الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De master en électrotechnique

Spécialité : énergies renouvelables en électrotechniques

THEME

Contribution à la commande des systèmes éoliens (application aux systèmes de pompage)

Présenté par :

Mr, Boura Mustapha
Mr, Khelfi Noureddine

Encadré par :

Dr.HAMIDIA.F
Dr.ABADI.A

PROMOTION 2017-2018

Dédicace

*Je remercie **Dieu** tout puissant qui m'a donné toute la volonté et la patience pour aboutir à la réalisation de ce travail.*

Je dédiée ce modeste travail :

*A mon source de douceur, de tendresse, d'amour et affection et grâce au encouragement et aux sacrifices qu'elle a consentis j'ai pu arriver à réaliser ce travail, ma très chère **mère**.*

*A mon très cher **père**, pour les sacrifices qu'il a consentis pour mon éducation et pour l'avenir qu'il m'a cessé d'offrir.*

A toute ma famille

A tout ce qui j'aime et tout ce qu'ils m'aiment.

Toutes ces personnes que j'ai senties redoutable de leur dédier ce modeste travail en termes d'amour et de profonde gratitude.

BOURA ET KHELFI

Remerciement

Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.
Je tiens à remercier sincèrement Dr.F.HAMIDIA, qui, en tant que directrice de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.
J'exprime ma gratitude à tous les enseignants département de GEI
Merci à tous et toutes

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande directe du couple (DTC) associée à une électropompe asynchrone. La configuration de ce système comporte une génératrice éolienne (MSAP), un bus de courant continu contrôlé de telle façon à maintenir la tension délivrée à une valeur constante, le système comportait également une unité de stockage d'énergie et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système éolien moyennant une technique intelligente (les régulateurs basés sur les réseaux de neurones).

L'introduction de techniques de régulation par Réseaux de neurones sera effectuée auprès de l'étage différent comme MPPT, le bus continu, et le stockage d'énergie.

L'adaptation entre le générateur éolien et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC

La technique de commande directe du couple (DTC) est développée et présentée dans ce mémoire. Une simulation sous l'environnement simulation du logiciel MATLAB de la structure proposée.

Mot clé : turbine éolienne, machine synchrone à aimant permanent, machine asynchrone, réseau de neurone, la commande direct du couple.

ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو توفير آلية تحكم المباشر لعزم الآلة الغير متزامنة مع مضخة ،تكوين هذا النظام يحتوي على مولد للطاقة باستعمال توربينات الرياح، مقوم ،و يحتوي النظام ايضا على وحدة تحزين للطاقة، و عاكس الذي يغذي الة غير متزامنة مرتبطة بمضخة طرد مركزي،بحيث تكيف وحدة الانتاج مع الحمولة تم عن طريق العاكس.

سوف نقوم في هذه المذكرة بضمان عمل النظام في افصى نقطة قوة عن طريق التحكم في أجهزة التنظيم بطريقة ذكية (المنظمين على أساس الشبكات العصبية).

تدخل هذه التقنية الذكية في النظام المدروس على عدة مستويات منها تتبع نقطة الفوة الاعظمية،وحدة تحزين الطاقة،و المحافظة على التوتر الناتج من طرف التوربين.

طورنا في هذه المذكرة آلية تحكم المباشر لعزم الآلة الغير متزامنة بنظام التحاكي في فضاء الماطلب

الكلمة الرئيسية: تور بينات الرياح ، آلة متزامن بمغناطيس الدائم ، آلة غير متزامن ، شبكة العصبية ، التحكم المباشر لعزم الالة.

Abstract

The purpose of this memoir is to provide a direct torque control mechanism for the asynchronous-pump. This system consists of an energy generator using wind turbine, rectifier. The system also contains an energy storage unit and a reflector that feeds the asynchronous machine connected to a centrifugal pump.

In this note we will ensure that the system operates at its most powerful point by intelligently controlling the regulatory devices (regulators based on neural networks).

This smart technology is introduced into the studied system at several levels, including tracking the maximum point of the maximum, the energy storage unit, and maintaining the tension produced by the turbine.

In this note, we developed a mechanism for direct torque control of the asynchronous with simulator system in the space of MATLAB.

Key word: Wind turbine, permanent magnet synchronous machine, asynchronous machine, neuron network, direct torque control.

Listes des figures

Chapitre 01

Figure 1.1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER) 5
Figure 1.2 Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010. 6
Figure 1.3 Capacité éolienne des trois premiers producteurs du monde en MW. 6
Figure 1.4 Eolienne à rotor de Darrieus 9
Figure 1.5 éolienne à rotor de savonius 9
Figure 1.6 machine à axe horizontale 10
Figure 1.7 les principaux éléments d'une éolienne 11
Figure 1.8 Tube de courant autour d'une éolienne 11
Figure 1.10 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents. 16
Figure 1.9 Différents types de rotors d'une MSAP 16
Figure 1.11 suivie de point de puissance maximale 18

Chapitre 02

Figure 2. 1 Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent 19
Figure 2.2 Machine équivalente au sens de Park 22
Figure 2.3 Schéma simple du circuit du bus continu 25
Figure1.4 Représentation Vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone 26
Figure 2.5 Passage du système triphasé au système biphasé 30

Chapitre 03

Figure 3.1 Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destiné au pompage d'eau 35
Figure 3.2 principe d'entrainement du réseau de neurone par rétro-propagation de l'erreur . 37
Figure 3.3 Schéma équivalent de la batterie dans le modèle CIEMAT 39
Figure 3.4 technique DTC appliqué sur le convertisseur côté charge 41
Figure 3.5 Machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension 43
Figure 3.6 Séquences de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux 44
Figure 3.7 Evolution de l'extrémité du vecteur φ_s. 45
Figure3.8 Répartition des zones 47
Figure 3.9 Sélection des tensions correspondant au contrôle de l'amplitude de flux statorique 50
Figure 3.10 Constitution d'une pompe centrifuge 53
Figure 3.11 résultats de simulation de l'ensemble éolienne-DTC-pompe 56

Liste des tableaux

Chapitre 03

Tableau 3.1 Les caractéristiques d'optimisations neuronales 37
Tableau 3.2 La régulation de la tension du bus continu 38
Tableau 3.3 régulation des caractéristique de batterie 40
Tableau 3.4 Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur V_s appliqué dans la zone Z_i. 47
Tableau 3.5 Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis a trois niveaux (avec les vecteurs tension nuls). 48

Sommaire

Chapitre 01

INTRODUCTION 1

1.1. INTRODUCTION 3

1.2. LE VENT 3

1.3. CARACTERISTIQUE DU VENT 4

1.4. DISTRIBUTION DU VENT EN ALGERIE 4

1.5. L'EOLIENNE DANS LE MONDE 5

1.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE 6

1.6.1. Les Avantages 6

1.6.2. Les Inconvénients 7

1.7. PRINCIPE ET THEORIE D'UNE EOLIENNE 7

1.8. DIFFERENTS TYPES DES TURBINES EOLIENNES 8

1.8.1. Machine à axe vertical 8

1.6.1.1. Eoliennes à rotor de Darrieus 9

1.6.1.2. Eoliennes à rotor de Savonius 9

1.8.2. Avantages 9

1.8.3. Inconvénients 10

1.8.4. Machine a axe horizontal 10

1.8.5. Avantages 10

1.8.6. Inconvénients 10

1.9. LES COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE 11

1.10. LA LOI DE BETZ 11

1.11. LE MODELE DES PALES 13

1.12. MODELE DU MULTIPLCATEUR DE VITESSE 13

1.13. MODELE DU VENT 14

1.14. LA GENERATRICE 14

1.14.1 Générateur Synchrone 14

1.14.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents 15

1.14.3 Principe de fonctionnement de la MSAP 16

1.14.4 Avantage de GSAP 17

1.15. METHODES DE RECHERCHEDU PONITMAXIMUMDEPUISSANCE 17
1.16. CONCLUSION 18

Chapitre 02

2.1. INTRODUCTION 19
2.2. MODELESATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANET . 19
2.2.1. Hypothèses simplificatrices 20
2.2.2. Equations de tensions et flux 20
3.3.3. Transformation de Park 22
2.2.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique 24
2.4. MODELISATION DE BUD CONTINUE 25
2.5. MODELISATION TRIPHASE DE LA MAS 26
2.5.1. Présentation de la machine 26
2.6. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE 27
2.6.1. Hypothèses simplificatrices 27
2.7.1. Modèle de PARK de la machine 31
2.7.2. Expression du couple électromagnétique 32
2.10. CONCLUSION 34

Chapitre 03

3.1. INTRODUCTION 35
3.2. CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE 35
3.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 36
3.4. STRATEGIE DE CONTROLE DE LA CHAINE DE CONVERSION 36
3.4.1. Méthodes de recherche du point maximum de puissance 37
3.5. CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE CHARGE (DTC) 41
3.5.1. principe de la commande DTC 42
3.5.2. Fonctionnement d'un onduleur triphasé 43
3.5.3. Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique 45
3.5.3.1. Principe de contrôle de flux statorique 45
3.5.3.2. Principe de contrôle de couple électromagnétique 47
3.5.4. Choix du vecteur de tension 47

3.5.5. Estimateurs 49
3.5.5.1. Estimateur du flux statorique 49
3.5.5.2. Estimation du couple électromagnétique 50
3.6. ÉLABORATION DU VECTEUR DE COMMANDE 51
3.6.1. Correcteur de flux 51
3.6.2. Correcteur de couple 51
3.6.2.1. Le correcteur à deux niveaux 52
3.7. ÉLABORARTION DE LA TABLE DE COMMANDE 52
3.8. Avantages de la commande directe de couple 53
3.9. Inconvénients de la commande directe de couple : 53
3.10. LE POMPAGE 53
3.10.1. Pompes centrifuges 53
3.10.2. Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges 54
3.10.2.1. Avantages 54
3.10.2.1. Inconvénients 54
3.10.3. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge 55
3.10.4. Caractéristiques de la pompe centrifuge 55
3.10.4.1. Caractéristiques débit-vitesse 55
3.10.4.2. Caractéristiques couple-vitesse 55
3.10.4.3. Caractéristiques débit–hauteur 56
3.10.4.4. Caractéristique de rendement 56
3.11. RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA DTC DE LA MAS 57
3.12. CONCLUSION 58
CONCLUSION GENERALE 59

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz,…) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont « propres » et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable. [1]

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité)[2]. Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.**La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie éolienne associée à un système de pompage.**

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent.

Le pompage éolien est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie éolienne. Le système de pompage éolien est généralement composé d'un générateur éolien, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

L'utilisation de l'énergie éolien est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigérationou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes. L'ampleur de l'utilisation de l'énergie éolienne nous amène à étudier un système de pompage d'eau composé d'un générateur hybride couplé directement à un moteur à courant continu à aimants permanents qui entraîneune pompe centrifuge.

La modélisation des différents éléments d'un système éolien est une étape indispensable qui doit précéder toute phase de commande, ou de simulation.

Le document présenté est rédigé en quatre chapitres principaux résumés dans ce qui suit :

Dans ***le premier chapitre***, on va faire une description générale sur la conversion éolienne, Ce chapitre est aussi consacré à la modélisation de la turbine éolienne.

le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de machines synchrones et de la machine asynchrone.

Le troisième chapitre est consacré à la commande de la machine par l'application de la commande directe du couple. où nous abordons la structure du système du contrôle direct du couple en présentant les méthodes d'estimation du couple et du flux, les correcteurs du couple et du flux, puis on donne la table de commutation des interrupteurs de l'onduleur de tension, ce chapitre termine aussi par des résultats de simulation, et nous avons introduire une technique de réseaux de neurones artificiels.

Finalement, On termine par une conclusion sur l'ensemble de cette étude, on propose des perspectives à ce travail et l'annexe contient les paramètres de la machine utilisée.

1.1. INTRODUCTION

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.

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles, pour faire avancer les bateaux en mer, mais ce type d'énergie a été exploité aussi sur terre durant au moins les 3000 dernières années, [1]. En effet, des moulins à vent étaient déjà utilisés pour moudre du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. Après, la technologie des aérogénérateurs ont évidemment évoluée. Ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles, [2].

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne

1.2.LE VENT

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision.

Le vent est causé par le déplacement de la masse 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 parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi, le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage.

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents. Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la « débrayer » (pales en drapeau) pour en limiter l'usure. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps parallèle à la direction du vent.

1.3. CARACTERISTIQUE DU VENT

L'exploitation efficace de l'énergie du vent est une tâche difficile. Comme pour toutes les sources d'énergie, la problématique du rendement d'exploitation est toujours mise en jeu, même si cette question s'avère spécifique dans le cas des énergies renouvelables dont le gisement est « gratuit » et durable contrairement aux sources d'énergie fossile.

Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrémales,…) qui jouent aussi sur la durée de vie. En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction

Le vent est en effet fortement variable, tant géographiquement quetemporellement. En outre, cette variabilité est amplifiée par la relation cubique qui existe entre vent et puissance générée par la turbine éolienne. La représentation dynamique dugisement est ainsi une problématique à part entière.

1.4. DISTRIBUTION DU VENT EN ALGERIE

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et Peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar.

L'Algérie compte s'investir dans le domaine de la production électrique par conversion

éolienne pour atteindre 3% de la production nationale à l'horizon 2027. Dans ce cadre, le groupe Sonelgaz a confié la réalisation d'une première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet.

Le potentiel éolien en Algérie est très diversifié. La carte de la figure 1.3 publiée par le Centre de développement des énergies renouvelables montre que le sud du pays et particulièrement le sud-ouest sont caractérisés par des vitesses qui varie entre 4 m/s et 6 m/s, tandis que les sites côtiers d'Oran, de Bejaïa et d'Annaba, les hauts plateaux des régions de Tiaret et El Kheiter et la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes est bien choisie.

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour l'installation des parcs éoliens pour alimenter certaines régions isolées et leur permettre, grâce à l'énergie éolienne d'avoir une autonomie énergétique.

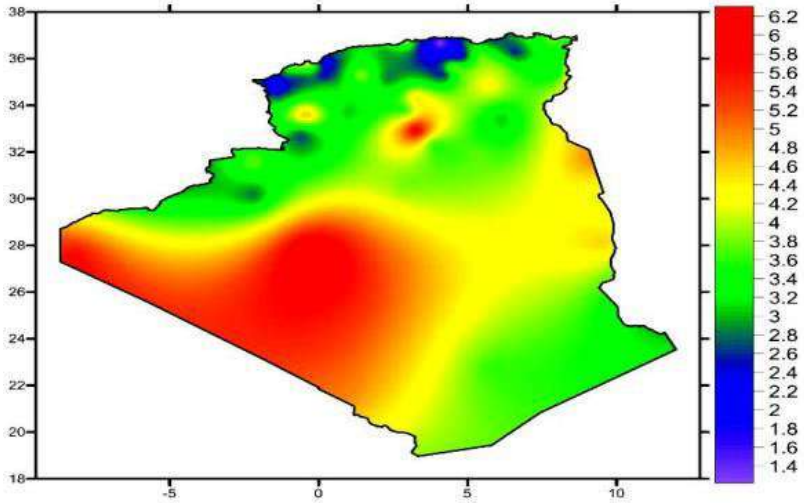


Figure 1.1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)

1.5. L'EOLIENNE DANS LE MONDE

Fin 2010, 193 GW (milliards de watts) d'éoliens sont installés dans le monde. En 2010, la Chine a investi 63 milliards de dollars dans l'éolien, les USA 18 milliards de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de 34% en 2010. Quant à la puissance, elle a augmenté de 22% en 2010 (soit 35,8 GW)[3].



