effectuées pour évaluer les performances du système. Les différentes parties du système (Turbine, redresseur, onduleur, filtres, réseau) sont modélisées par des blocs séparés puis reliés d'une manière cohérente.

III.5.1 Résultats de simulation sur la DPC à six secteurs (DPC6)

❖ Pour des vitesses du vent sous forme de paliers

Afin d'étudier les performances du système en fonctionnement à puissance maximale avec la méthode MPPT et la robustesse de la commande DPC appliquée (6 secteurs), on applique un profil du vent de $V_p = 8\text{m/s}$ à l'instant ($t=2\text{s}$), après la vitesse du vent passe à 9 m/s et puis revient à 7m/s à l'instant ($t=4\text{s}$).

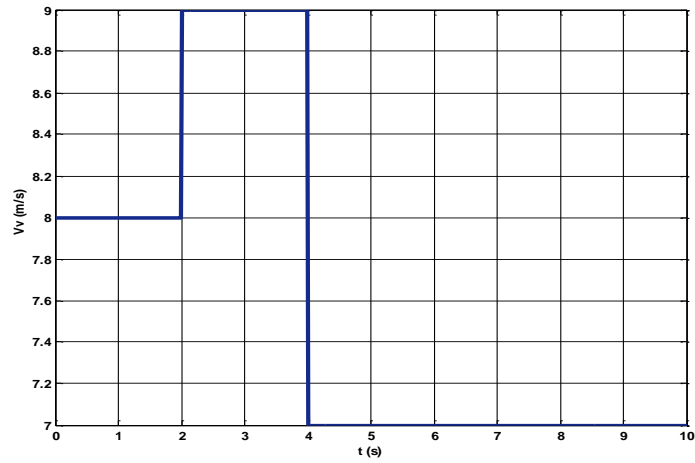


Figure III.7 : Profil de la vitesse du vent normal de la DPC (6).

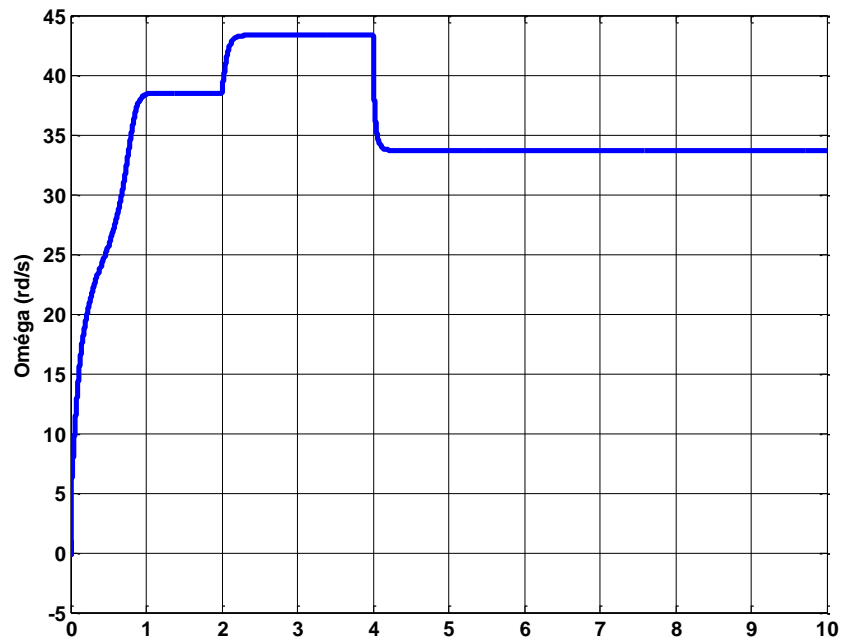


Figure III.8 : Évolution de la vitesse mécanique de la DPC (6).

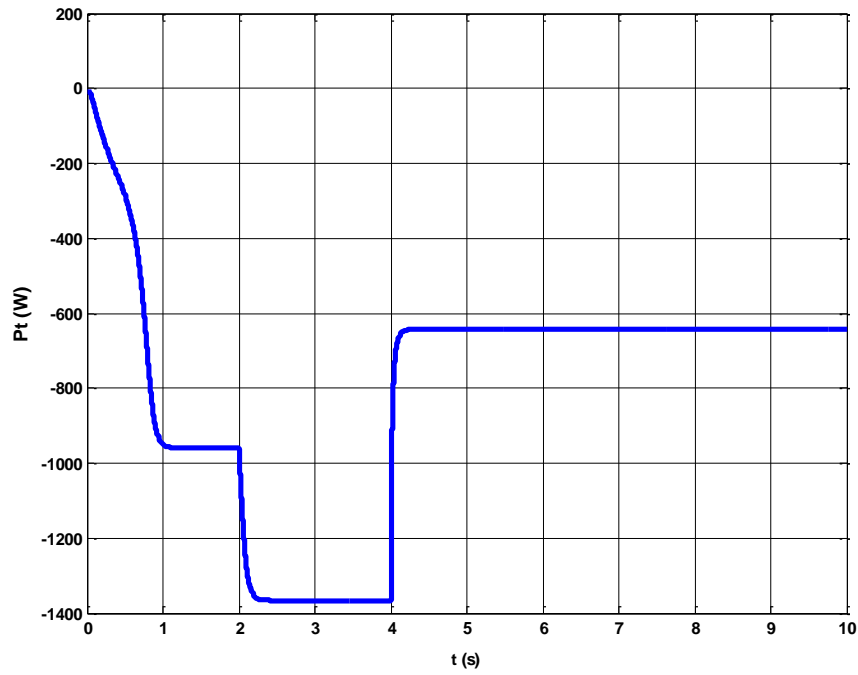


Figure III.9 : Evolution de la puissance turbine éolienne P_t de la DPC (6).

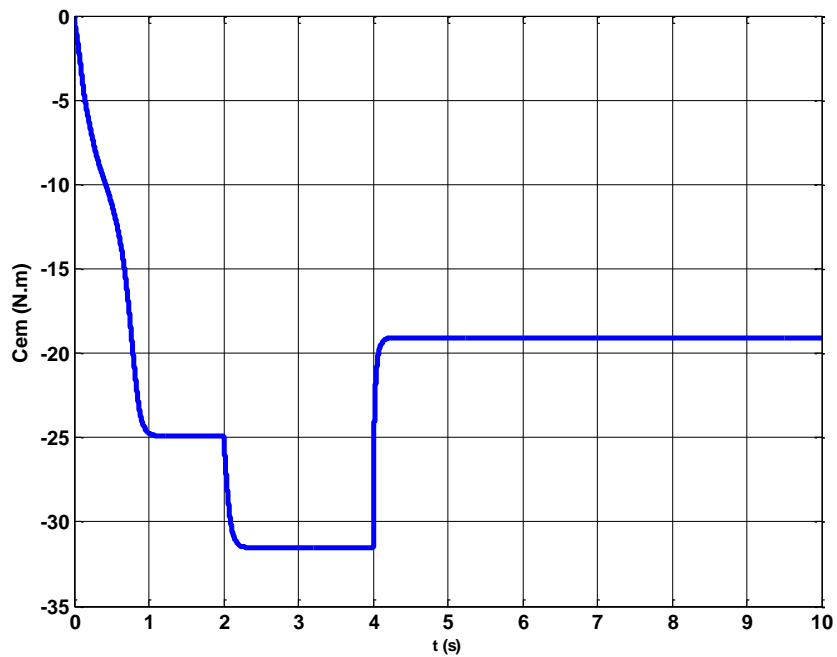


Figure III.10: Évolution du couple électromagnétique de la DPC (6).

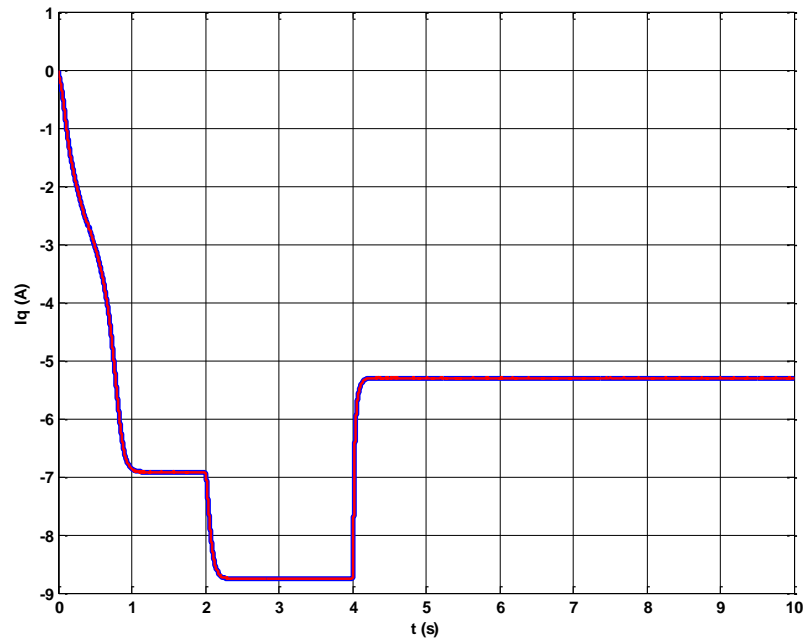


Figure III.11: Allure courant i_q de la DPC (6).

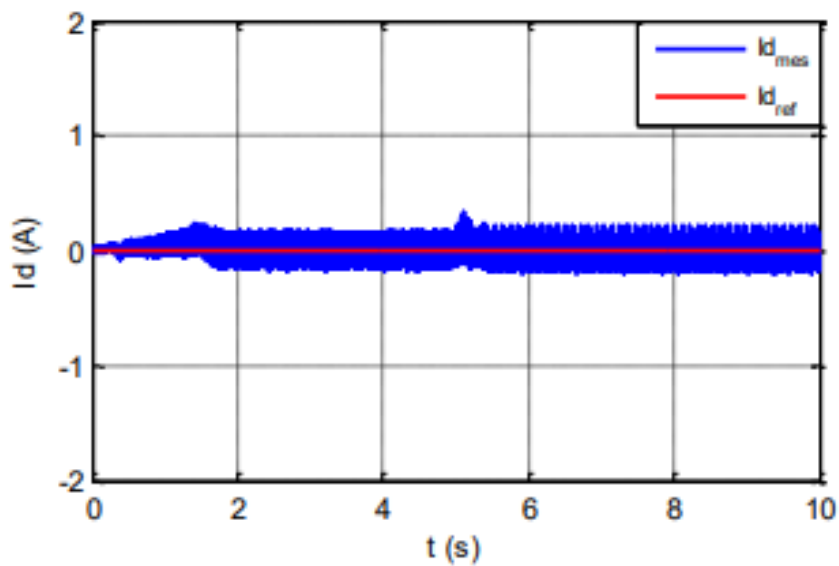


Figure III.12 : Allure courant i_d de la DPC (6).

Le courant i_q présente la même forme que le couple C_{em} (figure III.10), la génératrice synchrone est découplée, semblable à un moteur à courant continu, et le couple électromagnétique est proportionnel au courant i_q .

Les courants de la génératrice suivent l'évolution de la vitesse du vent, de la vitesse de l'éolienne et du couple électromagnétique.

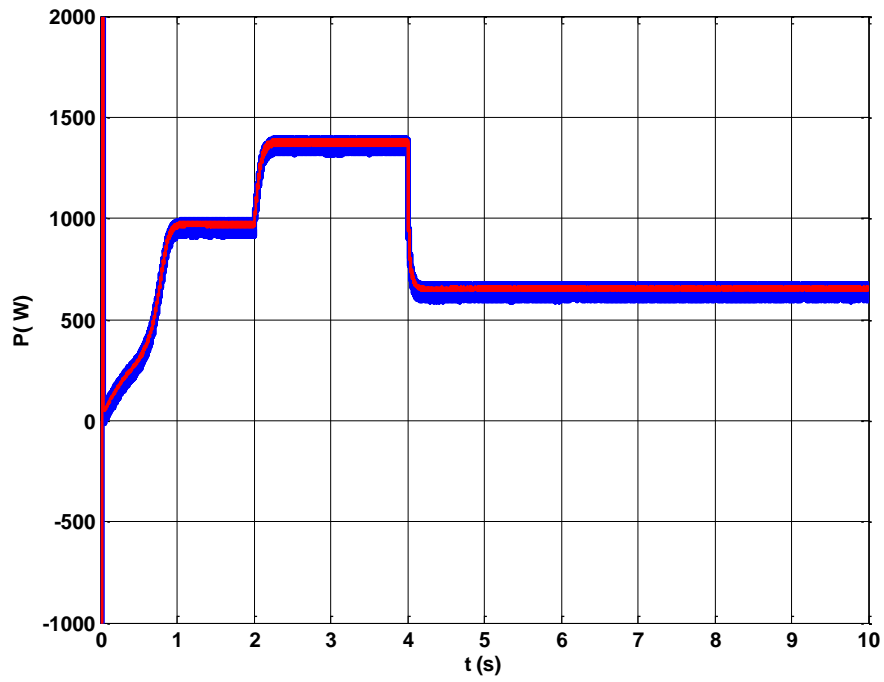


Figure III.13 : Évolution de la puissance active (P) de la DPC (6).

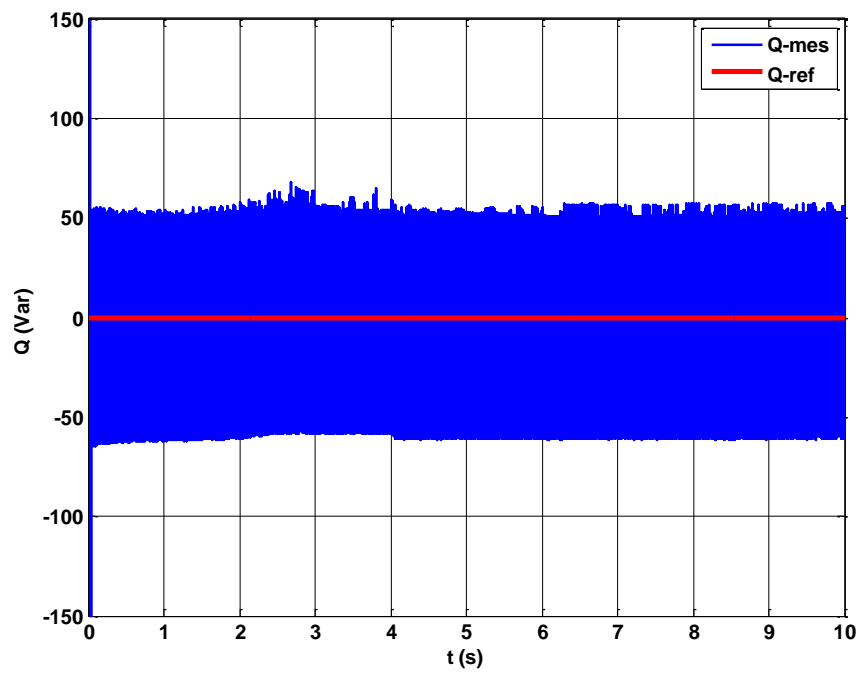


Figure III.14 : Évolution de la puissance réactive (Q) de la DPC (6).

