

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie
Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Présenté par :

Mr. HANICHE Mustapha
Mr. MILOUDI Bahaeddine

Pour l'obtention du diplôme

Master

En

« Électrotechnique »

Spécialité:

«Électrotechnique industrielle »

Intitulé du mémoire

**Commande DTC par logique floue d'une GSAP dédiée pour une
application éolienne en sites isolés**

Soutenu devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------------|---------------------------------------------|--------------|
| Dr. Bot YUCEF | Université Djillali Bounaama-Khemis Miliana | Président |
| Dr. LAYATE ZAKARIA | Université Djillali Bounaama-Khemis Miliana | Examineur |
| Dr. HAMZAOU IHSSEN | Université Djillali Bounaama-Khemis Miliana | Promoteur |
| Dr. C.KARA MOSTEFA KHELIL | Université Djillali Bounaama-Khemis Miliana | Co-Promoteur |

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le tout Puissant de nous avoir donné le courage, la Volonté et la patience pour faire ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier Mme. **Ihssen HAMZAOUI** et Mme. **C.KARA MOSTEFA KHELIL** pour avoir accepté de nous encadrer, nous nous exprimons par la*

Présente toute notre gratitude pour la confiance qu'il nous a prodigué, pour ses encouragements continus, pour le suivi de près de notre travail et pour ses qualités humaines.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'il sont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du département de l'électrotechnique de l'université d'UDBKM – Khmis Miliana tout le long de ces années d'études.

Nous voudrions aussi remercier tous les membres de nos famille, nos chers parents, nos chères sœurs, nos chers frères, nos chères amis et toutes les personnes qui ont participé de

Près ou de loin à la réalisation de ce travail Encore une fois merci.

Tables des matières

Chapitre I

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.1. Introduction..... | 1 |
| I.2 L'énergie électrique éolienne | 1 |
| I.2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne..... | 1 |
| I.2.2. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne..... | 2 |
| I.2.3. Potentiel Eolien en Algérie..... | 3 |
| I.2.4. Programme de l'énergie éolienne en Algérie | 4 |
| I.3. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs..... | 5 |
| I.3.1. Aspects constitutifs et technologiques des éoliennes..... | 5 |
| I.3.2. Principe composante d'une éolienne..... | 5 |
| I.3.3. Fonctionnement d'une centrale éolienne..... | 6 |
| I.4. Les éoliennes connectées au réseau électrique | 7 |
| I.4.1. Fonctionnement à vitesse fixe | 7 |
| I.4.2. Fonctionnement à vitesse variable | 8 |
| I.5. Modélisation Mathématique de la turbine éolienne | 9 |
| I.5.1. Modèle aérodynamique | 9 |
| I.5.2. Modèle de la partie mécanique..... | 11 |
| I.6. Intérêt de la vitesse variable | 13 |
| I.6.1. Contrôle dans la zone I (optimisation de la puissance)..... | 14 |
| I.6.1.1 Maximisation de la Puissance sans asservissement de la vitesse..... | 15 |

I.6.2. Contrôle dans la zone II (limitation de la puissance).....16

I.7 Résultat de simulation17

I.8 Conclusion :.....19

Chapitre II

II.1 Introduction :.....20

II.2. Principe de la commande DTC20

II.3. Caractéristiques principales de la commande directe du couple21

II.4. Modélisation mathématique de la génératrice synchrone à aimant permanents.....22

II.4.1. Hypothèses simplificatrices22

II.4.2. Modèle de la machine dans le repère (abc).....23

II.4.2.1 Équations des tensions23

II.4.2.2 Équations des flux24

II.5. Modèle du convertisseur coté GSAP :.....25

II.5.1 Séquence d'un convertisseur de tension triphasé :28

II.6 Modélisation en charge de la GSAP :.....29

II.7. Stratégie de commande directe du flux et de couple30

II.7.1 Principe du contrôle du flux statorique30

II.8. Sélection du vecteur de tension32

II.9. Les estimateurs :.....33

II.9.1. Estimateur du flux statorique :.....33

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.9.2. Estimation du couple électromagnétique..... | 34 |
| II.10 Elaboration du vecteur de commande | 35 |
| II.10.1 Elaboration du correcteur du flux..... | 35 |
| II.10.2 Elaboration du correcteur du couple | 35 |
| II.11 Elaboration de la table de commutation | 36 |
| II.11.1 Fonctionnement à deux quadrants | 36 |
| II.11.2 Fonctionnement à quatre quadrants | 36 |
| II.11.3. Régulation de la tension du bus continu | 37 |
| II.12 Les résultats de simulation et interprétation : | 38 |
| II.13 Conclusion..... | 41 |

Chapitre III

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.1.Introduction : | 62 |
| III.2 Principe de la logique floue : | 62 |
| III.2.2. Variables linguistiques et ensembles flous : | 62 |
| III.2.3 La fonction d'appartenance : | 63 |
| III.3 L'opérateur de la logique floue : | 64 |
| III.4 Structure d'une commande floue : | 65 |
| III.4.1 Fuzzification:..... | 66 |
| III.4.2La base de règles :..... | 66 |
| III.4.3 Méthode d'inférence floue : | 66 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.4.4 Défuzzification : | 66 |
| III.5 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue : | 67 |
| III.6 Application de la logique floue dans la DTC à deux-niveaux : | 67 |
| III.6.1 Choix des fonctions d'appartenances : | 68 |
| III.6.2 Fuzzification : | 68 |
| III.6.3 Variable de commande : | 68 |
| III.6.4 Défuzzification : | 69 |
| III.7 Le schéma synoptique de la DTFC à deux-niveau : | 69 |
| III.8 DTC-Floue appliquée sur un Redresseur à deux niveaux : | 70 |
| III.9 Table de commutation: | 73 |
| III.10. Les résultats de simulation : | 74 |
| III.11. Conclusion : | 76 |
| Bibliographie : | 81 |
| ANNEXE : | 86 |

Liste des tableaux :

Tableau II 1: Table de vérité de la structure de la DTC 37

Tableau III 1: Signification des opérateurs dans les deux logiques classique et floue..... 65

Tableau III 2: les tables de commutation avec Redresseur à deux niveaux. 73

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I 1: Évolution mondiale de la capacité éolienne installée en MW [12]...... 3

Figure I 2: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie..... 4

Figure I 3: La ferme éolienne de 10 MW à Kabertène (Adrar)..... 4

Figure I 4: Aérogénérateur à axe vertical **Figure I 5:** Aérogénérateur à axe horizontal. 5

Figure I 6: Eolienne avec multiplicateur 6

Figure I 7: Appareils utilisés pour la mesure du vent 7

Figure I 8: Eolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone à cage 8

Figure I.9: Éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone 8

Figure I.10: Principe de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique 9

Figure I 11: Variation du coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents angle β 11

Figure I.12: Modèle mécanique de la turbine éolienne. 12

Figure I.13: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne 13

Figure I.14: caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique 13

Figure I.15: Zones de fonctionnement des éoliennes 14

Figure I.16: Evolution de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation de la turbine..... 15

Figure I.17: Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent..... 16

Figure I.18: Profil aérodynamique d'une pale 17

Figure I.19 : Allure du profil du vent. 17

Figure I.20 : Allure de la Puissance aérodynamique. 17

Figure I.21: Allure du couple aérodynamique. 18

Figure I.22: Allure de la vitesse mécanique 18

Figure I.23: Allure de coefficient de puissance..... 18

Figure I.24: Allure de la vitesse relative λ 18

Chapitre II

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.1 Structure de base de la commande directe de couple..... | 21 |
| Figure II.2. Représentation schématique d’une machine synchrone dans le repère abc..... | 23 |
| Figure II.3 : Structure électrique du stator de la MSAP..... | 24 |
| Figure II 4: Structure du convertisseur à deux niveaux | 26 |
| Figure II 5: Différents états de commutation des interrupteurs du convertisseur à deux niveaux..... | 26 |
| Figure II.6: Elaboration du vecteur de tension statorique à partir des états de commutation de le redresseur. | 29 |
| Figure II.7: L’évolution de l’extrémité de Φ_s pour RS IS, négligeable [32]..... | 30 |
| Figure II.8: Présentation des trois directions possibles du vecteur flux Φ_s | 31 |
| Figure II.9: Exemple d’évolution de l’extrémité de Φ_s pour négligeable..... | 32 |
| Figure II.10: Sélection du vecteur tension selon la zone N=1 | 33 |
| Figure II.11: Evolution du flux en utilisant un correcteur à hystérésis à deux niveaux..... | 35 |
| Figure II.12: Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux | 36 |
| Figure II.13: Régulation de la tension continue avec un correcteur PI..... | 37 |
| Figure II.14: Tension redressée..... | 38 |
| Figure II.15: Couple électromagnétique de la GSAP | 38 |
| Figure II.16: Flux statorique de la GSAP | 39 |
| Figure II.17: Flux statorique dans le repère de Concordia..... | 39 |
| Figure II.18: Trajectoire de flux statorique de la GSAP..... | 39 |
| Figure II.19: Secteur du travail | 40 |
| Figure II.20: Courant statorique..... | 40 |

Chapitre III

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.1: a. Format d’un ensemble flou normalisé b. représentation des variables linguistiques. | 63 |
| Figure III.2: Différentes formes des fonctions d’appartenance..... | 64 |
| Figure III.3: La structure générale d’un régulateur flou. | 65 |
| Figure III.4: La structure finale du régulateur flou utilisé dans la DTC deux-niveaux. | 69 |
| Figure III.5: Schéma synoptique de la commande floue directe du couple..... | 70 |
| Figure III.6: Fonction d’appartenance de l’erreur du couple ΔC_e | 71 |
| Figure III.7: Fonction d’appartenance de l’erreur du flux $\Delta \varphi_s$ | 71 |
| Figure III.8: fonction d’appartenance de la position θ_S | 72 |
| Figure III.9: fonction d’appartenance de l’état de commutation des interrupteurs. | 72 |
| Figure III.10: structure du contrôleur flou pour redresseur à deux niveaux. | 73 |
| Figure III.11: le flux de référence et le flux estimé | 74 |
| Figure III.12: le couple estimé et le couple électromagnétique | 74 |
| Figure III.13 : les courants de sortie de la GSAP | 74 |
| Figure III.14 : la trajectoire des flux statorique Alpha et Beta | 75 |
| Figure III.15 : les flux statorique de la GSAP | 75 |
| Figure III.16 : les tensions de sortie de la GSAP | 75 |

SYMBOL& NOTION

| | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| E_c | L'énergie cinétique |
| m_a | La masse d'air |
| v | La vitesse de vent |
| P_v | La puissance cinétique du vent |
| S | La surface d'aire balayée par les pales |
| ρ | La masse volumique de l'air |
| v_1 | La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur |
| v_2 | La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur |
| P_m | La puissance extraire par le rotor éolienne |
| λ | La vitesse spécifique de vitesse |
| C_p | Le coefficient de puissance |
| v_d | La vitesse de vent de démarrage |
| v_n | La vitesse de vent nominal |
| v_{max} | La vitesse de vent maximal |
| P | La puissance fournie par la turbine |
| P_n | La puissance nominale fournie par la turbine |
| P_{max} | La puissance éolienne maximale |
| λ_{opt} | La vitesse spécifique de vitesse optimale |
| Ω_{opt} | La vitesse de rotation optimale de la turbine éolienne |
| C_c | Le coefficient de couple |
| A | La valeur moyenne de la vitesse du vent |
| a_n | L'amplitude de l'harmonique de l'ordre n |
| ω_n | La Pulsation de l'harmonique de l'ordre n |
| I | Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil de vent |
| t | Le temps(s) |
| R_t | Rayon de la surface balayée en m |
| Ω_t | La vitesse de rotation de la turbine éolienne |

| | |
|------------------|--------------------------------------------------------------|
| J | L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice |
| J_t | L'inertie de la turbine |
| J_m | L'inertie de la génératrice |
| C_t | Le couple turbine fournie par l'éolienne |
| C_{em} | Le couple électromécanique produit par génératrice |
| f_m | Le coefficient de frottements visqueux de la machine |
| f_t | Le coefficient de frottements visqueux de la turbine |
| H | La hauteur de la voilure |
| s | L'opérateur de Laplace |
| C_{Pmax} | Le coefficient de puissance maximum |
| $\Omega_{réf}$ | La vitesse de rotation de référence de la GSAP |
| K_i | Le gain intégral |
| K_P | Le gain proportionnel |
| Ω_{mec} | La vitesse de rotation mécanique |
| $C_{em-réf}$ | Le couple électromagnétique de référence |
| $\Omega_{t-réf}$ | La vitesse de référence |
| S_n | Le facteur d'amortissement |
| B | L'induction magnétique de l'aimant |
| B_e | L'induction magnétique de l'entrefer |
| ea | La longueur de l'aimant |
| e | La largeur de l'entrefer |
| H | L'excitation magnétique dans l'aimant |
| H_e | L'excitation magnétique dans l'entrefer |
| S_a | La section de l'aimant |
| S_e | La section de l'entrefer |
| μ_0 | La perméabilité relative de l'entrefer |
| H_m | Le champ maximal |
| H_c | Le champ coercitif |
| B_r | L'induction rémanente |
| (d, q) | L'indice du repère de Park lié au rotor |

| | |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| X_d | La réactance statorique sur l'axe d |
| X_q | La réactance statorique sur l'axe q |
| Φ_{abc} | Les vecteurs flux statorique des phases a, b et c |
| V_{abc} | Les tensions des phases statoriques |
| C_c | Le coefficient du couple |
| K_t | Le rapport entre le courant quadrature et le couple électromagnétique |
| i_{abc} | Les courants des phases statoriques |
| K_t | Le coefficient du couple |
| Φ_f | La valeur efficace du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques |
| ω_v | La pulsation propre |
| C_{ft} | Le couple frottement |
| R_s | La Résistance d'une phase d'enroulement statorique. |
| L_s | L'inductance synchrone |
| θ_p | Le déplacement angulaire |
| R_{ch} | La résistance de la charge |
| L_{ch} | L'inductance de la charge |
| L_d | L'inductance statorique à l'axe d |
| L_q | L'inductance statorique à l'axe q |
| ω | La vitesse de rotation électrique |
| P | Le nombre de paires de pôles |
| E | L'amplitude de la force électromotrice |
| E_0 | L'amplitude de la force électromotrice à vide |
| (t) | La force électromotrice |
| V_{dc} | La tension redressée (Bus continu) |
| C_f | La capacité de filtre |
| V_{red} | La tension redressée sans filtre |
| (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) | Les tensions simples des phases de la charge |
| V_n | L'amplitude des termes de la tension redressée |
| u | L'angle d'empiètement |
| L | L'inductance de redresseur |

| | |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| C | La capacité de redresseur |
| R | La résistance de redresseur |
| m | L'indice de modulation |
| r | Le rapport de modulation |
| V_m | Amplitude modulatrice |
| V_p | Amplitude porteuse |
| F_p | La fréquence de l'onde porteuse |
| F_m | La fréquence de l'onde modulatrice |
| (i_{d-ref}, i_{q-ref}) | Les composantes du courant référence au stator dans le repère de Park. |
| (v_{d-ref}, v_{q-ref}) | Les composantes du courant référence au stator dans le repère de Park. |
| e_d | FEM de la machine sur l'axe d |
| e_q | FEM de la machine sur l'axe q |
| T_e | Le constant de temps |
| T_0 | Le constant de temps en boucle ouvert |
| T_f | Le constant de temps en boucle fermé |
| R_{ch} | La résistance de charge |
| P_{dc} | La puissance du bus continue |
| T_E | La période d'échantillonnage |
| $\overline{\phi}_s$ | Le vecteur de flux statorique |
| \overline{V}_s | Le vecteur de tension statorique |
| \overline{i}_s | Le vecteur de courant statorique |
| $\overline{\phi}'_s$ | Le vecteur de flux rotoriques ramené au stator. |
| δ | L'angle entre les vecteurs des flux statorique et rotoriques. |
| (v_α, v_β) | Les composantes de la tension au stator dans le repère de Concordia |
| Φ_d, ϕ_q | Les composantes du flux au stator dans le repère de Concordia |
| (i_α, i_β) | Les composantes du courant au stator dans le repère de Concordia |
| C_{flux} | Le comparateur de flux |
| C_{cpt} | Le comparateur de couple |
| (θ) | La matrice de la transformation de Park |
| $(\theta)^{-1}$ | La matrice inverse de la transformation de Park |
| C_{em}^{\wedge} | Le couple électromagnétique estimé |
| Z_i | La zone des vecteurs du flux |

Les notations :

| | |
|-------------|-------------------------------------------------|
| MSAP | Machine synchrone à aimant permanent |
| HAWT | Horizontal Axis Wind turbine |
| VAWT | Vertical Axis Wind turbine |
| FSWT | Fixe System Wind turbine |
| VSWT | Variable System Wind turbine |
| MAS | Machine Asynchrone |
| MADA | Machine Asynchrone Double Alimentation |
| DTC | Direct Torque Control |
| DSC | Direct Self Control |
| GSAP | Génératrice Synchrone à Aimant Permanent |
| MSRB | Machine synchrone à rotor bobiné |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| CCM | Convertisseur Coté Machine |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| PI | Proportionnel Intégral |
| AC | Alternatif current |
| DC | Direct current |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation,... etc.) est un facteur essentiel pour un développement économique. L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique,... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé [1].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. De plus, ils permettent de contribuer à la réduction des rejets de gaz. La littérature montre que le coût des sources d'énergie renouvelable n'est pas forcément compétitif par rapport aux sources d'énergie fossile, mais la nécessité d'une énergie plus propre a suscité la multiplication d'applications dans le domaine de l'utilisation des énergies renouvelables. Dans le futur, avec le progrès de la science, ils deviendront de plus en plus compétitifs en termes de technologie et de coûts de production et cette solution permet l'exploitation des ressources locales pour les systèmes autonomes. [2].

Toutes les énergies renouvelables (solaire, éolienne hydraulique, biomasse...) viennent du soleil transformées ensuite par l'environnement terrestre. Ainsi, les énergies solaire et éolienne sont les plus développées et présentent de nombreux avantages. En effet, ce sont des énergies complètement propres, elles n'émettent ni déchets ni gaz à effet de serre. Leurs fonctionnements ne polluent ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et, convertissent en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine. [2].

Les techniques de commandes modernes conduisent à une commande des machines alternative analogue à celle de la machine à courant continu. Parmi ces techniques, on trouve la commande directe du couple (DTC), en anglais (Direct Torque Control) proposée pour la première fois, par **Takahashi** et **Depenbrock** en 1985. Cette technique ne cherche pas les tensions à appliquer à la machine, mais le meilleur état de commutation de **convertisseur** pour satisfaire les exigences de l'utilisateur. Elle permet d'avoir plusieurs avantages à savoir un découplage naturel entre le flux et le couple, de supprimer l'étage MLI et d'obtenir une très bonne réponse du couple. En revanche, le non maîtrise de la fréquence de commutation et les fortes ondulations du couple constituent les inconvénients majeurs de cette stratégie de commande. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour améliorer les performances de la DTC, on citera à titre d'exemple : la DTC floue qui fera l'objet principale de notre présent travail [3-4].

Ce mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré essentiellement à la généralité sur l'énergie éolienne, nous allons commencer par la modélisation du vent qui est la source principale d'énergie. Ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine avec la stratégie MPPT de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent.

Après avoir modélisé la turbine vient le tour de la génératrice à aimants permanents, qui fait l'objet du chapitre deux. Nous allons donner quelques généralités sur la machine synchrone et notamment la machine synchrone à aimants permanents. Puis nous allons passer aux équations mathématiques et aux calculs permettant de modéliser la machine de notre choix. Ensuite, nous allons aborder la technique de commande DTC de la GSAP alimenté par un convertisseur a deux niveaux, cette technique impose les états des interrupteurs de puissance en fonction de l'état électromagnétique de la machine.