Figure 1.2 Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010.

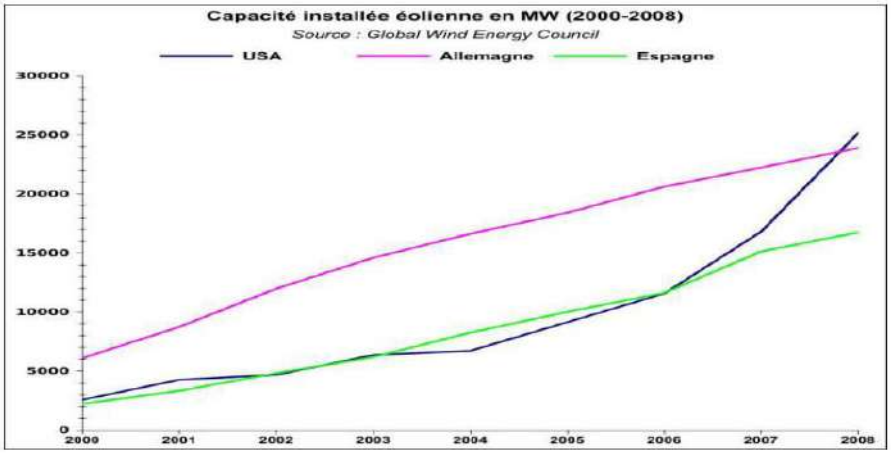


Figure 1.3 Capacité éolienne des trois premiers producteurs du monde en MW.

1.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

1.6.1. Les Avantages

- C'est une énergie renouvelable, le vent est gratuit, à 100 % renouvelable.
- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas, ni de gaz à effet de serre, ni de production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».
- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.
- Les principes techniques sont simples, même si leur mise en application technologique est relativement complexe et perfectionnée.
- Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents.

- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

1.6.2. Les Inconvénients

- L'énergie change suivant la météo ; la nature du vent stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaitre après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.
- Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage.

1.7. PRINCIPE ET THEORIE D'UNE EOLIENNE

Un aérogénérateur, couramment appelé (éolienne), est un système qui capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie électrique. D'une manière générale, une chaine de conversion éolienne est constituée d'une turbine éolienne, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique généralement triphasé et d'un circuit d'électronique de puissance.

La puissance aérodynamique captée par une turbine s'éxprime par :

$$P_{aero} = {}^{1}/_{2}\,\rho S C_p V_v^3 \qquad (1.1)$$

Où

$C_p$est le coefficient de puissance aérodynamique,

ρ la masse volumique de l'air,

S la surface active de l'éolienne et $V_v$la vitesse du vent.

Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de betz

$$C_{p\ limite} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \qquad (1.2)$$

Une turbine est typiquement caractérise par sa courbe $C_p = f(\lambda)$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\,\Omega}{V} \qquad (1.3)$$

Où

Ω est la vitesse angulaire de rotation,

λ est le rapport de la vitesse (linéaire) périphérique en bout de pale sur la composante normale de la vitesse du vent.

1.8. DIFFERENTS TYPES DES TURBINES EOLIENNES

Les éoliennes se devisent en générale en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice :

- Eolienne à axe verticale
- Eolienne à axe horizontale

1.8.1. Machine à axe vertical

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement facilement ainsi pour faciliter les opérations de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car empêché par le relief, ce qui induit un faible rendement de ce type d'éolienne. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par ailleurs, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais SiguardSavonius en 1924).

1.6.1.1. Eoliennes à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



Figure 1.4 Eolienne à rotor de Darrieus

1.6.1.2. Eoliennes à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

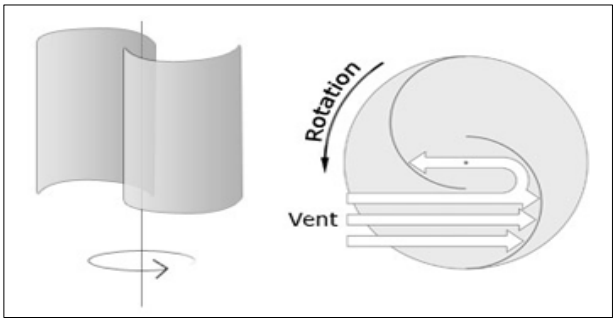


Figure 1.5 éolienne à rotor de savonius

1.8.2. Avantages

- Faible encombrement
- Intégrable au batiment, esthétique,
- Démarre à faible de vitesse du vent contrairement à l'éoliennr de type Darrieus
- Système peu bruyant,

- Pas de contraintes sur la direction du vent.

1.8.3. Inconvénients

- Faible rendement,
- Masse non négligeable

1.8.4. Machine a axe horizontal

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet decapter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (cut-in) et un coefficient de puissance (rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement) relativement élevé. Toutefois, la boite de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Par ailleurs l'orientation automatique de l'hélice face au vent nécessite un organe supplémentaire.[5]



Figure 1.6 machine à axe horizontale

1.8.5. Avantages

- Cout limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grand efficacité.

1.8.6. Inconvénients

- Bruit conséquents,
- Vibration non négligeable,
- Grand sensibilité au flux éolien et sa variation.

1.9. LES COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la (figure 1.7) :

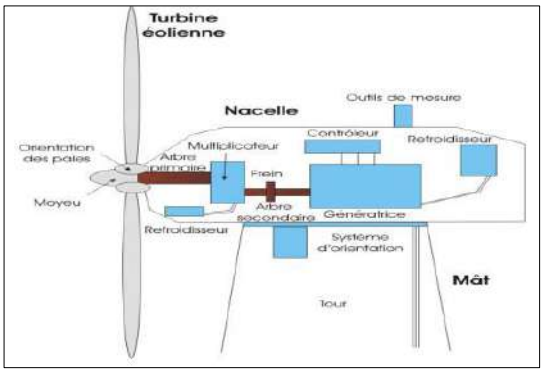


Figure 1.7 les principaux éléments d'une éolienne

1.10. LA LOI DE BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois[7]

Lorsque l'hélice est aéromotrice, le flux est ralenti au passage du disque rotor

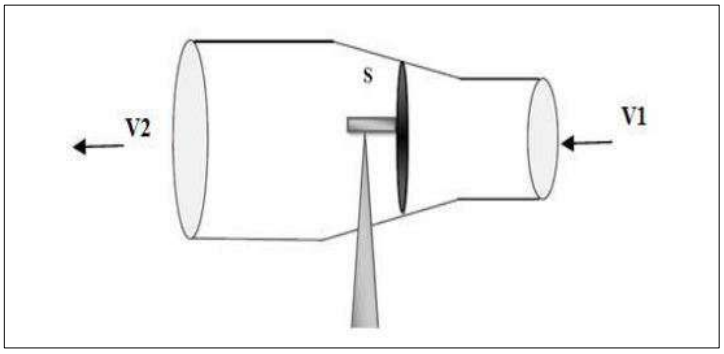


Figure 1.8 Tube de courant autour d'une éolienne

$$V_0 > V_1 > V_2 \qquad (1.4)$$

V_0 La vitesse axiale initiale du vent

S_0La surface à l'entrée du tube de courant

V_1 La vitesse du vent dans le plan de rotor

S_1 Surface du rotor

V_2 La vitesse du vent à l'aval

D'après la théorie de Betz, la puissance récupérable sur l'éolienne est due à lavariation de l'énergie cinétique du vent :

$$P = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (1.5)$$

Avec ρ (kg.m-3) masse volumique de l'air

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde par une moyenne de vitesse.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2^2) \quad (1.6)$$

$P = \Delta E_C$ donne :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (1.7)$$

et l'expression de P correspondante

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval$\frac{dP}{dV_2}$ fournit une seule racine ayant un sens physique $V_2 = \frac{V_0}{3}$ correspondant au maximum de puissance. En définissant le coefficient de puissance $C_p = \frac{\rho S V^3}{2}$, on aboutit à la limite de Betz, première personne ayant développé la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal

Qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne.

Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature[8].

1.11. LE MODELE DES PALES

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entrainant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse[12][6].

La puissance cinétique du vent est donnée par

$$P_V = (\rho . S . V^3)/2 \quad (1.8)$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique $C_{aéro}$ est donné par l'expression suivante :

$$C_{aéro} = 1/(2\Omega_t) C_p(\lambda, \beta) \rho S V^3 \quad (1.9)$$

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

$$P_{aéro} = C_p(\lambda, \beta) P_V = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S V^3}{2} \quad (1.10)$$

Ω_t : est la vitesse de la turbine

ρ : est la densité de l'aire, **ρ**=1.22 Kg/m3

S : est l'aire balayée par la turbine, $S = \pi R^2$

V : est la vitesse du vent (m/s).

C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β).

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

1.12. MODELE DU MULTIPLCATEUR DE VITESSE

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω, assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω. il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega \quad (1.11)$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aéro} \quad (1.12)$$

Où ;

G le gain de multiplicateur

1.13. MODELE DU VENT

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes:

$$v(t) = v_0 + vT(t) \qquad (1.13)$$

- Une composante turbulente du vent vT(t) est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Une composante lente V_{moy}; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné. Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme:

$$\mathrm{V}(t) = 7.5 + 0.7[3\sin 0.09 + 0.7\sin 0.42t + 18\sin 0.01t + \sin 0.038t] \qquad (1.14)$$

1.14. LA GENERATRICE

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est un alternateur. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [9][10].

1.14.1 Générateur Synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur GAS est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du SG peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boite de vitesses (gearless). Le SG est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à

vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (MSAP) est plus simple est moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

1.14.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents

Aujourd'hui, les machines synchrones représentent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé pour la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable, le plus puissant connu à ce jour, à une puissance d'environ 100 MW, il est conçu pour une soufflerie de la NASA.

Une machine synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position de ce champ est alors fixe par rapport au rotor, ce qui entraîne le synchronisme entre le champ magnétique tournant statorique et le rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. [11][13].

$$\omega_r = \frac{\omega}{P} \qquad (1.15)$$

Le stator, partie fixe de la machine, où sont logés est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques. décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$. Ces enroulements sont reliés à une source d'alimentation électrique triphasé.

Le rotor, partie mobile de la machine, est composé d'aimants permanents. Les aimants permanents apportent beaucoup de simplicité comme l'élimination des balais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable. Le rotor possède différentes configurations. La figure (1.9) montre trois cas typiques pour un rotor à tetrapolaire :

- Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux (Figure 1.10.a). les aimants permanent sont magnétisés dans le sens radiale.

- Les aimants permanents sont disposés radialement (aimants noyés dans le rotor) les aimants sont magnétisés tangentiellement (figure 1.9.b).
- Les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor L'aimantation des aimants est radiale(figure 1.9.c).

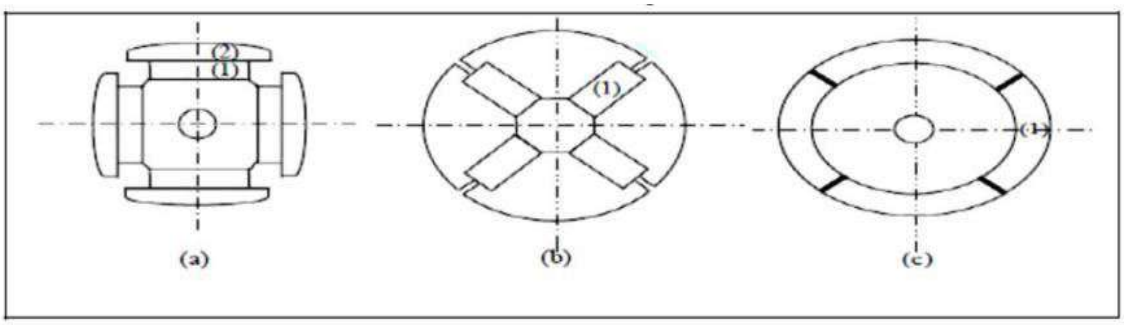


Figure 1.9 Différents types de rotors d'une MSAP

(a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2),
(b) aimants permanents (1) noyés
(c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.

1.14.3 Principe de fonctionnement de la MSAP

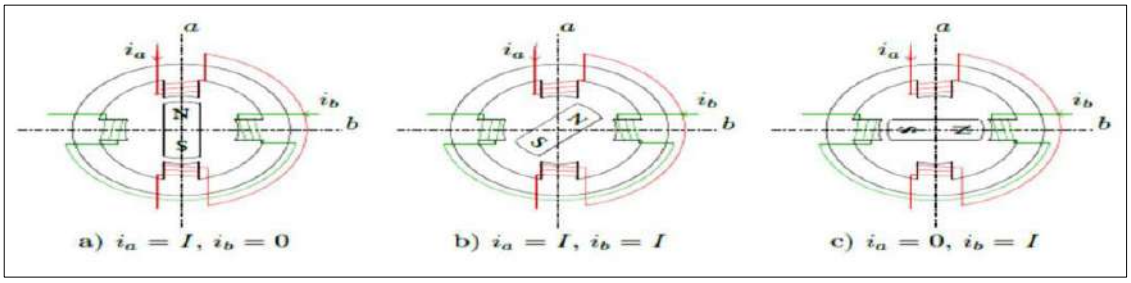


Figure 1.10 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. La Figure 1.10 représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator tetrapôlaire. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θp comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante.

Nous obtenons pour cette structure θp = 90. Ceci correspond au passage de la (figure 1.10.a) à la figure 1.10.c. Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (figure 1.10.b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

1.14.4 Avantage de GSAP

La génératrice synchrone à aimants permanents qui offre un grand nombre d'avantages :

- Une haute efficacité énergétique,
- Une grande fiabilité,
- Une simplicité de mise en œuvre.

1.15. METHODES DE RECHERCHEDU PONITMAXIMUMDEPUISSANCE

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. les points optimaux recherchés (puissance et vitesse de rotation de la turbine), définit une courbe dite de puissance optimale définit par l'équation [14]:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt} \rho s V_V^3 \qquad (1.16)$$

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT). La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

1. La première approche, la moins classique, considère que la caractéristique Cp=f(λ) n'est pas connue.
2. La deuxième approche considère que la caractéristique Cp=f(λ) est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimale.

