

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



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

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

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

**Commande non linéaire d'un système de conversion  
d'énergie éolienne autonome basé sur GSAP**

**Réalisé par :**  
DRIES Said  
BELHAFSI Atmane

**Encadré par :**  
M<sup>r</sup>. TAMALOUZT Salah  
**Co-Encadré par :**  
Mr DJOUDI Oualid

2022/2023

## Remerciements

Avant tout, nous remercierons le bon Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force, de sagesse, et de bonne volonté pour achever ce modeste travail et ce cursus universitaire.

Ces quelques lignes ne vont jamais exprimer à la juste valeur notre reconnaissance à l'égard de notre promoteur **Mr TAMALOUZT** Salah pour l'aide qu'il nous a offert durant la période de réalisation de ce travail et encore plus sa confiance et ses encouragements. Merci monsieur pour le temps que vous nous avez consacré, les conseils que vous nous avez prodigués, les vertus que vous nous avez inculqués.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre Co-promoteur **Mr DJOUDI oualid** pour son soutien. Nous sommes très sensibles au service que vous nous avez rendu. A tous les professeurs qui ont déployé leurs efforts pour nous assurer une formation complète et à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions. Nous tenons à remercier le président et les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner et juger notre travail.

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fiers. Un grand merci à nos frères et sœurs qui étaient toujours à nos côtés. À vous qui nous avez soutenu et avez su être notre inspiration quand on avait des baisses de régime.

Enfin, nous remercions nos amis qui ont toujours été là pour nous, également nous adressons nos vives reconnaissances à tous les membres de l'université Abderrahmane mira – Bejaïa.

# Sommaire

Liste des figures .....	I
Listes des tableaux .....	III
Abréviations .....	IV
Introduction générale.....	6
Chapitre I. Généralités sur les systèmes éolienne .....	3
Introduction .....	4
I.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique .....	4
I.2 Différents types d'éoliennes .....	5
I.2.1 Eoliennes connectées au réseau électrique .....	6
A. Eoliennes à vitesse fixe.....	6
B. Eolienne à vitesse variable.....	6
I.2.2 Eoliennes en fonctionnement autonome .....	7
I.3 Les avantages et les inconvénients de système éolien .....	7
I.4 Machine synchrone à aimants permanents .....	8
I.5 Aimants permanents .....	9
I.6 Différents types du rotor .....	11
I.7 Aperçu sur les différentes méthodes de commande de la MSAP .....	12
Chapitre II. Modélisation de la chaîne de conversion .....	14
Introduction .....	15
II.1 Modèle de la turbine .....	15
II.2 Machine synchrone à aimants permanents : .....	16
II.3 Equitation de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère abc....	<b>Erreur !</b>
<b>Signet non défini.</b>	
II.3.1 Equation électrique et magnétique de la machine.....	17
II.3.2 Equation mécanique.....	18
II.3.3 Equation de couple électromagnétique .....	19

II.3.4 Puissance instantanée.....	19
II.4 Transformation de Park .....	19
II.4.1 Equation électrique et magnétique de la machine.....	20
II.4.2 Equation de couple électromagnétique .....	21
II.5 Modèle du redresseur à MLI dans le repère (a, b, c) .....	21
Conclusion.....	23
Chapitre III. Commande DPC linéaire avec un régulateur PI.....	24
Introduction .....	25
III.1 La Commande Direct DE Puissance (DPC) .....	25
III.1.1 Principe de la commande DPC.....	25
III.1.2 Les Avantages de la commande DPC .....	26
III.1.3 Détection de secteur .....	26
III.1.4 Calcul des puissances instantanées « Active et réactive » .....	27
III.1.5 Comparateurs à hystérésis .....	28
III.1.6 La table de commutation .....	29
III.1.7 Régulation de la tension continue .....	31
III.2 Résultat de la simulation.....	32
Conclusion.....	36
Chapitre IV . Application de la logique floue à la DPC.....	37
Introduction .....	38
IV.1 Principe de la logique flou .....	38
IV.2 Variables linguistiques et ensembles flous .....	38
IV.3 Fonctions d'appartenance .....	39
IV.4 Règles floues.....	40
IV.5 Défuzzification.....	41
IV.6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue .....	41
IV.6.1 Avantages.....	42

IV.6.2 Inconvénients .....	42
IV.7 Application de la logique floue dans la technique DPC .....	42
IV.7.1 Principe et structure de la commande .....	42
IV.7.2 Les entrées floues .....	43
IV.7.3 Fonctions d'appartenances .....	43
IV.7.4 Règles d'inférence.....	44
IV.8 Résultats de simulation .....	44
IV.9 Etude comparative .....	46
Conclusion.....	47
Conclusion générale .....	48
Références bibliographique.....	50

## Liste des figures

<b>Figure I. 1 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. ....	5
<b>Figure I. 2:</b> Eolienne axe horizontal.....	5
<b>Figure I. 3:</b> Eolienne axe vertical.....	6
<b>Figure I. 4:</b> Structure générale de la machine synchrone à aimants permanents. ....	9
<b>Figure I. 5:</b> Courbe désaimantation.....	10
<b>Figure I. 6:</b> Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants . ....	11
<b>Figure I. 7:</b> Rotors de machine synchrone à aimants permanents.....	12
<b>Figure II. 1:</b> Représentation d'une machine synchrone dans le repère abc .....	17
<b>Figure II. 2:</b> Représentation d'une machine synchrone dans le repère de park .....	20
<b>Figure II. 3:</b> Schéma monophasé équivalent d'un redresseur à MLI connecté réseau .....	22
<b>Figure II. 4:</b> Schéma bloc du modèle du redresseur dans le système d'axe (a,b,c) .....	23
<b>Figure III. 1:</b> Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel ( $\alpha$ , $\beta$ ) divise en douze (12) secteurs. ....	27
<b>Figure III. 2:</b> Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.....	28
<b>Figure III. 3:</b> Régulation de la tension continue. ....	31
<b>Figure III. 4:</b> Configuration générale de la commande DPC.....	31
<b>Figure III. 5:</b> Schéma général de la commande DPC sur la chaîne de conversion.....	32
<b>Figure III. 6:</b> Allure de tension de bus continu ( $V_{dc}$ ). ....	33
<b>Figure III. 7:</b> Allure de puissance active ( $P_{ref}$ et $P_{mes}$ ).....	33
<b>Figure III. 8:</b> Allure de puissance réactive ( $Q_{mes}$ et $Q_{ref}$ ). ....	34
<b>Figure III. 9:</b> Allure des courants ( $I_{abc}$ ).....	34
<b>Figure III. 10:</b> Allure de courant du charge ( $I_{ch}$ ).....	35
<b>Figure III. 11:</b> Allure de la vitesse angulaire du turbine ( $\omega_m$ ).....	35
<b>Figure III. 12:</b> Allure des tensions ( $V_{abc}$ ). ....	35
<b>Figure IV. 1:</b> a. format d'un ensemble flou normalisé. b. Représentation des variables linguistiques. ....	39
<b>Figure IV. 2:</b> Différentes formes des fonctions d'appartenanc.....	40
<b>Figure IV. 3:</b> Schéma bloc d'un régulateur PI floue.....	43
<b>Figure IV. 4:</b> Création d'entrées et sortie. ....	43
<b>Figure IV. 5:</b> Fonctions d'appartenances du contrôleur flou (entrées, sorties). ....	44
<b>Figure IV. 6:</b> Allure de tension de bus continu ( $V_{dc}$ ). ....	45

<b>Figure IV. 7:</b> Allure de courant du charge ( $I_{ch}$ ).....	45
<b>Figure IV. 8:</b> Allure de puissance réactive ( $Q_{meset} Q_{ref}$ ).....	46
<b>Figure IV. 9:</b> Allure de puissance active ( $P_{ref}$ et $P_{mes}$ ).....	46
<b>Figure IV. 10:</b> l'ensemble des résultats de la tension $V_{dc}$ floue et $V_{dc}$ pi .....	47

## Listes des tableaux

<b>Tableau III. 1:</b> ésume les variations de p et q en fonction de la position des vecteurs. ....	29
<b>Tableau III. 2:</b> Les variations de p et q en fonction de la position des vecteurs . ....	30
<b>Tableau IV. 1:</b> Règles floues relative au contrôleur flou. ....	44
<b>Tableau IV. 2 :</b> tableau récapitulatif des résultats de l'étude. ....	46

## Abréviations

<b>MSAP</b>	: Machine Synchronne à Aimants Permanents
<b>GSAP</b>	: Génératrice Synchronne à Aimants Permanents
<b>DTC</b>	: Commande Directe du Couple
<b>DPC</b>	: Commande Directe du Puissance
<b>MLI</b>	: Modulation de Largeur d'Impulsion
<b><math>t</math></b>	: turbine
<b><math>P_t</math></b>	: Puissance de la turbine éolienne
<b><math>C_p</math></b>	: Coefficient de puissance
<b><math>\rho</math> (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	: Masse volumique de l'air
<b><math>S_t</math>(m<sup>2</sup>)</b>	: Surface traversée par l'air
<b><math>V</math> (m/s)</b>	: Vitesse du vent
<b><math>\delta</math></b>	: Rapport de la vitesse en bout des pales
<b><math>\beta</math>(deg)</b>	: Angle de calage des pales
<b><math>\Omega_t</math>(rad/s)</b>	: Vitesse mécanique de la turbine
<b><math>C_t</math> (N.m)</b>	: Couple de la turbine
<b><math>V_{abc}</math>(V)</b>	: Tensions statorique simple dans le repère abc
<b><math>I_{abc}</math>(A)</b>	: Courants statorique dans le repère abc
<b><math>\Phi_{abc}</math> (Wb)</b>	: Flux magnétique
<b><math>R_s</math>(<math>\Omega</math>)</b>	: Résistance statorique
<b><math>R_f</math>(<math>\Omega</math>)</b>	: Résistance du filtre
<b><math>L_f</math> (H)</b>	: Inductance du filtre
<b><math>\Phi_f</math> (Wb)</b>	: Flux d'excitation des aimants permanents
<b><math>L_{ss}</math></b>	: Matrice d'inductance statorique de dimension $3 \times 3$
<b><math>J</math>(Kg.m<sup>2</sup>)</b>	: Moment d'inertie
<b><math>C_m</math>(N.m)</b>	: Couple mécanique
<b><math>f</math>(N.m.s/rd)</b>	: Coefficient de frottement visqueux
<b><math>\Omega</math>(rad/s)</b>	: Vitesse angulaire mécanique de rotorique
<b><math>p</math></b>	: Nombre de paires de pôles
<b><math>P(t)</math> (W)</b>	: Puissance instantanée
<b><math>X_{abc}</math></b>	: L'axe dans le repère abc

$X_{dq}$	: L'axe dans le repère de Park
$[P(\theta)]$	: Matrice de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	: Matrice inverse de Park
$\theta$ (rad)	: Position angulaire du rotor par rapport au stator
$V_{dq}$ (v)	: Composantes de la tension dans le repère de Park
$I_{dq}$ (A)	: Composantes du courant dans le repère de Park
$L_d$ (H)	: Inductance électrique directe
$L_q$ (H)	: Inductance électrique quadratique
$\omega$ (rad/s)	: Pulsation électrique
$\Phi_{dq}$ (Wb)	: Composantes du flux dans le repère de Park
$C_{em}$ (N.m)	: Couple électromagnétique
$V_{abc}$ (v)	: Tension statorique simple dans le repère abc
$I_{abc}$ (A)	: Courants statorique simple dans le repère abc
$\Phi_s$ (Wb)	: Flux statorique
$S_{abc}$	: Etat des interrupteurs du redresseur
$I_{ch}$ (A)	: Courant de charge
$V_{dc}$ (v)	: Tension redressé
$\Delta$	: Largeur de la bande hystérésis
$V_s$ (v)	: Tension statorique
$E$ (v)	: Force électromotrice
$V_r$ (v)	: Tension rotorique
$T_{em}$ (N.m)	: Couple électromagnétique
$P_{ref}$ (W)	: référence de la Puissance active
$Q_{ref}$ (Var)	: référence de la Puissance réactive
$P_{mes}$ (W)	: Puissance active mesuré
$Q_{mes}$ (Var)	: Puissance réactive mesuré
$P$ (W)	: Puissance active
$Q$ (Var)	: Puissance réactive
$V\alpha, V\beta$ (v)	: Composantes de la tension dans le repère clark
$I\alpha, I\beta$ (A)	: Composantes du courant dans le repère clark
$\varphi_n$ (rad)	: position angulaire

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

---

### **Introduction générale**

Depuis la découverte de l'électricité, son utilisation a accédé à tous les domaines de la vie, du ménage, à l'industrie, à la santé ... etc. La dominance, l'efficacité et la facilité d'utilisation de cette énergie ont poussé les chercheurs à créer et à trouver des systèmes de production d'énergie électrique parmi eux le système énergie renouvelable.

L'énergie éolienne est l'une des principales sources d'énergie renouvelable, se classant juste après l'énergie solaire. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisent principalement des générateurs synchrones ou asynchrones. Ils ont pour objectif de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Grâce aux progrès technologiques dans le domaine de l'aérodynamique et à l'émergence de machines électriques rotatives, l'exploitation de l'énergie éolienne a connu un développement remarquable [1].

Les machines synchrones à aimants permanents sont utilisées dans divers domaines, notamment l'industrie automobile, les énergies renouvelables (éoliennes, hydroélectricité), les applications de conversion d'énergie et les machines industrielles. Leur efficacité élevée, leur réponse rapide et leur puissance spécifique supérieure en font une technologie prometteuse pour répondre aux besoins croissants d'efficacité énergétique et de performances améliorées [1].

Ce travail a comme objectif principal d'étudier et de modéliser le système de conversion d'énergie éolienne autonome à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents. Egalement d'étudier la stratégie de la commande DPC utilisés pour le contrôle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne autonome.

Le manuscrit s'articule en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera réservé à une synthèse bibliographique des généralités sur les systèmes éoliens, en fournissant une introduction, une définition, les types d'éoliennes, ainsi que les avantages et les inconvénients associés. Une partie sera consacrée à l'exploration de la technologie des machines synchrones à aimants permanents utilisées dans les éoliennes modernes, mettant en évidence leurs avantages en termes d'efficacité et de performances.

Le deuxième chapitre présentera la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, la turbine et la transformation de Park. De plus nous allons décrire les différentes caractéristiques et comportements de ces éléments, ainsi que leur intégration pour obtenir une représentation complète de notre système éolien.

## **Introduction générale**

---

Dans le troisième chapitre nous allons présenter la commande DPC avec un régulateur PI, puis nous allons expliquer ses principes de base tout en regroupant des résultats obtenus de la simulation du système éolien. Cette évaluation nous permettra de comprendre l'efficacité de la commande DPC avec le régulateur PI dans notre système et d'identifier les perspectives d'amélioration pour optimiser son fonctionnement.

