

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Option : Energie Renouvelable & Réseau électrique

Thème

Optimisation d'un système de pompage éolienne

Présentée par :

SLIMANOU Riadh
TABOURI Wassim

Encadré par :

Mme RAHRAH Karima

2020/2021

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions dieu de tout puissant de nous avoir donné l'aide et le courage nécessaire pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à nos promoteurs Madame **k. Rahrah** et Monsieur **S. Taraft** pour la confiance qu'ils nous ont prodigué, pour leurs encouragements continus, pour le suivi et la direction de notre travail, ainsi que pour leurs conseils prodigués. Nous tenons à remercier monsieur le président et les membres de jury.

On ne pourrait jamais manquer de remercier tous nos enseignants, désignés par leur dévouement, à qui nous exprimons notre profonde reconnaissance, et notre infinie gratitude.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| NOMENCLATURE | IV |
| LISTES DES FIGURES..... | X |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |
| I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE | 2 |
| I.1 INTRODUCTION | 2 |
| I.2 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE..... | 2 |
| I.3 STRUCTURE D'UN SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE..... | 2 |
| I.4 LES COMPOSANTES D'UNE EOLIENNE..... | 3 |
| I.5 TYPES D'EOLIENNES | 4 |
| I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal..... | 4 |
| I.5.2 Les éoliennes à axe vertical | 5 |
| I.6 CLASSIFICATION DES EOLIENNES | 7 |
| I.7 MODE DE FONCTIONNEMENT | 7 |
| I.7.1 Eolienne à vitesse constante | 7 |
| I.7.2 Eolienne à vitesse variable..... | 7 |
| I.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE | 8 |
| I.8.1 Avantages de l'éolien | 8 |
| I.8.2 Inconvénients de l'éolien | 9 |
| I.9 ZONE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE..... | 9 |
| I.10 LES MACHINES GENERATRICES A CA | 11 |
| I.10.1 Machines synchrones | 11 |
| I.10.2 Machines triphasées à induction (machines asynchrones) | 12 |
| I.11 L'ACCOUPLLEMENT MECANIQUE..... | 14 |
| I.12 NOMBRE DE PALES..... | 15 |
| I.13 MODES DE COUPLAGE AU RESEAU ET RESEAUX AUTONOMES | 15 |
| I.14 DESCRIPTION D'UN SYSTEME DE POMPAGE..... | 15 |
| I.14.1 Le pompage éolien..... | 16 |
| I.14.2 Les différents systèmes de pompes d'eau | 17 |
| I.15 POMPES HYDRAULIQUES | 18 |
| I.15.1 Description d'une pompe..... | 18 |
| I.15.2 Caractéristiques générales des pompes | 19 |
| I.16 CLASSIFICATION DES POMPES | 19 |
| I.16.1 Pompe volumétrique..... | 20 |
| I.16.2 Pompe centrifuge : | 20 |

| | | |
|---------------|--|-----------|
| I.17 | SYSTEME DE POMPAGE EOLIEN A ETUDIER | 21 |
| I.18 | CONCLUSION..... | 21 |
| | | |
| II. | CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CHAINE ETUDIEE | 25 |
| | | |
| II.1 | INTRODUCTION | 25 |
| II.2 | DESCRIPTION DU SYSTEME A ETUDIER..... | 25 |
| II.3 | MODELISATION DE LA PARTIE MECANIQUE | 26 |
| II.3.1 | Le vent..... | 26 |
| II.3.2 | La Turbine Eolienne | 26 |
| II.3.3 | Le multiplicateur..... | 29 |
| II.3.4 | L'arbre mécanique..... | 29 |
| II.4 | MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS | 29 |
| II.4.2 | Equations électriques..... | 30 |
| II.4.3 | Equation mécanique | 32 |
| II.4.4 | Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park | 32 |
| II.5 | MODELISATION DE CONVERTISSEUR | 34 |
| II.5.1 | Redresseurs a commande MLI | 35 |
| II.5.2 | Modèle du bus continu..... | 36 |
| II.5.3 | Modélisations de l'onduleur | 37 |
| II.6 | MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL | 39 |
| II.6.1 | Équations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil | 40 |
| II.7 | MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE..... | 44 |
| II.8 | CONCLUSION..... | 46 |
| | | |
| III. | CHAPITRE III : CONTROLE ET OPTIMISATION DU SYSTEME | |
| ETUDIE | 47 | |
| | | |
| III.1 | INTRODUCTION | 47 |
| III.2 | LE PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE..... | 47 |
| III.2.1 | Commande vectorielle directe | 47 |
| III.2.2 | Commande vectorielle indirecte | 47 |
| III.3 | CONTROLE DU COURANT PAR HYSTERESIS DE REDRESSEUR..... | 48 |
| III.4 | COMMANDE MLI DE L'ONDULEUR | 49 |
| III.5 | COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS | |
| PERMANENTS | 50 | |
| III.5.1 | Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP | 50 |
| III.6 | DESCRIPTION DE LA PREMIERE PARTIE (GENERATEUR EOLIEN) | 51 |
| III.6.1 | Régulation de tension V_{dc} | 52 |
| III.6.2 | Productions de la puissance maximale de la turbine (MPPT) | 52 |
| III.6.3 | Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse | 53 |
| III.7 | COMMANDE VECTORIELLE DE MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL ... | 54 |

| | | |
|----------|---|-----|
| III.7.1 | Choix d'orientation du flux | 54 |
| III.7.2 | Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté..... | 56 |
| III.7.3 | Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique | 57 |
| III.7.4 | Bloc de découplage par retour d'état..... | 57 |
| III.8 | FILTRE POUR LE REGLAGE DE LA VITESSE | 58 |
| III.9 | REGULATION DES COURANTS STATORIQUES | 60 |
| III.10 | DESCRIPTION DE LA DEUXIEME PARTIE (ASSOCIATION MOTOPOMPE) | 61 |
| III.11 | DESCRIPTION DE LA TROISIEME PARTIE | 62 |
| III.11.1 | Simulation et interprétation des résultats | 62 |
| III.12 | CONCLUSION | 69 |
| | CONCLUSION GENERALE..... | 70 |
| | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 71 |
| | ANNEXE | XII |

Nomenclature**NOTATIONS****I. La turbine**

v : Vitesse du vent (m/s).

v_0 : Composante moyenne du vent.

w_k : Pulsation de l'harmonique.

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre K .

i : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

p_v : Puissance du vent (W).

m : Masse d'air traversant la surface en une seconde.

ρ : Masse volumique de l'air (1.225 kg/m³).

R : Rayon de la pale (m).

p_t : Puissance de la turbine éolienne (W).

λ : Vitesse spécifique.

Ω_t : Vitesse de rotation la turbine (rad/s).

C_p : Coefficient de puissance.

C_{p_max} : Coefficient de puissance maximal.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale.

β : Angle d'orientation des pales (°).

C_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).

J_t : Inertie de la turbine.

II. La GSAP

$[v_a \ v_b \ v_c]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courant des phases statoriques.

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

$[R_s]$: Matrices des résistances statoriques.

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$[L_{s0}]$: Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques.

$[L_{s1}(\theta)]$: Inductance propre d'une phase statorique variable selon la position angulaire du rotor par rapport au stator.

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator ($^\circ$).

φ_f : Flux des aimants permanents (Wb).

J_g : Inertie de la génératrice (kg.m^2).

J : Inertie totale (kg.m^2).

Ω_g : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

f_g : Coefficient de frottement visqueux de la génératrice.

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m).

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d,q) (V).

$[V_{dqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o).

$p(\theta)$: Matrice de transformation de Park.

$[p(\theta)]^{-1}$: Matrice de transformation de Park inverse.

i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (wb).

P_1 : Nombre de paires de pôles de la GSAP.

L_d, L_q : Inductances direct et quadratique (H).

III. La MAS

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions des phases statoriques.

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions des phases rotoriques.

R_r : Résistance rotorique (Ohm).

R_s : Résistance statorique (Ohm).

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants de phases statoriques (A).

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants de phases rotorique(A).

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques en weber (w).

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$: Flux totaux traversant les bobinages rotoriques.

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statoriques (V).

$[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotorique (V).

$[I_{sabc}]$: Matrice des courants rotorique (A).

$[I_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques (A).

$[\varphi_{sabc}]$: Matrice des flux statorique.

$[\varphi_{rabc}]$: Matrice des flux rotoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statorique.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotorique. ;

$[L_s]$: Matrice d'inductances statorique.

$[L_r]$: Matrice d'inductances rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

$[M_{sr}]$: représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotorique.

ω : Vitesse mécanique[rad/s].

ω_s, ω_r : Vitesse statorique et rotorique[rd/s].

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique direct et quadratique.

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadratique.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux rotorique direct et quadratique.

I_{rd}, I_{rq} : Courant statorique direct et quadratique.

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Flux rotorique direct et quadratique.

L_s, L_r : Inductance cyclique statorique et rotorique.

I_s, I_r : Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique.

M : Inductance cyclique mutuelle (H).

M_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

$\varphi_{mq}, \varphi_{md}$: flux magnétisant selon l'axe d et q.

ω_s, ω_r : Vitesse statorique et rotorique[rd/s].

T_r : Constante de temps rotorique (s).

T_s : Constante de temps statorique (s).

σ : Le coefficient de la fuite totale.

IV. Convertisseurs

IV.1 Redresseur

V_1, V_2, V_3 : Tension de référence (V).

i_{red} : Courant redressé (A).

i_a, i_b, i_c : Courants à l'entrée de redresseur (A).

s_1, s_2, s_3 : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

i_{ca} : Courant de la capacité (A).

i_{ond} : Courant de l'onduleur (A).

C : Capacité (F).

IV.2 Onduleur

$V_{an0}, V_{bn0}, V_{cn0}$: Tensions à la sortie de l'onduleur (V).

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tensions de phase de la charge (V).

s_a, s_b, s_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

F_p, F_{ref}, m : Fréquences de la porteuse et de la référence et indice de modulation.

V_p, V_{ref}, r : Amplitude de tension de la porteuse, amplitude de tension de référence, et coefficient de réglage de tension respectivement.

V. Pompe

p_{mec} : Puissance mécanique (W).

K_r : Coefficient de proportionnalité.

C_r : Couple résistant (N.m).

P_h : Puissance hydraulique (W).

ρ : Masse volumique d'eau (1000kg/m³).

H : Hauteur manométrique (m)

Q : Débit volumique (m³/s)

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s²)

Ω : Vitesse du moteur qui entraîne la pompe (rad/s)

VI. Régulateurs

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral.

Abréviations

MLI : Modulation de la largeur d'impulsion.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel intégrale.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents.

GAS : Génératrice asynchrone.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu (Direct curent).

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

GTO:Gate turn-off thyristor.

Listes des figures

FIGURE I-1:CONVERSION DE L'ENERGIE CINETIQUE DU VENT 2

FIGURE I-2:ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UNE EOLIENNE 4

FIGURE I-3:EOLIENNES A AXE HORIZONTAL [6]..... 5

FIGURE I-4:EOLIENNE A AXE VERTICAL [6] 6

FIGURE I-5:VARIATION DE LA PUISSANCE EOLIENNE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT [5]. 8

FIGURE I-6:DIAGRAMME DE LA PUISSANCE UTILE SUR L'ARBRE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT [10]..... 10

FIGURE I-7:MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT [12] 11

FIGURE I-8:MACHINES SYNCHRONES A ROTOR BOBINE [13]..... 12

FIGURE I-9:STATOR AVANT LE BOBINAGE STATOR APRES LE BOBINAGE [9] 13

FIGURE I-10:ROTOR BOBINE [11] 13

FIGURE I-11:ROTOR A CAGE D'ECUREUIL [14] 14

FIGURE I-12:MULTIPLICATEUR DE VITESSE [15] 14

FIGURE I-13: COEFFICIENT AERODYNAMIQUE DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION [17] ... 15

FIGURE I-14:SYSTEME DE POMPAGE EOLIEN 16

FIGURE I-15:SCHEMA D'UNE EOLIENNE DE POMPAGE D'EAU MECANIQUE [22] 17

FIGURE I-16:EOLIENNE DE POMPAGE D'EAU ELECTRIQUE [19]..... 18

FIGURE I-17:DOMAINES D'UTILISATION DES POMPES VOLUMETRIQUES ET CENTRIFUGES [24] 19

FIGURE I-18:POMPE CENTRIFUGE POMPE VOLUMETRIQUE A DISQUE EXCENTRE 20

FIGURE II-1:STRUCTURE D'UNE CHAINE DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE 25

FIGURE II-2:SCHEMA BLOC DE PROFILE DE VENT 26

FIGURE II-3:CARACTERISTIQUES C_p (A, B) DE L'EOLIENNE UTILISEE 28

FIGURE II-4:PASSAGE DU REPERE NATUREL ABC DU STATOR AU REPERE DQ DE PARK 32

FIGURE II-5:CONVERTISSEUR STATIQUE MLI 35

FIGURE II-6:MACHINE SYNCHRONE CONNECTEE A UN REDRESSEUR A MLI..... 35

FIGURE II-7:SCHEMA SIMPLE DU CIRCUIT DU BUS CONTINU 37

FIGURE II-8:SCHEMA DE L'ONDULEUR TRIPHASE A DEUX NIVEAUX [50]..... 37

FIGURE II-9:REPRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL..... 40

FIGURE II-10:MODELE DE PARK DE MOTEUR ASYNCHRONE..... 42

FIGURE II-11:SCHEMA D'UNE POMPE CENTRIFUGE [58] 45

FIGURE III-1:PRINCIPE DE CONTROLE DU COURANT PAR HYSTERESIS 48

FIGURE III-2:SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA MLI 49

FIGURE III-3:REPRESENTATION SPATIALE DE L'ORIENTATION DU FLUX ROTORIQUE DANS UNE MSAP 51

FIGURE III-4:SCHEMA BLOC DE COMMANDE DE GENERATEUR EOLIEN 52

FIGURE III-5:SCHEMA BLOC DE LA REGULATION DE V_{dc} 52

FIGURE III-6:SCHEMA BLOC DE MPPT SANS ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE 54

FIGURE III-7:ORIENTATION DU FLUX (ROTORIQUE, STATORIQUE, D'ENTREFER) 54

FIGURE III-8:SCHEMA BLOC DE DECOUPLAGE PAR RETOUR D'ETAT 58

FIGURE III-9:SCHEMA FONCTIONNEL DE REGULATION DE VITESSE AVEC FILTRE 59

| | |
|--|----|
| FIGURE III-10: SCHEMA DE DEFUXAGE | 60 |
| FIGURE III-11: SCHEMA DE LA BOUCLE DE REGULATION DES COURANTS STATORIQUES | 61 |
| FIGURE III-12: SCHEMA GLOBALE DU SYSTEME DE POMPAGE EOLIEN | 62 |
| FIGURE III-13: ALLURE UTILISEE DE LA VITESSE DU VENT..... | 63 |
| FIGURE III-14: RESULTATS DE SIMULATION DE LA TURBINE..... | 64 |
| FIGURE III-15: RESULTATS DE SIMULATION DE LA GENERATRICE..... | 65 |
| FIGURE III-16: RESULTATS DE SIMULATION DE LA CHAINE MOTOPOMPE..... | 68 |
| FIGURE III-17: ALLURE DE RENDEMENT GLOBAL | 69 |

Introduction générale

Introduction générale

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter, est devenue un élément fondamental très importantes dans notre vie à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques est industriels.

La grande partie de l'énergie consommée, d'origines principalement fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les plus répondus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂ [1], qui ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, de plus les combustibles fossiles ont un impact négatif sur l'environnement, comme l'effet de serre.

Alors c'est obligé de chercher d'autres solution pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes est plus économiques. Est sortante dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles.

Dans ce cadre, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor, est l'une des croissances les plus rapides de sources d'énergie dans le monde, Aujourd'hui la production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs et plus de parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport aux sources classiques d'énergie, même sans incitation [2]. Jour après jour cette filière d'énergie connaît un développement sur les plans techniques et économique. Et elle joue le rôle de complément aux productions d'énergie classique.

La présente étude porte sur l'application de l'éolien pour la production de l'énergie mécanique utilisée pour le pompage de l'eau. Cette technique est bien adaptée pour satisfaire les besoins en eau (agriculture, consommation domestique...) de sites isolés, notamment de quelques sites ventés situés dans les hauts plateaux du volume de pompage.

Dans le premier chapitre, on présent un rappel sur les notions essentielles de l'énergie éolienne, en faisant une description générale sur ces différents types, ses avantage et inconvénients, des détails sur la constitution d'une éolienne et les différents composants d'un système éolienne.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modalisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, composée d'une partie mécanique et une partie électrique.

Le troisième chapitre présentera le but et la définition de la commande vectorielle appliqué à deux machines synchrones à aimant est la machine asynchrone a cage d'écureuil l'une en fonctionnement génératrice (GSAP) et l'autre en fonctionnement moteur (MAS), on

appliquera aussi la technique MPPT à la turbine afin de produire un maximum de puissance. Les résultats de simulation de toute la chaîne étudiée seront présentés à la fin de ce chapitre.

Notre travail sera achevé par une conclusion générale et quelques perspectives pour d'éventuelles contributions futures.

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage éolien

Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Une éolienne est une installation qui convertit la puissance du vent en énergie électrique, est l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus compétitives est dynamique dans le monde.

Dans ce chapitre on va rappeler quelques notions essentielles sur l'énergie éolienne, en faisant une représentation générale sur différents types d'éolienne, ses avantages et inconvénients. Des détails sur la constitution d'une éolienne et les différents composants de la chaîne de production de cette énergie seront aussi présentés.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Energie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être utilisée pour alimenter une pompe (figure I-1) [3].

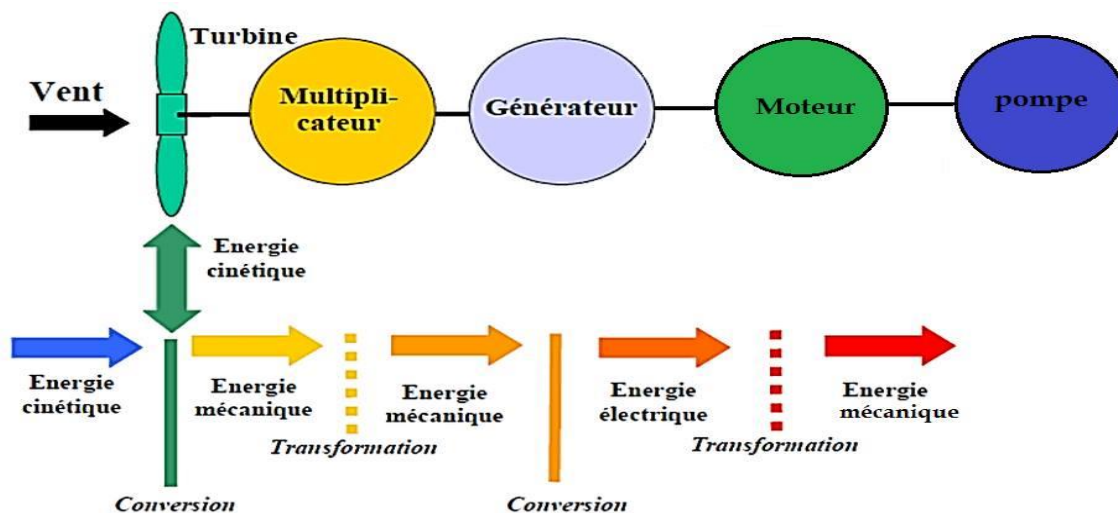


Figure I-1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3 Structure d'un système de conversion d'énergie éolienne

L'ensemble des composants d'un système de conversion d'énergie éolienne ordinaire est : une turbine, une génératrice triphasée, une charge, un dispositif d'interconnexion et un système de contrôle [4].

- Turbine éolienne : elle dispose de pales et d'autres composantes, elle représente l'organe qui capte le vent
- Générateur électrique : il convertit l'énergie cinétique de vent en énergie électrique
- Un système de commande et de régulation pour assurer la conversion optimale en énergie stationnaire et dynamique
- Multiplicateur de vitesse : l'arbre principal tourne à faible vitesse et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur. Par la suite, celui-ci transforme cette force : au lieu d'une rotation à faible vitesse avec une grande force, on obtient une rotation avec une vitesse importante et une petite force.
- La charge : elle reçoit l'énergie produit par l'éolienne

I.4 Les composantes d'une éolienne

- **Le rotor** : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une Vitesse de 5 à 25 tours par minute.
- **La nacelle** : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **La tour** : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.
- **La base** : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.
- **Un mât** : Il permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), ou à une hauteur où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.). Les mâts sont généralement en acier, mais des mâts de béton sont de plus en plus utilisés par certains producteurs.
- **Les pales** : elles captent le vent et transforment sa puissance en énergie mécanique au moyeu du rotor.
- **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.
- **Le moyeu** : est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine [5].