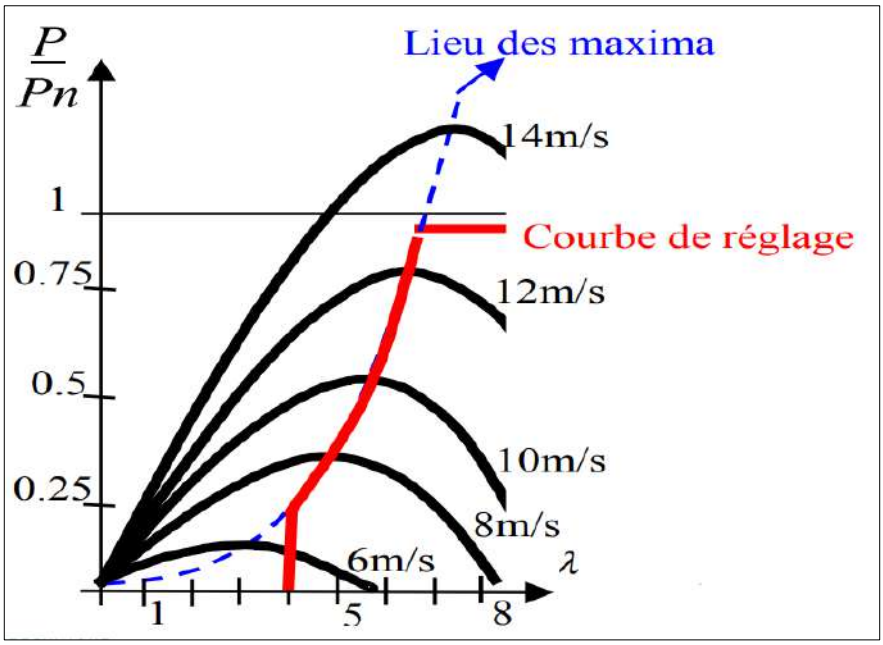


Figure 1.11 suivie de point de puissance maximale

1.16. CONCLUSION

Dans ce chapitre, une brève description de chaines de conversion de l'énergie éolienne est donnée. Quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne ont été introduites. Un aperçu succint des deux grandes familles d'éoliennes, leurs avantages et inconvénients, a été donné.

Dans la seconde partie, les différents constituants d'une éolienne sont présentés. Après l'étude avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant une machine synchrone à aimant permanant MSAP a été retenue. Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la présentation et la modélisation mathématique des deux machines électriques utilisées.

2.1. INTRODUCTION

Une machine électrique tournante est un système électromécanique réversible, qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement moteur) et vice versa (fonctionnement générateur).

Les machines électriques tournantes sont des systèmes physiques régis par des phénomènes électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques, acoustiques, etc. Dans le contexte de la commande en couple ou en vitesse de ces machines, seuls les phénomènes électromagnétiques et électromécaniques sont pertinents pour la mise en œuvre d'un modèle simplifié et représentatif. Ces phénomènes peuvent être décrits par des lois de la physique telles que les équations de Maxwell (pour la partie électromagnétique) et la force de Laplace et la deuxième loi de Newton (pour la partie électromécanique).

Ce chapitre est dédié à la présentation des machines électriques, leurs structures, principes de fonctionnement, leur mise en équations et leurs modèles en vue de la commande. Nous mettons l'accent sur les machines à courant alternatif[15].

2.2. MODELESATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANET

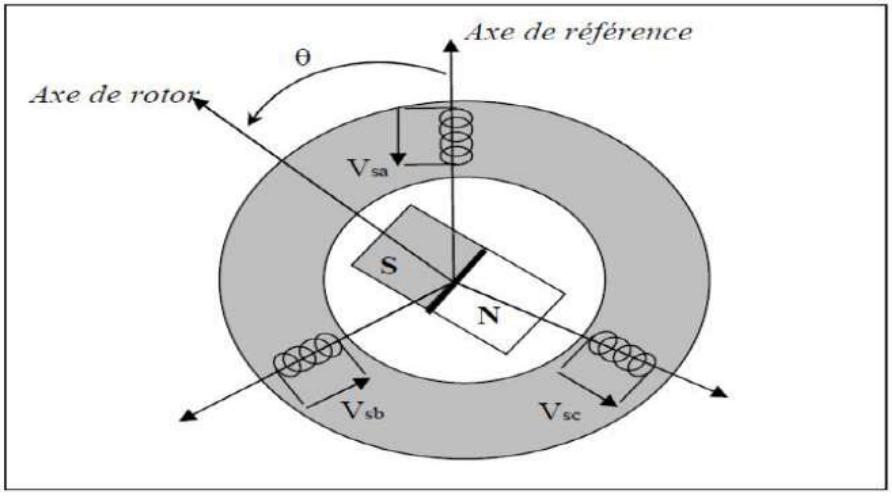


Figure 2. 1 Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent

2.2.1. Hypothèses simplificatrices

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique,
- La distribution sinusoïdale de FMM crée par les enroulements du stator,
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau,
- L'effet d'encochage est négligeable,
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

2.2.2. Equations de tensions et flux

Les tensions, flux et courants statoriques triphasé, sont écrit avec les notations vectorielles suivantes$[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[I_s]$ respectivement[16].

L'équation tension dans le référentiel du stator s'écrit :

$$V_s = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \qquad (2.1)$$

$$V_s = [V_{as}V_{bs}V_{cs}]^T, [I_s] = [I_{as}I_{bs}I_{cs}]^T, [\varphi_s] = [\varphi_{as}\varphi_{bs}\varphi_{cs}]^T$$

Avec

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

R_s Résistance des enroulements statoriques.

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [\varphi_f] \qquad (2.2)$$

Et

$$[\varphi_f] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

où

φ_{sf} Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques,

θ Position absolue du rotor en degré électrique,

$[L_{ss}]$ Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statoriques $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}(\theta)]$qui est en fonction de l'angle $\theta = p\theta_m$, θétant l'angle électrique et $\theta_m$est la position mécanique du rotor par rapport au stator[15].

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \tag{2.3}$$

Le terme $[L_{s0}]$ à pour **e**xpression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Le terme $[L_{s2}(\theta)]$ s'écrit, dans le cadre de la théorie du premier harmonique :

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos2\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Les inductances propres et mutuelle L_{s0} , M_{s0}, L_{s2} et sont des constants

En introduisant (2.2) dans (2.1) On aura

$$[V_S] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_s] + [\varphi_f]) \tag{2.6}$$

On remarque que l'équation (2.6) est non linéaire et couplée, pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste

à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tourne avec le rotor.

3.3.3. Transformation de Park

A l'aide de la transformation de Park, on passe des grandeurs statoriques réelles tension, flux courant) à leurs composantes fictives appelés les composantes d-q.

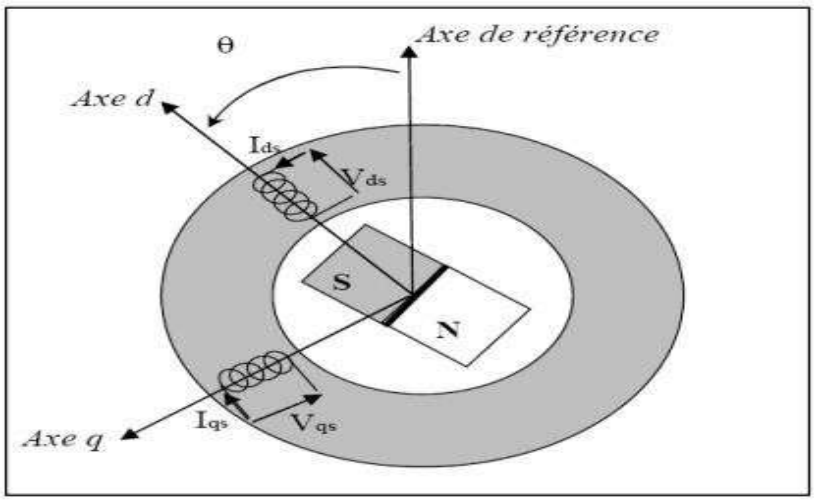


Figure 2.2 Machine équivalente au sens de Park

Dans le système d'équations (2.6) effectuons le changement de la variable suivant :

$$\begin{cases} [P(\theta)][V_{dqhs}] = [V_s] \\ [P(\theta)][I_{dqhs}] = [I_s] \end{cases} \tag{2.7}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{PM}{JL_r}\varphi_r I_{sq} - \frac{F_v\Omega}{J} - \frac{C_r}{J}$$

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r}\varphi_r$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{sq} - \omega_s I_{sd} - \frac{Mp\Omega}{\sigma L_s L_r}\varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq}$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r}\varphi_r + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd}$$

Avec

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

[P(θ)] étant la matrice de la transformation de park qui permet le passage des grandeurs statoriques $[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[I_s]$ à leurs compasants relatives $\left[V_{dqhs}\right]$ et $\left[I_{dqhs}\right]$.

L'application de la transformation de park à l'équation (2.8) donne :

$$[P(\theta)]\left[V_{dqhs}\right] = [R_s][P(\theta)]\left[I_{dqhs}\right] + \frac{d}{dt}\left([L_{ss}][P(\theta)]\left[I_{dqhs}\right]\right) + \frac{d[\varphi_f]}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} \quad (2.9)$$

$\frac{d}{dt}$=S

Si on prémultiple tous ces termes $[P(\theta)]^{-1}$ et en sachant que :

$$[R_s] = [R_s]\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On peut ecrire les équations simplifiés des tensions :

$$\left[V_{dqhs}\right] = [R_s]\left[I_{dqhs}\right] + [P(\theta)]^{-1}\left\{\frac{d}{dt}\left([L_{ss}][P(\theta)]\left[I_{dqhs}\right]\right) + \frac{d[\varphi_f]}{dt}\frac{d\theta}{dt}\right\} \quad (2.10)$$

Les equations électriques dans le repere de park :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds} - \omega\varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs} - \omega\varphi_{ds} \end{cases} \quad (2.11)$$

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \quad (2.12)$$

En introduisant (2.12) dans (2.13) on aura le modèle électrique du MSAP suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds}\dfrac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_{qs} I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs}\dfrac{d}{dt} I_{qs} + \omega L_{ds} I_{ds} + \omega \varphi_{ds} \end{cases} \quad (2.13)$$

2.2.3. Expression de la puissance et du couple électromagnétique

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit[17] :

$$p(t) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (2.14)$$

En remplacent V_{ds} et V_{qs} par leur expressions il vient :

$$p(t) = \frac{2}{3}\left[R_s\left(I_{ds}^2 + I_{qs}^2\right) - \left(I_{ds}\frac{d}{dt}\varphi_{ds} + I_{qs}\frac{d}{dt}\varphi_{qs}\right) + \frac{d}{dt}\left(\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}\right)\right] \quad (2.15)$$

D'où

Le 1^{er} terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule),

Le $2^{ème}$ terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée,

Le $3^{ème}$ terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer.

Sachant que :

$$P_e = C_e \Omega \quad (2.16)$$

D'où

$$C_e = \frac{3}{2} p\left[\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}\right] \quad (2.17)$$

En remplacent φ_{ds} et φ_{qs} par leur expressions il vient :

$$C_e = \frac{3}{2} p\left[\left(L_{ds} - L_{qs}\right) I_{ds} I_{qs} + \varphi_f I_{qs}\right] \quad (2.18)$$

Avec

p le nombre de paire de pôles

L'équation de mouvement de la machine est :

$$C_e - C_r - f\Omega = J\frac{d\Omega}{dt}$$

(2.19)

Avec

J le couple d'inertie des masses tournantes,

C_r Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique,

C_e Couple électromagnétique,

Ω Vitesse mécanique de rotation,

f coefficient des frottements visqueux,

φ_f flux des aimants permanents.

2.4. MODELISATION DE BUD CONTINUE

Le bus continu est composé d'une capacité, étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettant le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge[15][18][19].

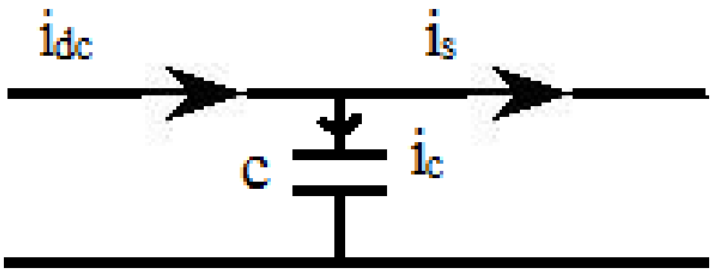


Figure 2.3 Schéma simple du circuit du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} . i_c dt$$

i_c : Courant circulant dans la capacité,

V_{dc} : Tension du bus continu,

C_{dc} : Capacité du bus continu.

2.5. MODELISATION TRIPHASE DE LA MAS

La modélisation consiste à établir un modèle mathématique de la machine. Dans notre cas la modélisation va être traité par une approche analytique qui utilise les équations intégro-différentielles en s'appuyant sur le modèle de connaissance qui prend en compte toutes les dynamiques aussi bien électromagnétiques que mécaniques[13].

2.6.2. Présentation de la machine

On peut considérer la machine asynchrone triphasée comme représentée par les bobinages de la figure

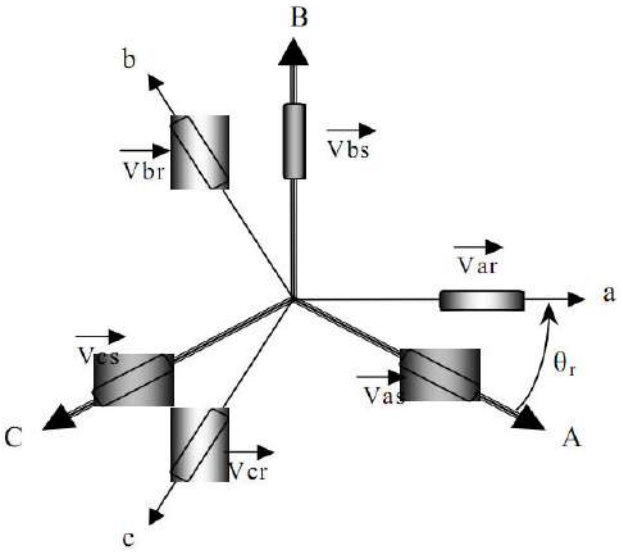


Figure1.4 Représentation Vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone

La machine asynchrone comporte trois bobinages au stator alimentés par un système de courants triphasés et trois bobinages au rotor court-circuités sur eux-mêmes traversés par un système de courants triphasé. Les axes de chaque système de bobinage sont décalés de 120 degrés. Θr est l'angle électrique (ou mécanique) entre l'axe de la phase (A) statorique et la phase(a) rotorique.

2.6. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Le champ tournant statorique induit un système de f.é.m au rotor où les enroulements sont en court-circuit. Les courants induits au rotor créent une force magnétomotriceε_r qui interagit avec la force magnétomotrice ε_s provenant des courants du stator. C'est ainsi que le couple électromagnétique existe à condition que :

- Le glissement g soit non nul, pour que les grandeurs induites au rotor soient non nulles.
- Les conducteurs du rotor soient fermés.

2.6.2. Hypothèses simplificatrices

Cette modélisation s'appuie sur ces hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer a une épaisseur uniforme,
- L'effet d'encochage est négligé,
- Le phénomène de l'hystérésis et les courants de Foucault ne sont pas pris en compte,
- La saturation du circuit magnétique est absente,
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé.

On en déduit des trois premières hypothèses que :

- La force magnétomotrice crée dans l'entrefer par chacune des trois phases est à Répartition Sinusoïdale,
- Les inductances propres et mutuelles de la même phase sont constantes et égales,
- Le flux est additif.