Le quatrième chapitre sera présentera la technique de la logique floue, son application sur la commande DPC ainsi que les résultats obtenus de la simulation avec leurs interprétations.

Cette évaluation nous servira à de mieux comprendre l'efficacité de la commande par logique floue dans notre système éolien et d'identifier des possibilités d'amélioration pour l'avenir.

A la fin, une conclusion et des perspectives générales sont présenter pour compléter cette contribution.

# **Chapitre I. Généralités sur les systèmes éolienne**

### Introduction

L'énergie éolienne est reconnue comme l'une des sources d'énergie les plus anciennes. Elle est à la fois propre, renouvelable et a été présente depuis toujours. Au fil des décennies récentes, la technologie des éoliennes a connu une évolution impressionnante, notamment dans le secteur de la production d'électricité. Différentes technologies, telles que les éoliennes à axe vertical ou à axe horizontal, sont utilisées pour capter l'énergie du vent, et leurs structures deviennent de plus en plus performantes.

L'objectif principal des systèmes éoliens est de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, qui est à la fois non polluante et économique, a suscité un vif intérêt, ce qui a poussé les fabricants à constamment réfléchir à de nouvelles solutions robustes permettant d'extraire le maximum d'énergie et à étudier les différents systèmes réalisables. Par conséquent, ce qui suit présentera un état de l'art sur l'énergie éolienne [2].

#### **I.1 Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique**

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [2].

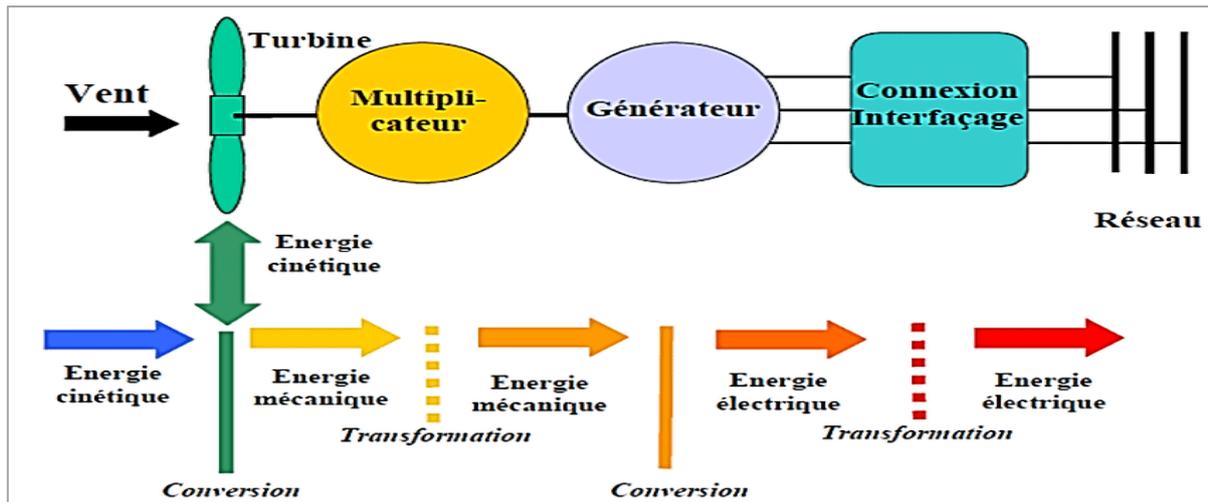


Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

### I.2 Différents types d'éoliennes

Il existe plusieurs types d'éoliennes qui utilisent différents mécanismes pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique. Voici quelques exemples :

#### ➤ A axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Leur capacité à générer une quantité d'énergie plus élevée grâce à un coefficient de puissance amélioré. De plus, elles présentent l'avantage d'avoir un coût inférieur et une efficacité accrue, attribués à leur positionnement à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol [3].



Figure I. 2: Eolienne axe horizontal.

## Chapitre I

---

### ➤ A axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures utilisées pour la production d'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont été développés, mais peu ont atteint le stade de l'industrialisation. Ces éoliennes sont classées en deux catégories en fonction de leur caractéristique aérodynamique [4] :

1. Les éoliennes à rotor de Darrieus, conçues sur la base de la portance (du nom de l'ingénieur français George Darrieus qui les a inventées) ;
2. Les éoliennes à rotor de Savonius, basées sur la traînée (inventées par le Finlandais Sigurd Savonius en 1924).



**Figure I. 3:** Eolienne axe vertical.

### I.2.1 Eoliennes connectées au réseau électrique

#### A. Eoliennes à vitesse fixe

Dans ce mode de fonctionnement, les éoliennes sont souvent équipées d'un système d'orientation des pales, ce qui permet à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) d'être directement connectée au réseau sans nécessiter de dispositif d'électronique de puissance. La génératrice est entraînée par le biais d'un multiplicateur de vitesse, et sa vitesse est maintenue à un niveau approximativement constant, proche de la vitesse de synchronisme imposée par la fréquence du réseau. Le glissement nominal de ce type d'éolienne est généralement d'environ -2% [4].

#### B. Eolienne à vitesse variable

Les éoliennes de ce type utilisent couramment des machines électriques telles que les machines asynchrones à cage, les machines à double alimentation et les machines synchrones à aimants permanents. La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est généralement

## Chapitre I

---

connectée à la turbine via un multiplicateur de vitesse. En revanche, la machine synchrone à aimants permanents peut être couplée à la turbine soit via un multiplicateur de vitesse, soit directement si elle possède un grand nombre de pôles, ce qui permet d'éviter l'utilisation du multiplicateur de vitesse [4].

### I.2.2 Eoliennes en fonctionnement autonome

De nos jours, de nombreuses applications ne peuvent pas être connectées au réseau en raison de la complexité de la connexion ou du coût d'installation. Dans de tels cas, ces sites peuvent être alimentés en électricité grâce aux sources d'énergie renouvelable. Dans de nombreuses régions isolées et venteuses, l'énergie éolienne représente la principale source potentielle d'énergie électrique. La diminution constante des prix des éoliennes et les avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance ont conduit à une utilisation de plus en plus répandue des éoliennes autonomes dans ces régions isolées.

La conception des petits systèmes éoliens diffère considérablement de celle des éoliennes reliées aux grands réseaux électriques. Dans les applications des petits systèmes éoliens autonomes, le générateur synchrone à aimants permanents se présente comme une solution très intéressante en raison de ses avantages, tels qu'un rendement élevé et un bon rapport couple/masse. Ces différentes structures de machines synchrones à aimants permanents permettent d'alimenter des charges autonomes en utilisant des dispositifs d'électronique de puissance, afin d'obtenir une tension alternative à fréquence constante si nécessaire.

Ces éoliennes sont généralement associées à des systèmes de stockage d'énergie, qui sont principalement constitués de batteries d'accumulateurs. Ces batteries se chargent grâce à l'aérogénérateur, soit directement par l'intermédiaire d'une génératrice à courant continu pour les faibles puissances, soit par une génératrice synchrone à aimants permanents via un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement, soit convertie par un onduleur pour obtenir une alimentation triphasée sinusoïdale de fréquence 50 Hz [4].

### I.3 Les avantages et les inconvénients de système éolien

Le système éolien a des avantages comme il a des inconvénients, ce qui peuvent se résumer en ces points :

#### Les avantages

- Une source d'énergie renouvelable et décarbonée ;
- Une énergie qui peut se trouver presque partout sur la planète ;
- Le terrain sous l'éolienne reste exploitable ;
- Certaines éoliennes peuvent être adaptées à des milieux urbains ;

## Chapitre I

---

- Des éoliennes pour les particuliers permettent de produire sa propre énergie.

### Les inconvénients

- Le vent n'est pas une source d'énergie constante. Pas de vent, pas de production d'électricité.
- L'énergie éolienne doit toujours ou presque être associée à une autre source d'énergie.
- Certaines éoliennes sont bruyantes
- Tout le monde n'apprécie pas la vue d'une éolienne dans le paysage.
- Les éoliennes peuvent être dangereuses pour la faune sauvage (notamment les oiseaux)
- Implanter massivement des éoliennes est compliqué puisque les zones intéressantes sont limitées.
- Les éoliennes offshore peuvent être des territoires de pêche ou de plaisance.
- Les coûts pour les particuliers qui veulent installer une éolienne restent importants

### I.4 Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone se compose de deux composants distincts : le rotor mobile qui sert d'inducteur, et le stator fixe qui abrite les enroulements de l'induit. L'espace étroit situé entre ces deux éléments est appelé l'entrefer.

Le stator d'une machine synchrone triphasée est composé de trois enroulements identiques, décalés de 120 degrés les uns par rapport aux autres, et placés dans les encoches du circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté pour réduire les courants de Foucault et limiter les pertes dans le fer. Il est généralement fabriqué à partir d'un alliage fer-silicium, qui permet d'obtenir une induction élevée.

Dans le rotor, les enroulements traversés par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternant entre pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices alternatives. L'interaction entre les champs statorique et rotorique crée un couple sur l'arbre du machine, ce qui entraîne la machine à la vitesse de synchronisme [5].



**Figure I. 4:** Structure générale de la machine synchrone à aimants permanents.

### I.5 Aimants permanents

Les aimants utilisés dans les machines synchrones sont généralement fabriqués à partir de poudre de ferrite, de poudre de fer-cobalt ou de terres rares. Pour être efficaces, un bon aimant doit posséder une induction rémanente et un champ coercitif élevés.

Les premiers aimants permanents, appelés Alnico (alliage à base d'aluminium-nickel-cobalt), sont apparus au début des années 1930. Depuis les années 1950, ils ont été progressivement remplacés par des aimants à base d'héxaferrite [6].

Le choix des aimants permanents est crucial car ils ont une grande influence sur le couple massique d'un actionneur. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis, en particulier la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H, comme illustré dans la Figure I.5.

## Chapitre I

Cette courbe est définie par plusieurs paramètres, notamment l'induction rémanente  $B_r$ , qui correspond à l'induction résiduelle en circuit fermé, le champ coercitif  $H_{cb}$  qui représente le champ démagnétisant annulant l'induction, et plus sa valeur est élevée, plus l'aimant est stable. Les valeurs de  $H_m$  et  $B_m$  du point de fonctionnement optimal M correspondant à  $(BH)_{max}$  sont également importantes pour caractériser les aimants permanents [6].

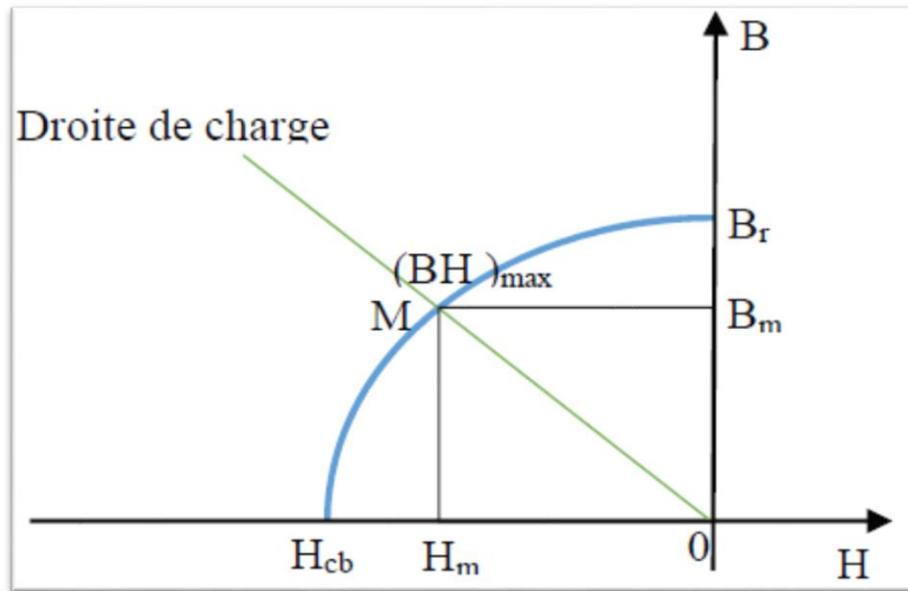


Figure I. 5: Courbe désaimantation.

La Figure. I.5 donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

- Les alliages **AlNiCo** sont composés de fer, d'aluminium et de nickel, auxquels sont ajoutés du cobalt, du cuivre ou du titane. Ils peuvent avoir une structure isotrope ou anisotrope.
- Les **ferrites** sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes.
- Les **terres rares** tels que les Samarium-Cobalt sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition.
- Les **Néodyme-Fer-Bore** (Nd-Fe-B) ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne (jusqu'à 160°C) [5].

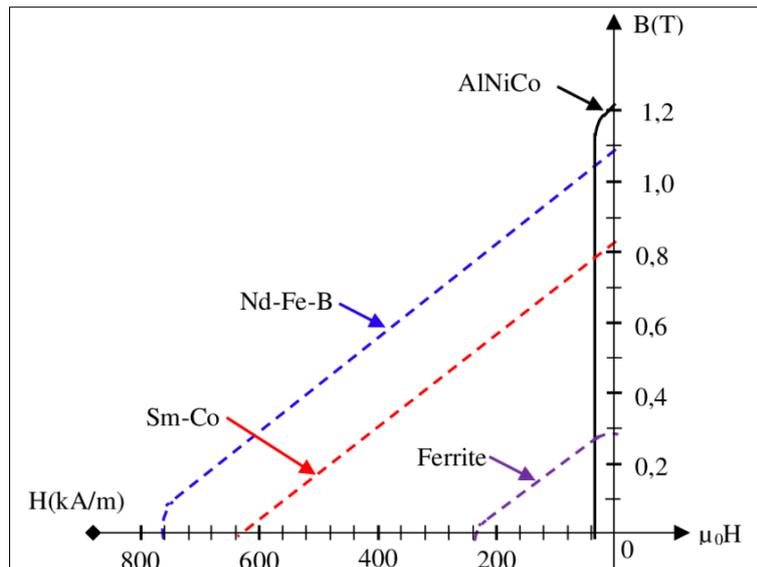


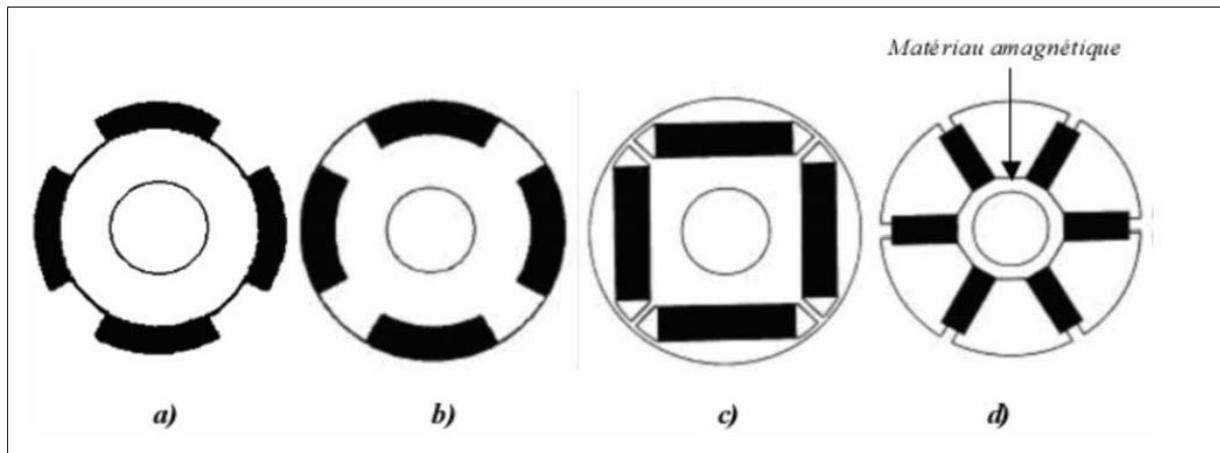
Figure I. 6: Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants [5].