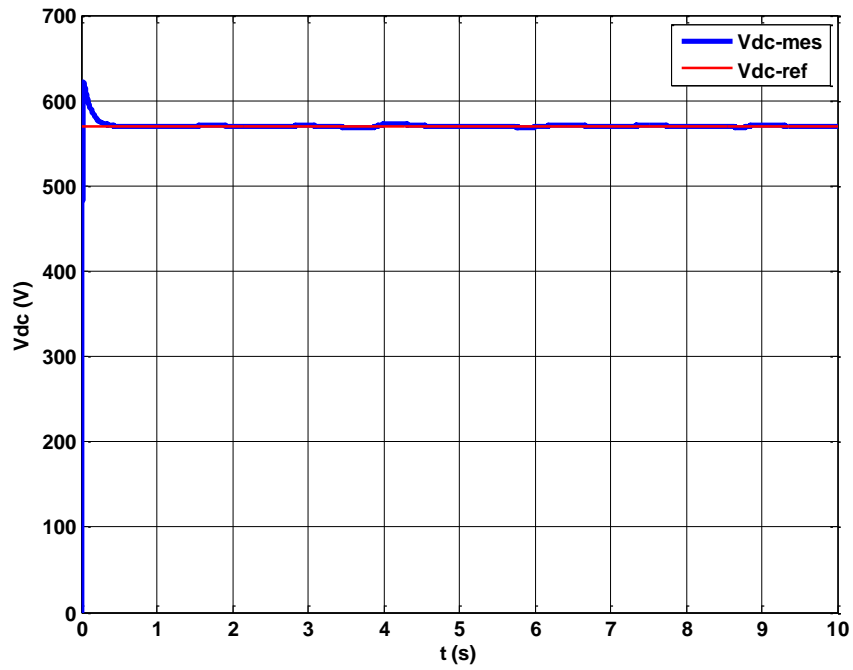
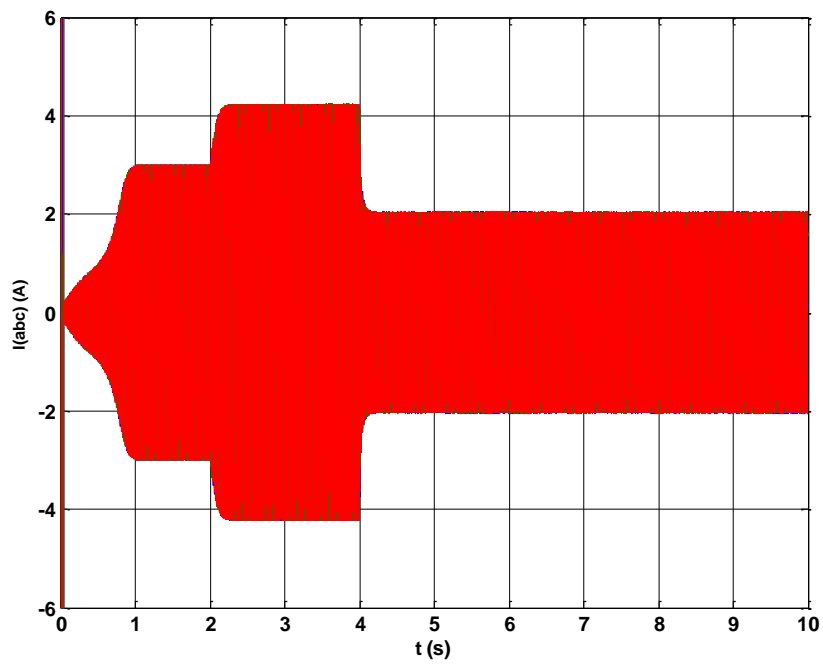
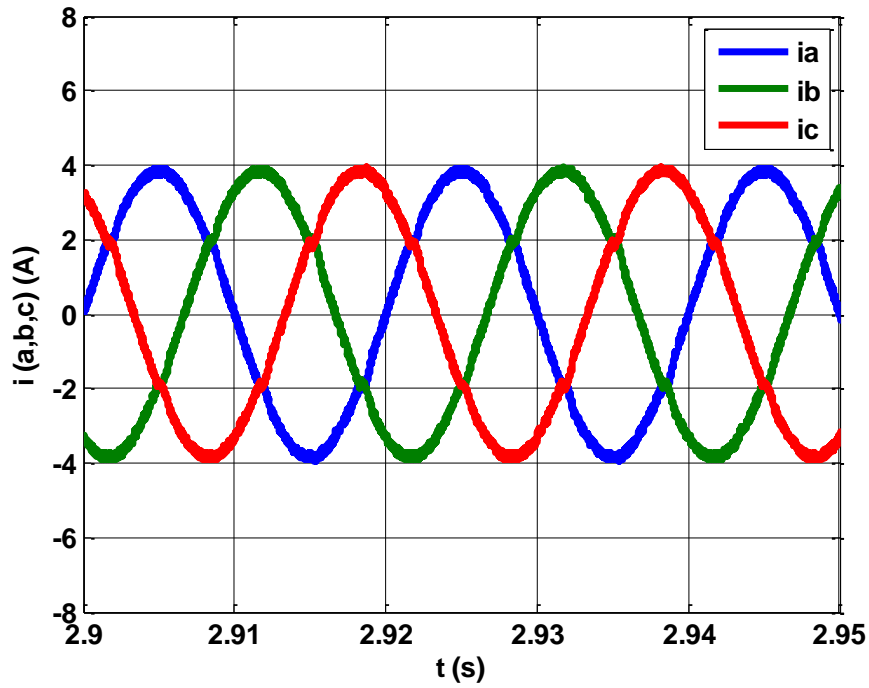


Figure III.15 : Allure de tension de bus continu **V_{dc}** de la DPC (6).



(a)



(b)

Figure III.16 : (a) Évolution des courants injectés au réseau $i(a, b, c)$ et (b) leur zoom de la DPC (6).

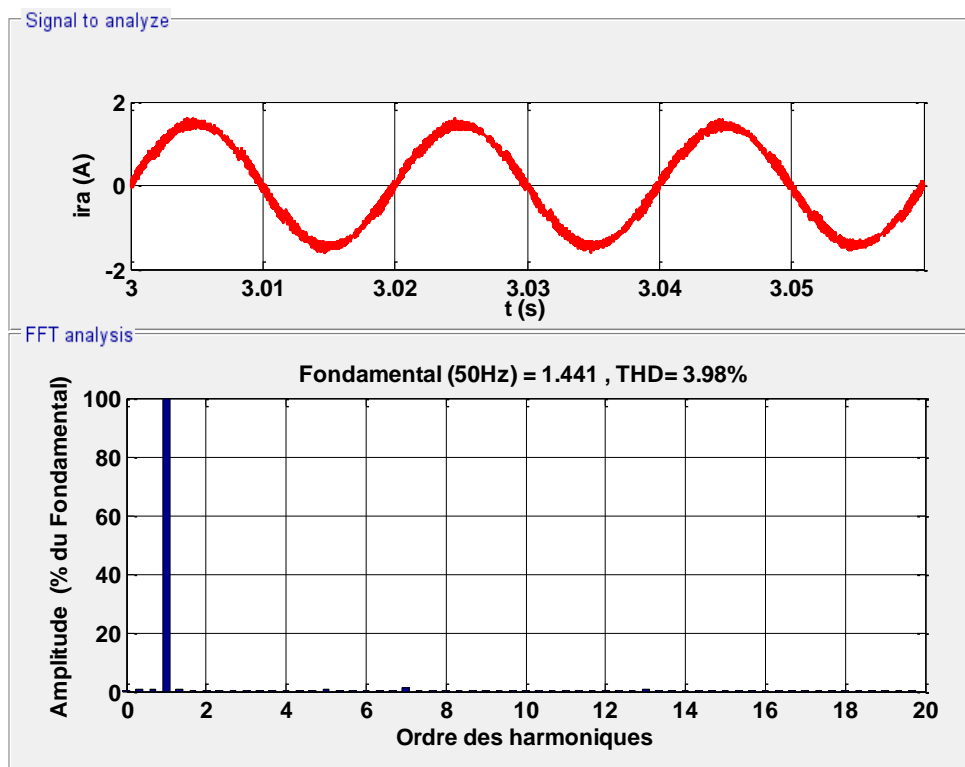


Figure III.17 : Allure du courant i_{ra} avec l'analyse de le THD de la DPC (6).

D'après (Figure III.8) et la (Figure III.7) on remarque que la vitesse de la turbine éolienne suit la variation de la vitesse du vent.

Les figures (III.9), (III.10) représentent respectivement la puissance mécanique fournie par la turbine éolienne et le couple électromagnétique en fonction du temps, on remarque que les deux allures sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

La figure (IV.17) représente le spectre d'harmonique de la (DPC 6) avec un taux de distorsion harmonique (THD) d'une valeur (3.98%).

❖ Pour profil du vent aléatoire

On applique un profil du vent aléatoire, les résultats de simulation sont représentés ci-dessous :

La figure (IV.18) montre le profil de la vitesse du vent en fonction du temps avec un caractère chaotique, la vitesse du vent varie entre (4,8 et 12 (m/s)).

La figure (IV.19) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, cette vitesse suit l'évolution de la vitesse du vent et présente une valeur moyenne autour de ($\Omega=47\text{rad/s}$).

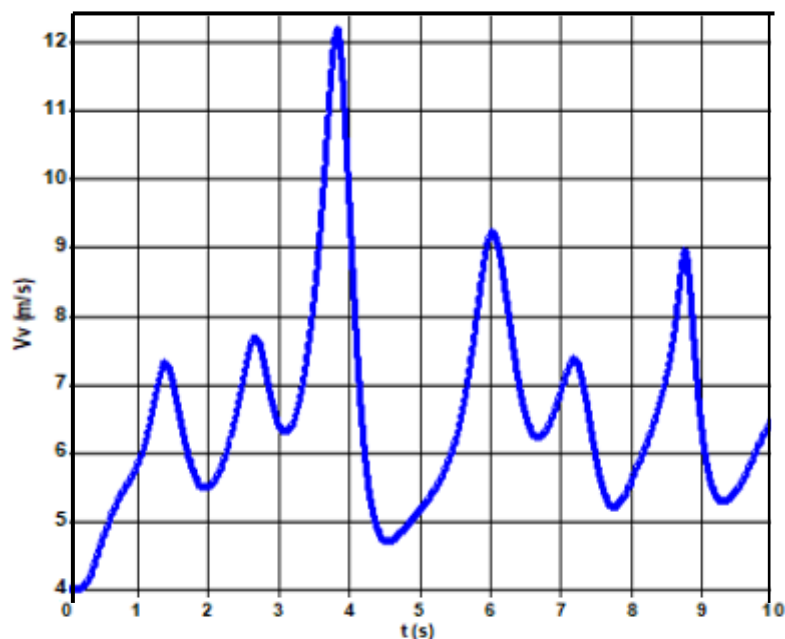


Figure III.18 : Profil de la vitesse du vent variable de la DPC (6).

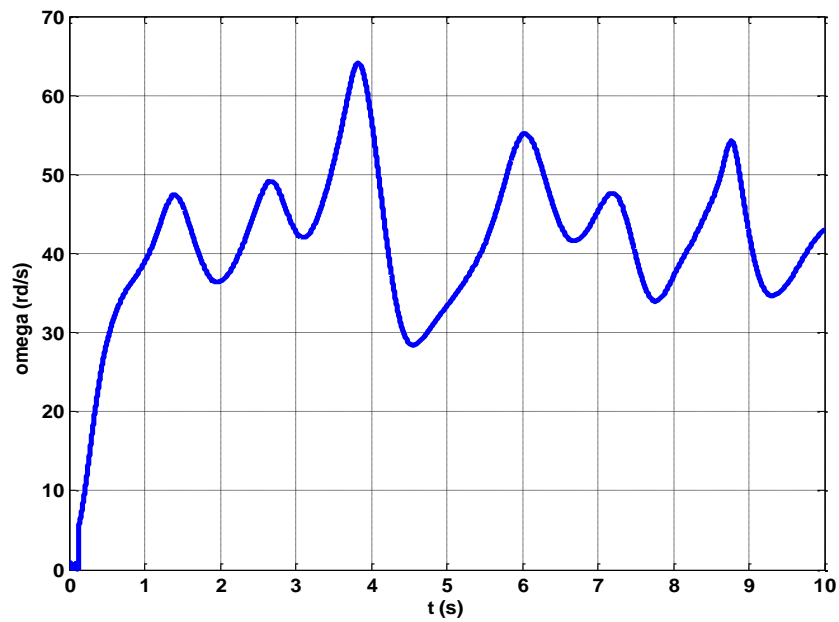


Figure III.19 : Évolution de la vitesse mécanique pour des vitesses variables du vent de la DPC
(6).