Dans le troisième chapitre on présentera le principe général, la théorie de base de la logique floue et la procédure de conception d'un réglage par logique floue. Une application de cette technique sur la commande directe de couple de la GSAP sera ainsi présentée.

Notre travail se termine par des références bibliographiques et une conclusion générale.

CHAPITRE I

L'ETAT DE L'ART DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.1. Introduction

Ces dernières années, la pollution de l'environnement est devenue une préoccupation majeure dans la vie quotidienne des gens, conduisant à une prise de conscience croissante de la nécessité de développer des nouvelles technologies pour produire de l'énergie à partir de sources propres, renouvelables et non polluantes. L'énergie éolienne, en particulier, a connu une évolution remarquable elle est devenue la source d'énergie électrique la plus répandue au monde. Nous examinerons le développement de l'énergie éolienne, et la direction et la vitesse du vent dans le monde, notamment en Algérie. Nous aborderons également les différents types d'éoliennes, en accordant une attention particulière aux éoliennes à axe horizontal. Une fois que nous aurons étudié la modélisation du vent, nous nous concentrerons sur la modélisation de l'éolienne choisie. Pour maximiser la puissance extraite malgré les variations de la vitesse du vent, nous proposerons une technique de contrôle qui permettra à l'éolienne de moduler sa vitesse de rotation. Pour valider le modèle de la turbine et le contrôle proposé, des tests de simulation seront réalisés à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

I.2 L'énergie électrique éolienne

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'énergie électrique [5]. La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres. Une différence de pression est créée d'où un déplacement perpétuel de masses d'air [6]. L'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde. On distingue les éoliennes offshore « au large » qui sont implantées en mer et les éoliennes terrestres. Ces deux types d'éoliennes fonctionnent de la même manière.

I.2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [7,8].

Avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie propre et qui respecte l'environnement ;
- 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.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires ;

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple [9].

Inconvénients :

- Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :
- Le bruit : Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne ;
- La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision ainsi les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques ;
- L'impact visuel ; reste néanmoins un thème subjectif.

Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par conséquent, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

I.2.2. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'option la plus économique pour les nouvelles capacités de production d'énergie dans un nombre croissant de régions, et de nouveaux marchés ont continué de fleurir en Afrique, en Asie et en Amérique latine. L'Asie est restée le plus grand marché au monde pour la septième année consécutive, sous le leadership de la Chine, et a dépassé l'Europe en termes de capacité totale. Les États-Unis sont au premier rang mondial pour la production d'énergie éolienne. L'énergie éolienne a assumé plus de 20 % de la demande en électricité de plusieurs pays tels que le Danemark, le Nicaragua, le Portugal et l'Espagne [10]. Après plusieurs années d'exploitation à perte, la plupart des fabricants de turbines ont retrouvé la voie des bénéfices et les dix premiers d'entre eux ont même battu des records en termes d'installations. La conception des turbines destinées à être utilisées sur terre et en mer a continué d'évoluer en vue d'améliorer la réalité économique de l'énergie éolienne dans un plus large éventail de régimes de vent et de conditions de fonctionnement [10].

La production des éoliennes a atteint 20,7 TWh en 2016, en recul de 1,8 % par rapport à 2015 du fait de conditions météorologiques moins favorables, les mois de septembre et décembre ayant été peu venteux ; elle a représenté 3,9 % de la production de la France nette d'électricité ; sa part dans la production d'électricité renouvelable a été de 20,4 % [11].

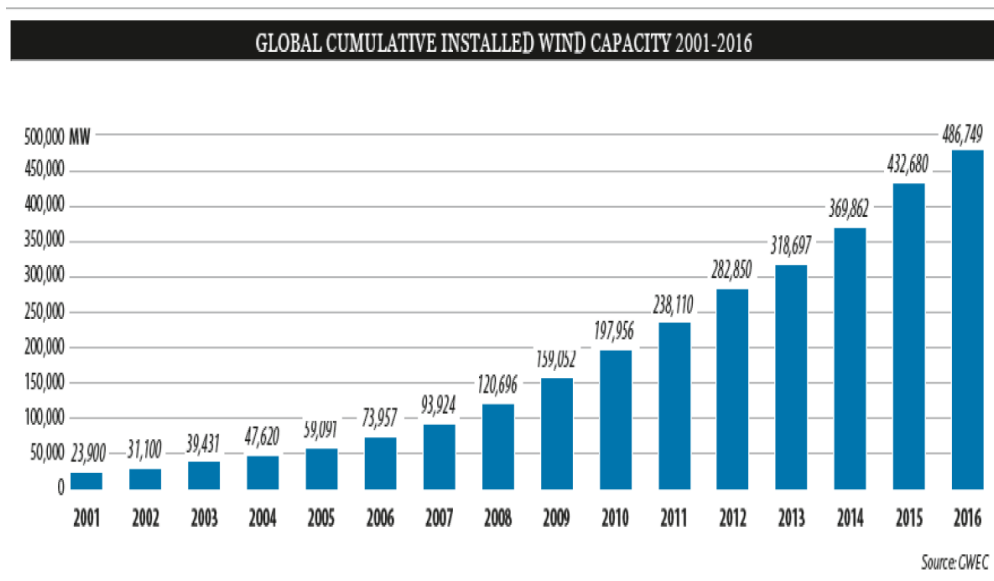


Figure I.1: Évolution mondiale de la capacité éolienne installée en MW [12].

À la fin 2016, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 486,7 GW (432,7 GW fin 2015), en augmentation de 54,6 GW en un an contre 63,0 GW en 2015, soit 12,6 % après 17 % en 2015, 16,2 % en 2014 et 12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,3 GW, soit 42,7 % du total 2016 (48,4 % en 2015, 45,2 % en 2014), et représente 34,7 % du parc mondial fin 2016 contre 33,6 % fin 2015 et 31 % fin 2014. En 2016, le marché éolien mondial a ralenti sa croissance avec 54 GW installés dans l'année ; la Chine est restée en tête avec 23,3 GW contre 30 GW en 2015, année marquée par un rush avant la mise en place de réductions des tarifs garantis ; aux États-Unis, les 8,2 GW mis en service portent le parc à 82 GW ; l'Union européenne a installé 12,5 GW, dont 5,4 GW en Allemagne et 1,5 GW en France [12].

I.2.3. Potentiel Eolien en Algérie

La configuration des vents varie selon l'emplacement géographique. Ainsi, dans le nord du pays, le régime des vents est caractérisé par des vitesses de vent moyennes modérées (1 à 4 m/s), des microclimats autour d'Oran, d'Annaba, de l'Altiplano et de Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.

L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s) [5]. Sur la base de la carte de direction des vents établie en Algérie par le Centre de Développement des Energies Renouvelables du CDER (Figure I.2).

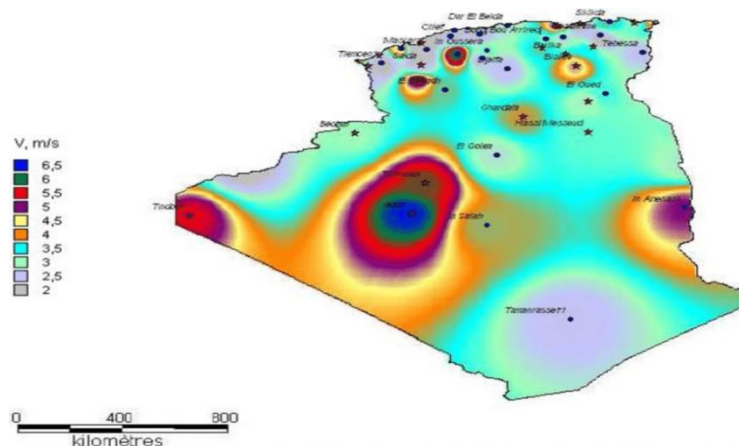


Figure I.2: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie

I.2.4. Programme de l'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie investit dans la production de l'énergie éolienne pour espérer atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe SONALGAZ, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW a été opérationnelle en 2012. Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014 [13].



Figure I.3: La ferme éolienne de 10 MW à Kabertène (Adrar).

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW. Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes [14] :

- construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes ;
- création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle ;

- montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception, procurement et réalisation capables d'atteindre un taux d'intégration d'au moins 50% par des entreprises algériennes.

I.3. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs

I.3.1. Aspects constitutifs et technologiques des éoliennes

Les turbines éoliennes sont souvent classées selon leur disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : Les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [15,16, 17, 18].

La plupart des éoliennes actuellement utilisées sont à axe horizontale, car elles représentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentant un faible encombrement au niveau du sol. Le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il offre un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les éoliennes à axe vertical sont encore au stade expérimental, deux structures sont parvenues au stade d'industrialisation, le rotor Savonius et le rotor Darrieus. Même si quelques projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées [19,20].



Figure I.4: Aérogénérateur à axe vertical

a -structure de Darrieus

Figure I.5: Aérogénérateur à axe horizontal.

b- structure de Savonius

I.3.2. Principe composante d'une éolienne

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [21] :

- ❖ **Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, installé plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité ;
- ❖ **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne ;

❖ Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production

d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. La figure I-6 représente une éolienne avec multiplicateur.

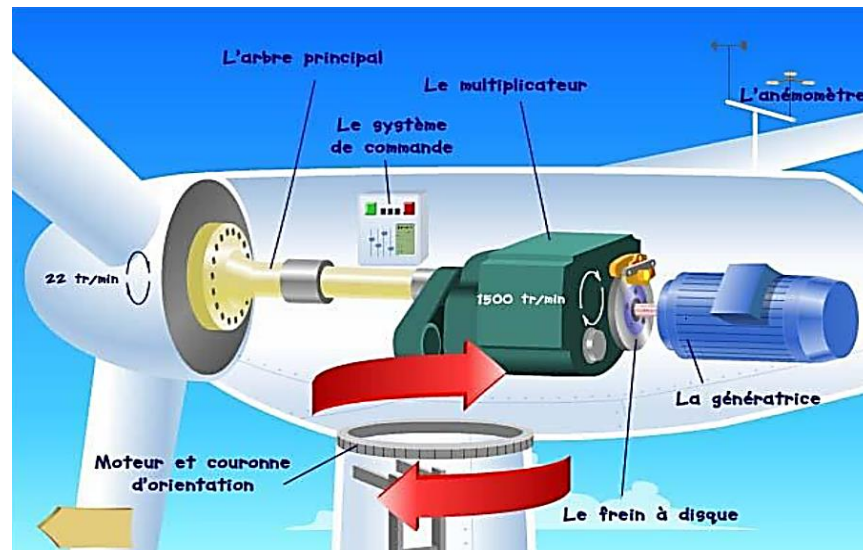


Figure I.6: Eolienne avec multiplicateur

Quelles soient à axe vertical ou horizontal, les éoliennes sont classifiées en trois catégories selon leur puissance nominale [22] ;

- Les éoliennes de petite puissance : inférieure de 40kW ;
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40kW à quelques centaines de kW ;
- Les éoliennes de grande puissance : supérieure à 1 MW.

I.3.3. Fonctionnement d'une centrale éolienne

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre Figure I.7. Un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement. Le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent. Les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée et transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des

convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [23].



Figure I.7: Appareils utilisés pour la mesure du vent

I.4. Les éoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de famille d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (**MADA**) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (**MSAP**). Ces dernières (**MADA** et **MSAP**) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse variable [24].

I.4.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas).

Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit.

a. Avantages de la vitesse fixe

- Simplicité d'implantation.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

b. Inconvénients de la vitesse fixe

- En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint.

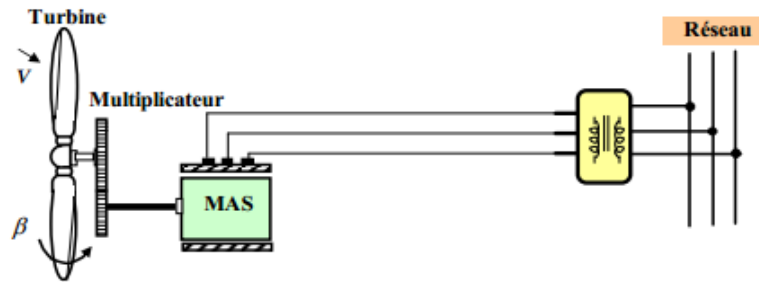


Figure I.8: Eolienne à vitesse fixe basée sur une génératrice asynchrone à cage

I.4.2. Fonctionnement à vitesse variable

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [24].

Pour la Génératrices synchrones, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statorique. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [25,26].

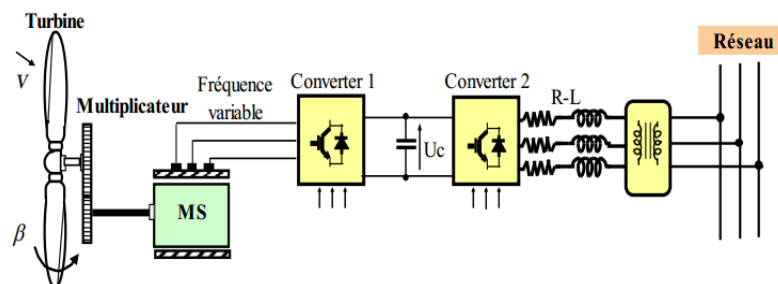


Figure I.9: Éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone

a. Avantages de la vitesse variable

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques.
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales, tout en stockant l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale. Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal.

b. Inconvénients de la vitesse variable

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance « complexe ».
- Perte énergétique lors du processus de conversion.

I.5. Modélisation Mathématique de la turbine éolienne

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 ; Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

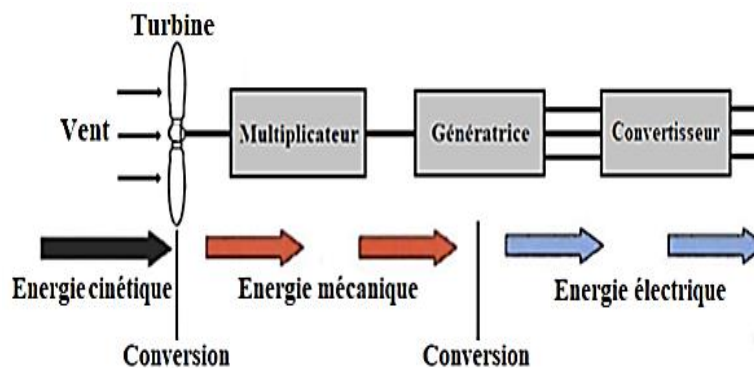


Figure I.10: Principe de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique

I.5.1. Modèle aérodynamique

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation (essentiellement dépendante du coefficient de puissance C_p ou rendement énergétique de l'éolienne). La puissance cinétique du vent est définie comme suit [27,28] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \tag{I-1}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [28,29] :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \tag{I-2}$$

ρ : la masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³).

S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale, $S = \pi \cdot R_t^2$.

R_t : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale

v: est la vitesse du vent.

C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (Figure I-11). Ce coefficient, dont la limite théorique égale à 16/27=0.593 (limite de Betz), dépend de deux paramètres [31,30] :

- La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \tag{I-3}$$

Où Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine.

- L'angle de calage des pales β

Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [31,32, 33], ou par des constructeurs de turbines éoliennes. L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [34,35, 36] :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{array} \right. \tag{I-4}$$

$C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068.$

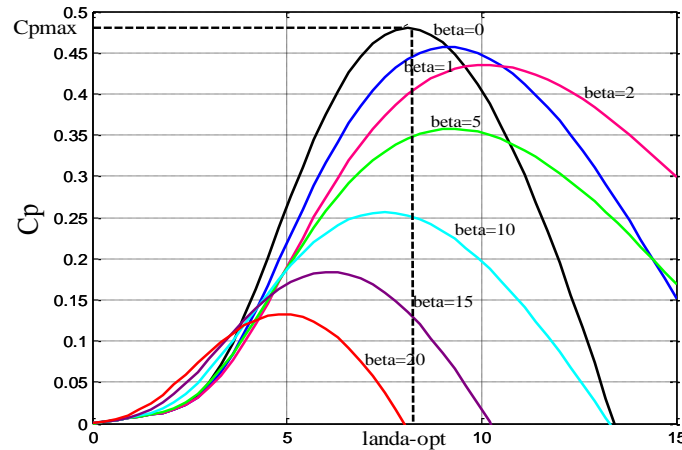


Figure I.11: Variation du coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents angle β .

Sur la figure I-11, plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède

Le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt}=8.1$, $C_{pmax}=0.48$, $\beta =0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique

récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (I-5)$$

I.5.2. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure I-12 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée [37,38].

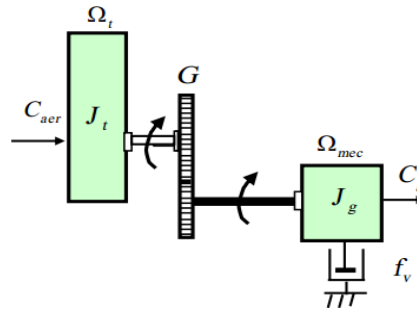


Figure I.12: Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec :

- J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;
- J_g : le moment d'inertie de la GSAP ;
- f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la GSAP ;
- C_g : le couple mécanique sur l'arbre de la GSAP ;
- Ω_{mec} : la vitesse de rotation du générateur(GSAP) (rad/s)

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la GSAP (arbre rapide) (Figure I-12). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{I-6}$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{I-7}$$

D'après la figure I-12, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la GSAP par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \tag{I-8}$$

Ou J = Inertie totale des parties tournantes (Kg.m²).

f = Coefficient de frottement visqueux.

$C_T = C_g + C_{em} =$ Couple totale de l'éolienne

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{I-9}$$

Le schéma bloc de la figure I-13 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_{mec} de la GSAP, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la GSAP. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

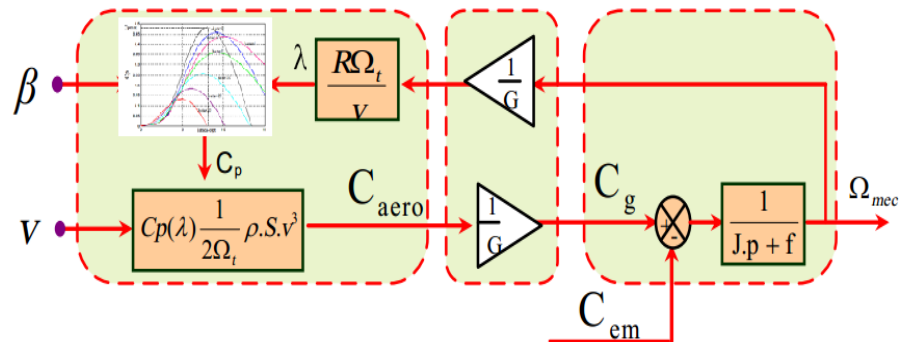


Figure I.13: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

I.6. Intérêt de la vitesse variable

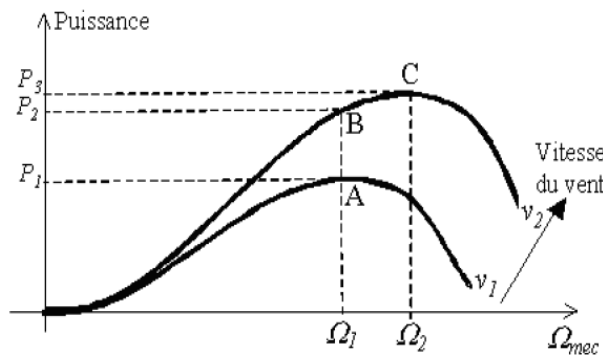


Figure I.14: caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B).