## I.6 Différents types du rotor

Il existe plusieurs types de machines synchrones à aimants permanents en fonction de leur rotor.

La figure I.7 présente les rotors des modèles les plus courants tel que :

- a: machine à aimants en surface. Cette machine est dite à pôles lisses car le rotor ne présente aucune saillie lorsqu'il tourne. L'inductance de l'axe direct est égale à l'inductance de l'axe en quadrature ( $L_d = L_q$ ) ;
- b : machines à aimants enterrés. Ces machines ont une saillance directe, ce qui signifie que l'inductance d'axe direct est inférieure à l'inductance d'axe en quadrature ( $L_d < L_q$ ) . Par conséquent, l'effet de saillance augmente le couple maximal ;
- d: machine à concentration de flux. Elle se caractérise par une saillance inversée, c'est-à-dire que l'inductance d'axe en quadrature est inférieure à l'inductance d'axe direct ( $L_d > L_q$ ) [7]



**Figure I. 7:** Rotors de machine synchrone à aimants permanents

### **I.7 Aperçu sur les différentes méthodes de commande de la MSAP**

La commande non linéaire d'un système de conversion d'énergie éolienne autonome basé sur une Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) vise à maximiser l'efficacité et la production d'énergie en adaptant une commande.

#### **I.7.1 Commande vectorielle à flux orienté**

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté, est une méthode de commande des variateurs de vitesse dans laquelle les courants statorique triphasés d'un moteur électrique à courants alternatifs sont transformés en deux composantes orthogonales qui peuvent être considérées comme étant des vecteurs. Le premier vecteur permet le réglage du flux magnétique du moteur, tandis que la seconde règle le couple. Ils sont alors découplés et le fonctionnement devient alors similaire à celui d'un moteur à courant continu. [7] [8] :

#### **I.7.2 Commande DPC**

C'est une méthode de commande utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie. Son objectif principal est de contrôler directement la puissance active et réactive échangée entre la source d'énergie et le réseau électrique. La DPC utilise des estimations locales de la puissance active, de la puissance réactive et de la tension pour générer des commandes appropriées pour les interrupteurs de puissance du convertisseur. Elle permet un contrôle précis de la puissance active et réactive [13].

## **Chapitre I**

---

### **I.7.3 Commande non linéaire**

Cette commande permet de répondre de manière dynamique aux variations de vent et d'optimiser les performances du système de conversion d'énergie éolienne autonome basé sur une GSAP. Elle améliore l'efficacité énergétique, la stabilité du système et la production globale d'énergie, en assurant une adaptation précise aux conditions environnementales changeantes.

### **Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé différentes informations générales sur l'énergie éolienne. Nous avons également fourni un bref aperçu des différents types d'éoliennes ainsi que des machines à aimants permanents utilisées pour convertir l'énergie éolienne.

Dans l'ensemble, le secteur de l'énergie éolienne est en pleine expansion et nécessite des recherches supplémentaires sur des aspects tels que le débit d'air et la vitesse du vent, en mettant particulièrement l'accent sur l'exploration de nouvelles technologies afin d'optimiser l'efficacité énergétique.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne basée sur la machine synchrone à aimants permanents.

## **Chapitre II. Modélisation de la chaîne de conversion**

### Introduction

L'étude du comportement d'une machine électrique est une tâche complexe qui nécessite une bonne connaissance de son modèle dynamique pour suivre son comportement dans différentes situations de fonctionnement par le biais de simulations. Parmi les machines à courant alternatif, la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est un choix attrayant pour une utilisation industrielle. Grâce aux avancées dans le domaine des aimants permanents, la MSAP est devenue concurrente des machines asynchrones. Les aimants permanents permettent non seulement d'augmenter la densité d'énergie de ces machines, mais aussi de réduire leur taille et leurs pertes par rapport à d'autres types de machines. La MSAP présente de nombreux avantages, tels qu'une faible inertie et un couple massique élevé.

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous définirons les équations électriques et mécaniques qui régissent son fonctionnement, en précisant le modèle à utiliser pour la description de notre système d'équations. En particulier, nous utiliserons le modèle de Park pour effectuer la synthèse de la simulation de cette MSAP dans les prochains chapitres [10].

#### II.1 Modèle de la turbine

La puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine est donnée par l'équation suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S_t C_p V^3 \dots (\text{II} . 1)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  va dépendre de la vitesse spécifique et de l'angle de décalage des pales  $\beta$ , l'équation II .1 va devenir :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S_t V^3 C_p(\delta, \beta) \dots (\text{II} . 2)$$

Pour la turbine utilisée dans cette étude, le coefficient de puissance est approché par la formule suivante [4] :

$$C_p(\delta, \beta) = D_1 \left( \frac{D_2}{\varepsilon} - D_3 \beta - D_4 \beta^X - D_5 \right) e^{\frac{-D_6}{\varepsilon}} \dots (\text{II} . 3)$$

Avec

$$\frac{D_2}{\varepsilon} = \frac{1}{\delta + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

Les six coefficients définis,  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, \varepsilon$  dépendent de la turbine considérée.

L'exemple donne ci-dessous correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur

Allemand ENERCON dont la puissance nominale est de 500KW :

$$D_1 = 0.5 \quad D_2 = 116 \quad D_3 = 0.4 \quad D_4 = 0 \quad D_5 = 5 \quad D_6 = 21 \quad \varepsilon = 0.0001$$

Le couple de la turbine peut alors être obtenu en divisant l'expression de la puissance II .2 par la vitesse de rotation de l'arbre mécanique  $\Omega_t$  :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \dots (\text{II} .4)$$

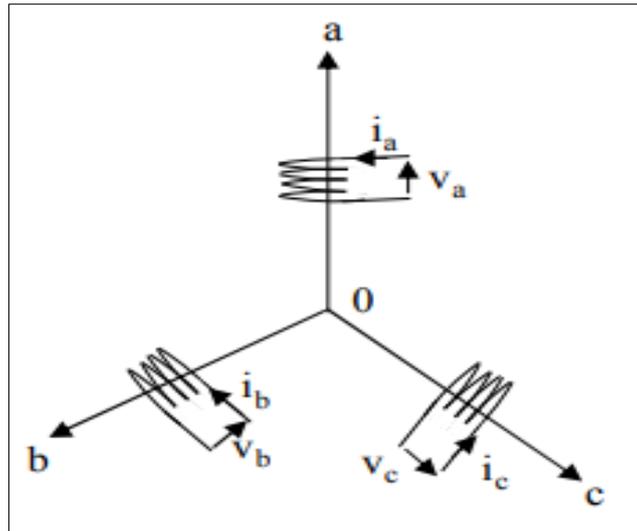
Alors :

$$C_t = \frac{1}{2\Omega_t} \rho S_t V^3 C_p(\delta, \beta) \dots (\text{II} .5)$$

L'expression II .5 n'est pas satisfaisante dans la mesure où une indétermination du couple  $C_t$  au démarrage existe : en ce point de fonctionnement, la vitesse  $\Omega_t$  est nulle, ainsi que le coefficient  $C_p$ .

### II.2 Machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation d'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.



**Figure II. 1:** Représentation d'une machine synchrone dans le repère abc

## II.3 Equitation de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère abc

### II.3.1 Equation électrique et magnétique de la machine

En considérant la tension appliquée à chaque enroulement, on peut obtenir l'équation générale de la tension de la machine. Cette équation est la somme de la chute de tension ohmique et de la chute de tension induite par l'inductance [11] :

Loi de Faraday :

$$V = RI + \frac{L di}{dt} \dots (\text{II}.6)$$

Le système d'équation est donc

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_S][I_{abc}] + \frac{d[\Phi_{abc}]}{dt} \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \end{cases} \dots (\text{II}.7)$$

Equation de flux magnétique

$$\begin{cases} [\Phi_{abc}] = [L_{SS}][I_{abc}] + [M_{Sf}]I_f \\ \Phi_f = [M_{fS}][I_{abc}] + L_f I_f \end{cases}$$

## Chapitre II

---

Tel que :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \dots \quad (\text{II}.9)$$

$R_s$ : Résistance de l'enroulement statorique.

$[L_{ss}]$  : Matrice d'inductance statorique, elle contient des termes constants que regroupe dans  $[L_{s0}]$  et des termes variable dépendant de  $\theta$  ; que nous regroupe dans  $[L_{s2}]$

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \dots \quad (\text{II}.10)$$

$$L_{s0} = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \dots \quad (\text{II}.11)$$

$$L_{s2} = \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2p\theta) \\ \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots \quad (\text{II}.12)$$

$$[M_{sf}] = M_f \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots \quad (\text{II}.13)$$

Avec

$$[M_{fs}] = [[M_{sf}]^t \dots \quad (\text{II}.14)$$

### II.3.2 Equation mécanique

L'équation mécanique est exprimée par la relation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_m \dots \quad (\text{II}.15)$$

Tel que :

$J$  : Le moment d'inertie ;

$C_m$  : Le couple mécanique (résistant) ;

$f$  : Coefficient de frottement visqueux ;

## Chapitre II

---

$\Omega$  : La vitesse angulaire mécanique rotorique.

### II.3.3 Equation de couple électromagnétique

$$C_{em} = [I_{abc}] \left\{ \frac{P}{2} \left( \frac{d[L_{ss}]}{dt} [I_{abc}] + \frac{d\Phi_f}{dt} \right) \dots \right. \quad (\text{II} .16)$$

Avec :

$$\frac{d\Phi_f}{dt} = 0$$

$\Phi_f$  : Valeur crête (constant) du flux crée par les aimants permanents à travers l'enrôlement statorique

$p$  : Nombre de paires de pôles.

### II.3.4 Puissance instantanée

$$P(t) = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c + V_f I_f \dots \quad (\text{II} .17)$$

## II.4 Transformation de Park

La transformation de Park est une technique utilisée pour convertir système triphasé équilibré de référence abc en un système biphasé de référence dq0, qui est synchronisé avec le champ magnétique de la machine électrique. Cette méthode est couramment employée lors de l'analyse de la commande des machines électriques [11].

$$[X_{abc}] = [P(\theta)][X_{dq}] \dots \quad (\text{II} .18)$$

$$[X_{dq}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{abc}] \dots \quad (\text{II} .19)$$

Tel que :

$[P(\theta)]$  : Matrice de Park qui assure le changement de variable.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots \quad (\text{II} .20)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \dots (\text{II} .21)$$

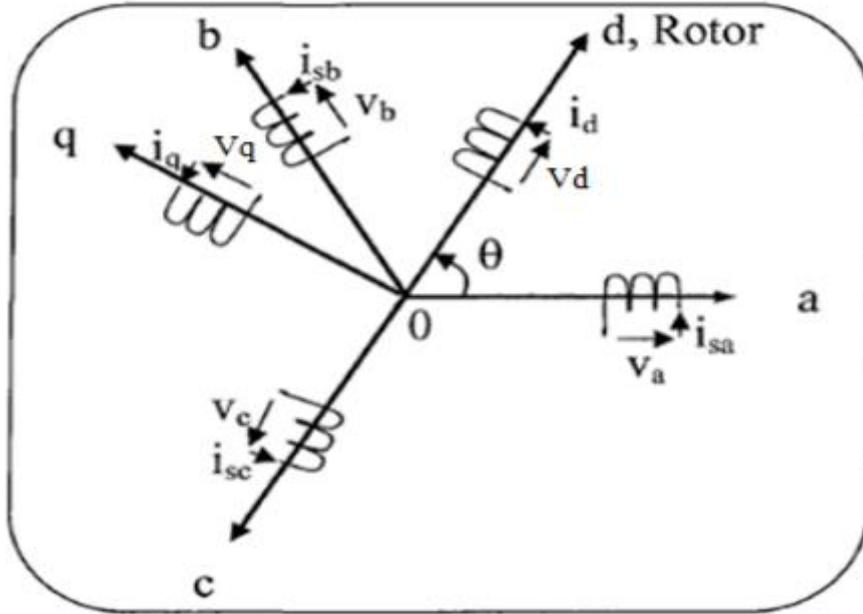


Figure II. 2: Représentation d'une machine synchrone dans le repère de park

#### II.4.1 Equation électrique et magnétique de la machine

Après avoir appliqué la transformation de Park aux équations de la machine, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \Phi_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \Phi_d \omega \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \end{cases} \dots (\text{II} .22)$$

Où :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q I_q \\ \Phi_r = \text{constant} \end{cases} \dots (\text{II} .23)$$

Le système ( II .22) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q I_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_q I_d \omega + \Phi_f \omega \end{cases} \dots (\text{II} .24)$$