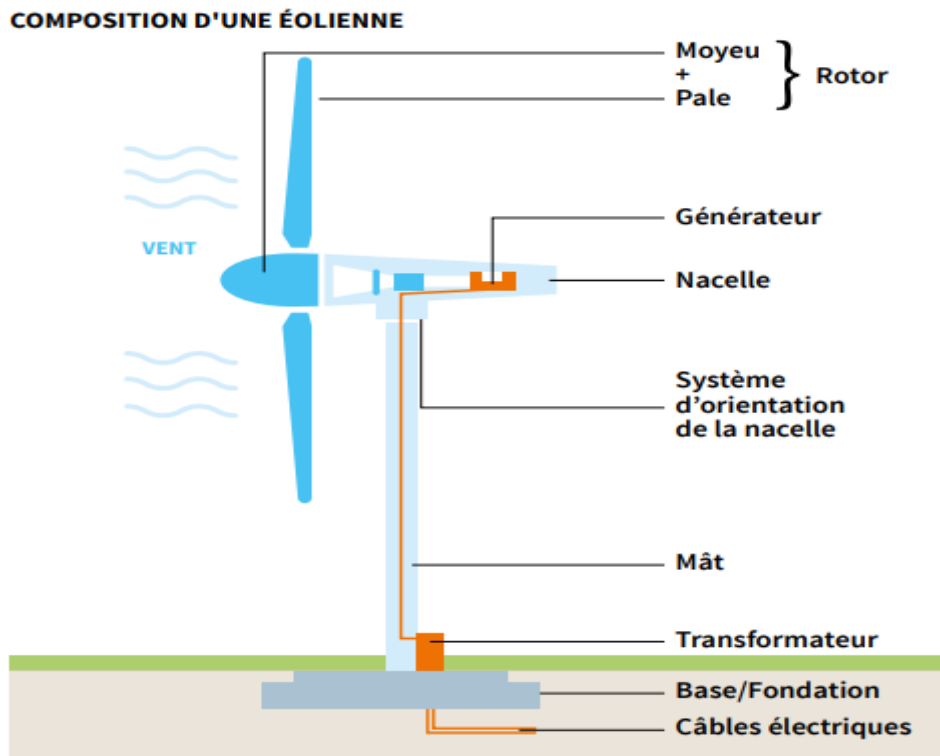


Figure I-2:Eléments constitutifs d'une éolienne

I.5 Types d'éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes choisis principalement en fonction de leur lieu géographique [6] :

I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales. Ce sont celles les plus courantes. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.



Figure I-3:Eoliennes à axe horizontal [6]

I.5.1.1 Avantages

- Son rendement est élevé
- Elle est équipée d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent
- Les frais de fonctionnement sont faibles
- Elle est moins exposée aux contraintes mécaniques que celle de l'éolienne à axe vertical
- Son coût est moins important que l'éolienne à axe vertical
- Elle est mieux adaptée au secteur rural
- Elle est plus solide

I.5.1.2 Inconvénients

- Elle est moins simple que l'éolienne à axe verticale
- Les pales des rotors doivent être non flexibles
- Elle fait beaucoup de bruit
- Il y a moins de sécurité pour les oiseaux car elle tourne à haute vitesse.

I.5.2 Les éoliennes à axe vertical

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles n'ont besoin d'aucun système pour les orienter dans la direction du vent, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent [6].



Figure I-4:Eolienne à axe vertical [6]

I.5.2.1 Avantages

- Sa conception est plus simple que l'éolienne à axe horizontal
- Elle est plus facile d'accès
- Elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, ce qui constitue un avantage de construction non négligeable
- Lors du fonctionnement, elle n'est pas soumise aux contraintes importantes sur les pales, les roulements et les axes dues aux changements d'orientations.

I.5.2.2 Inconvénients

- Son rendement est médiocre, ce qui n'a pas facilité son développement
- Le rotor se situe en général très près du sol, les vents sont donc très faibles dans la partie inférieure du rotor
- Elle ne démarre pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne
- Un démontage complet de l'éolienne est nécessaire pour procéder au remplacement du palier principal du rotor
- Il n'y a aucun système d'orientation au vent.

I.6 Classification des éoliennes

Quelles soient à axe vertical ou horizontal, les éoliennes sont classifiées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Les éoliennes de petite puissance : moins de 40KW.
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40KW à quelques centaines de KW.
- Les éoliennes de grande puissance : 1MW et plus.

I.7 Mode de fonctionnement

D'une manière générale, il existe deux modes de fonctionnement des éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable.

I.7.1 Eolienne à vitesse constante

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est réglée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (Pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [7].

I.7.2 Eolienne à vitesse variable

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne.

Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance.

De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible [6].

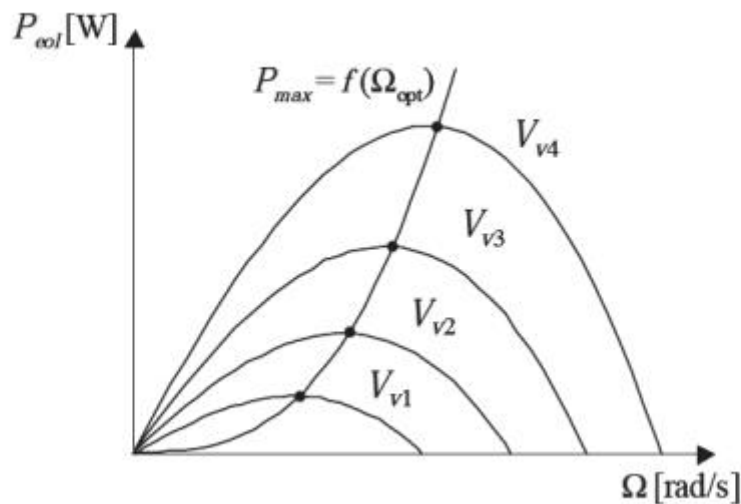


Figure I-5: Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [5].

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie inépuisable, cette source est disponible à volonté, grâce à cette énergie peu polluante, on peut envisager un système de production énergétique prolifique plus respectueux de la nature. Si l'énergie renouvelable possède de nombreux avantages, on recense également quelques inconvénients à leur exploitation [5].

I.8.1 Avantages de l'éolien

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'était fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.

- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

I.8.2 Inconvénients de l'éolien

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.9 Zone de fonctionnement d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale (P_n) à partir d'une vitesse de vent nominale (V_n). Pour des vitesses de vents supérieures à (V_n), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : (V_D) la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et (V_M) la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Après une partie (I) ou aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieur à la vitesse du démarrage (V_D) une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de turbine (MPPT : Maximum Power Point Tracking) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (I). Quand la puissance nominale (P_n) est atteinte, elle doit être limitée (III). Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent la turbine doit être arrêtée (IV) [9].

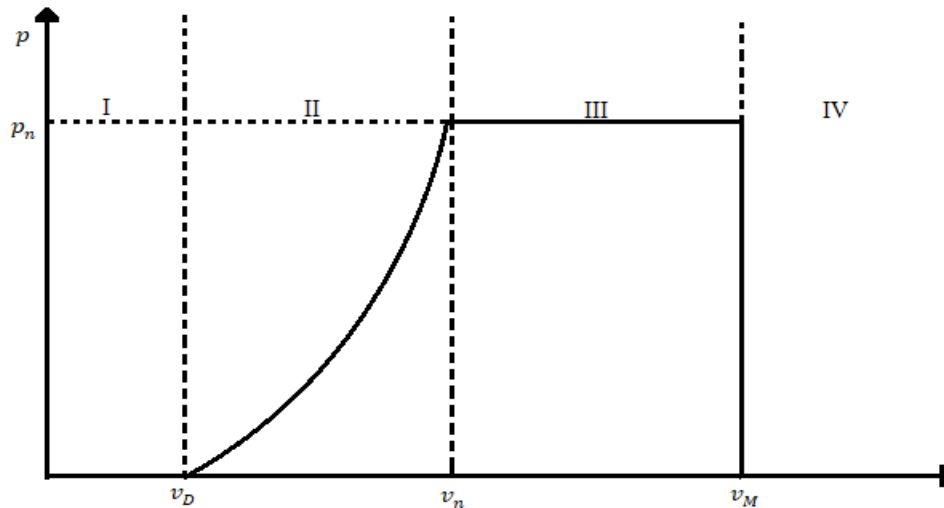


Figure I-6: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [10]

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- La zone I, où $p_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_{vent} ;
- La zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance $p_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- **Système « pitch » ou « à pas ou calage variable »** : qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses ;
- **Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique »** : le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch. [10]

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal.
- Pas variable par la pression du vent (modèle Air Wind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage) ;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et

créé une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

I.10 Les machines génératrices à CA

Transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique [11].

I.10.1 Machines synchrones

Les génératrices synchrones triphasées ou les alternateurs triphasés sont la source primaire de l'énergie que nous consommons. Ces machines sont les plus gros convertisseurs d'énergie du monde. Elles transforment l'énergie mécanique, produit par une turbine, en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500MW.

I.10.1.1 Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone, regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour une machine synchrone à aimants permanents, un tel fonctionnement est obtenu grâce au champ magnétique rotorique généré par des aimants. En réalité, une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible. Elle peut fonctionner en mode moteur tout comme en mode générateur. Sa particularité par rapport aux autres machines conventionnelles, réside au niveau du champ magnétique produit par les aimants permanents au rotor. Mais son bobinage statorique reste identique à celui des autres machines.

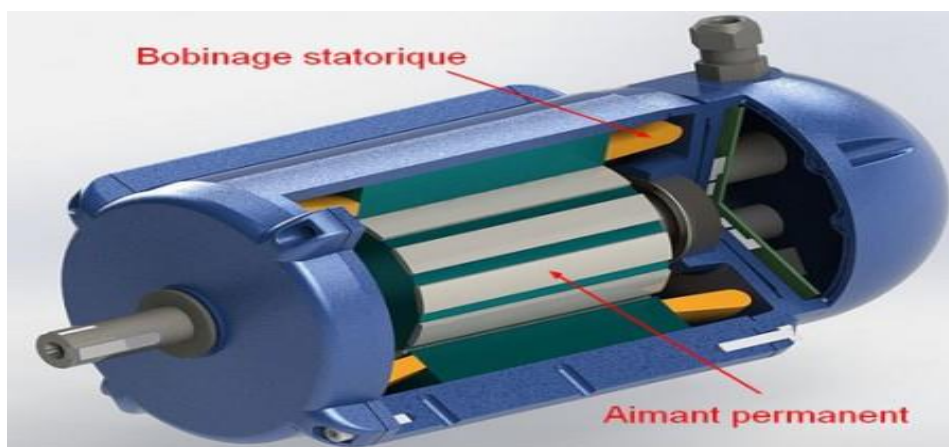


Figure I-7: Machine synchrone à aimant permanent [12]

I.10.1.2 Machines synchrones à rotor bobiné

Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.

Comme la montre la figure ci-dessous, le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. Comme dans le stator du moteur, des enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor et reliés électriquement aux bagues de bout d'arbre. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais.



Figure I-8: Machines synchrones à rotor bobiné [13]

I.10.2 Machines triphasées à induction (machines asynchrones)

Une machine à induction triphasée comprend deux parties principales, le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile).

1. Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles ferromagnétiques identiques qui constituent un cylindre creux ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé $2p$ polaires. Ce bobinage logé dans le circuit magnétique est appelé primaire de la machine asynchrone (Figure I-9).

2. Le rotor se compose d'un cylindre de tôles ferromagnétiques poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il existe deux types de rotor ; le rotor bobiné et rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).

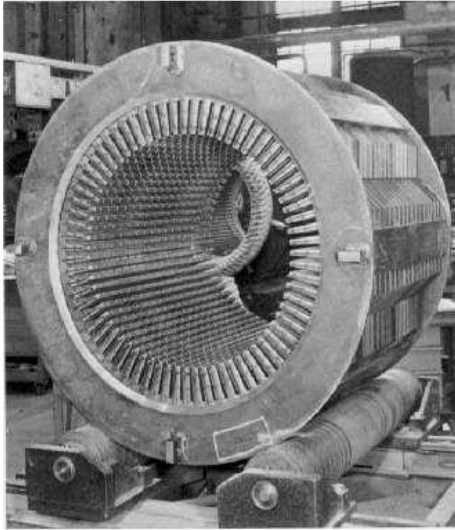
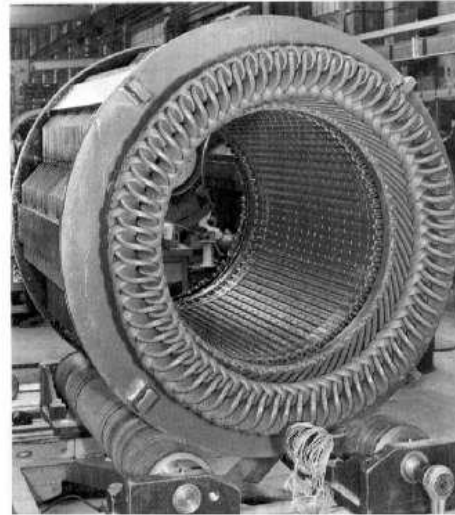


Figure I-9: Stator avant le bobinage



Stator après le bobinage [9]

I.10.2.1 Machines asynchrones à rotor bobiné

Le rotor bobiné comprend un bobinage généralement triphasé logé dans les encoches, de même nombre de paires de pôle que le primaire. Ce bobinage dit secondaire de la machine asynchrone est le plus souvent connecté en étoile ; les sommets de l'étoile sont reliés à des bagues portées sur l'arbre de la machine et sur lesquelles frottent des balais isolés (les bagues aussi sont électriquement isolées).

Ces bagues permettent, par l'intermédiaire des balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements du bobinage triphasé. Ces résistances sont utilisées au démarrage de la machine asynchrone. En fonctionnement normal les trois balais sont courts circuités.



Figure I-10: Rotor bobiné [11]

I.10.2.2 Machines asynchrones à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

Le rotor à cage d'écureuil est constitué de barres conductrices nues (en cuivre ou en aluminium) traversant l'empilement de tôles du rotor, parallèlement à l'axe, et court circuitées, aux deux extrémités de la machine, par des anneaux conducteurs de faible résistance.

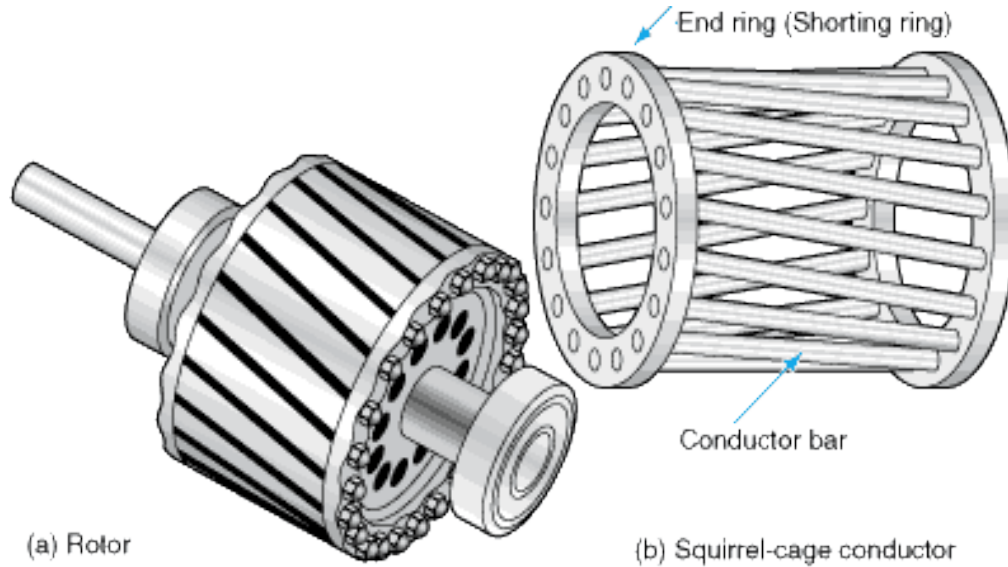


Figure I-11:Rotor à cage d'écureuil [14]

I.11 L'accouplement mécanique

Le multiplicateur aussi appelé boîte de vitesse permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice [15].



Figure I-12:Multiplicateur de vitesse [15]

I.12 Nombre de pales

Le rendement théorique maximal d'une éolienne à axe horizontal est fixé par le nombre de BETZ et vaut : 59%. En théorie, le nombre de pales n'influe pas directement sur le rendement. Le rendement est fonction de la puissance motrice recueillie et dépend principalement de la vitesse de rotation en bout de pale appelée Vitesse Spécifique.

Concrètement, des pales très grandes et tournant très vite, peuvent permettre de se rapprocher des 59%. Qu'il y en ait 2 ou 50 n'influe pas forcément. Par contre pour des raisons aérodynamiques mais aussi de contraintes technologiques et de prix, afin d'avoir des éoliennes dites "rapides", il est plus facile d'avoir des éoliennes bipales ou tripales. L'augmentation du nombre de pales entraînant nécessairement une baisse de la vitesse de rotation par perturbation aérodynamique, une augmentation inutile de la complexité et du prix de l'ensemble [16].

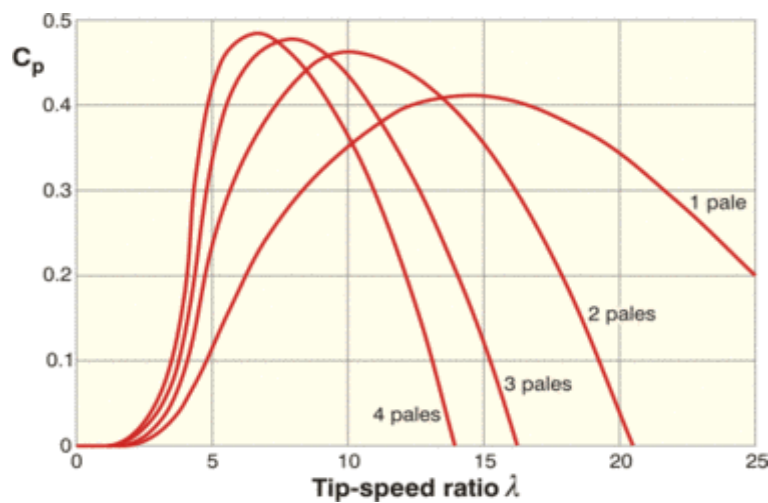


Figure I-13: Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation [17]

I.13 Modes de couplage au réseau et réseaux autonomes

On a deux catégories de systèmes de production d'énergie [4] :

- Les localités isolées où l'énergie produite est consommée dans le même endroit ou à proximité du générateur d'un réseau local (faible).
- Les systèmes connectés au réseau national.

I.14 Description d'un système de pompage

Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure(I-14) :

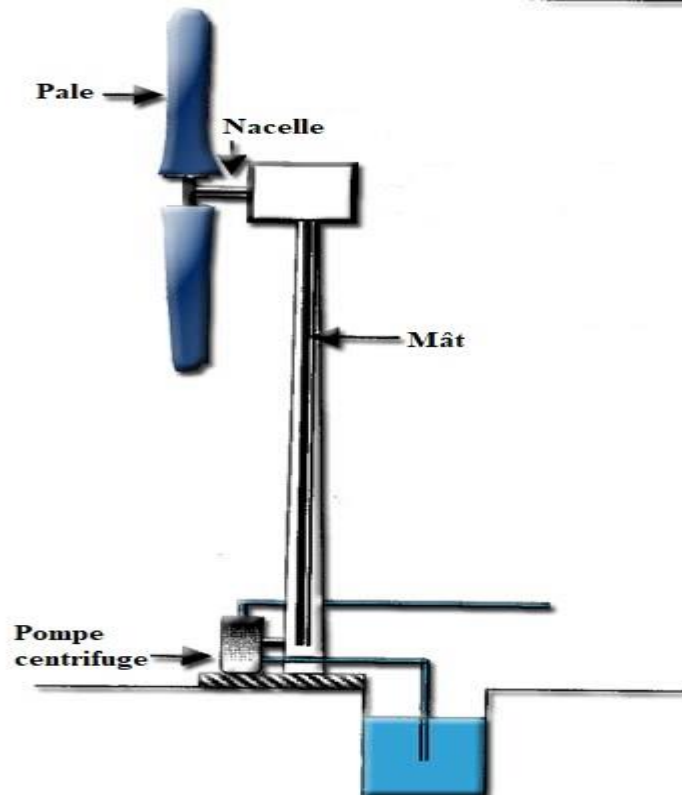


Figure I-14: Système de pompage éolien

Il est constitué principalement [18] :

- D'un générateur éolien.
- De convertisseurs statiques « redresseur + onduleur ».
- D'un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe.

Les avantages de choix de système sont :

- Production 100%
- Pas de souci d'environnement, n'émet pas des gaz à effet de serre

I.14.1 Le pompage éolien

Les éoliennes pompées sont utilisées pour pomper l'eau des puits depuis l'Antiquité. Cet usage est devenu populaire auprès des particuliers, notamment en milieu rural, afin d'économiser de l'énergie et de pomper efficacement l'eau à moindre coût.

Ce système présente également des avantages en raison de sa souplesse d'installation, de son bon réglage et de sa maintenance réduite, mais il présente également des inconvénients tels qu'un coût élevé et un rendement élevé uniquement sous des vents violents (4 à 12 m/s). Afin de répondre aux besoins des jours éventuellement venteux [19].

Il existe deux types de pompage :

- Système mécanique.
- Système électrique.

I.14.2 Les différents systèmes de pompes d'eau

I.14.2.1 Eolienne de pompage d'eau mécanique

Son principe de fonctionnement comprend : un rotor éolien d'environ 20 pales entraîné par un système de bielle à manivelle, et une pompe à piston immergée dans le fond du puits (Figure I-15). Le système est adapté aux zones venteuses, la demande quotidienne en eau ne dépasse pas 20 m³ et la profondeur du puits ne dépasse pas 50 m. Pour les puits plus profonds, la quantité d'eau pompée est faible, et le risque de tiges de pompage augmentera en cas de contrainte mécanique [20].