2.6.2. Equations des flux

Les équations des flux sous forme matricielle s'écrivent[13].

$$\begin{cases}[\varphi_s] = [\text{Lss}][\text{Is}] + [\text{Msr}][\text{Ir}] \\ [\varphi_r] = [\text{Lrr}][\text{Ir}] + [\text{Msr}][\text{Is}]\end{cases} \quad (2.20)$$

$$[L_{ss(rr)}]=\begin{bmatrix} l_{s(r)} & m_{s(r)} & m_{s(r)} \\ m_{s(r)} & l_{s(r)} & m_{s(r)} \\ m_{s(r)} & m_{s(r)} & l_{s(r)} \end{bmatrix} [M_{sr}]=m_{sr}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta+\frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

l (H):Inductance propre d'une phase statorique (rotorique),

$[L_{ss}]$ ($[L_{rr}]$) :Matrice d'inductances statoriques (rotoriques),

$m_s(m_r)$: Inductance mutuelle en deux phases du stator (du rotor),

m_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique,

M_{sr} : Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

2.6.3. Equations des tensions

Par application de la loi de Faraday a chaque enroulement, on peut écrire :

$$\begin{cases}[\text{Vs}] = [\text{Rs}][\text{Is}] + \frac{d}{dt}[\phi\text{s}] \\ [\text{Vr}] = [\text{Rr}][\text{Ir}] + \frac{d}{dt}[\phi\text{r}]\end{cases} \quad (2.22)$$

$[V_s] = [V_{sa}V_{sb}V_{sc}]$: Vecteur tensions statoriques,

$[V_r] = [V_{ra}V_{rb}V_{rc}]$: Vecteur tensions rotoriques,

$[I_s] = [I_{sa}I_{sb}I_{sc}]$: Vecteur courants statoriques,

$[I_r] = [I_{ra}I_{rb}I_{rc}]$: Vecteur courants rotoriques,

$[\phi_s]=[\varphi_{sa}\varphi_{sb}\varphi_{bc}]$: Vecteur flux statoriques,

$[\phi_r] = [\varphi_{ra}\varphi_{rb}\varphi_{rc}]$: Vecteur flux rotoriques.

$$[R_s]=\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \qquad [R_r]=\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où:

R_s: Résistance d'une phase du stator.

R_r: Résistance d'une phase du rotor.

2.6.4. Equation mécanique

L'équation mécanique est donnée par:

$$J\frac{d\Omega}{dt} = Ce - Cr - f_r\Omega \qquad (2.23)$$

Avec:

$$\Omega = P\frac{d\theta}{dt} = P.\omega \qquad (2.24)$$

Où:

Ce : Couple moteur de la machine (électromagnétique),

Cr : Le couple résistant,

f_r: Le coefficient de frottement,

Ω: Vitesse mécanique de rotation du rotor,

p : Nombre de paires de pôles de la machine,

ω: Vitesse électrique du rotor par rapport au stator.

2.7.Transformation de PARK

L'équation (2.20) ainsi obtenue, est à coefficients variables entraînant la complexité de résolution du modèle défini par (2.22) en vue de la commande.

On peut réaliser un changement de base sur les grandeurs physiques (tension, flux et courant) qui conduit à une relation matricielle indépendante de l'angle θ.

Le changement de base est appelé transformation de PARK. Cette transformation repose sur l'utilisation de deux axes (u, v) (système biphasé) au lieu de trois axes statoriques et rotoriques (système triphasé). Figure (2.5).

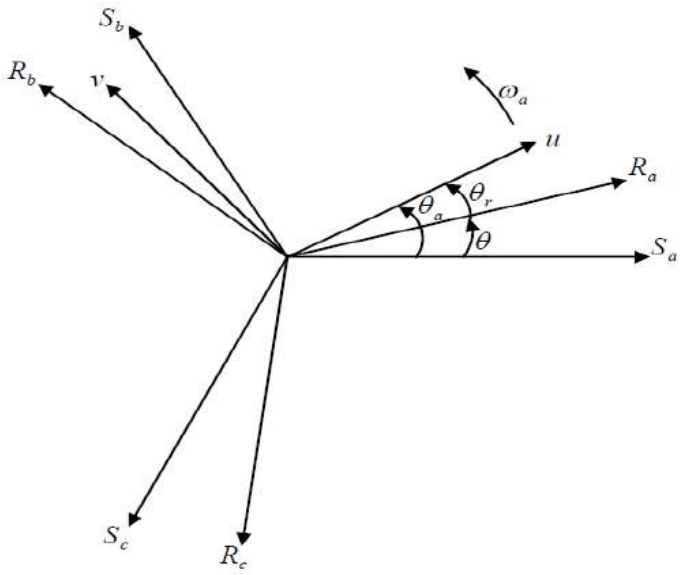


Figure 2.5 Passage du système triphasé au système biphasé

$$[P]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

La matrice inverse $[P]^{-1}$est donnée par :

$$[P]^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos(\theta) & -sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & -sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Le passage du système triphasé au système diphasé est définit par le système d'équations suivantes :

$$[X_{dq0}] = [p(\theta)][X_{abc}]$$

$$[X_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[X_{dq}]$$

2.7.1. Modèle de PARK de la machine

$$\begin{cases} [P]^{-1}\left[V_{sdq}\right] = [R_S][P]^{-1}\left[I_{sdq}\right] + \dfrac{d}{dt}\left([P]^{-1}\left[\varphi_{sdq}\right]\right) \\ [P]^{-1}\left[V_{rdq}\right] = [R_r][P]^{-1}\left[I_{rdq}\right] + \dfrac{d}{dt}\left([P]^{-1}\left[\varphi_{rdq}\right]\right) \end{cases} \quad (2.27)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} [P]^{-1}\left[V_{sdq}\right] = [R_S][P]^{-1}\left[I_{sdq}\right] + \dfrac{d}{dt}([P]^{-1}) + [P]^{-1}\dfrac{d}{dt}\left(\left[\varphi_{sdq}\right]\left[\varphi_{sdq}\right]\right) \\ [P]^{-1}\left[V_{rdq}\right] = [R_r][P]^{-1}\left[I_{rdq}\right] + \dfrac{d}{dt}([P]^{-1})\left[\varphi_{rdq}\right] + [P]^{-1}\dfrac{d}{dt}\left([\varphi_{rdq}]\right) \end{cases} \quad (2.28)$$

En utilisant (2.28) et en multipliant les deux membres par $[P]$, on obtient:

$$\begin{cases} \left[V_{sdq}\right] = [R_S]\left[I_{sdq}\right] + \omega_a \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\varphi_{sdq}\right] + \frac{d}{dt}\left(\left[\varphi_{sdq}\right]\right) \\ \left[V_{rdq}\right] = [R_r]\left[I_{rdq}\right] + \omega_a \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\varphi_{rdq}\right] + \frac{d}{dt}\left(\left[\varphi_{rdq}\right]\right) \end{cases} \quad (2.29)$$

Pour un système d'axes (d, q) de référentiel lié au champs tournant ,on a :

Au stator : $\omega_a = \omega_s$; Au rotor : $\omega_a = \omega_s - \omega$;

Avec : $\omega = p\Omega$

Donc (2.29) devient :

$$\begin{cases} \left[V_{sdq}\right] = [R_S]\left[I_{sdq}\right] + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\varphi_{sdq}\right] + \dfrac{d}{dt}\left(\left[\varphi_{sdq}\right]\right) \\ \left[V_{rdq}\right] = [R_r]\left[I_{rdq}\right] + (\omega_s - \omega) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\varphi_{rdq}\right] + \dfrac{d}{dt}\left([\varphi_{rdq}]\right) \end{cases} \quad (2.30)$$

Puisque le neutre n'est pas relié, la composante homopolaire est nulle, d'où les équations suivantes :

Pour la tension :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S I_{sd} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_S I_{sq} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r I_{rd} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{rd} - (\omega_s - \omega)\varphi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r I_{rq} + \dfrac{d}{dt}\varphi_{rq} + (\omega_s - \omega)\varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.31)$$

Pour les flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (2.32)$$

2.7.2. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par l'équation[13]:

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (2.33)$$

$$C_{em} = \frac{PM}{L_r}(\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd})$$

En utilisant les équations (2.4), (2.12), (2.13) et (2.14), et on choisit les composants de vecteur d'état $X = [\Omega\ \varphi_{rq}\ \varphi_{rd}\ I_{sq} I_{sd}]$, on obtient le modèle de la machine asynchrone dans le système d'axe (d q) et qui inclut les dynamiques électrique et mécanique de la machine:

$$\begin{cases} \dfrac{d\Omega}{dt} = \dfrac{PM}{JL_r}(\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) - \dfrac{C_r}{J} - \dfrac{F_v \Omega}{J} \\ \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} = \dfrac{M}{T_r} I_{sq} - \left(\dfrac{1}{T_r}\right)\varphi_{rq} - \omega_d \varphi_{rd} \\ \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} = \dfrac{M}{T_r} I_{sd} - \left(\dfrac{1}{T_r}\right)\varphi_{dq} + \omega_d \varphi_{rq} \\ \dfrac{di_{sq}}{dt} = -\left(\dfrac{R_s}{\sigma L_s} + \dfrac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{sq} - \dfrac{Mp\Omega}{\sigma L_s L_r}\varphi_{rd} + \dfrac{M}{\sigma L_s L_{rT_r}}\varphi_{rq} - \omega_s I_{sd} + \dfrac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \dfrac{di_{sd}}{dt} = -\left(\dfrac{R_s}{\sigma L_s} + \dfrac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{sd} + \dfrac{M}{\sigma L_s L_r T_r}\varphi_{rd} - \dfrac{Mp\Omega}{\sigma L_s L_r}\varphi_{rq} + \omega_s I_{s\,q} + \dfrac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \end{cases} \quad (2.34)$$

Avec: $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_S L_r}$; $T_{r} = \frac{L_r}{R_r}$; $\omega_{d} = \frac{M}{T_r \varphi_{rd}} I_{sq}$; $\omega_s = \omega_{d+} p$

2.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents et la machine asynchrone.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude du système globale contenant une turbine éolienne, une génératrice synchrone avec un système d'optimisation de la puissance extraite en utilisant un des principes de l'intelligence artificiel représenté dans les réseaux de neurones ,le système contient entre autre un redresseur, un hacheur, un bus continue a fin de maintenir la tension à une valeur désirée via un réglage intelligent, un onduleur de tension sera utilisé pour assurer la commande DTC à une machine asynchrone en assurant un système de stockage.

3.1. INTRODUCTION

Après l'étude du principe de fonctionnement d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne et la modélisation de ses différentes parties constitutives, ce chapitre est consacré à l'étude comportementale de cette chaine. Une simulation comportementale de cette chaine, en tenant compte de l'influence de la variation du profil de vent sur l'amplitude de la tension fournie, est effectuée sous environnement Matlab. Ainsi différentes techniques de contrôle, pour obtenir un meilleur rendement et une efficacité énergétique, de la chaine de conversion, en agissant sur l'interface de l'électronique de puissance, sont abordées[13].

3.2. CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

Dans un premier temps, nous illustrons dans la figure 3.1 les différents constituants de notre système de pompage éolien. Ce dernier se compose d'une éolienne a axe horizontale, d'un générateur synchrone a aimant permanent, qui permet d'avoir un bon rendement et un bon couple, ainsi qu'un système de commande (via un redresseur et un onduleur), qui est connecté à un groupe motopompe qui se compose d'une machine asynchrone vu sa robustesse, son entretien minimale, et sont faible cout. Et finalement on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un cout réduit, et couvre une large gamme d'utilisation.

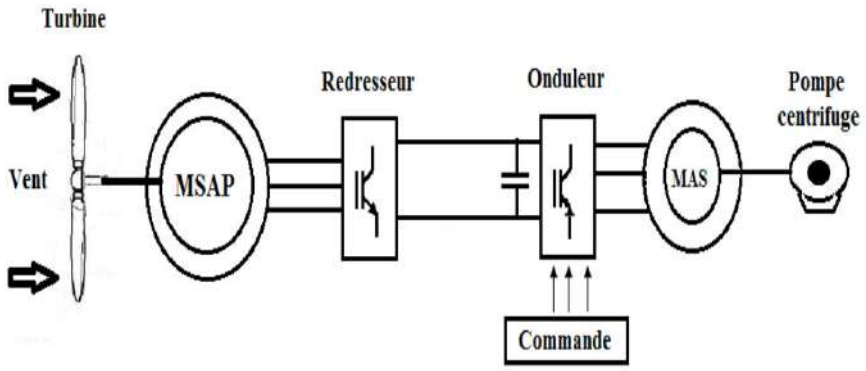


Figure 3.1 Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destiné au pompage d'eau

3.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le système étudié, représenté par la Figure 3.1, comprend :

- Une turbine couplée à un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP),
- Convertisseur statique côté du générateur agissant comme un redresseur (CCG),
- Convertisseur statique côté charge jouant le rôle d'un onduleur (CCM),

- Une charge représentée par un moteur.

La turbine est couplée à l'arbre du générateur à travers une boîte de vitesses. Son rapport d'engrenage G est choisi de manière à régler la vitesse de l'arbre du générateur dans la plage désirée. L'utilisation des convertisseurs statiques, composés de diodes, permet de fournir le courant nécessaire demandé par la charge.

3.4. STRATEGIE DE CONTROLE DE LA CHAINE DE CONVERSION

Le contrôle des systèmes de pompage a pour but d'améliorer leurs performances et d'augmenter la quantité d'eau pompée. Donc le contrôle de la vitesse de rotation de la machine est nécessaire à chaque instant. C'est pour cela que nous allons tester les performances de plusieurs régulateurs et nous opterons pour celui qui présentera les meilleures performances, et qui sera appliqué dans le système global[21].

Contrairement aux éoliennes fonctionnant à vitesse fixe, les éoliennes à vitesse variable présentent l'avantage d'offrir la possibilité d'imposer leur vitesse. Cela nécessite l'adaptation de l'architecture de la stratégie de commande à la cascade, à savoir :

- Maximisation de la puissance électrique,
- Le contrôle de la tension du bus continu,
- Le contrôle de batterie,
- Contrôle du convertisseur côté charge par l'application de la commande direct du couple DTC.

3.4.1. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

Un MPPT (l'anglais Maximum Power Point Tracking), est une commande associé à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance.

Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens. Un générateur éolien est un générateur, dont la caractéristique courant-tension est fortement non linéaire. En conséquence, pour une même vitesse de vent, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (pompe) et la génératrice éolienne de manière à fournir en permanence le maximum de puissance a la charge.

Plusieurs applications nécessitent l'utilisation des méthodes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Pour l'optimisation de système éolien nous allons utiliser une technique basée sur les Réseaux de Neurones.

Le choix d'architecture du réseau sera déterminé au cours de l'apprentissage, où nous commençons avec un certain nombre de neurones dans la couche cachée, si après plusieurs essais le réseau n'arrive pas à converger, nous augmentons le nombre de neurones dans la couche cachée ou encore le nombre de couches cachées (on fixe au préalable, l'erreur quadratique à une valeur maximale, en prenant à titre d'exemple $1e^{-8}$ et au fur et à mesure que cette valeur est atteinte, nous minimisons cette erreur jusqu'elle devienne négligeable). Plusieurs essais doivent être faits afin d'aboutir une architecture optimale, qui nous donnons de meilleurs résultats.

Les exemples présentés au réseau seront les résultats de simulation qui ont été faits sur le système à identifier pendant une durée de temps.