La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_1 . Il faut

donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [23] Pour cette raison, et pour ne pas dépasser la puissance nominale du générateur éolien, deux zones de contrôle sont distinguées selon la vitesse du vent comme le montre la figure I-15.

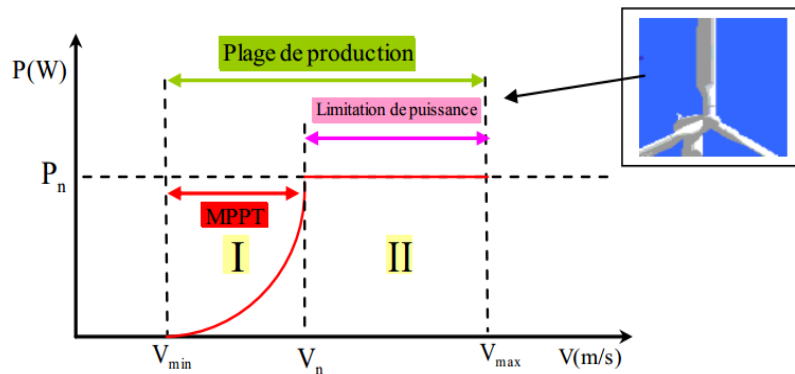


Figure I.15: Zones de fonctionnement des éoliennes

Zone I: Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (**MPPT**, Maximum Power Point Tracking). Pour maximiser la puissance, lorsque la vitesse du vent est inférieure à sa valeur nominale, la vitesse mécanique de l'éolienne est contrôlée ce qui correspond aux points 4, 5 et 6 par exemple. Cette commande permet aussi de commencer la production de l'énergie avec des vitesses du vent inférieure à V_{min} .

Zone II: Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales, c'est le pitch control. Dans les deux zones la vitesse du vent est inférieure à une limite (v_{max}) d'arrêt de l'éolienne déterminée pour des raisons de sécurité.

I.6.1. Contrôle dans la zone I (optimisation de la puissance)

Dans cette zone (λ_{opt} , C_{pmax} , $\beta=0$), on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda=\lambda_{opt}$. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance, comme l'indique la figure I.11. Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum, technique que l'on retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) dans la littérature [39,40]. Cette technique est aussi très utilisée dans les systèmes photovoltaïques ou la recherche du MPPT dans le plan courant – tension permet à terme de réduire le coût du kWh produit [41]. Si l'on relie les différents maximums des courbes de puissance, on obtient celle donnant la puissance maximale extractible pour chaque vitesse de vent. En considérant le rapport de vitesse optimal λ_{opt} pour lequel le coefficient de puissance est maximal, on peut en déduire l'expression analytique de la puissance maximale :

$$P_{max} = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot C_{p(max)} \left(\frac{R_t}{\lambda_{opt}} \right)^3 \Omega_t^3 \tag{I-10}$$

Que l'on peut écrire sous la forme :

$$P_{max} = K\Omega_t^3, K = \frac{1}{2}S\rho \cdot C_{p(max)} \left(\frac{R_t}{\lambda_{opt}}\right)^3 \quad (I-11)$$

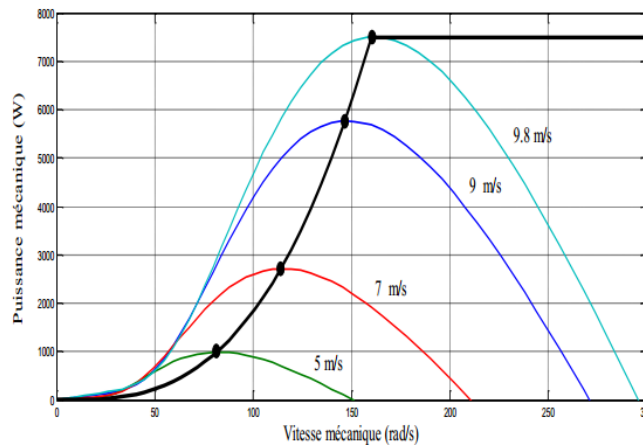


Figure I.16: Evolution de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation de la turbine

Deux structures de contrôle distingué pour poursuivre le MPPT [23] :

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

Une meilleure extraction de la puissance est atteinte par la stratégie de contrôle avec asservissement de vitesse mécanique, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre pour générer $(\Omega_t)_{ref}$ et cela avec un meilleur contrôle de vitesse de la génératrice en régime permanent et transitoire [16,23]. Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [30].

I.6.1.1 Maximisation de la Puissance sans asservissement de la vitesse

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. Ceci, nous conduit à déduire :

- ✓ Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec}=0$
- ✓ Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_{vis}=0$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R_t^5 C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3 G^3} \Omega_{mec}^2 \tag{I-12}$$

L'équation ci-dessus, montre que le couple de référence est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Le schéma bloc du modèle de la turbine pour cette stratégie et représenté sur la figure I-17.

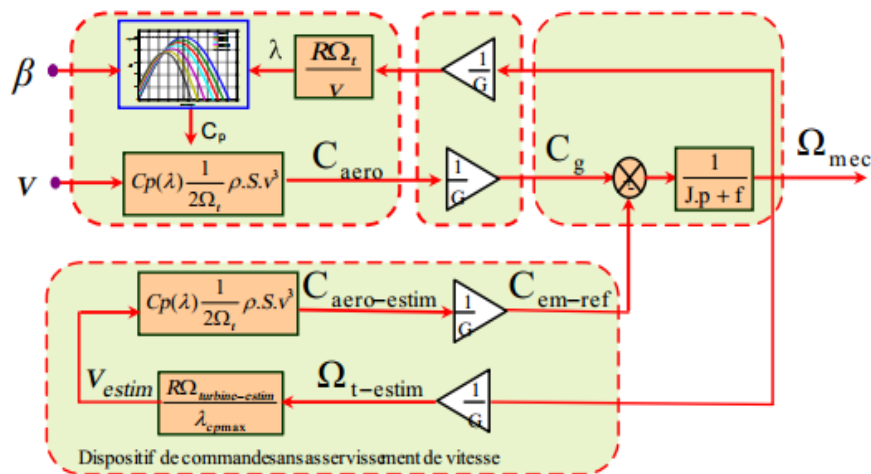


Figure I.17: Schéma-bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

I.6.2. Contrôle dans la zone II (limitation de la puissance)

L'objectif dans cette zone ($\Omega_{mec-nom}$, P_{nom}), est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales qui permet de dégrader le coefficient de puissance figure I-18 donc de limiter la puissance convertie. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles

S'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. (Elles atteignent la position «en drapeau» à la vitesse maximale.

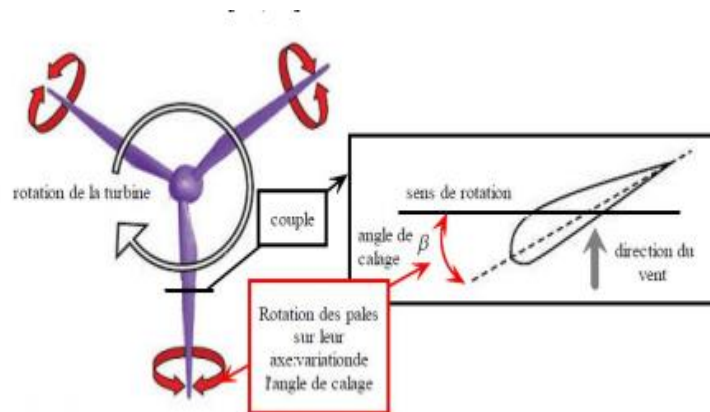


Figure I.18: Profil aérodynamique d'une pale

I.7 Résultat de simulation

Dans cette partie, nous donnerons les résultats du contrôle du système éolien en utilisant l'approche de contrôle MPPT précédemment étudiée. Le logiciel MATLAB/SIMULINK a été utilisé pour simuler l'ensemble du système éolien et sa commande en tenant compte d'une éolienne à axe horizontal de 2.5kW dont les spécifications sont listées en annexe A. L'éolienne a été exposée au vent, avec une vitesse moyenne de 6,2 m/s, dont le profil temporel est représenté sur la figure I-19

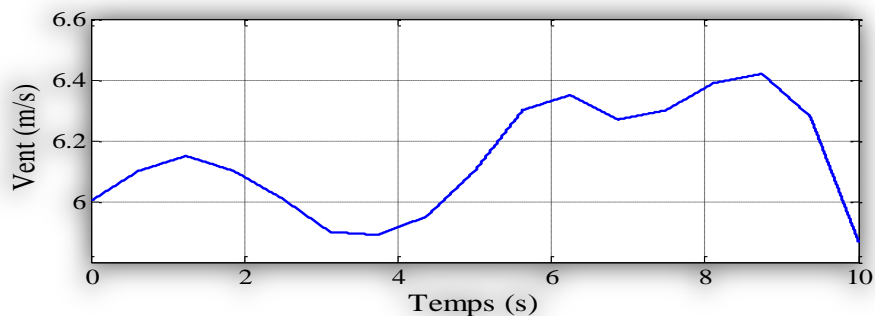


Figure I.19 : Allure du profil du vent.

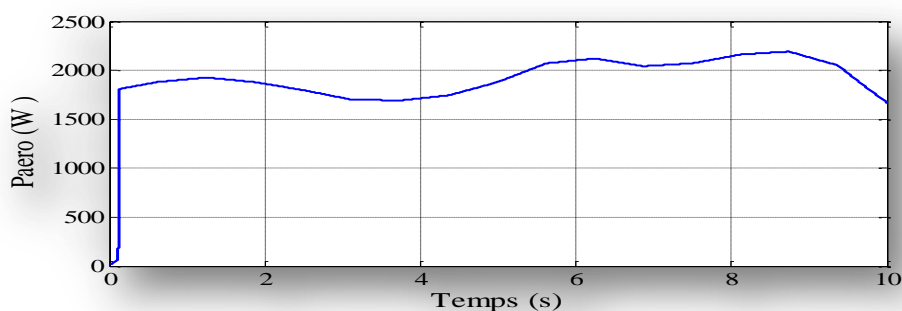


Figure I.20 : Allure de la Puissance aérodynamique.

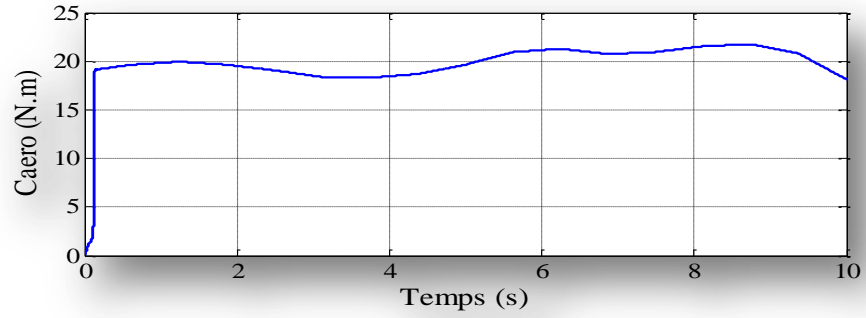


Figure I.21: Allure du couple aérodynamique.

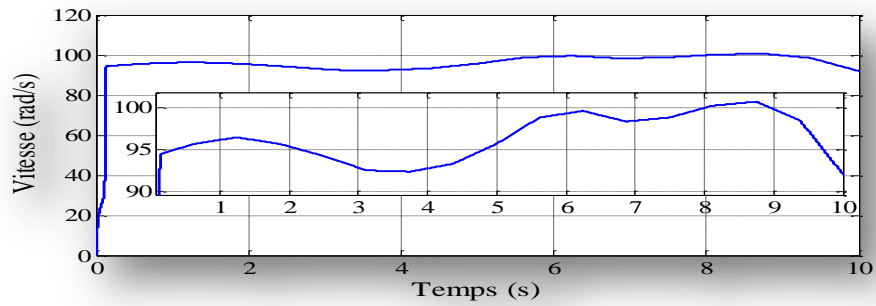


Figure I.22: Allure de la vitesse mécanique

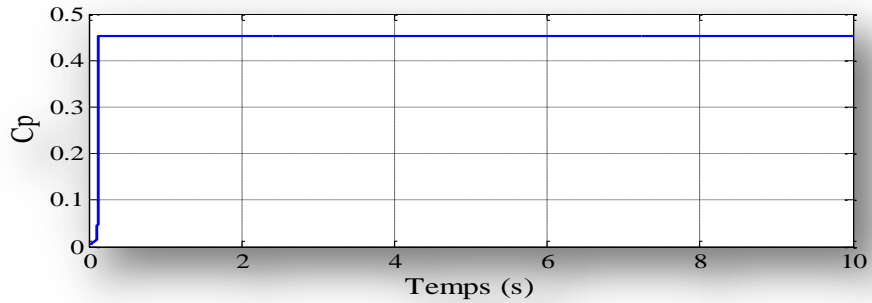


Figure I.23: Allure de coefficient de puissance.

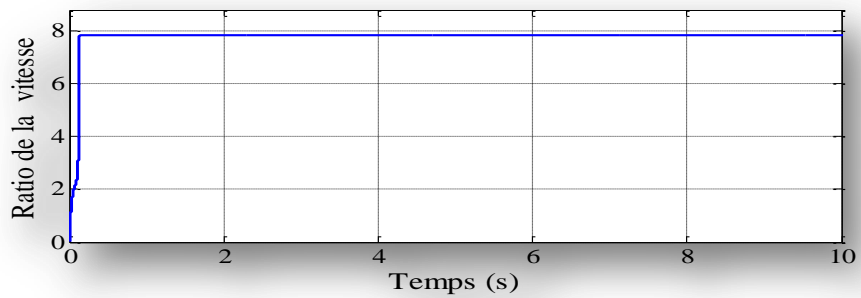


Figure I.24: Allure de la vitesse relative λ .

D'après la visualisation des courbes de profil de vent utilisé dans la turbine qui est à une vitesse moyenne de 6.2 m/s. On voit que la puissance et le couple aérodynamique sont proportionnels à la vitesse vent appliqué sur la turbine, ainsi que vitesse de rotation.

La turbine fournit une puissance de 1.9 kW à 2.3 kW inférieure à la puissance nominal (2.5 kW) de la machine qu'on va la appliquer sur cette dernière.

La MPPT aide à obtenir des bonnes valeurs de coefficient de puissance C_p et Ratio de vitesse λ et les rendre plus approchées à ces valeurs optimales $C_p \approx 0.49$ et λ optimale à 7.89 proche de 8 (qui la valeur optimale) donc C_p est maximisé grâce au contrôle de la vitesse mécanique.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons d'écrit en premier lieu les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique et les différents éléments d'une éolienne. Ainsi que son principe de fonctionnement. Puis nous avons modélisé la turbine.

Ensuite on a présente les différentes zones de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable, et nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation (MPPT) de l'énergie extraite du vent est effectuée de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent.

A la fin nous avons présenté les résultats de simulation effectuée sur Matlab/Simulink. Afin de valide le modèle de la turbine est voir les performances de la commande MPPT de cette dernière.

Pour le chapitre prochain, Nous allons étudier la génératrice (GSAP) utilisée dans la conversion de l'énergie mécanique de l'éolienne en énergie électrique.

Chapitre II

Modélisation et commande direct du couple de la GSAP

II.1 Introduction :

L'augmentation toujours croissante des performances globales des entraînements industriels à vitesse variable, est aujourd'hui principalement liée aux progrès dans le domaine de la commande des machines à courant alternatif. Ceci est obtenu grâce au développement de la technologie des composantes de l'électronique de puissance. Permettant l'amélioration de la qualité d'énergie et de réduire les harmoniques produites par les convertisseurs. [,]

La Machine synchrone à aimants permanents (**MSAP**), a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie renouvelable.

Ce chapitre traite de la modélisation et la commande direct du couple du système éolien à vitesse variable utilisant ce type de machine (GSAP) dans le cas d'un site isolé. On commencera par la modélisation de la GSAP dans le repère approprié et pour étudier cette stratégie de commande (DTC) de la GSAP, on présente l'onduleur de tension à deux niveaux par la suite nous présenterons le principe du contrôle direct de couple et de flux de la **GSAP** et on terminera par les résultats de simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink pour mettre en évidence les performances de la technique proposée.

II.2. Principe de la commande DTC

La commande directe du couple (**DTC**) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur.

Les variables contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation (Figure II.1) [42].

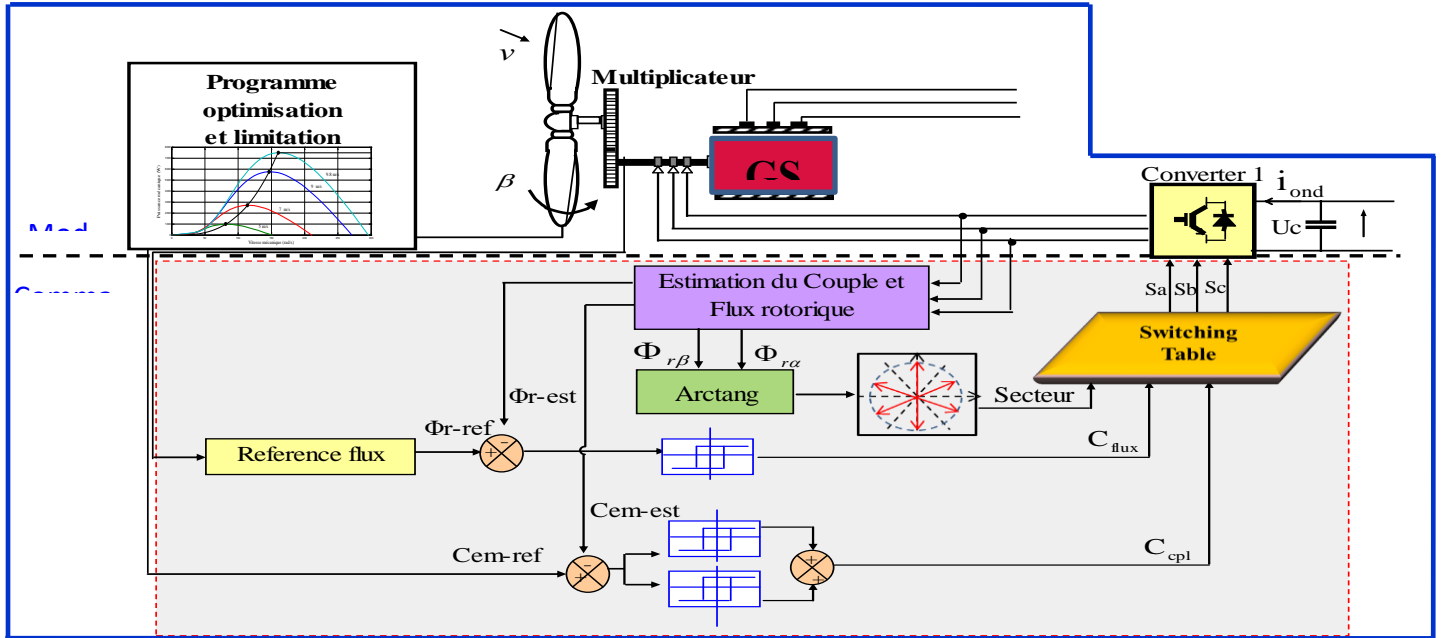


Figure II.1 : Structure de base de la commande directe de couple

II.3. Caractéristiques principales de la commande directe du couple

Dans une commande (DTC), il est recommandé d'utiliser une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations du couple provoquées par les régulateurs à hystérésis.

Cette condition se traduit par la nécessité de faire appel à des calculateurs de haute performance afin de satisfaire aux conditions de calculs en temps réel [44].