## Chapitre II

$\omega$  : pulsation électrique

$$\omega = p\Omega = p \frac{d\theta}{dt}$$

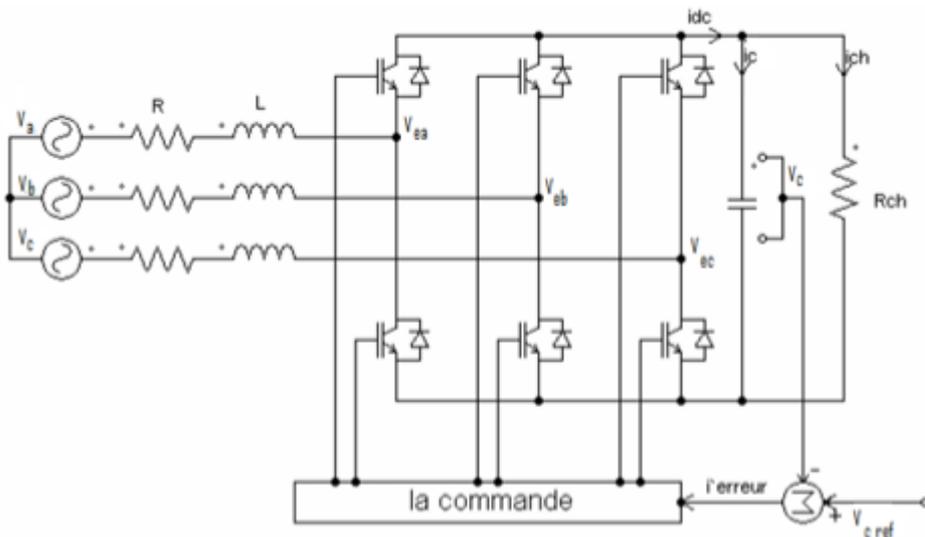
### II.4.2 Equation de couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = p(\Phi_d I_d - \Phi_q I_q) \dots (\text{II} .25)$$

$$C_{em} = p[(L_d - L_q)I_d + \Phi_f]I_q \dots (\text{II} .26)$$

### II.5 Modèle du redresseur à MLI dans le repère (a, b, c)



**Figure II. 3:** Circuit de puissance du redresseur MLI en pont triphasé.

À partir de la Figure II.3, on tire les équations suivantes :

$$\bar{V}_s = \bar{V}_i + V \dots (\text{II} .27)$$

Avec La Chute de tension aux bornes du filtre.

$$v_i = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} \dots (\text{II} .28)$$

On aura donc :

$$v_s = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + v \dots (\text{II} .29)$$

## Chapitre II

En écriture matricielle, on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \dots (\text{II} .30)$$

Le passage aux transformées de laplace nous permet de d'écrire :

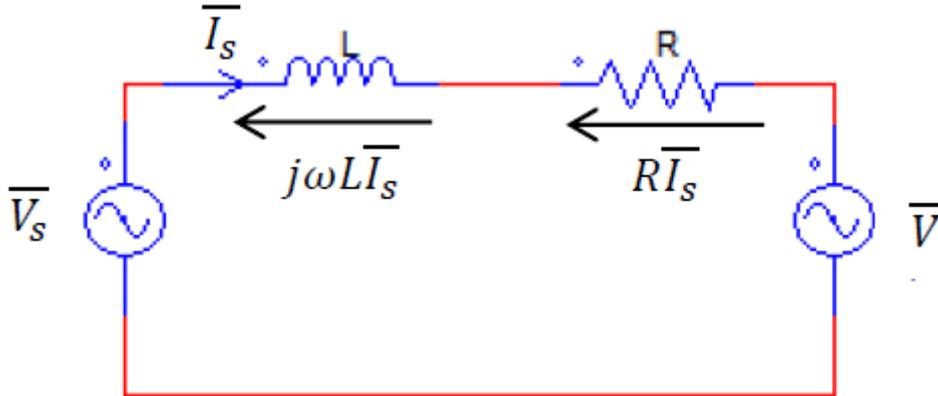
$$\begin{cases} I_{as} = (V_{as} - V_a) \frac{1}{(R+Lp)} \\ I_{bs} = (V_{bs} - V_b) \frac{1}{(R+Lp)} \\ I_{cs} = (V_{cs} - V_c) \frac{1}{(R+Lp)} \end{cases} \dots (\text{II} .31)$$

L'équation des courants peut écrire comme suit :

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_{as} + S_b \cdot i_{bs} + S_c \cdot i_{cs} - I_{ch} \dots (\text{II} .32)$$

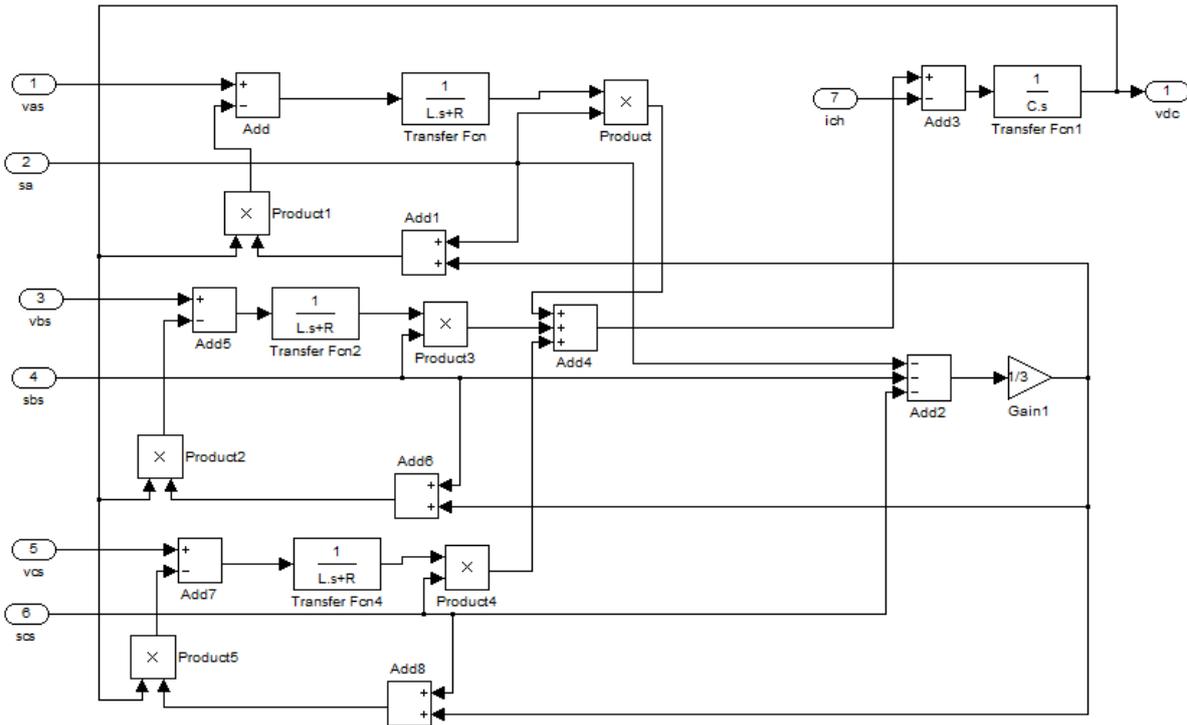
Après avoir appliqué la transformé de laplace :

$$V_{dc} = \frac{1}{cp} [(S_a \cdot i_{as} + S_b \cdot i_{bs} + S_c \cdot i_{cs}) - I_{ch}] \dots (\text{II} .33)$$



**Figure II. 4:** Schéma monophasé équivalent d'un redresseur à MLI connecté réseau

La combinaison des équation (II .27) (II .28) (II .29) (II .30) nous permet de tracer le schéma bloc du modèle du redresseur dans le système d'axe (a,b,c) voir la figure ci-dessous :



**Figure II. 5:** Schéma bloc du modèle du redresseur dans le système d'axe (a,b,c)

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description de la MSAP, la modélisation des différentes parties de la chaîne conversion éolienne puis nous avons défini le modèle de la MSAP dans le repère Park. Dans le chapitre suivant, nous allons mettre en œuvre la commande DPC classique sur la chaîne de conversion.

## **Chapitre III. Commande DPC linéaire avec un régulateur PI**

## **Introduction**

La conception d'un contrôleur dépend de la nature du système et des performances requises. La recherche constante d'amélioration des performances des systèmes commandés conduit à des modélisations de plus en plus précises. Ces modèles sont souvent non linéaires, ce qui rend les outils de synthèse de lois de commande linéaires insuffisants. Par conséquent, de nouvelles méthodes peuvent être nécessaires [11].

Dans ce chapitre, nous présenterons la commande DPC et sa conception. En fin, nous allons appliquer donner cette technique a la commande de la génératrice synchrone a aimants permanents.

### **III.1 La Commande Direct DE Puissance (DPC)**

En 1998, T. Noguchi a présenté la commande directe de puissance, également connue sous le nom de Direct Power Control (DPC), comme une méthode de contrôle direct des puissances actives et réactives instantanées d'un redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) triphasé, sans utiliser de capteurs de tension du réseau. Depuis lors, cette approche a été développée et différentes configurations ont été proposées.

Deux techniques distinctes de commande directe de puissance sont disponibles :

1. La commande classique de puissance non linéaire à fréquence de commutation variable, également connue sous le nom de DPC classique, est largement reconnue ;
2. La commande directe de puissance avec modulation de type vectoriel est utilisée pour obtenir une fréquence de commutation fixe. Cette approche est communément appelée DPC avec modulation vectorielle.

Cette technique est proposée pour le contrôle de la puissance active et réactive. Cette stratégie repose sur la sélection d'un vecteur de tension de manière à réduire les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence, tout en maintenant ces erreurs à l'intérieur des limites définies par les bandes d'hystérésis.

Les principaux avantages de cette technique sont sa rapidité de réponse dynamique en termes de puissance et une meilleure robustesse face aux variations des paramètres de la machine [12].

#### **III.1.1 Principe de la commande DPC**

La configuration générale de la DPC classique, qui implique l'utilisation d'une table de commutation préétablie, est appliquée aux convertisseurs triphasés. Son fonctionnement est similaire à celui du contrôle direct du couple (DTC). Cependant, au lieu de contrôler le couple et le flux rotorique, la DPC classique contrôle la puissance active et réactive en tant que grandeurs cibles.

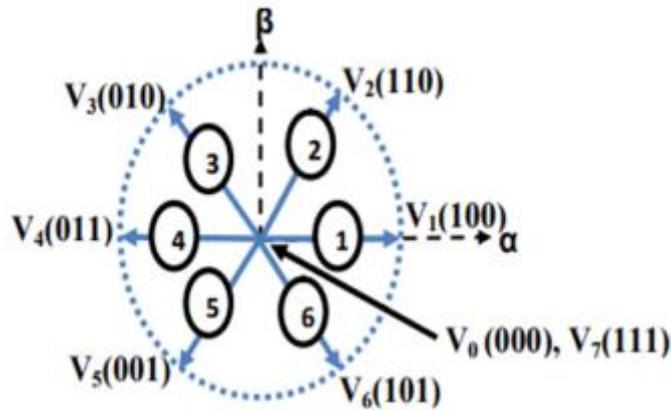
Le principe de base de la DPC consiste à choisir une séquence de commandes ( $S_a, S_b, S_c$ ) pour les semi-conducteurs de l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) à partir d'une table de commutation. Cette sélection est effectuée en se basant sur les erreurs ( $\Delta P$  et  $\Delta Q$ ) entre les références de puissance active et réactive ( $P_{ref}$  et  $Q_{ref}$ ) et les valeurs réelles ( $P$  et  $Q$ ) mesurées par deux comparateurs à hystérésis Figure (III.2) qui produisent des sorties [13].

### III.1.2 Les Avantages de la commande DPC

La commande DPC est basée sur le contrôle direct des puissances active et réactive sans boucle de courant ; Ces puissances sont commandées indépendamment les unes des autres à l'aide de deux contrôleurs à hystérésis, sont donc découplées et se caractérisent par le calcul rapide des puissances instantanées permet l'obtention d'une dynamique très élevée.

### III.1.3 Détection de secteur

Chaque vecteur de sortie de l'onduleur dans le convertisseur d'électronique de puissance a une influence significative sur les puissances active et réactive, en fonction de la position réelle du vecteur de tension source. Par conséquent, en plus des signaux provenant des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation prend en compte la position du vecteur de tension source, qui tourne à la pulsation ( $\omega$ ), dans le plan complexe. Cependant, au lieu d'indiquer la position exacte du vecteur de tension dans la table de commutation, le bloc de choix de secteur nous informe dans quelle zone se trouve le vecteur de tension source actuel [13].



**Figure III. 1:** Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) divisé en douze (12) secteurs.

Pour améliorer la précision et éviter les problèmes aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan de l'espace vectoriel est subdivisé en 12 secteurs de  $30^\circ$  chacun (Figure III.1). Le premier secteur est défini entre  $(11\frac{\pi}{6} < \varphi_n < 2\pi)$ . Les secteurs suivants sont déterminés de manière consécutive dans le sens trigonométrique en suivant le même critère, qui peut être formulé de manière générique comme suit :

$$(n - 2)\frac{\pi}{6} \leq \varphi_n \leq (n - 1)\frac{\pi}{6}, n = 1, 2, \dots, 12 \quad \dots \text{ (III.1)}$$

En fonction de l'orientation du vecteur de tension de la source par rapport à l'axe ( $\alpha$ ), le secteur correspondant auquel le vecteur est situé sera choisi. L'angle est déterminé en utilisant une fonction trigonométrique inverse qui utilise les composantes du vecteur de tension dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), tel qu'indiqué dans l'équation (III.2) :

$$\varphi = \text{actan} \frac{V_\beta}{V_\alpha} \dots \text{ (III.2)}$$

#### III.1.4 Calcul des puissances instantanées « Active et réactive »

Les expressions suivantes permettent de calculer instantanément les puissances active et réactive en se basant sur la mesure des tensions et des courants injectés :

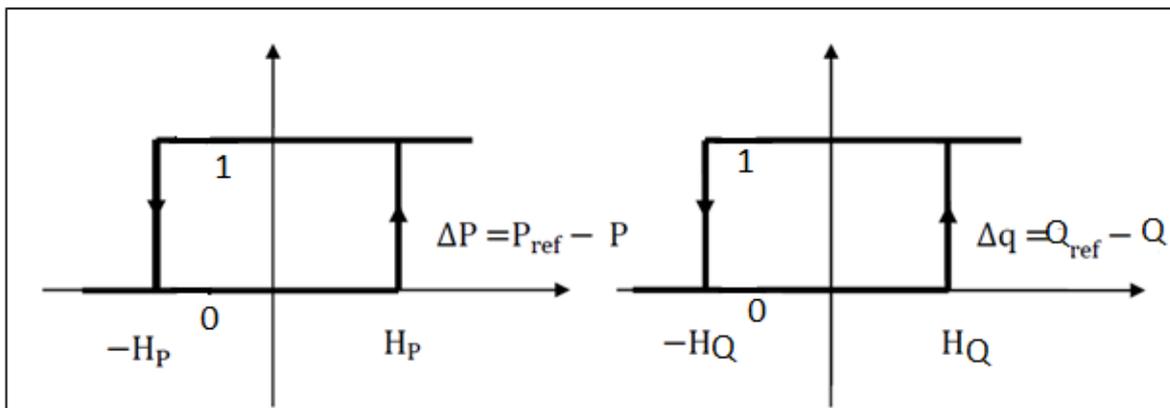
$$P = V_\alpha \cdot I_\alpha + V_\beta \cdot I_\beta \dots \text{ (III.3)}$$

$$Q = V_\beta \cdot I_\alpha - V_\alpha \cdot I_\beta \dots \text{ (III.4)}$$

### III.1.5 Comparateurs à hystérésis

La commande directe de puissance repose sur l'idée principale de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une plage souhaitée. Ce contrôle est réalisé à l'aide de deux comparateurs à hystérésis qui comparent les valeurs de référence et estimées des puissances active et réactive, comme illustré dans la figure (III.2)

Les dimensions des bandes d'hystérésis ont un impact sur les performances de l'onduleur, notamment sur la distorsion harmonique du courant et la fréquence moyenne de commutation [13].