Comme toute éolienne, cette éolienne présente ces avantages et inconvénients. Ils sont généralement fiables, faciles d'entretien et d'un prix raisonnable. La principale limitation est qu'ils doivent être installés directement au-dessus du puits ou du bassin, même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance du puits [21].

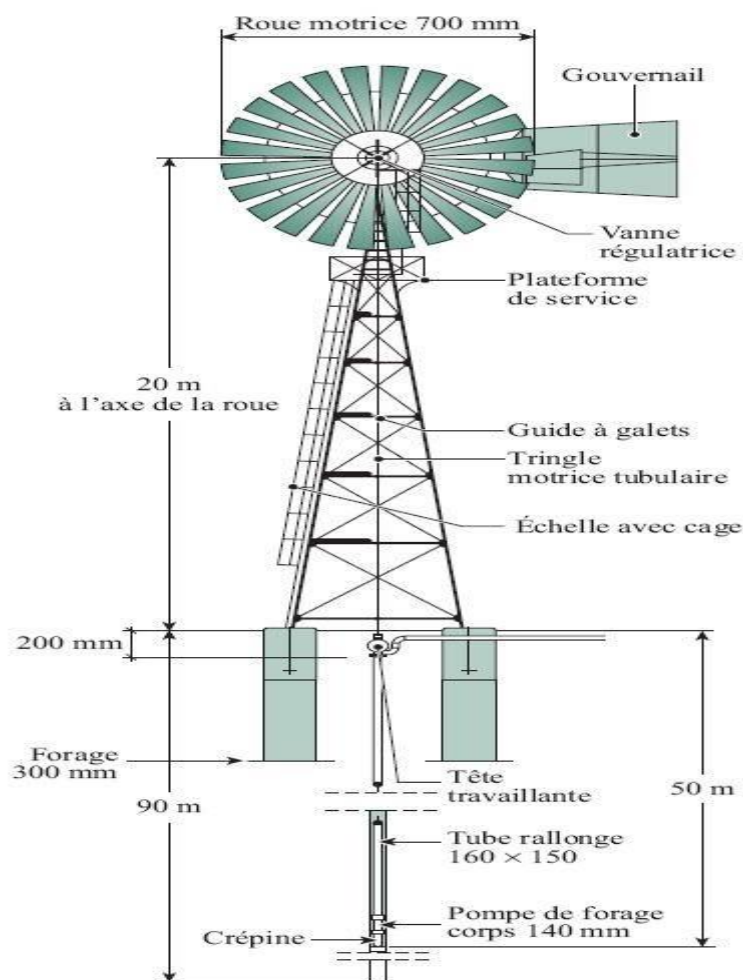


Figure I-15: Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique [22]

I.14.2.2 Eolienne de pompage d'eau électrique

Contrairement aux systèmes mécaniques, les systèmes éoliens n'ont pas besoin d'être situés près de la source d'approvisionnement en eau. Le système commande une pompe

électrique (après avoir converti l'énergie mécanique en électricité), qui puise l'eau à la source (puits ou autre...) et la refoule sur le lieu d'utilisation (système d'irrigation, abreuvoir à bétail...).

L'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, utilisant ainsi efficacement l'énergie éolienne. Les éoliennes à pompage électrique n'incluent pas les batteries. L'eau est stockée dans un réservoir comme réserve d'énergie [17].

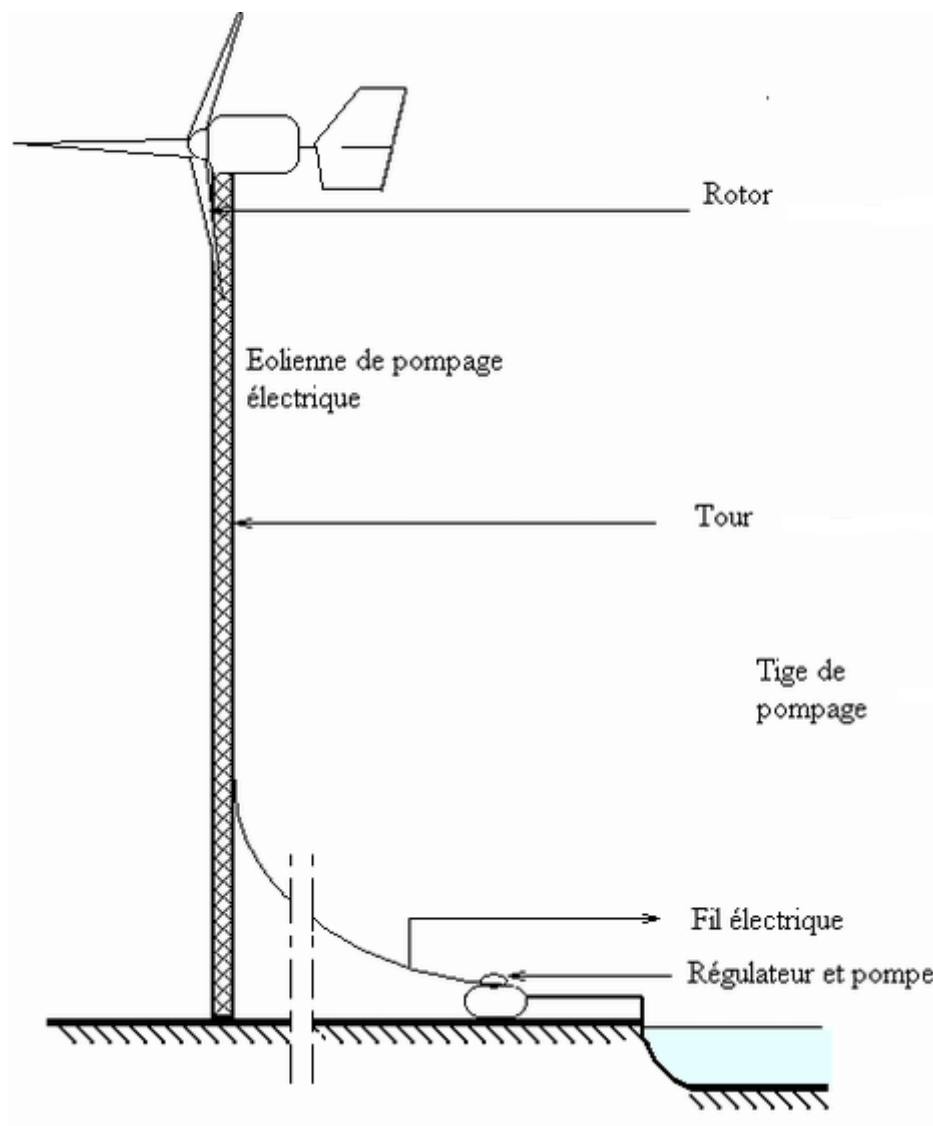


Figure I-16: Eolienne de pompage d'eau électrique [19]

I.15 Pompes hydrauliques

I.15.1 Description d'une pompe

Une pompe est une machine tournante qui transfère de l'énergie entre son propre arbre et le fluide en mouvement, ce dernier en surmontant la gravité. Cette transmission se traduit par une augmentation de l'énergie du fluide en fournissant de l'énergie mécanique à l'arbre de la machine.

I.15.2 Caractéristiques générales des pompes

Les caractéristiques des pompes sont [23] :

- Le débit fourni (Q) par une pompe est le volume d'eau qu'elle refoule par unité de temps. Il s'exprime en litres par minute (l/min) ou, en mètres cubes par heure (m^3/h) ;
- La hauteur manométrique (H) qui tient compte des pertes de charge du circuit hydraulique ainsi que la différence entre le niveau d'aspiration et le niveau de refoulement. Ce paramètre est exprimé en mètres de fluide (mètres de colonne d'eau) et diminue généralement en fonction du débit pompé.

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales selon le débit et la pression voulue comme le montre la figure(I-17) :

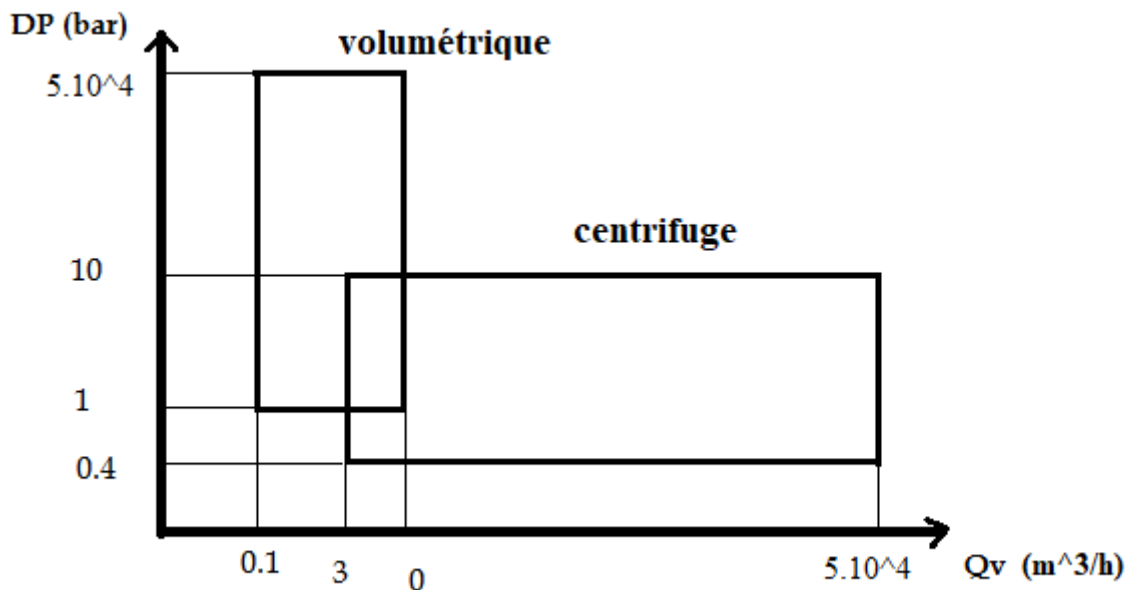


Figure I-17: Domaines d'utilisation des pompes volumétriques et centrifuges [24]

I.16 Classification des pompes

Suivant les modes des déplacements des liquides à l'intérieur des pompes, on classe ces dernières en deux grandes familles :

- Les turbopompes,
- Les pompes volumétriques.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges [25].

Dans les turbopompes une roue, munie d'aubes ou d'ailettes, animée d'un mouvement de rotation, fournit au fluide de l'énergie cinétique dont une partie est transformée en pression, par réduction de vitesse dans un organe appelé récupérateur [25].

Dans les pompes volumétriques, l'énergie est fournie par les variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement (grand encombrement) [25].



Figure I-18: Pompe centrifuge pompe volumétrique à disque excentré

I.16.1 Pompe volumétrique

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Ce déplacement est cyclique. Pendant un cycle, un volume de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé. Une pompe volumétrique est constituée [26] :

- D'un corps fixe ou stator.
- D'un ou de plusieurs éléments mobiles participant au déplacement de fluide à l'intérieur de la pompe.
- D'autres éléments mobiles destinés à mettre en mouvement les éléments précédents.

Pour ce type de pompe l'entrée et la sortie sont non communicantes grâce à une étanchéité interne, ainsi les fuites seront minimales et les pressions importantes.

I.16.2 Pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le moyen le plus simple et le plus répandu pour véhiculer des liquides est la pompe centrifuge qui est aussi le moyen le plus économique [27].

Cela s'explique par leurs caractéristiques suivantes [28] :

- Construction robuste,
- Conception simple,
- Coûts de fabrication peu élevés,
- Possibilité de régulation

La théorie du fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée. Cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique. L'énergie du fluide augmente en lui donnant une accélération tangentielle (ou rotation par rapport à l'axe de l'écoulement) durant son passage dans la pompe. Cette énergie est fournie par la roue, est entraînée par un moteur. Pour donner cette accélération tangentielle au fluide, les aubes de la roue poussent le fluide vers l'extérieur [29].

Dans ce travail on a choisi d'utiliser la pompe centrifuge car sa caractéristique couple-vitesse est proche de la caractéristique puissance-vitesse de la turbine.

I.17 Système de pompage éolien à étudier

Avant de conclure ce chapitre, nous avons décrit les différents composants de notre système de pompage éolien. Ce dernier est constitué d'une 'éolienne, d'un générateur synchrone à aimants permanents à terre rare, qui permet d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, ainsi qu'un système de commande (un redresseur MLI et un onduleur MLI), qui nous permette de commander la puissance. Qui est connecté à un groupe motopompe qui se compose d'une machine asynchrone vu sa robustesse, Et finalement, on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un coût réduit, et couvre une large gamme d'utilisation de sa vitesse.

I.18 Conclusion

Après un rappel des notions nécessaires de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits, ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur.

Nous avons abordé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens, ainsi que les différentes méthodes de commande et de contrôle employées pour améliorer leur efficacité énergétique.

Chapitre II : Modélisation de la chaîne étudiée

Chapitre II : Modélisation de la chaîne étudiée

II.1 Introduction

Après avoir fait dans ce premier chapitre un rappel des notions nécessaires sur la production d'énergie éolienne en général, des types de machines utilisés, différents structures de convertisseurs exploités et tous les composants du système de pompage éolien, nous procédons à la modélisation et contrôle de notre système.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation qui nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. On doit connaître alors les critères d'entrées (données de base), c'est-à-dire les données météorologiques du site.

II.2 Description du système à étudier

Avant de conclure ce chapitre, nous décrivons les différents constituants de notre système de pompage éolien. Le schéma général de système peut être représenté par la figure (II-1) est constitué principalement par :

- Une turbine éolienne tripale à axe horizontal ;
- Une génératrice synchrone à aimants permanents ;
- Deux convertisseurs statiques MLI ;
- Un groupe motopompe qui comprend un moteur asynchrone à cage d'écureuil et une pompe centrifuge.

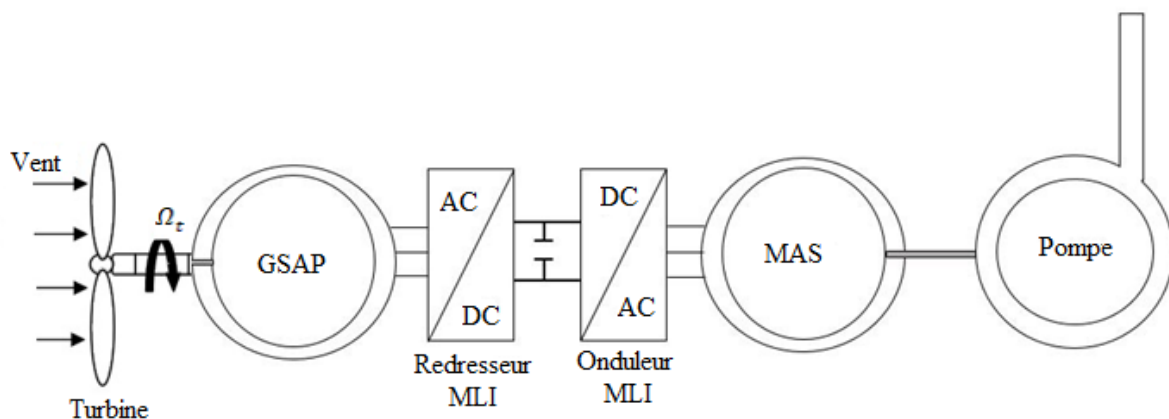


Figure II-1: Structure d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne

II.3 Modélisation de la partie mécanique

II.3.1 Le vent

Le vent est la raison d’être des aérogénérateurs. Son énergie cinétique est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur électrique, Le vent correspond au déplacement d'une masse d'air consécutif à des différences locales de température et de pression. D'une légère brise à une forte tempête, la vitesse et l'amplitude géographique des vents peuvent être très variables dans l'espace et dans le temps [30].

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [31] :

$$V = f(t) \tag{II.1}$$

Dans cette étude, nous avons représenté l’évolution la vitesse de vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques décrit comme suit [32] :

$$V(t) = 11.361 + 0.02 \sin(0.8047t) + 0.9 \sin(0.5665t) + 0.65 \sin(0.8930t) + 0.05 \sin(0.6645t) \tag{II.2}$$

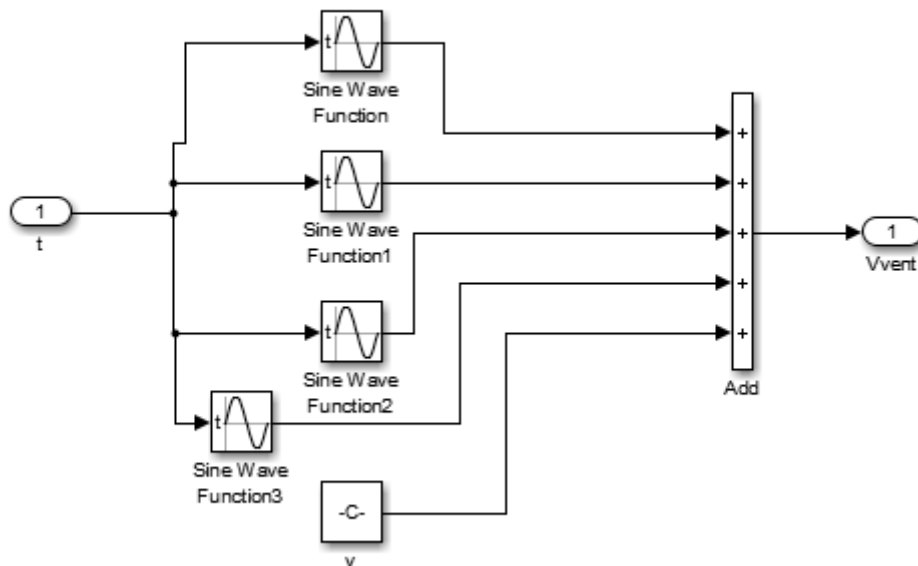


Figure II-2:Schéma bloc de profil de vent

II.3.2 La Turbine Eolienne

L’éolienne capte l’énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l’énergie du vent et l’énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l’air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent *v*. La densité de l’air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [33].

La puissance incidente (la puissance théorique du vent), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne est exprimée comme suit [35] :

$$p_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.3})$$

La surface S est exprimée par : $S = \pi \cdot R^2$

Ce qui donne :

$$p_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 kg/m³ en atmosphère normale).

S : Surface circulaire balayée par la turbine.

R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{vent} : Vitesse du vent (en m/s).

La mise en rotation des pales par le vent crée une puissance mécanique P_t sur l'arbre de la turbine exprimée par :

$$p_t = C_p(\lambda) \cdot P_v \quad (\text{II.5})$$

Avec :

C_p : coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0.59)

Le C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de rayon de la turbine, est de vitesse de la turbine.

En remplaçant P_{vent} par son expression dans (II.5), on obtient :

$$p_t = C_p(\lambda) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.6})$$

La valeur de ce coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine

Où C_p : Coefficient de puissance.

La caractéristique de C_p de l'éolienne étudiée est donnée par la formule approximée suivante [6] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (\text{II.7})$$

Où : $\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}}$ Avec β : Angle d'orientation des pales

Et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ comme suit :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V} \quad (\text{II.9})$$

Où : Ω_t Vitesse de la turbine, R est le rayon de la turbine éolienne et V est sa vitesse de rotation angulaire.

A partir de l'expression de la puissance mécanique de la turbine et connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine est exprimé comme suit :

$$C_t = \frac{p_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v^3 \frac{1}{2\Omega_t}$$

Cette expression de C_p fait partie de la bibliothèque de SIMULINK, et donc sera celle utilisée pour valider le modèle de notre système éolien. La courbe de cette dernière formule est donnée par la Figure (II-3). Plusieurs courbes sont représentées sur cette figure dépendant de l'angle d'attaque β , mais dans ce mémoire nous serons intéressés uniquement par celle correspondant à $\beta=0$. Cela est dû au fait que sur une petite éolienne il n'existe pas de moyen de changer l'angle de calage des pales car cela revient à produire une éolienne plus chère.