Les caractéristiques générales d'une commande directe de couple sont :

- La commande directe du couple et du flux à partir de la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions du stator de la machine.
- L'obtention des flux et des courants statorique proches de formes sinusoïdales.
- Une très bonne dynamique de la machine.
- L'existence d'oscillations du couple qui dépendent, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis.

Cette méthode de commande présente différents avantages et inconvénients qui sont énumérés ci-dessous dans le cas d'une régulation de vitesse en fonctionnement moteur.

Avantage :

- Absence de bloc de calcul de modulation de tension **MLI** ;
- Pas d'obligation de découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle ;
- Présence d'un seul régulateur, celui de la boucle externe de vitesse ;
- Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position rotorique car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur du flux statorique est nécessaire
- Très bonne réponse dynamique.

Inconvénients :

- Problèmes de commande à basse vitesse ;
- Nécessité de disposer d'estimations du flux statorique et du couple ;
- Existence d'oscillations de couple ;
- Fréquence de commutations non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis). Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruits acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

II.4. Modélisation mathématique de la génératrice synchrone à aimant permanents

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement, La modélisation de la **GSAP** fait l'objet de nombreuses études en moyenne et forte puissance. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une **GSAP** facilite largement son étude.

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre des hypothèses est grand, plus le modèle nous permet à une étude et une exploitation plus aisée même si l'on affecte la précision du modèle. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs [43]

II.4.1. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la **FMM** créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température [32].

Les équations de tensions des phases statorique servent au point de départ pour l'élaboration du modèle dynamique de la machine synchrone à aimants permanents. La structure électrique d'une GSAP triphasée est

Constituée au stator d'un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation, Figure II.2 :

Il est important de noter ici que le grand avantage des machines synchrones à aimants permanents est l'absence de bobinage au rotor et, par conséquent, l'absence de contacts glissants et de perte joules au rotor. En revanche, l'inconvénient majeur réside dans le fait qu'on perd toute possibilité de réguler le courant inducteur, donc le champ magnétique associé.

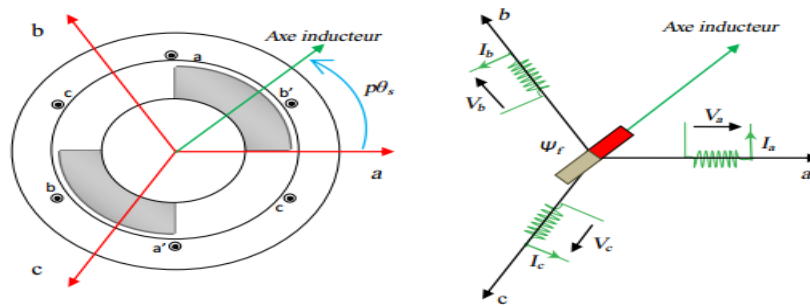


Figure II.2 : Représentation schématique d'une machine synchrone dans le repère abc.

II.4.2. Modèle de la machine dans le repère (abc)

II.4.2.1 Équations des tensions

Le point de départ dans l'étape de l'élaboration du modèle électrique de la machine consiste à modéliser le circuit des enroulements de phases illustrés dans la figure II.2. Le système d'équation des tensions de la machine synchrone est obtenu par l'application de la loi de Faraday, qui nous permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \tag{II-1}$$

Avec : V_a, V_b, V_c Tensions de phases statorique.

I_a, I_b, I_c Courants de phases statorique.

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c Flux totaux traversant les bobines statorique.

R_s Résistance des phases statorique

II.4.2.2 Équations des flux

Le flux total dans chaque phase peut être écrit par les équations qui suivent :

$$\begin{cases} \psi_a = (L_s - M) \cdot I_a + \psi_f \cdot \cos(\theta_s) \\ \psi_b = (L_s - M) \cdot I_b + \psi_f \cdot \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_c = (L_s - M) \cdot I_c + \psi_f \cdot \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II-2)$$

Avec :

ψ_{abc} Flux des axes (a, b, c).

ψ_f Flux de l'aimant permanent.

L_s : Inductance des phases statoriques.

$L_c = (L_s - M)$ Inductance cyclique.

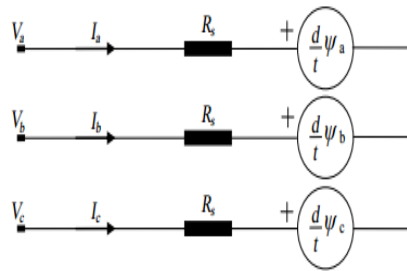


Figure II.3 : Structure électrique du stator de la MSAP.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone sont connectés en étoile à neutre isolé, ce qui explique l'inexistence de la composante homopolaire et même s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes. II.4.3. Modèle de la MSAP dans le repère (dq)

Le résumé du modèle complet de la MSAP est présenté par le système d'équations (II.3). Ce système d'équation est utilisé pour élaborer les boucles de régulation de la génératrice.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q I_q \omega_s \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - L_d I_d \omega_s + \Psi_f \omega_s \\ \Psi_d = L_d I_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_d I_d \\ C_{em} = \frac{3}{2} P ((L_q - L_d) I_d I_q + \Psi_f I_q \\ C_{tr} - C_{em} - f \Omega_g = J \frac{\Omega_s}{dt} \end{array} \right. \quad (II-3)$$

Où : i_d, i_q -les courants statoriques ;

V_d, V_q -tensions statoriques ;

R_s - résistance statorique ;

L_{sd}, L_{sq} -inductances du stator ;

Ψ_{md} -flux de l'aimant permanent, déterminé comme dans l'annexe A.4 ;

P -nombre de paires de pôles de la machine ;

$\Psi_r = \frac{d}{dt} \theta_r = P \frac{d}{dt} \theta_m$ - vitesse angulaire (pulsation) électrique du rotor,

θ_m -position mécanique du rotor ;

C_{em} -couple électromagnétique.

II.5. Modèle du convertisseur coté GSAP :

Convertisseur étudié est bidirectionnel en courant et classiquement composé de trois cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors **IGBT** qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle (Figure II-4). Pour cette étude, les semi-conducteurs seront considérés comme idéaux, pas de pertes et les commutations sont instantanées. L'hypothèse de la conduction continue nous conduit à

Considérer un convertisseur équivalent à interrupteurs idéaux et donc sans pertes. Qui sont présentées comme des interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée V_i est en fonction des états de ces interrupteurs. Il y a 8 états de commutations possibles, (Figure II.5) [44].

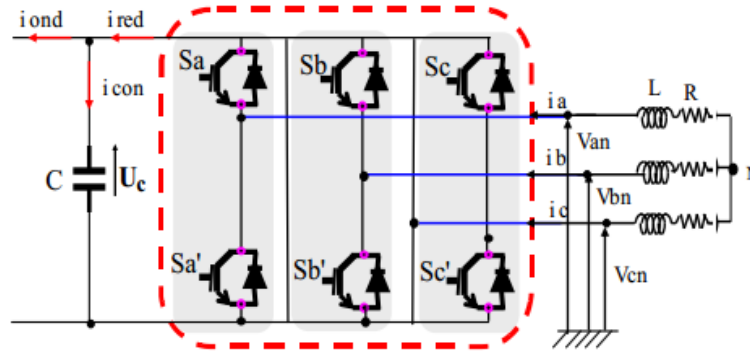


Figure II.4: Structure du convertisseur à deux niveaux

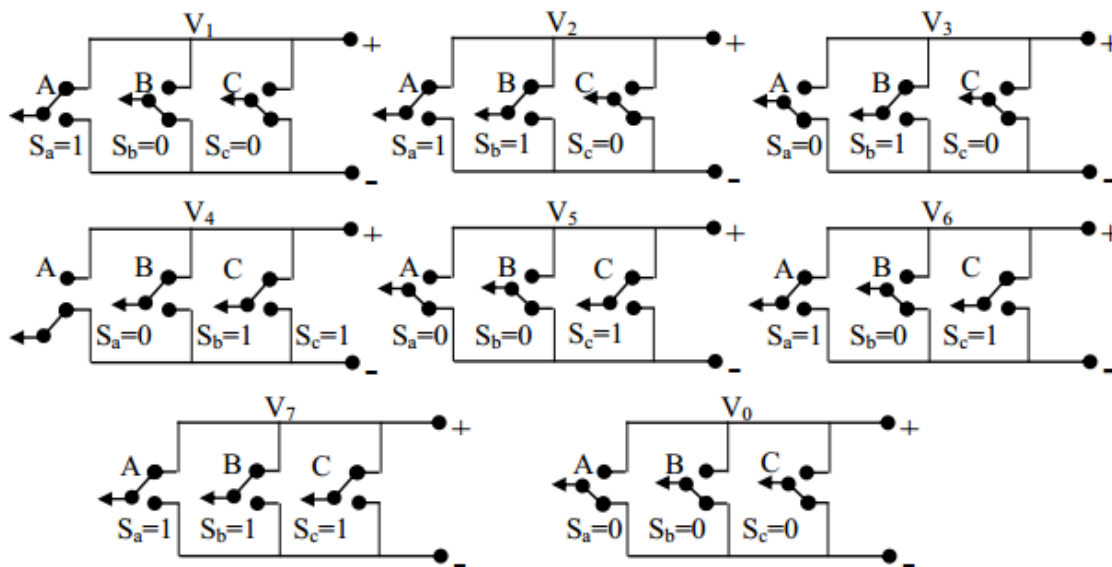


Figure II.5: Différents états de commutation des interrupteurs du convertisseur à deux niveaux

Le convertisseur utilisé est piloté à partir de grandeurs logiques par l'intermédiaire d'un circuit de commande. On appelle T_i et T_i' les transistors, S_i et S_i' les commandes logiques associées. En négligeant le temps mort entre les interrupteurs du même bras, la commande de ces derniers sera alternée ($S_i = \overline{S_i'}$), nous constatons deux états complémentaires

- Si $S_i=1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert ;
- Si $S_i=0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Pour simplifier l'étude, supposons que l'alimentation en tension est une source parfaite dans le sens où, quel que soit le courant i délivré ou absorbé, la tension V_{dc} à ses bornes reste toujours constante [44].

Calculons la valeur des tensions entre les points a, b, c et le point m :

$$\begin{cases} V_{am} = V_a - V_m = S_a \cdot E (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_a) \text{ est fermé, } V_{am} = 0 (T_a) \text{ est ouvert}) \\ V_{bm} = V_b - V_m = S_b \cdot E (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_b) \text{ est fermé, } V_{am} = 0 (T_b) \text{ est ouvert}) \\ V_{cm} = V_c - V_m = S_c \cdot E (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_c) \text{ est fermé, } V_{am} = 0 (T_c) \text{ est ouvert}) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

D'où nous déduisons que :

$$\begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{aligned} V_{am} &= V_{an} - V_{nm} \\ V_{bm} &= V_{bn} - V_{nm} \\ V_{cm} &= V_{cn} - V_{nm} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

$$\Rightarrow V_{am} + V_{bm} + V_{cm} = (V_a + V_{bn} + V_{cn}) + 3V_{nm}$$

Pour une charge équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Donc :

$$V_{nm} = \frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant V_{nm} dans le système ci-dessus :

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + \frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{bm} = V_{bn} + \frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{cm} = V_{cn} + \frac{1}{3} (V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} (2V_{am} - V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (V_{am} - 2V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (2V_{am} - V_{bm} - 2V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Le modèle de l'onduleur en fonction de la tension d'entrée et des états des interrupteurs sera

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

II.5.1 Séquence d'un convertisseur de tension triphasé :

Dans le cas d'un fonctionnement moteur, les tensions d'alimentation sont estimées en fonction de la tension du bus continu et des états de commutation des bras du convertisseur [42].

Ces états sont donnés par le groupe (S_a, S_b, S_c) où chacune des trois variables peut prendre les valeurs 1 ou 0. Ainsi, huit combinaisons différentes sont possibles :

$$\mathbf{V}_0 (0\ 0\ 0), \mathbf{V}_1 (1\ 0\ 0), \mathbf{V}_2 (1\ 1\ 0), \mathbf{V}_3 (0\ 1\ 0), \mathbf{V}_4 (0\ 1\ 1), \mathbf{V}_5 (0\ 0\ 1), \mathbf{V}_6 (1\ 0\ 1), \mathbf{V}_7 (1\ 1\ 1).$$

Ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tensions qui peuvent être appliqués aux bornes de la GSAP. Tous les vecteurs sont actifs hormis les vecteurs V_0, V_7 qui sont nuls.

L'équation électrique aux bornes de la machine peut s'écrire en fonction des différents vecteurs tension, courant et flux, sous la forme suivante :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Le vecteur tension V_s est délivré par le convertisseur de tension triphasé supposé parfait. Ce vecteur est fonction des états de commutation des bras d'onduleur (S_a, S_b, S_c) et peut s'écrire, en utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, sous la forme suivante :

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot (S_a + S_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \quad (\text{II.14})$$

En développant le vecteur tension V_s , la relation entre les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et les variables booléennes (S_a, S_b, S_c) est donnée par l'équation (II.11).

Par ailleurs, en utilisant la transformée de Concordia, on peut lier les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) aux tensions dans le plan (α, β) par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.7. Stratégie de commande directe du flux et de couple

II.7.1 Principe du contrôle du flux statorique

A partir de la relation (II.12) de la tension statorique, on peut exprimer le flux statorique par [45] :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s \cdot i_s) dt \tag{II.22}$$

Sur un intervalle $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e , les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixes. Par conséquent, on peut écrire :

$$\Phi_s(t) = \Phi_{s0} + V_s T_e - R_s \int_0^{T_e} i_s dt \tag{II.23}$$

Où Φ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t=0$. En considérant la chute de tension $(R_s I_s)$

Négligeable devant la tension V_s (ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée), l'extrémité du vecteur Φ_s , sur un intervalle $[0, T_e]$, se déplace sur une droite de direction V_s

$$\Phi_s = \Phi_{s0} + V_s T_e \tag{II.24}$$

$$\Delta \Phi_s = V_s \Delta T_e \tag{II.25}$$

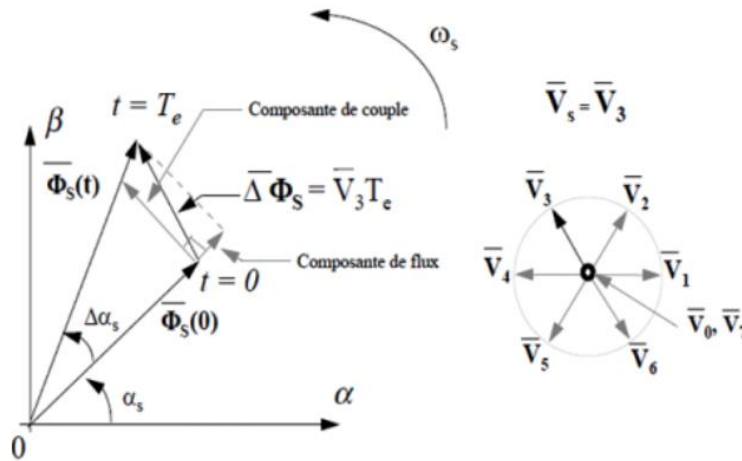


Figure II.7: L'évolution de l'extrémité de Φ_s pour RS IS, négligeable [32]

Par conséquent, en choisissant une séquence correcte du vecteur V_s , sur des intervalles de temps successifs de durée T_e , on peut faire suivre à l'extrémité du vecteur Φ_s la trajectoire désirée. Il est alors possible de faire fonctionner la machine avec un module de flux Φ_s pratiquement constant. Pour cela, il suffit de faire suivre à l'extrémité de Φ_s une trajectoire presque circulaire, si la période T_e est très faible devant la période de rotation du flux statorique T_s .

Lorsque le vecteur de tension V_s est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité du flux Φ_s est donnée par la dérivée $\frac{d\Phi_s}{dt}$, correspondant à la force électromotrice $E = \frac{d\Phi_s}{dt}$. En supposant le terme $R_s I_s$ négligeable, on montre que le vecteur $\frac{d\Phi_s}{dt}$ est pratiquement égal au vecteur tension V_s . Ainsi, la vitesse de déplacement de l'extrémité du flux Φ_s est donnée par l'amplitude de la dérivée du vecteur flux $\frac{d\Phi_s}{dt} = V_s$ qui est égale à $V_{dc} \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Le déplacement du flux statorique correspond à la dérivée angulaire $\frac{d\theta_s}{dt}$. Sur la figure II.8, on présente les trois directions possibles du vecteur flux Φ_s . Ainsi, on peut voir que pour $E = \frac{d\Phi_s}{dt}$ donné, le déplacement de l'extrémité du flux statorique est maximal si cette même force électromotrice est perpendiculaire à la direction du vecteur Φ_s .

Par contre, dans le cas où la force électromotrice est décalée par rapport à la perpendiculaire de Φ_s (α_1 en avant ou α_2 en arrière), on observe un ralentissement du déplacement de l'extrémité du flux Φ_s . De même, on relève que la vitesse de déplacement de l'extrémité du flux Φ_s est nulle, si l'on applique un vecteur tension nul (cas où le terme $R_s I_s$ est négligé) [43].

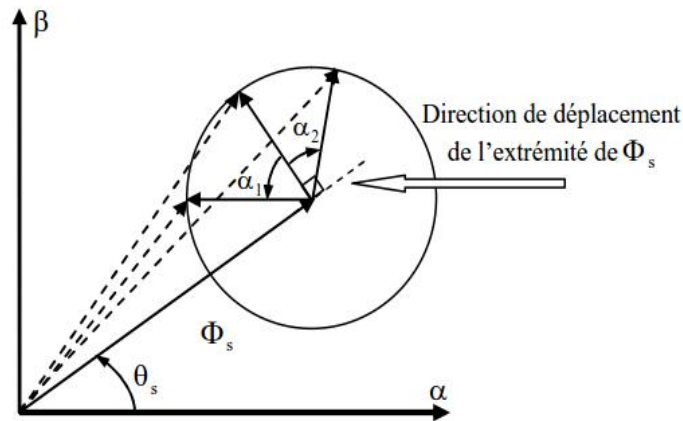


Figure II.8: Présentation des trois directions possibles du vecteur flux Φ_s

On peut dire que la manière la plus efficace d'augmenter (respectivement diminuer) le flux est celle d'appliquer un vecteur de tension parallèle à Φ_s , et de même sens (respectivement de sens opposé).

La figure II.9 montre un exemple d'évolution de l'extrémité du vecteur Φ_s pour ($V_s = V_2$) avec $R_s I_s$ négligeable. On constate ainsi que la composante tangentielle du vecteur tension appliqué a pour effet de contrôler le couple alors que la composante radiale agit sur l'amplitude du flux Φ_s .

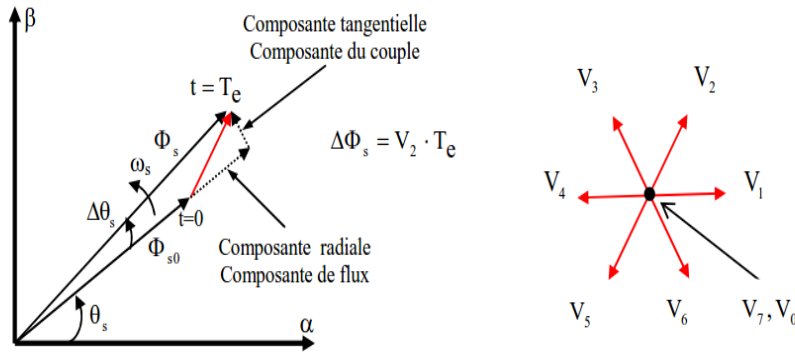


Figure II.9: Exemple d'évolution de l'extrémité de pour négligeable

II.8. Sélection du vecteur de tension

Le choix du vecteur de tension statorique V_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux Φ_s , du sens de rotation de Φ_s et de l'évolution souhaitée pour le couple. L'espace de l'évolution de Φ_s est décomposé en six zones i , avec $i \in [1,6]$, telles qu'elles sont représentées sur La figure II.10.