**Figure III. 2:** Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

Le régulateur à hystérésis pour la puissance instantané active peut être décrit comme suit :

$$\Delta P > H_p \text{ donc } dP = 1$$

$$-H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ ET } \frac{d\Delta_p}{dt} > 0 \text{ donc } dp = 0$$

$$-H_p \leq \Delta P \leq H_p \text{ ET } \frac{d\Delta_p}{dt} < 0 \text{ donc } dp = 1$$

$$\Delta P < -H_p \text{ donc } dP = 0$$

Et le même pour le régulateur à hystérésis pour la puissance réactive :

$$\Delta Q > H_Q \text{ donc } dQ = 1$$

$$-H_Q \leq \Delta Q \leq H_Q \text{ ET } \frac{d\Delta_Q}{dt} > 0 \text{ donc } dQ = 0$$

$$-HQ \leq \Delta Q \leq Hp \text{ ET } \frac{d\Delta Q}{dt} < 0 \text{ donc } dQ = 1$$

$$\Delta Q < -HQ \text{ donc } dQ = 0$$

### III.1.6 La table de commutation

Une fois que les sorties logiques des comparateurs à hystérésis ont été établies et en fonction du secteur dans lequel se trouve le vecteur  $V(\alpha, \beta)$ , le vecteur de tension à appliquer est sélectionné à partir d'une table de commutation. Les erreurs numérisées ( $Sp, Sq$ ) et le secteur de travail sont utilisés comme entrées dans cette table, où les états de commutation  $Sa, Sb$  et  $Sc$  sont enregistrés.

À chaque état de commutation l'oduteur choisit l'état de commutation optimal en fonction de la combinaison des signaux numériques ( $Sp, Sq$ ) et du secteur. Ce choix est effectué de manière à maintenir l'erreur de la puissance active et réactive instantanée dans une plage souhaitée.

Dans le cas d'un redresseur de tension à deux niveaux, huit combinaisons différentes de commutation sont possibles, ce qui génère huit vecteurs de tension. Chaque vecteur de tension est calculé en utilisant une combinaison spécifique des interrupteurs et de la tension du bus continu. La sélection des vecteurs de tension en sortie de l'onduleur pour construire la table de commutation est basée à la fois sur les erreurs de puissance active et réactive et sur la position du vecteur de tension dans chaque secteur [13].

**Tableau III. 1:** ésume les variations de p et q en fonction de la position des vecteurs.

	V(k-2)	V(k-1)		V(k)	V(k+1)	V(k+2)	V(k+3)	V(0,7)
q	--	-		++	+	+	-	+-
P	+	-		-	+	++	++	+

Dans notre étude, on utilise une table à 12 secteurs (Tableau III.2).

**Tableau III. 2:** Les variations de p et q en fonction de la position des vecteurs [13].

Sp	Sq	Sect1	Sect2	Sect3	Sect4	Sect 5	Sect 6	Sect7	Sect 8	Sect9	Sect10	Sect11	Sect 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)

### III.1.7 Régulation de la tension continue

Un régulateur de type PI est utilisé pour contrôler la tension continue en corrigeant l'écart entre la tension continue mesurée et la référence. La puissance active de référence ( $P_{ref}$ ) est obtenue en multipliant le courant continu de référence par la tension continue ( $V_{dc}$ ) [14]

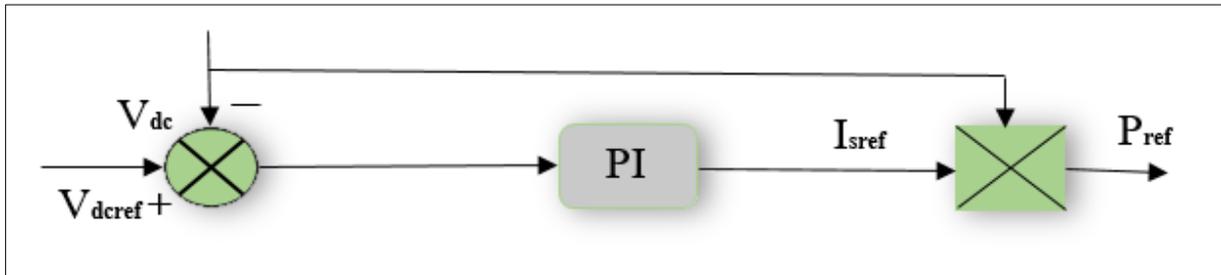


Figure III. 3: Régulation de la tension continue.

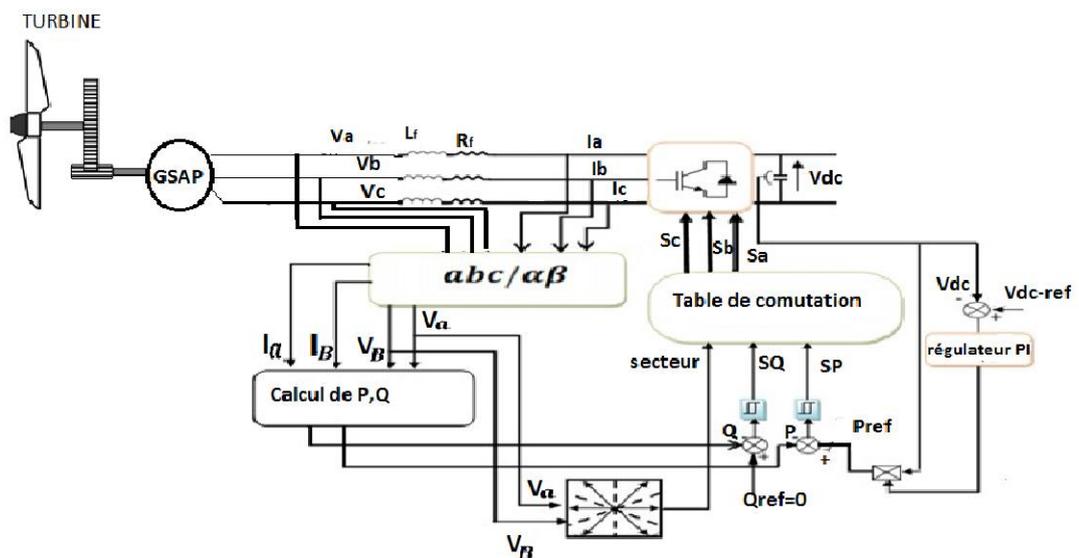


Figure III. 4: Configuration générale de la commande DPC.

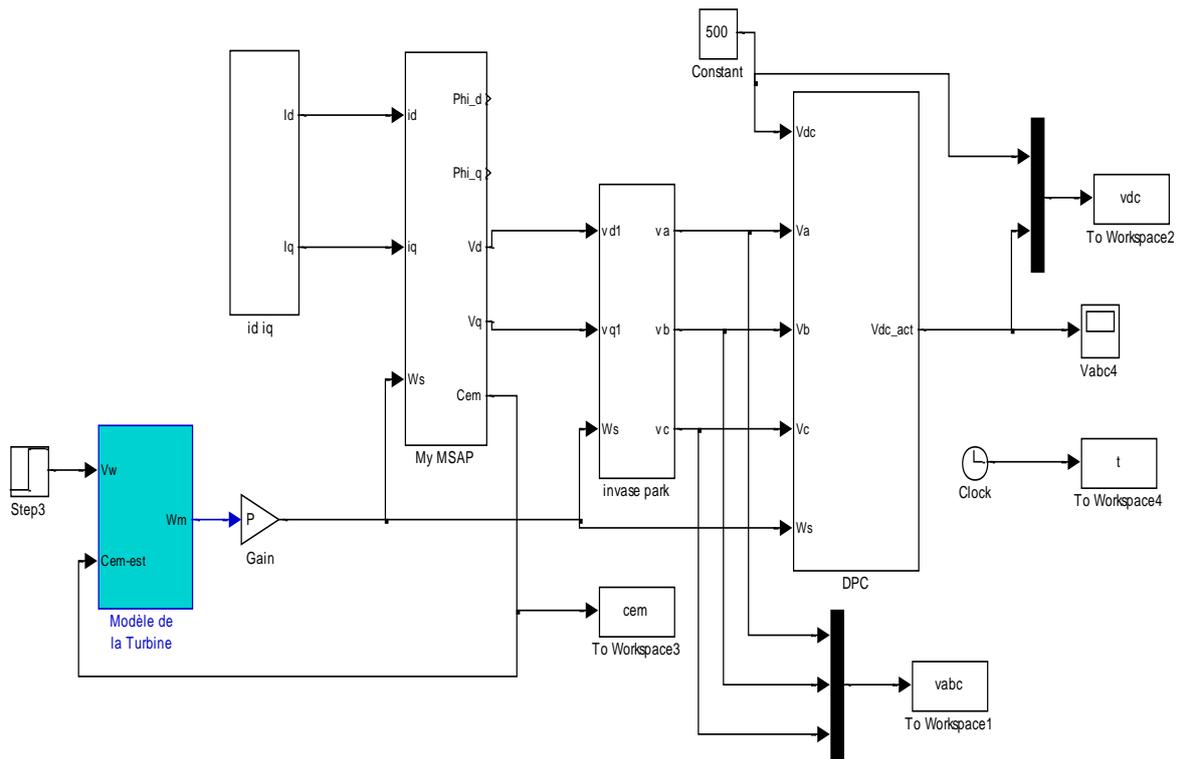


Figure III. 5: Schéma général de la commande DPC sur la chaîne de conversion

## III.2 Résultat de la simulation

### Conditions d'essai

$$V_{ref} = 500 \text{ V}$$

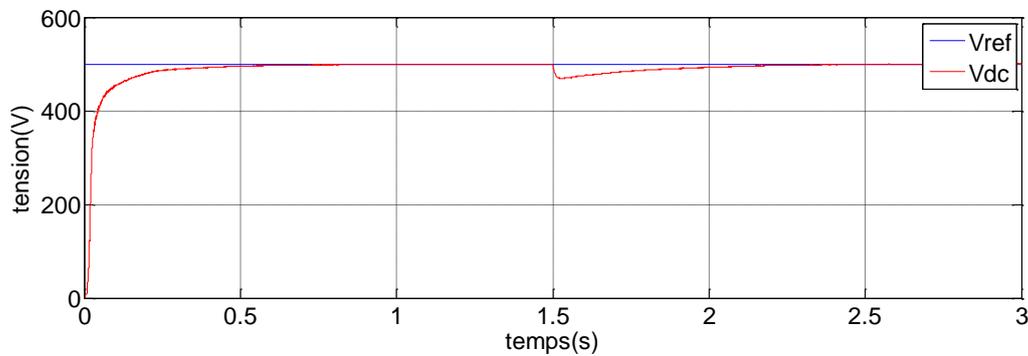
$$Q_{ref} = 0$$

$R_{ch}$  : Variation en échelon de ( $100\Omega$  à  $70\Omega$ ) à  $t = 1.5$  s.

La Figure III.6 illustre la réponse du système, où on peut la subdiviser en 4 phases :

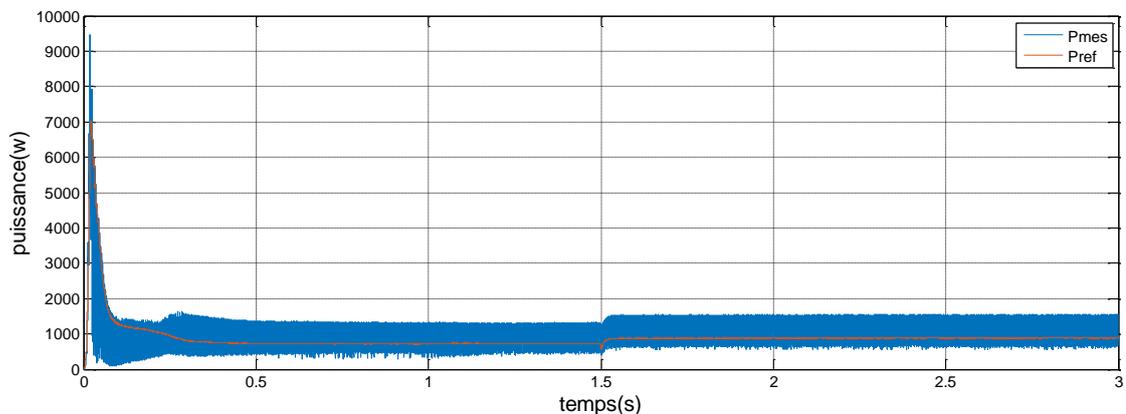
- **la première phase [0s ; 0,5s]** : présente le temps de repense du système ;
- **la deuxième phase [0,5s ; 1,5s] et la quatrième phase [2,25s ; 3s]** : sont des phases stationnaire du système où la tension du bus continu suit la tension de référence ( $V_{ref}$ ) ;

- **La troisième phase [1,5s ; 2, 25s]** : a connu à l'instant 1,5s une diminution brusque de la tension, en raison de la diminution de la charge, puis une augmentation linéaire jusqu'à la valeur égale à celle de la tension de référence.



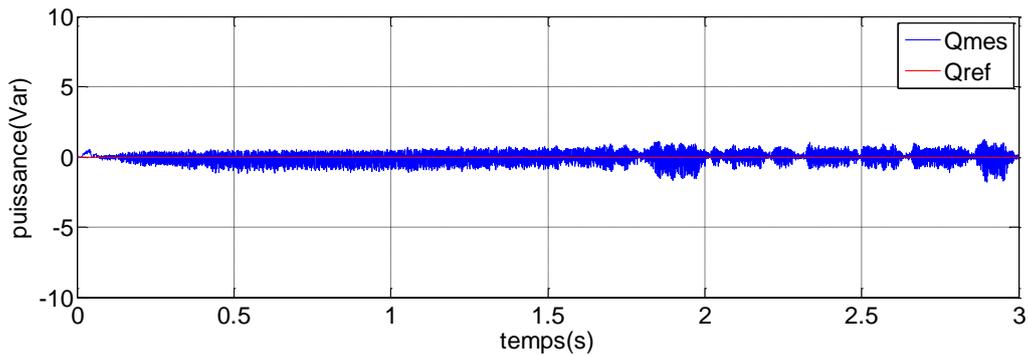
**Figure III. 6:** Allure de tension de bus continu (Vdc).