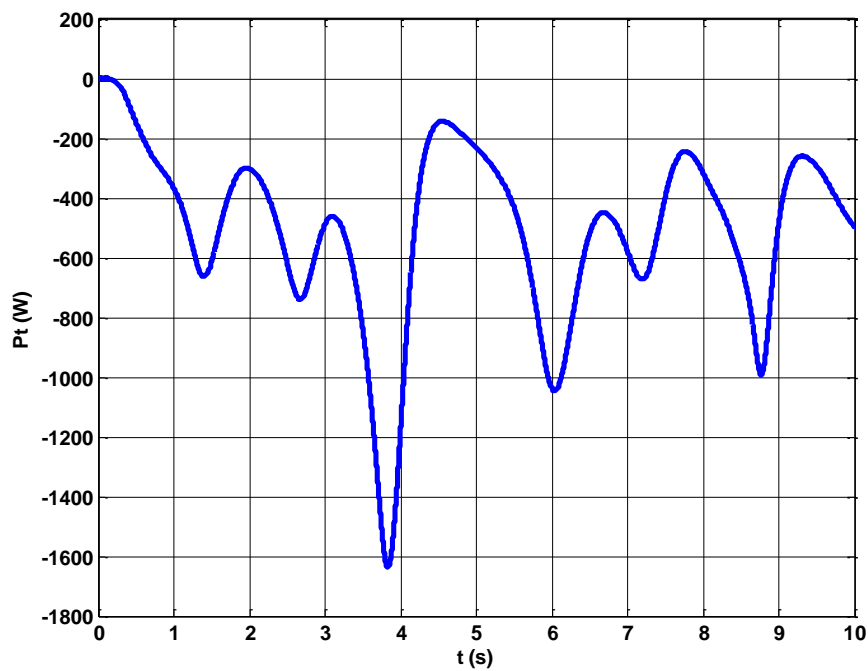


Figure III.20 : Évolution de la puissance éolienne pour des vitesses variables du vent de la DPC
(6).

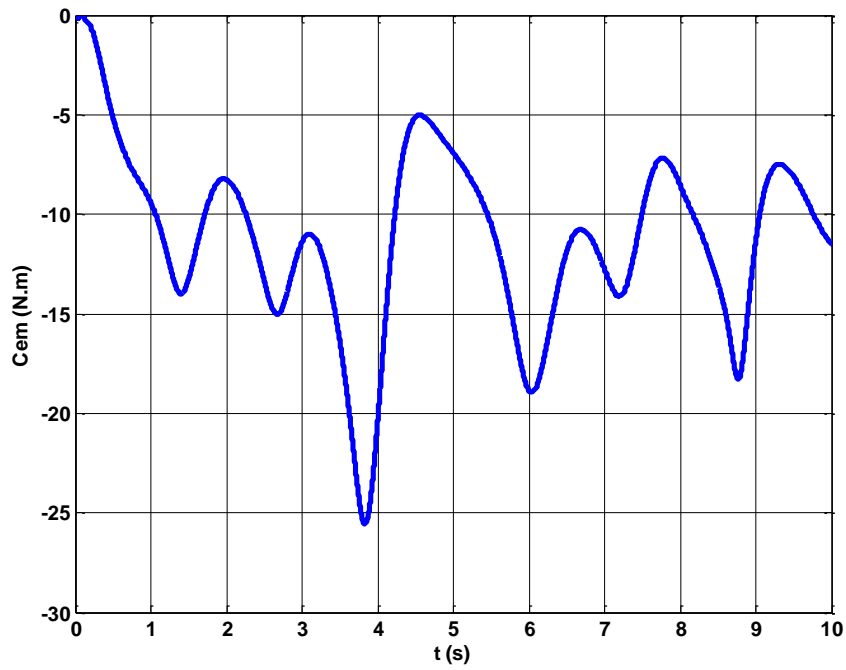


Figure III.21: Évolution du couple électromagnétique pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

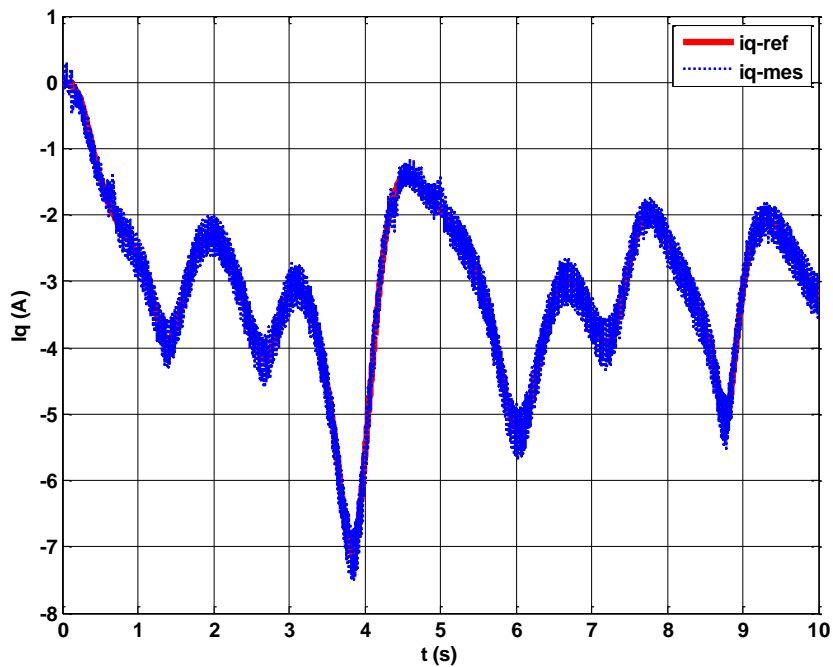


Figure III.22 : Allure de courant i_q pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

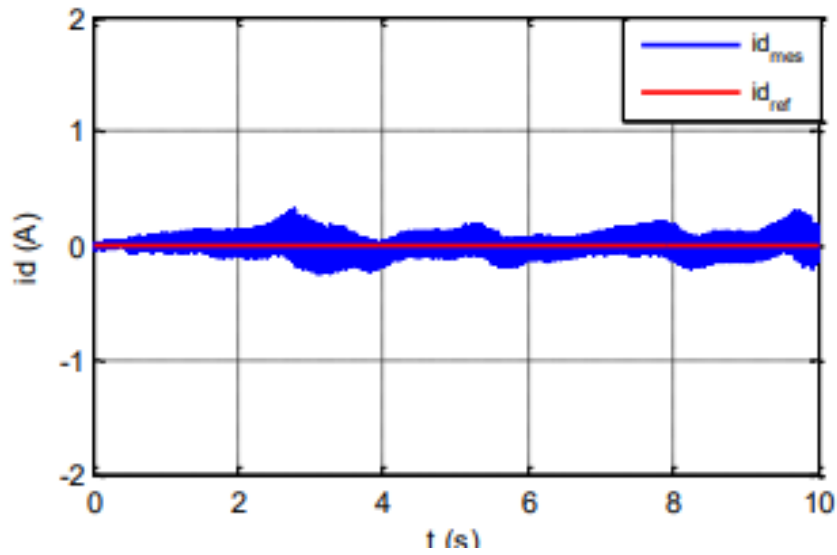


Figure III.23 : Allure du courant i_d pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

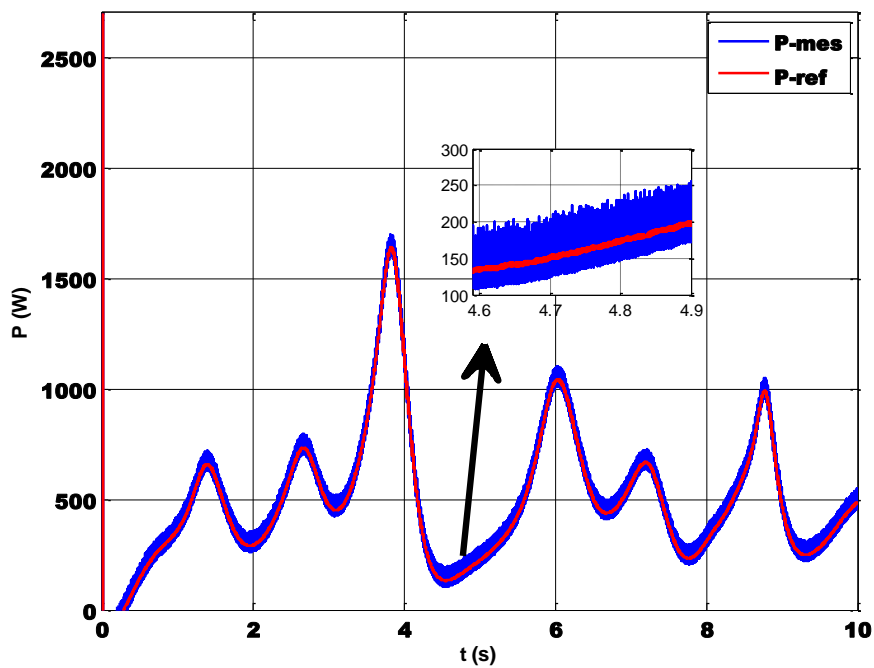


Figure III.24 : Évolution de la puissance active injectée au réseau pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

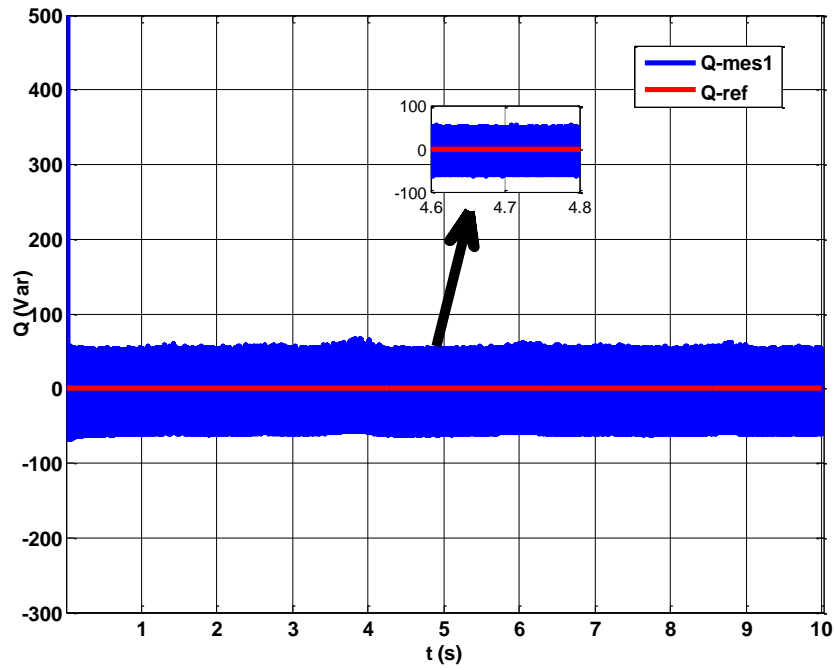


Figure III.25 : Évolution de la puissance réactive du réseau pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

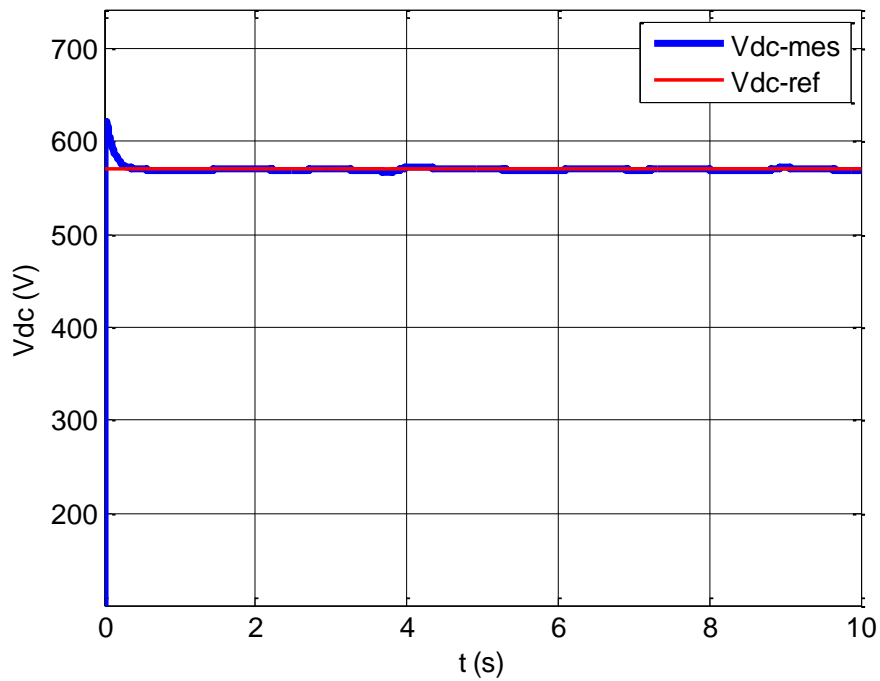
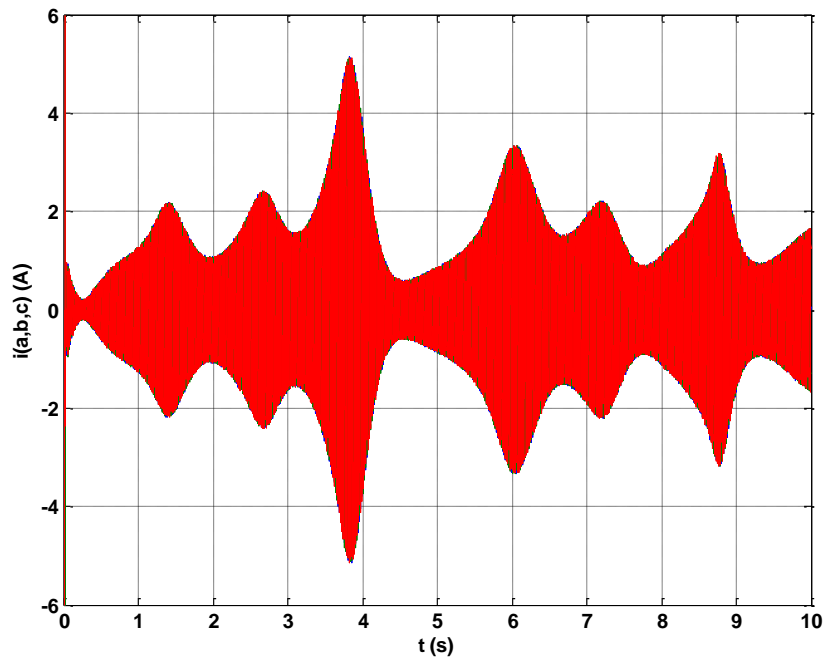
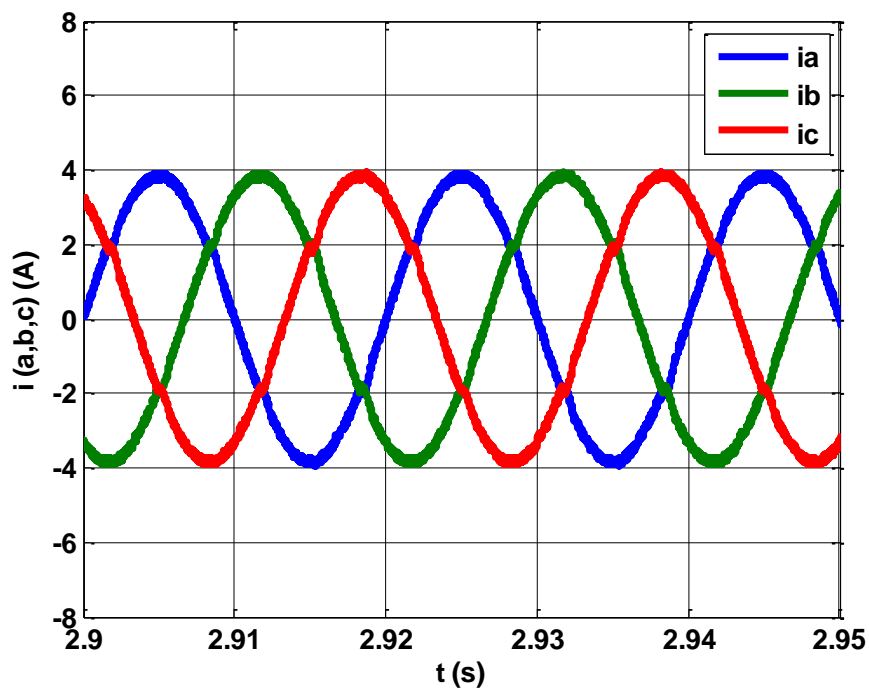


Figure III.26 : Allure de tension de bus continu **Vdc** pour des vitesses variables de la DPC (6).



