

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MÉMOIRE DE MASTER



En vue de l'obtention du Diplôme de Master en électromécanique

Thème

Etude d'un système de pompage éolien

Présenté par

ASLOUNE. Bachir

Encadré par

Mr D. AOUZELEG

Mr S. TARAFT

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements

Remerciement

je fais partie des personnes qui croient qu'il n'y a de force ni de puissance que par Dieu. Pour cela, je commence par Le remercier de m'avoir donné le courage, la force, la volonté et la patience de rendre ce mémoire à terme.

Je remercie très chaleureusement mes promoteurs Mr Aouzelleg et Mr Taraft qui ont accepté de m'encadrer et pour leurs orientations et soutiens.

Je remercie profondément Mme Ch.Serir pour son aide, ces conseils et pour le temps qu'elle m'a consacré sans oublier Mr Hamitouche, Mme Tadjine qui m'ont aidé dans des moments difficile.

Je remercie le doctorant E.Amirouche pour leurs soutiens, son aide et ses informations qui m'a donné pour continuer mon travail.

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Anes et Sami que j'aime beaucoup

A Mes oncles et mes tantes

Mes amis Et à toute personne qui m'a aidé de loin ou de près à réaliser ce mémoire

Nomenclature

Nomenclature

I. La turbine

V_v : vitesse du vent (m/s).

V_D : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie de 2.5m/s à 4m/s pour les éoliennes de forte puissance selon le constructeur.

V_n : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Celle-ci varie de 11.5m/s à 15m/s suivant les constructeurs et en fonction de la technologie.

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. V_M vaut 25m/s.

P_n : Puissance nominal de la turbine (W).

V_{max} : vitesse maximal de la turbine (m/s).

P_v : Puissance fournie par le vent (W).

ρ : Masse volumique de l'air ($1.225 \frac{kg}{m^3}$).

S : S Surface balayée par les pales (m^2).

β : Angle de calage des pales (rad).

λ : Rapport de la vitesse en bout des pales.

C_p : Coefficient de puissance.

P_t : Puissance de la turbine éolienne (W).

$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.59$ Limite de Betz. Coefficient de puissance maximale.

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

R : Rayon de la turbine éolienne(m).

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

2. MSAP

2.1 Grandeur statorique

v_a, v_b, v_c : Tensions des phases statoriques (Volt).

i_a, i_b, i_c : Courants de phases statoriques (Ampère).

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques (weber).

R_s : Résistance statorique(Ohm)

$[v_a \ v_b \ v_c]^t$: Vecteur tension statoriques (volt)

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courants statoriques (volt)

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$: Vecteur flux statoriques (volt)

$[R]$: Matrice des résistances statoriques (ohm).

$[L_s]$: Matrice des inductances statorique (H)

$[L_{s0}]$: Inductance propre d'une phase statorique (H)

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

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$[M_{s0}]$: Inductance mutuelle entre deux phases statorique (H)

2.2. Grandeur mécanique

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

f : Coefficient de frottement visqueux total du couplage mécanique (N.m.s/rad)

J : l'inertie totale du système ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice ($kg \cdot m^2$)

C_g : Couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m)

C_r : Couple résistant (N.m)

V_d, V_q : Tensions statoriques dans le repère de Pack (d,q) (Volt).

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

$[P(\theta)]$: Matrice de transformation de Pack de repère triphasé (abc) au repère biphasé (d, q, o).

$[P(\theta)]^{-1}$: matrice de transformation de Pack inverse.

i_d, i_q : Courants statoriques dans le repère de Pack (d,q) (A)

φ_q, φ_d : Flux statoriques dans le repère de Pack (d,q) (weber)

P : Nombre de paire de pole.

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

φ_{sf} : Flux des aimants (weber).

F_{mm} : Force magnétomotrice.

P_{tr} : Puissance transmise au rotor (W).

4. Grandeur de La machine asynchrone

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions des phases statoriques (Volt)

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tensions des phases rotorique (Volt)

R_r : Résistance rotorique (ohm)

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : Courants de phases statoriques (A).

i_{ar}, i_{br}, i_{cr} : Courants de phases rotorique(A).

$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques en weber

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$: Flux totaux traversant les bobinages rotorique (weber)

$[V_s]$: Matrice des tensions statorique (Volt)

$[V_r]$: Matrice des tensions rotorique (Volt)

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

$[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotorique (A).

$[\varphi_{sabc}]$: Matrice des flux statorique (weber)

$[\varphi_{rabc}]$: Matrice des flux rotorique (weber)

$[R_s]$: Matrice des résistances statorique (Ohm)

$[R_r]$: Matrice des résistances rotorique (Ohm)

$[L_{ss}]$; Matrice d'inductances statorique (H)

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotorique (H)

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor (H)

$[M_0]$: représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotorique (H)

w_e : Énergie électromagnétique (Joule)

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

V_{ds}, V_{qs} : Tension statoriques direct et quadratique (volt)

ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).

$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}$: Flux statorique direct et quadratique (weber)

$\varphi_{rq}, \varphi_{rd}$; Flux rotoriques direct et quadratique (weber)

i_{sd}, i_{sq} : Courant statoriques direct et quadratique (A)

V_{rd}, V_{rq} : Tension rotorique direct et quadratique (volt)

L_s, L_r : Inductance cyclique statorique et rotorique (H)

$l_s; l_r$: Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique (H)

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

φ_{md} et φ_{mq} : flux magnétisant selon l'axe d et q (weber)

θ_{sest} : Angle relatif estimé entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park.

w_{sest} : Pulsation du champ statorique estimé (rad/s).

w_{rest} : Pulsation du champ rotorique estimé (rad/s).

T_r : Constante de temps rotorique (s)

σ : Facteur de blondel.

5. Convertisseurs

5.1 Redresseur

V_1, V_2, V_3 : Tension de référence (Volt)

i_{red} : Courant redressée (A).

i_1, i_2, i_3 : Courants de référence (A).

V_{dc} : Tensions redressée (Volt)

S_1, S_2, S_3 : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur.

i_c : Courant capacitif (A).

i_{ond} : Courant ondulé (A).

C : Capacité (Farad).

5.3 Onduleur

V_{aO}, V_{bO}, V_{cO} : Tensions à la sortie de l'onduleur (Volt).

V_{aO}, V_{bO}, V_{cO} : Tensions à l'entrée de l'onduleur (Volt).

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

S_7, S_8, S_9 : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur

f_p, f_m, m : Fréquence de référence, Fréquence de modulation et L'indice de modulation.

V_m, V_p et r : Amplitude de la tension de référence, Valeur crête de l'onde de modulation et Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension

6. Pompe

P_n : Puissance nominale (W)

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

K_{re} : Couple résistant de la pompe (N.m).

P_{hyd} : Puissance hydraulique (W).

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

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

H : Hauteur totale du pompage (m).

P_{mec} : Puissance mécanique (W).

η_{hyd} : Rendement de la pompe.

H_{mt} : Hauteur manométrique(m).

6. Régulateur :

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral

7. Abréviations

MLI	Modulation de la largeur d'impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel intégrale
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MAS	Machine Asynchrone
MADA	Machine Asynchrone Double Alimentation
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
AC	Alternatif curent
DC	Direct curent
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
FOC	Field Oriented Control

Sommaire

Table des matières

Chapitre I/Généralités sur le système de pompage éolien..... 16

I.1 Introduction..... 16

I.2 Energie éolienne 16

I.3 Potentiel éolienne en Algérie :..... 16

I.4 Programme de l'énergie éolienne en Algérie..... 17

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne..... 17

I.6 Différents types d'éoliennes 18

 I.6.1 Éolienne à axe horizontal..... 18

 I.6.1.1 Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe horizontal 20

 I.6.2 Éolienne à axe vertical (VAWT) 20

I.7 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne 21

 I.7.1 Eolienne à vitesse fixe 21

 I.7.2 Eoliennes à vitesse variable 22

I.8 Intérêt de la vitesse variable..... 23

I.9 Zone de fonctionnement de l'éolienne..... 24

I.10 Maximisation du rendement de la turbine..... 25

I.11 Régulation mécanique de la puissance..... 25

I.12 Machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs..... 26

 I.12.1 Machine asynchrone à cage 26

 I.12.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)..... 26

 I.12.3 Machines à courant continu 27

 I.12.4 Machine synchrone à rotor bobiné..... 27

 I.12.5 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) 27

I.13 Convertisseurs utilisées..... 27

 I.13.1 Structure avec redresseur à diodes (AC/DC) 28

I.13.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur	28
I.13.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont.....	29
I.13.4 Structure avec redresseur à MLI.....	29
I.13.5 Structure avec redresseur/onduleur à IGBT commandés par MLI	30
I.14 Pompage éolien.....	30
I.14.1 Eolienne de pompage mécanique.....	30
I.14.2 Eolienne de pompage électrique :	31
I.15 Différentes pompes utilisées	32
I.15.1 Classification des pompes.....	32
I.16. Composition d'une pompe centrifuge.....	35
I.17 Couplages des pompes centrifuges	36
I.17.1 Couplage en série.....	36
I.17.2 Couplage en parallèle.....	36
I.18 Système de pompage éolien à étudier	36
I.19 Conclusion	37
Chapitre II : Modélisation de la chaine étudiée.....	38
II.1 Introduction	38
II.2 Modélisation de la vitesse du vent.....	38
II.3 Modélisation de la turbine éolienne.....	38
II.4 Modélisation de la l'arbre de la machine.....	40
II.5 Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	41
II.5.1 Equations électriques.....	41
II.5.2 Equations magnétiques	42
II.5.3 Equation mécanique	43
II.6 Mise en équations électriques et magnétiques dans repère de Park	43
II.6.1 Equations électriques.....	44
II.6.2 Equations magnétiques	44

II.6.3 Couple électromagnétique	44
II.7 Modélisation des convertisseurs statiques	45
II.7.1 Modélisation de redresseur	45
II.7.2 Modélisation de bus continu	46
II.7.3 Modélisation de l'onduleur	46
II.8 Commande MLI des convertisseurs	48
II.9 Modélisation de la machine asynchrone	49
II.9.1 Equation de la MAS dans le repère (abc)	49
II.9.2 Expression du couple électromagnétique	51
II.10 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone	52
II.10.1 Equations électriques	52
II.10.2 Equations magnétiques	53
II.11 Modélisation de la pompe centrifuge	53
II.13 Association de la MAS-pompe-onduleurs de tension à commande M.L.I	54
II.13.1 Simulation et interprétation des résultats	54
II.14 Conclusion	57
Chapitre III : Commande de la chaine étudiée	58
III.1 Introduction	58
III.2 Etat de l'art de la commande vectorielle	58
III.3 But de la commande vectorielle	58
III.4 Types de commande vectorielle	59
III.4.1 Commande vectorielle directe	59
III.4.2 Commande vectorielle indirecte	59
III.5 Commande vectorielle GSAP	59
III.5.1 Principe de la commande vectorielle d'une GSAP	59
III.5.2. Description de la première partie	60
III.5.3 Optimisation de la puissance de la turbine	61

III.6 Simulation de la première partie	62
III.6.1 Interpretation des resultats :	64
III.7 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique	64
III.7.1 Estimation de φ_r^*	65
III.7.2 Estimation des angles θ_r et θ_s	66
III.8 Découplage des tensions	66
III.9 Simulation commande IFOC de motopompe avec regulation de vitesse.....	68
III.9.1 Identification des paramètres des régulateurs PI	68
III.9.2 Identification des paramètres du régulateur de vitesse	70
III.9.3 Description de la deuxième partie et Interpretation des resultats.....	70
III.10 Description de la troisième partie.....	72
III.10.1 Simulation et interpretation des résultats	73
III.11 Conclusion.....	74
Chapitre IV : Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC.....	76
IV.1 Introduction.....	76
IV.2 But de ce travail	76
IV .3 Développement mathématique pour le couplage électrique	77
IV.4 Simulation interprétation des résultats	79
IV.5 Conclusion	82
Conclusion générale	83
Références bibliographies	84
Annexe	87
Annexe 1 : Paramètres de la machine asynchrone	87
Annexe 2 : Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents	87
Annexe 3 : Paramètres de la turbine éolienne	87
Annexe 4 : Paramètres de la pompe centrifuge	87
Annexe 5 : Contrôle des courants par hystérésis.....	87

liste des figures

Figure I 1. Carte annuelle du vent (m/s) à 10 m de sol	17
Figure I 2. Ferme éolienne de 10MW à Adrar	17
Figure I 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent	18
Figure I 4. Eolienne à axe horizontal	18
Figure I 5. Eoliennes On shore	19
Figure I 6. Eoliennes Off shore	19
Figure I 7. Eoliennes à axe vertical	21
Figure I 8. Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone	Erreur ! Signet non défini.
Figure I 9. Eolienne fonctionnent à vitesse variable	23
Figure I 10. Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	23
Figure I 11. Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	24
Figure I 12. Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage	26
Figure I 13. Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation	27
Figure I 14. Système éolienne basé la machine synchrone à rotor bobiné	Erreur ! Signet non défini.
Figure I 15. Machine synchrone avec redresseur à diode	28
Figure I 16. Machine synchrone avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur	29
Figure I 17. Machine synchrone avec redresseur à diodes et pont	29
Figure I 18. Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	30
Figure I 19. Eolienne de pompage mécanique	31
Figure I 20. Eolienne de pompage d'eau électrique	31
Figure I 21. Classification des pompes	32
Figure I 22. Variation des ΔP et Q_v entre les pompes volumétrique et centrifuge	33
Figure I 23. Pompe volumétrique	34
Figure I 24. Caractéristique d'une pompe volumétrique	34
Figure I 25. Pompe centrifuge	35
Figure I 26. Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge	35
Figure I 27. Différents types de rotor	35
Figure I 28. Composition d'une pompe centrifuge	36
Figure I 29. Couplage série	36
Figure I 30. Couplage parallèle	36
Figure I 31. Structure d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne	37
Figure II 1. Modèle de la turbine	38
Figure II 2. Allure de performance d'une turbine éolienne étudiée	39
Figure II 3. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	40
Figure II 4. Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)	41

Figure II 5.Représentation de MSAP dans le repère (d, q)	43
Figure II 6.Redresseur MLI.....	45
Figure II 7.Schéma simple du circuit du bus continu.....	46
Figure II 8.Onduleur MLI	47
Figure II 9.Principe de la MLI	48
Figure II 10.Tension de référence à la sortie de l'onduleur MLI	49
Figure II 11.Représentation des enroulementsde la machine asynchrone triphasée à induction	49
Figure II 12.transformation du système triphasé vers biphasé.....	52
Figure II 13.Comparaison de l'évolution des caractéristiques de la MAS-Pompe alimentée par une source sinusoïdale puis par un onduleur MLI	57
Figure III 1.Schéma bloc de commande du générateur éolien	61
Figure III 2.Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.....	62
Figure III 3.Diagramme Simulink de la turbine avec MPPT classique.....	62
Figure III 4.Resultats de simulation de la premiere partie	64
Figure III 5.Principe du contrôle vectoriel	65
Figure III 6.Schéma de découplage.....	68
Figure III 7.Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI	68
Figure III 8.Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques	69
Figure III 9.Schéma de défluxage	69
Figure III 10.Boucle de régulation de vitesse.....	70
Figure III 11.Resultats de simulatio de la deuxième partie.....	72
Figure III 12.Schéma globale du système de pompage éolien	73
Figure III 13.Resultats de simulation de la trisième partie.....	74
Figure IV 1.Caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne	76
Figure IV 2.Caractéristique couple-vitesse de la pompe étudiée	77
Figure IV 3.Schéma global sur sous logiciel PSIM	79
Figure IV 4.Variation de la vitesse de vent en fonction du temps	79
Figure IV 5.Allure de vitesse de la MAS	80
Figure IV 6.Allure de courant statorique	80
Figure IV 7.Zoom de l'allure de courant statorique.....	80
Figure IV 8.Allure de la puissance de la turbine.....	81
Figure IV 9.Allure du courant statorique	81
Figure IV 10.Allure de rendement	81

Introduction générale

Introduction générale

La production de l'énergie renouvelable a connu des développements considérables au cours des dernières années. En effet, les modes de production reposant sur la transformation d'énergies renouvelables par exemple éolienne, sont appelées à être de plus en plus utilisées dans le cadre du développement durable [1].

D'une part, les gisements des ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole, charbon et le gaz qui sont issus de la sédimentation de matière organique ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. D'autre part, ces énergies ne sont pas renouvelables et leur combustion émet des gaz à effet de serre qui provoque la pollution de l'air et le réchauffement climatique. Donc les énergies renouvelables prennent leur place afin d'assurer la continuité de la production d'énergie. Parmi ces énergies l'énergie éolienne.

Parmi les applications potentielles de l'éolienne, on peut citer le domaine de l'électrification rurale pour une consommation locale d'électricité ou pour sa transformation vers d'autres vecteurs énergétiques [2] : pompage, traitement de l'eau, l'électrolyse de l'eau et stockage d'hydrogène à long terme. Au delà de ces réseaux isolés, son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes [3].

Dans notre travail, on s'intéressera à l'énergie du vent qui fera l'objet de ce mémoire dans la recherche de solutions à la maîtrise de cette énergie applicable au pompage, il ne paraît intéressant de connaître ces bénéfices à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) à grand nombre de pôles qui rend les systèmes plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui nécessite un multiplicateur mécanique.

En raison d'une évolution incessante des outils de production, les industriels deviennent de plus en plus exigeants sur la fiabilité, la disponibilité et la facilité d'entretien de ces outils. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement électrique à vitesse variable a connu ces dernières années un essor considérable qui permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe mais ces convertisseurs présentent donc un coût d'installation plus élevé. Face à cette problématique notre étude est basé sur la possibilité d'éliminé le convertisseur AC/DC/AC dans un système de pompage éolienne. Pour le faire notre mémoire est structurée comme suit :

Le premier chapitre présentera l'état de l'art sur les chaînes de conversion de l'énergie éolienne, il se divise en deux parties :

- La première partie rappellera les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien ainsi que les différents types d'aérogénérateurs. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable,) seront également décrites.
- La deuxième partie présentera les différentes chaînes de conversion électromécaniques (machines et convertisseurs) permettant de transformer l'énergie

mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique et des généralités sur le système de pompage.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une éolienne à axe horizontal tripal, génératrice synchrone à aimants permanents, d'un redresseur, d'un onduleur et enfin, la modélisation du groupe motopompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge. On terminera ce chapitre par une simulation de motopompe sans et avec onduleur MLI à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

Le troisième chapitre portera la définition de la commande vectorielle appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents et la machine asynchrone ensuite, on définira le principe de la technique MPPT qui sera appliquée à la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie. Les résultats de simulation de toute la chaîne étudiée seront représentés.