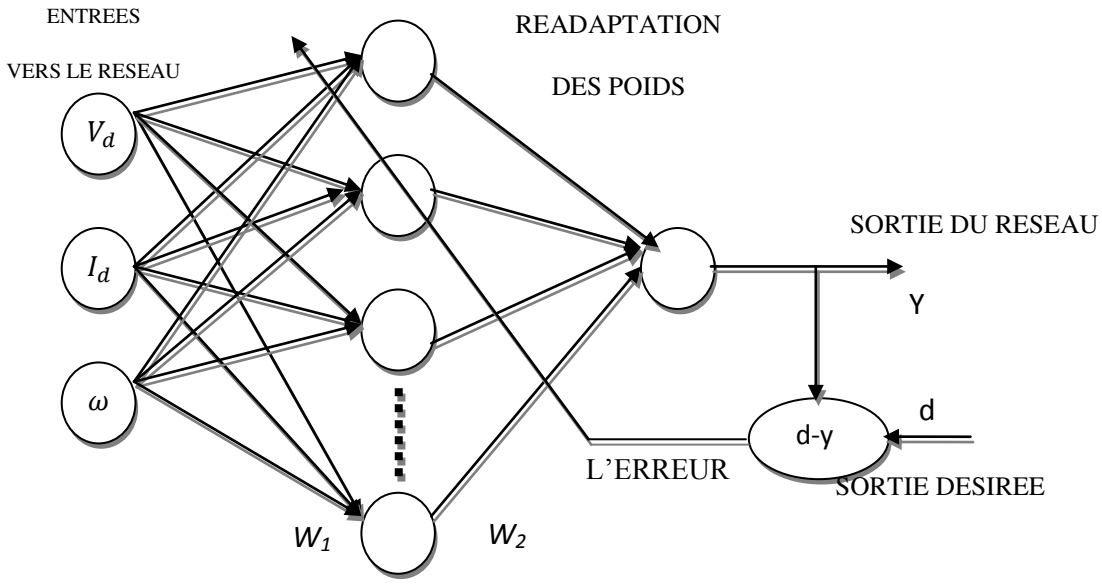


Figure 3.2 principe d'entrainement du réseau de neurone par rétro-propagation de l'erreur

Caractéristique	Optimisation de la puissance extraite
	ANN1
ENTRÉES - SORTIES	3-1
NOMBRE DE NEURONES	3-15-1
ITÉRATIONS	60
PERFORMANCE	$8e^{-4}$
ALGIRITHM D'APPRENTISSAGE	Back-probagation

Tableau 3.1 Les caractéristiques d'optimisations neuronales

3.4.2. Contrôle de la tension de bus continu

La régulation de la tension du bus continu a pour objectif de maintenir la tension délivrée constante. Cette régulation est assurée par une boucle extérieure utilisant un correcteur neuronal. La tension du bus continu Vdc est détectée et comparée à une valeur de référence Vdc-ref, l'erreur obtenue est utilisée comme une entrée pour le régulateur.

Caractéristique	Optimisation de la puissance extraite
	ANN2
ENTRÉES - SORTIES	2-1
NOMBRE DE NEURONES	2-15-1
ITÉRATIONS	100
PERFORMANCE	$1.3e^{-4}$
ALGIRITHM D'APPRENTISSAGE	Back-probagation

Tableau 3.2 La régulation de la tension du bus continu

3.4.3. Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

34.3.1Modélisation de la batterie

Modèle CIEMAT :

Ce modèle, étudié par Olivier GERGAUD (Gergaud O., 2002), est basé sur le schéma la figure qui représente le schéma équivalent de n_b éléments en série. La batterie est représentée dans ce cas par une source de tension et une résistance interne.

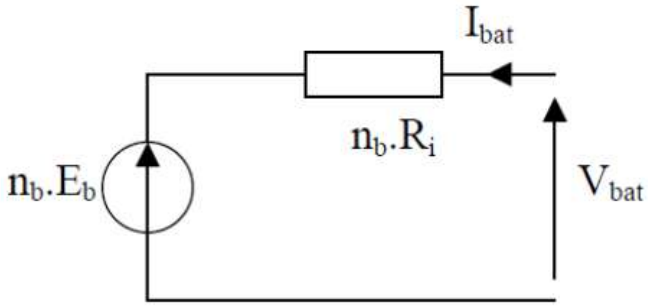


Figure 3.3 Schéma équivalent de la batterie dans le modèle CIEMAT

L'équation de la tension V_{bat} peut donc s'écrire :

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_i I_{bat} \quad (3.1)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont respectivement les valeurs de la tension et du courant de la batterie en convention recepteur, E_b represente la f.e.m. de la batterie qui dépend de l'état de charge et R_i est la resistance interne d'un élément.

L'expression de l'état de charge est égale à :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (3.2)$$

La quantité de charge manquante Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle croit pendant la charge et décroit pendant la décharge.

L'équation de la tension de décharge est donnée par :

$$V_{bat-d} = n_b.[1.965 + 0.12.EDC] - n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}}\left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02\right).(1 - 0.0007.\Delta T) \quad (3.3)$$

Où C_{10} est la capacité de la batterie en A.h en régime de décharge à courant constant pendant 10 heures, et ΔT est l'écart de la température de l'accumulateur par rapport à une température de référence de 25°C.

L'expression de la charge est éxprimée par :

$$V_{bat-c} = n_b.[2 + 0.16.EDC] - n_b \frac{|I_{bat}|}{C_{10}}\left(\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.36\right).(1 - 0.025.\Delta T) \quad (3.4)$$

Caractéristique	Optimisation de la puissance extraite
	ANN3
ENTRÉES - SORTIES	2-1
NOMBRE DE NEURONES	2-15-1
ITÉRATIONS	60
PERFORMANCE	0.067
ALGIRITHM D'APPRENTISSAGE	Back-probagation

Tableau 3.3 régulation des caractéristique de batterie

3.5. CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE CHARGE (DTC)

Le contrôle direct du couple DTC « Direct Torque Control », basé sur l'orientation du flux statorique, Cette technique permet de calculer les grandeurs de contrôle que sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures des courants statoriques sans l'utilisation des capteurs mécaniques. Dans la structure DTC, la machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension est un système dynamique hybride, dont la partie continue est la machine asynchrone l'onduleur de tension [15]

Afin de remédier aux problèmes de sensibilité aux variations paramétriques, des méthodes de contrôle ont été développées dans lesquelles le flux statorique et le couple électromagnétique sont estimés à partir des grandeurs électriques accessibles au stator, et ceci sans le recours à des capteurs mécaniques

Elle présente des avantages déjà bien connus par rapport aux techniques classiques, notamment en ce qui concerne la réduction du temps de réponse du couple ; l'amélioration de sa robustesse par rapport aux variations des paramètres rotoriques ; l'imposition directe de l'amplitude des ondulations du couple et du flux statorique ; l'absence de transformations de Park. D'autre part, cette loi de commande en couple s'adapte par nature à l'absence de capteur mécanique (vitesse, position).

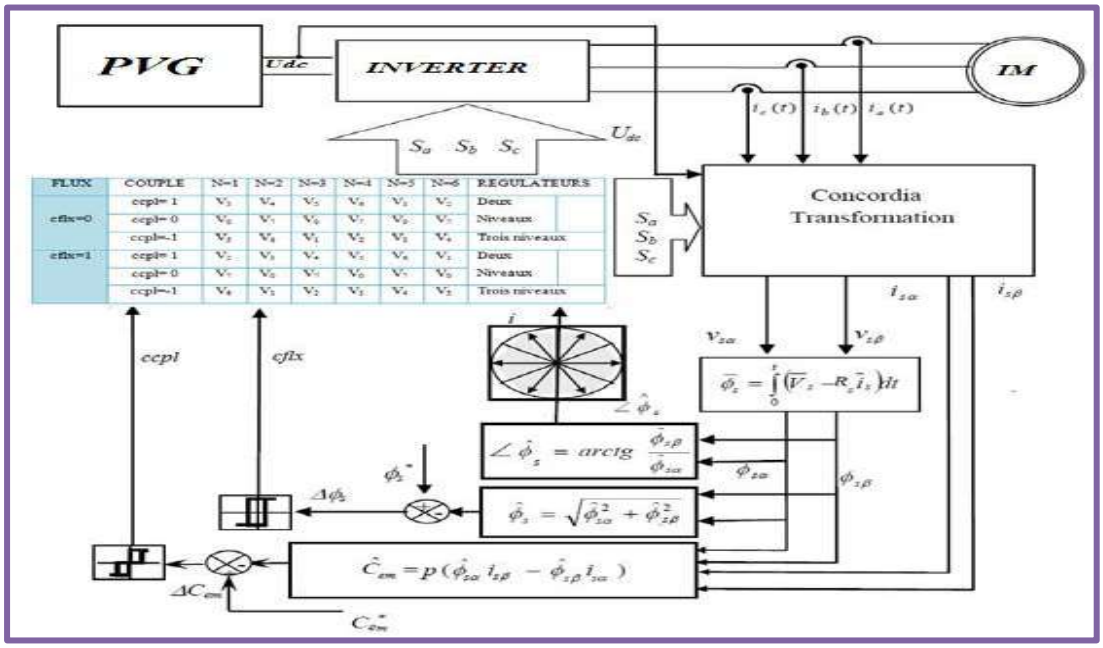


Figure 3.4 technique DTC appliqué sur le convertisseur côté charge

3.5.1. Principe de la commande DTC

Les méthodes de commande directe du couple DTC consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur à partir des valeurs calculées du flux statorique et du couple.

Les variables de commande sont le flux magnétisant et le couple du moteur. Avec la DTC, nous n'avons pas besoin d'un modulateur, ni d'un tachymètre ou bien d'un encodeur de position pour assurer le retour d'information de la vitesse ou de position.

La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux statorique la direction déterminée par les valeurs de consigne [18], [19].

Pour connaitre l'état électromagnétique du moteur afin de déterminer la commande des interrupteurs de l'onduleur, il faut disposer d'un modèle approprie de la machine.

A partir des mesures de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des courants statoriques, le modèle donne à chaque instant : [16], [17]

- Le flux statorique réel de la machine,
- Le couple réel qu'elle développe,
- Sa vitesse de rotation.

La mesure de la vitesse de l'arbre n'est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de ces méthodes.

Le flux et le couple ainsi calculés sont comparés à leurs valeurs de référence pour déterminer les instants de commande des interrupteurs. D'ordinaire on cherche à maintenir le flux constant. [18][19].

3.5.2. Fonctionnement d'un onduleur triphasé

Les interrupteurs de l'onduleur de tension doivent être commandés de manière à maintenir le flux et le couple de la machine.

Le vecteur de la tension statorique V_s peut s'écrire sous la forme :

$$\overline{V_s} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left[S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (3.5)$$

Où (S_a ,S_b,S_c) représentent l'état logique des 3 interrupteurs : S_i=1 signifie que l'interrupteur haut est fermé et l'interrupteur bas est ouvert,(V_i=+Vdc/2) et S_i=0 signifie que l'interrupteur haut estouvert et l'interrupteur bas est ferme (V_i=-Vdc/2).

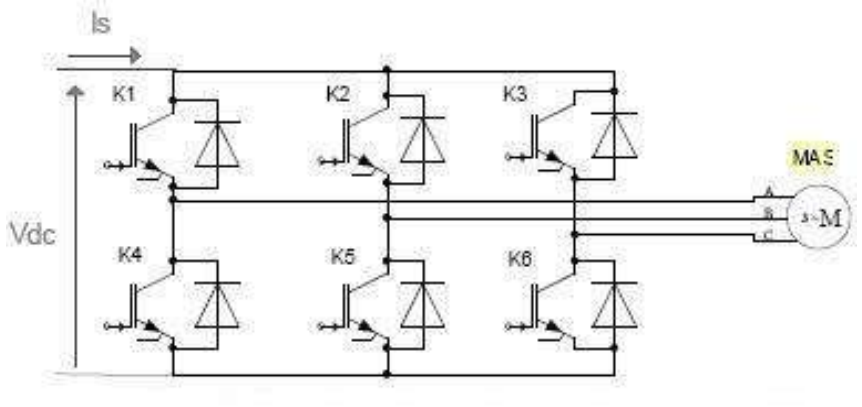


Figure3.5 Machine asynchrone commandée par l'onduleur de tension

On cherchera donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs. Comme nous disposons de 3 interrupteurs, il y a donc 2^3=8 possibilités pour le vecteur V_s.

Deux vecteurs V_0 et V_7 correspondent au vecteur nul :*(S_a, S_b, S_c)=(0,0,0)* et *(S_a, S_b, S_c)=(1,1,1)*.

V_0(0,0,0) est toujours à côté d'un vecteur impair; *V_1 (1,0,0)* ; *V_3 (0,1,0)* ;où *V_5 (0,0,1)* ; d'où une seul commutation ;

V_7(1,1,1) est toujours à côté d'un vecteur Pair; *V_2 (1,1,0)* ; *V_4 (0,1,1)* ;où *V_6 (1,0,1)* ; donc une seul commutation

Dans chaque période de modulation, un bras ne commute pas deux fois.

La figure (3.6) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs de tensions non nuls qui peuvent être générés par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. On procède ainsi :

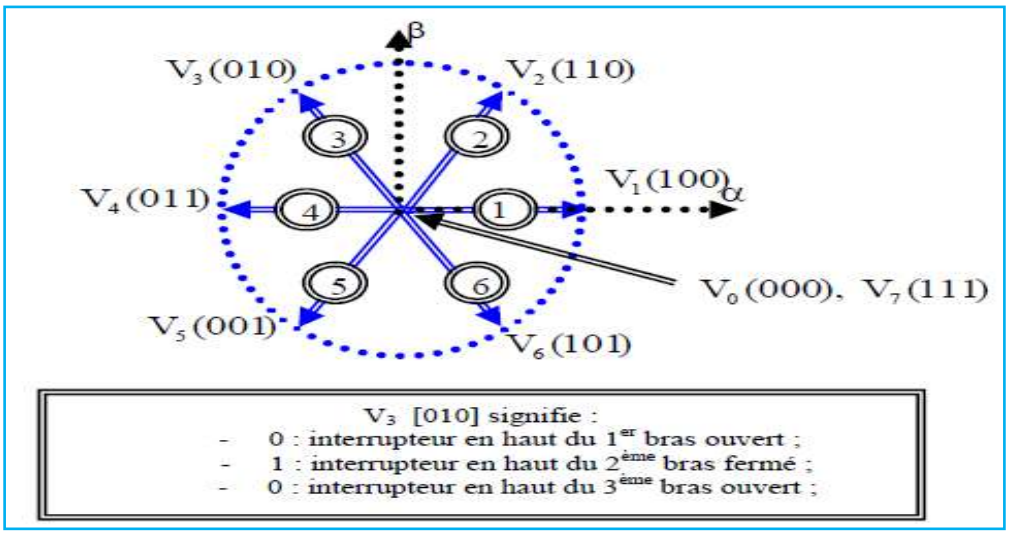


Figure 3.6 Séquences de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux

3.5.3. Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique

3.5.3.1. Principe de contrôle de flux statorique

A partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au stator et de l'expression de la tension statorique : [20]

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\varphi_s}{} \tag{3.6}$$

Le flux statorique est estimé à partir de la relation suivante :

$$\varphi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt \tag{3.7}$$

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + V_s(t) - R_s \int I_s dt \tag{3.8}$$

Avec l'hypothèse que R_s reste constante et que le terme (R_s I_s) est négligeable devant la tension V_s Sur un intervalle périodique de contrôle [0 T_e] correspondant à une période d'échantillonnage T_e commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixées, ainsi on peut écrire : [21]

$$\varphi_s(t) \approx \varphi_{s0} + V_s T_e \tag{3.9}$$

Où

φ_{s0}:est le vecteur flux à l'instant t =0.

Dans un intervalle de temps T_e , l'extrémité du vecteurφ_s se déplace sur une droite dont la direction est donnéeV_s.La figure (3.7) illustre ce principe, lorsqu'on sélectionne le vecteur V_s=V_3 par exemple.