(a)



(b)

Figure III.27 : (a) Evolution des courants **ia**, **b**, **c** injectés au réseau et (b) leur Zoom pour des vitesses variables du vent de la DPC (6)..

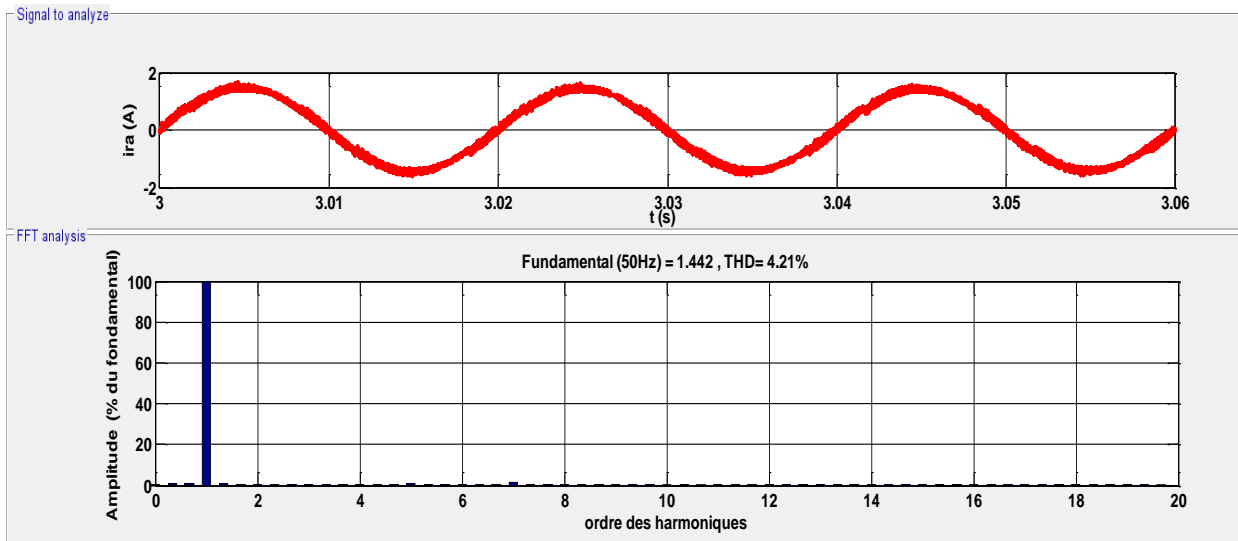


Figure III.28 : Allure du courant **ira** avec l’analyse de le **THD** pour des vitesses variables du vent de la DPC (6).

D’après (Figure III.19) et la (Figure III.18) on remarque que la vitesse de la turbine éolienne suit la variation de la vitesse du vent.

Les figures (III.20), (III.21) représentent respectivement la puissance mécanique fournie par la turbine éolienne et le couple électromagnétique en fonction du temps, on remarque que les deux allures sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

La figure (IV.28) représente le spectre d’harmonique de la (DPC 6) avec un taux de distorsion harmonique (THD) d’une valeur (4,21%).

Afin d’améliorer notre système, nous avons proposé une DPC de douze secteurs qui sera présentée et étudié.

III.6 Étude d’une DPC classique avec une table à douze secteurs (DPC12)

III.6.1 Description du système

Dans ce qui suit nous allons présenter une étude sur une DPC basée sur une table de commutation à douze (12) secteurs.

III.6.2 Table de commutation

Les variations de la puissance active et réactive en fonction du vecteur de commande appliqué sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau (III.2) : Table de commutation de la DPC à 12 secteurs [40].

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}

1	0	V6 (101)	V7 (111)	V1 (100)	V0 (000)	V2 (110)	V7 (111)	V3 (010)	V0 (000)	V4 (011)	V7 (111)	V5 (001)	V0 (000)
1	1	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)	V7 (111)	V7 (111)	V0 (000)	V0 (000)
0	0	V6 (101)	V1 (100)	V1 (100)	V2 (110)	V2 (110)	V3 (010)	V3 (010)	V4 (011)	V4 (011)	V5 (001)	V5 (001)	V6 (101)
0	1	V1 (100)	V2 (110)	V2 (110)	V3 (010)	V3 (010)	V4 (011)	V4 (011)	V5 (001)	V5 (001)	V6 (101)	V6 (101)	V1 (100)

En utilisant cette table de commutation, les états de commutation optimaux du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés comme il est montré sur le tableau (III.2).

A cet effet, les coordonnées stationnaires sont divisées en 12 secteurs, comme il est montré sur la Figure (III.29). Les secteurs peuvent être numériquement exprimés comme suit :

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n - 1) \frac{\pi}{6}, n = 1, 2, \dots, 12 \tag{III.18}$$

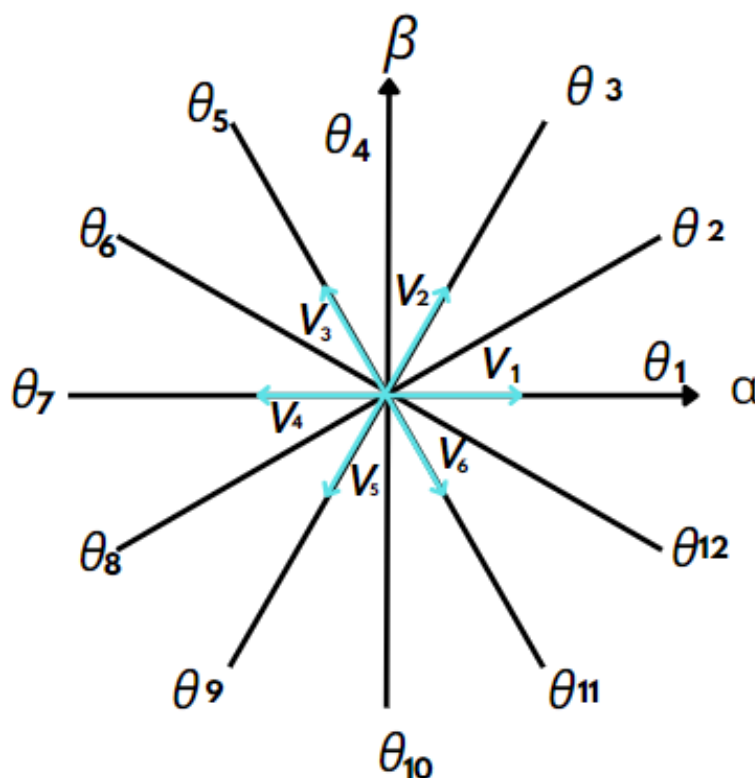


Figure III.29 : Plan (α, β) divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension.

III.6.3 : Résultats de simulation sur la DPC à 12 secteurs (DPC12)

❖ Pour des vitesses du vent sous forme de paliers

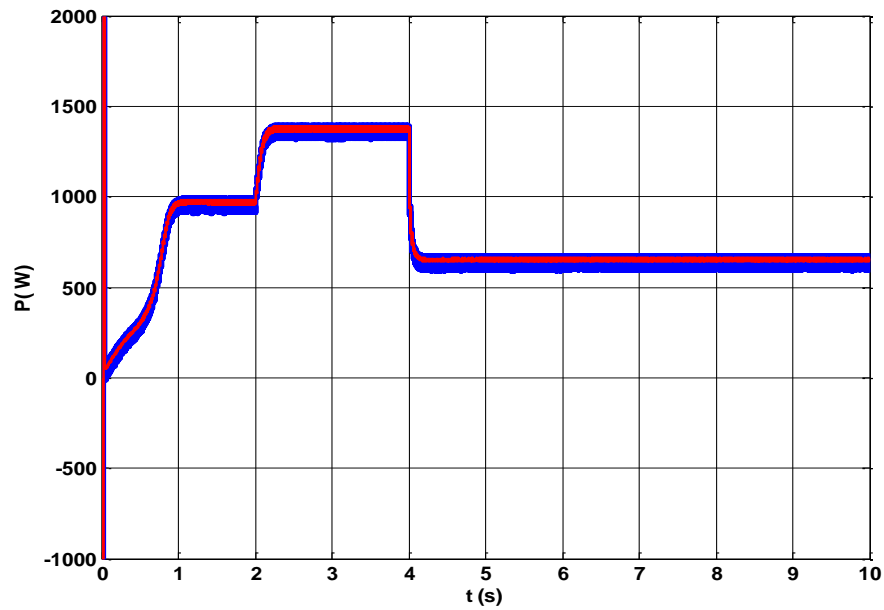


Figure III.30 : Allure de puissance active P de la DPC (12).

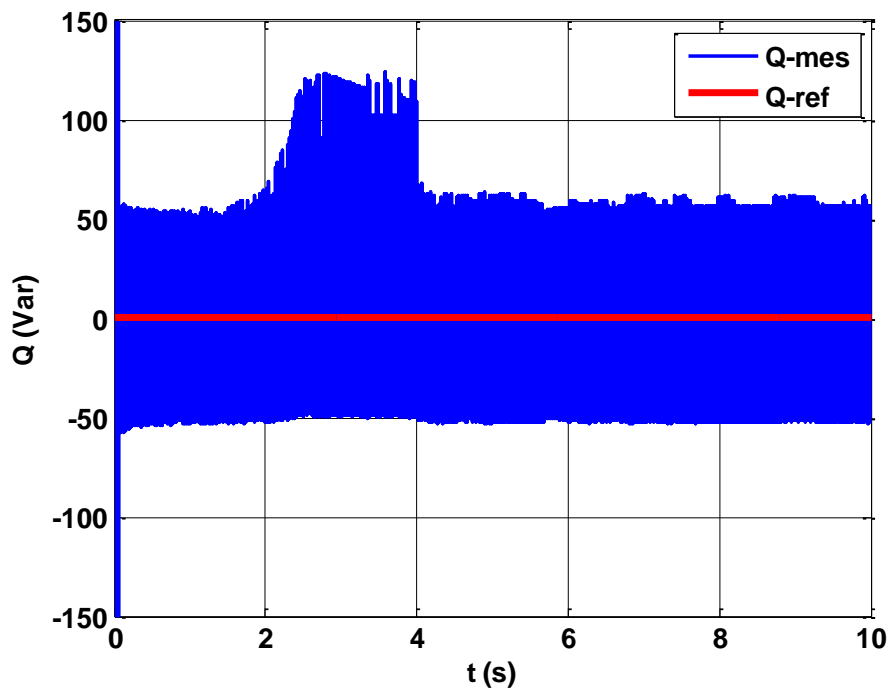


Figure III.31 : : Allure de puissance réactive Q de la DPC (12).