Le quatrième chapitre sera basé sur la possibilité d'éliminer le convertisseur statique, le développement mathématique et ainsi des résultats de simulation à l'aide du logiciel PSIM seront exposés.

On terminera ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur le pompage éolien

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage éolien

I.1 Introduction

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor dans le monde entier. Pour cela beaucoup de systèmes sont étudiés, de différents types ont été conçus et développés tous en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. L'énergie éolienne est utilisée dans diverses applications en site isolé telle que l'éclairage et le pompage. Sachant que nous nous intéresserons à un système de pompage éolien. Nous devons nous familiariser avec tous les éléments le constituant. Alors dans ce premier chapitre porte un aperçu sur la production d'énergie éolienne en général, des types de machines utilisés, différents structures de convertisseurs exploités et tous les éléments de la chaîne de pompage éolien seront expliqués.

I.2 Energie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [4].

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité de transformer l'énergie cinétique présentée dans le vent en énergie mécanique de rotation. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- ✓ Soit conservation de l'énergie mécanique, le vent est utilisé pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✓ Soit transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [5].

I.3 Potentiel éolienne en Algérie

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar. L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s) [6], selon la carte des vents (Fig. I.2) en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER.

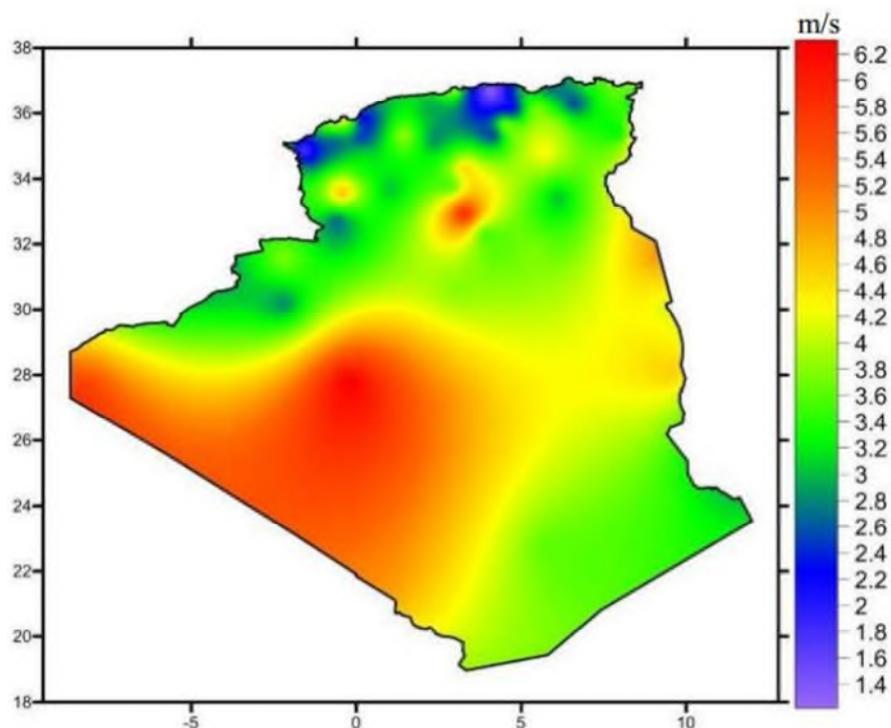


Figure I 1. Carte annuelle du vent (m/s) à 10 m de sol [10]

I.4 Programme de l'énergie éolienne en Algérie

Un premier pas a été déjà fait par le groupe SONELGAZ en 13 décembre 2010 qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne de Kabertene à Adrar d'une puissance totale de 10MW (Fig. I.2). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014 [21].



Figure I 2. Ferme éolienne de 10MW à Adrar [6]

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.3) [8].

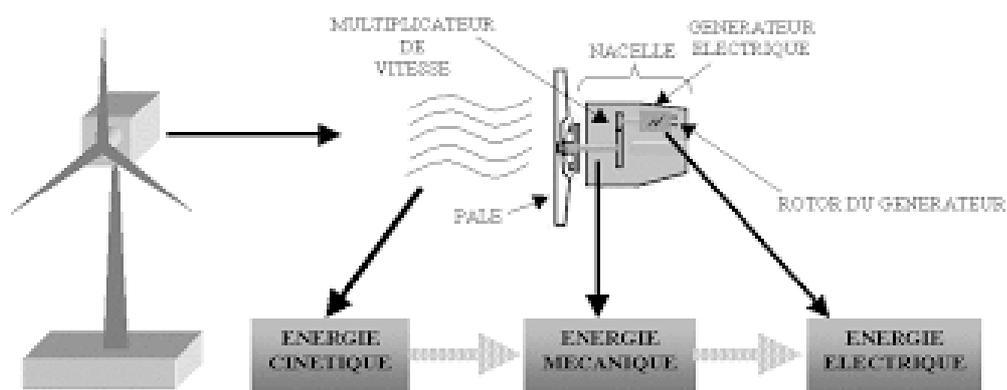


Figure I 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.6 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon leur axe en deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.6.1 Éolienne à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal (HAWT : horizontal axis Wind turbine) sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement plus élevé, démarrent de façon autonome et occupent une faible emprise au niveau de sol. On peut distinguer deux éoliennes à axe horizontal : les éoliennes dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent et les éoliennes dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent [9]. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à mono pale, bipale et tripale (les plus courantes Fig. I.4) et les multi-pales.



Figure I 4. Éolienne à axe horizontal

On distingue aussi :

- Les éoliennes terrestres dites On shore installées sur la terre ;
- Les éoliennes marines dites Off shore installées aux larges côtes.



Figure I 5. Eoliennes On shore



Figure I 6. Eoliennes Off shore

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques (pale, moyeu, l'arbre, génératrice, tour, etc.).

➤ Pales

Elles sont directement exposées aux variations du vent ce qui provoque leur rotation. Le contrôle de la puissance éolienne captée se fait de deux façons :

1. le contrôle de la surface exposée au vent par la méthode de PITCH, qui consiste sur le réglage de l'angle d'exposition des pales à l'angle incident du vent ;
2. le contrôle de cette surface par la méthode du STALL.

➤ Mat ou tour

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

➤ Rotor

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre des pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone est très utilisée car ils allient la légèreté et une bonne résistance mécanique.

➤ Nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien aérogénérateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

➤ Multiplicateur

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire munie par le vent, et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de

l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques [12].

➤ **Génératrice électrique**

Elle est l'élément principal de la conversion mécano-électrique. Elle est composée généralement d'une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier de quelques kW à 10 MW. Le rôle du système de commande est le contrôle en permanence du bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement en cas de défaillance pour l'arrêter. L'arbre relie le moyeu au multiplicateur. Il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin. Le système d'orientation des pâles, sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique) [13].

I.6.1.1 Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe horizontal

a) Avantages

- Coût limité ;
- Peu de contraintes mécaniques ;
- Grande efficacité.

b) Inconvénients

- Bruit conséquent ;
- Vibrations non négligeables ;
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

I.6.2 Éolienne à axe vertical (VAWT)

Ce type d'éolienne ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent, et offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol ce qui ne permet pas de développer de grandes puissances. Ce type d'éolienne n'a qu'un très faible rendement ne dépassant pas 50% de la limite de Betz. De plus certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage ce qui nécessite un moteur électrique au démarrage [15].



Figure I 7. Eoliennes à axe vertical

1.6.2.1 Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe vertical

a) Avantages

- Faible encombrement ;
- Intégrable au bâtiment, esthétique ;
- Système peu bruyant ;
- Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles) ;
- Fonctionne quel que soit la direction du vent.

b) Inconvénients

- Faible rendement ;
- Masse non négligeable [16].

A la suite de ce mémoire, notre étude est basé sur l'éolien à axe horizontal tripale.

1.7 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne

Les éoliennes peuvent être classées selon leurs vitesse en deux partie: celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

I.7.1 Eolienne à vitesse fixe

Premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (figure I.11). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage [17].

Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixe tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines

atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable [18].

A) Avantage :

- Système électrique simple ;
- Faible cout de construction et maintenance ;
- Grande fiabilité et non nécessité de système électrique de commande.

B) Inconvénients

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre Quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

I.7.2 Eoliennes à vitesse variable

On place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. Les structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure I.9. La configuration de la figure I.9.a est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure I.9.b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation. La structure de la figure I.9.c est basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance [12].

A) Avantages :

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent ;
- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient [13].

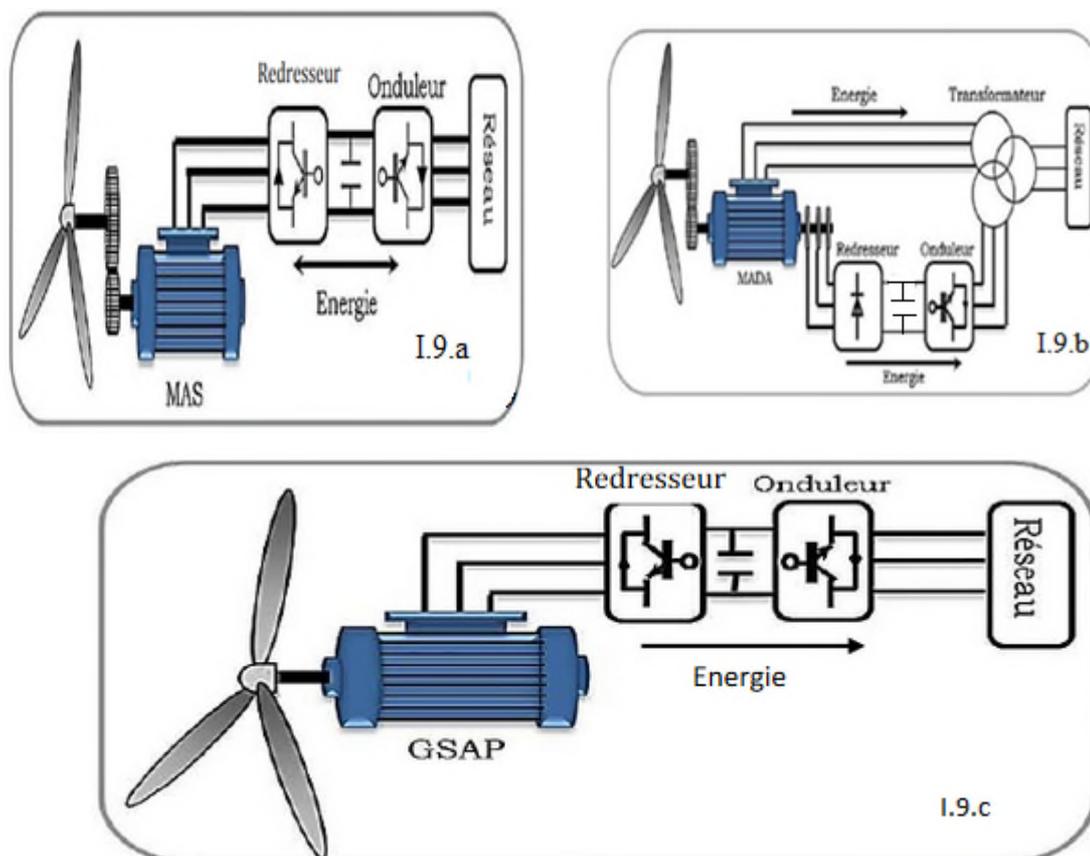


Figure I 8.Eolienne fonctionnent à vitesse variable

I.8 Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance (β) en fonction de la vitesse spécifique (λ), il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée à une charge, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (V_v). La figure I.9 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [19].

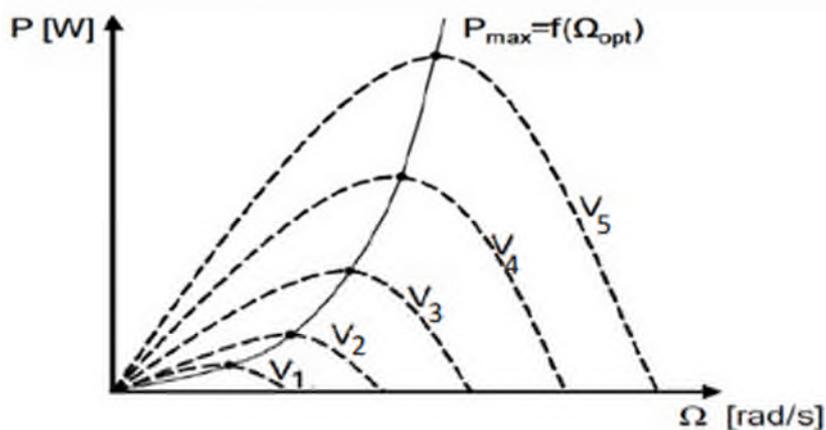


Figure I 9.Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

I.9 Zone de fonctionnement de l'éolienne

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions de stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes fonctionnent au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations ne sont pas conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1.5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [4]. Donc La courbe de puissance d'un aérogénérateur qui est généralement fournie par le constructeur, met en évidence les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne suivant la vitesse du vent comme le montre la figure I.10 [20].

- Zone I : $V < V_D$: la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible ;
- Zone II : $V_D < V < V_n$: La puissance capté dans cette zone est proportionnelle au carré de la vitesse du vent ;
- Zone III: $V_n < V < V_M$: la puissance est maintenant plus importante et constante tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale ($P = P_n$) quelque soit la vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement en pleine charge ;
- Zone IV : cette zone est dans laquelle le système de sureté de fonctionnement arrête le transfert d'énergie.

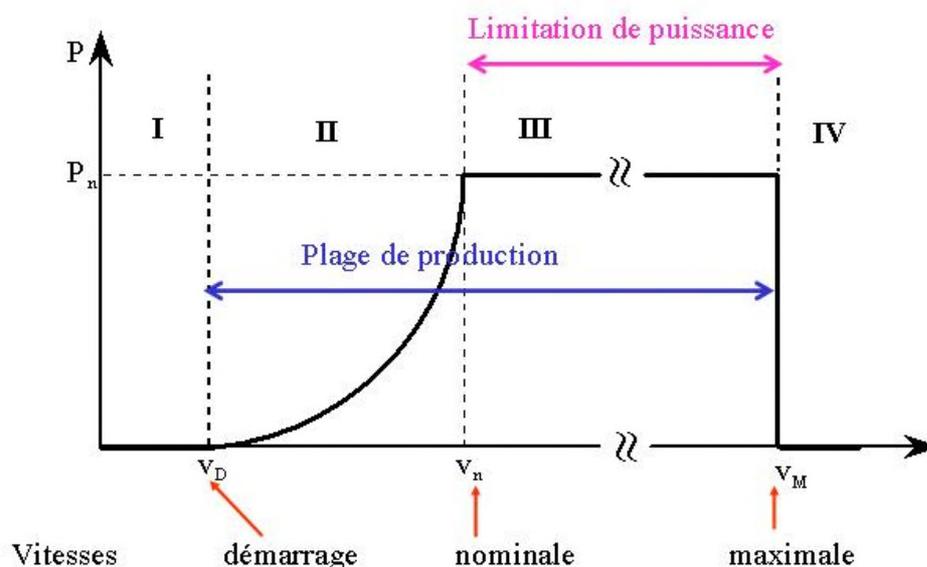


Figure I 10.Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

Avec :

V_D : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie de 2.5m/s à 4m/s pour les éoliennes de forte puissance selon le constructeur ;

V_n : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Celle-ci varie de 11.5 m/s à 15 m/s suivant les constructeurs et en fonction de la technologie ;

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. V_M vaut 25 m/s.

Sachant que notre étude est basé seulement dans la zone deux de la figure (I.10).

I.10 Maximisation du rendement de la turbine

L'efficacité du système éolien repose sur le fonctionnement à une vitesse de rotation optimale des pales de l'éolienne. Pour chaque vitesse du vent correspond une vitesse de la génératrice pour laquelle la courbe de puissance de l'éolienne présente un maximum. Cette vitesse change en fonction de la vitesse de vent, il est donc nécessaire de réguler le système pour se placer au point de fonctionnement optimal. Les processus de recherche du point de fonctionnement optimal sont appelés MPPT (maximum power point tracking), ils seront réalisés de différentes manières à savoir :

- Maximisation de puissance sans connaissance de la caractéristique de la voilure ;
- Maximisation de puissance avec connaissance de la caractéristique de la voilure.

Dans notre étude, on s'intéresse à la maximisation de puissance avec connaissance de la caractéristique de la voilure.

I.11 Régulation mécanique de la puissance

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine.

Les stratégies de commande aérodynamiques permettent d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent) [21]. Trois systèmes de régulation existent :

➤ La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort ;

➤ Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "STALL control". Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor ;

➤ Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "Active stall". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [2].

I.12 Machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

I.12.1 Machine asynchrone à cage

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction [2]. Mais les inconvénients majeur que les MAS sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [23].

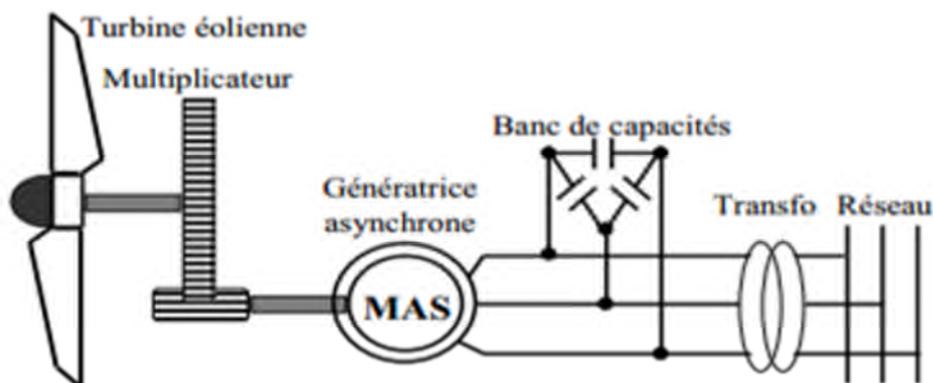


Figure I 11. Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage

I.12.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à une tension et à une fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence, si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles sont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant [22].