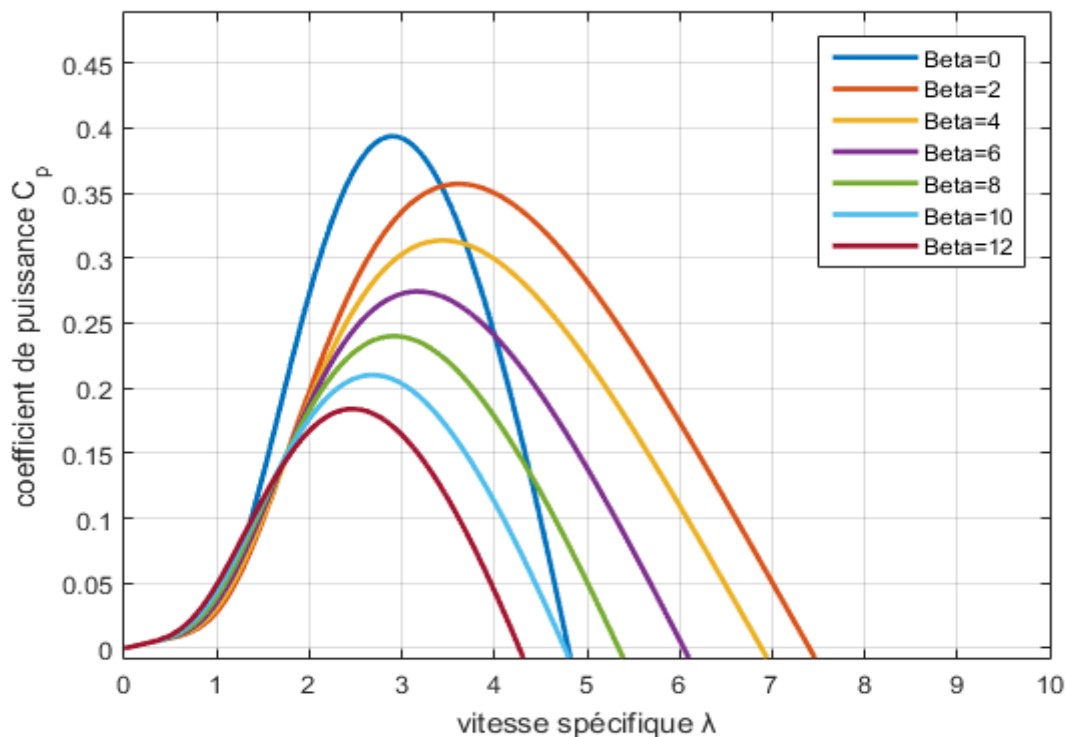


Figure II-3: Caractéristiques $C_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne utilisée

II.3.3 Le multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. A pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_T , le multiplicateur est supposé rigide et défini par un simple gain. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles [36].

Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.10})$$

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

G : Le rapport de multiplication.

$C_{méc}$: Le couple mécanique disponible sur l'arbre du générateur.

C_t : Le couple de la turbine.

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

Ω : La vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

II.3.4 L'arbre mécanique

L'inertie totale J est constituée de l'inertie de la turbine J_t et celle de la génératrice J_g , l'éolienne est sans multiplicateur de vitesse ce qui donne l'équation suivante [37] :

$$J = J_t + J_g \quad (\text{II.12})$$

Si on applique l'équation fondamentale de la dynamique prenant en compte les frottements ainsi que J , le couple électromagnétique de la génératrice, on obtient :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.13})$$

Avec : $C_{vis} = f \cdot \Omega_g$: Couple visqueux ; C_{em} : Couple électromagnétique.

Puisque notre système de pompage éolien est sans multiplicateur de vitesse, on a :

$$\Omega_g = \Omega_t \quad (\text{II.14})$$

II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques, la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne, peut être utilisée donc direct lorsque la liaison

mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Ce type de machine tend à être de plus en plus utilisé par les constructeurs d'éoliennes car elle peut fonctionner en mode autonome et sont beaucoup plus légères que les autres types de générateurs [38].

On citer quelque avantage est inconvénient de ce type des machines :

II.4.1.1 Avantage

- Commutateur mécanique remplacé par une autre électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu,
- Suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais). - moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator.
- Facteur de puissance et rendement du moteur est améliorées.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.
- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.
- Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules

II.4.1.2 Inconvénient

- Prix des aimants le rend plus cher, - La présence de pulsation de couple,
- Risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation par les des contraintes comme la température max, courant max...etc.
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants [39].

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [40] :

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

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air [41].

II.4.2 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques triphasées dans un repère fixe lié au stator sont décrites par [42] :

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courant des phases statoriques ;

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

La forme matricielle du système d'équations de l'enroulement statorique est :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec : R_s : La résistance des phases statoriques.

Ou bien on peut réécrire sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi_s]_{abc} \quad (\text{II.17})$$

Où : $[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$: Matrice des résistances statoriques.

Equations magnétiques

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II.18})$$

Où :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_0 & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Où :

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques ; L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique ; $[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques ; $[\varphi_f]$: Flux des aimants permanents.

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

On peut réécrire le système (II.17) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II.22})$$

II.4.3 Equation mécanique

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad (\text{II.23})$$

II.4.4 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park

Le modèle de la machine synchrone le plus utilisé est basé sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park et elle permet d'obtenir un système équivalent formé de deux enroulements orthogonaux qui sont situés dans le même plan que les enroulements (a, b et c). Avec cette transformation, nous pouvons passer d'une représentation dans le repère triphasé (a, b, c) à une représentation dans le repère cartésien (d, q) comme le montre la Figure (II-4) [43].

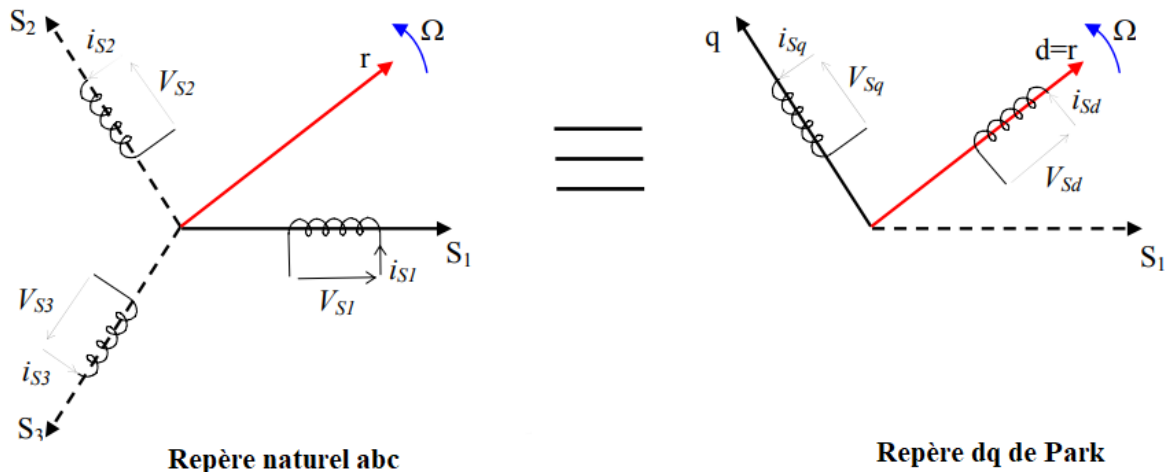


Figure II-4: Passage du repère naturel abc du stator au repère dq de Park

En réalité, la transformation de Park pour fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé partir d'un passage défini par la matrice $[p(\theta_s)]$ reliant les grandeurs des deux domaines

(abc) et (d, q)

$$X_{dq0} = [p(\theta_s)]. X_{abc} \Rightarrow X_{abc} = [p(\theta_s)]^{-1}. X_{odq}$$

La matrice de la transformation de Park pour le stator est donnée comme suit (le repère est relié au rotor) :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

La matrice de la transformation de Park inverse pour le stator est donné comme suit (le repère est relié au rotor) :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le changement de variable effectué, les équations des tensions sont [41] :

$$[v_{dqo}] = [p(\theta)][v_{abc}] \quad (\text{II.26})$$

$$[v_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[v_{dqo}] \quad (\text{II.27})$$

II.4.4.1 Equations électriques

Les équations statoriques de la MSAP dans le référentiel de Park lié au rotor sont décrites par [44] :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P\Omega_g \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + P\Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

II.4.4.2 Equations magnétiques

Les équations de flux magnétiques sont données comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Où : L_d et L_q : Inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ .

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.28) on aboutit à :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P\Omega_g L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} P\Omega_g + P\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

II.4.4.3 Expression du couple électromagnétique

Selon Park modifié, l'expression de la puissance absorbée s'écrit comme suit :

$$P_a = (v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant v_{sd} et v_{sq} par leur expression (II.30), on obtient :

$$P_a(t) = [(R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2))] + \left[i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right] + [\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd}]\omega_e \quad (\text{II.32})$$

Avec : $\omega_e = P \cdot \Omega_g$: Pulsation électrique.

Où :

$R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$: Pertes par effet Joule ;

$(i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt})$: Variation de l'énergie magnétique emmagasinée ;

$(\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd})$: Puissance électromagnétique.

Donc, on peut écrire :

$$C_{em} = P(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + P\varphi_f i_{sq} \quad (\text{II.33})$$

Dans les MSAP avec rotor à pôles lisses, les inductances statoriques sur les deux axes d et q sont égales ($L_d = L_q$) et l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P(\varphi_f i_{sq}) \quad (\text{II.34})$$

II.5 Modélisation de convertisseur

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, une bonne qualité de puissance et à moindre coût. Le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance et leur utilisation dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée.

Notre choix est argumenté par l'usage actuel de cette structure ainsi que par les avantages suivants :

- Facilité de commande.
- La structure de convertisseur est classique et les composants IGBT à l'heure actuelle sont bien maîtrisés.

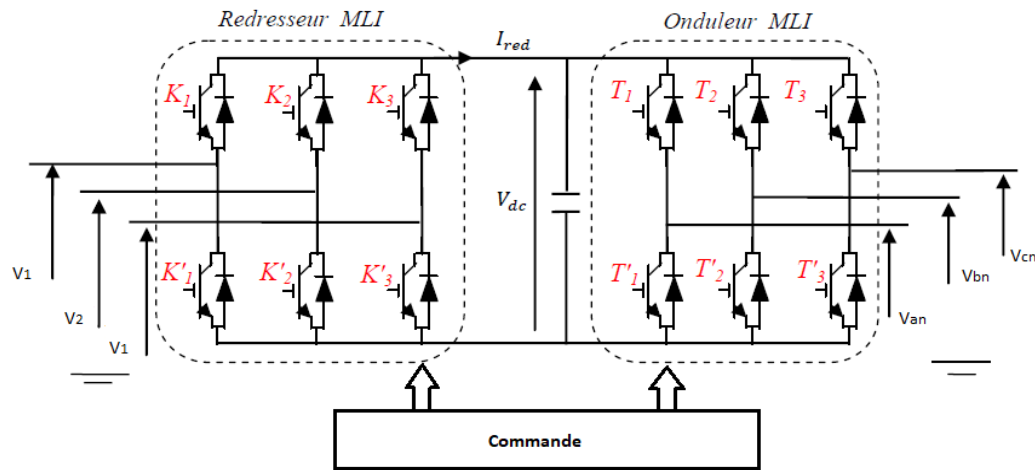


Figure II-5: Convertisseur statique MLI

II.5.1 Redresseurs à commande MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (II-6), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [45].

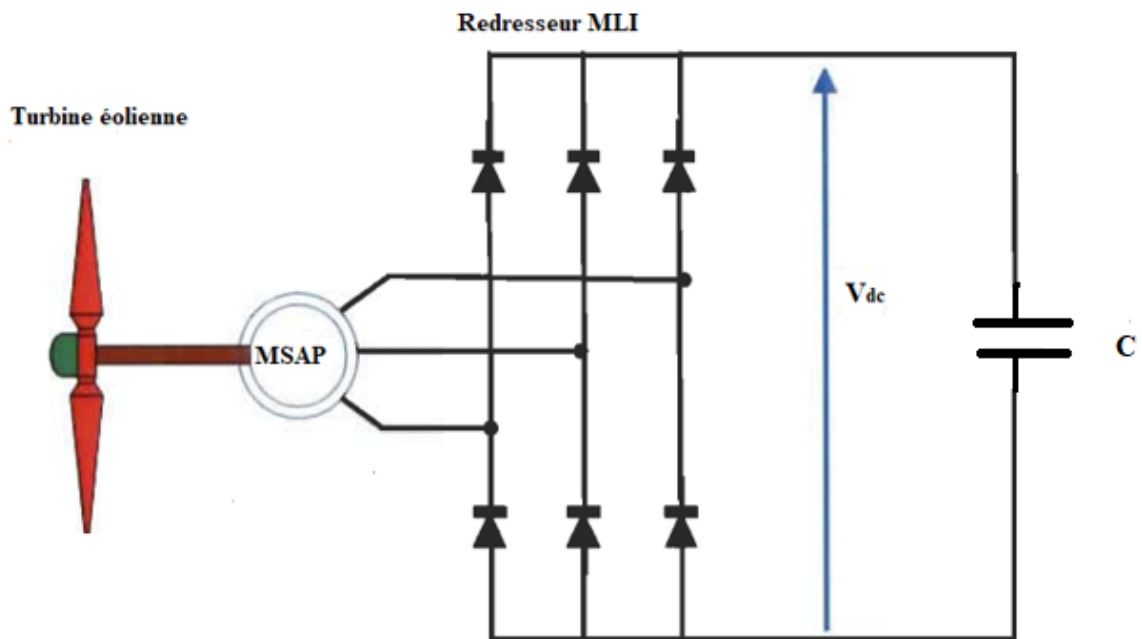


Figure II-6: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI

Le redresseur est un convertisseur alternatif/ continu. Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative.

On peut faciliter la modélisation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [46] :

$$S_j = \begin{cases} 1, & \bar{S}_j = 0 \\ 0, & \bar{S}_j = 1 \end{cases} ; j = 1,2,3 \quad (\text{II.35})$$

Les tensions de phase d'entrée et les courants de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , V_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.36})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{12} = (s_1 - s_2)V_{dc} \\ U_{23} = (s_2 - s_3)V_{dc} \\ U_{31} = (s_3 - s_1)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

On peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{2.s_1 - s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_2 = \frac{-s_1 + 2.s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_3 = \frac{-s_1 - s_2 + 2.s_3}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Avec : V_{dc} : Tension redressée.

s_1, s_2, s_3 : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

Le courant i_{red} est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$i_{red} = s_a \cdot i_a + s_b \cdot i_b + s_c \cdot i_c \quad (\text{II.39})$$

Avec :

i_{red} : Courant redressé.

II.5.2 Modèle du bus continu

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure (II-7) montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur [47][48].

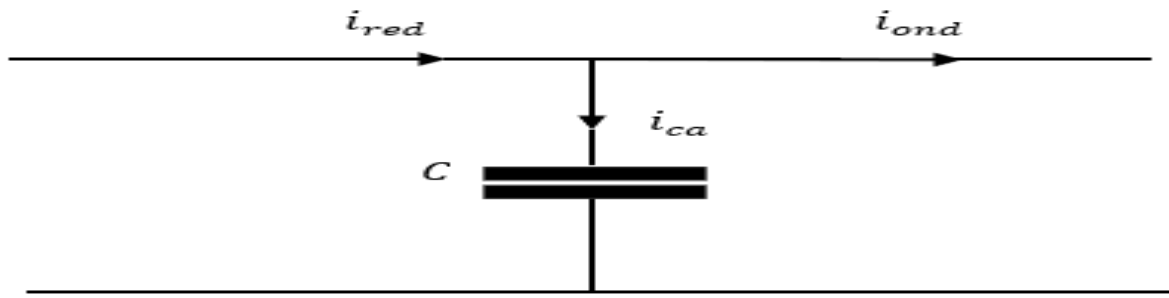


Figure II-7: Schéma simple du circuit du bus continu

II.5.3 Modélisations de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. Il a la même structure que le redresseur à MLI. La commande des états passant et bloqué des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI [49].

Nous utilisons un onduleur à 3 branches et 2 niveaux de tension. Chaque bras de l'onduleur est composé de deux interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, les interrupteurs sont des semi-conducteurs (transistors IGBT) reliés en antiparallèle avec des diodes.

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

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

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (II-8).

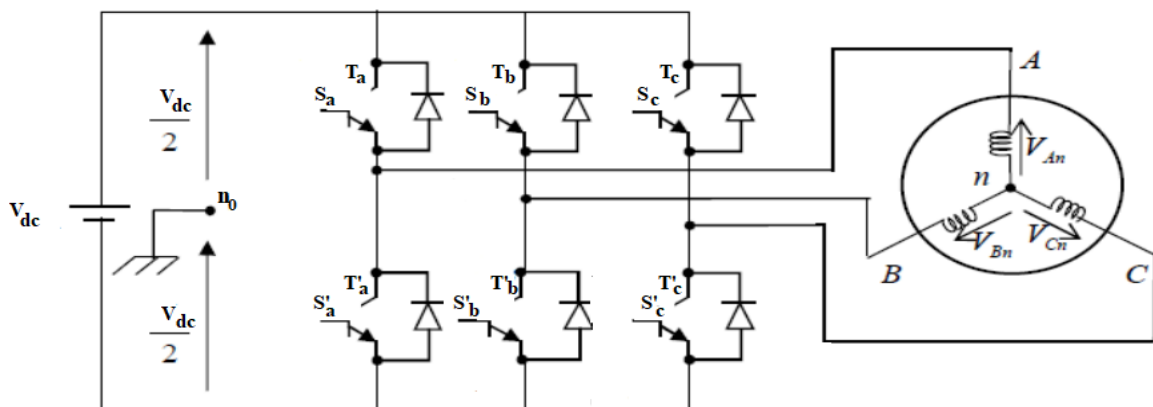


Figure II-8: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux [50]

L'onduleur alimenté par une tension parfaite donne à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs [51].

Soit 'n', le point neutre du côté alternatif, alors les trois tensions composées :

Les tensions U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

La charge constituée par la machine est équilibrée ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an_0} = V_{an} + V_{nn_0} \\ V_{bn_0} = V_{bn} + V_{nn_0} \\ V_{cn_0} = V_{cn} + V_{nn_0} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

En introduisant le point de référence " n_0 ", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et n_0 :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{II.47})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits s_i ($i = a, b, c$), on a :

$$V_{in} = s_i \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = (s_i - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (\text{II.48})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (s_a - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{bn_0} = (s_b - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{cn_0} = (s_c - \frac{1}{2})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

En remplaçant (II.46) dans (II.45), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

En remplaçant l'équation (II.49) dans l'équation (II.50), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....) [52].

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par le champ tournant [53].

II.6.1 Équations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

II.6.1.1 Équations des tensions et des flux

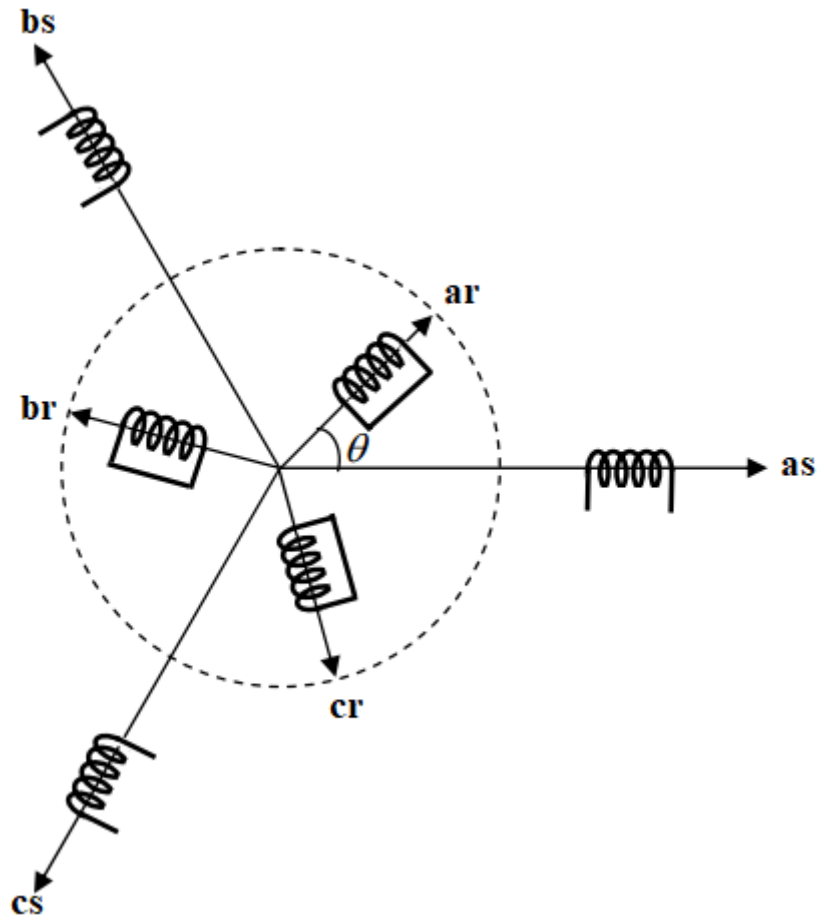


Figure II-9: Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on trouve les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone et elles s'écrivent sous forme matricielle [54] :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (\text{II.52})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.53})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.

$$[\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.

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

Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.53) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.54})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique (C_{em}) qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.55})$$

Les flux totalisés φ_{sabc} et φ_{rabc} des phases statorique et rotorique s'expriment en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.56})$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.57})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Les inductances propres et mutuelles statorique (L_s, M_s) et rotorique (L_r, M_r) sont constantes, seules les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases de rotor qui varient. Elles dépendent de l'angle θ telle que :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

M_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

Finalement on peut écrire les équations électriques de moteur asynchrone :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.59})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.60})$$

Les équations (II.59), (II.60) aboutissent à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors plus difficile pour cela on fait appel au modèle de Park.

II.6.1.2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone

La théorie de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique à des axes électriquement perpendiculaires appelés **d** pour l'axe direct et **q** pour celui en quadrature. Par raison de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale,
- Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés,
- Les composantes homopolaires sont nulles.