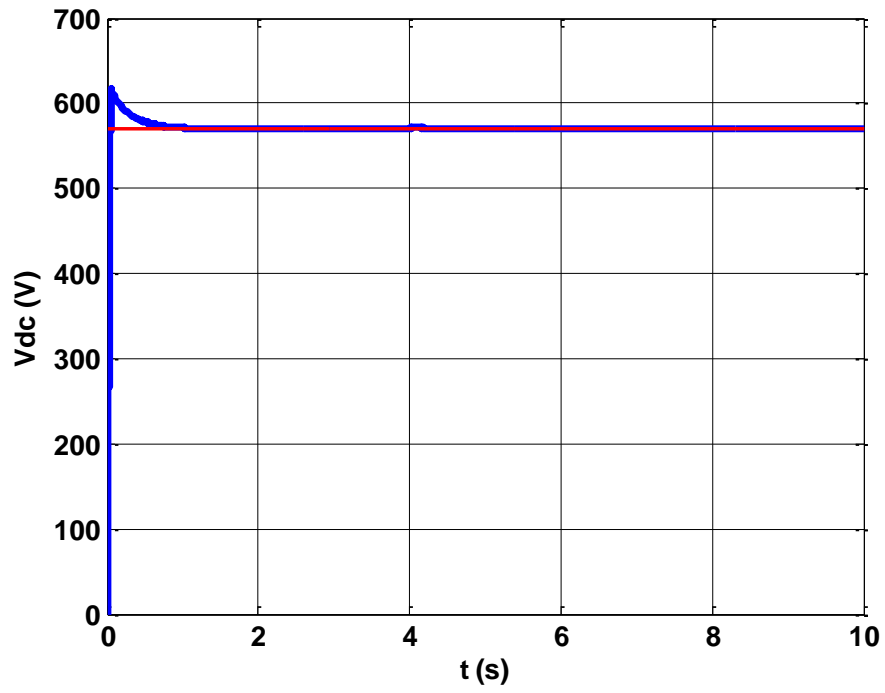
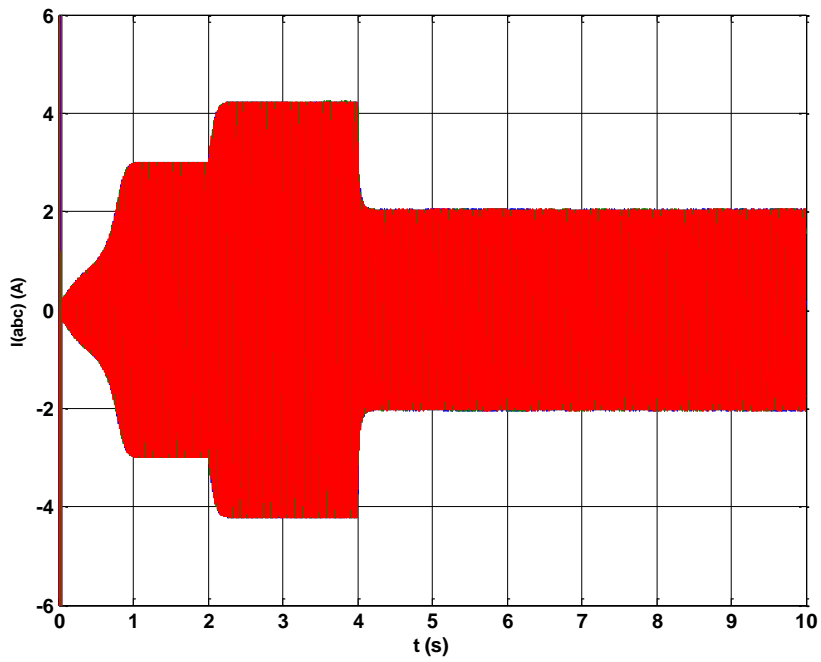
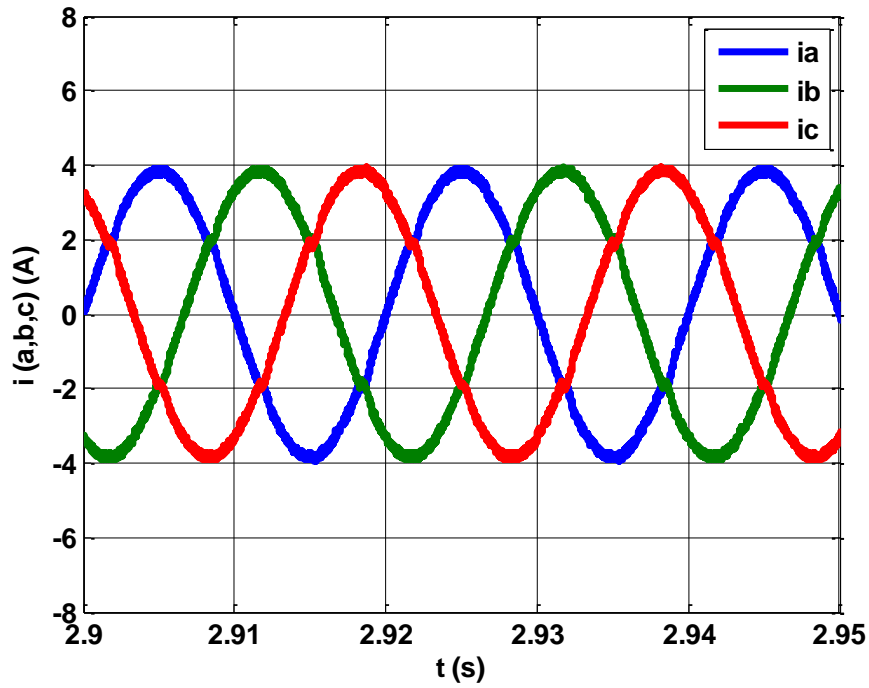


Figure III.32 : Allure de tension de bus continu V_{dc} de la DPC (12).



(a)



(b)

Figure III.33 : (a) Allure des courants i_a , b , c de la DPC (12) injectés au réseau et (b) leur zoom.

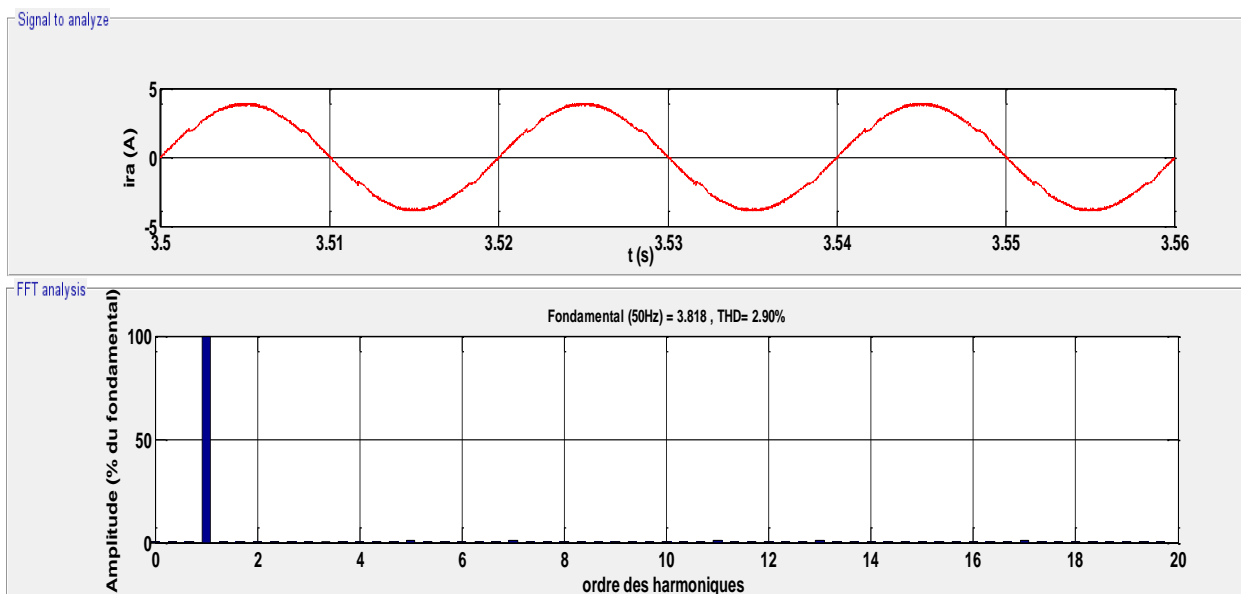


Figure III.34 : Allure du courant i_{ra} avec l'analyse de le THD de la DPC (12).

La figure (III.32) montre l'allure de la tension du bus continu Vdc, on remarque qu'elle présente un léger dépassement et stabilise alors la valeur de référence ($V_{dc-ref} = 570V$) appliquée lors de la commande, même lorsque la vitesse du vent change, la figure (Figure III.30) représente l'allure de la puissance active fournie au réseau, on constate que celle-ci remonte jusqu'à sa hauteur de référence, la figure (III.31) représente l'évolution de la puissance réactive stabilisée à zéro et confirme l'unicité du facteur de puissance .Selon la figure (III.34) on peut observer que le THD du courant est égal à 2.90 %.

❖ un profile de vent variable

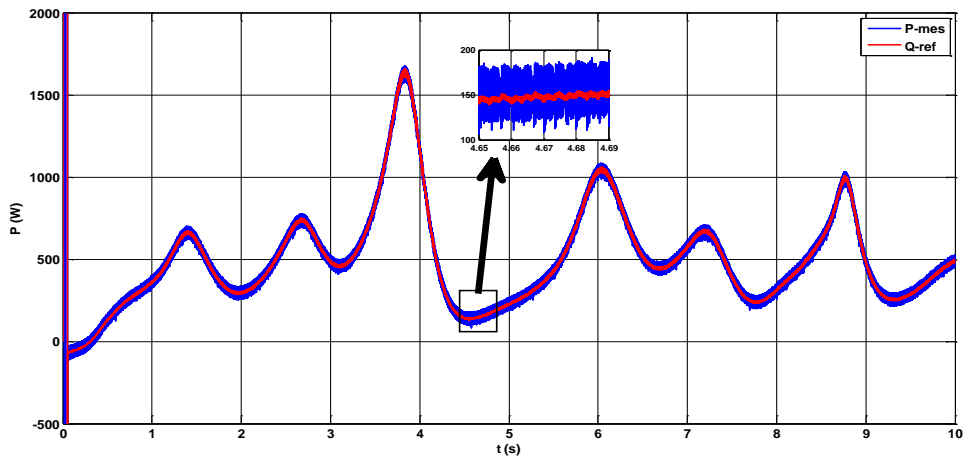


Figure III.35 : Évolution de la puissance active (P) pour des vitesses variables du vent de la DPC (12).

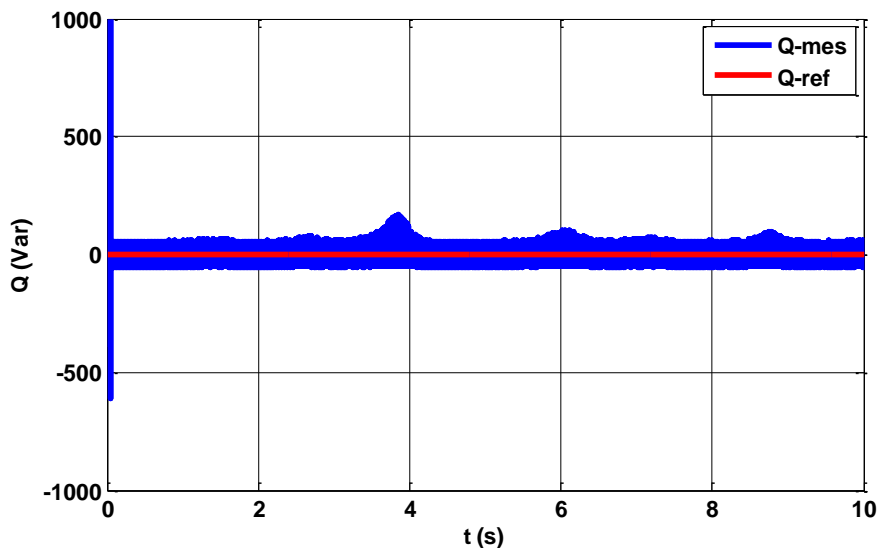


Figure III.36 : Évolution de la puissance(Q) pour des vitesses variables du vent de la DPC (12).

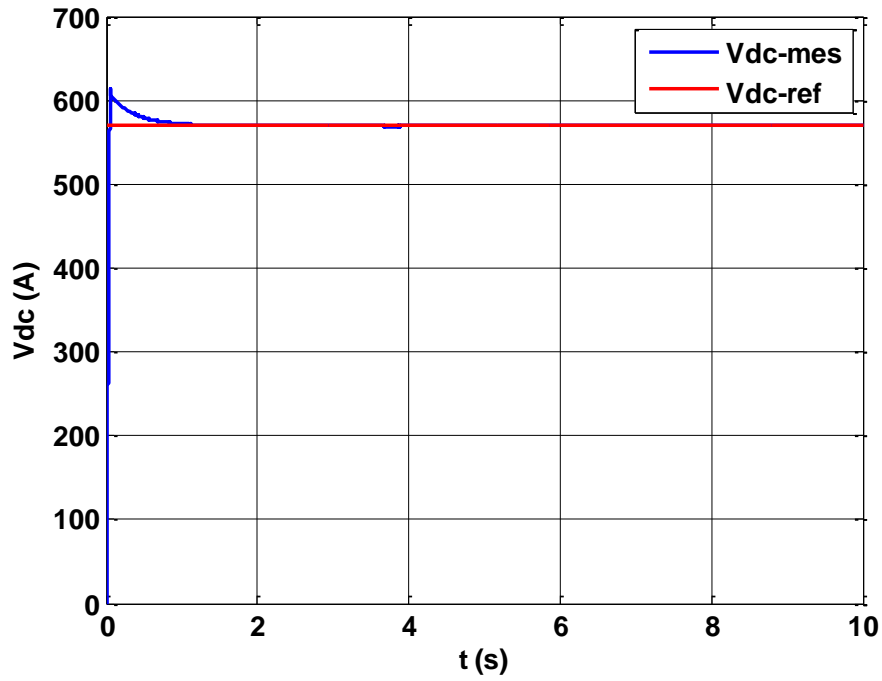
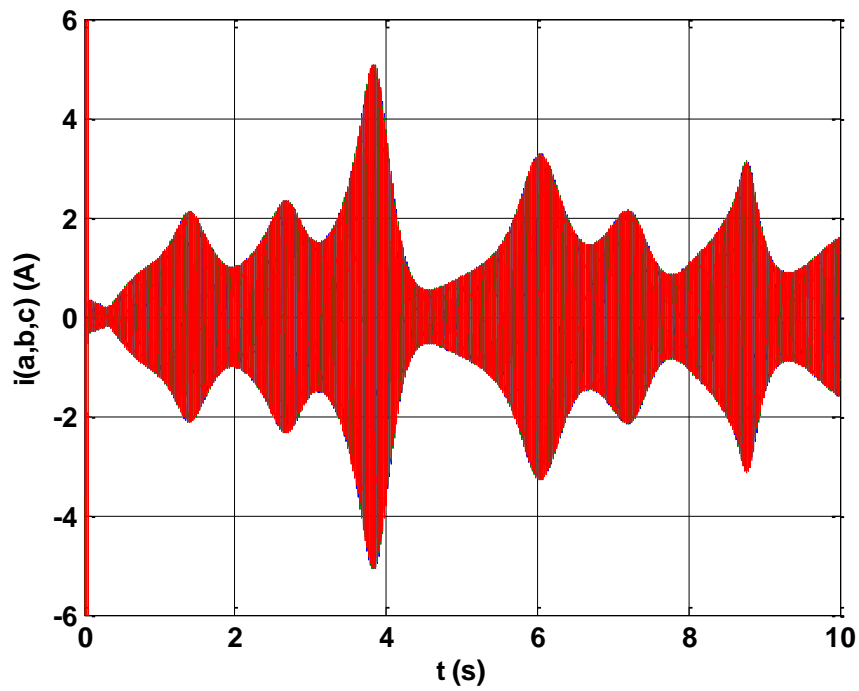
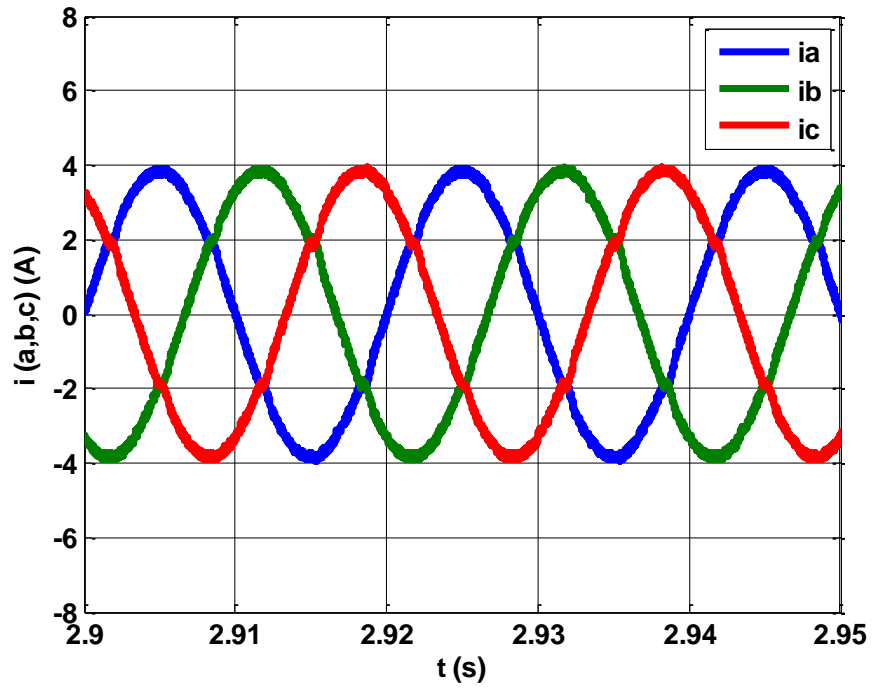


Figure III.37 : Allure de la tension de bus continu V_{dc} pour des vitesses variables du vent de la DPC (12).