Lorsque le flux Φ_s se trouve dans une zone i ($i=1 \dots 6$) le contrôle du flux statorique et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivants [31] :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors Φ_s croît et T_{em} croît ;
- Si V_{i-1} est sélectionné alors Φ_s croît et T_{em} décroît ;
- Si V_{i+2} est sélectionné alors Φ_s décroît et T_{em} croît ;
- Si V_{i-2} est sélectionné alors Φ_s décroît et T_{em} décroît ;
- Si V_0 ou V_7 est sélectionné alors l'amplitude du flux demeure constante et le couple décroît si la vitesse est positive est, et croît si la vitesse est négative.

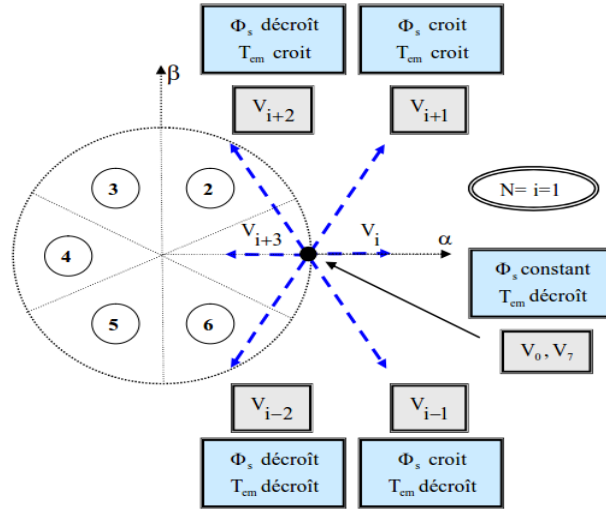


Figure II.10: Sélection du vecteur de tension selon la zone N=1

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position $N= i$, les deux vecteurs de tensions V_i et V_{i+3} ne sont jamais utilisés. Ce qui signifie que lors du déplacement du flux Φ_s sur une zone $N=i$, un bras de l'onduleur ne commute jamais et permet ainsi de diminuer la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs du convertisseur [44].

II.9. Les estimateurs :

Le vecteur tension à la sortie de l'onduleur est déduit à partir des écarts de couple et du flux, estimés par rapport à leurs références, et de la position du vecteur (Φ_s). Il est donc nécessaire d'estimer le flux statorique et le couple électromagnétique avec la meilleure précision possible pour obtenir de bonnes performances du système [42].

II.9.1. Estimateur du flux statorique :

L'estimateur du flux est réalisé à partir des mesures des grandeurs statoriques (courants et tensions) de la machine.

Les vecteurs de tensions dans le repère (α, β)

A partir des commandes (S_a, S_b, S_c) et de la tension V_{dc} , on détermine les valeurs des tensions $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$ en appliquant la transformation de Concordia [32] :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot \left(S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot (S_b - S_c) \end{cases} \quad (II.26)$$

De même, les courants $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$ sont obtenus à partir de l'application de la transformation de Concordia aux courants I_{sa} , I_{sb} et I_{sc} mesurés :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

L'utilisation de l'équation (II.22), permet alors de déterminer directement les Composantes du vecteur flux statorique Φ_s :

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}) dt \\ \Phi_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Dont le module s'écrit :

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad (\text{II.29})$$

La zone N_i dans laquelle se situe le vecteur Φ_s est déterminée à partir des composantes $\Phi_{s\alpha}$ et $\Phi_{s\beta}$. En effet, l'angle α_s entre le référentiel (α, β) et le vecteur Φ_s est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\alpha_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}}\right) \quad (\text{II.30})$$

II.9.2. Estimation du couple électromagnétique

Le couple est estimé directement à partir des grandeurs estimées du flux $\Phi_{s\alpha}$ et $\Phi_{s\beta}$ et des grandeurs calculées du courant $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$.

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{II.31})$$

II.10 Elaboration du vecteur de commande

II.10.1 Elaboration du correcteur du flux

Le but d'utiliser un correcteur de flux est de maintenir l'extrémité du vecteur flux (Φ_s) dans une couronne circulaire comme le montre la figure II.11. La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de Φ_s afin de sélectionner le vecteur tension correspondant.

Pour cela, un correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne Cflx indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée (Cflx = 1) ou diminuée (Cflx = 0) de façon à maintenir $|\Phi_{sref} - \Phi_s| \leq \Delta\Phi_s$.

Où Φ_{sref} correspond à la consigne de flux et $\Delta\Phi_s$ est la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur [45].

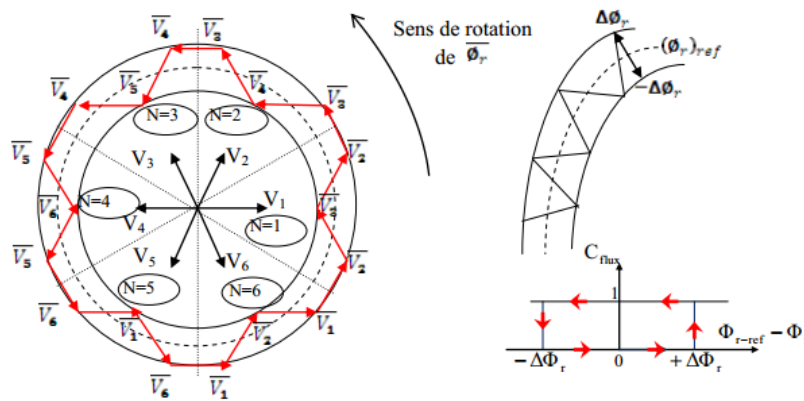


Figure II.11: Evolution du flux en utilisant un correcteur à hystérésis à deux niveaux

II.10.2 Elaboration du correcteur du couple

Ce correcteur a pour fonction de maintenir le couple dans les limites $|C_{em_ref} - C_{em}| \leq \Delta C_{em}$, C_{em_ref} étant la référence du couple et ΔC_{em} la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur.

Contrairement au flux, le couple électromagnétique peut être positif ou négatif.

Deux solutions peuvent alors être envisagées :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux

Dans notre cas, nous utilisons un correcteur à trois niveaux afin de contrôler la machine dans les deux modes de fonctionnement soit pour un couple positif ou négatif.

La sortie du correcteur est représentée par une variable booléenne C_{cpl} , elle indique directement si l'amplitude du couple doit augmenter en valeur absolue ($C_{cpl}=1$) pour une consigne positive et ($C_{cpl}= -1$) pour une consigne négative et ($C_{cpl}=0$) pour maintenir le couple constant [44].

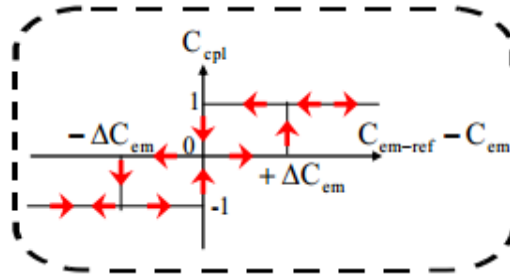


Figure II.12: Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux

II.11 Elaboration de la table de commutation

Plusieurs vecteurs de tensions peuvent être sélectionnés pour une combinaison donnée du flux et du couple. Le choix se fait sur la base d'une stratégie prédéfinie et chacune d'elles (les combinaisons) affectent le couple et l'ondulation du courant, les performances dynamiques et le fonctionnement à deux ou à quatre quadrants [32].

II.11.1 Fonctionnement à deux quadrants

Pour une vitesse positive, deux vecteurs tensions (en avant) V_{i+1} , V_{i+2} seulement peuvent être appliqués pour augmenter le couple selon le flux statorique exigé. Pour diminuer le couple, il est possible d'appliquer les vecteurs tensions radiaux V_i , V_{i+3} ou le vecteur nul.

II.11.2 Fonctionnement à quatre quadrants

Afin d'améliorer les performances dynamiques de la commande DTC à basse vitesse et assurer le fonctionnement en quatre quadrants, il est nécessaire d'appliquer les vecteurs tensions (en arrière) V_{i-1} et V_{i-2} dans le contrôle du couple et du flux. Cette stratégie exige du flux de tourner dans les deux sens de rotation, même à très basse vitesse. Lesquelles sont exigées quand le couple doit diminuer rapidement. Cette stratégie permet d'obtenir un très bon contrôle du flux statorique même à très basse vitesse.

Dans nos travaux, nous utilisons une table qui fonctionne dans les quatre quadrants.

II.11.3. Régulation de la tension du bus continu

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 donne la puissance active de référence [14,20].

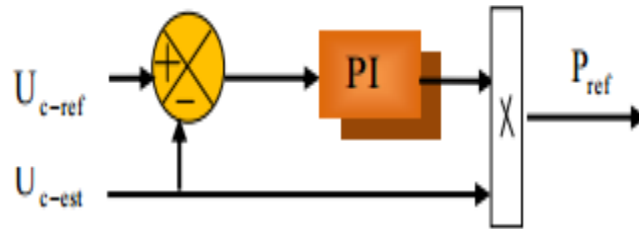


Figure II.13: Régulation de la tension continue avec un correcteur PI

II.11.4. Table de commutation

Comme introduit ci-dessus, il est donc possible d'utiliser deux vectrices tensions pour chaque sens de rotation ; l'un fait croître le vecteur flux statorique et l'autre le fait décroître. Ainsi, Le couple peut être contrôlé en utilisant la table logique de commutation optimale, qui permet de définir le vecteur qu'il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteurs et de la position du vecteur flux statorique. Cette table est représentée ci-dessous [46].

Il est à noter que la fréquence de commutation dépendra de l'amplitude de la bande d'hystérésis du flux utilisée. Plus la largeur de la bande est faible, plus la fréquence est élevée.

| N | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Correcteur |
|--------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Cflx=1 | Ccpl=1 | V ₂ | V ₃ | V ₄ | V ₅ | V ₆ | V ₁ | 2 niveaux |
| | Ccpl=0 | V ₇ | V ₀ | V ₇ | V ₀ | V ₇ | V ₀ | |
| | Ccpl=-1 | V ₆ | V ₁ | V ₂ | V ₃ | V ₄ | V ₅ | 3 niveaux |
| Cflx=0 | Ccpl=1 | V ₃ | V ₄ | V ₅ | V ₆ | V ₁ | V ₂ | 2 niveaux |
| | Ccpl=0 | V ₀ | V ₇ | V ₀ | V ₇ | V ₀ | V ₇ | |
| | Ccpl=-1 | V ₅ | V ₆ | V ₁ | V ₂ | V ₃ | V ₄ | 3 niveaux |

Tableau II.1: Table de vérité de la structure de la DTC

II.12 Les résultats de simulation et interprétation :

Pour illustrer le comportement de la structure de commande par DTC, appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents. On représente dans ce qui suit, des résultats de simulation de cette commande avec la GSAP entraînée à une vitesse variable. Pour une largeur de la bande d'hystérésis du couple $\Delta C_e = 0,004$ Nm et celle du flux $\Delta \varphi = 0,004$ Wb, le couple de référence est obtenu à partir de la technique MPPT et le flux de référence correspondant à sa valeur nominale (Flux des aimants)

Les figures ci-dessous présentes les résultats de simulation sur un intervalle (10 s).

Les tests de simulation sont effectués en considérant le même profil de vent présenté au chapitre I dans la figure I.19, appliqué aux pales de la turbine éolienne. Ce dernier à son tour entraîne la GSAP à une vitesse mécanique variable via un multiplicateur de vitesse. La référence de la tension du bus continu est égale à $U_{c-ref} = 220V$,

Les résultats obtenus par la commande DTC de la GSAP sont respectivement: le couple électromagnétique, le module du flux statorique, ainsi que celui obtenu dans repère de Concordia, avec son évolution par rapport à ces deux composantes, et enfin les courants statorique sont représentés par les figures suivantes :

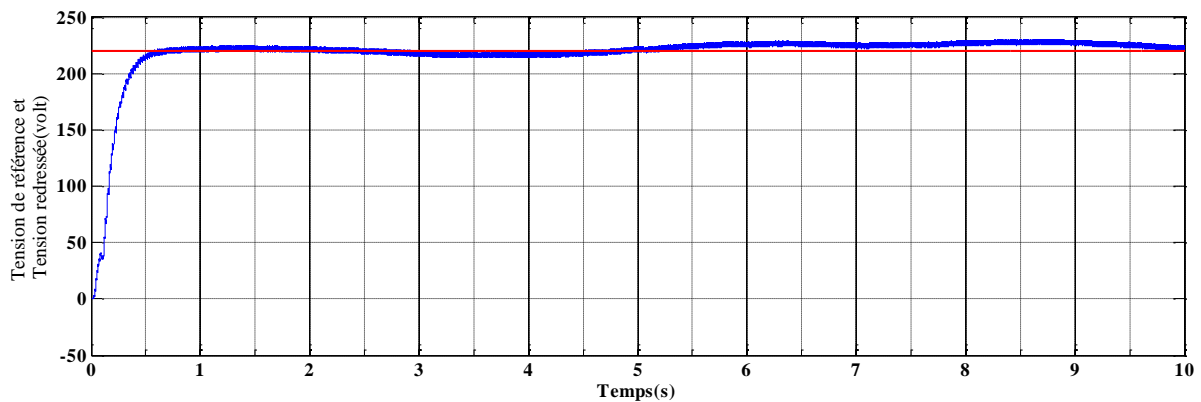


Figure II.14: Tension redressée

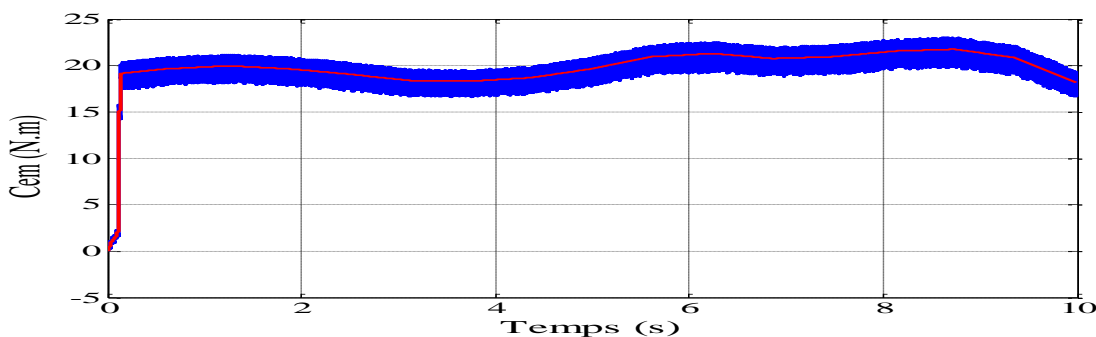


Figure II.15: Couple électromagnétique de la GSAP

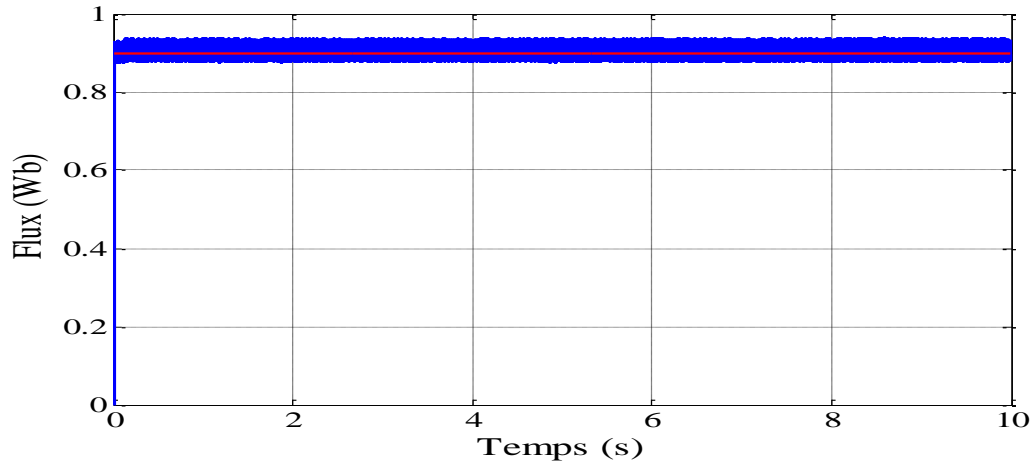


Figure II.16: Flux statorique de la GSAP

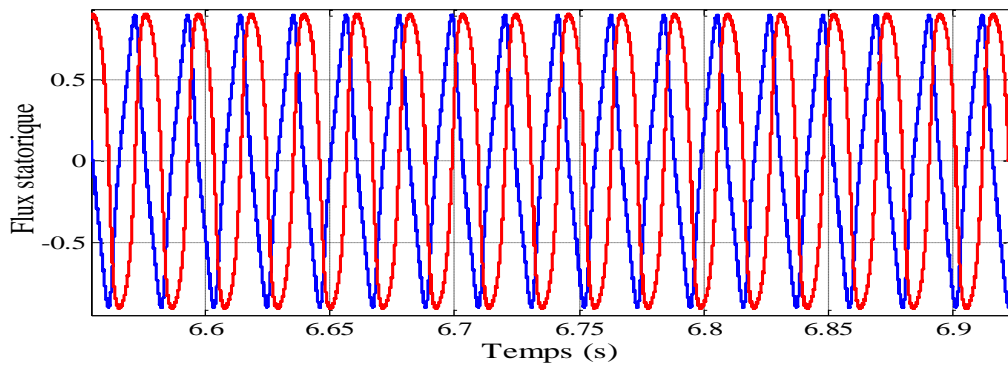


Figure II.17: Flux statorique dans le repère de Concordia

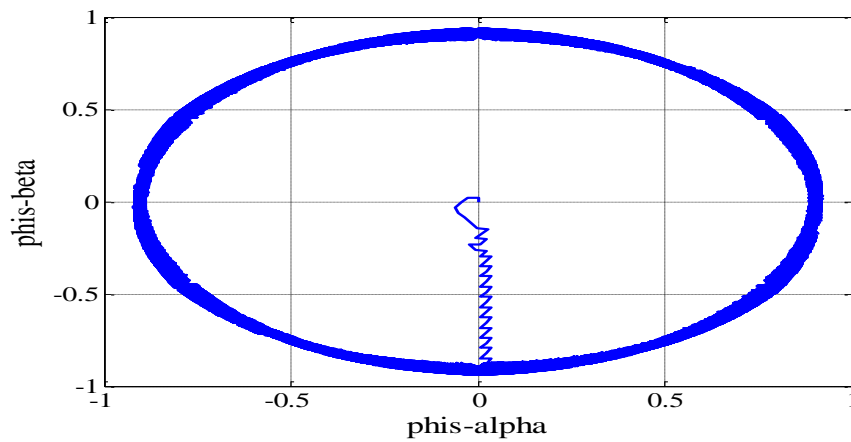


Figure II.18: Trajectoire de flux statorique de la GSAP

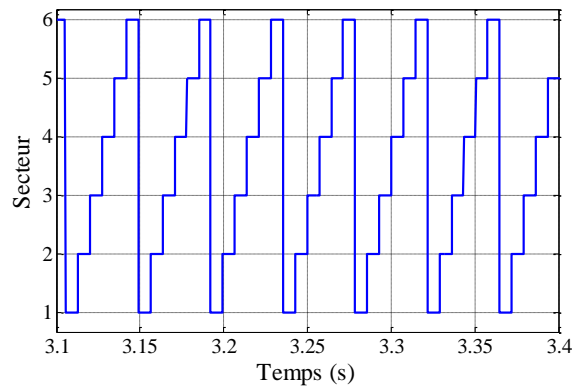


Figure II.19: Secteur du travail

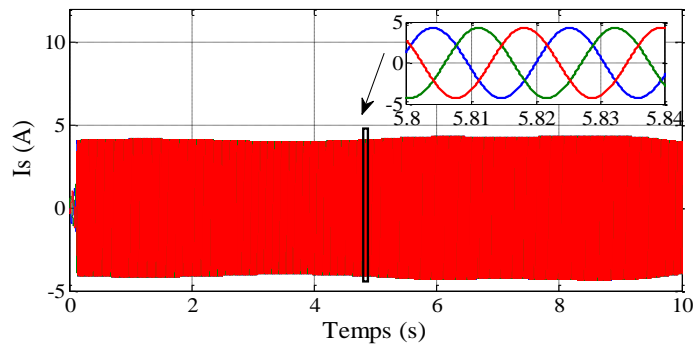


Figure II.20: Courant statorique

D’après les résultats de la simulation obtenue, nous remarquons que la GSAP entraînée par la turbine éolienne reçoit une vitesse variable de 93.1 tr/min à 105.2tr/min sur l’arbre mécanique fournit une tension

D’une valeur de 218 à 223 volts et un courant de 4.3 à 4.9 ampères que ces changement de la tension et du courant due à cause de variation de vitesse de profile de vent.