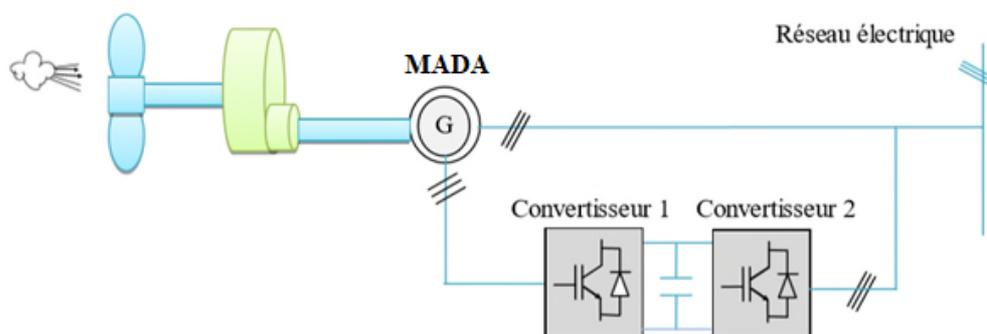


Figure I 12. Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation

I.12.3 Machines à courant continu

Ce type présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et moins robuste à cause de système balais collecteur et ont un grand poids [18].

I.12.4 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine (synchrone à rotor bobiné) possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du système bagues-balais.

I.12.5 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission directe) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De part son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible. Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autres machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement [24]. c'est pour cela on a choisi dans notre étude la MSAP.

I.13 Convertisseurs utilisés

Vu la complexité d'un système éolien à cause de la multiplicité des domaines existants et le couplage mutuelle délicat entre les différents composants à savoir la turbine, l'arbre, le générateur, et le convertisseur, ainsi que l'environnement extérieur (vent, charge), plusieurs configurations dédiées aux petites éoliennes à entraînement direct ont été étudiées et implantées au niveau mondial en vue d'améliorer leurs rendements énergétiques et de faciliter leurs exploitations. Selon les applications souhaitées de telles systèmes que ce soit, autonomes pour charger des batteries, ou à des applications avec raccordement au réseau électrique, une variété d'équipements de contrôle et de conditionnement d'énergie électrique a été développée [32]. En vue de remédier aux problèmes d'adaptation naturelle de la

chaîne précédente, nous détaillerons la configuration appartenant à la chaîne éolienne dite «Active » à cause des composants actifs d'électronique de puissance et les dispositifs MPPT, qui servent à adapter électriquement les différents composants de la chaîne éolienne, et maximiser ainsi le rendement énergétique global. A cet effet, cinq structures de conversion de l'énergie électrique fournie par l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables sont présentées dans la littérature [25].

I.13.1 Structure avec redresseur à diodes (AC/DC)

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [21]. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure I.13. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée.

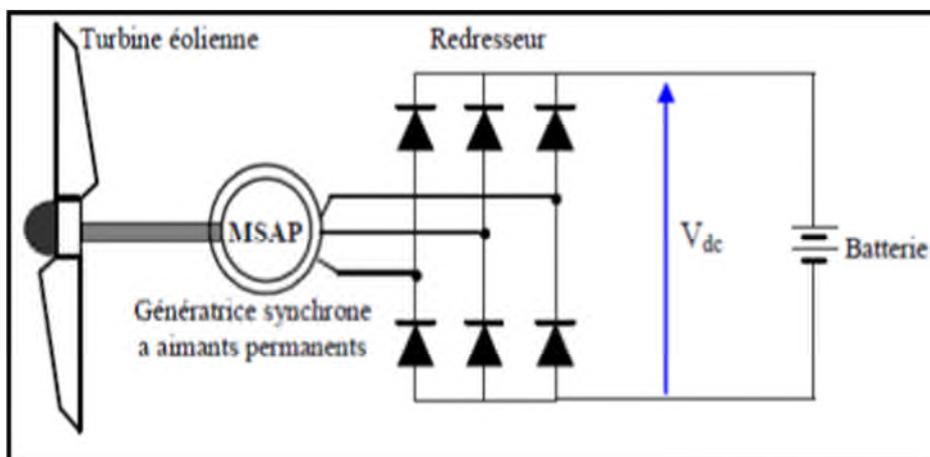


Figure I 13.Machine synchrone avec redresseur à diode

I.13.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe de la (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes [26]. Comme illustré la figure. I.14

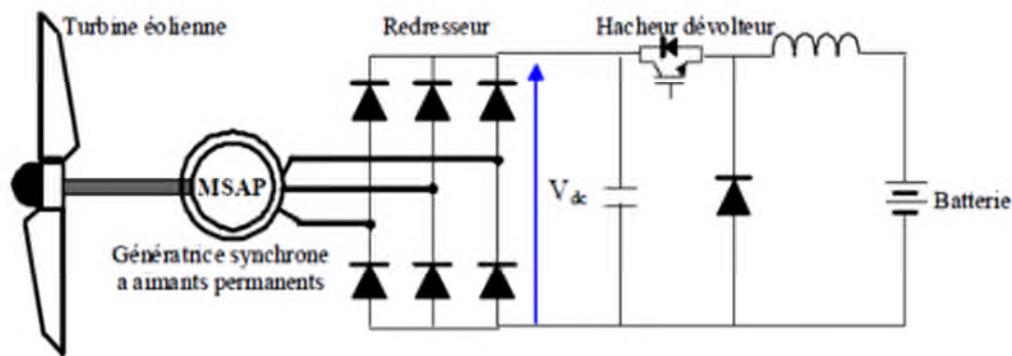


Figure I 14. Machine synchrone avec redresseur à diodes et à hacheur dévolteur

I.13.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T_1 et T_2 comme illustré sur la figure I.17. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [18].

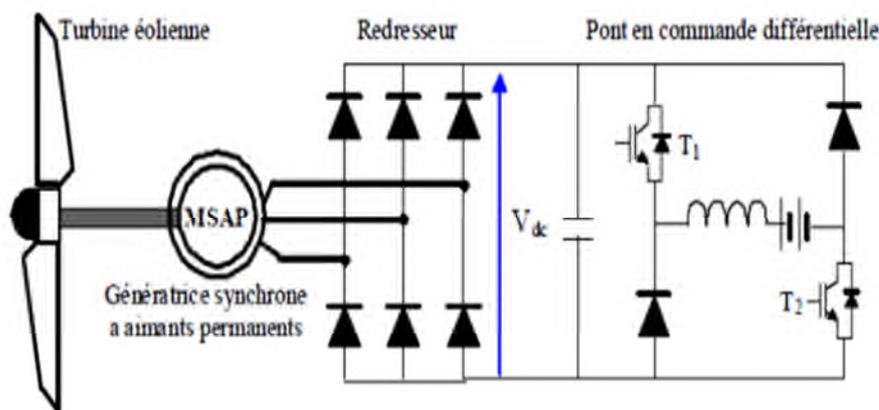


Figure I 15. Machine synchrone avec redresseur à diodes et pont

I.13.4 Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. , il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse où 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 comme montré sur la figure I.16 [2].

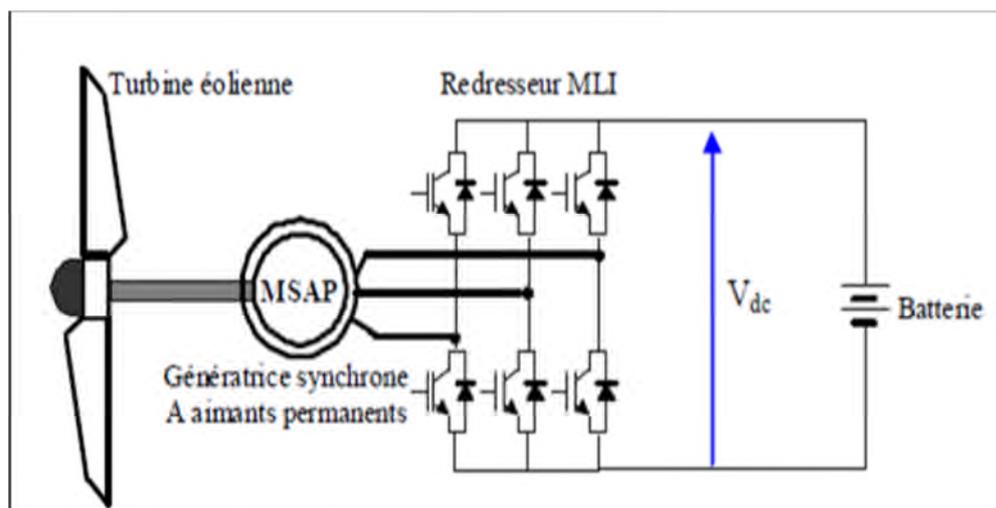


Figure I 16. Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI

I.13.5 Structure avec redresseur/onduleur à IGBT commandés par MLI

Cette cinquième solution est la plus intéressante, elle consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur. Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau ou le site isolé (charge variable) peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau/site, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du site isolé [22]. Dans ce mémoire, notre choix est basé sur cette dernière configuration, ceci permet de piloter directement en couple ou en vitesse les machines utilisées.

I.14 Pompage éolien

Les éoliennes de pompage sont utilisées depuis l'antiquité pour pomper de l'eau dans des puits. Cette utilisation revient à la mode chez les particuliers notamment dans le milieu rural, dans l'optique d'une économie d'énergie et d'un pompage d'eau efficace à moindre coût, aussi un tel système présente des avantages, du fait qu'il est souple d'installation, bonne régulation et une maintenance réduite, également il représente des inconvénients comme le coût élevé, rendement qui pour des vents élevés (4 à 12 m/s) et son exigence de stockage afin de subvenir aux besoins pour les jours peu ventés [1].

On cite deux types de pompage :

- Le pompage mécanique ;
- Le pompage électrique.

I.14.1 Eolienne de pompage mécanique

Son principe de fonctionnement consiste : un rotor éolien d'une vingtaine de pâles entraîné par un système de bielle-manivelle, ainsi qu'une pompe à piston plongée au fond du puits (Figures I.17). C'est un système qui s'adapte avec les zones peu ventées, et avec des besoins en eau journaliers ne dépassant pas les 20 m³ en volume et 50 m en profondeur du puits. Pour les puits plus profonds, les quantités d'eau pompées sont faibles et le risque de la tringlerie de pompage est accru compte tenu des efforts mécaniques [3].

Comme toute éolienne, cette éolienne a ces avantages et ses inconvénients. Elles sont généralement fiables, faciles à entretenir et d'un coût abordable, sa contrainte principale réside dans le fait qu'elle doit être installée directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits.

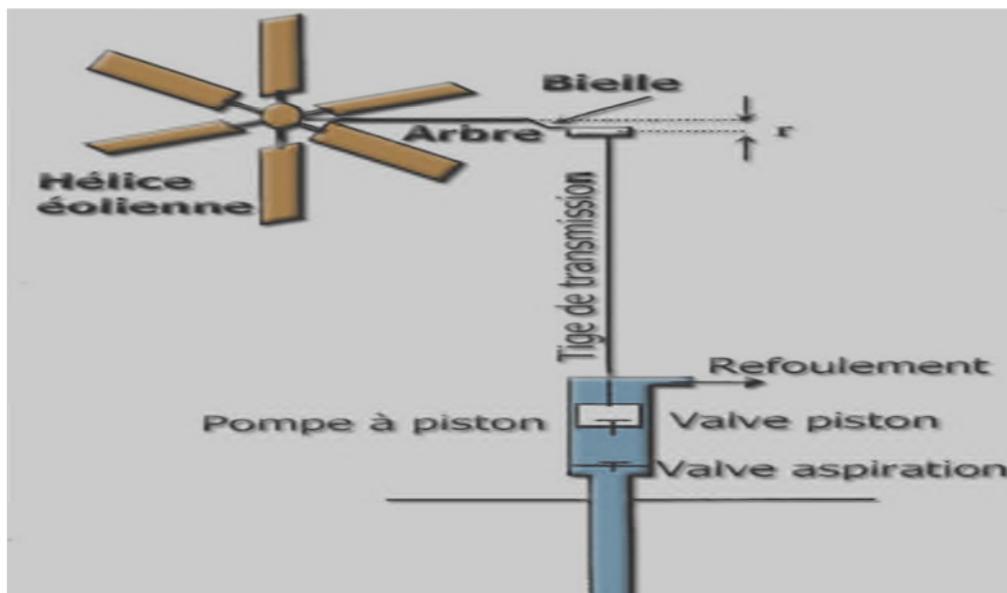


Figure I 17.Éolienne de pompage mécanique

I.14.2 Éolienne de pompage électrique :

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se placer près de la source d'approvisionnement en eau. Ce système commande une pompe électrique (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (puits) et la refoule à l'endroit de son utilisation (système d'irrigation, abreuvoir à bétail). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de la sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas de batterie. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [27]. Dans notre étude on s'intéresse au pompage électrique produit à partir de l'énergie éolienne.

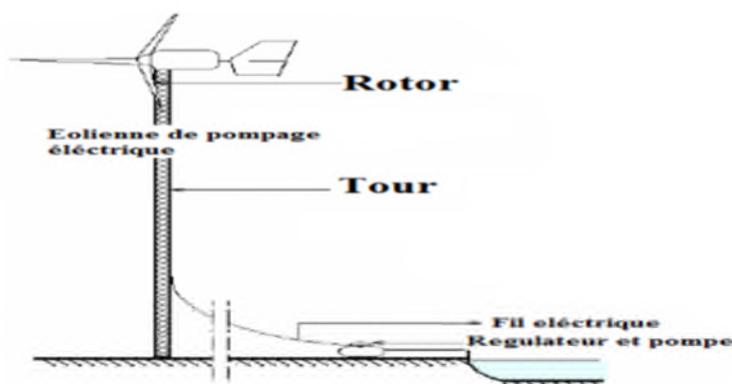


Figure I 18.Éolienne de pompage d'eau électrique

I.15 Différentes pompes utilisées

Le pompage est une opération effectuée par des organes nommés « Pompes » qui assurent le déplacement d'un fluide d'un point à un autre, lorsque la pesanteur n'assure pas cette tâche. Afin d'assurer le mouvement des organes de la pompe, il est nécessaire, au préalable, de transmettre l'énergie indispensable aux moteurs qui transforment l'énergie thermique ou électrique en une énergie mécanique retransmise au fluide, soit sous forme d'énergie cinétique appelée « débit » ou bien sous forme d'énergie potentielle appelée « pression » [28].

I.15.1 Classification des pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 5 ou 6 mètres au maximum. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celles-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface, la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [29].

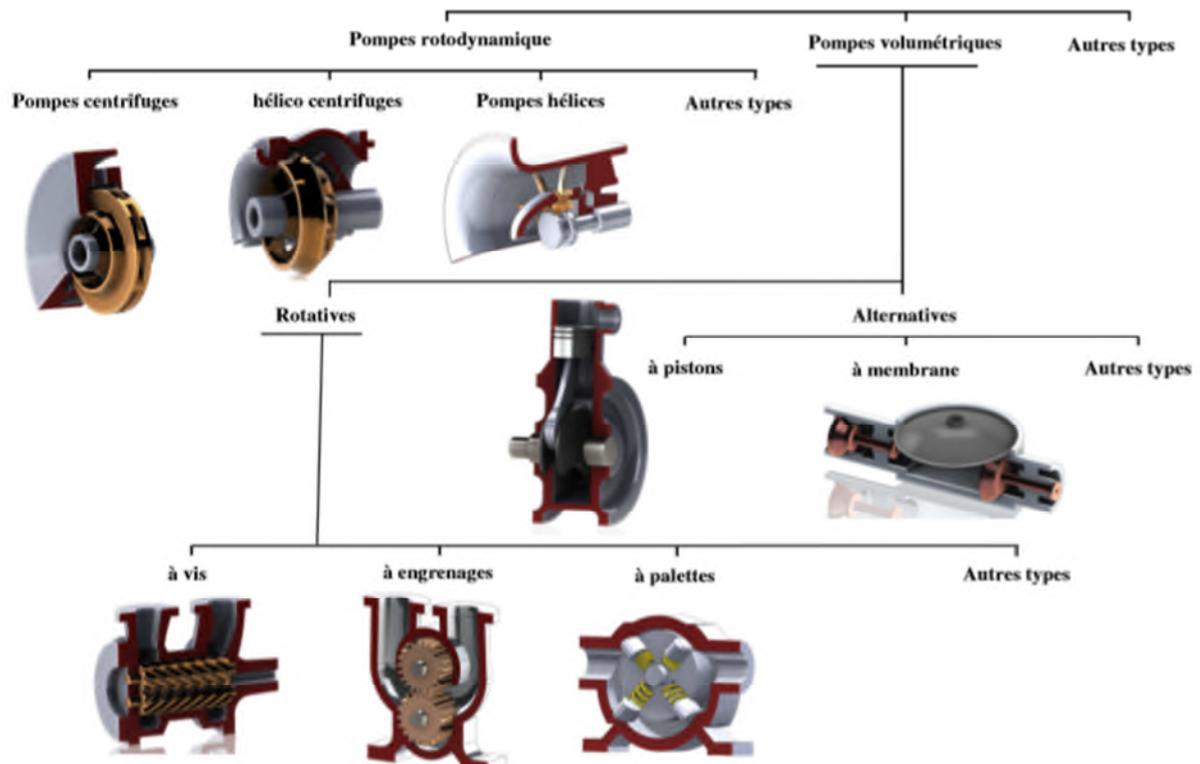


Figure I 19. Classification des pompes

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide.