(a)



(b)

Figure III.38 : (a) Évolution des courants i (a, b, c) et (b) leur Zoom injecté au réseau pour des vitesses variables du vent de la DPC (12).

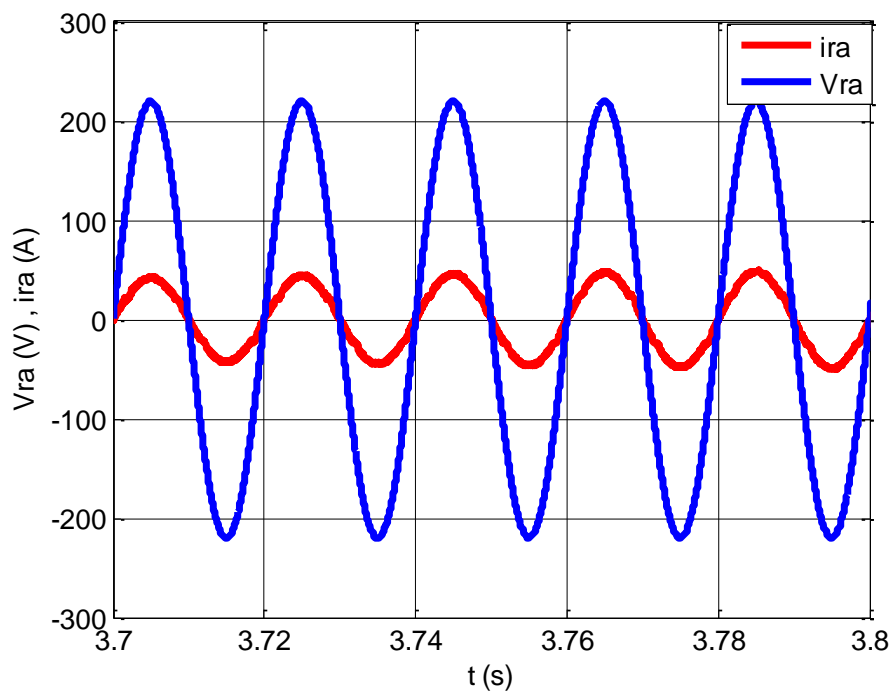


Figure III.39 : Allure du courant I_a et tension V_{ra} du réseau de la DPC (12).

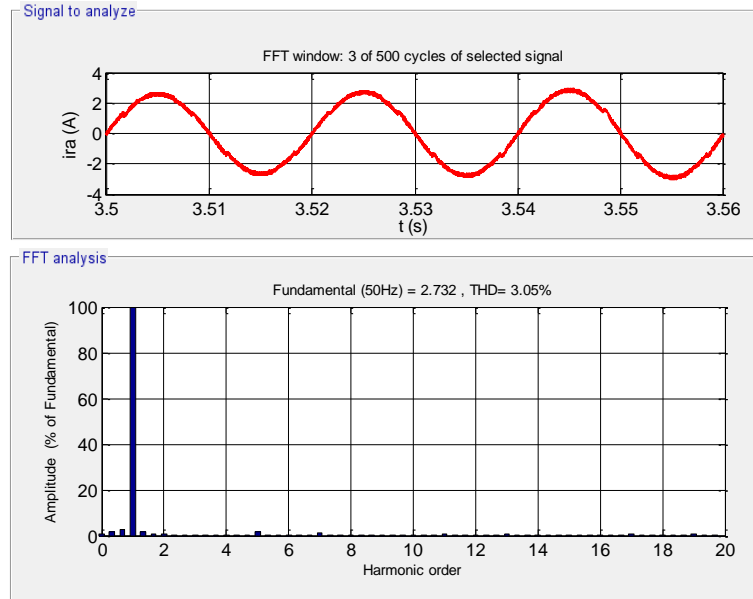


Figure III.40 : Allure du courant i_{ra} avec l’analyse de le THD pour des vitesses variables du vent de la DPC (12).

La figure (III.38) donne l’évolution des courants injectes au réseau, ces courants sont sinusoïdaux et en phase avec la tension du réseau (figure III.39), avec un bon taux de distorsion harmonique du courant de valeur (3.05%), comme le montre la figure (III.40).

III.7 Étude comparative

Tableau (III.3) : Taux de distorsions harmoniques obtenus.

Type de la DPC	DPC à six secteurs (6)	DPC à douze secteurs (12)
Vent forme de palier	3.98%	2.90%
Vent variable	4.21%	3.05%

En comparant les résultats obtenus à partir des deux études effectuées, on déduit que ceux réalisées avec la table à douze (12) secteurs présentent des performances meilleures que la table six (6) secteurs.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier le principe de la commande vectorielle à flux orienté ayant pour principe le découplage entre le couple électromagnétique et le flux. Avec

cette orientation du flux, nous avons obtenu un modèle découplé de la MSAP similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée. Pour bien contrôler le système nous avons appliqué une commande DPC : une à douze (12) secteurs et une autre à six (6) secteurs sur lesquelles nous avons mené une étude comparative.

En comparant les résultats obtenus à partir des deux études effectuées, on déduit que ceux obtenus avec la table à douze (DPC12) secteurs présente des performances meilleures que la table à six (DPC6) secteurs avec des taux de distorsion harmonique de 3,95 %, 3,05% respectivement. Cela veut dire qu'une légère amélioration a été obtenue. Pour bien améliorer notre système éolien, le chapitre suivant abordera une DPC floue qui sera proposée et appliquée à notre système à fin d'atteindre de meilleures performances.

CHAPITRE

4

***Contrôle directe de
puissance à base de la
logique floue***

IV.1 Introduction

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché [41]. Elle a été connue la première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle a été conçue au milieu des années soixante à l'université de Berkley en Californie par le professeur Lotfi Zadeh qui a introduit la notion des variables linguistiques et des ensembles flous. La première application expérimentale de cette technique de commande est celle réalisée par Mamdani [42].

Ce chapitre décrit le principe de l'association de la logique floue au concept de contrôle direct de puissance pour l'amélioration des performances d'un système éolien connecté au réseau. La dernière partie du chapitre sera consacrée à une étude comparative entre les (DPC) classiques et floue.

IV.2 Application de la logique floue dans la technique DPC

Dans la technique DPC classique, les états sélectionnés pour un bon contrôle en régime de fonctionnement normale sont les mêmes que ceux choisis pour une grande perturbation intervenant durant la variation de la commande de la puissance active et réactive. Il est donc difficile en utilisant un régulateur à hystérésis de prendre en considération tous les dynamiques des puissances instantanées actives et réactives pendant la phase de la génération des instants de commutation et ceci peut affecter les performances de la réponse du système en termes de stabilité et de la rapidité. Pour y remédier, la génération des instants de commutation doivent être basées sur les différents niveaux d'erreurs et ceci peut être réalisé en utilisant un contrôleur flou et une table de commutation qui sera remplacée par le système à inférence floue montré sur figure (IV.1) [43].

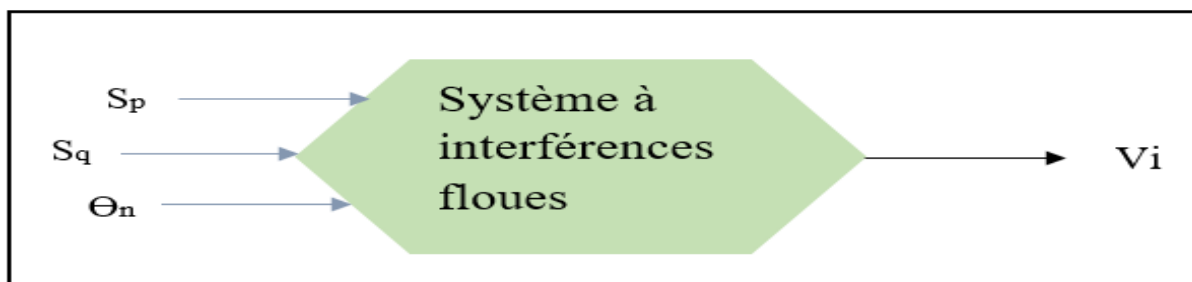


Figure IV.1 : Variables d'entrées et de sortie d'une table de commutation floue.

La configuration de la DPC floue est illustrée sur la figure (IV.2) :

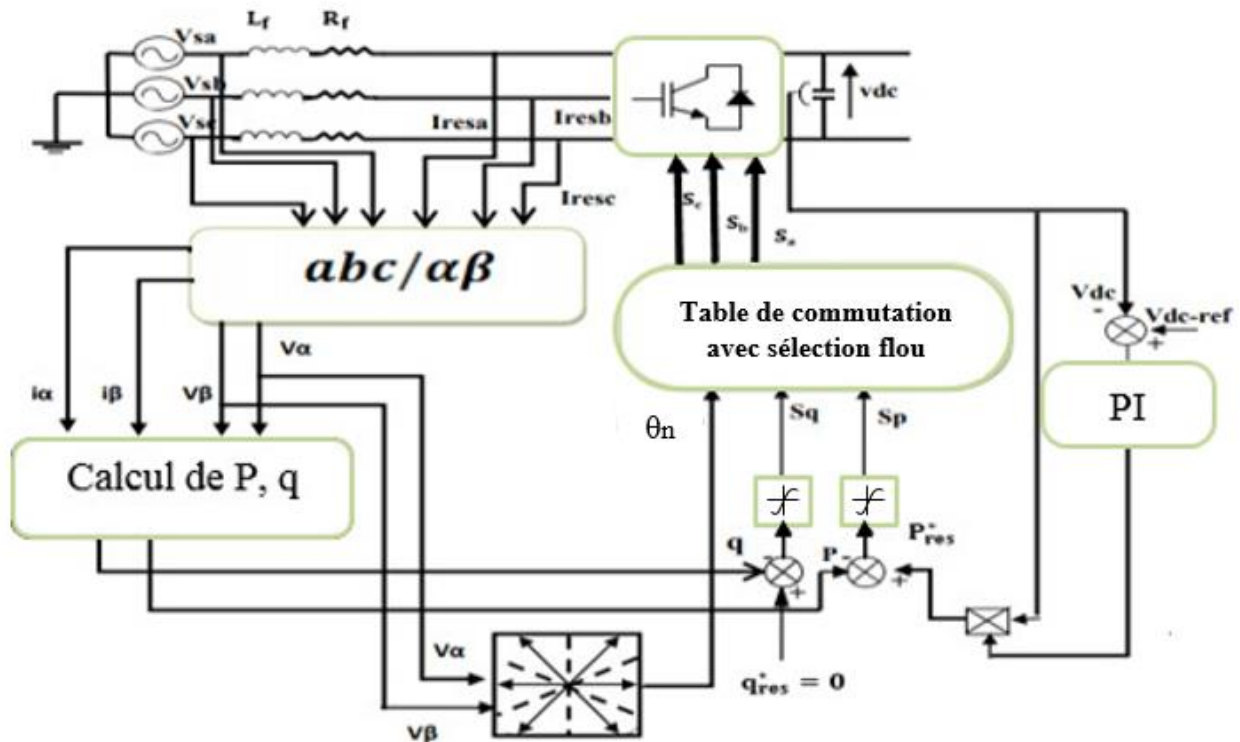


Figure IV.2 : Configuration globale de la commande DPC avec sélection floue.

IV.3 Variables floues et fonctions d'appartenance

L'entrée d'erreur de la puissance active est représentée par trois variables linguistiques : négative (N), zéro (Z) et positive (P). Les variables N et P sont représentées par la fonction d'appartenance trapézoïdale et Z par la fonction d'appartenance triangulaire, comme indiqué sur la figure (IV.3) :

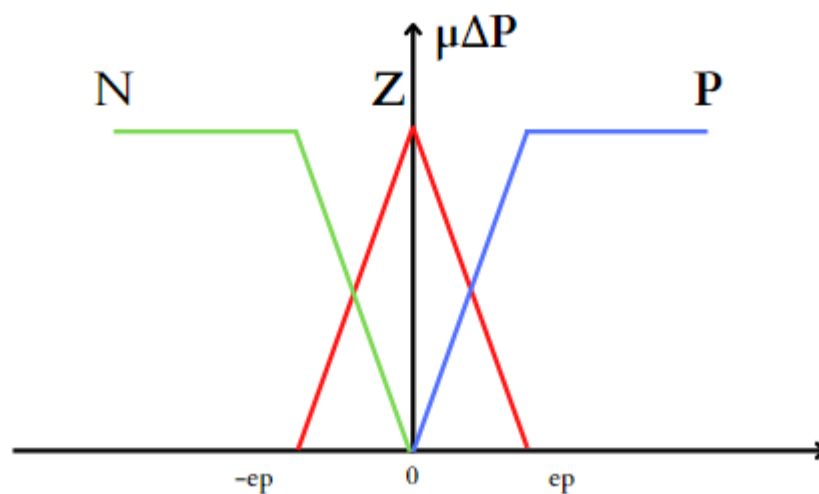


Figure IV.3 : Fonctions d'appartenance pour l'erreur de la puissance active Δp .