La tension de bus continu est donné par le redresseur suit la tension de référence avec des petites fluctuations dues à cause de la variation de la vitesse de vent.

On remarque pour la figure II.14 une bonne dynamique du couple dont la valeur estimée suit de façon acceptable la valeur de consigne avec quelque ondulation sur le couple qui est causées par les régulateurs à hystérésis.

La figure II.15 montre le module de flux statorique, on remarque que dernier suit la valeur de référence avec des petites ondulations autour de sa valeur de consigne du a la bande d'hystérésis. On outre, l'évolution de flux statorique dans le repère (α, β) , présente une trajectoire circulaire avec une amplitude fixée à sa valeur nominale qui est de **0,9 Wb** pour cette machine, ainsi les deux composantes du flux sont bien sinusoïdales et déphasés de $\pi/2$.

On constate que le flux et le couple suivent convenablement leur référence, et on note les performances dynamiques et statiques du couple électromagnétique qui suit précisément sa consigne, mais avec des ondulations importantes.

L'amplitude ainsi que la fréquence des courants statorique s'adaptent suite à la variation de la vitesse.

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre l'approche DTC est utilisée pour contrôler le couple et le flux de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers des comparateurs à hystérésis. L'étude qui a été réalisée de ce dernier, nous a permis de bien comprendre la structure de la commande DTC et sa simplicité. Cette technique de commande a présenté un contrôle du couple très performant et une dynamique très importante tout en gardant une bonne précision du contrôle. Cette précision est basée sur le bon choix du vecteur tension qui joue un rôle primordial dans la régulation du vecteur flux donc du couple. Elle est robuste pour les variations paramétriques du fait que la résistance statorique est théoriquement le seul paramètre de la machine qui intervient dans la commande directe du couple, utilisé pour l'estimation du vecteur flux statorique.

Le prochain chapitre, traitera la méthode d'amélioration de la commande directe de couple par l'utilisation la technique d'intelligence artificiel (la logique floue).

Chapitre III

Commande DTC par la logique floue de la GSAP

III.1.Introduction :

La logique floue (fuzzy-logic) est une technique utilisée en intelligence artificielle. En réalité elle existait déjà depuis longtemps. L'utilisation de la logique floue dans la commande des systèmes nécessite d'avoir des connaissances sur cette théorie et son utilisation dans la commande d'où la nécessité de présenter quelques bases générales de la logique floue : Théorie des ensembles flous, les relations floues, principe de réglage par logique floue ainsi que la structure de commande par logique floue des systèmes multivariables. La logique floue est à l'image de la logique binaire, clairement et logiquement étayée à l'aide de la théorie mathématique. Elle est apparue en 1965 avec la publication par **Lotfi Zadeh** d'un article intitulé «les ensembles flous». La logique floue permet de manipuler des symboles et d'inférer des actions se utilisant des règles logiques à partir des prémisses imprécises ou incertaines.

En 1975 **Mamdani** a développé à partir de quelques principes de la logique floue une stratégie de contrôle de procédé, par la suite ces travaux ont été repris, et les techniques utilisées dans les réalisations récentes sont issues [35], [18].

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe général et la théorie de base de la logique floue et les fondements du régulateur flou, Puis nous évoquerons en détail l'application de cette technique d'intelligence à la commande directe du couple (DTC).

III.2 Principe de la logique floue :

Le principe de réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine du fait que les variables traitées ne sont pas des variables logiques mais des variables linguistiques, proches du langage humain. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide des règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. Toute une série de notions fondamentales est développée dans la logique floue. Ces notions permettent de démontrer et de justifier certains principes de base [15].

III.2.2. Variables linguistiques et ensembles flous :

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues. Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables Linguistiques. Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques qui sont normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe [36].

Dans un ensemble de référence E, un sous ensemble flou de sous référentiel E est caractérisé par une fonction d'apparence μ 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 [38].

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 aborne supérieure de la fonction d'appartenance : $\text{ht}(E) = \sup (x \in E) \mu_E(x)$

Ensemble normalisée : un ensemble est dit normalisés 'il est de hauteur 1

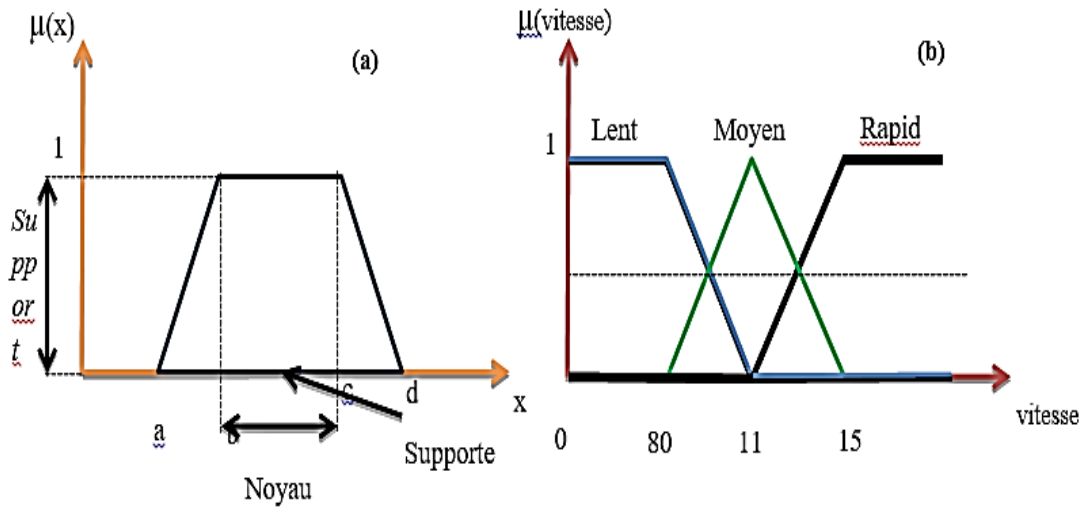


Figure III.1: a. Format d'un ensemble flou normalisé b. représentation des variables linguistiques.

III.2.3 La fonction d'appartenance :

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique, elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'UN élément à l'ensemble flou. En toute généralité, une fonction d'appartenance d'un ensemble flou est désignée par $\mu_E(x)$. L'argument x se rapporte à la variable caractérisée, alors que l'indice E indique l'ensemble concerné. Les fonctions d'appartenance peuvent être linaires ou gaussiennes avec différentes formes [13] :

- ✓ Monotones(Croissante sou décroissantes),comme il est montré sur la figure(III.2.a)
- ✓ Triangulaire, figure(III.2.c).
- ✓ Trapézoïdales, figure(III.2.d).

✓ En forme de cloche(Gaussienne), figure(III.2.e).

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaires.

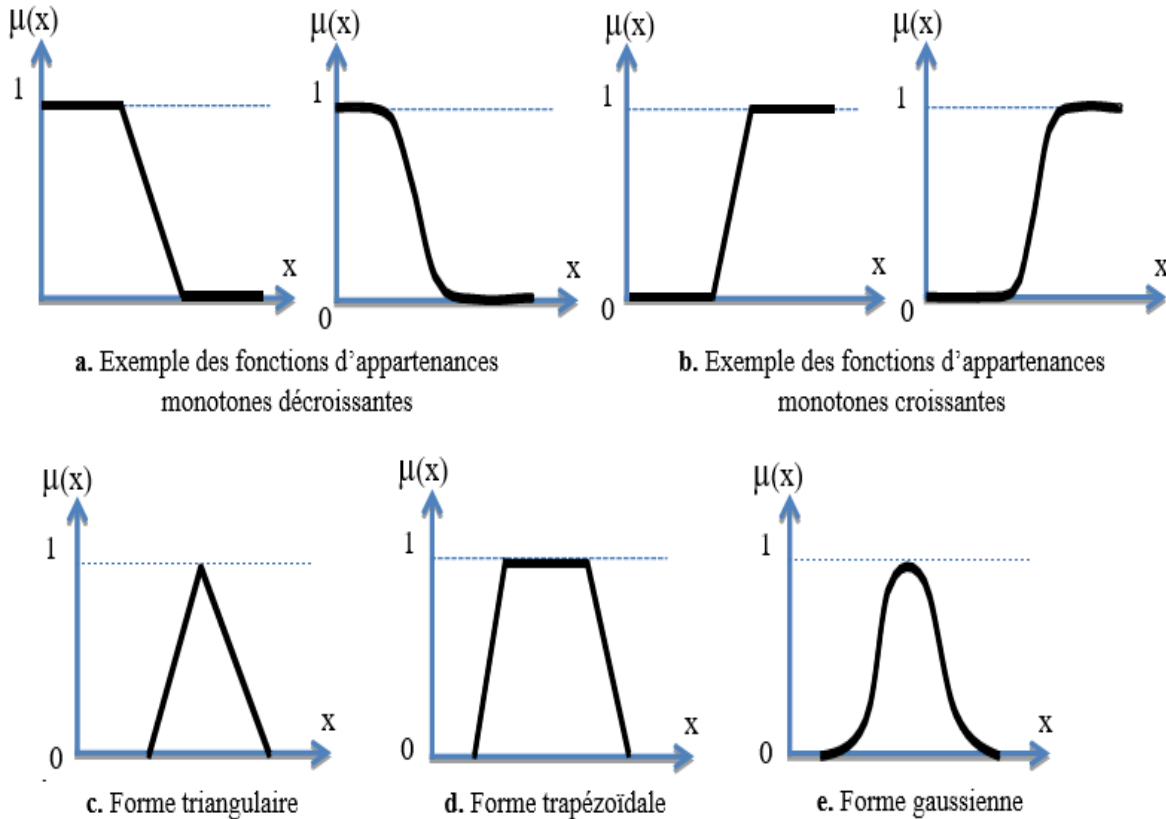


Figure III.2: Différentes formes des fonctions d'appartenance

III.3 L'opérateur de la logique floue :

Ladescription d'un situation où il y a plus qu'une variable qui intervient, nécessite l'utilisation des opérateurs logique tel que : "ET", "OU" et "NON" qui dans la théorie de la logique floue peuvent être interprétés par les opérations respectivement : "Minimum", "maximum" et "Complément à un". L'analogie d'utilisation de ces opérateurs dans les deux logiques classiques et floue est donnée sur le Tableau II.1 [36].

| | Logique classique | Logique floue |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|
| $C = A \text{ ET } B$ | $C = A \cap B$ | $\mu_c(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ |
| $C = A \text{ OU } B$ | $C = A \cup B$ | $\mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ |
| $C = \text{NON } A$ | $C = \bar{A}$ | $\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x)$ |

Tableau III.1: Signification des opérateurs dans les deux logiques classique et floue.

III.4 Structure d'une commande floue :

La commande floue est l'application la plus utilisée dans la logique floue. En effet, Cette méthode permet d'obtenir un réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard, le régulateur floue (RLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences (déduction) avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques [20].

On distingue dans un régulateur flou quatre étapes principaux : la fuzzification, l'inférence, la défuzzification et la base des règles (Figure II.3).

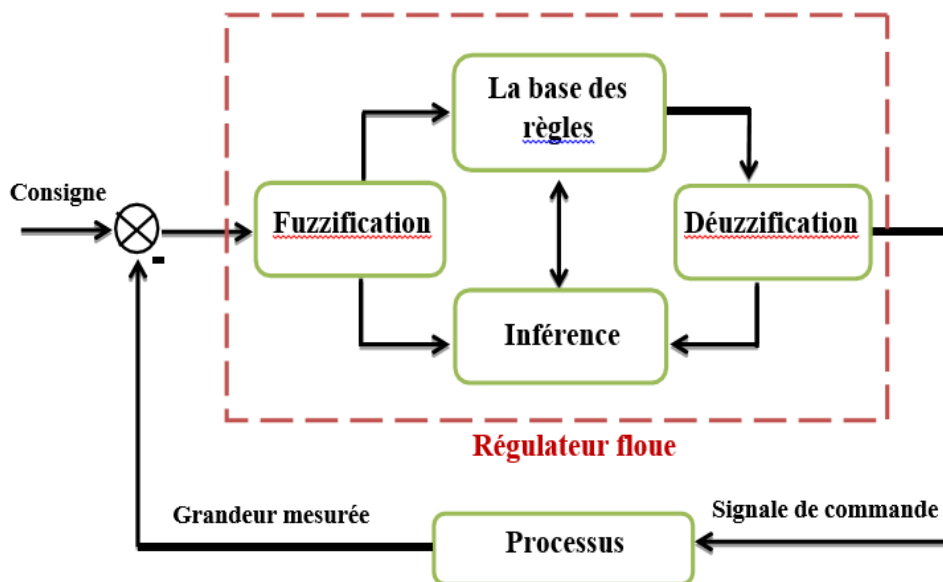


Figure III.3: La structure générale d'un régulateur flou.

III.4.1 Fuzzification:

Les variables d'entrée et de sortie choisies pour modéliser ou commander un système sont des grandeurs numériques. L'étape de fuzzification consiste à transformer ces grandeurs réelles invariables linguistiques en vue d'un traitement d'inférence. Ainsi, à chaque variable d'entrée et de sortie, on lui associe des ensembles caractérisant les termes linguistiques pris par ces variables. Ces termes seront utilisés pour écrire les règles d'inférence [36]

III.4.2 La base de règles :

Une base de règles floues est une collection de règles qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie. La description de la commande se fait par l'intermédiaire de ces règles qui ont la forme suivante [36]:

- a. Six1 est A1 et x2 est A2 Alors y est B où:

x1, x2 et y : sont les grandeurs physiques caractéristiques du système. A1, A2 et B : sont les termes linguistiques.

Le "ET" de conjonction est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions floues x1 est A1 et x2 est A2.

III.4.3 Méthode d'inférence floue :

Les processus d'inférence floue et l'agrégation des règles sont utilisés pour construire l'ensemble flou lié à la commande. Pour chaque règle qui doit être étudiée, un opérateur d'implication floue est utilisé dans l'inférence floue. Cet opérateur mesure le degré de relation entre la prémisse et la conclusion de la règle. Réfléchissons à la règle suivante : Y doit être B si x0 est A.

L'inférence peut être exprimée mathématiquement par l'expression suivante :

$$\mu_B(y) = I(\mu_A(x_0); \mu_B(y))$$

Où I désigne l'opérateur d'inférence.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. Pourtant, on utilise souvent les inférences floues définies par **Mamdani** et **Sugeno** [36].

III.4.4 Défuzzification :

Le traitement des règles d'inférence fournit une valeur floue. L'étape de Défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise à appliquer au processus. Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour réaliser cette opération telle que la moyenne des maxima, le centre des aires, le centre des maxima. La méthode de défuzzification par le centre de gravité est la méthode la plus utilisée en commande floue du fait qu'elle fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. Elle consiste à calculer le centre de gravité de la surface formée par la fonction d'appartenance résultante [36].

III.5 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue :

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et d'inconvénients [13].

a. Les avantages :

- ✓ L'absence de 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.

b. Les 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).

III.6 Application de la logique floue dans la DTC à deux-niveaux :

Dans la commande directe de couple traditionnelle, l'état de commutation est directement choisi en fonction des erreurs de couple et de flux, sans distinction entre un défaut très important et un défaut relativement mineur.

Par ailleurs, l'état de commutation choisi pour une grande erreur qui se produit au démarrage ou lors de la variation des consignes du couple et du flux est le même qu'en fonctionnement normal. Ce qui implique évidemment une réponse médiocre. Les performances du système peuvent être améliorées si on sélectionne le vecteur de tension selon la valeur de l'erreur du couple et du flux ainsi que la position du flux dans l'espace de son évolution. [28]

Cette fonction erreur est la différence entre une grandeur calculée à partir des informations fournies par la commande et de la grandeur équivalente déterminée à partir des mesures. Cependant les principes de la logique

floue, l'utilisation du concept d'ensemble flou, peuvent être appliqués à beaucoup des problèmes où la manipulation de l'imprécis ou vague est indispensable. Nous verrons, par la suite, l'avantage que ce mode de raisonnement peut apporter à partir des règles d'expertise définies par les entrées (erreur, dérivé de l'erreur en générale) Del fonction définie. [29].

La structure finale du contrôleur flou pour la commande directe de couple utilisée sur un onduleur multiniveau est illustrée à la figure III.4.

III.6.1 Choix des fonctions d'appartenances :

Les fonctions d'appartenances trapézoïdales et triangulaires sont les plus utilisées et elles sont prouvées d'être de bon compensateur entre l'efficacité et la facilité d'implantation [34].

III.6.2 Fuzzification :

L'erreur de flux, l'erreur de couple et l'angle de flux du stator sont les trois entrées du contrôleur à logique floue dans ce système. Elles sont définies tour à tour ci-dessous.

$$\Delta c_e = c_{ref} - c_{em} \text{ (III-1)}$$

$$\Delta \varphi_s = \varphi_{sref} - \varphi_s \text{ (III-2)}$$

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \text{ (III-3)}$$

III.6.3 Variable de commande :

Les règles de contrôle peuvent être exprimées en fonction des variables d'entrée et des sorties de la manière suivante :

Ri :if $\Delta\varphi_s$ is A_i , and ΔC is B_i , and θ_s is C_i then n_i Ou

$A_i, B_i, C_i, n_i, G_i, K_i$ sont les ensembles flous.

Le traitement de ces règles se fera par la méthode de minimum de Mamdani exprimée par :

$$\mu_{Ri}(n) = \min(\mu_{A_i}(\Delta\varphi_s), \mu_{B_i}(\Delta C), \mu_{C_i}(\theta_s)) \quad \text{Avec :} \quad \mu_{A_i} = \min(\mu_{A_i}(\Delta C), \mu_{B_i}(\Delta\varphi_s), \mu_{C_i}(\theta_s))$$

Où μ_A, μ_B, μ_C et μ_N représentent les fonctions d'appartenance des ensembles A, B, C, N, des variables $\varphi_s, \Delta C, \theta_s, n, g$ respectivement.