En observant la Figure III.7, il est notable que dans les premières 0,25s on a un régime transitoire avec une amplitude remarquable. Et que la variation de la puissance active mesurée suit celle de la puissance de référence à savoir qu'elle augmente une fois la charge diminue.



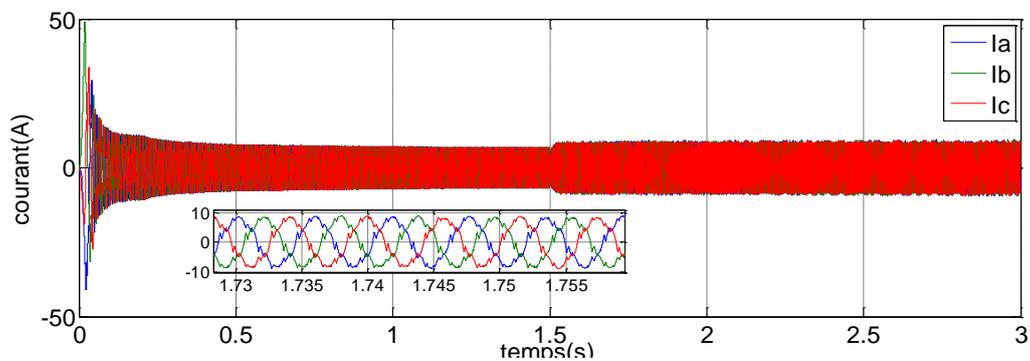
**Figure III. 7:** Allure de puissance active (Pref et Pmes).

L'analyse de la Figure III.8 montre que les perturbations de la puissance réactive mesurée varient entre 1 et -1.5 alors que la puissance de référence est nulle (zéro Var satisfaisant la condition du facteur de puissance unitaire).



**Figure III. 8:** Allure de puissance réactive ( $Q_{mes}$  et  $Q_{ref}$ ).

D'après la Figure III.9, les amplitudes des courants ( $I_{abc}$ ) sont augmenté de 6.5A à 9A dès l'instant  $t = 1.5s$ . Cette hausse est due à la diminution de la résistance.

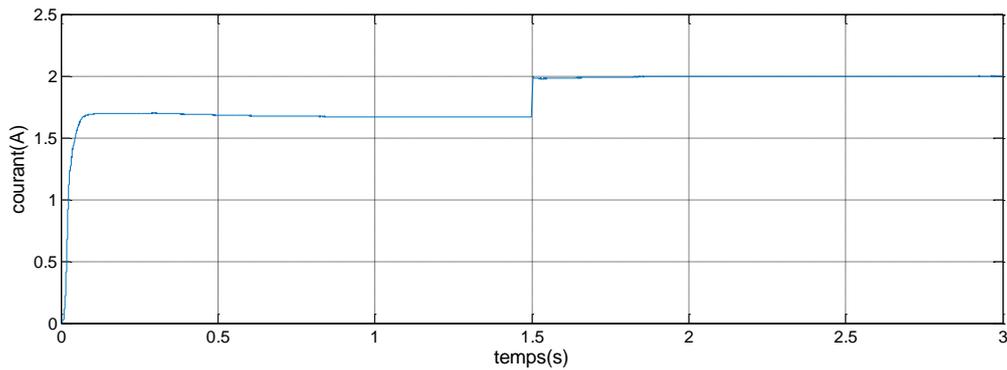


**Figure III. 9:** Allure des courants ( $I_{abc}$ ).

En examinant la Figure III.10, on observe que le courant  $I_{ch}$  présente une amplitude de 1.7A durant la période  $[0 ; 1,5s]$ . À l'instant  $t = 1.5s$  cette amplitude augmente suivie d'une légère diminution puis une réaugmentation jusqu'à ce qu'elle devienne stationnaire avec le temps.

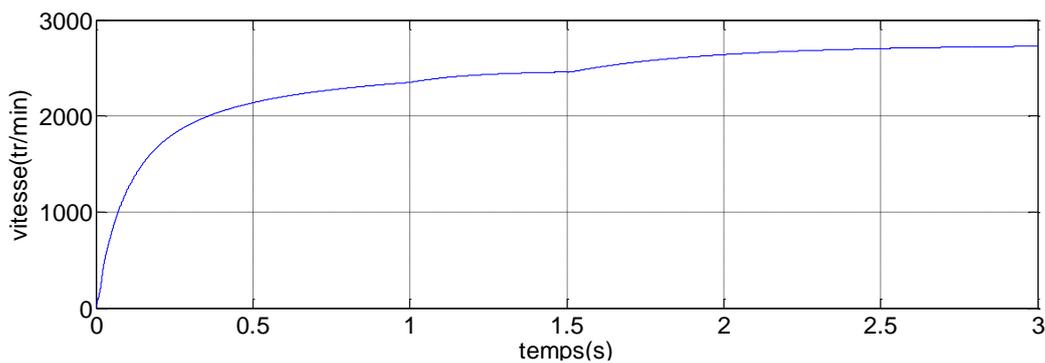
En relation avec le résultat obtenu dans la Figure III.7, on déduit que le courant est proportionnel avec la puissance active et cette remarque est confirmée par la relation

$$P = V_{dc} I_{ch}$$

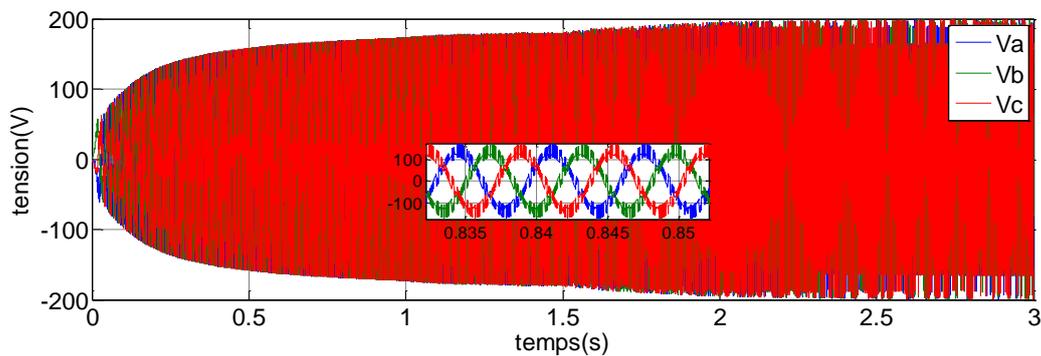


**Figure III. 10:** Allure de courant du charge ( $I_{ch}$ ).

D'après la Figure III. 11, la vitesse angulaire de la turbine présente une évolution exponentielle avec le temps, à partir de l'instant  $t = 2,5s$  devient stationnaire. L'analyse de la Figure III. 12 et en reliant avec la figure précédente, l'amplitude de la tension évolue dans le même sens d'évolution de la vitesse angulaire de la turbine (Figure III. 12).



**Figure III. 11:** Allure de la vitesse angulaire du turbine ( $W_m$ ).



**Figure III. 12:** Allure des tensions ( $V_{abc}$ ).

Les résultats de la simulation sont illustrés par les Figures (III.6, III.7, III.9), qui représentent respectivement la tension du bus continu ( $V_{dc}$ ), la puissance active ( $P$ ) et le courant statorique

( $I_{abc}$ ). Ces figures démontrent que la tension du bus continu reste pratiquement constante. Cela est possible grâce à l'action du régulateur PI, qui réagit aux variations de charge en ajustant la puissance à travers les courants. Ainsi, le facteur de puissance est maintenu constamment égal à 1.

### **Conclusion**

Les résultats de la simulation de la commande Directe de Puissance (DPC) avec un régulateur PI appliqué à une machine synchrone ne sont pas les résultats attendus, pour cela dans le chapitre qui suit on essaiera d'améliorer le système via la commande non linéaire.

# **Chapitre IV . Application de la logique floue à la DPC**

## **Introduction**

La logique floue, ainsi que le traitement des incertitudes en général, constitue l'une des branches de l'intelligence artificielle. Son but principal est d'analyser et de représenter des connaissances vagues, ainsi que de permettre un raisonnement approximatif. La première reconnaissance de cette discipline remonte à sa découverte en tant que branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique. Elle s'est ensuite intégrée avec succès aux techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Son origine remonte aux années soixante, à l'université de Berkeley en Californie, où le professeur Lotfi Zadeh a introduit les concepts de variables linguistiques et d'ensembles flous. L'expérimentation initiale de cette approche de commande a été réalisée par Mamdani.

La première reconnaissance de cette discipline remonte à sa découverte en tant que branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique. Elle s'est ensuite intégrée avec succès aux techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Son origine remonte aux années soixante, à l'université de Berkeley en Californie, où le professeur Lotfi Zadeh a introduit les concepts de variables linguistiques et d'ensembles flous. L'expérimentation initiale de cette approche de commande a été réalisée par Mamdani [14].

### **IV.1 Principe de la logique flou**

Le principe de réglage basé sur la logique floue adopte une approche similaire à celle des êtres humains, car il utilise des variables linguistiques au lieu de variables logiques. Ces variables linguistiques sont conçues pour être proches du langage humain. De plus, elles sont traitées en utilisant des règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. La logique floue développe toute une série de notions fondamentales qui permettent de démontrer et de justifier certains principes de base [15].

### **IV.2 Variables linguistiques et ensembles flous**

Lorsqu'il s'agit de décrire une situation, un phénomène ou une grandeur physique de manière imprécise, seules des expressions relatives ou vagues peuvent être utilisées. Ces différentes catégories d'expressions floues, connues sous le nom d'ensembles flous, constituent ce que l'on appelle des variables linguistiques.

Pour pouvoir effectuer des calculs numériques sur ces variables linguistiques, qui sont généralement normalisées sur un intervalle spécifique appelé univers de discours, il est nécessaire de les définir mathématiquement à l'aide de fonctions d'appartenance. Ces fonctions d'appartenance permettent de quantifier le degré de vérification des variables linguistiques par rapport aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

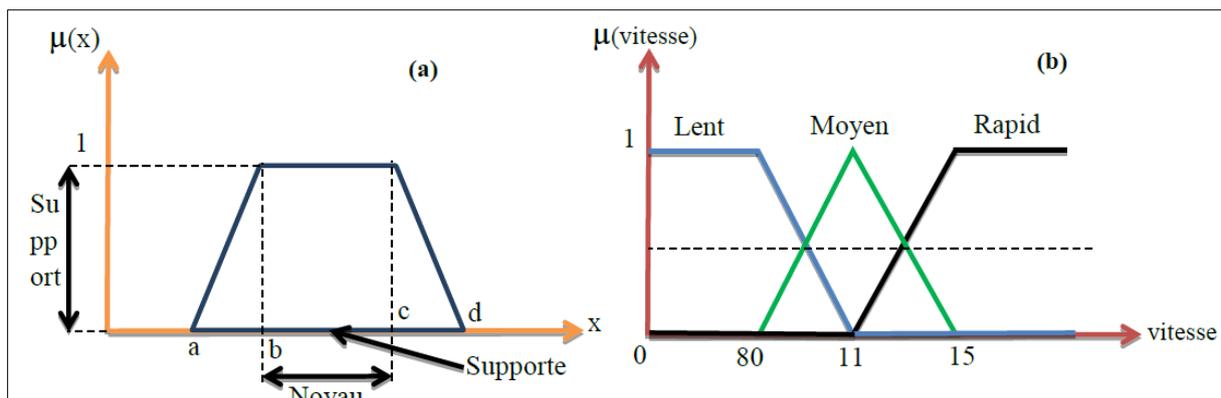
Dans un ensemble de référence E, un sous ensemble flou de sous référentiel E est caractérisé par une fonction d'apparence  $\mu$  de E dans l'intervalle de nombre réel [0,1] qui indique avec quel degré un élément appartient à cette classe. Un sous ensemble flou est caractérisé par un noyau, un support et une hauteur [15].

**Noyau :** C'est l'ensemble des éléments qui sont vraiment dans E :  $\text{noy} (E) = \{x / \mu_E (x) = 1\}$

**Support:** C'est l'ensemble des éléments qui sont dans E à degrés divers.

**Hauteur:** c'est la borne supérieure de la fonction d'appartenance :  $\text{ht} (E) = \sup(x \in E) \mu_E (x)$

**Ensemble normalisée :** un ensemble est dit normalisé s'il est de hauteur 1.

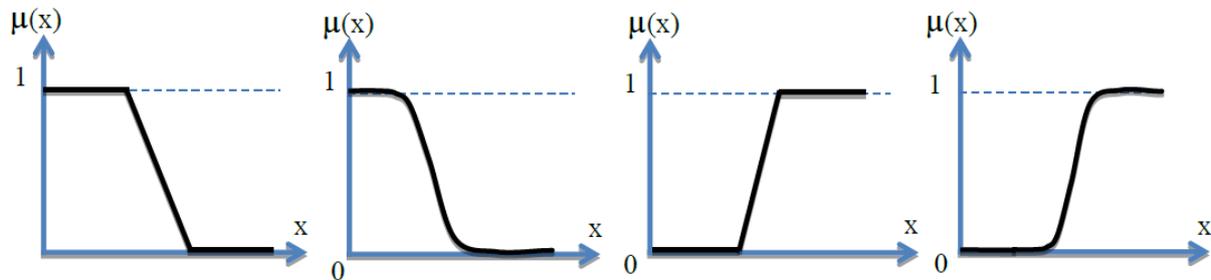


**Figure IV. 1:** a. format d'un ensemble flou normalisé. b. Représentation des variables linguistiques.

### IV.3 Fonctions d'appartenance

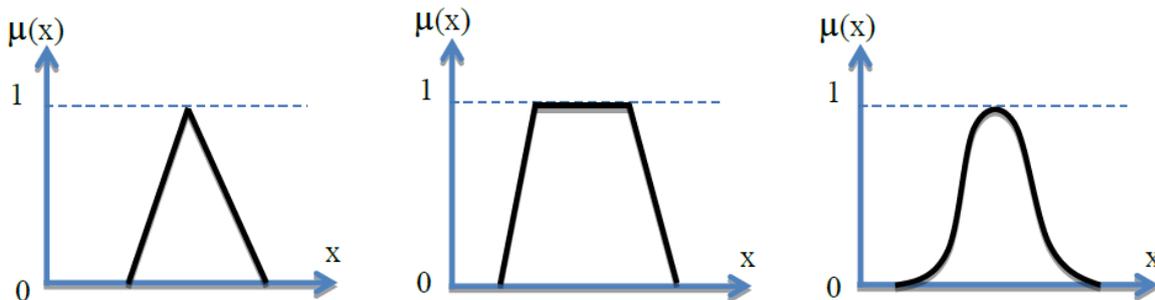
La définition d'un ensemble flou repose sur sa fonction d'appartenance, qui joue un rôle similaire à celui de la fonction caractéristique en logique classique. Cette fonction permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou. De manière générale, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou est notée  $\mu_E(x)$ . L'argument  $x$  fait référence à la variable caractérisée, tandis que l'indice E indique l'ensemble en question. Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes, telles que linéaires ou gaussiennes [15].