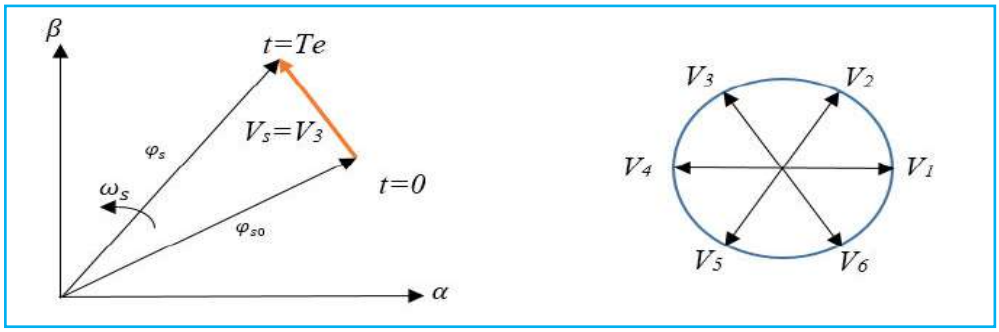


Figure 3.7 Evolution de l'extrémité du vecteur φ_s.

Si la période de contrôle « T_e» est très faible devant la période de rotation du vecteur flux statorique. En choisissant une séquence appropriée de vecteur tension de l'onduleur sur des intervalles de temps successifs de durée T_e, nous pouvons donc faire suivre à l'extrémité du vecteur flux φ_s la trajectoire désirée.

Le vecteur φ_s est maintenu entre deux valeurs φ_{max} et φ_{min} le passage de l'une à l'autre étant commandé par V_s. Si le vecteur de commande est l'un des vecteurs non nuls, φ_s évolue avec une vitesse constante proportionnelle à la tension de commande. Si l'on maintientφ_s à peu près constant, le couple ne dépend que du déphasage entre les deux flux.

Pour répondre à une demande de variation rapide du couple, il suffit donc de modifier rapidement le déphasage entre les deux flux.[15][16][19].

Par exemple quand φ_s atteint la valeurφ_{max}, on déclenche le changement d'interrupteurs pour que la nouvelle valeur de V_s entraîne une diminution du module de φ_s .En même temps la nouvelle phase du vecteur V_s provoque le décalage I_s et $\varphi_s$dans le sens de rotation, fait augmenter le déphasage et le couple. Quand φ_s chutera à la valeur φ_{min}, on commandera la commutation suivante.[19]

Il est possible de fonctionner avec un module de fluxφ_s pratiquement constant ; pour cela il suffit de choisir une trajectoire circulaire pour l'extrémité du vecteur flux. Ceci n'est possible que si la période de contrôle est très faible devant la période de rotation du flux. En

plus la composante du flux des vecteurs tensions appliquées doit être minimum et au contraire celle de la composante du couple doit être maximum. Ainsi les vecteurs appliqués changent la position du flux avec une amplitude presque constante [16].

Lorsque le vecteur tension V_s est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité du flux φ_s et donnée par sa dérivée ($d\varphi_s/dt$) correspondant pratiquement au vecteur V_s. En ce qui concerne le flux rotorique φ_r, on peut admettre que compte tenu de la forte constante du temps du rotor de la machine asynchrone, son amplitude ne varie pas durant un régime transitoire. Donc la variation de flux rotorique est négligeable vis-à-vis de celle du flux statorique.

3.5.3.2.Principe de contrôle de couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel entre les vecteurs des flux statorique et rotorique selon l'expression suivante [20]:

$$C_{em} = k\left(\overline{\varphi_s} * \overline{\varphi_r}'\right) = k\left|\overline{\varphi_s}\right|\left|\overline{\varphi_r}'\right|\sin(\gamma) \qquad (3.10)$$

Avec

$\overline{\varphi_s}$: représente le vecteur de flux statorique,

$\overline{\varphi_r'}$: représente le vecteur de flux rotorique ramené au stator,

γ : représente l'angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

3.5.4. Choix du vecteur de tension

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux $\overline{\varphi_s}$ [21]. Le tableau (3.4) montre l'évolution des deux grandeurs flux et couple pour chacun des quatre vecteurs V_{i+1}, V_{i+2}, V_{i-1}, V_{i-2}qui peuvent être appliqués dans la zone Z_i.

Lorsque le flux $\bar{\varphi}$ se trouve dans une zone **i**, le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tensions suivants :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors l'amplitude du flux$\overline{\varphi_s}$ croit et le couple C_{em}croit
- Si V_{i-1}est sélectionné alors l'amplitude du flux $\overline{\varphi_s}$ croit et le couple C_{em} décroit
- Si V_{i+2} est sélectionné alors l'amplitude du flux $\overline{\varphi_s}$ décroit et le couple C_{em}croit

- Si V_{i-2} est sélectionné alors l'amplitude du flux $\overline{\varphi_s}$ décroit et le couple C_{em} décroit
- Si V_0 ou V_7 est sélectionnée la rotation de $\overline{\varphi_s}$est arrête, d'où une décroissance du couple

alors que le module du couple reste inchangé. [20], [21], Les vecteurs tension à appliquer dépendent de la zone où se trouve le vecteur flux.

Vecteur V_k	V_{i+1}	V_{i+2}	V_{i-1}	V_{i-2}
φ_s	↗	↘	↗	↘
C_{em}	↗	↗	↘	↘

Tableau 3.4 Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur V_s appliqué dans la zone Z_i.

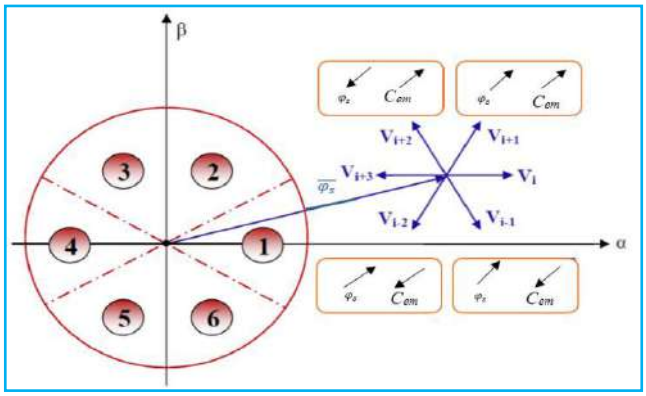


Figure3.8 Répartition des zones

Le niveau d'efficacité des vecteurs tensions appliqués dépend également de la position du vecteur flux dans la zone i.

En effet, en début de zone, les vecteurs $\overline{V_{i+1}}$et $\overline{V_{i-2}}$ sont perpendiculaires à $\overline{\varphi_s}$, d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux $\overline{\varphi_s}$, alors qu'en fin de zone l'évolution est inverse. Avec les vecteurs $\overline{V_{i+1}}$ et $\overline{V_{i-2}}$, il correspond à des évolutions lente du couple et rapide de l'amplitude du flux $\overline{\varphi_s}$en début de zone, alors qu'en fin de zone c'est le contraire.

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans la zone i, les deux vecteurs $V_i$et $\overline{V_{i+3}}$ ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci ont la composante de flux la plus forte (évolution très rapide de $\overline{\varphi_s}$) mais l'effet sur le couple lui, dépend de la position de $\overline{\varphi_s}$dans la zone, avec un effet nul en milieu de zone.Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux, estimé par rapport à leur référence, ainsi que la position du vecteur $\overline{\varphi_s}$.

3.5.5. Estimateurs

3.5.5.1.Estimateur du flux statorique

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courants et tension de la machine. [19], [20], [21]

A partir de l'équation :

$$\overline{\varphi_s} = \int_0^t \left(\overline{V_s} - R_s \overline{I_s}\right) dt \tag{3.11}$$

On obtient les composantes α et β du vecteur $\overline{\varphi_s}$.

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^t \left(V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}\right) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^t \left(V_{s\alpha} - R_s I_{s\beta}\right) dt \end{cases} \tag{3.12}$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux statorique.

On obtient les tensions $V_{s\alpha}$et $V_{s\beta}$ à partir des commandes (S_a,S_b, S_c) et de la mesure de la tension Vdc et par application de la transformée de Concordia [19], [20], [21]

$$\overline{V_s} = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \tag{3.13}$$

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left(S_a - \frac{1}{2}\left(S_b + S_c\right) \right) \\ V_{s\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}} V_{dc} \left(S_b - S_c\right) \end{cases} \tag{3.14}$$

De même les courants $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$ sont obtenus à partir de la mesure des courants réels I_{sa} ,I_{sb},I_{sc} et en appliquant la transformée de Concordia :

$$\overline{I_s} = I_{s\alpha} + jI_{s\beta} \tag{3.15}$$

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{sa} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(I_{sb} - I_{sc} \right) \end{cases} \tag{3.16}$$

Le module du flux statorique s'écrit :

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \tag{3.17}$$

L'angle θ_s entre le référentielle statorique et le vecteur flux φ_s est égal à [21] :

$$\theta_s = arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \tag{3.18}$$

3.5.5.2.Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir des flux estimés, et des courants statorique mesurés, et qui peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_{em} = p\left(\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha} \right) \tag{3.19}$$

On peut remarquer dans cette équation que l'exactitude de cette dernière dépend de la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants statorique.

3.6. ÉLABORATION DU VECTEUR DE COMMANDE

3.6.1. Correcteur de flux

L'objectif de cette correction est de conserver l'amplitude du flux statorique dans une bande et de maintenir ainsi l'extrémité de ce dernier dans une couronne circulaire comme le montre la (figure 3.9).

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de $\overline{\varphi_s}$, afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela un simple correcteur à hystérésis àdeux niveaux convient parfaitement, et permet de 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 :

$$\left|(\varphi_s)_{ref} - \varphi_s\right| \le \Delta\varphi_s \qquad (3.20)$$

Avec : φ_{sref}: La consigne de flux ;

$\triangle\varphi$: La largeur d'hystérésis du correcteur

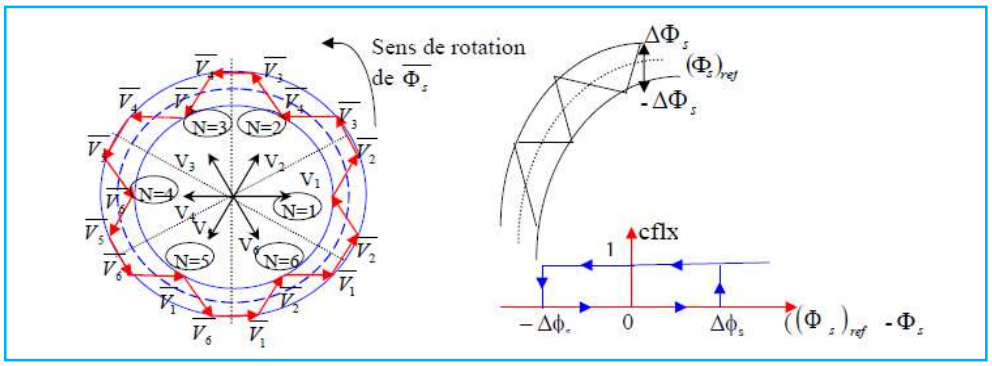


Figure 3.9 Sélection des tensions correspondant au contrôle de l'amplitude de flux statorique

3.6.2. Correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour but de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis et d'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple dans les limites

$$\left|C_{ref} - C_{em}\right| \le \Delta C \qquad (3.21)$$

Avec

C_{ref} : La référence de couple ;

ΔC : La bande d'hystérésis du correcteur. [20][21]

Cependant une différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine.

3.6.2.1.Le correcteur à deux niveaux

Ce correcteur n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation. Ainsi seuls les vecteurs $\overline{V_{i+1}}$et $\overline{V_{i+2}}$, peuvent être sélectionnés pour faire évoluer le fluxφ_s. Par conséquent, la diminution du couple est uniquement réalisée par la sélection des vecteurs nuls.

Avec ce correcteur, pour inverser le sens de rotation de la machine il est nécessaire de croiser les deux phases de la machine.

Cependant ce correcteur est plus simple à implanter. De plus en sélectionnant correctement les vecteurs nuls suivant les zones N_i, on s'aperçoit que pour chaque zone **i,** il y a un bras de l'onduleur qui ne commute jamais, et permet ainsi de diminuer la fréquence moyenne de commutation des interrupteurs, diminuant ainsi les pertes par commutation au niveau de l'onduleur.[18],[19].

3.7. ÉLABORARTION DE LA TABLE DE COMMANDE

La table de commande est construite en fonction de l'état des variables *cflx* et *ccpl,* et de la zone N_i de position de φ_s . Elle se présente donc sous la forme suivante :

Flux	***Couple***	***N=1***	***N=2***	***N=3***	***N=4***	***N=5***	***N=6***	***Correcteur***
cflx=0	ccpl=1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	***Deux 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	***Trois niveaux***
cflx=1	ccpl=1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	***Deux 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	***trois niveaux***

Tableau 3.5 Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis a trois niveaux (avec les vecteurs tension nuls).

3.8. Avantages de la commande directe de couple

- Il n'est pas nécessaire de faire la transformation des coordonnées, car les courants et les tensions sont dans un repère lié au stator,
- Utilise un modèle simplifie à moteur asynchrone double étoile,
- Il n'existe pas de bloc qui calcule la modulation de la tension (MLI),
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande, comme dans le cas de la commande vectorielle,
- Elle exige deux comparateurs à hystérésis et un contrôleur de vitesse du type PI, tandis dans la commande vectorielle exige 2 régulateurs PI et un modulateur de MLI.

3.9. Inconvénients de la commande directe de couple :

- L'existence de problèmes à basse vitesse (influence du terme résistif),
- La nécessité de disposer des estimations de flux statorique et du couple,
- L'existence des oscillations de couple,
- La fréquence de commutation n'est pas constante (utilisation des régulateurs à hystérésis), ce qui conduit à un contenu riche en harmoniques qui fait augmenter les pertes et amène à des bruits acoustiques et des oscillations de couple pouvant exciter des résonances mécaniques.

3.10. LE POMPAGE

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile…) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression. Une pompe est un système transférant de l'énergie à un liquide de façon à provoquer son écoulement dans une canalisation.

3.10.1. Pompes centrifuges

Le mouvement du liquide est rigoureusement normal à l'axe, car il pénètre au centre de la roue et est projeté vers l'extérieur par l'action combinée de la force centrifuge et des aubes du rotor. La volute du corps transforme la vitesse acquise par le liquide en pression.

3.10.2. Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges

3.10.2.1. Avantages

- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor ». Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.
- Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en général peu coûteux.
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

3.10.2.1. Inconvénients

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit.