La fonction d'appartenance μ_n de la sortie n est déterminée alors par:

$$\mu_N = \max_{i=1}^m \mu_{Ri}(n) \quad \text{Avec: } m: \text{ nombre de règle}$$

III.6.4 Défuzzification :

Pour la défuzzification nous utilisons la méthode de maximum. La fonction d'appartenance μ_N s de la sortie est déterminée alors par :

$$Ns(n) = \max(\mu_{Ri}(n))$$

$$N = 0$$

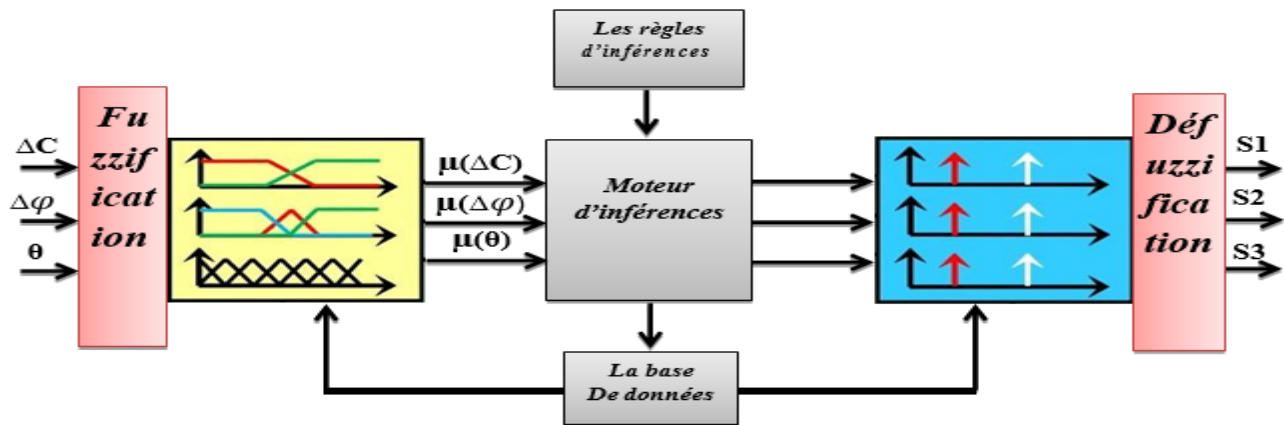


Figure III.4: La structure finale du régulateur flou utilisé dans la DTC deux-niveaux.

III.7 Le schéma synoptique de la DTFC à deux-niveau :

Le schéma synoptique de la commande floue directe du couple (DTFC) d'une machine asynchrone est montré dans la figure II.6, où un contrôleur flou a été inséré pour remplacer simultanément les contrôleurs à hystérésis classiques et la table de commutation [13]. La valeur estimée du flux statorique est comparée à sa valeur souhaitée. La valeur estimée du couple électromagnétique est comparée au couple de référence. Les erreurs du flux, couple et de l'angle de position du flux statorique sont fuzzifiées en plusieurs sous-ensembles flous pour sélectionner un vecteur de tension afin de conduire le couple et le flux vers leurs valeurs de référence [39].

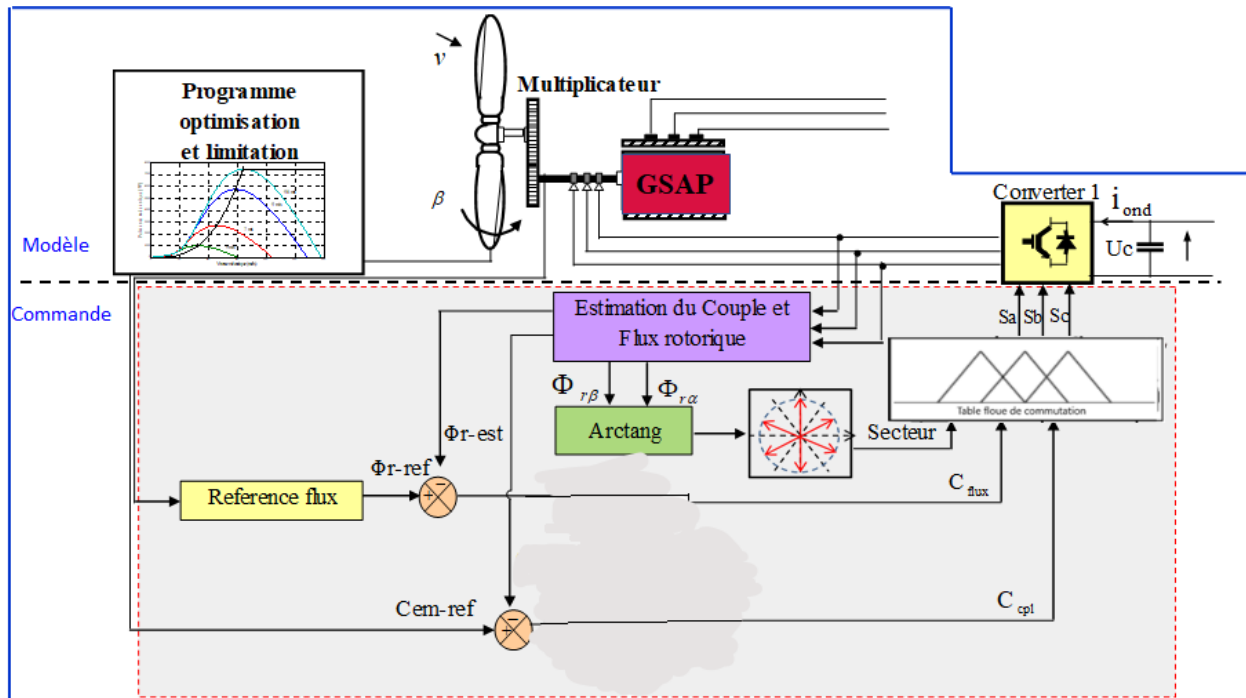


Figure III.5: Schéma synoptique de la commande floue directe du couple

III.8 DTC-Floue appliquée sur un Redresseur à deux niveaux :

Le principe de base de cette approche est d'appliquer un raisonnement flou pour les erreurs sur les grandeurs de commande. Ainsi, l'erreur de flux " $\Delta\phi_s$ ", l'erreur du couple " ΔC_e " et la position du flux " θ_s " sont utilisées comme des entrées du contrôleur flou. L'état de commutation des interrupteurs du convertisseur est évidemment la sortie du régulateur.

Après cette présentation des variables d'entrées et sorties on va détailler ces applications sur les convertisseurs à deux niveaux [38][35].

Les trois variables d'entrées sont divisées en un nombre déterminé d'ensemble flou de façon à avoir le meilleur contrôle en utilisant le minimum de règles. L'univers de discours de La première variable d'entrée est l'erreur du flux " $\Delta\phi_s$ " est divisée en deux ensembles flous:

- ✓ Erreur du flux est positive, «P»
- ✓ Erreur du flux est négative, «Z»

On choisit de fonction d'appartenance trapézoïdale pour le variable P et de fonction d'appartenances triangulaire pour l'ensemble Z, figure (II.6).

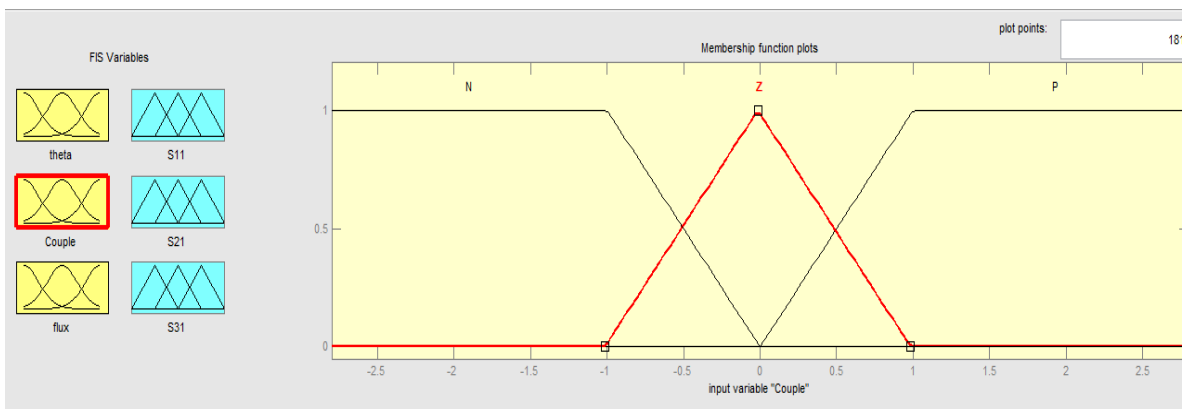


Figure III.6: Fonction d'appartenance de l'erreur du couple ΔC_e .

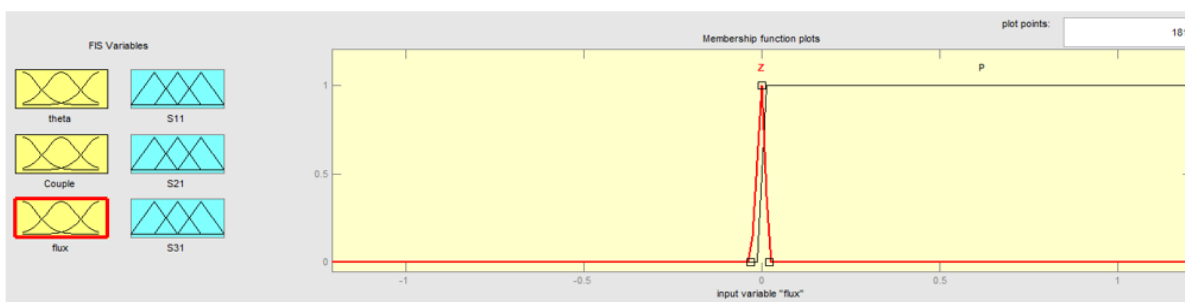


Figure III.7: Fonction d'appartenance de l'erreur du flux $\Delta \phi_s$.

La deuxième entrée est l'erreur du couple " ΔC_e ". Son univers du discours est divisé en quatre ensembles flous :

- ✓ Erreur du couple est positive, «P»
- ✓ Erreur du couple est Zéro, «Z»
- ✓ Erreur du couple est négative, «N»

On choisit des fonctions d'appartenances trapézoïdales pour les ensembles P et N, et de fonctions d'appartenances triangulaires pour l'ensemble Z, figure(II.7).

La position du flux dans le cadre lié au stator sert de troisième variable d'entrée. Selon la figure II.8, l'angle de flux "S" a un univers de discours égal à 2 radians. Pour être équivalent au DTC de base, il

est divisé en six zones ou secteurs. Le secteur I est désigné par "thêta", "o1" désigne le secteur 1 (θ_1), et ainsi de suite.

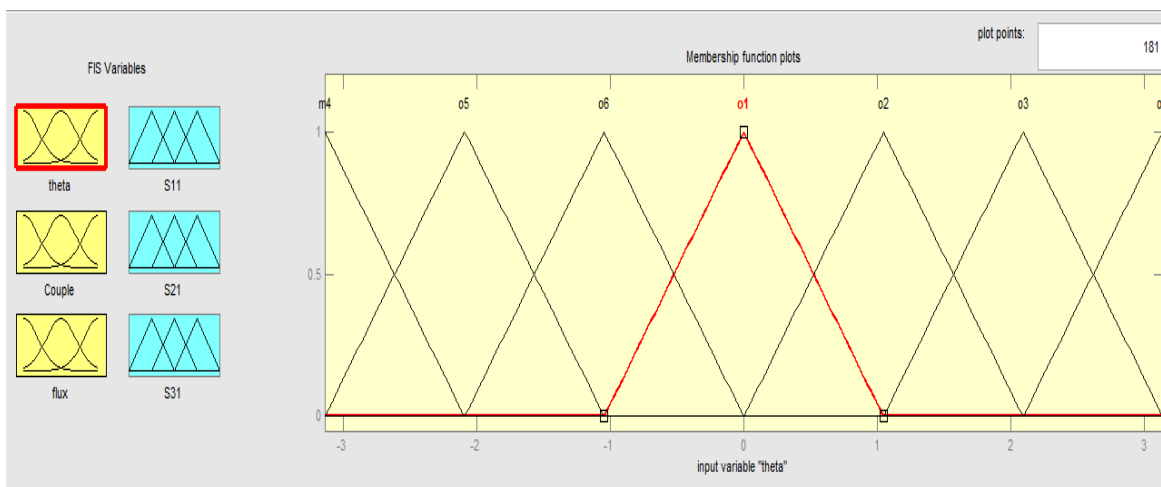


Figure III.8: fonction d'appartenance de la position θ_S

Le vecteur de tension spécifié ou les états de commutation de l'onduleur S1, S2 et S3 sont les seules variables de contrôle de sortie pour le système de logique floue. L'ensemble flou de sortie proposé est représenté par un singlet dans la figure (II.10). En fait, les règles de la table de commutation sont utilisées pour déterminer le vecteur de tension du stator. Les variables d'état s, Ce, et s ainsi que les variables de contrôle peuvent être utilisées pour décrire chaque règle de contrôle.

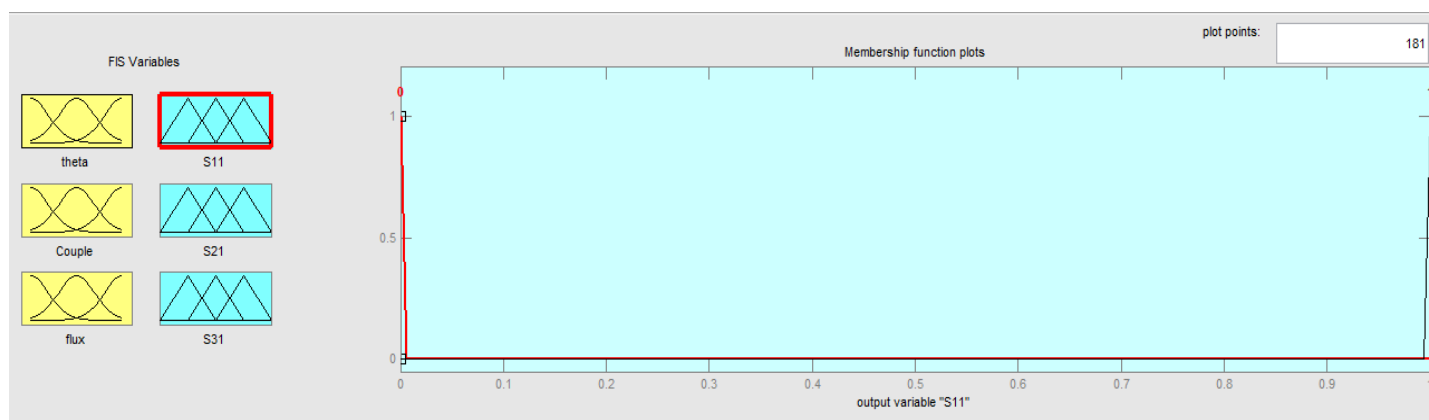


Figure III.9: fonction d'appartenance de l'état de commutation des interrupteurs.

Le bloc de commande, qui comprend l'estimation du débit et du couple, l'estimation de la position et toutes les limites imposées, sera maintenant examiné. L'exemple suivant illustre la manière dont les règles de contrôle peuvent être représentées en fonction des variables d'entrée et de sortie :

Ri : **if** $\Delta\varphi_s$ is Nan d ΔC_e is P and θ_{s1} **then** S1 is zero S2 is zero S3 is one

Dans la figure(II.11) on va représenter la structure interne du contrôleur flou pour le redresseur à deux niveaux.



Figure III.10: structure du contrôleur flou pour redresseur à deux niveaux.

III.9 Table de commutation:

Les variables d'erreur "s", l'erreur de débit ; "Ce", l'erreur de couple ; et "s", la position du débit qui sont divisées en bandes déterminées au chapitre II, mais pour cette technique toutes les variables sont des ensembles flous, sont similaires à celles que nous avons développées plus tôt au chapitre II dans les tableaux (II.2).

En outre, le résultat est singulier et calculé à l'aide d'opérateurs flous.

| Secteur (θ_s) | | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | θ_5 | θ_6 |
|------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Flux(φ_s) | Couple(C_e) | | | | | | |
| P | P | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V1 |
| | EZ | V7 | V0 | V7 | V0 | V7 | V0 |
| | N | V6 | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 |
| Z | P | V3 | V4 | V5 | V6 | V1 | V2 |
| | EZ | V0 | V7 | V0 | V7 | V0 | V7 |
| | N | V5 | V6 | V1 | V2 | V3 | V4 |

Tableau III.2: les tables de commutation avec Redresseur à deux niveaux.

III.10. Les résultats de simulation :

On présente maintenant les résultats obtenus à partir de simulation du fonctionnement de la structure du contrôle direct du couple à base de la logique floue appliquée à la génératrice synchrone à aimant permanents de 2.5kW alimentée par un convertisseur de tension à deux niveaux pour une table de commutation à trois niveaux du correcteur de couple et de deux niveaux pour le flux statorique, nous obtenons les résultats suivant :