L'erreur de puissance réactive est minimisée, de sorte qu'elle est représentée par trois variables linguistique avec des fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdales ou Z

désigne l'environ de zéro de l'erreur de la puissance réactive (Figure .IV.4)

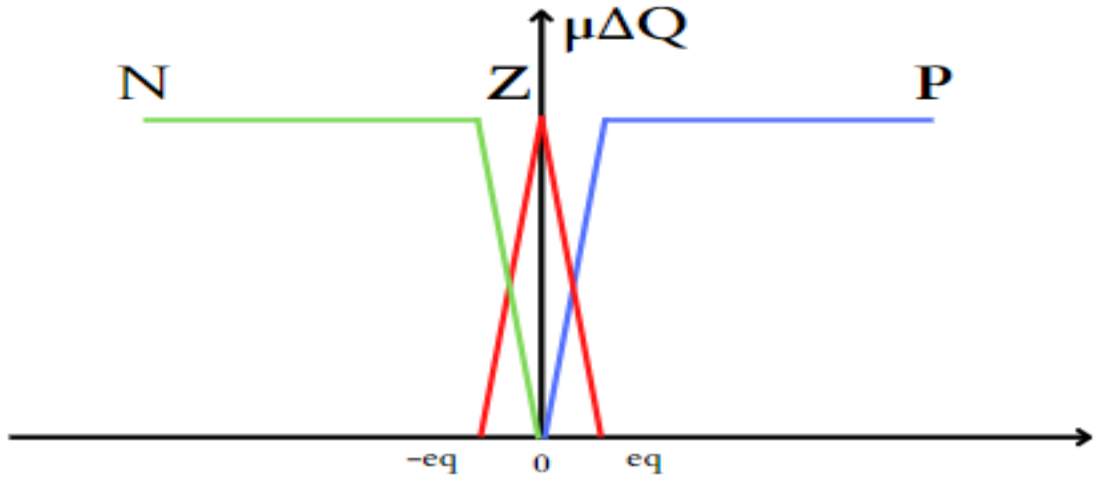


Figure IV.4 : Fonctions d'appartenances pour l'erreur de la puissance réactive Δq .

L'angle de vecteur tension est divisé en 12 secteurs pour plus de précision, il est représenté par 12 ensembles flous ($\theta_1 - \theta_{12}$). Tous les ensembles flous sont représentés par des fonctions d'appartenances triangulaires de 60° et un chevauchement de 30° avec des ensembles flous de voisinage. Ainsi, chaque ensemble flou fonctionne pour un angle de 30° . La figure (IV.5) illustre la répartition des fonctions d'appartenance entre 0° à 360° .

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n - 1) \frac{\pi}{6}, n = 1, 2, \dots, 12 \tag{IV. 1}$$

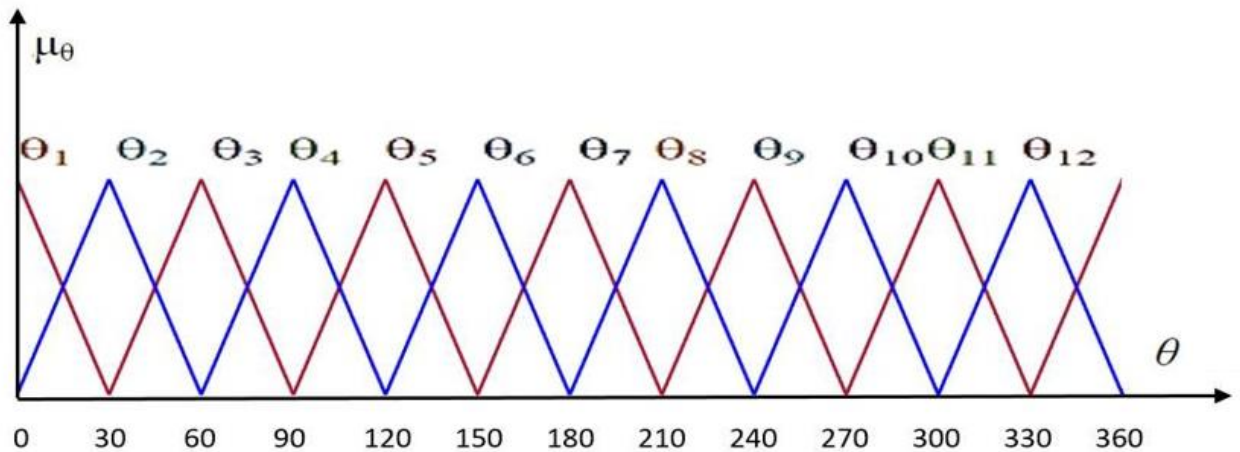


Figure IV.5: Fonctions d'appartenances pour la position du vecteur θ .

Le contrôleur flou fourni à sa sortie les vecteurs de tension suivant : ($V_0, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$) représentés par les fonctions d'appartenance de la figure (IV.6) ci-dessous.

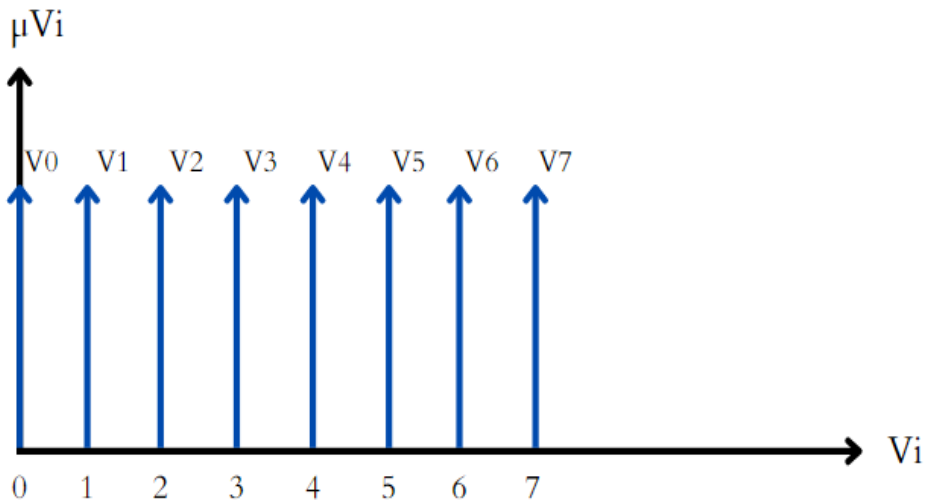


Figure IV.6 : Fonctions d'appartenances pour la variable de sortie V_i .

Chaque règle d'inférence peut être décrite en utilisant les variables Δp , Δq et θ ainsi que la variable de commande V qui caractérise l'état de commutation de l'onduleur. La i ème règle peut être exprimé par : Si S_p est A_i et S_q est B_i et θ est C_i alors V est V_i . L'ensemble des règles floues synthétisées pour tous les secteurs de la tension du réseau est indiqué dans la table de commutation floue.

IV.3.1 Table de commutation floue

La mise en œuvre effective de la logique floue est basée sur la table de commutation floue qui est développée à l'aide de connaissances expertes. Une fois les fonctions d'appartenance attribuées, des règles floues sont développées. Le tableau suivant montre la base de règles correspondante pour le contrôleur de logique floue.

Tableau (IV.1). Table de commutation floue [43].

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
N	N	v6	v1	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6
	Z	v1	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6	v6
	P	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6	v6	v1
Z	N	v6	v1	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6
	Z	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0
	P	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6	v6	v1
P	N	v5	v6	v6	v1	v1	v2	v2	v3	v3	v4	v4	v5
	Z	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0	v7	v0
	P	v2	v3	v3	v4	v4	v5	v5	v6	v6	v1	v1	v2

Le schéma du contrôleur flou est mis en œuvre sous Matlab / Simulink, en utilisant la méthode d'inférence de Mamdani basé sur la décision min-max. Le critère du maximum est utilisé pour la défuzzification.

IV.4 Résultat de simulation

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation de la DPC floue à douze secteurs. Les puissances actives et réactives sont correctement contrôlées durant tous les secteurs comme illustré sur les figures (IV.7) et (IV.8) respectivement. Les courants absorbés sont quasi-sinusoïdaux et en phase avec les tensions de ligne. La tension V_{dc} est très bien régulée (figure (IV.9), elle suit sa valeur de référence quel que soit les variations de la du vent.

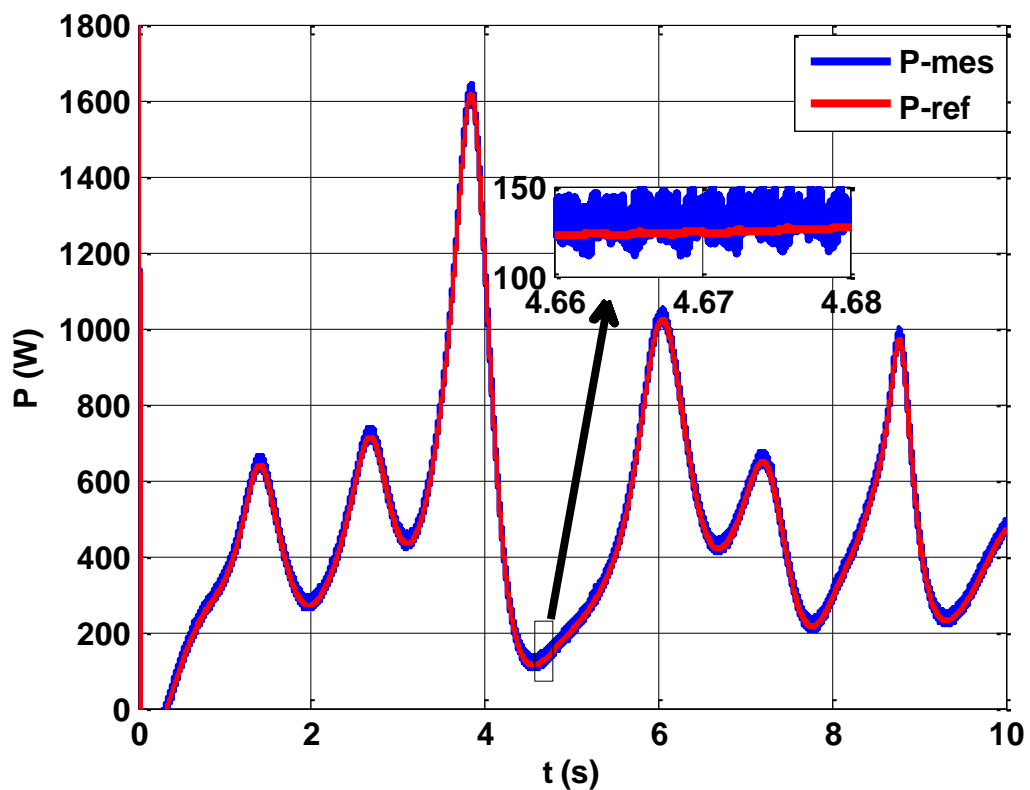


Figure IV.7 : Evolution de la puissance active P de la DPCfloue.

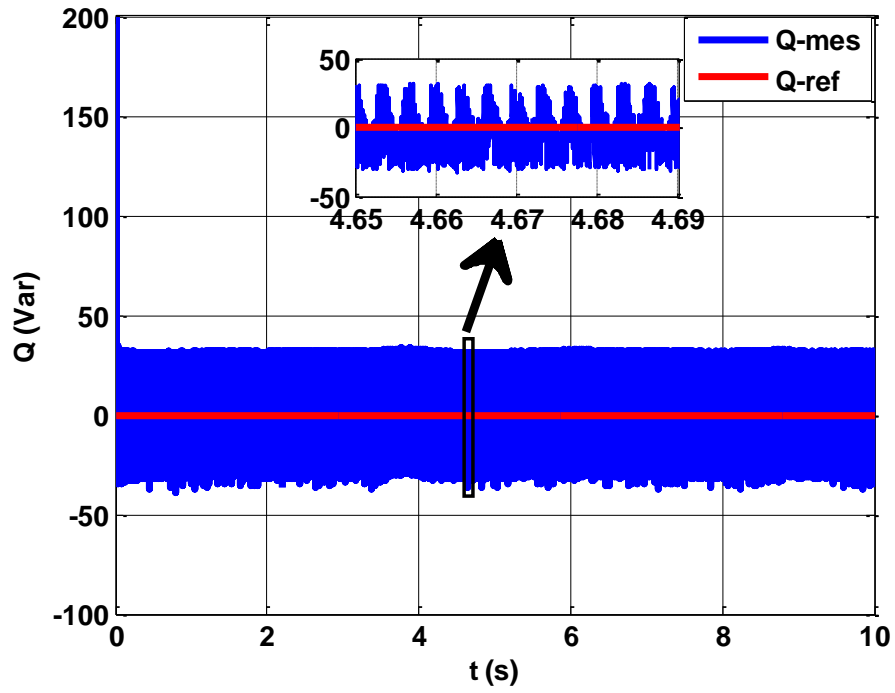


Figure IV.8 :Évolution de la puissance réactive Q de la DPC floue.

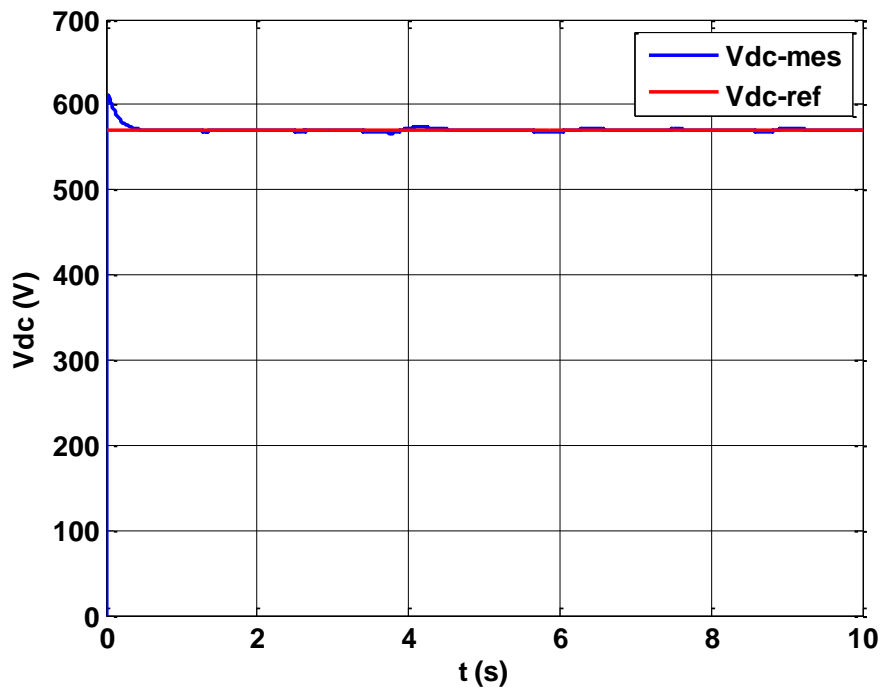


Figure IV.9 : Allure de la tension V_{dc} de la DPC floue.