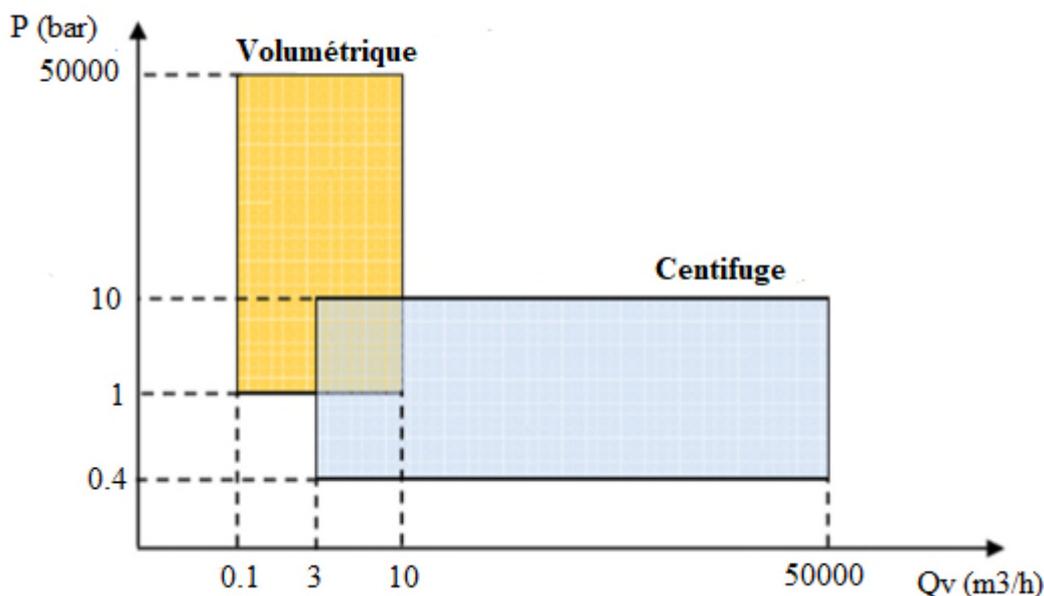


Figure I 20. Variation des ΔP et Q_v entre les pompes volumétrique et centrifuge

De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.

I.15.1.1 Pompes volumétriques

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.).

A) Avantages :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$) et aux grandes hauteurs ;
- Elles ont de bons rendements.

B) Inconvénients :

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $C = f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur une éolienne n'est pas économiquement fiable. Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadéquation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système [26] à cause de cette inconvénient on a orienté vers la pompe centrifuge.



Figure I 21. Pompe volumétrique

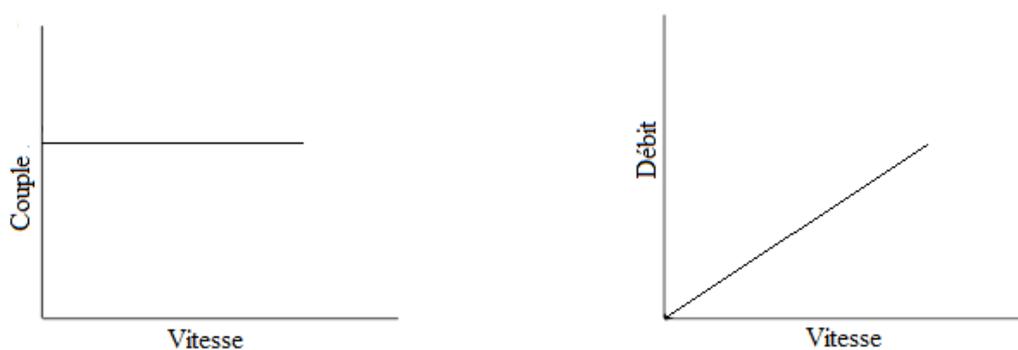


Figure I 22. Caractéristique d'une pompe volumétrique

I.15.1.2 Pompes centrifuges

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (H_{mt}) relativement fixe. Elle utilise les variations de vitesse de fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aube ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformé en pression par réduction de vitesse [30]. 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. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance absorbée est proportionnelle au produit $Q \cdot H_{mt}$. Ces pompes sont donc utilisées pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [31]. Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur, et lorsque la pompe sera pleine d'eau, la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine, de ce fait engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Les caractéristiques $C = f(V)$ et $Q = f(V)$ sont montrés dans la figure I.24. La puissance absorbée est bien adaptée aux modules de l'énergie éolienne, fournissant un bon rendement global. Dans notre étude, on utilise une pompe centrifuge à cause de la caractéristique $C = f(V)$ qui fonctionne à chaque vitesse à un couple maximum donc à une puissance maximal.

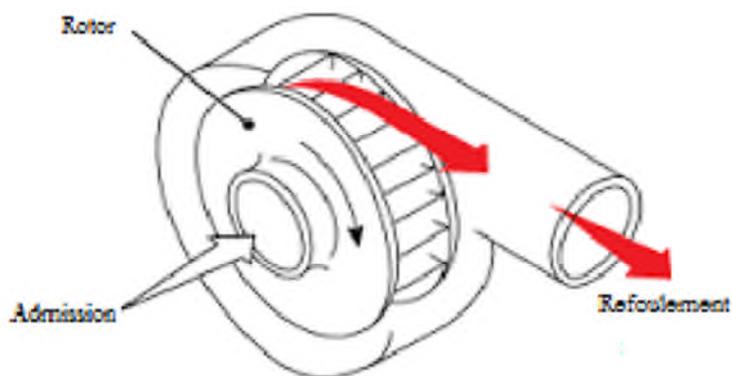


Figure I 23.Pompe centrifuge

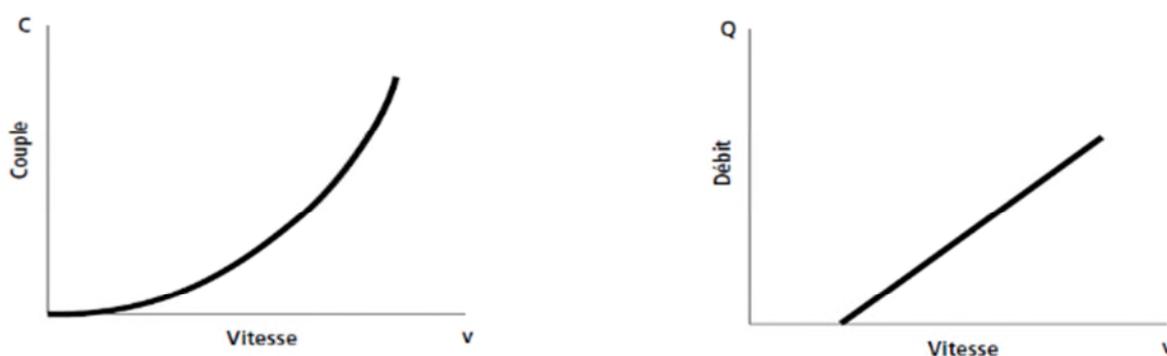
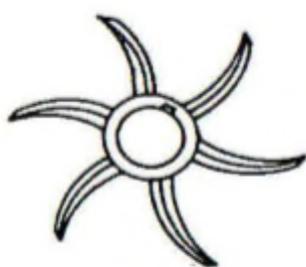


Figure I 24.Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge

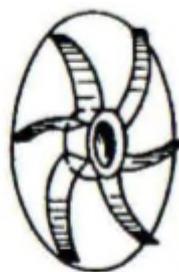
I.16. Composition d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est constituée de:

- a) Une roue à aubes tournante autour de son axe, appelée impulseur ;



Rotor ouvert



Rotor demi ouvert



Rotor fermé

Figure I 25.Différents types de rotor

- b) Un distributeur dans l'axe de la roue. Il sert à distribuer l'eau avec une vitesse et une direction convenables dans l'axe de la pompe appelé « ouïe » ou « œillard » précédé, à l'amont, par la canalisation d'aspiration ;

- c) Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

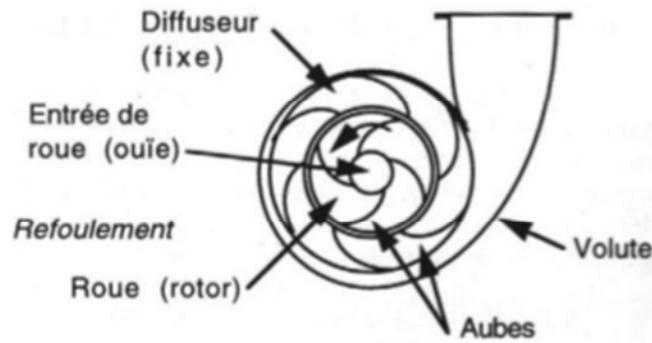


Figure I 26. Composition d'une pompe centrifuge

L'étanchéité de la pompe est assurée en générale par un presse-étoupe, ou une garniture mécanique, placé entre la volute et l'arbre d'entraînement.

I.17 Couplages des pompes centrifuges

Pour parvenir à obtenir certaines conditions de fonctionnement impossibles à réaliser avec une seule pompe, les utilisateurs associent parfois deux pompes dans des montages en série ou en parallèle. On considère deux pompes P_1 et P_2 ayant des caractéristiques identiques.

I.17.1 Couplage en série : Le couplage en série permet d'augmenter la hauteur dans les réseaux, il convient lorsque le besoin de hauteur plus important s'avère nécessaire.

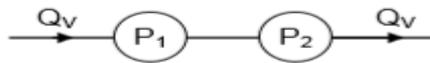


Figure I 27. Couplage série

Pour ce cas de couplage, on a :

$$\begin{cases} H_{mt} = H_{mt1} + H_{mt2} \\ Q_v = Q_{v1} = Q_{v2} \end{cases} \quad (I.1)$$

I.17.2 Couplage en parallèle : Le couplage en parallèle permet d'augmenter le débit dans les réseaux, il convient lorsque le besoin de débit plus important s'avère nécessaire.

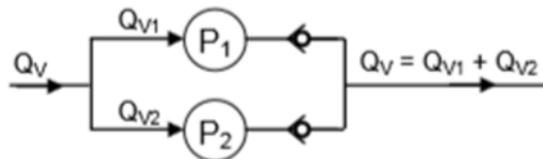


Figure I 28. Couplage parallèle

Pour ce cas de couplage, on a

$$\begin{cases} H_{mt} = H_{mt1} = H_{mt2} \\ Q_v = Q_{v2} + Q_{v1} \end{cases} \quad (I.2)$$

I.18 Système de pompage éolien à étudier

Avant de conclure ce chapitre, nous décrivons les différents constituants de notre système de pompage éolien. Ce dernier se compose 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 (via 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, son entretien minimale, et sont faible cout. Et finalement, on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un cout réduit, et couvre une large gamme d'utilisation de sa vitesse.

La structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destiné au pompage d'eau est décrite dans la figure (I.29).

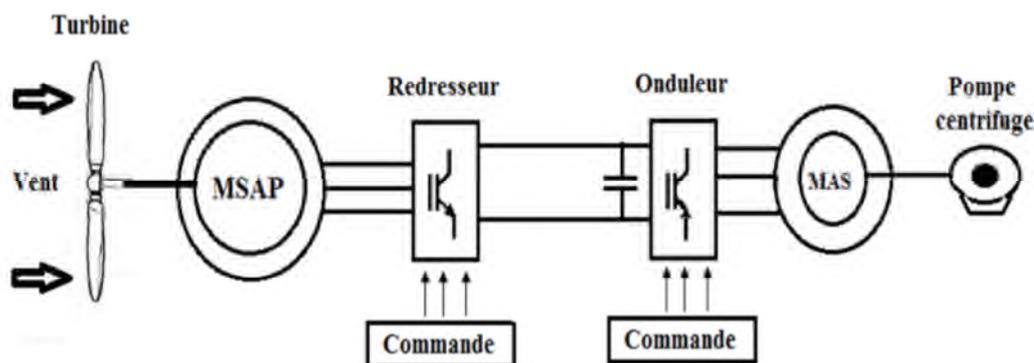


Figure I 29. Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne

I.19 Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a présenté quelques définitions et généralités sur l'énergie éolienne destinées au pompage, puis un bref aperçu sur les différents types d'éoliens et de pompe, ainsi on a présenté quelques convertisseurs les plus utilisés. Aussi quelques machines les plus répandus pour le générateur dédié à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Enfin nous avons donné un état d'art du pompage éolien.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude et à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie.

CHAPITRE II

Modélisation de toute la chaîne étudiée

Chapitre II : Modélisation de la chaîne étudiée

II.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique de la chaîne étudiée. Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation de la turbine, la génératrice synchrone à aimants permanents, de l'onduleur, redresseur, bus continu, la pompe centrifuge, ainsi que la machine asynchrone. À la fin de ce chapitre une simulation sous logiciel MATLAB/Simulink de la MAS avec et sans ondulateur MLI a été effectuée.

II.2 Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent, car la puissance éolienne dans les conditions optimales, et en fonction de la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle [19].

La vitesse du vent (V_v) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$V_v = f(t) \quad (\text{II-1})$$

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique et délivre une puissance mécanique caractérisée par le couple mécanique et la vitesse mécanique.

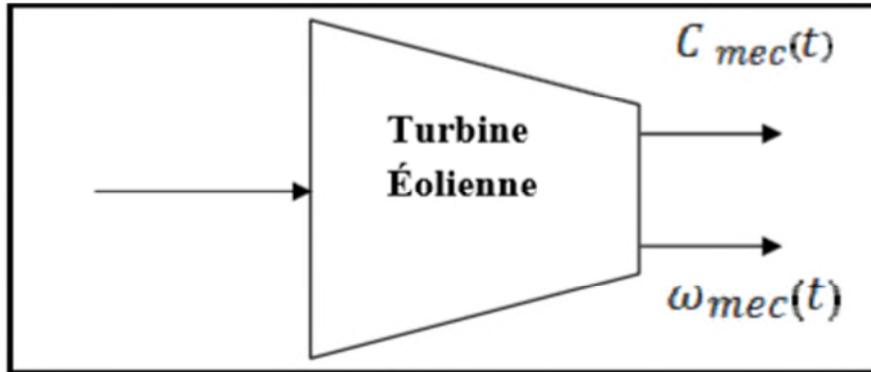


Figure II 1. Modèle de la turbine

La puissance fournie par le vent est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz

$$P_t = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) S V_v^3 \quad (\text{II.3})$$

Où : C_p est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine, qui dépend de la vitesse spécifique, angle de calage β , paramètre des pales. Selon la loi de Betz $C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.59$, ρ la masse volumique de l'air ($1.225 \frac{kg}{m^3}$) au niveau de la mer, S la surface balayée par les pales et V_v la vitesse de vent.

La figure II.2 montre la caractéristique $C_{pmax}(\lambda, \beta)$. Sur la courbe il existe un point correspondant au point optimale. La fonction utilisée est donnée comme suit [42] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \cdot (116 \cdot \frac{1}{\delta} - 0.4\beta - 5) e^{-21\frac{1}{\delta}}$$

$$\text{Telque : } \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

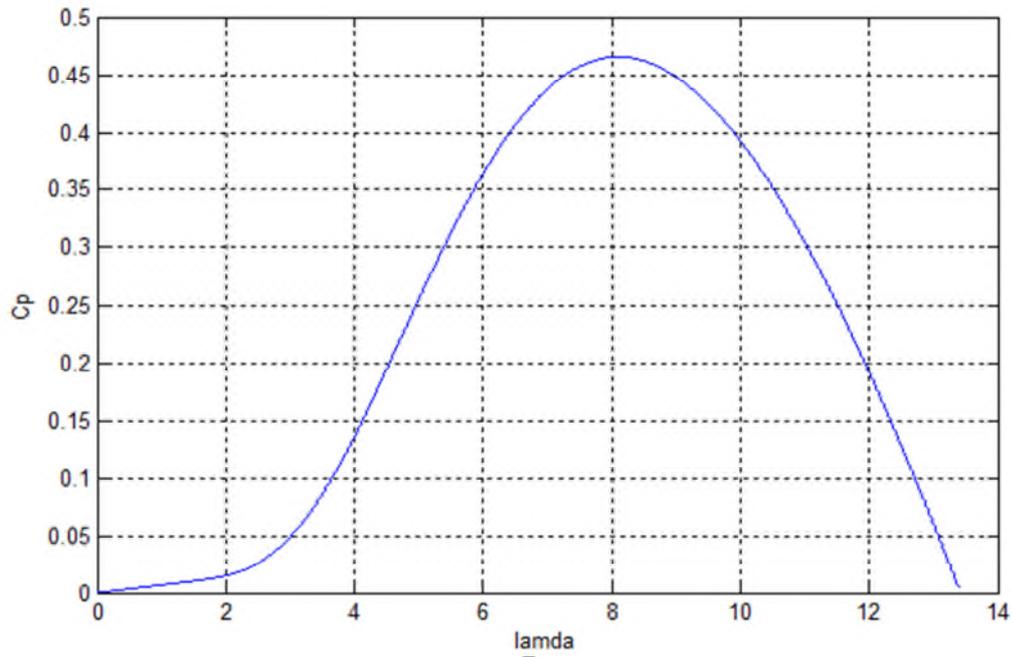


Figure II 2. Allure de performance d'une turbine éolienne étudiée

On introduit une variable sans dimension appelée vitesse spécifique pour caractériser les performances aérodynamiques d'une turbine éolienne :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.4})$$

Tel que Ω_t vitesse angulaire de rotation de la turbine et R son rayon. L'expression du couple aérodynamique est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} \rho C_p(\lambda, \beta) S V_v^3 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Avec : } S = \pi R^2 \quad (\text{II.6}) \text{ En}$$

remplaçant $\Omega_t = \frac{\lambda V_v}{R}$ dans (II.5), on aboutit à l'expression du couple aérodynamique suivante :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V_v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.7})$$

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal

(HAWT). Le graphique de la figure II-3 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse relative λ pour différents types d'éoliennes

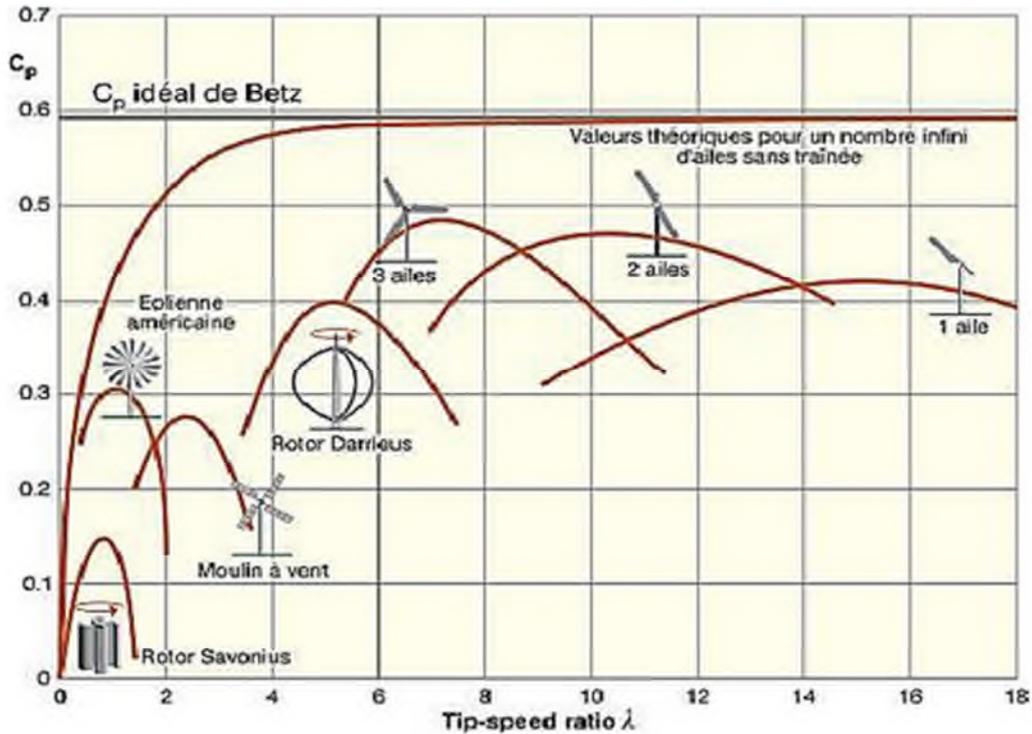


Figure II 3.Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [6]

Cette figure montre que pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10 appelées aussi éoliennes lentes, la courbe $C_p = f(\lambda)$ a une forme en cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 18, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatie au sommet [12].