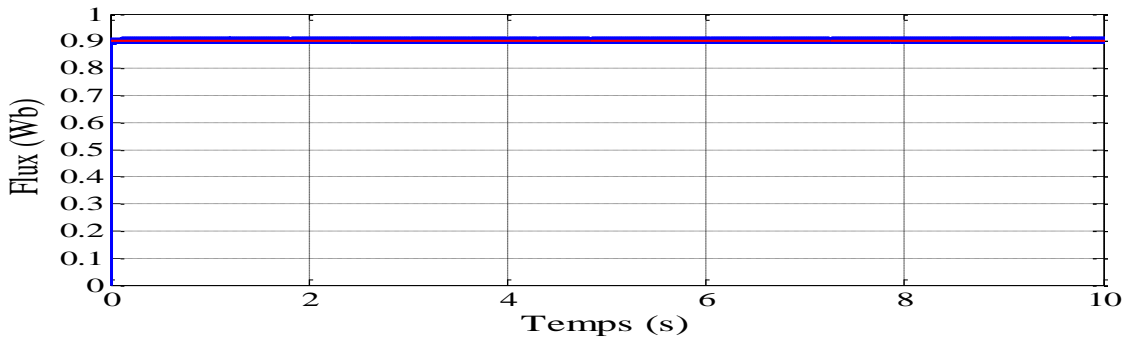


Figure III.11: le flux de référence et le flux estimé

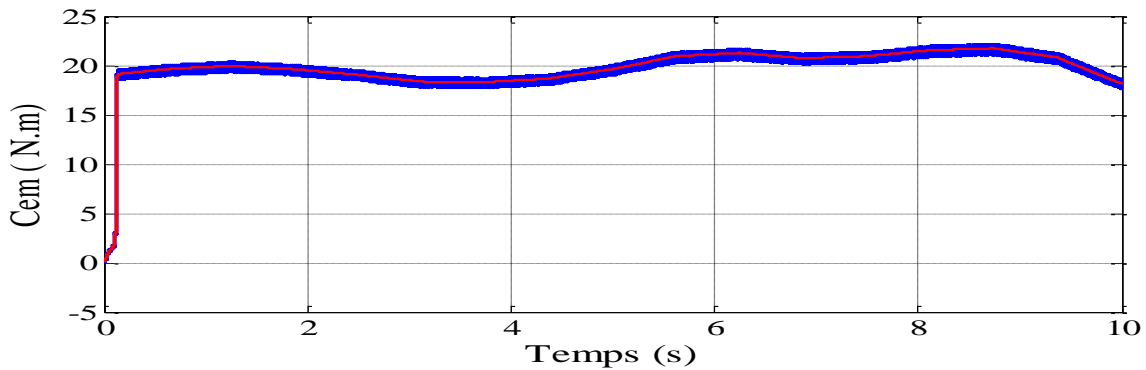


Figure III.12: le couple estimé et le couple électromagnétique

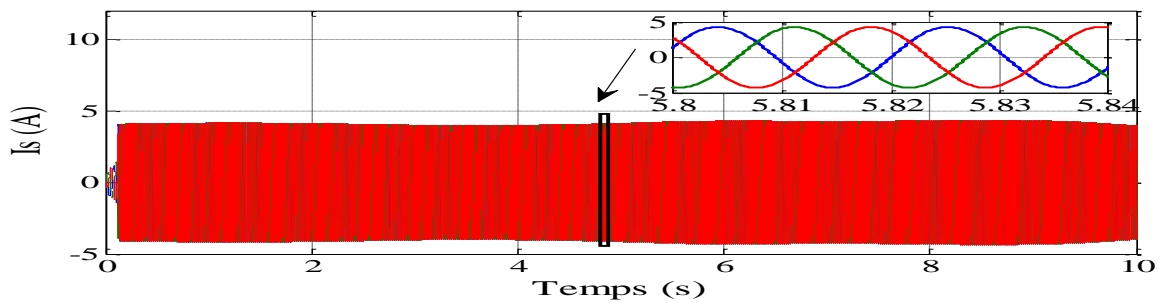


Figure III.13 : les courants de sortie de la GSAP

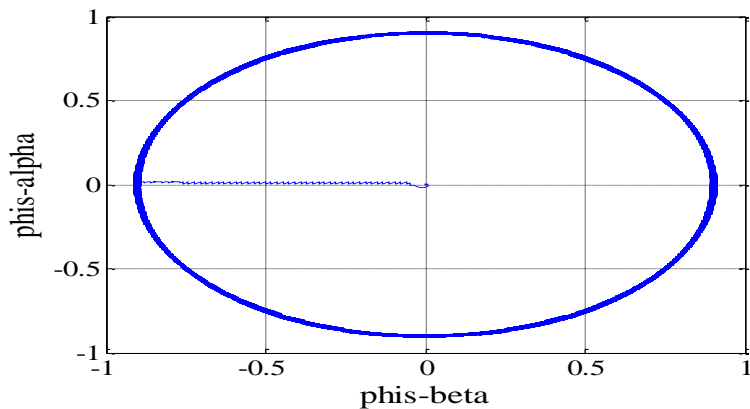


Figure III.14 : la trajectoire des flux statorique Alpha et Beta

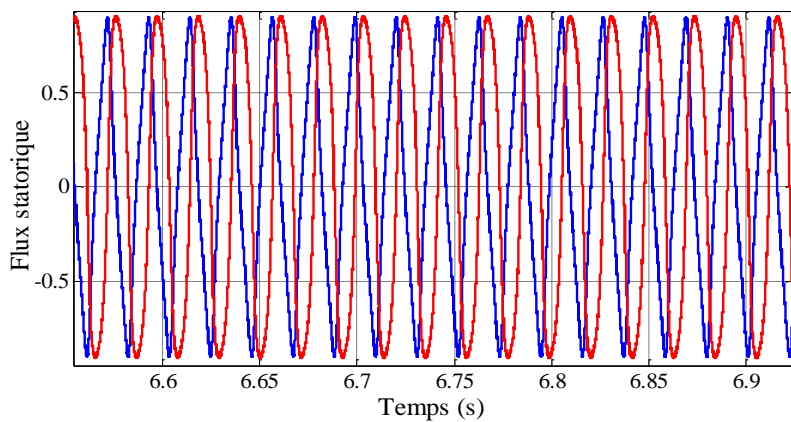


Figure III.15 : les flux statorique de la GSAP

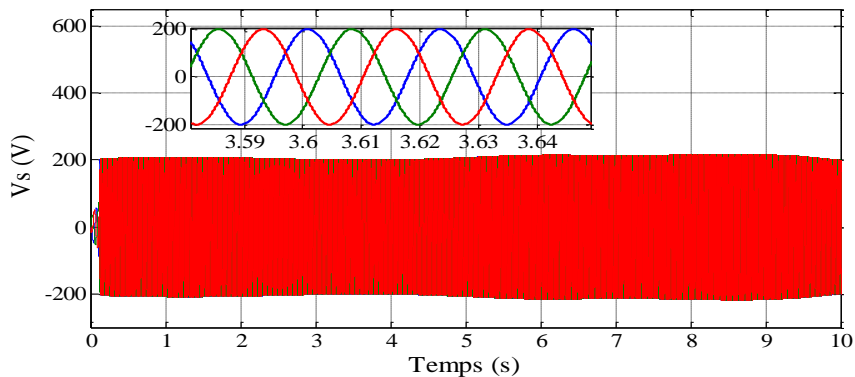


Figure III.16 : les tensions de sortie de la GSAP

L'interprétation :

Les résultats de simulation montre que le couple électromagnétique suit précisément sa référence et on relève son temps de réponse (0.5 sec). Le flux statorique φ_s est pratiquement constant et sa forme circulaire est plus nette et fine par rapport toujours au chapitre précédent, ensuite le courant statorique répond aussi bien aux variations imposées par le couple et que sa forme est très proche de la sinusoïde. On observe également la diminution des harmoniques.

III.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, la technique de la logique floue a été exposées, dont l'objectif était l'amélioration de la commande directe du couple classique avec l'utilisation des intelligences artificielles. En commençant par un rappelle sur les concepts de base sur lesquels repose la théorie de la logique floue, Par la suite nous nous sommes intéressées aux étapes de conception d'un régulateur flou afin d'introduire ce dernier dans la commande direct du couple tout en remplaçant les contrôleurs à hystérésis ainsi que la table de commutation par des contrôleurs flous dans le but d'améliorer les performances statiques et dynamiques de la DTC classique. Ce choix de la commande a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Les résultats obtenus montrent que la commande floue directe du couple présente des bonnes performances telles que la minimisation des ondulations au niveau du couple électromagnétique.

Conclusion Générale

Conclusion Générale et Perspectives

L'intérêt pour l'utilisation des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée. Le choix du type de la génératrice électrique utilisée dans la conversion éolienne pour produire de l'énergie électrique avec un bon rendement et à moindre coût est un défi qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au cours de ces dernières. Parmi les différents types de génératrices électriques on trouve Génératrices Synchrones à Aimant Permanent (GSAP). Plusieurs stratégies de commande de la GSAP ; on cite la commande directe du couple (DTC). Cette méthode même si elle porte plusieurs avantages, elle présente aussi bien quelques inconvénients représentés par l'irrégularité dans la fréquence de commutation et des ondulations notables aux niveaux du flux statorique et du couple électromagnétique.

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer à l'améliorer les performances de la commande DTC par l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle (logique floue)

La première chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne (définition, historique, avantages et inconvénients). Puis nous avons présenté différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP. Ainsi que la modélisation et la simulation de la turbine dans la zone de fonctionnement MPPT de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent. La structure de maximisation de puissance (MPPT) a été validée par des résultats de simulation qui ont montré ces avantages.

Dans le deuxième chapitre, et en premier lieu, on a présenté la modélisation de différentes équations (électrique, magnétique, mécanique) régissant le fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent MSAP dans le référentiel de Park, la transformation de Concordia est utilisée par la suite pour faire le passage entre le système triphasé abc et un système fictif $\alpha\beta$. Après, nous avons proposé une commande du premier convertisseur par la DTC (coté GSAP), cette technique a montré une grande simplicité et robustesse contre les variations paramétriques, les principes de cette stratégie ont été présentés d'une manière détaillée, avec explication du principe de réglage du flux et du couple électromagnétique de la GSAP.

Dans le troisième chapitre, nous avons développé un algorithme de commande basé sur la DTC classique par logique floue sur le convertisseur à deux niveaux. Cette partie nous a permis d'étudier et de réaliser le tableau de commutation sous une structure d'un contrôleur flou cela nous a permis de bien maîtriser la méthodologie de sa conception. En effet, le contrôle classique a été remplacé par le système flou pour améliorer les performances de la commande de la GSAP car ce dernier est très peu sensible aux variations des paramètres du système ainsi qu'aux perturbations externes, ce qui justifie sa robustesse.

Finalement, On propose en perspectives pour la suite de ce travail :

- Développement des nouvelles stratégies de commande.
- Réalisations pratiques pour valider nos modèles.
- Elargir le domaine d'utilisation de technique d'intelligence artificiel dans les systèmes de commandes industrielle.
- L'amélioration dans les systèmes robustes de commande.

Bibliographie :

[1] Djeriri Youcef ; « commande directe du couple et de puissance d'une MADA associé à un système éolienne par les techniques de l'intelligence artificielle » ; thèse de doctorat en science ; université de Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes; 05 /11/2015.

[2]. Minh Huynh Quang, "Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé, " Thèse de Doctorat, de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

[3] F Blaabjerg, M Liserre, and K Ma, «Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems», IEEE Transaction on Industrial Electronics, 48(2):708–719, Mar 2012.

[4].D. Boudiaf ,M.Belil, " Commande DTC par logique floue d'un moteur à induction alimenté par onduleur à cinq niveaux, "Mémoire de Master , 2020.

[5] Guide pratique énergie éolienne édition, Novembre 2015, ISBN 979-10-297-0130-6, Ce guide vous est fourni par : L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

[6] Site internet : <http://www.energies-renouvelables.org> (Dernier accès 2018)

[7]. J. Usaola, et al., "Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modeling issues and operation requirements", Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas (USA).

[8]. F.Kendouli, " Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique ", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.

[9]. N.ABU-TABAK, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: modélisation, commande, observation et simulation, " Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, Novembre 2008.

[10] www.ren21.net; site web

[11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne; site web.

[12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne_en_France ; site web.

[13] Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables - CDER, <http://portail.cder.dz/spip.php?article4321> (Dernier accès 2018).

[14] Ben aicha Sabrina ; « étude théorique et Expérimental d'un génératrice synchrone utilisées dans une chaîne éolienne à axe verticale » ; de Magister en Electrotechnique ; université de Batna ; 25 Décembre 2014.

[15]. B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", Revue J3Ea, vol. 5, Hors Série 1, EDP Science, 2006.

[16]. I.Hamzaoui, F.Bouchafaa, A.Talha,"Conventional MPPT system of wind generation: comparative study", International Review on modelling and Simulation (IREMOS), Vol.5, N.4,pp 1798-1804 August 2012.

[17]. B.Multon, X.Roboam, B.Dakyo, C.Nichita, O.Gergaud, H.Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'ingénieur, D3960, 2004.

[18]. B. Paluch, "Introduction à l'énergie éolienne", Revue REE, no. 5, pp. 35-50, Mai 2005.

[19]. L.Abdelhamid, R.Abdesmed, H.Amimeur, E.Merabet, "Etude des performances des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia,pp.1-6(CDROM),25-27Novembre2007.

[20]. F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : -Machine asynchrone à cage autonome, -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.

[21]. S. Heier, Grid integration of wind energy conversion systems, Deuxième édition, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex (UK), 2006. 426 pages.

[22]. E. Hau, Wind turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics,"2nd ed., Edition Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2006.783 pages.

[23]. S.El Aimani, " Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, Décembre 2004.

[24] F.KENDOULI,"Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique," thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.

[25]. T. Ghennam, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat d'Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Alger, Septembre 2011.

[26]. B. Raison et al., "L'énergie électrique éolienne, Partie I : Présentation générale et approche probabilistique," *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 5/3-4, pp. 405-484, 2002.

[27]. L. Shenghu, et al., "Dynamic aggregation of doubly-fed induction generators (DFIGs) for stability analysis of wind power systems", in *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE, 2011, pp. 1-6.

[28]. D. Casadei, F.Profumo, G.Serra, and A.Tani, "FOC and DTC:Two viable schemes for induction motors torque control, " *IEEE Trans.Power Electron.* Vol.17. no.5,pp.779–787, September 2002.

[29]. A. Boyette, "Contrôle-Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.

[30]. T. Ghennam, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat d'Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Alger, Septembre 2011.

[31]. M.N. KASBADJI, N. MESSSEN, "Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides " *Rev. Energ. Ren.: Zones Arides* ,PP 9-15,2002.

[32]. N. Kasbadji Merzouk, "Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie? ", *Bulletin des Energies Renouvelables*, Publication du Centre de développement des Energies Renouvelables N°14, pp. 6 – 7, Décembre 2008.

[33]. L.Jerbi, L.Krichen, A.Ouali, "A fuzzy logic supervisor for active and reactive power control of a variable speed wind energy conversion system associated to a flywheel storage system, " *Electric Power Systems Research* 79 (2009) 919–925.

[34]. M.Cirrincone, M.Pucci, "Growing Neural Gas based MPPT of Variable Pitch Wind Generators with Induction Machines", 2010 IEEE.

[35]. Y.D. Song, X.H. Yin, G. Leby, and L.Weng, "A Direct Approach to Achieving Maximum Power Conversion in Wind Power Generation Systems", ISSN 2009, Part III, LNCS 5553, pp. 1112–1121, 2009.

[36]. S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid and A. Denis, "Modeling and MPPT Sensorless Control of a DFIG-Based Marine Current Turbine", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, pp.1-6, 2008.

[37]. A.GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-

[38] H. Gallas, Amina Mseddi, Helmi Aloui, Sandrine Le Ballois, Vido Lionel. Développement d'un simulateur réaliste pour un aérogénérateur à vitesse variable. Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. fahal-02978278v2f

[39]. L.G. González, and al., "Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems", Applied Energy 2010.

[40]. S.E. Ben Elghali, M.E.H. Benbouzid and A. Denis, "Modeling and MPPT Sensorless Control of a DFIG-Based Marine Current Turbine", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, pp.1-6, 2008.

[41]. N. Patcharaprakitia, and al, "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", in IEEE Power Eng. Society Winter Meeting, 2002, pp. 372-377.

[42] N.El Ouanjli¹, A.Derouich¹, A.El Ghzizal¹, Saad Motahhir¹, Ali Chebabhi², Youness El Mourabit¹ and Mohammed Taoussi Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives - a review.

[43]. <http://www.metz.supelec.fr/metz/personnel/vialle/course/Mineure-HPC/index.htm>

[44] M.Akhbari. Modèle de Cellule de Commutation pour les Etudes de Pertes et de Performances CEM. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2000. Français. ffNNT : ff. fftel-00688480f

[45] SEDDIKI Rachid, REZGUI Samira, Synthèse d'un régulateur de vitesse à gains variables dans une structure DTC 2010. Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU Faculté du Génie Electrique et d'Informatique Département d'électrotechnique

ANNEXE :

PARAMETRES DE LA GSAP

Valeurs nominales : 2.5KW ; 220/380V- 50Hz ; 4.7/8.14A ; 1500tr/min.

Résistance du stator $R_s=0.859\Omega$

Flux statorique $\phi_f=0.9$ Weber

Inductance direct stator $L_d=0.021H$

Inductance quadratique de stator $L_q=0.0122H$

Couple résistant $C_r=23Nm$

Moment d'inertie $J=0.0014Kg.m^2$

Coefficient de frottement $f_r=0.001$ Nm.s/rad

Nombre de paire de pôles $P=4$

PARAMETRES DE LA TURBINE EOLIENNE

Puissance nominale $P_n=2.5kW$

Nombre de pale=3

Rayon d'une pale $R=3m$

Gain du multiplicateur (rapport de multiplication) $G=6$

Inertie $J=0.0014Kg.m^2$

Coefficient de frottements visqueux $f=0.001Nm.s/rad$

PARAMETRES DE LA CHARGE RL

$R= 50$ OHM

$L=0.02$ HENRY

DIMENSIONNEMENT DU RÉGULATEUR PI

La figure A montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI

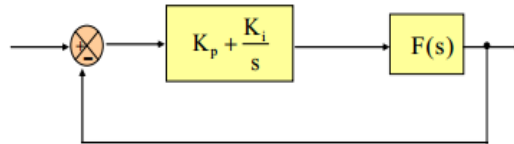


Figure. A. Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La forme du correcteur est la suivante :

$$C_s = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Avec :

k_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

k_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction de transfert suivante pour un processus associé à ce correcteur :

$$F(s) = \frac{k}{1 + \tau s}$$

En boucle ouverte, on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(s) = K \frac{k_p + (k_i / s)}{1 + \tau s} = \frac{K(k_p s + k_i)}{s(1 + \tau s)} = Kk_i \frac{1 + \frac{k_p s}{k_i}}{s(1 + \tau s)}$$

On prend

$$\tau = \frac{k_p}{k_i}$$

Alors

$$F_{BO}(s) = \frac{k_i K}{s}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(s) = \frac{k_i K}{k_i K + s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{k_i K} s}$$

Pour atteindre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut :

$$t_r = 3 \frac{1}{k_i K}$$

Or, $k_i = \frac{k_p}{\tau}$

Alors : $t_r = 3 \frac{\tau}{k_p K}$

D'où :

$$\begin{cases} k_p = 3 \frac{\tau}{t_r K} \\ k_i = \frac{3}{t_r K} \end{cases}$$

ملخص :

يتناول هذا العمل نمذجة ومراقبة ومحاكاة مولد متزامن مع مغناطيس دائم (GSAP) ، جنباً إلى جنب مع توربينات رياح محور أفقي صغير، مخصصة للتطبيق في المواقع المعزولة. تم تطبيق تقنية MPPT وشجعت على تعظيم القوة. وقد وُضعت استراتيجيات ووضع النماذج ومراقبة عزم الدوران المباشر في النظام الشامل. على الرغم من أن هذه الطريقة لها العديد من المزايا، إلا أنها لها أيضاً بعض العيوب المتمثلة في عدم انتظام وتيرة التبديل والتموجات الملحوظة على مستوى تدفق الحالة وعزم الدوران الكهرومغناطيسي. لتحسين أداء هذا التحكم، يتم إدخال المنطق الغامض لتحديد جدول تبديل المحول من مستويين المرتبط بتحكم GSAP-DTC. واستخدمت نتائج عمليات المحاكاة التي أجريت في بيئة ماتلاب/سيمولينك لتقييم أداء تكنولوجيا التحكم المقترحة.

الكلمات المفتاحية:

توربين المحور الأفقي، مولد مغناطيسي دائم متزامن (GSAP)، موقع معزول، تحكم مباشر في عزم الدوران (DTC)، منطق غامض.

Résumé :

Ce travail traite la modélisation, le contrôle et la simulation d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), associée à une éolienne à axe horizontal de petite puissance, dédiée pour une application en sites isolés. Une technique MPPT a été appliquée et a favorisé une maximisation de la puissance. La modélisation et la stratégie de commande directe du couple de la GSAP est élaborées. Cette méthode même si elle porte plusieurs avantages, elle présente aussi bien quelques inconvénients représentés par l'irrégularité dans la fréquence de commutation et des ondulations notables aux niveaux du flux statorique et du couple électromagnétique. Pour améliorer les performances de cette commande la logique floue est introduite pour déterminer la table de commutation de convertisseur à deux niveaux associé à la commande DTC de la GSAP. Les résultats de simulations réalisées sous l'environnement MATLAB/Simulink, ont permis d'évaluer les performances de la technique de commandes proposée.

Mot clés :

Eolienne à axe horizontal, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), site isolé, commande direct de couple (DTC), la logique floue

Abstract:

This work deals with the modeling, control and simulation of a permanent magnet synchronous generator (PMSG), associated with a small horizontal axis wind turbine, and dedicated to an application in isolated sites. An MPPT technique has been applied to maximize power output, and a direct torque control strategy for the GSAP has been developed. Although this method has a number of advantages, it also has a number of disadvantages, such as irregular switching frequency and significant ripples in stator flux and electromagnetic torque. To improve the performance of this control, fuzzy logic is introduced to determine the two-level converter switching table associated with the DTC- PMSG control. Simulation results using the MATLAB/Simulink environment have been used to evaluate the performance of the proposed control technique.

Key words:

Horizontal axis wind turbine, permanent magnet synchronous generator (PMSG), isolated site, direct torque control (DTC), fuzzy logic.