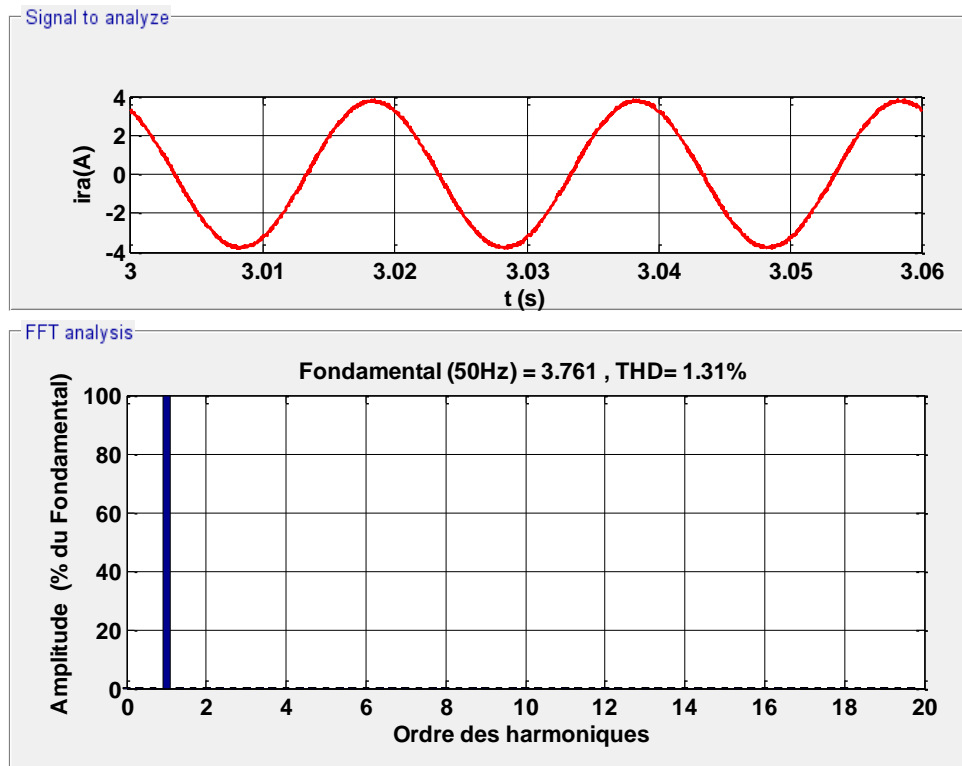


Figure IV.10 :Allure du courant **ira** avec l’analyse de le **THD** de la **DPC** floue.

IV.5 Etude comparative

Tableau (IV.2) : Taux de distorsions harmoniques obtenus.

Type de la DPC	DPC classique à six secteurs (DPC6)	DPC classique à douze secteurs (DPC12)	DPC à base de la logique floue
THD	3.95%	3.05%	1.32%

Les résultats obtenus à partir des trois études effectuées montrent clairement que ceux réalisées avec la commande par la logique floue présentent des performances meilleures que la DPC à douze secteurs et la DPC à six secteurs (Tableau IV.2).

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe la DPC floue pour améliorer les performances du système étudié. Après avoir simuler et comparer les résultats des deux commandes de la DPC classique et la floue, on déduit que cette dernière offre de meilleures performances. En effet, La puissance produite correspond à celle injectée au réseau avec un facteur de puissance unitaire et un taux de distorsion harmonique de 1.32%. Enfin on peut conclure d’après

les résultats obtenus l'efficacité de cette commande appliquée au système éolien

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances d'un système éolien connecté réseau.

Nous avons présenté dans le premier chapitre, un bref aperçu sur l'énergie éolienne et les différents systèmes de conversion d'énergie électromécanique. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système étudié.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation du système globale constitué d'une turbine éolienne avec une génératrice synchrone à aimants permanents, de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) et d'un filtre pour le raccordement au réseau, un bus continu et un réseau électrique. Ensuite nous avons appliqué une commande MPPT afin de maximiser la puissance produite par la turbine, ainsi que pour avoir un fonctionnement avec un rendement maximal en imposant le coefficient de puissance à sa valeur optimale.

La commande du système éolien a été abordée au troisième chapitre. Nous avons appliqué en premier lieu une commande vectorielle à MLI à la GSAP qui nous permet de découpler cette machine pour rendre son comportement similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

La deuxième partie de ce chapitre est dédié au contrôle des puissances actives et réactives à l'aide de la commande DPC (direct power control). Nous avons réalisé deux types de DPC classiques : une à six (6) secteurs et une autre à douze (12) secteurs sur lesquelles nous avons mené une étude comparative, on a pu remarquer que la DPC à douze (12) secteurs offre de meilleur résultat que ceux à six (6) secteurs. En effets les taux de distorsions harmoniques sont respectivement 3.05%, 3.95%.

Pour améliorer les résultats obtenus au chapitre trois, nous avons appliqué dans le dernier chapitre une commande directe de puissance à base de la logique floue (DPC floue) qui a apporté de meilleurs performances au système éolien :

- ✓ Compensation de puissance réactive ($\cos\phi=1$).
- ✓ Minimiser les ondulations des courants injectés au réseau.
- ✓ La réduction du taux de distorsion harmonique à 1.32% du courant du réseau.

Comme perspectives, il serait intéressant de reprendre ce travail en vue de son amélioration en proposant d'autres commandes. Faire valider les résultats de simulation obtenus par une réalisation pratique.

Références bibliographique

Références Bibliographiques

- [01] M.&Shahbaz, C. Raghutla, K. R. Chittedi, Z. Jiao, X. V. Vo, The Effect of Renewable Energy Consumption on Economic Growth: Evidence from the Renewable Energy Country Attractive Index, *Energy*, Vol.207, p. 118162, 2020.
- [02] Toual Belkacem : « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » mémoire magister, université de Batna ,2010.
- [03] B. Boukhezzar : « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paris XI ORSAY, 2006.
- [04] Pérol. C : d'où vient le vent. Portrait et magazine aux multiples POMM, www.pomms.org (Consulté le 05 Mai 2022).
- [05] "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [06] C. Kan, Y.Devrim, S. Eryilmaz, on the theoretical distribution of the wind farm power when there is a correlation between wind speed and wind turbine availability, *Reliability Engineering & System Safety*. Vol.203, p. 107115, 2020.
- [07] Multon. B, Gergaud. O, Ben Ahmed. H, Roboam. X, Astier. S : Etat de l'art des aérogénérateurs. L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, ed. NOVELECT-ECRIN, pp.97-154, 2002.
- [08] S. Massoum, Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [09] R. Aubrée, Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance, Thèse de Doctorat, Université de Nantes,2014.
- [10] Ackerman. T, Söder L, « An Overview of Wind Energy-Status » renewable and sustainable energy reviews, Vol-6, pp-67-128, 2002.

- [11] B.BELTRAN, «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur», Thèse de Doctorat en Science pour l'Ingénieur UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, le 6 juillet 2010.
- [12] BURTON, Tony, JENKINS, Nick, SHARPE, David, et al. « Wind energy handbook ». Edition John Wiley & Sons, 2011.
- [13] A.M. Houekpohéha, B. Kounouhéwa, B.N. Tokpohozin et N. Awanou, « Estimation de la Puissance Energétique Eolienne à Partir de la Distribution de Weibull sur la Côte Béninoise à Cotonou dans le Golfe de Guinée », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 17, N°3, pp. 489- 495, 2014.
- [14] P. Jaohindy, Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : modélisation du couple production / Bâtiment, Thèse de Doctorat, Université de La Réunion, 2012.
- [15] D. Rekioua, Wind Power Electric Systems Modeling, Simulation and Control, Springer London Heidelberg New York Dordrecht, 2014.
- [16] C. Khélifi, Contrôle non destructif des machines tournantes : application a une éolienne a axe vertical, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Mohammed Boudiaf d'Oran, 2015.
- [17] D. Mida, Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride Eolien – Photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [18] A. Said, Amélioration de la commande d'un système éolien à base d'une machine MADA utilisant les techniques intelligentes, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2019.
- [19] Melloul. A: Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, Sétif (Algérie), 2011
- [20] Guérette.D : Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration ; Thèse de Doctorat, Université du Québec à Rimouski, Rimouski (Canada), 2010
- [21] M.H. Hague, Evaluation of power flow solutions with fixed speed wind turbine generating systems”, Energy Conversion and Management, Vol. 79, pp. 511-

518, 2014.

- [22] S. LOUAREM Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique connecté à un système éolien utilisant les systèmes FACTS, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif, 2021.
- [23] M. Debbache, Amélioration de la performance de pale éolienne par considération des paramètres locaux et prend en compte les phénomènes des pertes, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [24] Liva Eric Radaorozandry, « conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique», université Laval Québec, 2007.
- [25] A. Boyette : « Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [26] A.Mircki :« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [27] K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [28] LALOUNI, Sofia et al. « Maximum Power Point Tracking Based Hybrid Hill-climb Search Method Applied to Wind Energy Conversion System », Electric power components and systems, vol.43, p.1028-1038, (2015).
- [29] M. AMGHAR Lyes, M. BENABDESSLAM Abderrahim << Amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien connecte au réseau >>, Mémoire de master, Université de Bejaïa 2021.
- [30] M. Messaoud : « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », mémoire de magister Université de Batna, 2008.
- [31] Beltran : « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat ,Université de Bretagne Occidentale, Juin 2011.
- [32] Z.Boudjema : « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2015.

- [33] Jeon S.H, Oh K.K, Choi J.Y, "Flux observer with online tuning of stator and rotor resistances for induction motors " IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49,N° 3, June2002.
- [34] Rong J.W,JengD.L,KuoM.L, "Robust de couple control of direct field oriented induction motor drive". IEEE Industrial Electronics Transactions on Vol.52,Issue3,pp.837 – 854. June2005.
- [35] A. Med Elhadi "Étude comparative de différente méthode de compensation actif d'énergie électrique" mémoire d'ingénierie Université M'sila 2012 / 2013.
- [36] N. Mesbahi and A. Ouari : "Direct power control of three-phase PWM rectifier without line voltage sensors", in Proc. 2èmes Journées Internationales d'Électrotechnique, de Maintenance et de Compatibilité Électromagnétique (JIEMCEM2010), ENSET Oran, Algeria, 25-27 May 2010.
- [37] BENGOURINA Mohamed Rida, « Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique » Mémoire de Magister, 2012.
- [38] BENGANA Sara, «Stratégies de Contrôle Direct de Puissance d'un Redresseur PWM Triphasé », mémoire de master, UniversitéOurgla,2013.
- [39] CHAOUI. A ; « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » ; Thèse de doctorat ; Université de Sétif, ; 2010.
- [40] ARROUR. S, AZROU. A ; « Étude et analyse des performances d'une commande directe en puissance basée table de commutation d'un redresseur à MLI triphasé » ; Mémoire de Master, Université de Bejaia ; 2015.
- [41] Y. ELBIA, Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté, mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, juin 2009.
- [42] R. SADOUNI, Commande par Mode Glissant Flou d'une Machine Asynchrone à Double, mémoire de magister d'université de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [43] BOUAFIA. A : « Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance : Application Aux Redresseurs AMLI» ; Thèse de doctorat université de Sétif ,2010.

Annexe

➤ **Paramètres de la turbine éolienne utilisée dans la simulation:**

$$\rho = 1.08 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$R = 1.25 \text{ m}$$

$$J=0.0833 \text{ (Kg.m}^2\text{)}$$

$$\lambda_{opt} = 7.34$$

$$C_{opt} = 0.475$$

➤ **Paramètres de MSAP :**

$$P_{machine}=2 \text{ KW}$$

$$P=12$$

$$R_s=1.137(\Omega)$$

$$L_d = L_q=0.025(\text{H})$$

$$\phi_f=0.2(\text{Wb})$$

➤ **Paramètre du filtre et de bus continu :**

$$V_{dc}=570(\text{V})$$

$$L_f=0.02(\text{H})$$

$$R_f=0.1(\Omega)$$

$$C=0.001(\text{F})$$

RÉSUMÉ

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et la commande d'un système éolien connecté au réseau. Cette étude consiste à appliquer des différents algorithmes pour le suivi du point de maximale tel que MPPT basée sur la logique floue, puis on s'est intéressé sur la modélisation de la machine synchrone à aimants permanent et de son alimentation constituée d'un onduleur triphasé. Nous avons appliqué différentes stratégies de commande à fin d'apporter une amélioration au système globale. Des comparaisons ont été élaborer entre les commandes appliquées DPC classique, DPC à 6 secteurs, DPC à 12 secteurs, DPC à base de la logique floue. Les résultats sont satisfaisants aussi bien en termes d'optimisation de la capture de l'énergie. du vent qu'en régulation de puissance.

Mots-Clés : Eolienne, Génératrice /Machine synchrone à aiment permanent, DPC, Logique floue, optimisation de la génération de puissance (MPPT).

The work presented in this dissertation focuses on the modeling and control of agrid-connected wind system. This study consists of applying different algorithms for the monitoring of the maximum point such as MPPT based on fuzzylogic, then we focused on the modeling of the permanent magnet synchronous machine and its power supply consisting of a three-phase inverter. We applied different ordering strategies in order to improve the overall system. Comparisons were made between the command supplied classic DPC , DPC with 6 sectors, DPC with 12 sectors, DPC based on fuzzylogic. The results are satisfactory both in terms of optimizing wind energy capture and power regulation