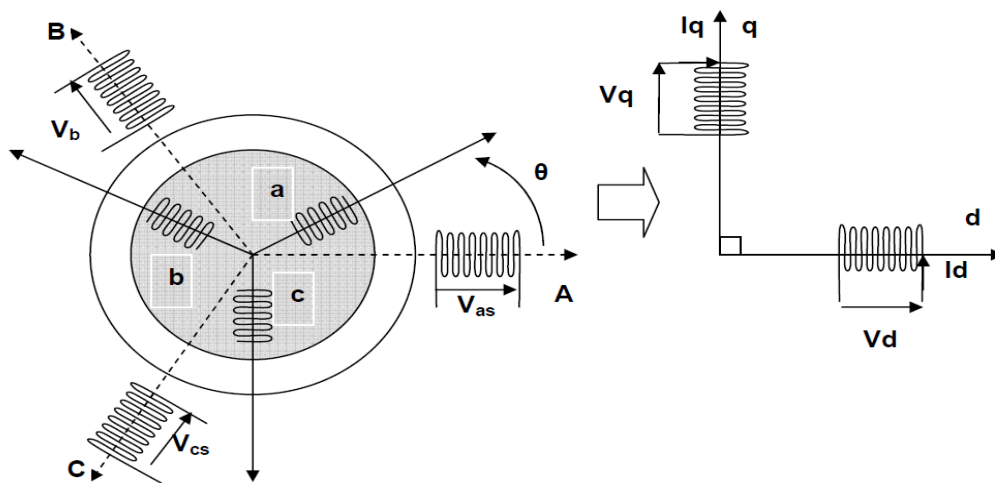


Figure II-10:Modèle de Park de moteur asynchrone

Les amplitudes directes (d) et en quadrature (q) des grandeurs statorique et rotorique sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suite [55] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Ces deux équations peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

Les équations de la machine asynchrone dans le système biphasé (d, q) lié au champ tournant, sont obtenues en utilisant la transformée de Park.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\varphi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\varphi_{r0}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.63})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique direct et quadratique.

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadratique.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux rotorique direct et quadratique.

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotorique direct et quadratique.

ω_s, ω_r : Vitesse statorique et rotorique[rd/s].

$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique[rd/s]

Les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.64})$$

Avec :

$L_s = L_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = L_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

I_s : Inductance de fuite statorique.

I_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Inductance mutuelle.

Finalement on obtient la matrice suivante qui rassemble toutes les équations de moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.65})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.66})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.67})$$

II.7 Modélisation de la pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont des machines utilisées pour transporter des liquides par l'augmentation d'un débit spécifique à une certaine pression. Les performances de la pompe à une vitesse donnée du rotor sont décrites par le débit délivré, la pression atteinte, la puissance absorbée au niveau du couplage, le rendement et le NPSH. Selon l'application, une large variété de types de pompes est offerte sur le marché. Tous présentent au moins une roue à aubes, et un collecteur où la majeure partie de l'énergie cinétique à la sortie de la pompe est transformée en énergie statique de pression [56].

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [57].

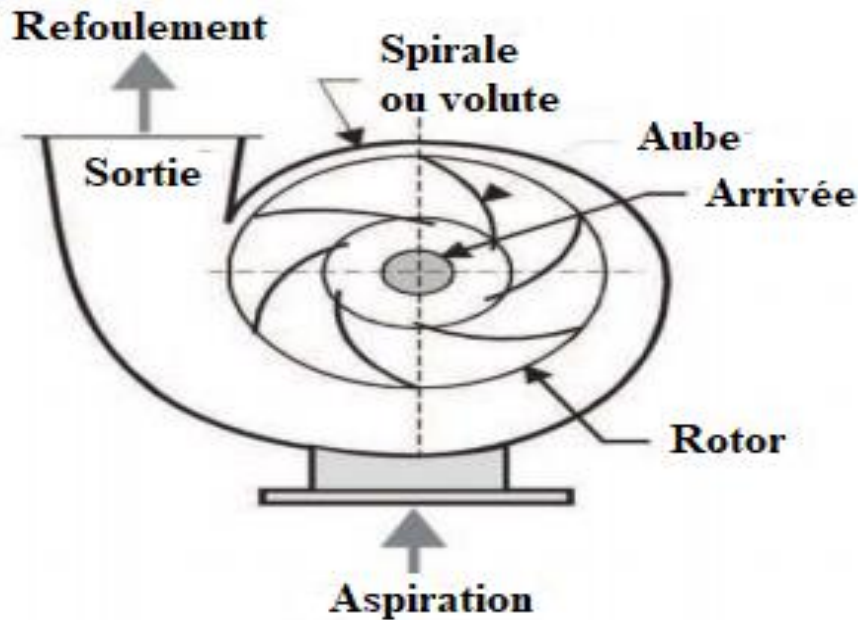


Figure II-11:Schéma d'une pompe centrifuge [58]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse [59].

$$C_r = K_r \Omega^2 + C_s \quad (\text{II.68})$$

Avec :

K_r : Coefficient de proportionnalité ; C_s : Couple statique qui est très petit.

En négligeant le couple statique (C_s) l'équation (II.68), le couple résistant devient :

Alors la pompe centrifuge impose un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur qui peut être décrit par :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.69})$$

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

$$P_{mec} = K_r \Omega^3 \quad (\text{II.70})$$

L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (\text{II.71})$$

Où :

ρ : Masse volumique de l'eau étant de ; g : Accélération de la pesanteur ; P_h : Puissance hydraulique ; H : Hauteur manométrique ; Q : Débit volumique.

Le rendement de la pompe est donné par la formule suivante :

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{mec}} \quad (\text{II.72})$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation de chaque composant du système éolienne (turbine éolienne et générateurs synchrones à aimants permanents sans multiplicateur de vitesse), des convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs) et des groupes motopompes, qui comprennent (une pompe centrifuge et un moteur asynchrone).

Cette modélisation est une étape essentielle, et elle nous permettra d'étudier la commande du système dans le prochain chapitre.

Chapitre III : Contrôle et optimisation du système étudié

Chapitre III : Contrôle et optimisation du système étudié

III.1 Introduction

Ce chapitre sera divisé en trois parties, la première partie sera consacré au contrôle de générateur éolien on appliquera la commande vectorielle à la machine synchrone à aimants permanents fonctionnant en mode génératrice alimenté par une turbine éolienne associée à un redresseur à commande à hystérésis et la régulation du bus continu, Dans la deuxième partie, on présentera la commande vectorielle indirecte appliquée à une motopompe avec régulation de la vitesse de la MAS, la troisième partie sera consacré à la simulation grâce au logiciel MATLAB/SIMULINK, toute la chaîne de conversion éolienne sera traitée afin de confirmer le bon fonctionnement du système proposés.

III.2 Le principe de la commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone et synchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple [60].

L'utilisation de la commande vectorielle dans les machines alternative dans les applications de l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse [61].

On site deux méthode de commande vectorielle :

- Commande vectorielle directe.
- Commande vectorielle indirecte.

III.2.1 Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré par des capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Ces valeurs doivent ensuite être traitées pour obtenir le flux global. Cette méthode présente des lacunes dans la mesure de la fiabilité, telles que [61] :

- Le problème du filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie avec la température.
- Coût de production élevé. (Capteurs, régulateurs, filtres).

III.2.2 Commande vectorielle indirecte

A cause des défauts de la commande précédente, le contrôle vectoriel indirect est considéré comme le plus pratique. Dans cette commande, le courant rotorique, le flux rotorique

et la position angulaire (θ) sont estimés à partir de la mesure des paramètres machine accessibles tels que la tension et le courant statorique. Cependant, cette méthode présente un inconvénient, c'est-à-dire qu'en raison de la saturation du circuit magnétique et des changements de température, la sensibilité aux changements de paramètres de la machine est estimée. Pour cette raison, nous avons établi des hypothèses simplifiées pour la modélisation.

III.3 Contrôle du courant par hystérésis de redresseur

Le contrôle d'hystérésis tire parti des caractéristiques non linéaires du redresseur MLI. Compte tenu de la largeur d'hystérésis d'erreur donnée, l'état de commutation de l'interrupteur de puissance est déterminé par la comparaison entre la grandeur mesurée et sa valeur de référence. Cette stratégie peut être utilisée pour des applications simples, telles que le contrôle de courant avec hystérésis [62].

Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants [63].

Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence comme montre sur la figure (III-1).

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant est le suivant :

$$\text{Si } \varepsilon_k \geq \Delta_i \Rightarrow s_k = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon_k \leq -\Delta_i \Rightarrow s_k = 1$$

Avec : $\varepsilon_k = I_{mes_k} - I_{ref_k}$: Ecart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase k ; Δ_i : Largeur de bande hystérésis.

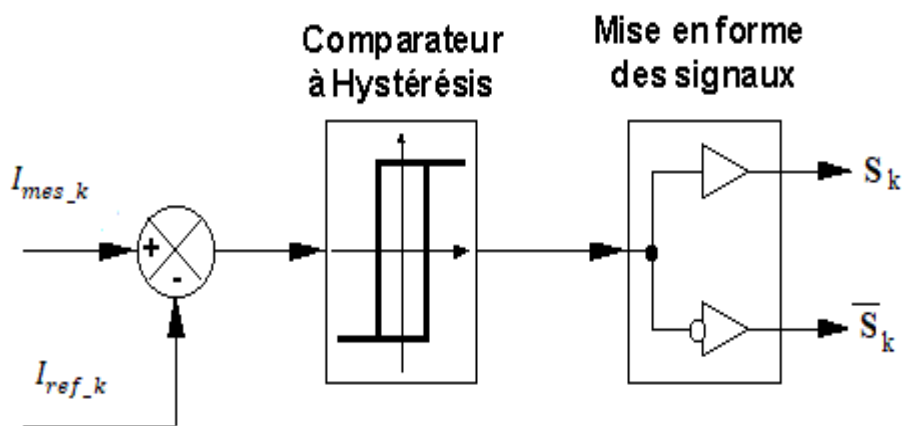


Figure III-1: Principe de contrôle du courant par hystérésis

III.4 Commande MLI de l'onduleur

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueilli à la sortie de l'onduleur [64]

Dans ce travail, on s'intéresse à la méthode sinus-triangle qui est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. La technique MLI sinusoïdale (STPWM) est une technique très utilisée en industrie et elle est largement passée en revues dans la littérature. Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse (figure III-2). Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [65].

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages [66] :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie,
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont :

- Minimisation de la distorsion du courant,
- Faible coût du filtre de sortie.

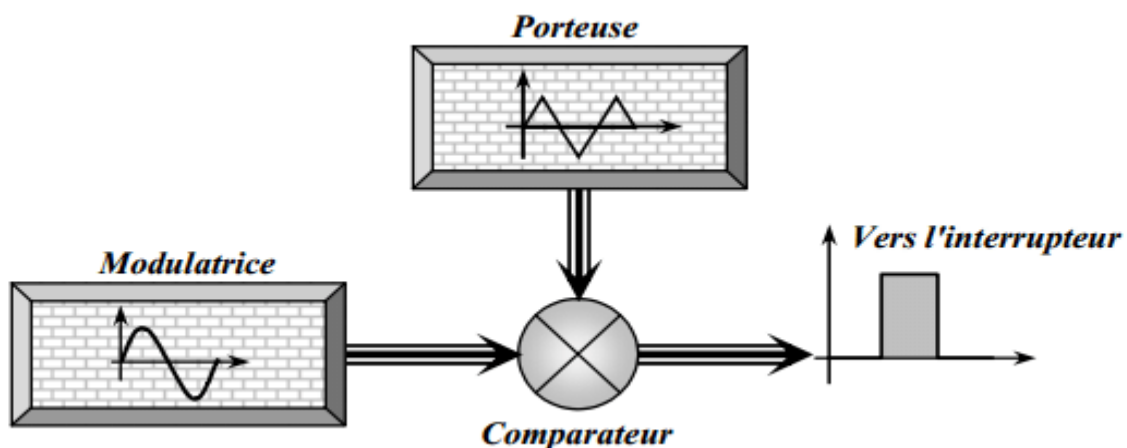


Figure III-2: Schéma synoptique de la MLI

On définit :

- L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la référence : $m = \frac{F_p}{F_{ref}}$

- Le taux de modulation régale au rapport de l'amplitude de référence sur l'amplitude de la porteuse : $r = \frac{V_{ref}}{V_p}$
- Avec : F_p : Fréquence de la porteuse ; F_{ref} : Fréquence de référence ; V_p : Amplitude de tension de la porteuse ; V_{ref} : Amplitude de tension de référence.

Le choix des valeurs de (m) et (r) procède d'un compromis entre la neutralisation des harmoniques et le rendement de l'onduleur.

III.5 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents

Quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle du couple de moteur est nécessaire. Celui-ci, dépendant des deux variables i_{sd} et i_{sq} , nous laisse un degré de liberté. Cette liberté peut être exploitée afin de satisfaire un critère d'optimisation selon l'application.

L'objectif principal de la commande vectorielle des MSAP est donc de contrôler le couple de manière optimale selon un critère choisi. Le critère choisi correspond souvent à la minimisation des pertes Joule à couple donné. Mais ce critère demande la solution d'un problème d'optimisation qui impose le contrôle simultané des courants i_{sd} et i_{sq} . Pour simplifier la commande, on fixe souvent le courant i_{sd} de manière que le couple soit proportionnel à i_{sq} dans une plage de vitesse donnée [67] [68].

III.5.1 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

Dans la stratégie de contrôle vectoriel appliquée à MSAP, la mise à zéro de la valeur de référence du courant direct i_{sd} est la plus courante, car elle nous permet d'éviter démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d et de travailler à couple maximal [69].

La commande doit maintenir $i_{sd} = 0$, et réguler le couple avec i_q .

En imposant le courant $i_{sd} = 0$, le système d'équation (II.28) devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = -L_q i_{sq} P_1 \Omega_g \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d\varphi_q}{dt} i_{sq} + P_1 \Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Le couple de l'équation (II.34) est simplifié en une expression linéaire donné par :

$$C_{em} = P_1 \cdot i_{sq} \cdot \varphi_f \quad (\text{III.2})$$

$$C_{em} = K_t \cdot i_{sq} \quad (III.3)$$

Tels que : $K_t = P_1 \cdot \varphi_f$

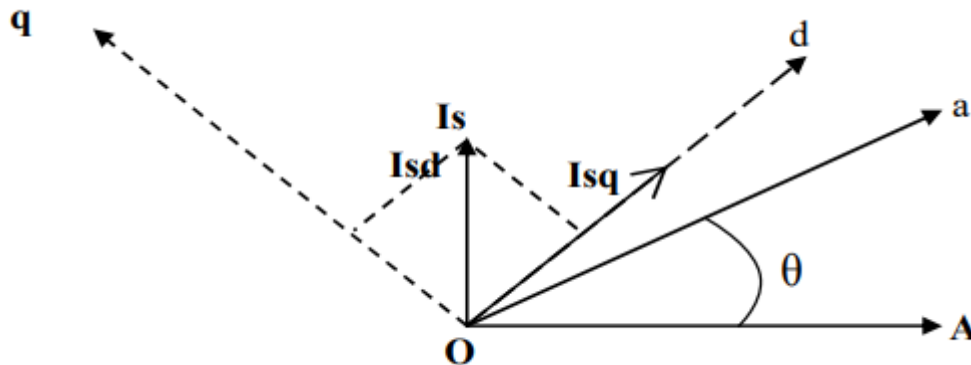


Figure III-3: Représentation spatiale de l'orientation du flux rotorique dans une MSAP

III.6 Description de la première partie (générateur éolien)

Le générateur éolien est contrôlé par une commande vectorielle tout en imposant ($i_{sd_ref} = 0$), et une commande MPPT sans asservissement de vitesse ont été appliquée à la turbine pour avoir une puissance maximale.

Le schéma fonctionnel de commande est illustré à la Figure (III.4). Le couple électromagnétique de référence C_{em_ref} est obtenu par régulation de vitesse, et le couple ne dépend que du courant i_{sq} . Par conséquent, on ne peut contrôler le couple que par la composante i_q . Le courant i_{sq_ref} est obtenu par la relation (III.3), et les courants de référence (i_{a_ref} , i_{b_ref} et i_{c_ref}) sont obtenus par application de la transformation de park inverse au courants (i_{sd_ref} et i_{sq_ref}). Ces courants de référence sont comparés au courant de référence du générateur en passant par un régulateur à hystérésis pour commander le redresseur MLI.

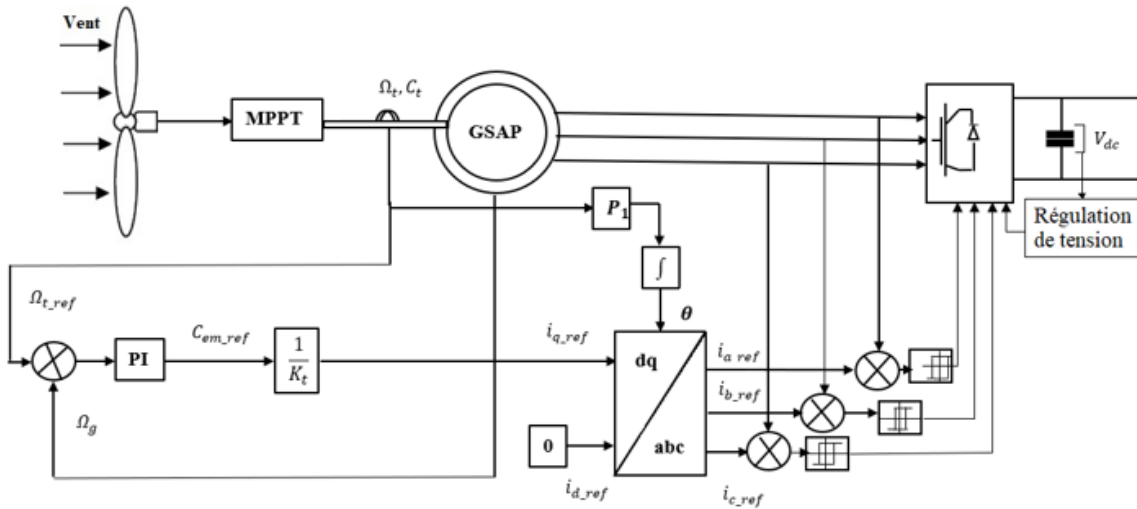


Figure III-4: Schéma bloc de commande de générateur éolien

III.6.1 Régulation de tension V_{dc}

La tension continue est régulée par le régulateur de type PI. Ce dernier corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa tension de référence. La figure (III-5) est le schéma bloc de réglage de la tension du bus continu [70].

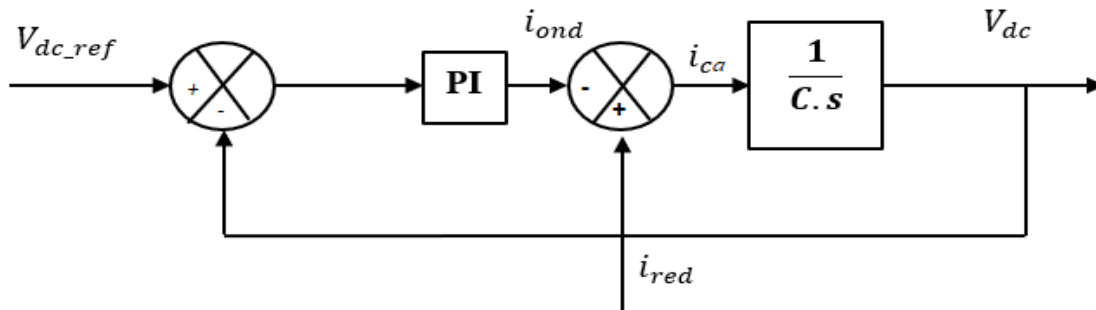


Figure III-5: Schéma bloc de la régulation de V_{dc}

III.6.2 Productions de la puissance maximale de la turbine (MPPT)

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimal) à l'aide du sous-système MPPT, et cela pour produire la puissance max. L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible [71].

III.6.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voile éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimal l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [72]. La courbe spécifique de la turbine est en forme de cloche. Le haut de la courbe correspond à la puissance maximale. Il se caractérise par la vitesse optimale (λ_{opt}) et le facteur de puissance maximum (C_{opt}). D'après l'équation (III.4), la valeur de la vitesse du vent est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t.R}{v} \quad (III.4)$$

Nous pouvons en extraire l'expression de la vitesse du vent :

$$v = \frac{\Omega_t.R}{\lambda} \quad (III.5)$$

Nous remplaçons l'expression (III.5) dans l'équation de la puissance extraite de l'éolienne :

$$p_t = \frac{1}{2} \frac{\rho.C_p(\lambda,\beta).S.R^3}{\lambda^3} . \Omega_t^3 \quad (III.6)$$

Le couple de la turbine est donné par :

$$C_t = \frac{1}{2} \frac{\rho.C_p(\lambda,\beta).S.R^3}{\lambda^3} . \Omega_t^2 \quad (III.7)$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire

$\lambda = \lambda_{opt}$ Le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{t_opt} = K_{opt} . \Omega_t^2 \quad (III.8)$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho.C_{p_max}.\pi.R^5}{\lambda_{opt}^3}.$$

On constate qu'au point de fonctionnement optimal, le couple aérodynamique est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de l'éolienne.

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal.