II.4 Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble. L'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre est donnée par :

$$J \frac{\Omega_t}{dt} + f \Omega_t = C_t - C_g \quad (\text{II.8})$$

Avec : C_g : Couple électromagnétique développé par la génératrice ; C_t : Couple aérodynamique ; f : Coefficient de frottement visqueux total du couplage mécanique ; J : Inertie totale du système ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine et de la génératrice.

II.5 Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (Figure II.4) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

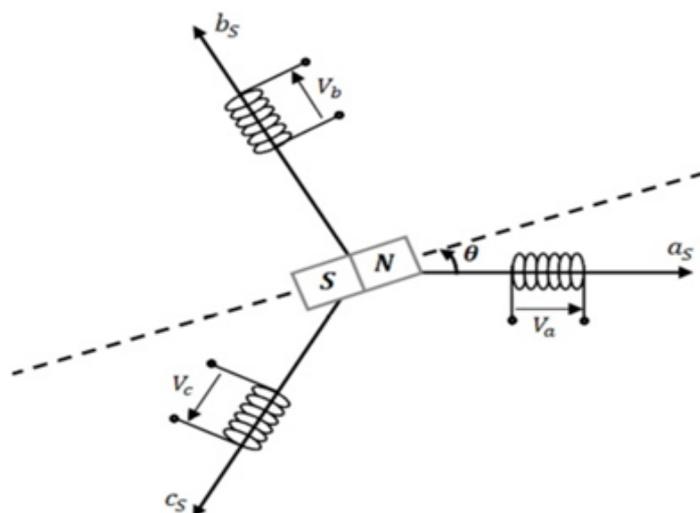


Figure II 4.Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)

Le modèle de la machine synchrone possède quatre sorties de type électrique: les trois bornes des enroulements stator et une borne représentant le neutre. Les phases sont généralement connectées en étoile avec le neutre flottant, ce qui élimine les harmoniques d'ordre trois. Une sortie de type mécanique est prévue pour la connexion d'une charge c'est la représentation de l'arbre de la machine.

On peut utiliser les hypothèses simplificatrices suivantes [9] :

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

On distingue trois types d'équations qui définissent le comportement de la machine à savoir :

- Les équations électriques ;
- Les équations magnétiques ;
- L'équation mécanique.

II.5.1 Equations électriques

Les tensions des trois phases sont données par

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où : v_a, v_b, v_c : Tensions des phases statoriques ; i_a, i_b, i_c : Courants de phases statoriques ; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques ; R_s : Résistance statorique :

Ce système d'équations peut se mettre sous une forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec : $[v_a \ v_b \ v_c]^t$: Vecteur tension statoriques ; $[i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courants statoriques ;

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$: Vecteur flux statoriques ;

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} ; \quad \text{avec } [R] : \text{Matrice des résistances statoriques}$$

II.5.2 Equations magnétiques

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [\varphi_{sf}] \quad (\text{II.11})$$

La matrice $[L_s]$ est une matrice d'ordre 3, elle contient des termes constants et variables, on met les termes constants dans la matrice $[L_{s0}]$ et les termes variable dans la matrice $[L_{s1}(\theta)]$ et on aura :

$$[L_s] = [L_{s0}] + [L_{s1}(\theta)] \text{ et } [\varphi_{sf}] = [\varphi_{fa}, \varphi_{fb}, \varphi_{fc}]^T \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Et

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2p\theta) \\ \cos(2p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2p\theta) & \cos(2p\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$[M_{s0}]$: Inductance mutuelle entre deux phases statorique ;

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

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator ; $[\varphi_{sf}]$: Vecteur du flux créer par les aimants permanents à travers les enroulements statoriques.

II.5.3 Equation mécanique

L'équation mécanique exprime par cette équation :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f\Omega_g = C_g - C_r \tag{II.14}$$

Tel que : C_r : Couple résistant.

II.6 Mise en équations électriques et magnétiques dans repère de Park

La résolution du système d'équations matricielles s'avère trop complexe, afin de réduire sa complexité on fait appel à des transformations, pour le passage d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (d, q, o) on fait la transformation de Park. Dans notre étude, on a utilisé la transformation de Park modifiée.

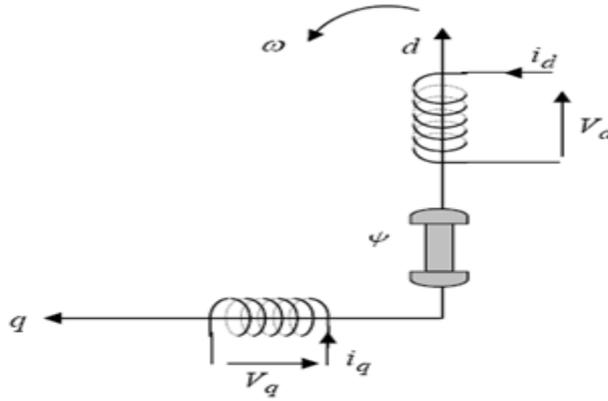


Figure II 5.Représentation de MSAP dans le repère (d, q)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tension, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante [33] :

$$[V_{dqo}] = [P(\theta)][V_{abc}] \tag{II.15}$$

$$[V_{abc}] = [P(\theta)^{-1}][V_{dqo}] \tag{II.16}$$

Avec :

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: Matrices de passage direct et inverse de Park qui conserve la puissance et assure le changement de variable. Elles sont données par les matrices suivantes :

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

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

$P^{-1}(\theta) = P^t(\theta)$; (θ) c'est une matrice orthonormée

II.6.1 Equations électriques

Les équations de la MSAP dans le repère de Park sont :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - p\Omega_{mec} \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + p\Omega_{mec} \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

II.6.2 Equations magnétiques

Sur l'axe d, on a : $\varphi_d = L_d i_d + \varphi_{sf}$ (II.18)

Où : φ_d : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor.

Sur l'axe q, on a : $\varphi_q = L_q i_q$ (II.19)

Le système (II.16) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega_{mec} \varphi_q \\ V_q = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_{sd} p\Omega_{mec} + p\Omega_{mec} \varphi_{sf} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Le dernier système obtenu décrit le schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park comme il est illustré dans la figure II.5.

II.6.3 Couple électromagnétique

Le couple électromécanique C_{em} est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les F_{mm} dans l'entrefer généré par les courants statoriques [34].

Selon Park l'expression de la puissance produite ou consommée est la suivante :

$$P_a(t) = V_d i_d + V_q i_q \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant V_d et V_q par leurs expressions on aura:

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

Avec :

- $R_s(i_d^2 + i_q^2)$: Représente la puissance dissipé en perte Joule dans les enroulements du stator ;
- $(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt})$: Montre la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements de stator ;

- $\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$: Indique la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$\omega = p \Omega_{mec} \tag{II.23}$$

Avec : ω : pulsations électrique; Ω_{mec} : vitesse de rotation de la machine (rotor) :

$$C_g = p[\varphi_d i_q - \varphi_q i_d] \tag{II.24}$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire:

$$C_{em} = p[(L_q - L_d)i_d i_q + i_q \varphi_{sf}] \tag{II.25}$$

Dans la suite de notre travail, on choisit le rotor à pôles lisses ($L_q = L_d$) et l'équation (II.24) devient :

$$C_g = p i_q \varphi_{sf} \tag{II.25}$$

II.7 Modélisation des convertisseurs statiques

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et des diodes montées en antiparallèle commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour des raisons suivantes [43] [44]:

- Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée, à partir des interrupteurs qui sont bidirectionnels ;
- Génère moins ou pas de perturbation électrique par propagation de courant harmonique ;
- il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la machine électrique.

II.7.1 Modélisation de redresseur

Les redresseurs sont des onduleurs utilisés « à l'envers » qui permettent de produire une tension continue à partir d'une source alternative. La figure (II.6) représente le schéma d'un redresseur MLI.

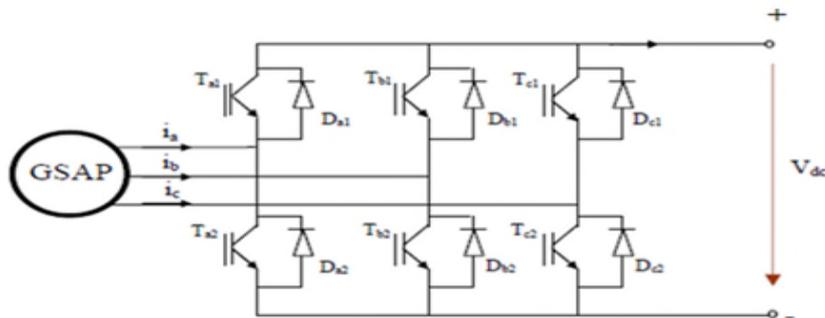


Figure II 6.Redresseur MLI

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle II.26 :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$i_{red} = S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3 \quad (\text{II.27})$$

Avec : V_{dc} : Tension sressedée; i_{red} : Courant redressé ; S_1, S_2, S_3 : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

II.7.2 Modélisation de bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettent le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge (figure II.7).

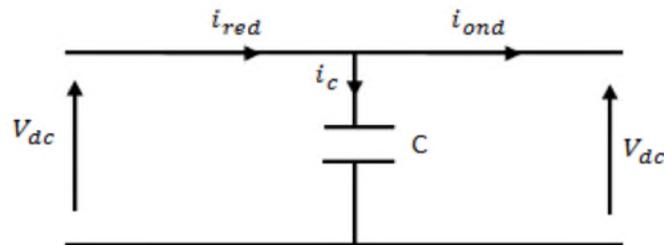


Figure II 7.Schéma simple du circuit du bus continu

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

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{i_c}{C} \quad (\text{II.28})$$

La tension du bus continue est égale à l'intégration du courant capacitif et son expression s'écrira comme suit :

$$V_{dc}(t) = V_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad (\text{II.29})$$

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II.30})$$

II.7.3 Modélisation de l'onduleur

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par une éolienne, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans cette étude, on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente impédance interne négligeable.

L'onduleur considérés dans notre étude est de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et des diodes montées en antiparallèle commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) comme la montre la figure (II.8) :

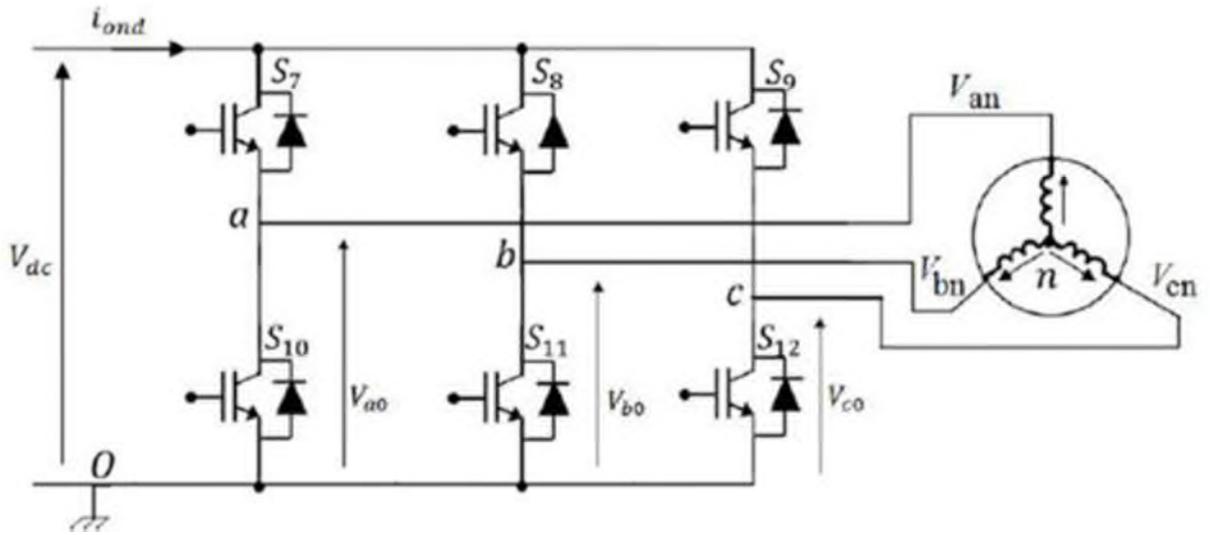


Figure II 8. Onduleur MLI

La loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (II.31)$$

Pour une charge équilibrée, on a :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.32)$$

La substitution des équations précédentes, on aboutit à :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (II.33)$$

En remplaçant (II.33) dans (II.34), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (II.34)$$

Nous déduisons le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logiques des interrupteurs

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{bmatrix} \quad (II.35)$$

On peut exprimer le courant i_{ond} en fonction des courants i_a, i_b, i_c alternatifs par l'équation suivante :

$$i_{ond} = S_7 i_a + S_8 i_b + S_9 i_c \quad (II.36)$$

Avec : S_7, S_8, S_9 : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égal à 1 si l'interrupteur est fermé et zéro s'il est ouvert).

II.8 Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir de façon simple les temps de conduction de chaque interrupteur [25].

Les deux paramètres qui caractérisent la commande sont:

- L'indice de modulation « m » défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_m de la tension de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.37})$$

- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension « r » comme étant le rapport de la tension de référence V_m et l'amplitude V_p de la porteuse

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.38})$$

Avec : f_p : Fréquence de modulation ; f_m : Fréquence de référence ; V_m : Amplitude de la tension de référence ; V_p : Valeur crête de l'onde de modulation.

Si m est entier, on parle d'une modulation synchrone sinon elle est asynchrone ; l'indice de modulation en triphasé doit être un multiple de trois afin que la MLI élimine des harmoniques d'ordre bas et repousse d'autres à des fréquences très élevées. La figure II.9 représente le principe de la commande par M.L.I sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$.

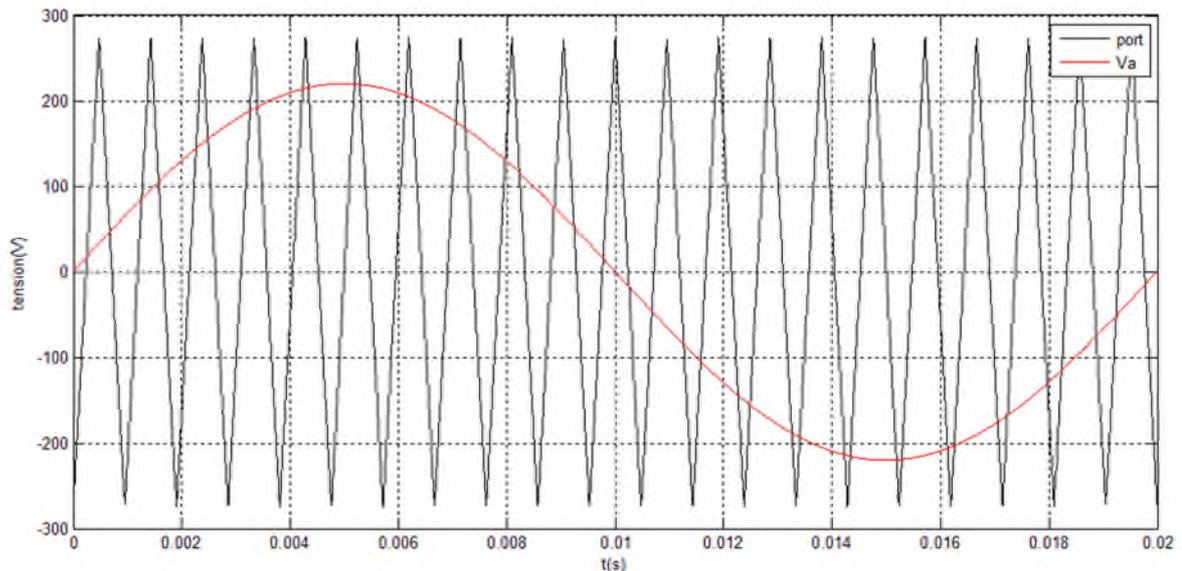


Figure II.9. Principe de la MLI

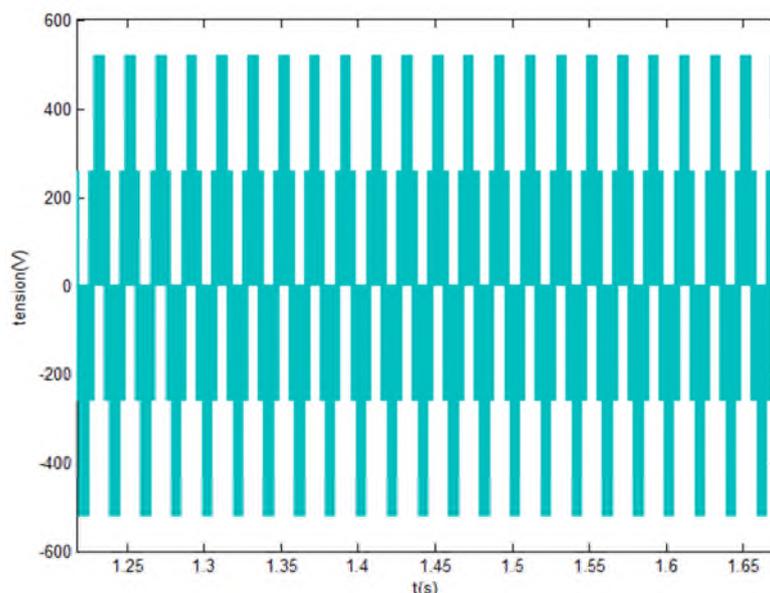


Figure II 10. Tension de référence à la sortie de l'onduleur MLI

II.9 Modélisation de la machine asynchrone

La MAS triphasés est représenté schématiquement par la figure II.11 :

- ▶ Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes identiques décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables ;
- ▶ Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° . Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

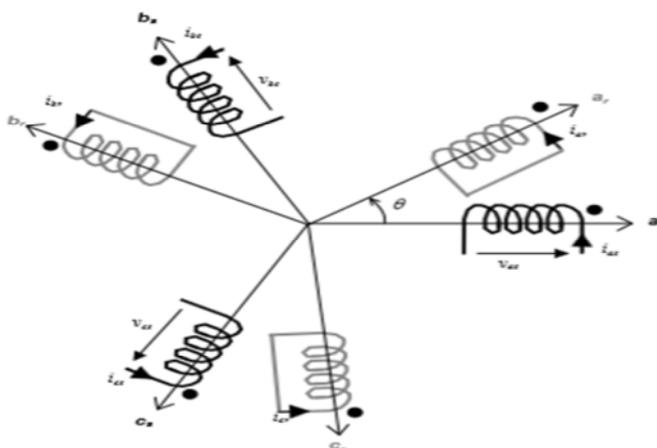


Figure II 11. Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée à induction

II.9.1 Equation de la MAS dans le repère (abc)

Hypothèses simplificatrices [9]

Dans cette étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique est non saturé ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;

- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, la f.é.m. est variable, les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques ;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;
- La machine est de constitution symétrique.