- \* Monotones (Croissantes ou décroissantes), comme il est montré sur la figure (V.2.a)
- \* Triangulaire, figure (V.2.c)
- \* Trapézoïdales, figure (V.2.d)
- \* En forme de cloche (Gaussienne), figure (V.2.e)



a. Exemple des fonctions d'appartenances monotones décroissantes

b. Exemple des fonctions d'appartenances monotones croissantes



c. Forme triangulaire

d. Forme trapézoïdale

e. Forme gaussienne

**Figure IV. 2:** Différentes formes des fonctions d'appartenanc

## IV.4 Règles floues

### A. Inférence floue

Les règles floues permettent de tirer des informations sur l'état du système en se basant sur les qualifications linguistiques fournies lors de l'étape de fuzzification. Ces informations sont également des qualifications linguistiques.

En général, les règles floues sont dérivées des expériences acquises par les opérateurs ou les experts. Ces connaissances sont ensuite converties en règles simples qui peuvent être utilisées dans un processus d'inférence floue. Par exemple, si un expert exprime la règle « si la

température de l'eau chaude, il faut ajouter de l'eau froid », le système utilisera une règle du genre « si p alors q » [16].

### **B. Traitement numérique de l'inférence**

Lors du réglage par logique floue, on a fourni une valeur de commande pour ensemble de variables physiques d'entrée. Par exemple pour la règle :

Si l'on considère que  $\mu_{A_1}(x_1)$  est de degré d'appartenance de  $x_1$  à  $A_1$  et  $\mu_{A_2}(x_2)$  est celui de  $x_2$  à  $A_2$  et en combinant ces deux valeurs, on obtient la valeur à affecter à l'ensemble flou de sortie  $A_3$ .

Il existe différentes options pour effectuer les opérations qui combinent les valeurs d'entrée et les valeurs de sortie, ce processus est connu sous le nom de méthode d'inférence. Les approches les plus couramment utilisées sont les suivantes [16] :

- Méthode d'inférence **MAX-MIN**.
- Méthode d'inférence **MAX-PROD**.
- Méthode d'inférence **SOMME-PROD**.

### **IV.5 Défuzzification**

Le traitement des règles d'inférence génère une valeur floue. La défuzzification consiste à convertir l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une valeur de commande précise à appliquer au processus. Dans la littérature, plusieurs stratégies sont décrites pour effectuer cette opération, telles que la moyenne des maxima, le centre des aires et le centre des maximas. La méthode de défuzzification la plus couramment utilisée en commande floue est celle du centre de gravité, car elle fournit de manière intuitive la valeur la plus représentative de l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles. Cette méthode consiste à calculer le centre de gravité de la surface formée par la fonction d'appartenance obtenue [16].

### **IV.6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue**

La commande par la logique floue se caractérise par un ensemble des avantages mais aussi par certains inconvénients, cités ci-dessous :

### IV.6.1 Avantages

- ✓ Le non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus.
- ✓ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur du processus.
- ✓ La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser).
- ✓ L'emploi possible aussi pour les processus rapides (grâce à des processeurs dédiés).
- ✓ La réduction du temps de développement et de la maintenance.
- ✓ La simplicité de définition et de conception.

### IV.6.2 Inconvénients

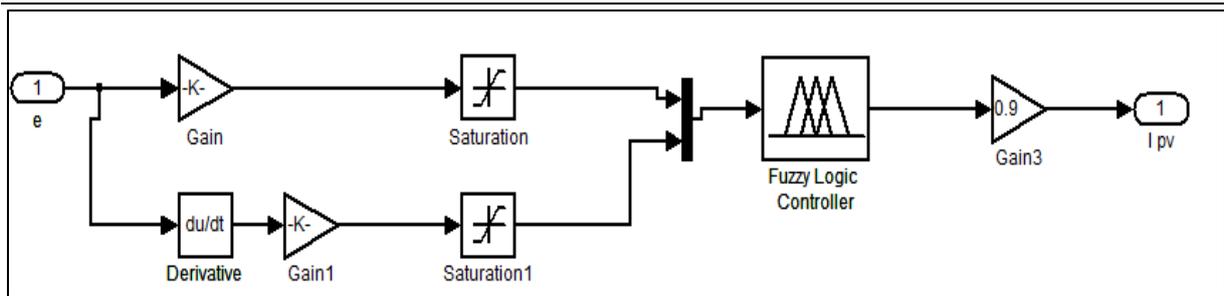
- ✓ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- ✓ L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile).
- ✓ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

## IV.7 Application de la logique floue dans la technique DPC

Dans la méthode classique de contrôle direct de puissance (DPC), les mêmes états sont utilisés pour assurer un bon contrôle en régime de fonctionnement normal et pour faire face à de fortes perturbations lors des variations de la commande de la puissance active et réactive. Cependant, l'utilisation d'un régulateur à hystérésis rend difficile la prise en compte de toutes les dynamiques des puissances actives et réactives instantanées lors de la génération des instants de commutation. Cela peut avoir un impact sur les performances du système en termes de stabilité et de rapidité de réponse. Pour remédier à cela, il est nécessaire de baser la génération des instants de commutation sur différents niveaux d'erreurs, ce qui peut être réalisé en utilisant un contrôleur flou [14].

### IV.7.1 Principe et structure de la commande

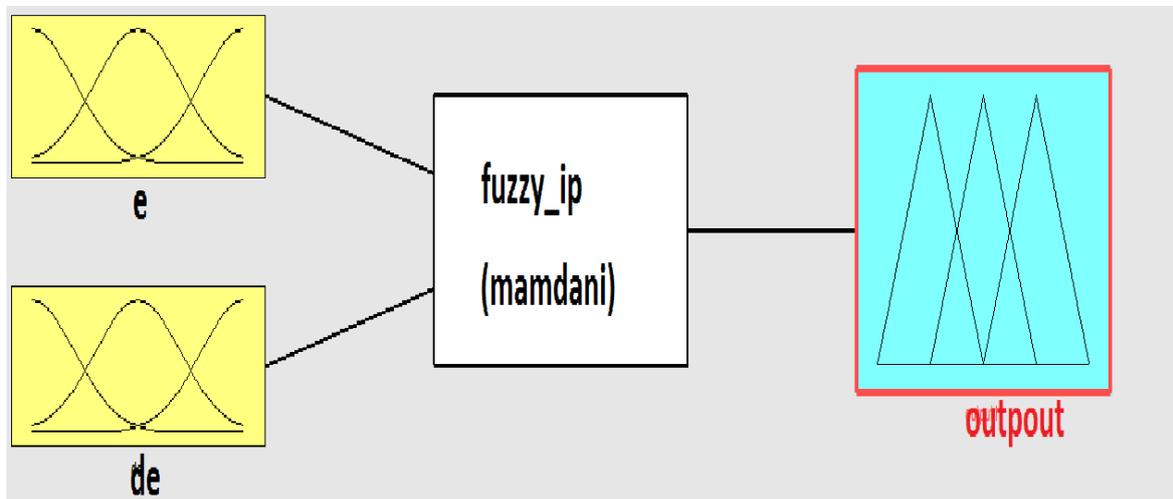
Le contrôleur flou est de type Mamdani il reçoit comme entrée l'erreur ( $e$ ) et la variation de l'erreur ( $de$ ), le schéma bloc de la structure de commande est illustré par la figure (V.3)



**Figure IV. 3:** Schéma bloc d'un régulateur PI floue.

### IV.7.2 Les entrées floues

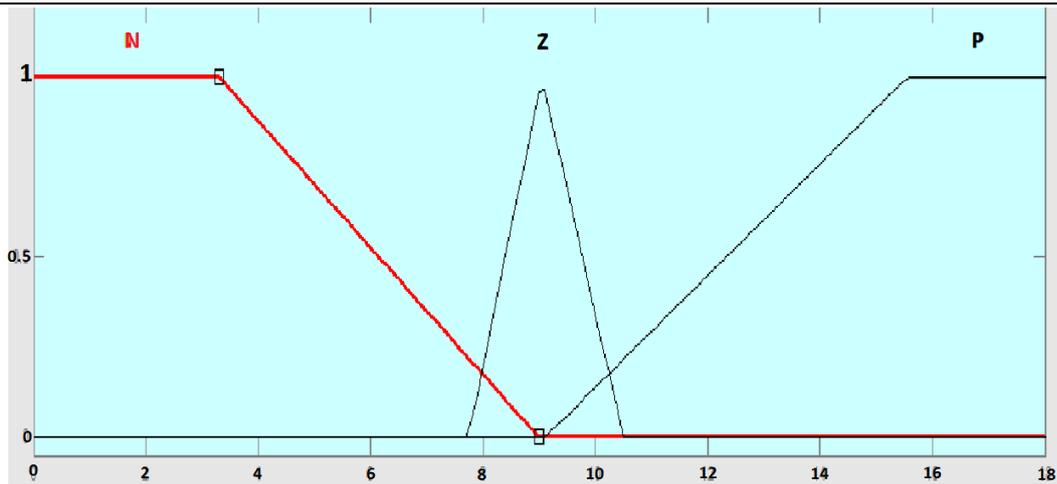
Dans notre système on a deux entrées et une seule sortie (Figure V.4) :



**Figure IV. 4:** Création d'entrées et sortie.

### IV.7.3 Fonctions d'appartenances

Les fonctions d'appartenance des entrées (( $e$ ), ( $\Delta e$ )) sont choisies identiques de formes triangulaires avec sept classe et sont définies sur l'intervalle  $[1, 18]$  comme le montre la figure (V.4)



**Figure IV. 5:** Fonctions d'appartenances du contrôleur flou (entrées, sorties).

#### IV.7.4 Règles d'inférence

Le tableau (V.1), montre la table des règles du contrôleur flou relative au système ou toutes les entrées de la matrice sont :

Les ensembles flous de l'erreur (e) et le dérivé de l'erreur (de). La sortie de cette table est nommée résultats :

**Tableau IV. 1:** Règles floues relative au contrôleur flou.

La dérivé d'erreur (de)	N	Z	P
Erreur			
N	N	N	Z
Z	Z	Z	Z
P	Z	P	P

Avec :

**N** : pour négatif, **P** : pour positif, **Z** : pour zéro

#### IV.8 Résultats de simulation

Conditions d'essai

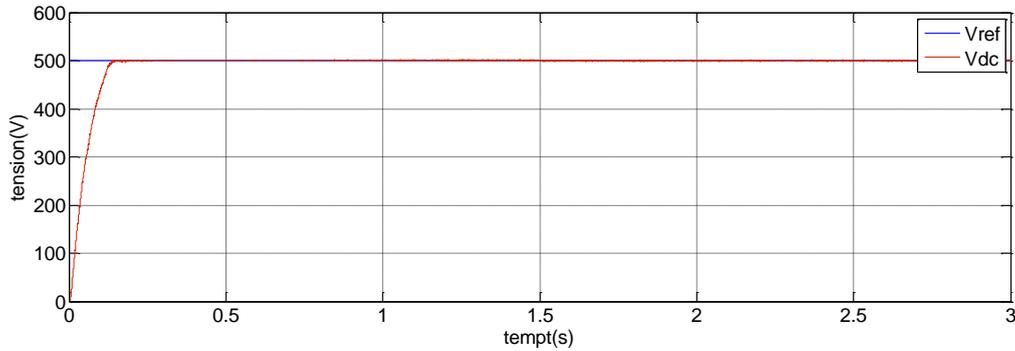
$$V_{ref} = 500 \text{ V}$$

$$q_{ref} = 0$$

$R_{ch}$  : Variation en échelon de ( $120\Omega$  à  $100\Omega$ ) à  $t = 1.5$  s

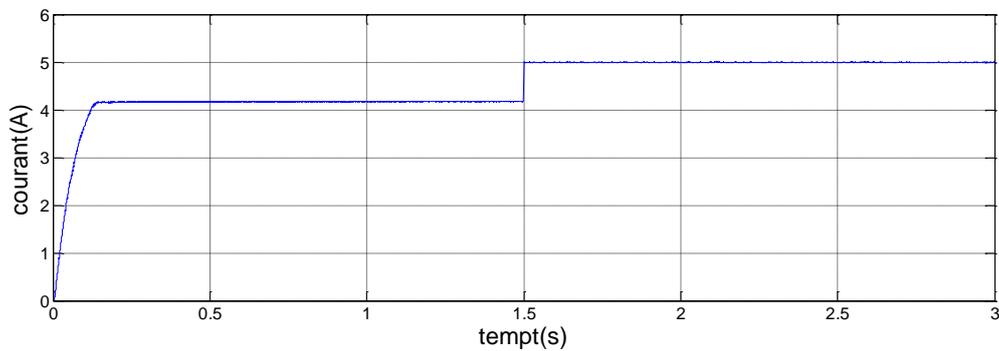
Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation de la DPC PI floue.

La réponse du système est montrée sur la Figure V.6, On remarque que la tension du bus continu suit la référence ( $V_{ref}$ ) sans aucune perturbation, grâce à une régulation efficace.



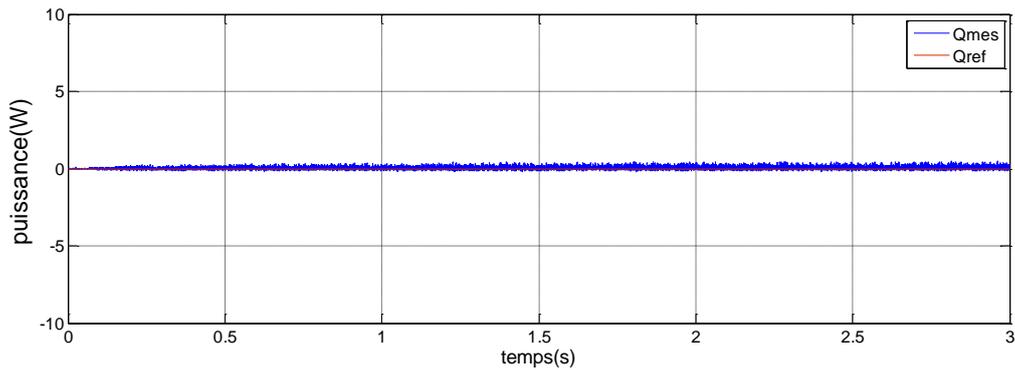
**Figure IV. 6:** Allure de tension de bus continu ( $V_{dc}$ ).