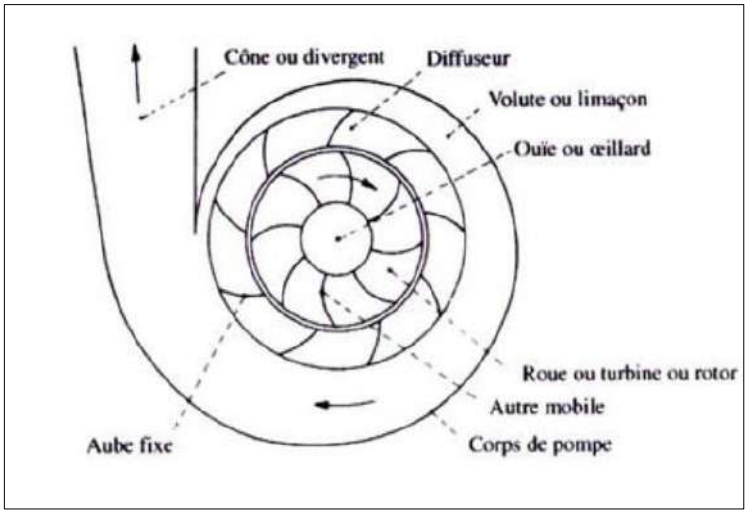


Figure 3.10 Constitution d'une pompe centrifuge

3.10.3. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

Sous l'effet de la rotation de la roue, le liquide emmagasiné entre les aubes de la roue est projeté de la région axiale vers le diffuseur à cause de la force centrifuge ; de ce fait une dépression est créée à l'entrée de la pompe d'où l'effet d'aspiration du liquide et en même temps une compression à la sortie de la roue, cela suffit pour établir le mouvement continu de l'écoulement. A la sortie de la roue, le liquide est récupéré dans une volute reliée à l'orifice de refoulement où l'énergie cinétique est transformée en énergie potentielle, on dispose ainsi à l'orifice de refoulement un débit sous une pression qui se traduit par une hauteur manométrique de refoulement.

3.10.4. Caractéristiques de la pompe centrifuge

3.10.4.1. Caractéristiques débit-vitesse

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit.

3.10.4.2.Caractéristiques couple-vitesse

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul.

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant Cr

$$C_r = k_r\omega^2 + C_s \qquad (3.22)$$

k_r Coefficient de proportionnalité [(Nm/rad.s^{-1})^2]

C_s le couple statique, très petite.

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{méc} = k_r . \omega^3 \quad (3.23)$$

3.10.4.3.Caractéristiques débit–hauteur

Le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN "

$$HMT = k_0 . \omega^2 - k_1 . \omega Q - k_2 . Q^2 \quad (3.24)$$

k_0 k_1 k_2 des constants propre de la pompe donnée par le constricteur.

ω La vitesse (rad/sec),

HMT la hauteur (mètre),

Q Débit (l/min).

3.10.4.4. Caractéristique de rendement

Pour les groupes électropompes (pompe moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement, comme on peut tracer la courbe de rendement hydraulique en utilisant la formule.

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (3.25)$$

$$P_h = \rho . g . Q . HMT \quad (3.26)$$

P_h puissance hydraulique (W),

ρ Masse volumique d'eau (1000kg/m^3),

g Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2),

HMT : Hauteur manométrique (m).

Q Débit volumique (m^3/s) ,

P_{ab} Puissance fournie par le moteur.

3.11. RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA DTC DE LA MAS

La figure ci-dessous représente une simulation effectuée sur la machine asynchrone, elle montre également la réponse du couple, du flux statorique et la trajectoire du flux statorique. On relève que la trajectoire du flux statorique est presque circulaire durant toute la variation du couple. Les résultats montrent que les valeurs estimées suivent les valeurs de consigne rapidement pour une rampe, un échelon de couple.

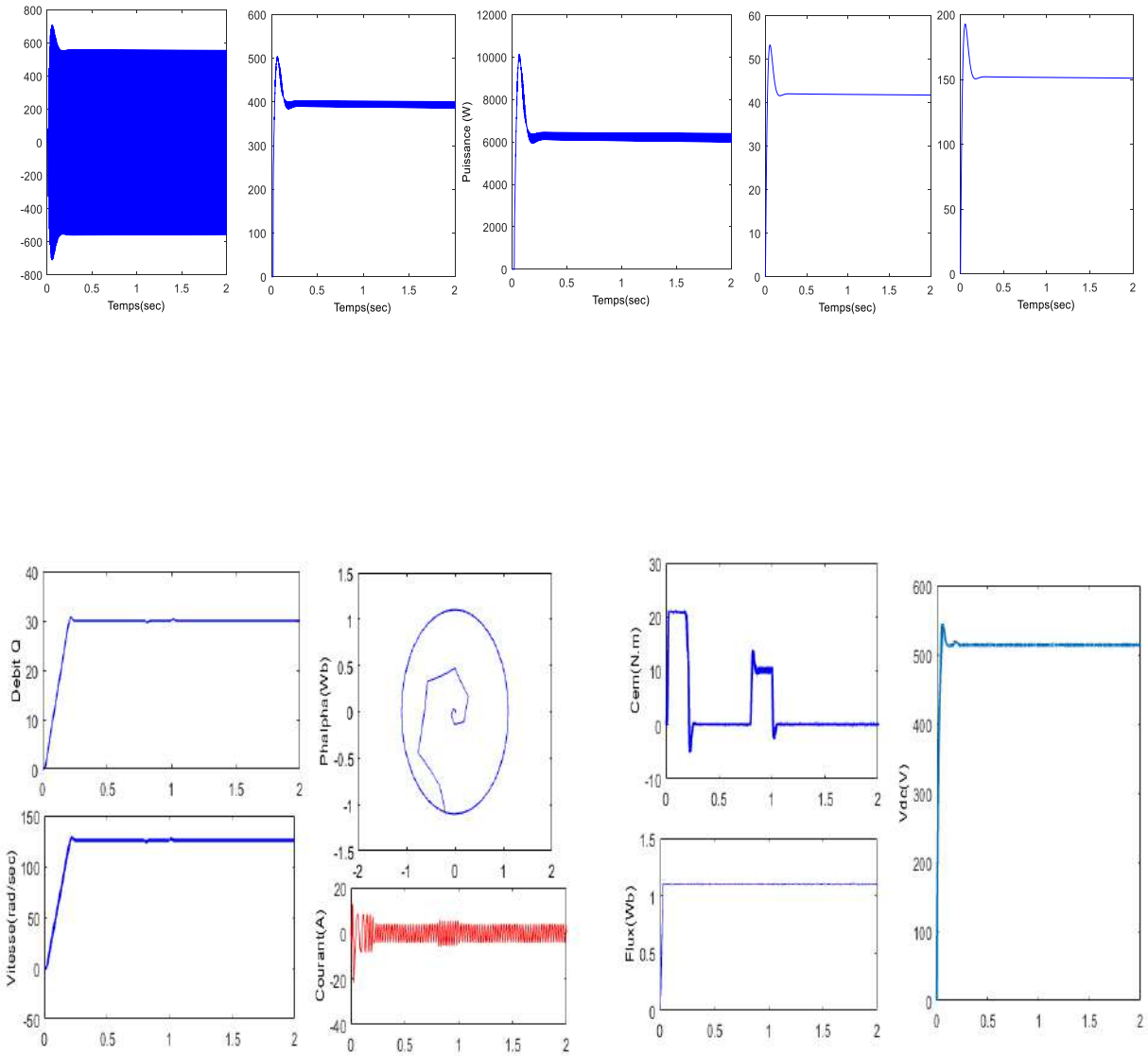


Figure 3.11 résultats de simulation de l'ensemble éolienne-DTC-pompe

3.12. CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre montre la faisabilité de l'application de la technique de contrôle DTC sur une machine asynchrone. Ce chapitre a permis d'étudier en simulation, le comportement du contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un onduleurs de tension à deux niveaux.

Les résultats obtenus montrent que le contrôle du couple d'une machine asynchrone basé sur la technique du contrôle DTC permet d'obtenir de hautes performances dynamiques avec une structure simple. Ainsi, il apporte une solution concrète aux problèmes de robustesse et de dynamique rencontrés dans la structure de commande FOC pour le même type de machine.

La commande directe du couple présente plusieurs avantages significatifs (simplicité et facilité d'implantation, robustesse, dynamique élevée, précision, … etc).

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur la commande non linéaire d'un système de pompage éolien, qui est composé d'une turbine éolienne, d'une GSAP, des convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe (pompe centrifuge et une machine asynchrone).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des machines éléctriques utilisées dans le travail représentées dans la génératrice synchrone a aiment permanant et la machine asynchrone.

L'objectif du troisième chapitre est d'étudier une technique de commande la DTC, aussi de faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie. Pour assurer une commande du système de pompage éolien, en appliquant un contrôleur neuronal

Les résultats obtenus confirment les performances souhaités. Nous avons présentés des résultats de simulation.

Annexes

Turbine éolienne :

R=4.5 m

Ro=1.24

G=1

Kf=0.001

J=76.8

Paramètres de la MSAP :

Rs=2.2 ohm

Φ=0.845 wb

P=8

Paramètres de la MSAP :

Rr=3.805 ohm

Ls=0.274 H

Lr=2.274 H

Msr=0.258

j=0.031

P=2

F=0.001136

Table des matières

1.3. INTRODUCTION 62

3.1. LES RÉSEAUX DE NEURONES 62

3.2.1. Définition 62

3.2.2. Le neurone biologique 62

3.2.3. Le neurone artificiel 63

3.2.4. Structure du réseau de neurone artificiel 64

3.2.4.1. Réseau de neurones multicouches 64

3.2.4.2. Réseau à connexions locales 65

3.2.4.3. Réseau à connexions récurrentes 65

3.2.4.4. Réseau à connexions complètes 66

3.2.5. Apprentissage 66

3.2.5.1. Apprentissage non supervisé 67

3.2.5.2. Apprentissage supervisé 67

3.3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES RÉSEAUX DE NEURONES 69

3.3.1. Avantage des réseaux de neurones 69

3.3.2. Inconvénients des réseaux de neurones 69

1.3. INTRODUCTION

Les commandes intelligentes connaissent depuis quelques années un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur notamment dans la correction des systèmes.

Grace à ses avantages et sa simplicité, ces méthodes jouent un rôle important dans la régulation et l'élimination des inconvénients des anciennes commandes telles que la commande directe du couple électromagnétique et du flux statorique DTC.

Ces commandes utilisées dans de nombreux domaines (physique, chimie, biologie, finance, etc....), notamment pour la modélisation de processus et la synthèse de lois de commandes

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation de la commande basée sur les réseaux de neurones et les systèmes neuro-flou, leur classifications, ses avantages et inconvénients, ainsi que l'application dans la commande des processus.

3.1. LES RÉSEAUX DE NEURONES

3.2.1. Définition

L'origine de réseaux de neurones vient d'essai de modélisation du neurone biologique par Warren McCulloch et Walter Pitt. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat de calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée est née grâce à des effets collectifs d'un réseau de neurones interconnectés.

3.2.2. Le neurone biologique

Le cerveau humain possède deux hémisphères latérales reliées par le corps calleux et d'autres ponts axonaux ; il pèse moins de deux kilogrammes et contient mille milliards de cellules, dont 100 milliards sont des neurones constitués en réseaux. Les neurones sont des cellules nerveuses décomposables, en 4 parties principales (figure 3 .1) :

- ✓ ***Les dendrites,*** sur lesquelles les autres cellules entrent en contact synaptique, c'est par les dendrites que se fait la réception des signaux.
- ✓ ***Le corps de la cellule,*** c'est l'unité de traitement.
- ✓ ***L'axone,*** où passent les messages accumulés dans le corps de la cellule, l'envoi de l'information se fait par l'axone.
- ✓ ***Les synapses*****,** par lesquelles la cellule communique avec d'autres cellules, ce sont des points de connexion par où passent les signaux de la cellule.

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule. Au

point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions sont converties en signaux chimiques. Quand l'accumulation des excitations atteint un certain seuil, le neurone engendre un potentiel d'action, d'une amplitude d'environ 100 mV et pendant une durée de 1 ms[BOU 13]

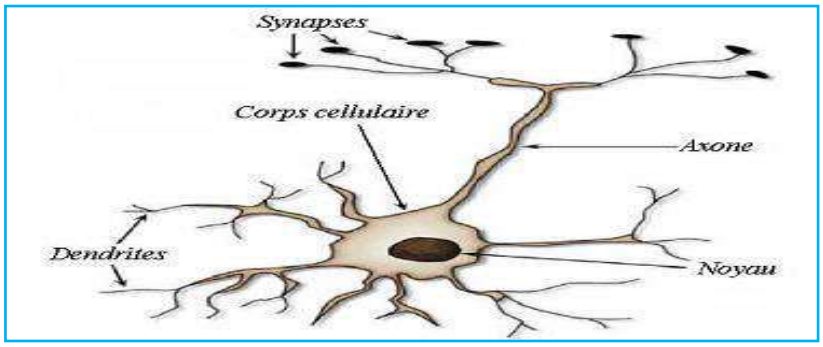


Figure 3.1 : Schéma simplifié d'un neurone biologique[BOU 13]

3.2.3. Le neurone artificiel

Un réseau de neurones (ouArtificiel Neural Networken anglais) est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspiré du fonctionnement de vrais neurones (biologiques ou non). Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, si bien qu'ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de générer de vastes espaces fonctionnels souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle , qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel. Le schéma suivant présente un neurone formel.

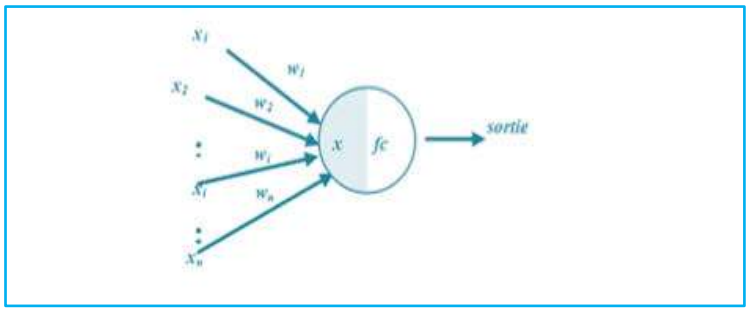


Figure 3.2 : Représentation d'un neurone

Les entrées de neurones sont désignées par x_i ***(i=1…n)***. Les paramètres $w_i$reliant les entrées aux neurones sont appelés

poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par :

$$sortie = fc(x) \qquad avec\ x = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \quad (3.1)$$

- ✓ x est l'état de l'activation du neurone (également appelé état ou activité).
- ✓ f_c est la fonction d'activation du neurone. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde.

Les réseaux de neurones sont constitués de neurones élémentaires connectés entre eux par l'intermédiaire des poids qui jouent le rôle de synapses. L'information est portée par la valeur de ces poids tandis que la structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter cette information et à l'acheminer vers la sortie.

Le réseau de neurones fait partie des Réseaux Adaptatifs Non linéaires, cela signifié que ses agents (neurones) s'organisent et modifient leurs liens mutuels lors de la procédure fondamentale qui est l'apprentissage. Pour une tache précise. L'apprentissage du réseau de neurones consiste donc à adapter les différents poids w_i.

3.2.4. Structure du réseau de neurone artificiel

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle qui peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité [HAM 13].

3.2.4.1. Réseau de neurones multicouches

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne sont font qu'avec les neurones des couches en aval (figure 3.3). Habituellement, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc de définir les concepts de neurone d'entrée et de neurone de sortie.

Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées cachées [HAM 13].