Les équations des tensions de la MAS dans le repère abc représentent pour chaque enroulement la somme des chutes ohmique et inductive due au flux.

Pour le stator

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\text{Pour le stator : } [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad \text{avec : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

$$\text{Pour le rotor : } [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad \text{et : } [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

$[V_s]$, $[V_r]$: Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

Les vecteurs des courants statoriques et rotoriques respectivement sont :

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique sont:

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique sont :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Les enroulements statoriques et rotoriques étant symétriques, on aura :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s \quad ; \quad R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r \quad (\text{II.46})$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.42) devient :

$$[V_r] = 0 = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{II.47})$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

Exemple de la phase *a* statorique :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)][i_{rabc}] \quad (\text{II.48})$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)][i_{sabc}] \quad (\text{II.49})$$

Tel que :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

La symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales et de même pour celles du rotor.

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix};$$

$$[M_{sr}] = [M_0] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Avec :

- $[M_0]$: Valeur maximale des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotorique ;
- $[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statorique ;
- $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor ;
- $[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques ;
- θ : Angle de rotation du rotor par rapport au stator.

II.9.2 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.51})$$

Avec :

$$W_e = \frac{1}{2} ([i_s]^t [\varphi_s] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.52})$$

Après quelques transformations, on obtient l'expression du couple électromagnétique comme suit :

$$C_{em} = \frac{p}{2} ([i_s]^t \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}][i_r] + [i_r]^t \frac{d}{d\theta_r} [M_{rs}][i_s]) \quad (\text{II.53})$$

II.9.3 Equation mécanique

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire des variations non

seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_r) \quad (II.54)$$

Avec C_{em} : couple électromagnétique ; C_r : couple de charge ; J : moment d'inertie totale du rotor et des parties tournantes de la machine ; f : Coefficient du frottement visqueux ; $\Omega_r = \omega_r/p$: Vitesse rotorique du moteur mécanique.

II.10 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone

Le principe de la transformation de Park consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a, b, c par des grandeurs d'indices d, q, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park $[(\theta)]$.

On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant, on obtient la représentation suivante :

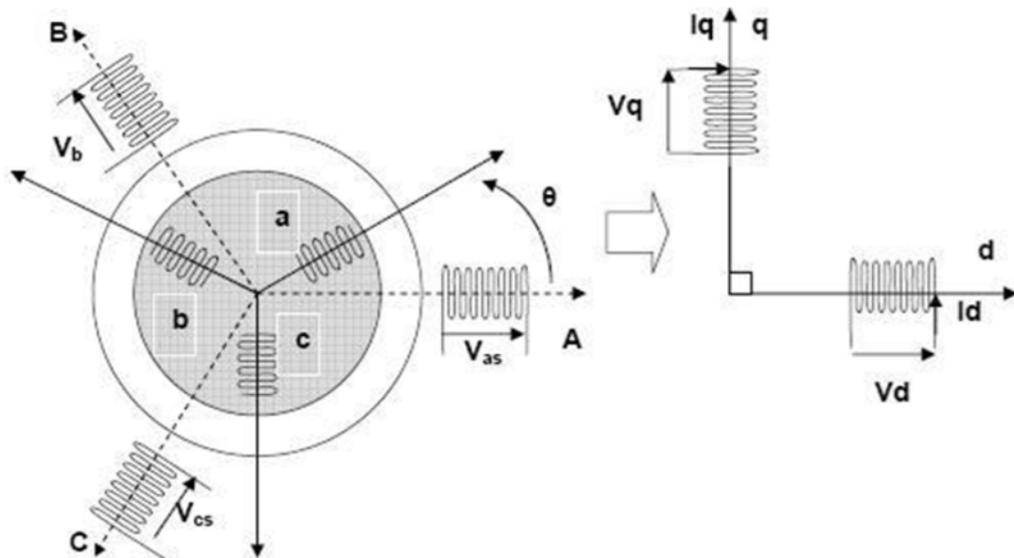


Figure II 12.transformation du système triphasé vers biphasé

II.10.1 Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{qs} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (II.55)$$

De même, en appliquant aux équations rotorique la transformation de Park avec angle de θ_r , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{rd} \end{cases} \quad (II.56)$$

Tel que : V_{ds}, V_{qs} : Tensions statoriques directe et quadratique ; V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotorique directe et quadratique ; i_{rd}, i_{rq} : Courants statoriques direct et quadratique ; ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Flux rotorique direct et quadratique ; ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Flux statoriques direct et quadratique

En supposant le système parfaitement équilibré, les composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

II.10.2 Equations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de Park, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

Avec :

- $L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique ;
- $L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique ;
- $l_s; l_r$: Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique.
- M : Mutuelle cyclique.

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statorique et courants rotorique est comme suite :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II.58})$$

II.11 Modélisation de la pompe centrifuge:

Donc, la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r avec C_s représentant le couple statique, très petit et K_r le coefficient de proportionnalité ($\frac{Nm}{rd.s^{-2}}$) tel que BRAUNSTEIN et KORNFEELD l'ont introduit en 1981 [36] :

$$\begin{cases} C_r = K_r \cdot \omega^2 + C_s \\ P_m = K_r \omega^3 \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

Sachant que dans notre étude le C_s est négligeable puisque il est très petit devant K_r

Donc l'équation (II.52) devient

$$\begin{cases} C_r = K_r \cdot \omega^2 \\ P_m = K_r \omega^3 \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

Avec : $K_r = \frac{P_n}{\omega_n^3}$

Où : P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W) ; ω_n : Vitesse nominale de la turbine ($\frac{rd}{s}$) ; K_r : Constante qui dépend de la pompe.

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est exprimée par l'équation suivante :

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (\text{II.61})$$

Avec : P_{hyd} : Puissance hydraulique (W) ; ρ : Masse volumique d'eau $1000 \frac{kg}{m^3}$; g : Accélération de la pesanteur ($9.81m/s^2$) ; H : Hauteur manométrique (m) ; Q : Débit volumique (m^3/s).

La puissance mécanique est donnée par l'équation suivante :

$$P_{mec} = \frac{p_{hyd}}{\eta_{hyd}} \quad (\text{II.62})$$

Où : P_{mec} : Puissance mécanique (W) ; η_{hyd} : Rendement de la pompe.

II.13 Association de la MAS-pompe-onduleurs de tension à commande M.L.I

II.13.1 Simulation et interprétation des résultats

Pour la simulation, il s'agit d'implanter le modèle électromécanique de la MAS-pompe sous l'environnement Matlab/Simulink. La MAS est alimentée par une source purement sinusoïdale et équilibrées, exprimées comme suit:

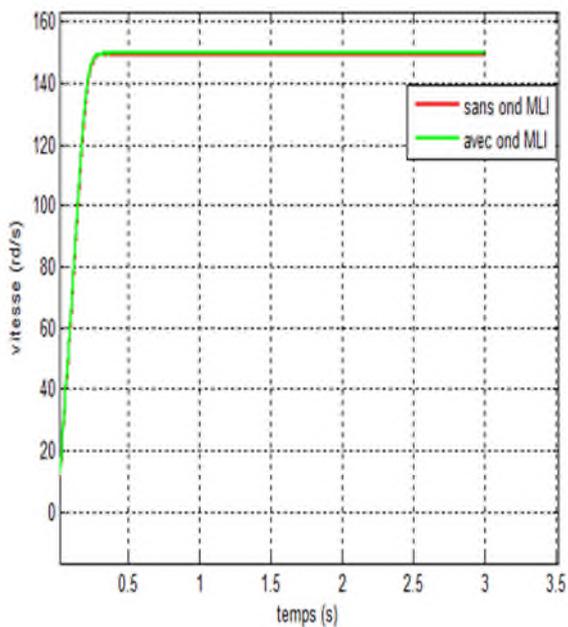
$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega_s t) \\ V_b = V_m \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

Puis on effectue une simulation en alimentant la MAS-pompe par onduleurs de tension à commande M.L.I dont $r = 0.8$ et $m = 63$. La figure. II.13 représente une comparaison de l'évolution des caractéristiques de la MAS-Pompe alimentée par une source sinusoïdale puis par un onduleur de tension à commande MLI. La figure (II.13) montre que :

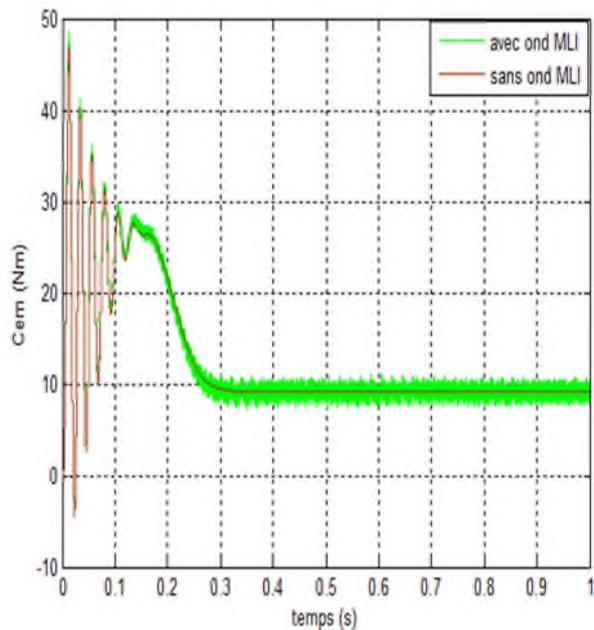
Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse augmente et évolue d'une manière presque linéaire, et elle atteint 150 rd/s (très proche de celle du synchronisme) à $t \approx 0.3s$ mais avec une légère diminution due au couple de charge de la pompe $C_r=9$ Nm. Le couple électromagnétique, au début atteint sa valeur maximale de 48.5 Nm et présente des oscillations qui disparaissent au bout de 0.18s ou il rejoint 25.4N.m, puis il diminue d'une façon presque linéaire et se stabilise au régime permanent à la même valeur que couple de la pompe à sa valeur minimale 9 Nm. Les courants statoriques présentent des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant, qui sont d'environ 4 fois le courant nominal, mais qui disparaissent au bout de quelques alternances pour donner lieu à des formes sinusoïdales d'amplitude constante (5.01A). Les courants statoriques suivant les axes direct et en quadrature, évoluent d'une façon à peu près analogue à l'évolution de la vitesse néanmoins, on remarque de faibles oscillations au niveau de ces derniers durant approximativement 0.3s. L'évolution des flux rotorique est presque identique à celle du couple électromagnétique en fin du régime transitoire, les flux selon les deux axes (d,q) se stabilisent respectivement à -1.076 Wb et à 0.08 Wb. Enfin la caractéristique de la pompe qui représente le couple de charge varie avec le carré de la vitesse.

Lorsqu'on alimente par un onduleur MLI les résultats obtenus sont approximativement similaires avec ceux obtenus par l'alimentation directe (figure II.13). Cependant, ces allures et en particulier celles, du couple électromagnétique, des courants statorique et de ceux suivant les deux axes direct et en quadrature, montrent que cette technique engendre une augmentation des ondulations dues principalement aux harmoniques délivrés par l'onduleur.

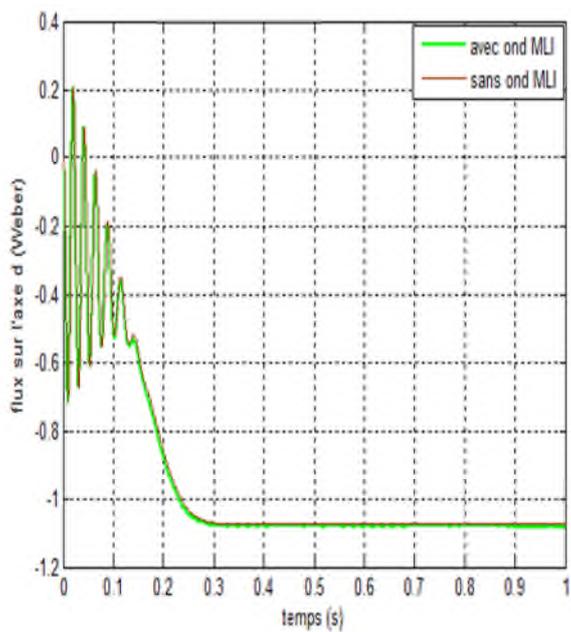
(a)



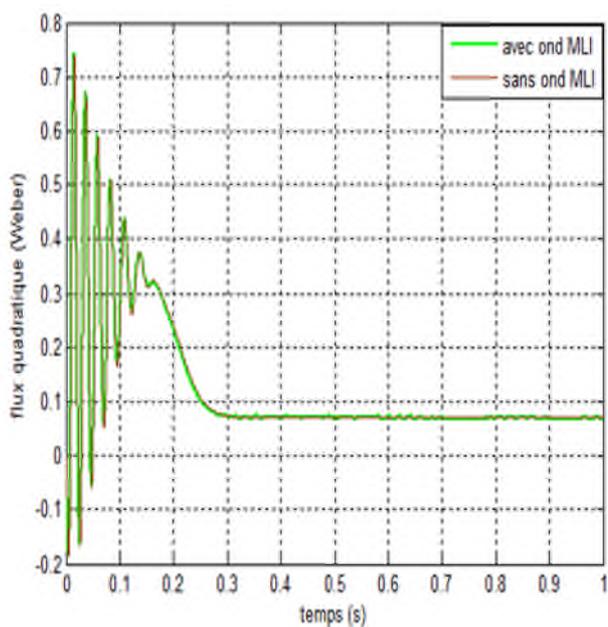
(b)



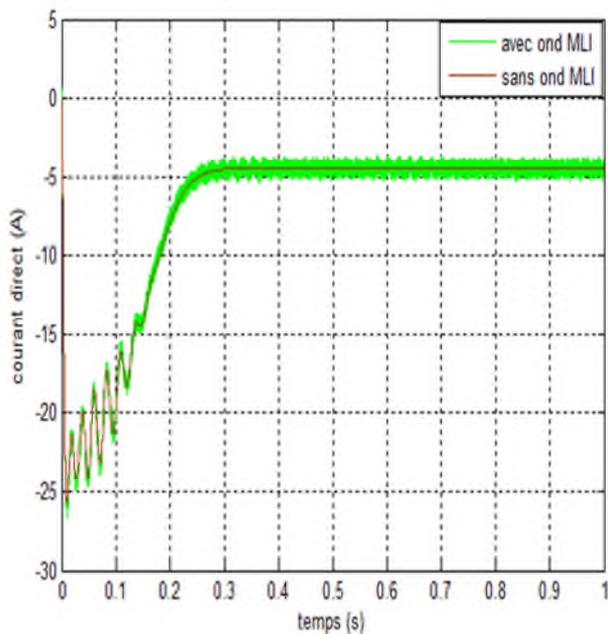
(c)



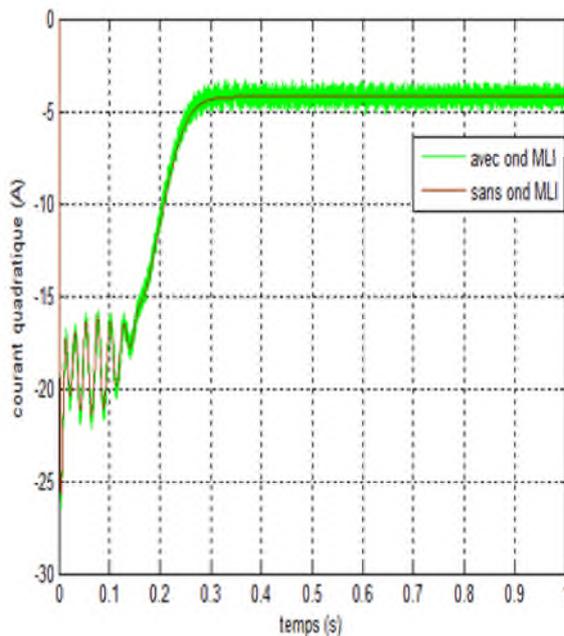
(d)