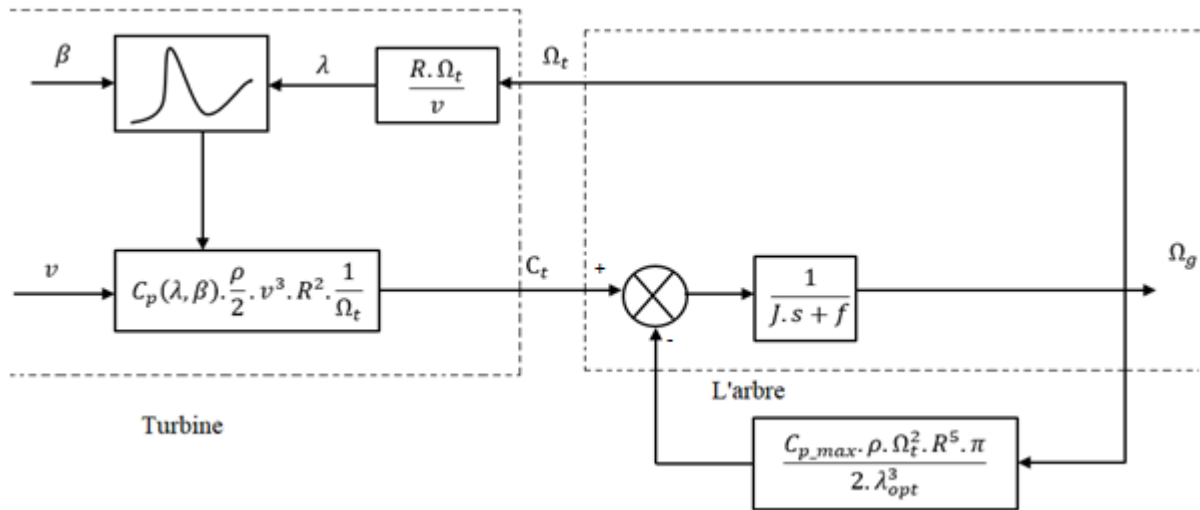


Figure III-6:Schéma bloc de MPPT sans asservissement de la vitesse

III.7 Commande vectorielle de moteur asynchrone à cage d'éccureuil

III.7.1 Choix d'orientation du flux

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe « d,q ».

Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère « d, q » entraîne l'alignement de l'axe d sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme il est illustre sur la figure (III-7).

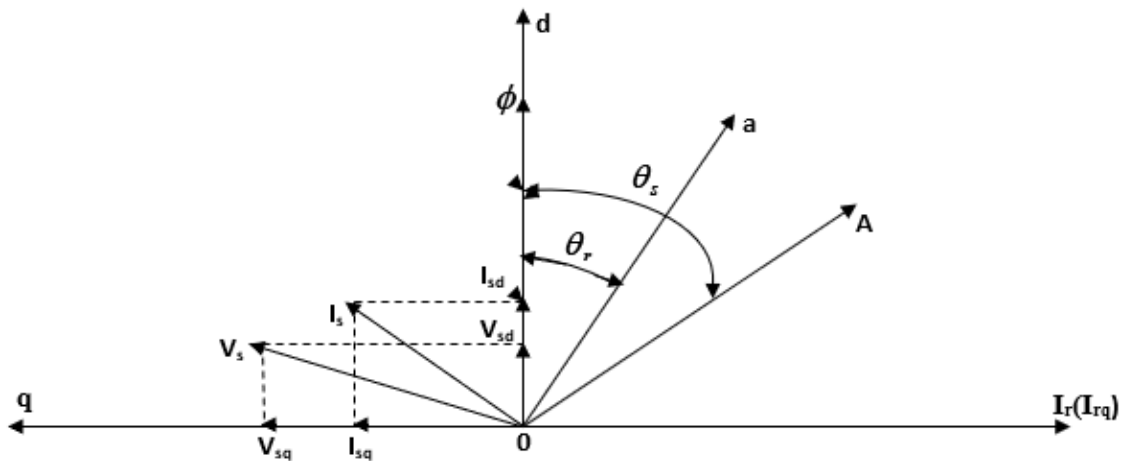


Figure III-7:Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe d d'une référence solidaire au champ tournant de vitesse (ω_s), donc on peut remarquer les propriétés suivantes :

- La composante transversale du flux rotorique est nulle.
- L'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique.

- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

D'après ces propriétés on peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = \varphi_r = cst \\ I_{rd} = 0 \end{cases} \quad (III.9)$$

On remplace ce système d'équations dans le système (II.47) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = M i_{sd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (III.10)$$

À partir de la dernière équation de système (III.10) on aura l'équation suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} I_{sq} \quad (III.11)$$

On remplace le système (III.9) dans l'équation (II.49) on obtient :

$$C_{em} = \frac{PM}{L_r} \varphi_r I_{sq} \quad (III.12)$$

On remplace l'équation (III.10) dans l'équation (III.12), le couple devient :

$$C_{em} = K_1 I_{sd} I_{sq} \quad (III.13)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{PM^2}{L_r} \quad (III.14)$$

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \quad (III.15)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \quad (III.16)$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rq} \quad (III.17)$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rd} \quad (III.18)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (III.19)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (III.20)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (III.21)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (III.22)$$

D'après l'équation matricielle (III.17) :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r I_{rd} \quad (III.23)$$

Par ailleurs, l'équation (III.18) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\varphi_r = -\frac{R_r I_{rq}}{\omega_r} \quad (III.24)$$

La relation (III.24) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir φ_r en fonction de I_{rq} pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (III.21), exprimer le courant I_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\varphi_r - M I_{sd}}{L_r} \quad (III.25)$$

D'après la relation matricielle (III.22), on peut écrire pour :

$$I_{rq} = -\frac{M I_{sq}}{L_r} \quad (III.26)$$

III.7.2 Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté

Suite aux différentes simplifications établies ci-dessus, nous allons exprimer les tensions statoriques en fonction des courants statorique et du flux φ_r . Les développements seront effectués uniquement pour V_{sd} sachant que le raisonnement est identique pour V_{sq} .

En dérivant le flux φ_{sd} par rapport au temps, dont l'expression est donnée par (III.19), on obtient :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} \quad (III.27)$$

Dans l'équation (III.15), on remplace ensuite φ_{sq} (relation (III.20)) et $\frac{d\varphi_{sd}}{dt}$ par leurs expressions respectives. Cela aboutit à :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot L_s \cdot I_{sq} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s \cdot M \cdot I_{rq} \quad (III.28)$$

En échangeant les courants rotoriques par les relations (III.25) et (III.26), on obtient :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \left(L_s + \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (III.29)$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$ les tensions statoriques peuvent s'écrire comme suite :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (III.30)$$

De manière identique, on peut réécrire V_{sq} sous la forme suivante :

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \sigma L_s I_{sd} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \varphi_r \quad (III.31)$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer φ_r et ω_s pour l'application de la transformation de Park [45].

III.7.3 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques ne le sont pas. Il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques [73].

Donc à partir des équations (III.23 et III.25) et en utilisant la notation de Laplace On obtient :

$$\varphi_r = \frac{M.I_{sd}}{1+T_r s} \quad (III.32)$$

Tel que :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.33)$$

On obtient aussi des équations (III.24 et III.26) la formule de la pulsation rotorique :

$$\omega_r = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (III.34)$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation $\omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega = \omega$ on aura :

$$\omega_s = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + P \cdot \Omega \quad (III.35)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{Le coefficient de la fuite totale.}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante de temps statorique.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

III.7.4 Bloc de découplage par retour d'état

En reprenant la description de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sur l'axe (d) du repère lié au champ tournant et en réécrivant le système d'équation de la manière suivante :

$$I_{sd}^* = \frac{1}{M} \varphi_r^* \quad (III.36)$$

$$I_{sq}^* = C_e^* \frac{L_r}{P M \varphi_r^*} \quad (III.37)$$

$$\omega_s^* = \frac{M I_{qs}^*}{T_r \varphi_r^*} + \omega_r^* \quad (III.38)$$

$$\begin{cases} V_{sd}^* = R_s I_{sd}^* - \omega_s^* \sigma L_s I_{sq}^* \\ V_{sq}^* = R_s I_{sq}^* + \omega_s^* \frac{M}{L_r} \varphi_r^* + \omega_s^* \sigma L_s I_{sd}^* \end{cases} \quad (III.39)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^* \\ V_{sq}^* \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} + \omega_s^* D \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Avec : C et D son des matrices

$$[C] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \end{bmatrix} [D] = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \quad (III.41)$$

On remplacer (III.41) dans (III.40) Alors on aura ces équations :

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^* \\ V_{sq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} + \omega_s^* \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} \quad (III.42)$$

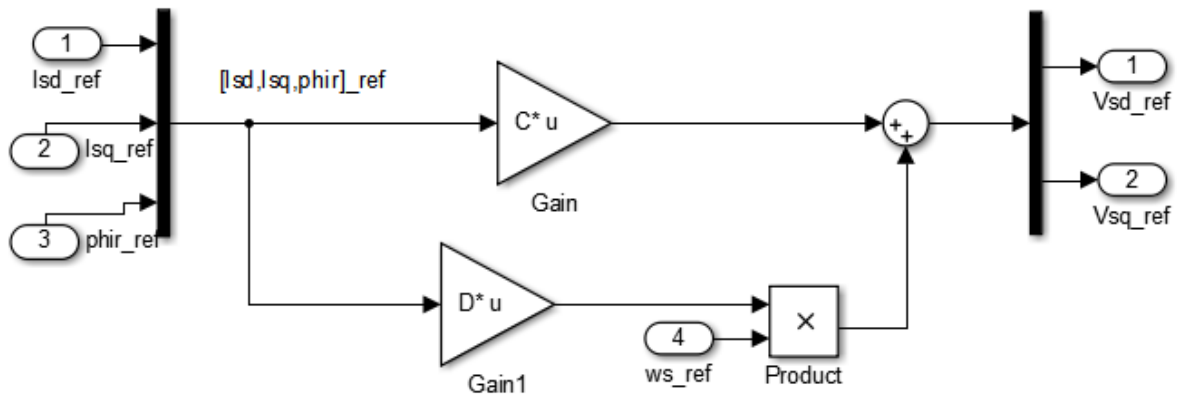


Figure III-8:Schéma Bloc de découplage par retour d'état

III.8 Filtre pour le réglage de la vitesse

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (III-9) :

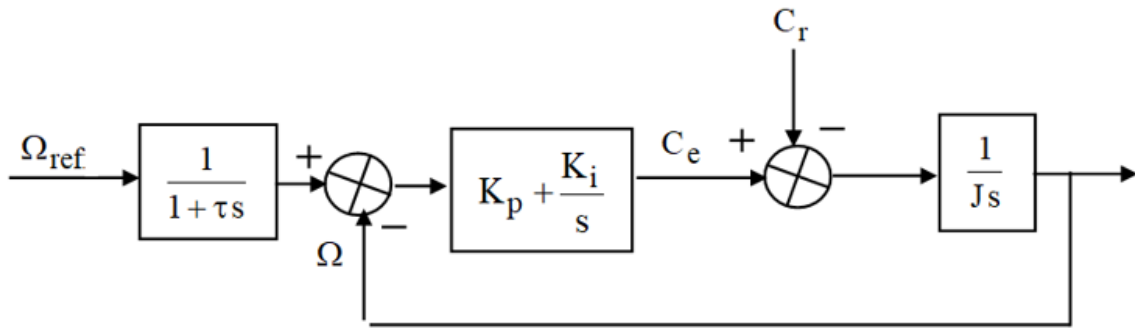


Figure III-9:Schéma fonctionnel de régulation de vitesse avec filtre

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nuls 'écrit :

$$\frac{\omega_{\text{ref}}(s)}{\omega(s)} = \frac{K_p s + K_i}{J s^2 + (K_p + f)s + K_i} \quad (\text{III.43})$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre dont la forme canonique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \quad (\text{III.44})$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$ et une pulsation ω_n donnée, on obtient :

$$\begin{cases} K_i = J \cdot \omega_n^2 \\ K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n - f \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

Le défluxage pour la régulation de vitesse. Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela est réalisable par un bloc de défluxage défini par la fonction non linéaire suivante :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Phi_{\text{ref}} = \Phi_{r.\text{nom}} & \text{Si } |\Omega| \leq \Omega_{\text{nom}} \\ \Phi_{\text{ref}} = \frac{\Phi_{r.\text{nom}}}{|\Omega|} \cdot \Omega_{\text{nom}} & \text{Si } |\Omega| > \Omega_{\text{nom}} \end{array} \right.$$

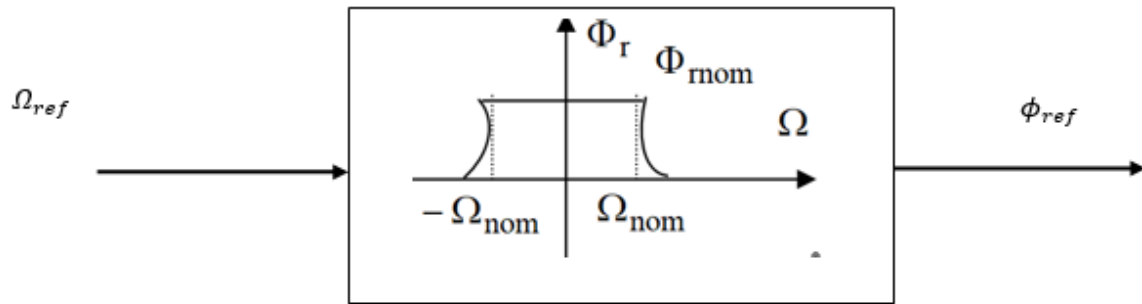


Figure III-10:Schéma de défluxage

III.9 Régulation des courants statoriques

Chaque boucle de courant est dotée d'un régulateur proportionnel intégral (PI) classique, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [74],[75].

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, telle que :

$$H(p) = \frac{a}{ap+b} \quad (\text{III.46})$$

Se fait d'une manière générale comme suit : La fonction de transfert du PI est :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (\text{III.47})$$

La perturbation est généralement négligée dans les étapes d'identification des paramètres des régulateurs.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est :

$$T(p) = H(p)C(p) = \frac{k_p p + k_i}{ap^2 + a + bp} \quad (\text{III.48})$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(p) = \frac{T(p)}{1+T(p)} = \frac{k_p p + k_i}{ap^2 + (b+k_p)p + k_i} \quad (\text{III.49})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{\tau_p + 1} \quad (\text{III.60})$$

Par identification des deux expressions (III.43) à (III.44) :

$$\frac{k_p p + k_i}{ap^2 + (b + k_p)p + k_i} = \frac{1}{\tau p + 1} \quad (\text{III.61})$$

Ce qui donne :

$$k_p \tau p^2 + (k_i \tau + k_p)p + k_i = ap^2 + (b + k_p)p + k_i \quad (\text{III.62})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} k_p = \frac{a}{\tau} \\ k_i = \frac{b}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.63})$$

La figure (III-11) représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

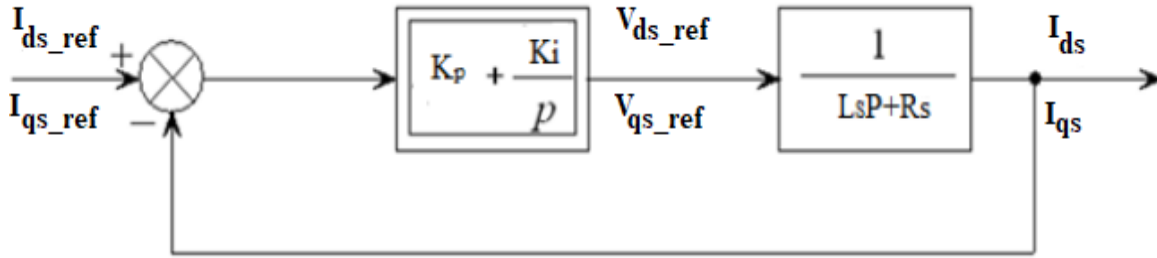


Figure III-11:Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

$$\text{Avec : } \begin{cases} k_p = \frac{L_r}{\tau} \\ k_i = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.64})$$

k_p : constante de proportionnalité

k_i : constante d'intégration

On prend $\tau = \frac{\tau_r}{6}$ pour avoir une dynamique du processus rapide, avec $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ est la

Constante de temps électrique (rotorique) du système.

III.10 Description de la deuxième partie (association motopompe)

Dans cette partie, le système de pompage est connecté au générateur éolien tout en appliquant une vitesse de vent variable pendant 60 secondes. La figure (III-12) montre le schéma global du système de pompage éolien. Il comporte : une turbine éolienne à axe horizontal ; contrôlé en MPPT, couplée à une GSAP avec la commande vectorielle, des convertisseurs (redresseur et onduleur), un bloc de commande vectorielle de la MAS avec un régulateurs PI classique pour la régulation de la vitesse du groupe motopompe.

Dans notre étude, on a régulé la tension de bus continu afin de ne pas perturbé l'onduleur et à partir de bilan de puissance on déduit la vitesse de référence afin de réguler la vitesse de la

MAS. Pour cela on a supposé que les convertisseurs sont idéals, le rendement de la GSAP et MAS sont 0.96 et 0.94 respectivement.

Le bilan de puissance de la chaîne étudiée est donné comme suit :

$$p_{mec} = \eta_{GSAP} \cdot \eta_{MAS} \cdot p_t \quad (III.65)$$

En remplaçant (III.65) dans l'équation (II.70), on aura :

$$\eta_{GSAP} \cdot \eta_{MAS} \cdot p_t = K_r \omega^3 \quad (III.66)$$

Donc l'expression finale de la vitesse de référence est exprimée comme suit :

$$\omega_{ref} = \sqrt[3]{\frac{\eta_{GSAP} \cdot \eta_{MAS} \cdot p_t}{K_r}}$$

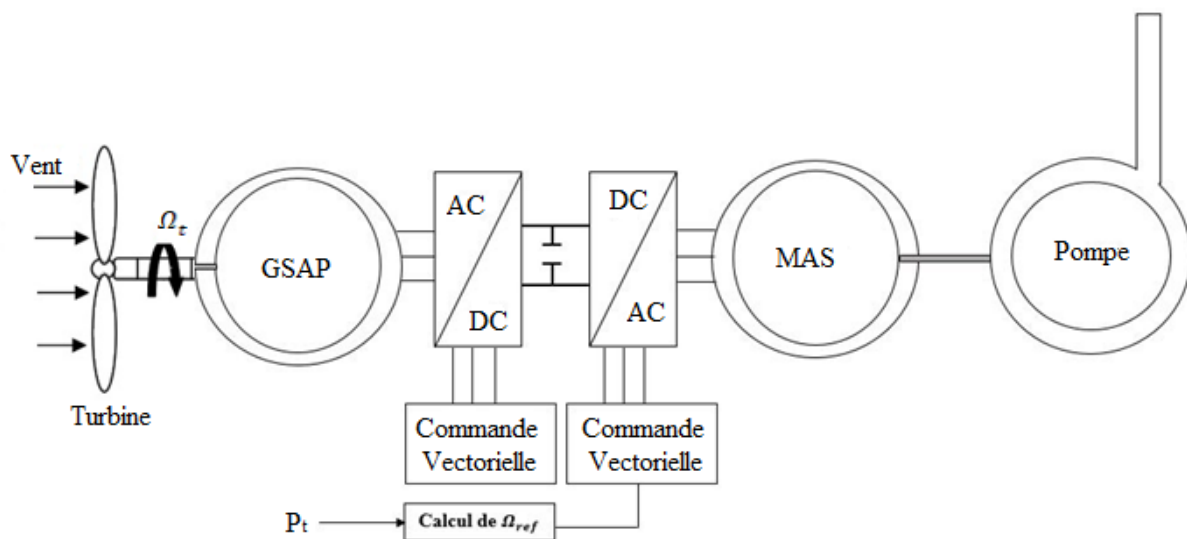


Figure III-12:Schéma globale du système de pompage éolien

III.11 Description de la troisième partie

Cette partie sera consacrée à la simulation du système global illustré dans la figure III-12.