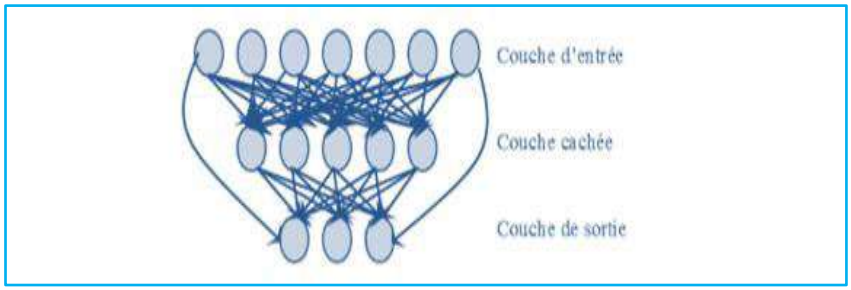


Figure 3.3 :Définition des couches d'un réseau multicouche

3.2.4.2. Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une architecture multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone est connecté avec un nombre réduit et localisé de neurone de la couche avale (figure 3.4). Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

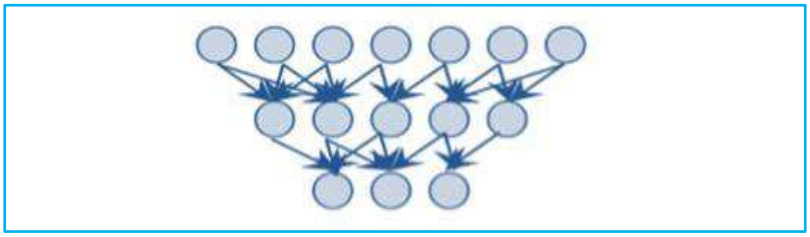


Figure 3.4 : Réseau à connexions locales

3.2.4.3. Réseau à connexions récurrentes

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales voir la figure 3.5.

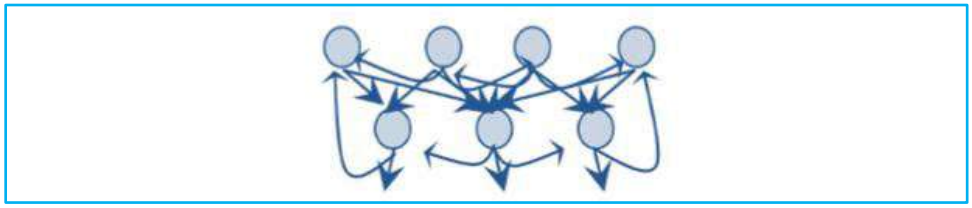


Figure 3.5 : Réseau à connexions récurrentes

3.2.4.4. Réseau à connexions complètes

C'est la structure d'interconnexion la plus générale voir la figure 3.6 .chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même).

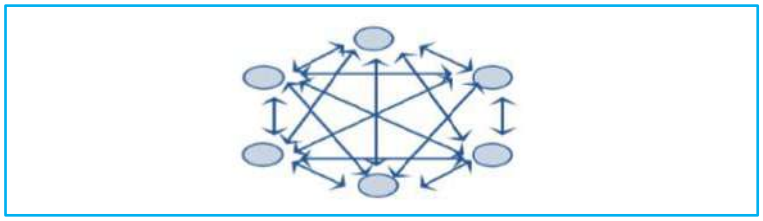


Figure 3.6 :Réseau à connexions complète

3.2.5. Apprentissage

Une fois la structure est fixée, il faut passer par le processus d'apprentissage, par lequel les poids vont être ajustés de manière à satisfaire un critère d'optimisation.

Prenons le cas de l'identification d'un processus qui comporte deux entrées et une sorties. L'apprentissage va se faire sur un ensemble de triplet (x_1^0, x_2^0, y_s).

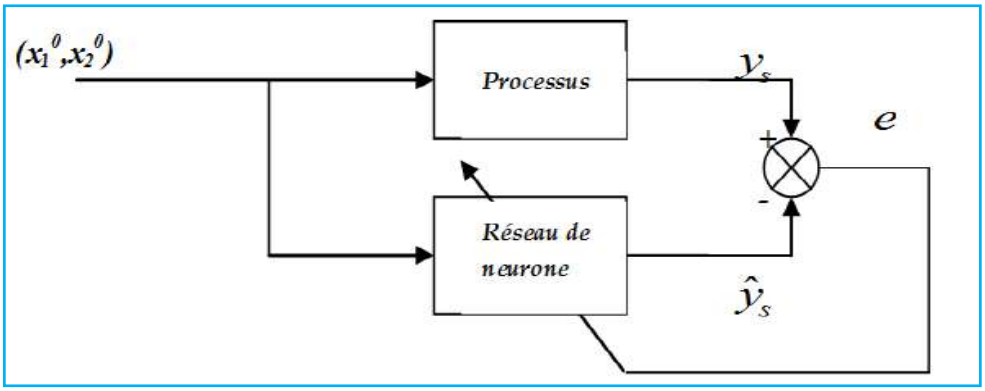


Figure 3.7 : Schéma synoptique du procédé d'apprentissage du réseau de neurone

Pour chaque triple, on peut subdiviser le processus d'apprentissage en trois classes

- ✓ Apprentissage supervisé « ***supervisedlearning***»
- ✓ Apprentissage non supervisé « ***unsupervisedlearning*** »
- ✓ Apprentissage par renforcement

3.2.5.1. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé représente la capacité du réseau de neurones à apprendre sans connaître la sortie désirée. Ce type d'apprentissage possède souvent une complexité réduite dans les calculs en comparaison avec l'apprentissage supervisé.

Il apprend rapidement, parfois un seul passage des données suffit. Il est particulièrement souhaitable dans les processus rapides où on n'a pas suffisamment de temps ou d'informations.

3.2.5.2. Apprentissage supervisé

Dans l'apprentissage supervisé, la sortie désirée est connue, et c'est en minimisant l'erreur entre la sortie désirée et la sortie du réseau qu'on modifie les paramètres internes des réseaux de neurones. Dans ce cas, on devrait avoir un ensemble de paires entrées-sorties désirées qu'on appelle exemples. Donc, le but est de produire un réseau de neurones qui implémente la fonction inconnue F_{on}, quand un nombre suffisant d'exemples est à notre disposition. Le processus est automatisé grâce à l'algorithme d'apprentissage. Cette implémentation est souvent une approximation de F_{on}.

L'un des algorithmes les plus répandus est celui de la «rétro-propagation » (backpropagation). Cet algorithme change les poids d'un réseau dont l'architecture est fixée à priori, à chaque fois qu'un exemple $y_i=F_{on}\ (x_i)$ est présenté. Ce changement est fait de telle sorte à minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la réponse du réseau à une entrée x_i.

Ceci est réalisé grâce à la méthode de descente de gradient. A chaque itération le signal d'entrée se propage dans le réseau dans le sens entrée-sortie, une sortie est ainsi obtenue, l'erreur entre cette sortie et la sortie désirée est calculée puis par rétro-propagation de l'erreur (errorbackpropagation), des erreurs intermédiaires, correspondant à la couche cachée sont ainsi calculées et permettent l'ajustement des poids w_{ij}^{1}de la couche cachée.

L'algorithme de rétro-propagation du gradient comporte donc deux phases distinctes :

- ✓ propagation : à chaque étape, on présente au réseau un exemple en entrée. Cette entrée est propagée jusqu'à la couche de sortie.
- ✓ correction : à coup sûr, le réseau ne fournira pas exactement ce que l'on attendait. On calcule donc une erreur (en général la somme quadratique moyenne des erreurs pour tous les neurones de sortie) que l'on rétro propage dans le réseau.

L'apprentissage par l'algorithme « back propagation » pose plusieurs problèmes, les principaux qu'on peut citer sont comme suit :

- ✓ **L'architecture du réseau**

Il n'existe pas de règles générales pour déterminer la structure des réseaux (le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche), sachant que le problème critique pendant l'apprentissage est de trouver un réseau assez large pour bien apprendre mais également assez petit pour bien généraliser. On ne sait (presque) pas dimensionner correctement le réseau.

Les couches entrées et sorties sont bien sur imposées, puisque le nombre de neurones qu'elles admettent dépend du problème posé. Mais que dire surtout du nombre de neurones des couches cachées ?

- ✓ **Le temps d'apprentissage**

Le temps d'apprentissage augmente avec le nombre de couples d'apprentissage, ce qui diminue la vitesse de convergence.

- ✓ **La convergence de l'algorithme**

Aucune preuve mathématique sur la convergence de cet algorithme vers un minimum global n'existe du fait que cette méthode utilise la décente du gradient. La recherche d'un minimum global sur la surface de l'erreur dans le domaine des poids, peut présenter un problème si cette surface possède des minimums locaux qui peuvent ralentir (voire stopper) l'algorithme.

Le choix d'apprentissage variable permet dans certains cas d'accélérer la convergence. Il arrive cependant qu'on reste au-dessus du critère d'arrêt sans jamais l'atteindre. C'est souvent le signe que le mécanisme d'apprentissage est inadapté ou que l'architecture du réseau ne permet pas d'atteindre ce degré de précision. Dans ce cas, il faut augmenter le nombre de neurones de la couche cachée ou changer de structure [HAM 13].

On ne peut pas prévoir le nombre d'itérations nécessaires à l'apprentissage

- ✓ **Le pas de correction des poids**

Si le pas de correction des poids est très petit, l'apprentissage nécessite alors un temps très important. Par contre si ce même pas est très grand le réseau devient oscillatoire, ce qui compromet sa convergence. La solution à ce problème est de choisir un pas variable, initialisé à une grande valeur comprise entre 0 et 1, et qui sera diminué jusqu'à une valeur minimale positive fixée au préalable. L'algorithme de rétro propagation introduit la dérivée première des fonctions d'activation. Il est cependant tout à fait envisageable d'utiliser d'autres

algorithmes qui ne nécessitent pas de dérivation comme par exemple les algorithmes génétiques.

- ✓ **La saturation du réseau**

Si les poids prennent de grandes valeurs, les sorties deviennent grandes et se rapprochent de la zone de saturation de la fonction d'activation. La solution à ce problème est un compromis à faire entre

- ✓ Le choix d'un pas de correction petit.
- ✓ L'initialisation des poids à de très petites valeurs.

Des améliorations (optimisations) peuvent être apportées pour un meilleur apprentissage [HAM 13].

3.3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES RÉSEAUX DE NEURONES

3.3.1. Avantage des réseaux de neurones

- ✓ Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe ;
- ✓ Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par « rétro propagation des erreurs ». l'apprentissage ou construction du modèle est automatique ;
- ✓ Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données ;
- ✓ Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en math, informatique statistique requise ;
- ✓ Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données ;
- ✓ Pour l'utilisation novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

3.3.2. Inconvénients des réseaux de neurones

- ✓ L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche (s) cachée (s) ;
- ✓ Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence ;
- ✓ Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation) ;
- ✓ La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boites noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur [BOU 13].

Bibliographie

[1] http://www.éolienne , « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre » Article de Scientific American sur l'invention de Brush (1890).

[2] Adam MIRECKI , « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »,Thèse de doctorat , L'institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005.

[3] Nachida KASBADJI MERZOUK , « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » ,Thèse de doctorat, L'université Abou BekrBelkaid de Tlemcen 2006.

[4] Khaled FERKOUS , «Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne ». Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.

[4] Miloud REZKALLAH, « Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien –diesel », Mémoire de Magister, École de Technologie Supérieure Université du Québec 2010.

[5] Alexandre TENINGE, «Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire », Thèse de doctorat, L'institut Polytechnique de Grenobl2009.

[6] A. Smadi, M. Farida, «contribution à l'étude des systèmes éoliennes, application aux génératrice : A courant continue, Synchrone a pôles saillant et à aimant permanent », thèse ingénieur de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maintenance, 27 juillet 2007.

[7] Alan Mullane, G. Lightbody and R.Yacamini , « Adaptive control of variable speedwind turbines », UniversityCollege Cork, Cork, Ireland. Rev. Energ. Ren: PowerEngineering (2001)101-110.

[8] O. GERGAUD, B. MULTON, H. BEN AHMED, «Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance » , Electrotechnique du Futur 2001 – Nancy 14-15 novembre 2001.

[9] Arnaud DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 2007.

[10] A.Mehdary, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une aéroturbine », Domaine Universitaire de Saint-Jérôme Avenue Escadrille Normandie -Niemen.13397 Marseille Cedex 20.

[11] M. Mayouf, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », thèse de magistère de l'université de Al Hadj Lakhdar –Batna, option énergies renouvelables, 2007.

[12] M. LAPIE, « Modélisation du comportement dynamique d'éoliennes de moyenne et faible puissance à axe horizontale », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologie de Lille I, N°d'ordre 3645, 20 septembre 2005.

[13] A. Ameur, « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'un moteur synchrone à aimants permanents en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat de l'université El Hadj Lakhdar –Batna, 23 mai 2012.

[14] L. Abdelhamid, « Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens – Evaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement », thèse de doctorat de l'université de EL Hadj Lkhdar – Batna, option maitrise des énergies, 26 avril 2012.

[15] F. Khatounian " Contribution a la Modélisation, L'Identification et à la Commande d'une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entrainée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents " Thèse de Doctorat, De L'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2006.

[16] Y. Amara "contribution à la Conception et à la Commande des Machine Synchrone à Double Excitation Appliquée au Véhicule Hybride", Thèse de Doctorat, Université Paris, France, Décembre 2001.

[17] R. Abdessemed, M.Khadoudj, « Modélisation des Machines Electriques » Presses de l'Université de Batna ,1997 .

[18] F. Labrique et G. Séguier, "La conversion Continu-Alternatif", Technique et Documentation, Paris, 1995.

[19] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012

[20] LADJABI Abdelkader« Pseudo-identification des paramètres des machines asynchrones à cage en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel» Magister novembre 2001, USTO ORAN.

[21] L.FATEH« modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent» thèse doctorale 2016 université de Annaba.

Liste des Symboles et Notations

C_p Le coefficient de puissance aérodynamique

ρ La masse volumique de l'air

V_v La vitesse du vent

S la surface active de l'éolienne

Ω est la vitesse angulaire de rotation

λ est le rapport de la vitesse (linéaire) périphérique en bout de pale sur la composante normale de la vitesse du vent.

G le gain de multiplicateur

V_{moy} la moyenne de la vitesse du vent

Ld l'inductance statorique sur l'axe d

Lq l'inductance statorique sur l'axe q

l Inductance propre d'une phase statorique (rotorique)

$[L_{ss}]$ ($[L_{rr}]$) Matrice d'inductances statoriques (rotoriques)

$m_s(m_r)$ Inductance mutuelle en deux phases du stator (du rotor)

m_{sr} Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique

M_{sr} Inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique

Id le courant statorique sur l'axe d

Iq le courant statorique sur l'axe q

P nombre de pires de poles

$P(\theta)$ transformation de parck

$P(\theta)^{-1}$ transformation inverse de parck

R_s Résistance des enroulements statoriques

R_r Résistance d'une phase du rotor

ω Vitesse électrique du rotor par rapport au stator

φ_{sf} Valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques

θ Position absolue du rotor en degré électrique

J Le couple d'inertie des masses tournantes

C_r Couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique

C_e Couple électromagnétique

f Coefficient des frottements visqueux

Ω Vitesse mécanique de rotation

φ_f Flux des aimants permanents

i_c Courant circulant dans la capacité

V_{dc} Tension du bus continu

C_{dc} Capacité du bus continu

C_{ref} La référence de couple

k_r Coefficient de proportionnalité

C_s le couple statique

HMT La hauteur manométrique totale d'une pompe

Q Débit volumique

P_{ab} Puissance fournie par le moteur.

NOTATIONS

MPPT maximum power point tracking

DTC direct torque control

MSAP machine synchrone à aimant permanent

MAS machine asynchrone