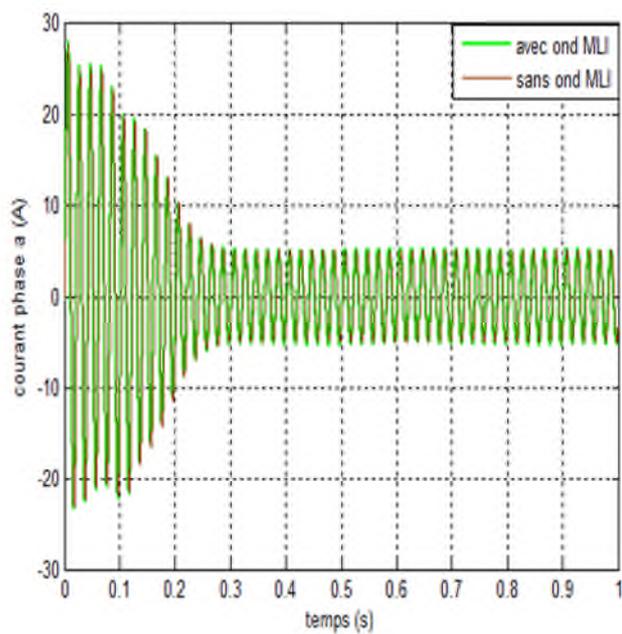
(e)



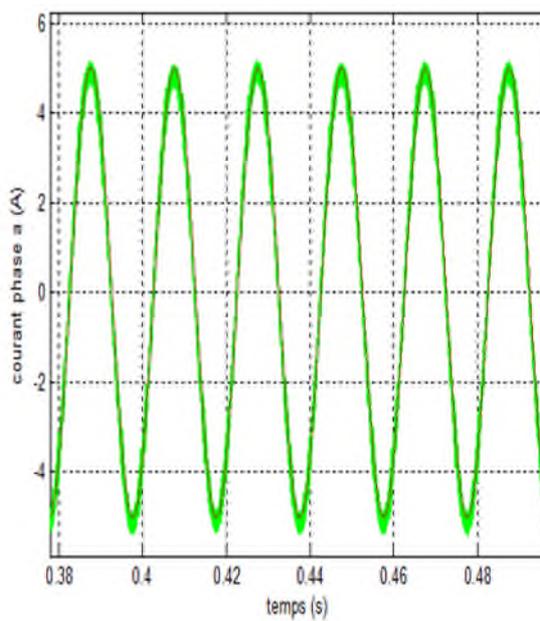
(f)



(g)



(h)



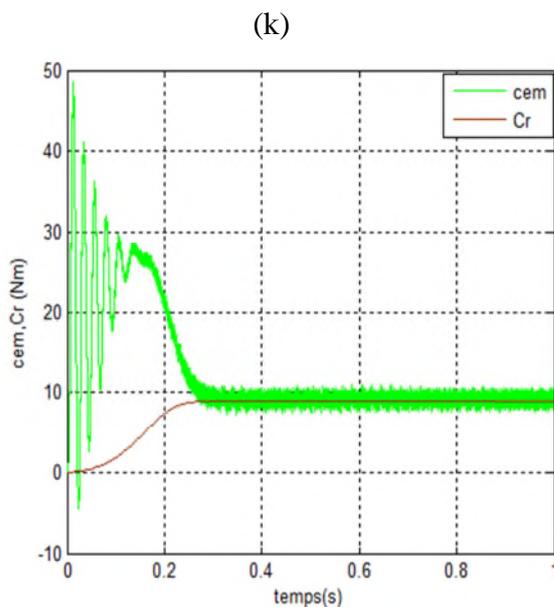


Figure II 13. Comparaison de l'évolution des caractéristiques de la MAS-Pompe alimentée par une source sinusoïdale puis par un onduleur MLI

II.14 Conclusion

Dans ce chapitre, on a consacré cette partie du travail à la modélisation de la chaîne de pompage éolien (turbine éolienne et génératrice synchrone à aimants permanents), convertisseurs statiques (redresseur, onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge et un moteur asynchrone. Une simulation est effectuée à l'aide de logiciel de simulation MATLAB/Simulink pour la MAS alimenté par une source triphasée équilibrée puis par un onduleur MLI et des résultats sont exposés et interprétés.

Cette modélisation sera exploitée pour la simulation de toute la chaîne globale de conversion en introduisant la commande vectorielle dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

Commande de la chaîne étudiée

Chapitre III : Commande de la chaine étudiée

III.1 Introduction

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs du couple et de la vitesse ayant des hautes performances dynamiques. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux variateurs d'atteindre ces performances. Parmi ses techniques qu'on a utilisées dans ce mémoire « commande par orientation de flux » et notées FOC (Field Oriented Control).

Pour la réalisation de ce control, il est nécessaire que l'orientation du flux soit en quadrature avec le courant qui génère le couple. Ainsi, on obtient le modèle de la machine où le flux et le couple électromagnétique sont découplés de sorte que l'on puisse agir sur le couple sans influencer le flux, puisque le couple dépend uniquement du courant i_q . Ce qui permet l'obtention des performances considérables, relatives à la réponse du système en régime dynamique similaire à celle d'une MCC à excitation séparée.

Ce chapitre sera divisé en trois parties, la première partie permet d'introduire les concepts de la commande vectorielle appliquée à la machine synchrone à aimants permanents fonctionne en mode génératrice alimenté par une turbine éolienne associée à un redresseur à commande à hystérésis et la régulation du bus continu. 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 dédiée à la connections de toute la chaine étudiée commandables en puissance.

Une simulation sous logiciel MATLAB/Simulink sera présentée à la fin de chaque partie.

III.2 Etat de l'art de la commande vectorielle

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancées en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de la transformation de Park, évaluation de fonction trigonométriques, des intégrations, des régulations. Ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. On se trouve confronter à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple, alors vient la commande vectorielle pour régler ce problème de découplage.

III.3 But 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 [38].

III.4 Types de commande vectorielle

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 [39].

On site deux méthode de commande vectorielle :

- Commande vectorielle directe;
- Commande vectorielle indirecte.

III.4.1 Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator, ces capteurs donnent les valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure comme :

- ❖ Le problème de filtrage du signal mesuré;
- ❖ La mesure varie en fonction de la température;
- ❖ Le coût de production est élevé. (capteur, conditionneur, filtre). Cette commande n'est pas optimale.

Donc pour régler ce problème, dans notre mémoire on a opté pour la commande vectorielle indirecte.

III.4.2 Commande vectorielle indirecte

A cause des inconvénients de la commande précédente, la commande vectorielle indirecte est considérée comme la plus pratique. Dans cette commande, les courants rotorique, le flux rotorique et la position angulaire (θ) sont estimés à partir de la mesure des paramètres de la machine qui peuvent être accessible comme la tension et le courant statorique.

Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température pour cela on a établie quelque hypothèse simplificatrice pour la modélisation.

III.5 Commande vectorielle GSAP

III.5.1 Principe de la commande vectorielle d'une GSAP

La commande vectorielle des machines à courants alternatifs est maintenant bien connue. Son principe est de rendre le fonctionnement d'une machine à courants alternatifs identique à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composante des courants suivant les deux axes d et q. Habituellement, la composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composantes d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple [40].

Le modèle de la MSAP dans le repère de Park donné par les équations différentielles (II.16) et (II.17).

La stratégie souvent utilisée pour les machines synchrones, consiste à maintenir une référence du courant direct i_d à zéro. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d et de travailler à couple maximal.

On impose $i_d = 0$ le système d'équation devient :

$$\begin{cases} V_d = -L_q i_q p\Omega_{mec} \\ V_q = R i_s + L_q \frac{d\varphi_q}{dt} i_q + p\Omega_{mec} \varphi_{sf} \end{cases} \quad (III.1)$$

Donc :

Le couple électromagnétique devient d'après (II.24)

$$C_g = p i_q \varphi_{sf} \quad (III.2)$$

Comme l'amplitude du flux des aimants permanents est constante, le couple est directement proportionnel à i_q .

$$C_g = k_t i_q \quad (III.3)$$

Tel que $k_t = p\varphi_{sf}$

On remplace l'expression du couple (III.3) dans l'équation mécanique (II.13) on obtient

$$\frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{1}{j} (k_t i_q - C_r - f\Omega_g) \quad (III.4)$$

III.5.2. Description de la première partie

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d, q). La référence du courant direct i_{dref} est fixée à zéro et la sortie du régulateur de la tension du bus continu constitue la consigne du couple. Le couple dépend seulement du courant i_q . Alors, on peut contrôler le couple uniquement par la composante i_q . Le courant de référence i_{qref} est obtenu par la relation (III.3) dont le couple de référence est issu de la régulation de la tension du bus continu. Les références des courants passent par une transformation biphasé vers triphasé ce qui nous donne les trois courants de référence qui sont comparés par les courants réels. La sortie de comparateur passe par un régulateur à hystérésis. Les signaux logiques destiné à attaquer les semi-conducteurs du redresseur. La figure (III.1) représente le schéma bloc de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents avec régulation du bus continu.

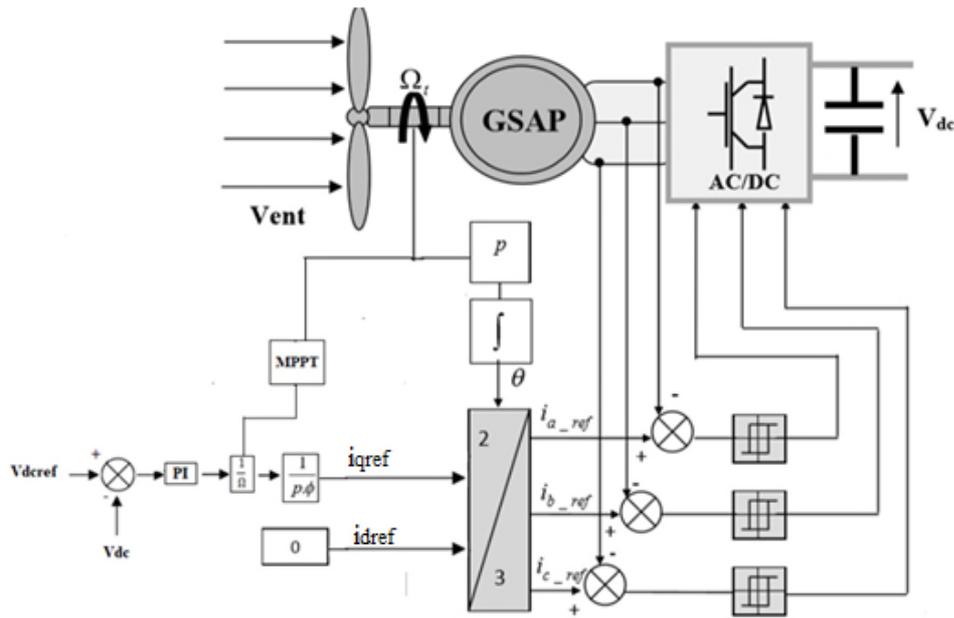


Figure III 1. Schéma bloc de commande du générateur éolien

Pour calcul de régulateur PI (voir l'annexe 2).

III.5.3 Optimisation de la puissance de la turbine

Pour la l'optimisation de la puissance nous avons adopté à la technique MPPT sans asservissement de vitesse.

III.5.3.2 Méthode MPPT 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'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [41]. La courbe spécifique d'une turbine possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale (λ_{opt}) et le coefficient de puissance maximal (C_{opt}). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation(II.5) est égale à :

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

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est donnée par:

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

En remplaçant (III.5) dans (III.6) on obtient

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

Si on divise cette dernière sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du couple :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} \rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta) \Omega_t^2 \quad (III.8)$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III.8) permet le calcul de la valeur optimale du couple.

$$C_{topt} = K_{opt} \Omega_t^2 \tag{III.9}$$

Avec : $K_{opt} = \frac{1}{2\lambda^3} \rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta)$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence montrée par la figure (III.2).

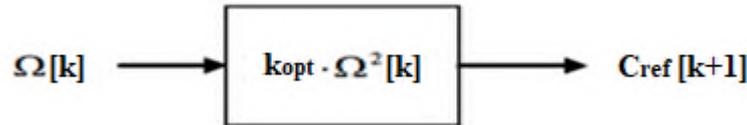


Figure III 2.Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La Figure (III.3) donne l'illustration graphique de ce mode de recherche du point maximal de puissance:

- La mesure de la vitesse de rotation Ω_t engendre le calcul du couple C_{ref} . Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice :
- $$C_t - C_g = J \frac{\Omega_t}{dt} + f \Omega_t$$
- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse Ω_t où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée ;
 - Après quelques itérations, on atteint l'optimum à (C_{opt}, Ω_{opt}) correspondant à la puissance optimale $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{popt})$.

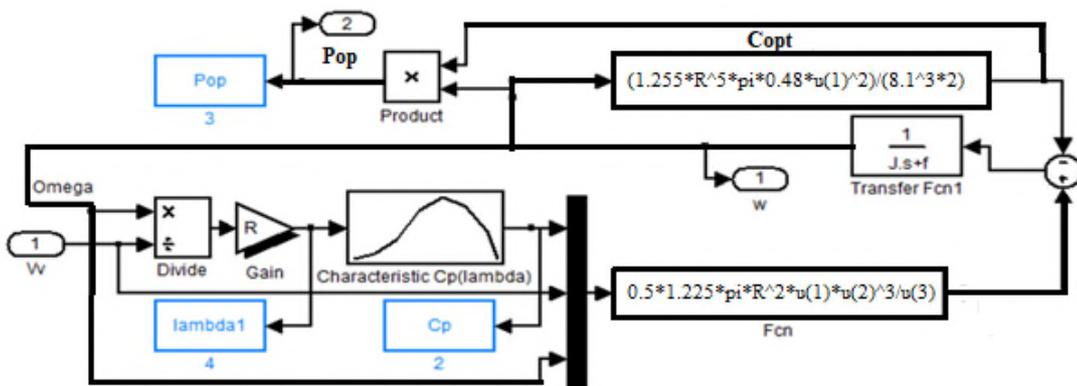
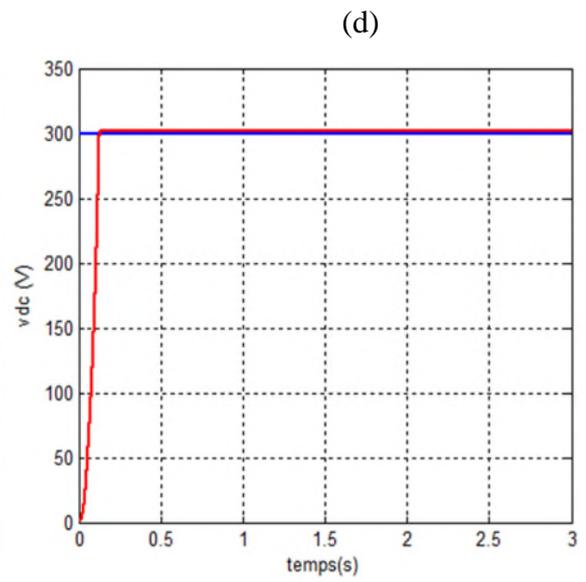
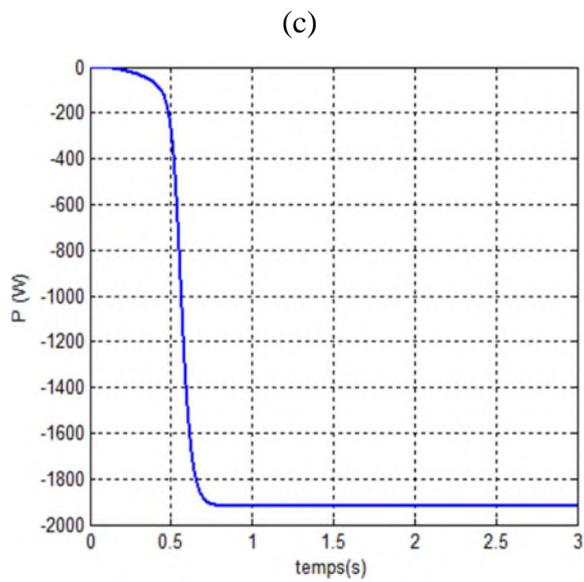
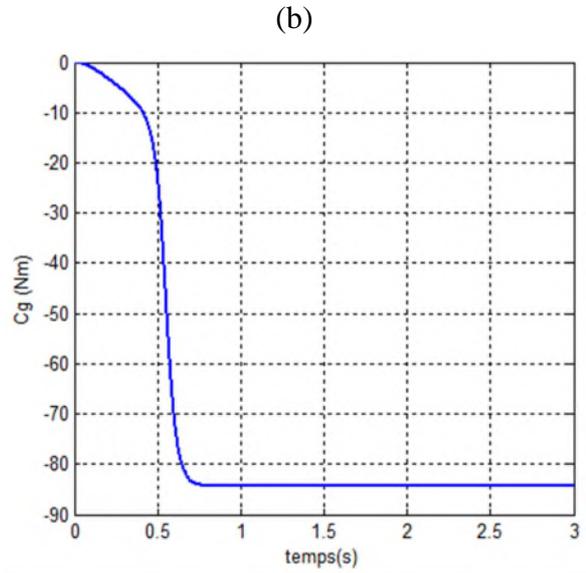
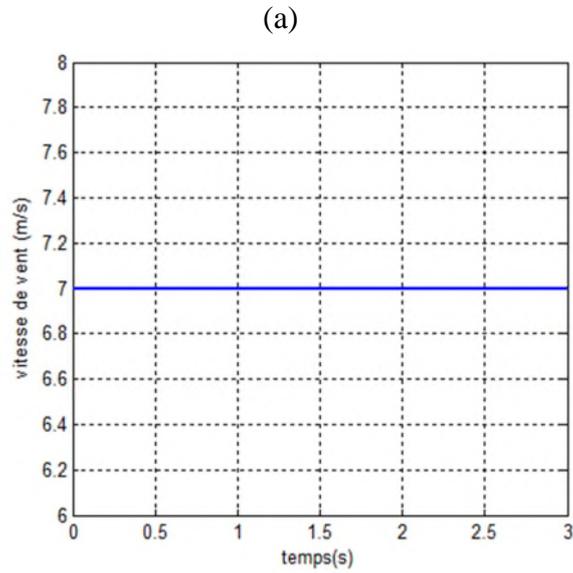


Figure III 3.Diagramme Simulink de la turbine avec MPPT classique

III.6 Simulation de la première partie

Cette partie sera consacrée à la simulation du générateur éolien qui est contrôlé par une commande vectorielle avec régulation de bus continu pour que la GSAP ait le comportement d'une machine à courant continu à excitation séparée tout en imposant

($i_d = 0$) alimenté par une turbine éolienne contrôlée par la technique MPPT. Pour la simulation nous avons appliqué un échelon de vitesse 7 m/s.