III.11.1 Simulation et interprétation des résultats

On applique le profil du vent donné sur la figure (III-13), les résultats de simulation de la chaîne complète les résultats de simulation obtenus sont résumés sur la figure (III-14), figure (III-15) et figure (III-16) :

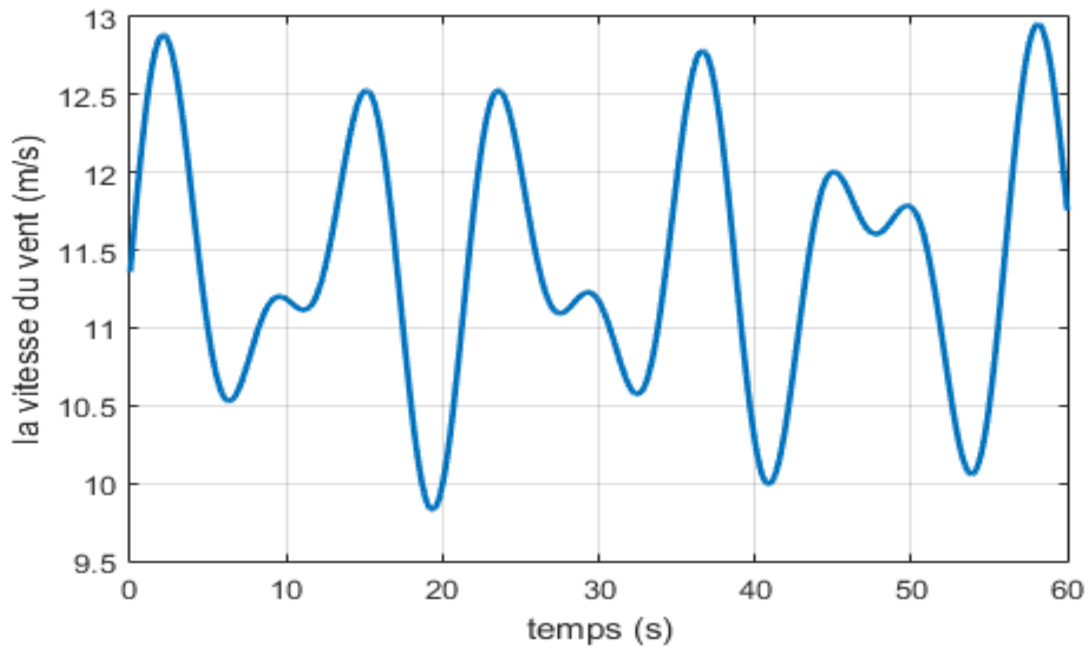
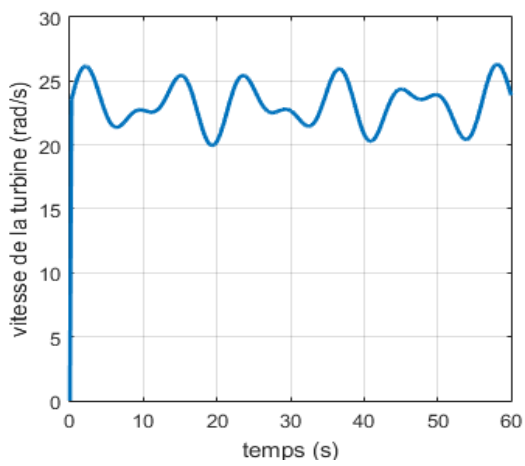
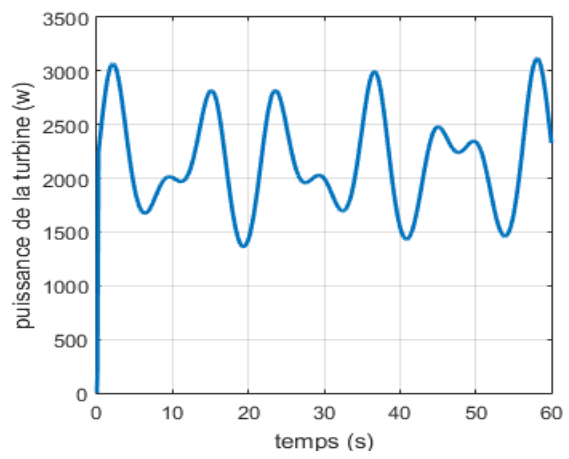


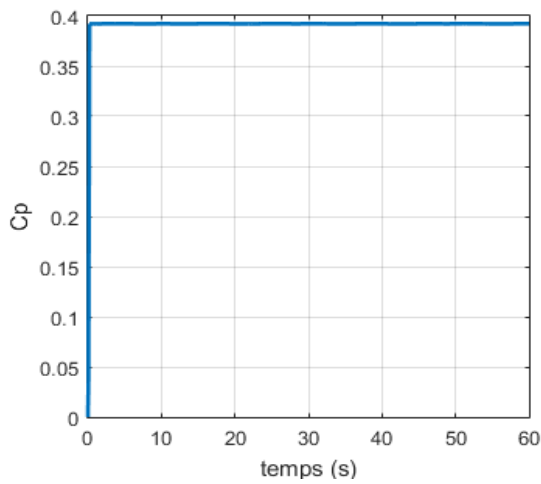
Figure III-13: Allure utilisée de la vitesse du vent



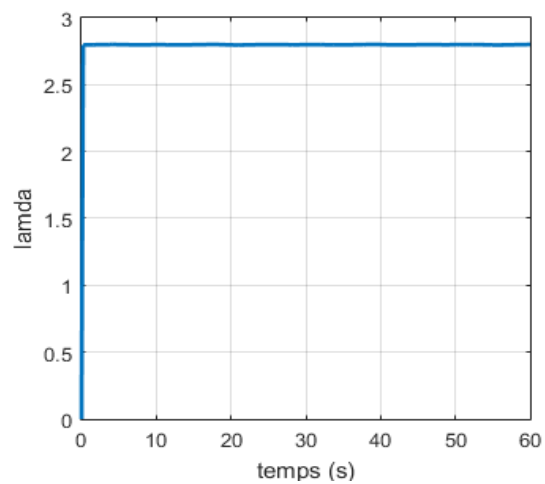
(A)



(B)



(C)

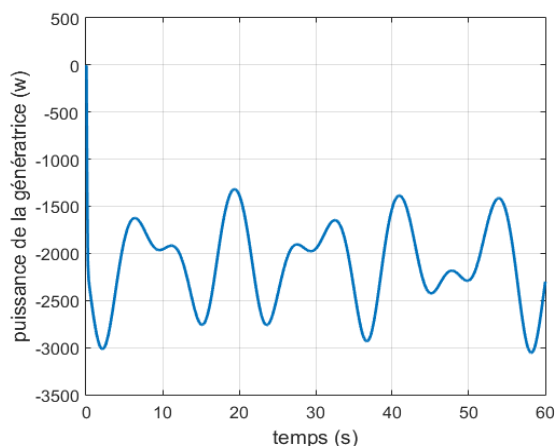


(D)

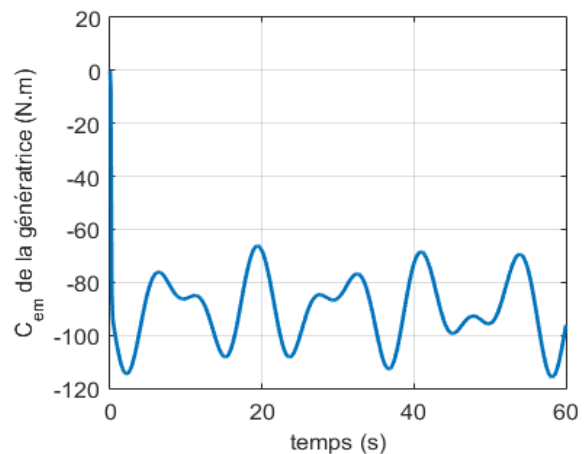
Figure III-14:Résultats de simulation de la turbine

Les figures (III-14 A, B, C, D) montrent l'évolution de la vitesse de la turbine, la puissance de la turbine, le coefficient de puissance, la vitesse spécifique, la vitesse obtenue ainsi que la puissance suivent leurs caractéristiques optimales ce qui explique l'efficacité de la MPPT appliqué (figure III-14 A, B) le coefficient de puissance C_p est maintenu à sa valeur maximale (0.39) ce qui correspond dans ce cas à une vitesse spécifique λ constante (figure III-14 D).

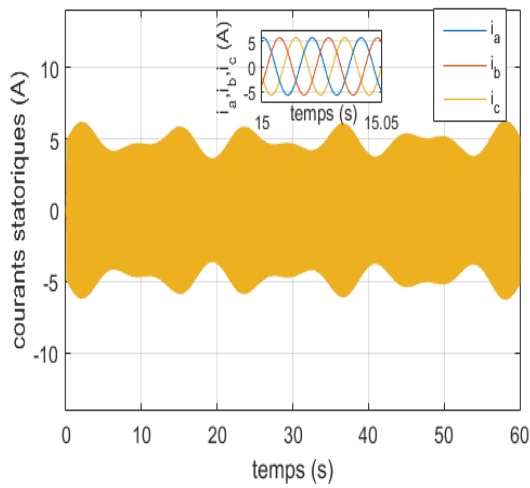
Les figure (III-15, A, B, C, D, E, F, G) montre l'évolution de couple électromagnétique, puissance, les courants directes et en quadrature de la génératrice et la tension de bus continu V_{dc} :



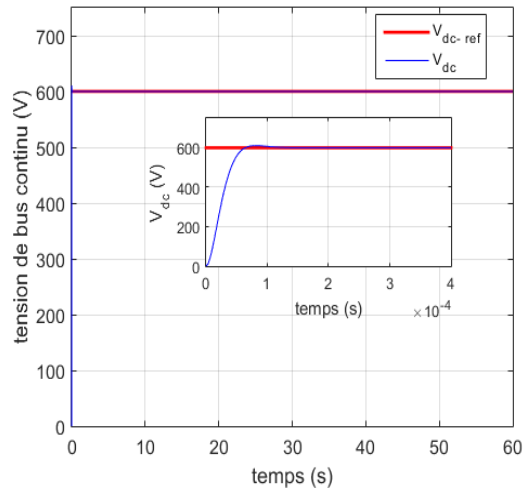
(A)



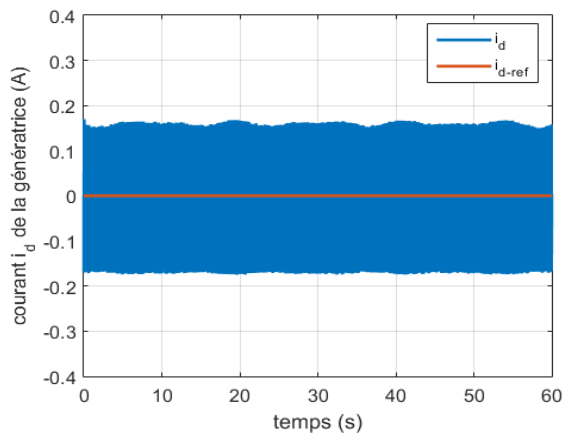
(B)



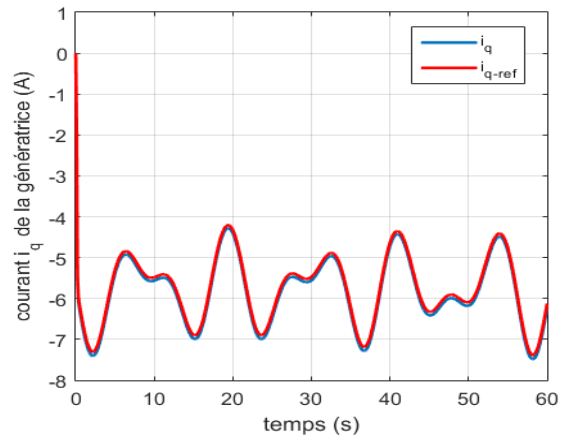
(C)



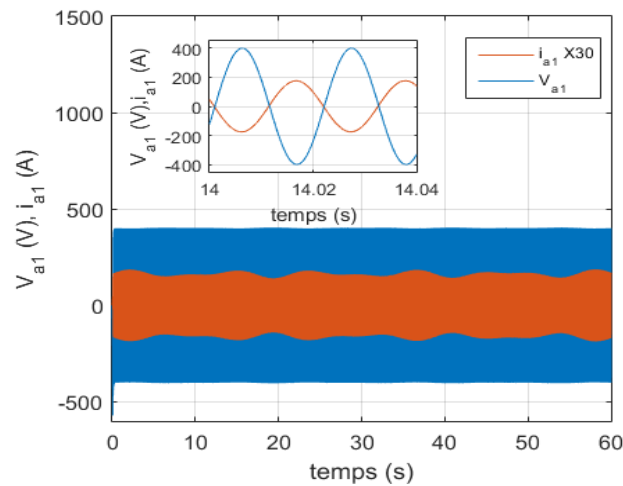
(D)



(E)



(F)



(G)

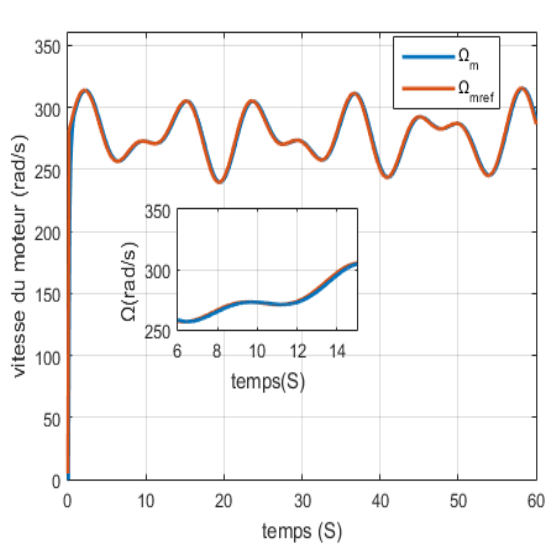
Figure III-15: Résultats de simulation de la génératrice

On remarque que la puissance et le couple de la génératrice sont de signe négatif ce qui confirme le fonctionnement du générateur, la tension du bus continu est bien régulée et suit sa

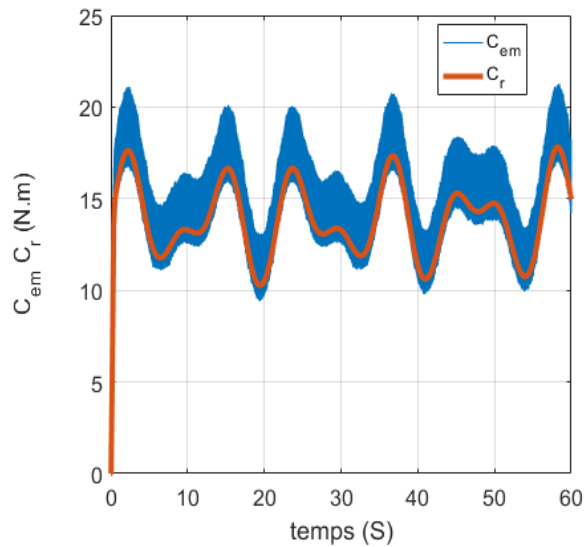
consigne (fixé à 600v). On remarque aussi que le courant i_{sd} est pratiquement nul et le courant i_{sq} suit sa référence et suit l'évolution du couple de la génératrice ce qui confirme la commande vectorielle appliquée à la MSAP. On observe les courants (figure III-15. C) générés par la GSAP sont des courants sinusoïdaux avec des amplitudes et des fréquences variables suivant la variation de la vitesse du vent.

La figure (III-15. G) montre la tension et le courant d'une phase, sur le zoom on voit 2 périodes, on remarque que leur fréquence est de 50 Hz. Le déphasage angulaire de π entre l'onde du courant et celle de la tension.

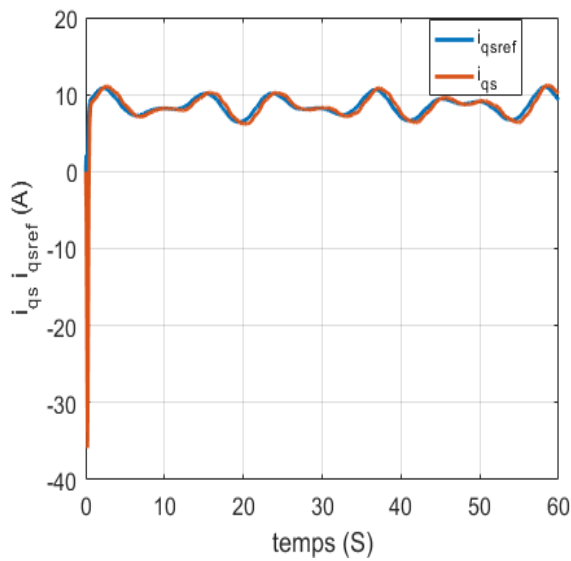
La figure (III-16) représente l'évolution des caractéristiques MAS avec la régulation de vitesse, suivi de l'application de couple de charge de la pompe.



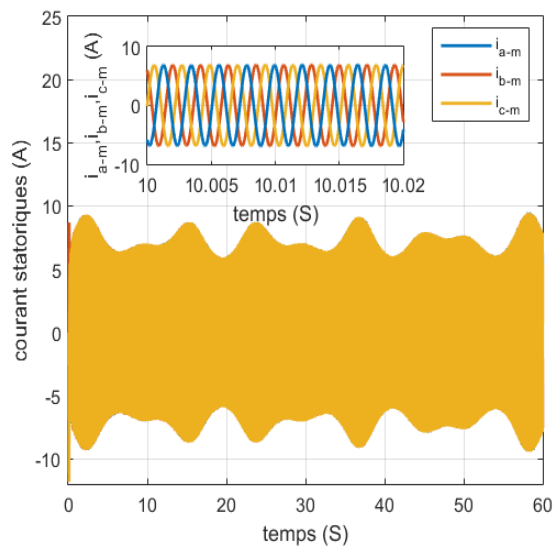
(A)



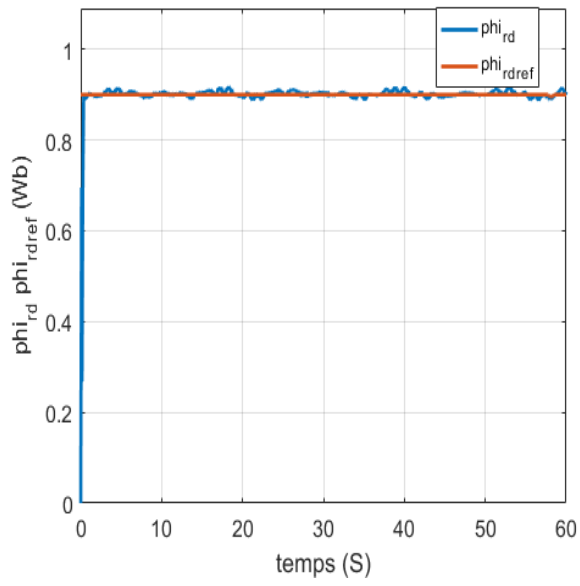
(B)



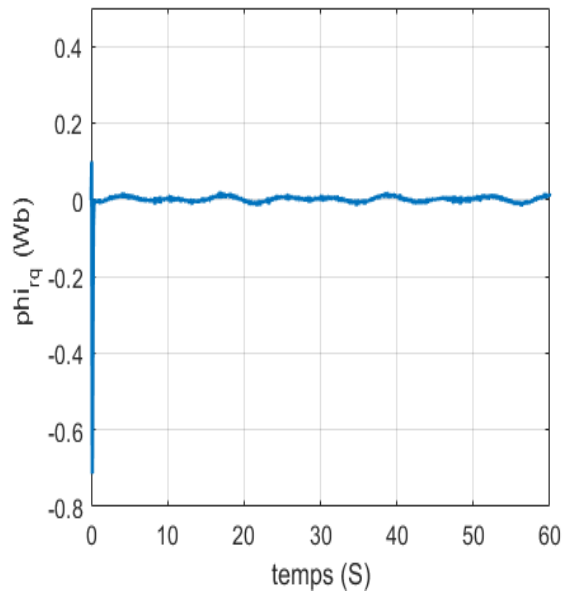
(C)



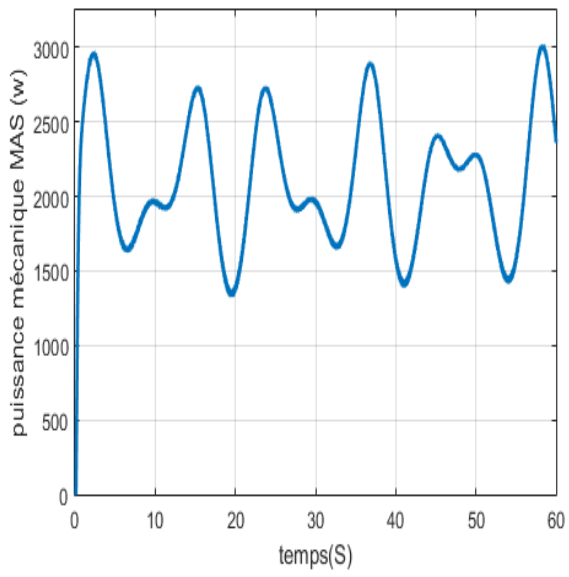
(D)



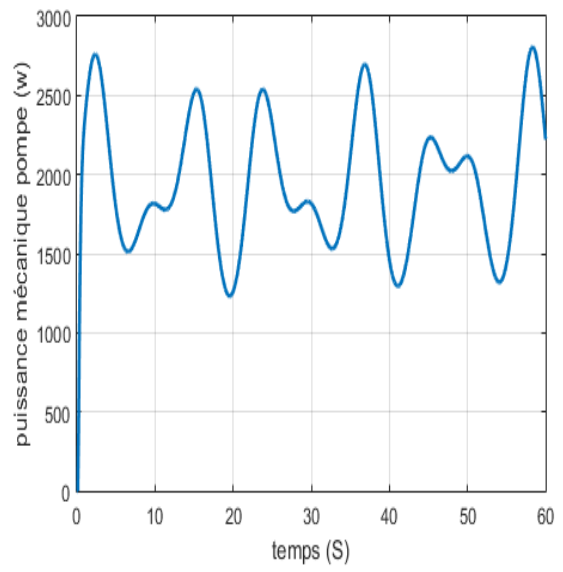
(E)



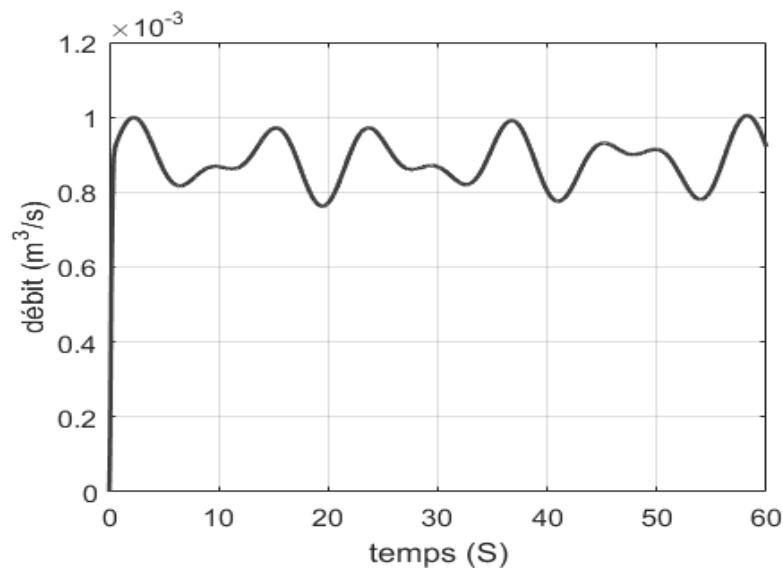
(F)



(G)



(H)



(I)

Figure III-16:Résultats de simulation de la chaine motopompe

Il est à noter que la vitesse du moteur suit complètement sa valeur de référence et atteint la valeur de référence rapidement avec un temps de réponse acceptable (Figure III.16-A). Le couple électromagnétique après le régime transitoire est quasiment égal au couple résistant appliqué par la pompe (Figure III-16. B). Des courants d'appel importants sont observés dans les courants statoriques, puis ils évoluent de manière sinusoïdale en régime permanent (Figure III-16. D), Le courant en quadrature évolue pendant le régime établi identiquement au couple électromagnétique et suit sa référence (Figure III-16.C). Les flux rotoriques direct et quadratique progressent d'une manière analogue à celle du couple électromagnétique pendant le régime transitoire, toutefois ils se stabilisent et évoluent selon leurs consignes et il suit sa référence c'est le cas flux direct durant le régime permanent et flux quadratique sera nul c'est le principe de la commande vectorielle (Figure III-16. E, F). La puissance de la pompe et la puissance de la MAS et le débit varient avec le débit du vent (Figure III-16. G, H, I).