Le graphe de courant du charge (Figure IV. 7) montre l'absence de la perturbation illustré dans la Figure III.6 qu' on a obtenue durant la période [1,5s ; 2, 25s].



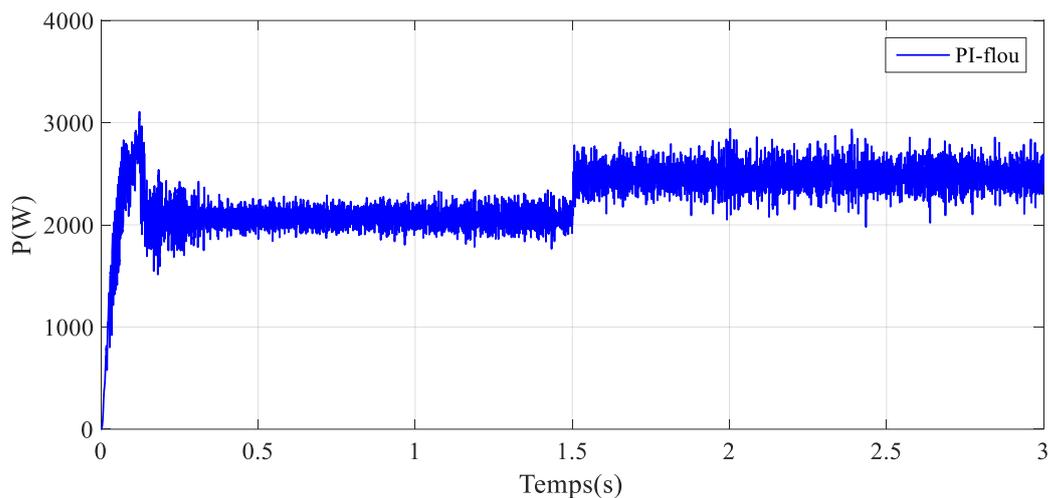
**Figure IV. 7:** Allure de courant du charge ( $I_{ch}$ ).

L'analyse de la Figure IV. 8 montre que la perturbation temporelle de la puissance réactive mesurée est stationnaire proche de 0 Var.



**Figure IV. 8:** Allure de puissance réactive ( $Q_{mes}$  et  $Q_{ref}$ ).

Figure IV. 9 qui correspond à la variation de la puissance en fonction du temps, montre un régime transitoire durant le temps de repense du système dont la puissance mesuré maximal est environ 4500W. Au cours du temps cette puissance est stationnaire. Une fois la charge diminue, les deux puissances sautent à une valeur élevée.



**Figure IV. 9:** Allure de puissance active ( $P_{ref}$  et  $P_{mes}$ ).

### IV.9 Etude comparative

Les résultats obtenus à partir des deux études effectuées, résumé dans le Tableau IV. 2 et la Figure IV. 10, montrent clairement que ceux réalisées avec la commande DPC par la logique floue présentent des performances meilleures que la DPC classique présenter dans chapitre III.

**Tableau IV. 2 :** tableau récapitulatif des résultats de l'étude.

Variables	DPC classique « PI »	DPC par la logique floue
-----------	----------------------	--------------------------

Temps de repense $V_{dc}$	<b>Allongé</b>	<b>court</b>
Perturbation $V_{dc}$ durant [1,5s ; 2, 25s]	<b>Présence</b>	<b>Absence</b>

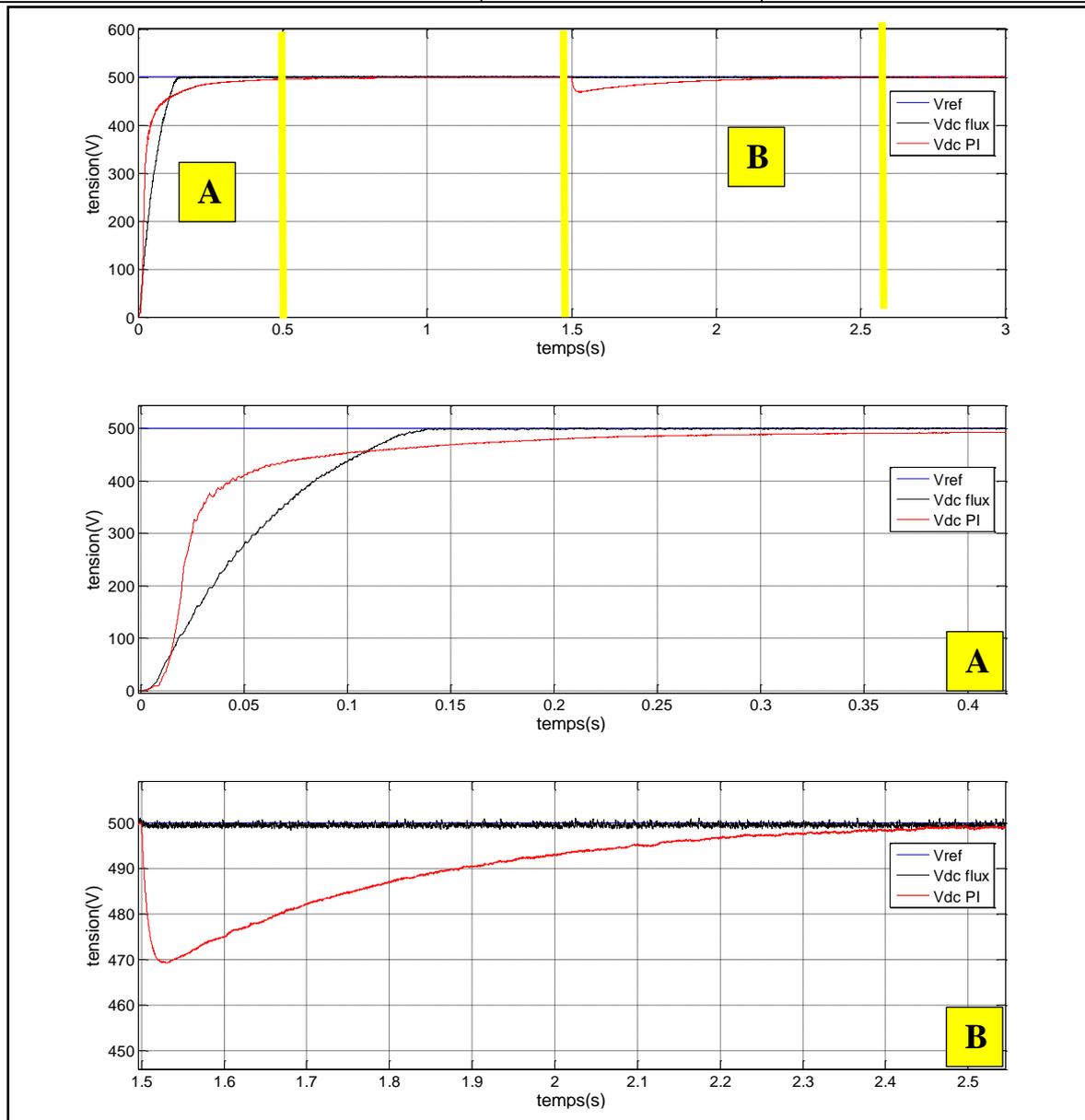


Figure IV. 10: l'ensemble des résultats de la tension  $V_{dc}$  floue et  $V_{dc}$  pi

## Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le concept de la DPC avec régulateur PI floue. Après avoir effectué des simulations et comparé les résultats des deux méthodes de commande, à savoir la DPC classique et la DPC floue, nous sommes parvenus à la conclusion que cette dernière offre des performances supérieures.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'objectif de mémoire est de proposer une approche de commande non linéaire pour un système de conversion d'énergie éolienne autonome basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents, afin d'optimiser la production d'énergie, d'améliorer la stabilité du système et de maximiser l'utilisation de l'énergie éolienne disponible.

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble sur les systèmes éoliens, mettant en évidence leur importance en tant que source d'énergie renouvelable. Nous avons examiné différents types de systèmes éoliens, qu'ils soient à axe horizontal ou axe à verticale, ainsi les avantages et inconvénients respectifs, et leur principe de fonctionnement. Nous avons également présenté la machine synchrone à aimants permanents, qui joue un rôle crucial dans la conversion de l'énergie éolienne en électricité.

Dans le second chapitre, nous avons abordé de manière succincte la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Plus spécifiquement, nous avons utilisé la transformation de Park pour représenter la machine triphasée dans un référentiel à deux axes. Cette approche permet de simplifier la résolution des équations électromagnétiques de la machine, facilitant ainsi l'analyse de son comportement.

Au cours des deux derniers chapitres, nous avons examiné deux approches de contrôle : la DPC classique avec un régulateur PI et l'application de la logique floue à la DPC. Ces approches ont été étudiées pour comprendre leurs comportements respectifs et présenter les concepts associés. À la fin, nous avons procédé à une simulation en utilisant MATLAB/Simulink.

La simulation réalisée à la fin des deux derniers chapitres utilisant MATLAB/Simulink a montré que les résultats obtenus avec la technique de logique floue étaient supérieurs à ceux de l'autre méthode (la commande PI). Cela a permis d'atteindre parfaitement l'objectif souhaité de limiter la puissance au niveau de la turbine éolienne.

## **Références bibliographique**

## Références bibliographiques

### Références

- [1] S. Touati, M. Alibey ,«Utilisation des convertisseur multi-niveux pour le contrôle d'un système de production d'énergie éolienne autonome basé sur une génératrice a cage d'écureuil», Memoire de Master de l'Universite ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA ,2020/2021.
- [2] F. Ouatmani, N. Touahria, « Contrôle d'un système éolien connecté au Réseaux», Memoire de Master de l'Universite ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA, 2019/2020.
- [3] A. Allouache, K. Ghour, « Commande d'un système éolien connecté au réseau », Memoire de Master de l'Universite ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA, 2018/2019.
- [4] H.Mernache, B.Kasmi, «Etude d'une petite éolienne en fonctionnement autonome» Memoire de Master de l'Universite ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA, 2019/2020.
- [5] B. Houara, « Commande DTC Prédictive de la MSAP», Memoire de Master de l'Universite Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi,2016/2017.
- [6] H. Mesloub Hayette, «Commande DTC Prédictive d'Une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Thèse Doctorat de Université de Biskra ,2016.
- [7] k. Nabti, «Stratégies De Commande et Techniques Intelligentes Appliquées Aux Machines De Type Synchrone», Thèse Magister de l'Univercité Mentouri de Constantine, 2010.
- [8] B. Robyns, Y. Pankow, L. Leclercq, B. Francois, « Equivalent Continuous Dynamic Model of Renewable Energy Systems », 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems : Electrimacs 2002, C D, 18-21 Aout 2002, Montreal, Canada.
- [9] J.T.G. Pierikm, J. Morrenm, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie, « Electrical and Control Aspects of Offshore Wind Farms II (Erao II ), Volume 1: ‘Dynamic models of wind farms’ » , Juin 2004.
- [10]A.Hamichi, F.Benkerrou, «Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent», Mémoire de Master de l'Universite ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2014/2015.

## Références bibliographiques

- [11] Tamiti, «Etude et commande d'un système éolien a base d'une génératrice synchrone a aimant permanents», Mémoire de Master de l'Université ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2010.
- [12] F.Ouaoudia, T.Yahia, «Commande non linéaire en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à une éolienne», Mémoire de Master de l'Université ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2019/2020.
- [13] F.Ouatmani, N.Touahria, «Contrôle d'un système éolien connecté au Réseau», Mémoire de Master de l'Université ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA, 2019/2020.
- [14] S. Soltana, A. Loubar, « Amélioration des performances d' u n système éolien connecté au réseau», Mémoire de Master de l'Université ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA, 2021/2022.
- [15] D. Boudiaf, M. Belil, «Commande DTC par logique floue d'un moteur à induction alimenté par onduleur à cinq niveaux», Mémoire de Master de l'Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,2019/2020 .
- [16] R. Gacem, .A. Ayadi, «Commande par logique floue de vitesse et de flux d'un moteur asynchrone linéarisé par Entrées-Sorties », Mémoire de Master de l'Université AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA,2018/2019 .

## **Résumé :**

Ce mémoire se concentre sur la commande non linéaire d'un système de conversion d'énergie éolienne autonome basé sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Nous avons commencé par examiner de manière générale les systèmes éoliens, en fournissant une introduction, une description des différents types d'éoliennes, ainsi qu'une discussion sur les avantages et les inconvénients associés. En outre, nous avons exploré en détail la technologie des machines synchrones à aimants permanents utilisée dans les éoliennes modernes. Le second chapitre est dédié à une modélisation détaillée de la machine synchrone à aimants permanents, de la turbine et du processus de transformation de Park. Les deux dernières parties du mémoire est consacrée à la commande DPC par régulateur PI classique et la logique floue. Le but de ces techniques est de maintenir une tension constante à la sortie du redresseur. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ces techniques ainsi que les intérêts et les limites de chacune d'elles.

## **Abstract:**

This thesis focuses on the non-linear control of an autonomous wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG). We began by examining wind energy systems in a general sense, providing an introduction, a description of different types of wind turbines, as well as a discussion on the associated advantages and disadvantages. Furthermore, we extensively explored the technology of permanent magnet synchronous machines used in modern wind turbines.

The second chapter is dedicated to a detailed modeling of the permanent magnet synchronous machine, the turbine, and the Park transformation process. The last two parts of the thesis are devoted to the Direct Power Control (DPC) using a classical PI controller and fuzzy logic. The goal of these techniques is to maintain a constant voltage at the output of the rectifier. Simulation results demonstrated the effectiveness of these techniques as well as the advantages and limitations of each approach.

ملخص:

تركز هذه الأطروحة على التحكم غير الخطي في نظام تحويل طاقة الرياح المستقل على أساس مولد غناطيسي دائم متزامن. بدأنا بالنظر في أنظمة طاقة الرياح بشكل عام، وتقديم مقدمة، ووصف للأنواع المختلفة من توربينات الرياح، ومناقشة المزايا والعيوب المرتبطة بها. بالإضافة إلى ذلك، استكشفنا بالتفصيل تقنية الآلة المتزامنة المغناطيسية الدائمة المستخدمة في توربينات الرياح الحديثة. الفصل الثاني مخصص للنمذجة التفصيلية للآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم والتوربين وعملية

تحويل المنتزه. تم تخصيص الجزأين الأخيرين من الأطروحة للتحكم DPC بواسطة منظم PI التقليدي والمنطق الضبابي. الغرض من هذه التقنيات هو الحفاظ على جهد ثابت عند خرج المعدل. أظهرت نتائج المحاكاة فاعلية هذه التقنيات بالإضافة إلى اهتمامات وحدود كل منها.