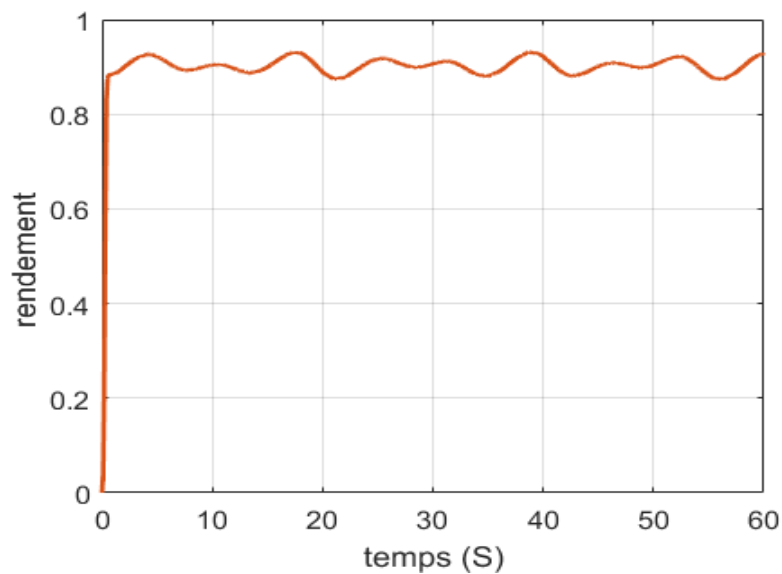


Figure III-17:Allure de rendement global

Depuis la figure III-17 on voit que le rendement global du système est à l'environ de 93 %.

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre, une commande côté génératrice a été utilisée pour suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable à l'aide de la technique MPPT, La GSAP a été contrôlée par la commande vectorielle Cette commande nous a permis, de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur afin de garantir une tension constante et stable quelques soit les perturbations engendrées par la vitesse du vent.

La deuxième partie a été consacrée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la MAS, l'objectif étant la régulation de la vitesse. La troisième partie est dédiée à la simulation de toute la chaîne de pompage avec une commande en puissance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de master, l'objectif des travaux est d'étudier le système de pompage éolien, qui est composé d'éoliennes, de GSAP, des convertisseurs d'électroniques de puissance et d'un groupe motopompes (pompes centrifuges et moteurs Asynchrones à cage d'écureuil). Ce travail est divisé en trois chapitres :

Dans le cadre de la production d'énergie éolienne, le premier chapitre présente la dernière technologie du système de conversion d'énergie éolienne. Nous avons discuté de différents types d'éoliennes existantes, qui ont des structures différentes, à savoir des éoliennes à axe vertical et des éoliennes à axe horizontal. Nous avons également présenté les différents types de machines et de pompes utilisés, puis nous avons expliqué le schéma d'ensemble du système à étudier. Dans cet article, nous avons choisi une éolienne tripale à axe horizontal à entraînement direct basée sur un générateur synchrone à aimants permanents avec un grand nombre de paires de pôles à vitesse variables.

Le chapitre deux est consacré à la modélisation des différents composants du système de pompage éolien à vitesse variable (vent, éolienne à axe horizontal, GSAP, redresseur, bus DC, onduleur, machine asynchrone à cage d'écureuil et pompe centrifuge).

Le troisième chapitre concerne le contrôle et la simulation de la chaîne de pompage éolien. Nous définissons le principe de contrôle vectoriel appliqué au GSAP, et utilisons cette technologie de commande pour ajuster la tension du bus DC à la sortie du redresseur à MLI. L'utilisation de la stratégie de contrôle MPPT permet de maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimale, que la vitesse du vent change moins que la vitesse nominale. Nous avons donné le principe du contrôle vectoriel indirect à flux rotorique orienté et de découplage par retour d'état pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **O. Gergaud**, « modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couple Au Réseau Et Associe A Un Accumulateur », 2002 ;
- [2] **J. F. Manwell, J. G. Mcgowan**, And A. L. Rogers, Wind Energy Explained : Theory, Design And Application, West Sussex, England : John Wiley & Sons, 2002 ;
- [3] **M. Bouameur** «modélisation Et Dispositif De Commande D'un Système Eolien A Base De Machine Asynchrone A Double Aimantation» Mémoire De Master, Université Bourdj Baji Moukhtar Annaba, 2018 ;
- [4] **F. Ibrir Et H. Mammasse** « Commande Et Optimisation D'une Chaîne De Conversion D'Energie Eolienne » Mémoire De Fin D'étude, Université A. Mira Bejaia, 2013 ;
- [5] **S. Hammachi Et H. Hammachi** «Commande D'une Génératrice Asynchrone Double Alimentation Dans Un Système De Conversion D'Energie Eolienne » Projet De Fin D'étude, Université De Bejaia, 2016 ;
- [6] Tpe De Si Les Energies De Demain L'Energie Eolienne
- [7] **M. Addour Et L. Allouti** « Etude Et Maximisation D'un Système Eolien » Mémoire De Fin D'études, Université De Bejaia, 2013 ;
- [8] **D.M. Eggleston, F.S. Stoddard** « Wind Turbine Engineering Design, Van Nostrand Reinhold Company» New York, 1987;
- [9] **R. Aubree** « Stratégies De Commande Sans Capteur Et De Gestion De L'Energie Pour Les Aérogénérateurs De Petite Puissance » Thèse De Doctorat, Université De Nantes, 2014 ;
- [10] **K. Ammour Et A. Mekelleche** « Commande De La Vitesse D'une Eolienne Par L'approche Multi-Modelé » Mémoire Master, Tlemcen, 2014 ;
- [11] **Dr. S. Bensaid** « Cours De Machines Electriques » Licence LMD, Université Amo Bouira, 2013/2014 ;
- [12] https://www.google.com/search?q=Moteur+Synchrone+%C3%A0+Aimant+Permanent&Tbm=isch&ved=2ahukewik-X6_Pjvaxo_4ukhzprduq2-Cceqgiabaa&Oq=Moteur+Synchrone+%C3%A0&Gs_Lcp=Cgnpbwqcqargbmgqiabbdmgiiadigc aaqcbuemgqiabaymgqiabaymgqiabaymgqiabaymgqiabayoggiabaieacqhlcbgqnyrlkdy prkbggacab4aiab1ggiadejkgefmc41ljkyaqcgaqgqaqnd3mtd2l6lwtz8abaq&Sclient=Img&Ei=Jwf0yotyks7_Lwsa17mocg&Bih=568&Biw=1366#Imgrc=Kehejyhgwdafxm
- [13] <https://energieplus-lesite.be/Techniques/Ascenseurs7/Moteur-Synchrone/>

- [14] [Http://Server.Idemdito.Org/Electro/Elec/Mot/Asyn.Htm](http://Server.Idemdito.Org/Electro/Elec/Mot/Asyn.Htm)
- [15] [Https://Eolienne.F4jr.Org/Multiplicateur](https://Eolienne.F4jr.Org/Multiplicateur)
- [16] Fondation La Main A La Pate Stephane Perrot26 Rue Des Jardins Du Sauzat31750 Escalquens 0662510837 Perrot-Stephane@Orange.Fr
- [17] [Https://Energieplus-Lesite.Be/Theories/Eolien8/Rendement-Des-Eoliennes/](https://Energieplus-Lesite.Be/Theories/Eolien8/Rendement-Des-Eoliennes/)
- [18] **N.Benbelaid Et R.Maiz Ia** «Commande Et Optimisation D'un Système De Pompage Hybride (Photovoltaïque-Eolien)», Mémoire De Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016 ;
- [19] **G.Thierry Et D.Fedullo** « Le Grand Livre De L'électricité », Livre Troisième Edition, 2014 ;
- [20] **A. Guettaf** « Optimisation Floue-Génétique D'un Système De Pompage Eolien » Thèse De Doctorat, Université De Biskra, 2013 ;
- [21] **M. Chadel** « Dimensionnement D'un Système De Pompage D'eau Potable Pour Les Sites De Tlemcen Et Adrar » Mémoire De Master, Université De Tlemcen, 2012 ;
- [22] **N.Kasbadji Merzouk Et M. Merzouk** «Perspectives Du Pompage Eolien En Algérie », Colloque Ciress, Ouargla, 2005 ;
- [23] **Amine Daoud** « Contrôle De La Puissance D'un Générateur Photovoltaïque Pour Le Pompage Solaire » Thèse De Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran 2013 ;
- [24] **Badereddine Et H.Djeghbala Amor**« Optimisation De La Maintenance Préventive D'une Pompe Centrifuge Ga -1102 » Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016 ;
- [25] **M.Hammed Yahia Et Ch.Madoni** « Etude De Système De Refoulement Tfna_Dzioua » Mémoire De Projet De Fin D'études, Université Aboubakrbelkayid Tlemcen, 2016 ;
- [26] **Temacini Djaber** « Etude Et Dimensionnement D'une Pompe A Boue » Mémoire De Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2019 ;
- [27] **J.Poulain** « Pompes Roto dynamiques: Présentation, Description », Technique De L'ingénieur B4300 ;
- [28] **Guide Technique**, « Régulation De Pompes / Automatisation De Pompes, Savoir-Faire », Volume 4, Edition K.S.B, 2009 ;
- [29] **M.Djerroud** « Identification Numérique Des Paramètres D'amélioration Des Performances D'une Pompe Centrifuge: Roue, Roue-Volute Et Roue-Diffuseur » Mémoire De Maitrise, Université Du Québec, 2011 ;
- [30] **Dris mida** « Contribution A La modélisation D'un Système De Production D'Énergie Electrique Hybride Eolien – Photovoltaïque » Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2019 ;

- [31] **B.Toual** « Contribution A La Commande Et La Gestion Des Sources Hybrides D’Energie Electrique » Thèse De Doctorat, Université Batna 2 Mostefa Ben Boulaïd , 2018 ;
- [32] **C.Nabila Et M.Kahina** « Etude Et Emulation D’une Turbine Eolienne De 3kw », Doctoral Dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2017 ;
- [33] **Abed, K Et Kendouli, K. Nabti**, « Modélisation, Simulation Et Contrôle D’une Turbine Eolienne A Vitesse Variable Basée Sur La Génératrice Asynchrone A Double Alimentation. Revue Des Energies Renouvelables » H. B. F. 2011 ;
- [34] **T. Ghennam** « Supervision D’une Ferme Eolienne Pour Son Intégration Dans La Gestion D’un Réseau Electrique, Apports Des Convertisseurs Multi Niveaux Au Réglage Des Eoliennes A Base De Machine Asynchrone A Double Alimentation » Thèse De Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique D’Alger Ecole Centrale De Lille ,2011 ;
- [35] **A. Zaimi** « Optimisation De La Commande D’une Eolienne A Base De Machine Synchrone A Aimants Permanents » Mémoire D’ingénieur, Conservation National Des Arts Et Métiers, Centre Du Maroc, 2014 ;
- [36] **A.Assam Et R.Boukerma** « Optimisation Et Commande D’une Chaîne De Conversion Eolienne Par La Logique Floue Adaptative » (Doctoral Dissertation), 2019 ;
- [37] **A. Chemidi** « Analyse, Modélisation Et Commande Avancée D’une Eolienne Utilisée Dans Une Ferme » Thèse De Doctorat, Université Abou Bekrbelkaid Tlemcen, 2015 ;
- [38] **Soulahi** « Optimisation Du Rendement D’un Ensemble Convertisseur –Machine A Induction », Thèse De Magister, Université De Batna, 2004 ;
- [39] **K. Belaidi Et O. Hamdou**, « Commande Robuste D’un Moteur Synchrone A Aimant Permanent », Mémoire De Master, De Université Kasdimerbah Ouargla,2016 ;
- [40] **Mayouf, M.** « Contribution A La Modélisation De L’aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents » Doctoral Dissertation, Batna, Université El Hadj Lakhdar, 2008 ;
- [41] **Louar fateh** « Modélisation Et Simulation D’une Chaîne De Conversion D’Energie Eolienne A Base D’une Machine Synchrone A Aimant Permanent », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016 ;
- [42] **Mernache, H., Aouzellag, D., Kasmi, B., &Merahi, F.** « Etude D’une Petite Eolienne En Fonctionnement Autonome », Doctoral Dissertation, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2020 ;
- [43] **Zidelmal, T.** « Modelé De Prédiction Et De Commande De La Machine Synchrone A Aimants Permanents : Application Dans Les Aérogénérateurs », Doctoral Dissertation, Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue, 2015 ;
- [44] **Meghnibillel** « Contribution A L’amélioration Des Performances D’une Chaîne Energétique Eolienne », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015 ;

- [45] **K. Idjdarene** « Contribution A L'étude Et La Commande De Génératrices Asynchrones A Cage Dédiées A Des Centrales Eoliennes Autonomes », Thèse De Doctorat En Cotutelle, A. Mira, Bejaïa, 2009 ;
- [46] **Belakehal, S., Bentounsi, A., Merzoug, M., & Benalla, H.** « Modélisation Et Commande D'une Génératrice Synchrone A Aimants Permanents Dédiée A La Conversion De L'Energie Eolienne ». Revue Des Energies Renouvelables, 13 ;
- [47] **A. Telli** « Etude Et Commande D'une Eolienne A Vitesse Variable Intégrée Au Réseau Mt », Mémoire De Magister, Université D'Oran, 2012 ;
- [48] **F.Z. Tria**, « Contribution A La Commande D'un Système Eolien Base Sur Une Mada Par Différentes Techniques », Mémoire De Magister, Université D'el- Oued, 2013 ;
- [49] **M. Chinchilla, J.C. Burgos**, « Control of Permanent Magnet Generator Applied to Variable Speed Wind Energy Systems Connected to The Grid », Ieee Transactions on Energy Conversion, 2006;
- [50] **NACER TAREK**. « Génération Des Signaux PWM A L'aide D'un DSP », Mémoire Master, Université Saad Dahleb De Blida, 2016 ;
- [51] **S.Azzouz** « Amélioration De La Commande D'un Système Eolien A Base D'une Machine Mada Utilisant Les Techniques Intelligentes » Thèse De Doctorat, Université Mohamed Boudiaf De M'sila, 2019 ;
- [52] **Chahmi, A.** « Identification Paramétrique De La Machine Asynchrone Dédiée Au Diagnostic », Doctoral Dissertation, Université Des Sciences Et Technologie Doran-Mb, 2017 ;
- [53] **Doumbia, M. L., & Traore, A.** « Modélisation Et Simulation D'une Machine Asynchrone A Cage A L'aide Du Logiciel Matlab/Simulink. Msas », Bamako, 2002 ;
- [54] **Bendjoudi, F., Belaid, S., & Lakhdari, F.** « Etude Et Simulation D'un Système De Pompage Photovoltaïque Avec Batteries » Doctoral Dissertation, Université Abderrahmane Mira, 2014 ;
- [55] **M.Anki Et A.Bouallag** « Contribution A L'étude Et A L'optimisation D'un Système De Pompage Photovoltaïque » Thèse doctorat , Université De Bejaïa, 2012 ;
- [56] **Gülich, Johann Friedrich** «Centrifugal pumps». Berlin : Springer, 2008 ;
- [57] **Narimene Debili** « Etude Et Optimisation En Environnement Matlab/Simulink D'un Système De Pompage Photovoltaïque » Mémoire De Magister, Université Constantine, 2015 ;
- [58] **Bennis, Saad.** Hydraulique Et Hydrologie. Puq, 2007 ;
- [59] **D. Boukhers** « Optimisation D'un Système D'Energie Photovoltaïque Application Au Pompage », Mémoire De Magister Université De Constantine, 2007 ;
- [60] **N. Hamdi** « Modélisation Et Commande Des Génératrices Eoliennes », Mémoire De Magister, Université De Constantine, 2008 ;
- [61] **D. Aitkaid** « Commande D'une Machine Asynchrone Sans Capteur Mécanique, A L'aide De Régulateurs Fonctionnaires », Mémoire D'ingénieur. Université de Tizi Ouzo, 2011 ;

- [62] **H. Mesloub** « Commande DTC Prédicative D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents » Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider De Biskra, 2016 ;
- [63] **F. Hamoudi**, " Commande Robuste D'un Filtre Actif Shunt A Quatre Fils ", Mémoire De Magistère, Université De Batna, 2008 ;
- [64] **Adjimi, N., & Belaidi, W.** « Modélisation Et Commande D'un Onduleur MLI » (2009) ;
- [65] **Ghouissem Mohammed**, « Commande Par Logique Floue D'un Moteur Asynchrone Alimenté Par Un Onduleur Sous Défaut », Université Des Sciences Et De La Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, Diplôme De Magistère, 2016 ;
- [66] **Mr C.Said**, « Etude Des Stratégies De Commande De L'onduleur », Mémoire D'ingénieur ; Université De Beskra, 2008 ;
- [67] **B. Belabbes** « Commande Linéarisant D'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents » Mémoire De Magister, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2001 ;
- [68] **M.S.Merzoug** « Etude Comparative Des Performances D'un D ETCT D'un Foc D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents (MSAP) », Mémoire De Magister, Batna, 2007 ;
- [69] **T. Rekioua** « Contribution A La Modélisation Et A La Commande Vectorielle Des MSAP » Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique, Lorraine, 1991 ;
- [70] **Belhaouchet, N.** « Fonctionnement A Fréquences De Commutation Constante Des Convertisseurs De Puissance En Utilisant Des Techniques De Commande Avancées Application : Amélioration De La Qualité De L'Energie », Doctoral Dissertation, 2014 ;
- [71] **Ameziane, S.** « Implantation Expérimentale De L'MPPT Pour Un Système De Génération Hybride Solaire-Eolien », Doctoral Dissertation, Université De Batna 2, 2009 ;
- [72] **R.Kot, M.Rolak, M.Malinowski** « Comparison Of Maximum Peak Power Tracking Algorithms For A Small Wind Turbine », Mathematics And Computers In Simulation 91 29–40, 2013.
- [73] **L. Zarour** « Etude Technique D'un Système D'Energie Hybride Photovoltaïque Eolien Hors Réseau » ; Thèse Doctorat. Université Mentouri De Constantine, 2010 ;
- [74] **Baghli Lotfi** : « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques ». Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat à l'université Henri Poincaré, Nancy I, en génie électrique, 1999 ;
- [75] **Sorin Gusia**, « Modélisation des systèmes électroniques puissance à commande MLI Application aux actionnements électriques », Université catholique de Louvain, Thèse de doctorat 2005 ;

Annexe

Annexe

Paramètres de la turbine éolienne

La turbine utiliser dans ce mémoire est une turbine tripale à axe horizontal, ses caractéristiques sont les suivantes :

$$C_p = 0.3921$$

$$\lambda = 2.8$$

$$R = 1.3785m$$

$$P_n = 3 kW$$

Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents

$$P_n = 3kW$$

$$R_s = 2.875 \Omega$$

$$L_d = 0.0085 H$$

$$L_q = 0.0085 H$$

$$\varphi = 1.29 Wb$$

$$P = 12$$

Paramètres du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Puissance nominale $P_n = 3kW$

Tension 220/380V

La vitesse de rotation nominale $N_n = 750 tr/min$

Nombre de pair de pôles $P = 2$

Résistance statorique $R_s = 2.24 \Omega$

Résistance rotorique $R_r = 1.47 \Omega$

Inductance cyclique statorique $L_s = 0.236 H$

Inductance cyclique rotorique $L_r = 0.236 H$

Inductance cyclique mutuelle $M = 0.2296 H$

Coefficient de frottement $f = 0.008 N. m. s/rad$

Inertie $J = 0.001 kg. m^2$