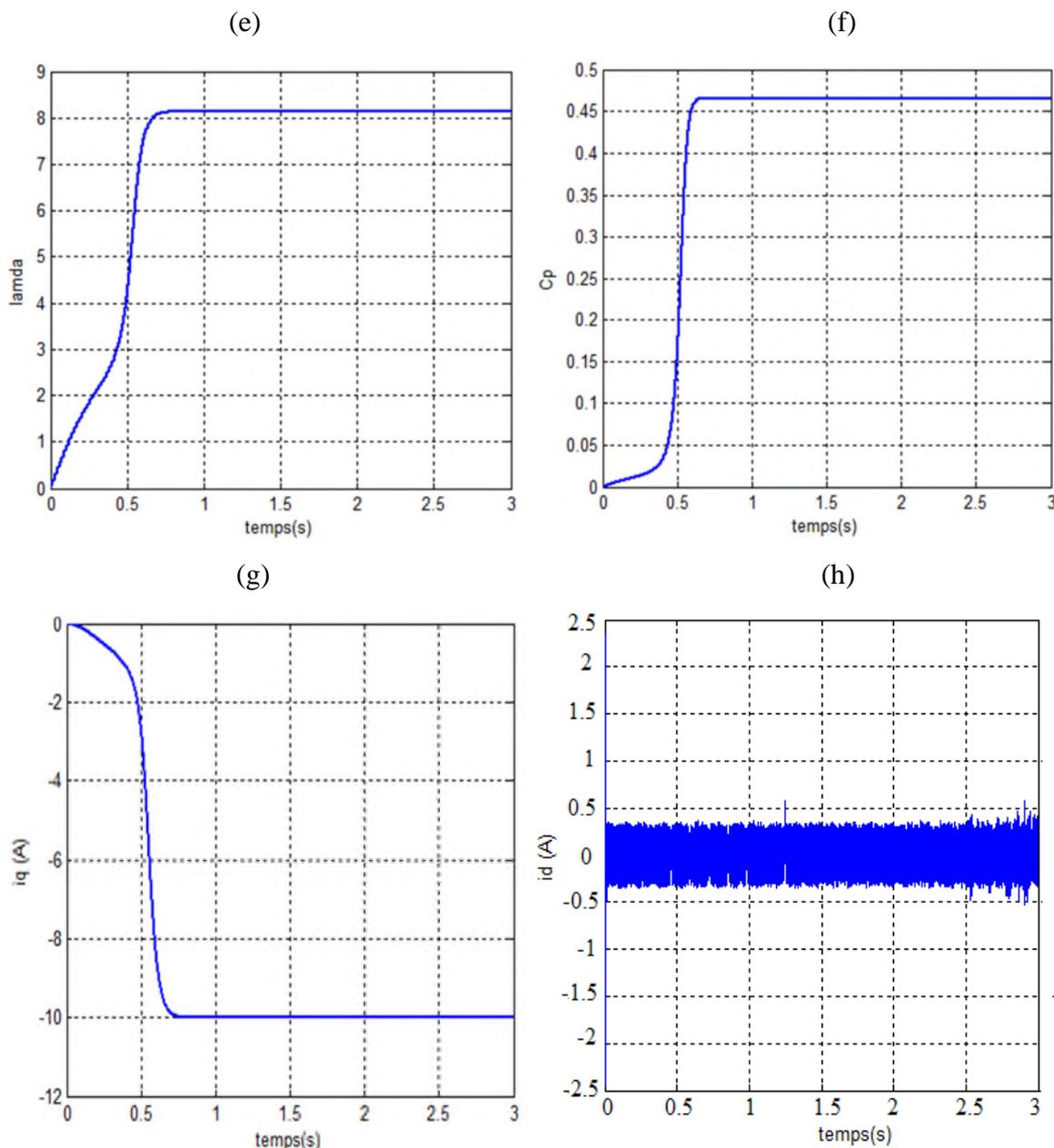


Figure III 4. Résultats de simulation de la première partie

III.6.1 Interprétation des résultats :

Les figures (b, c, d) montrent l'évolution du couple, la puissance de la turbine éolienne et la tension du bus continu. On peut remarquer que la puissance et le couple de la turbine sont négatifs ce qui confirme le fonctionnement générateur, la tension du bus continu est bien régulé et suit sa consigne. On remarque aussi que le courant i_d est pratiquement nul et le courant i_q suit l'évolution du couple de la turbine ce qui confirme la commande vectorielle appliquée à la MSAP. Le coefficient de puissance maximale et une vitesse spécifique optimale sont obtenus qui explique l'efficacité de la MPPT appliqué.

III.7 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Nous avons vu dans le chapitre précédant que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère (d, q) comme un produit croisé de courant et de

flux. À partir de l'équation (II.50) on remarque que si l'on élimine le deuxième produit ($\varphi_{rq}i_{sd}$), alors le couple ressemble fort à celui des machines à courant continu, pour cela, il suffit d'orienter le repère (d,q) de manière à annuler la composante de flux en quadrature c'est-à-dire choisir l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d), donc avoir :

$$\varphi_{rq}=0 \text{ et } \varphi_{dr}=\varphi_r \quad (\text{III.10})$$

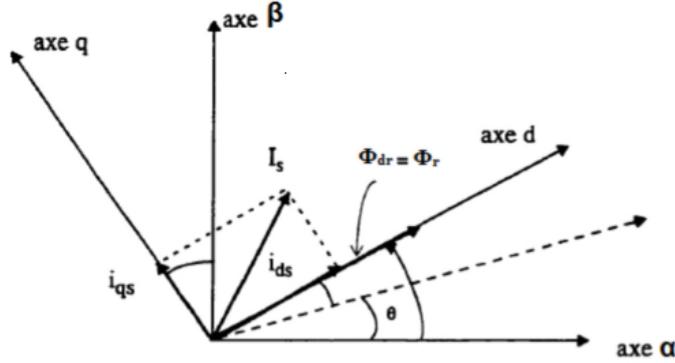


Figure III 5.Principe du contrôle vectoriel

Le couple s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{rd}i_{sq}) \quad (\text{III.11})$$

La stratégie consistera donc à contrôler de façon indépendante le terme flux et terme courant pour imposer un couple.

En remplaçant φ_{rq} dans (II.49), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_r}{dt} \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_r)\varphi_r \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

III.7.1 Estimation de φ_r^*

Seul les grandeurs statoriques sont facilement accessible pour les grandeurs rotoriques, il faut donc l'estimer à partir des grandeurs statoriques.

On a :

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_r}{dt} \\ \varphi_r = L_r i_{rd} + M i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

A partir de (III.13), on peut écrire :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r i_{rd} \quad (\text{III.14})$$

$$i_{rd} = \frac{\varphi_r}{L_r} - M \frac{i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant (III.15) dans (III.14), on obtient:

$$T_r \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = M i_{sd} \quad (\text{III.16})$$

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

Avec la transformé de Laplace, on aura:

$$\varphi_r \cdot [1 + pT_r] = M i_{sd} \quad (\text{III.17})$$

$$\varphi_r^* = \frac{M}{[1+pT_r]} i_{sdmes} \quad (\text{III.18})$$

III.7.2 Estimation des angles θ_r et θ_s

$$\theta_{sest} = \int \omega_{sest} dt \quad (\text{III.19})$$

$$\omega_{sest} = \omega_{est} + \omega_r \quad \text{tel que } \omega_r = p\Omega_r$$

$$\text{Donc on obtient : } \omega_{sest} = \omega_{est} + p\Omega_r \quad (\text{III.20})$$

Et d'après l'équation (III.12), on peut écrire :

$$\omega = -\frac{R_r}{\varphi_r} i_{rq} \quad \text{tel que : } \omega_s - \omega_r = \omega \quad (\text{III.21})$$

D'après (II.50), on déduit i_{rq} :

$$i_{rq} = -\frac{M i_{sq}}{L_r} \quad (\text{III.22})$$

En remplaçant (III.22) dans (III.21) on obtient:

$$\omega_{est} = \frac{M}{T_r \varphi_r} i_{sqmes} \quad (\text{III.23})$$

on remplace (III.23) dans (III.19) on obtient

$$\theta_{sest} = \int \left(\frac{M}{T_r \varphi_r} i_{sqmes} + p\Omega_r \right) dt \quad (\text{III.24})$$

III.8 Découplage des tensions

- Pour l'axe direct

$$V_{ds} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \quad (\text{III.25})$$

Nous exprimerons cette tension en fonction de deux grandeurs utiles à la maîtrise du couple (φ_r, i_{sq}) .

$$i_{sd} = \frac{[1+pT_r]}{M} \varphi_r \quad (\text{III.26})$$

D'autre part, on a :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_r = L_r i_{rd} + M i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

$$\text{D'après (III.27), on a : } i_{rd} = \frac{1}{L_r} \cdot [\varphi_r - M i_{sd}] \quad (\text{III.28})$$

En remplaçant (III.28) dans (III.27), on obtient

$$\varphi_{sd} = L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \cdot [\varphi_r - M i_{sd}] \quad (\text{III.29})$$

$$\varphi_{sd} = \left[1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right] \cdot L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_r \quad (\text{III.30})$$

$$\varphi_{sd} = \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_r \quad (\text{III.31})$$

Avec : $\sigma = \left[1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right]$: Facteur de dispersion de Blondel

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

En remplaçant (III.22) dans (III.32), on obtient:

$$\varphi_{sq} = L_s \cdot \left[1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right] \cdot i_{sq} \quad (\text{III.33})$$

$$\varphi_{sq} = L_s \sigma i_{sq} \quad (\text{III.34})$$

En remplaçant les expressions obtenues dans (II.48), on aura :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \left[\sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_r \right] - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \quad (\text{III.35})$$

Après la transformation de Laplace, on obtient:

$$V_{sd} = R_s \frac{[1+pT_r]}{M} \varphi_r + \sigma L_s p \frac{[1+pT_r]}{M} \varphi_r + p \frac{M}{L_r} \varphi_r - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \quad (\text{III.36})$$

$$V_{sd} = \left[(R_s + \sigma L_s p) \cdot \frac{[1+pT_r]}{M} + p \frac{M}{L_r} \right] \varphi_r - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \quad (\text{III.37})$$

• Pour l'axe en quadrature

En remplaçant φ_{sq} et φ_{sd} par ses expressions (II.48) on obtient :

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} [L_s \sigma i_{sq}] + \omega_s [\sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_r] \quad (\text{III.38})$$

Après la transformation de Laplace, on obtient:

$$\begin{cases} V_{sd} = \left[(R_s + \sigma L_s p) \cdot \frac{[1+pT_r]}{M} + p \frac{M}{L_r} \right] \varphi_r - \omega_s L_s \sigma i_{sq} \\ V_{sq} = (R_s + p L_s \sigma) i_{sq} + \omega_s \left[\sigma L_s \frac{[1+pT_r]}{M} + \frac{M}{L_r} \right] \varphi_r \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

On remarque que même si on oriente le flux, les deux axes direct et quadratique sont couplés. Pour cela on fait le découplage par la méthode suivante :

$$\begin{cases} \varphi_r = A[V_{sd} + B i_{sq}] \\ i_{sq} = C[V_{sq} - D \varphi_r] \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

Avec :

$$A = \frac{1}{\left[(R_s + \sigma L_s p) \cdot \frac{[1+pT_r]}{M} + p \frac{M}{L_r} \right]}; B = \omega_s L_s \sigma; C = \frac{1}{(R_s + p L_s \sigma)}; D = \omega_s \left[\sigma L_s \frac{[1+pT_r]}{M} + \frac{M}{L_r} \right]$$

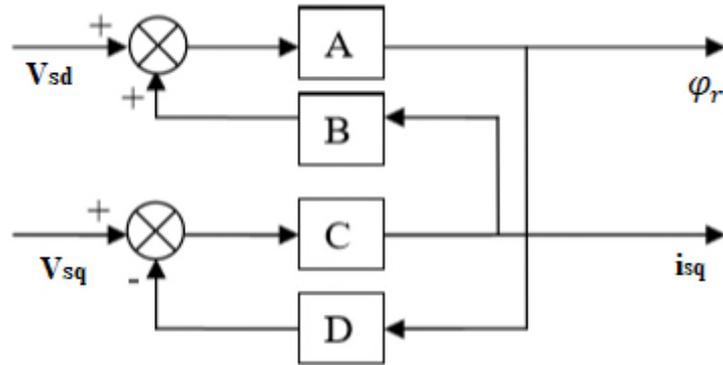


Figure III 6.Schéma de simplification

III.9 Simulation commande IFOC de motopompe avec regulation de vitesse

III.9.1 Identification des paramètres des régulateurs PI

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

$$H(p) = \frac{a}{ap+b} \tag{III.41}$$

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

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \tag{III.42}$$

Le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre à retour unitaire régulé par un PI est donné par la figure (III.7).

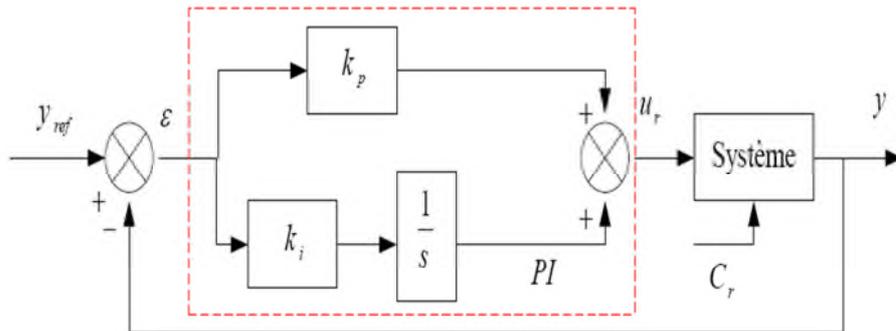


Figure III 7.Schéma d'un système asservi du premier ordre régulé par un PI

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:

$$T(p) = H(p)C(p) = \frac{K_p p + K_i}{ap^2 + bp} \tag{III.43}$$

En boucle fermée, on obtient:

$$F(p) = \frac{T(p)}{1+T(p)} = \frac{K_p p + K_i}{ap^2 + (b+K_p)p + K_i} \tag{III.44}$$

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

$$G(p) = \frac{1}{\tau p + 1} \tag{III.45}$$

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

$$\frac{K_p p + K_i}{ap^2 + (b + K_p)p + K_i} = \frac{1}{\tau p + 1} \tag{III.46}$$

Ce qui donne:

$$K_p \tau p^2 + (K_i \tau + K_p)p + K_i = ap^2 + (b + K_p)p + K_i \tag{III.47}$$

$$\text{D'où : } \begin{cases} K_p = \frac{a}{\tau} \\ K_i = \frac{b}{\tau} \end{cases} \tag{III.48}$$

La figure (III.8) représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

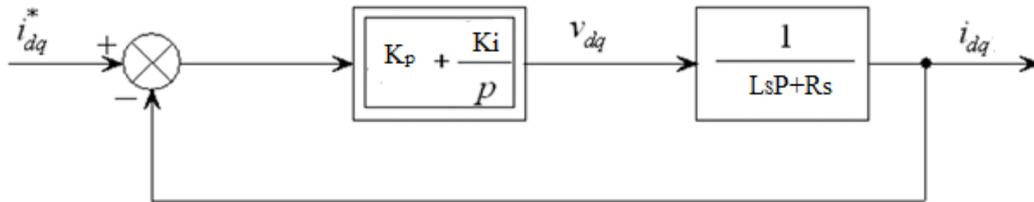


Figure III 8. Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

$$\text{Avec : } \begin{cases} K_p = \frac{Ls}{\tau} \\ K_i = \frac{Rs}{\tau} \end{cases} \tag{III.49}$$

On prend $\tau = \tau_r/6$ pour avoir une dynamique du processus rapide, avec $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ est la constante de temps électrique (rotorique) du système.

Pour la regulation 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 :

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \frac{\varphi_n \Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \tag{III.50}$$

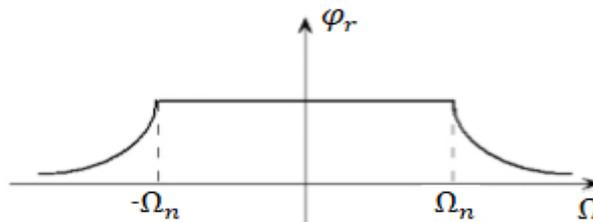


Figure III 9. Schéma de défluxage

III.9.2 Identification des paramètres du régulateur de vitesse

Le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure (III.10) et l'identification nous donne :

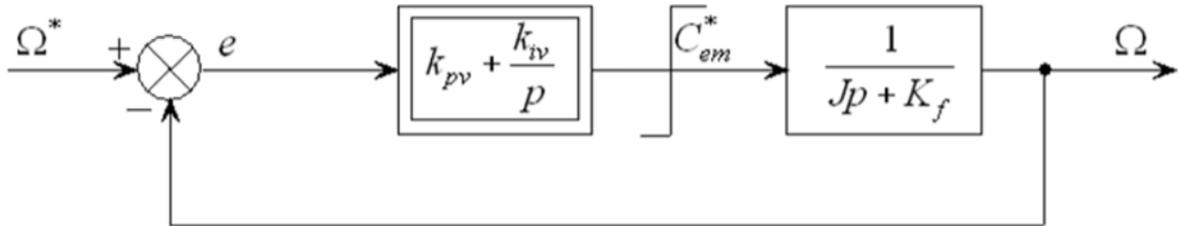


Figure III 10. Boucle de régulation de vitesse

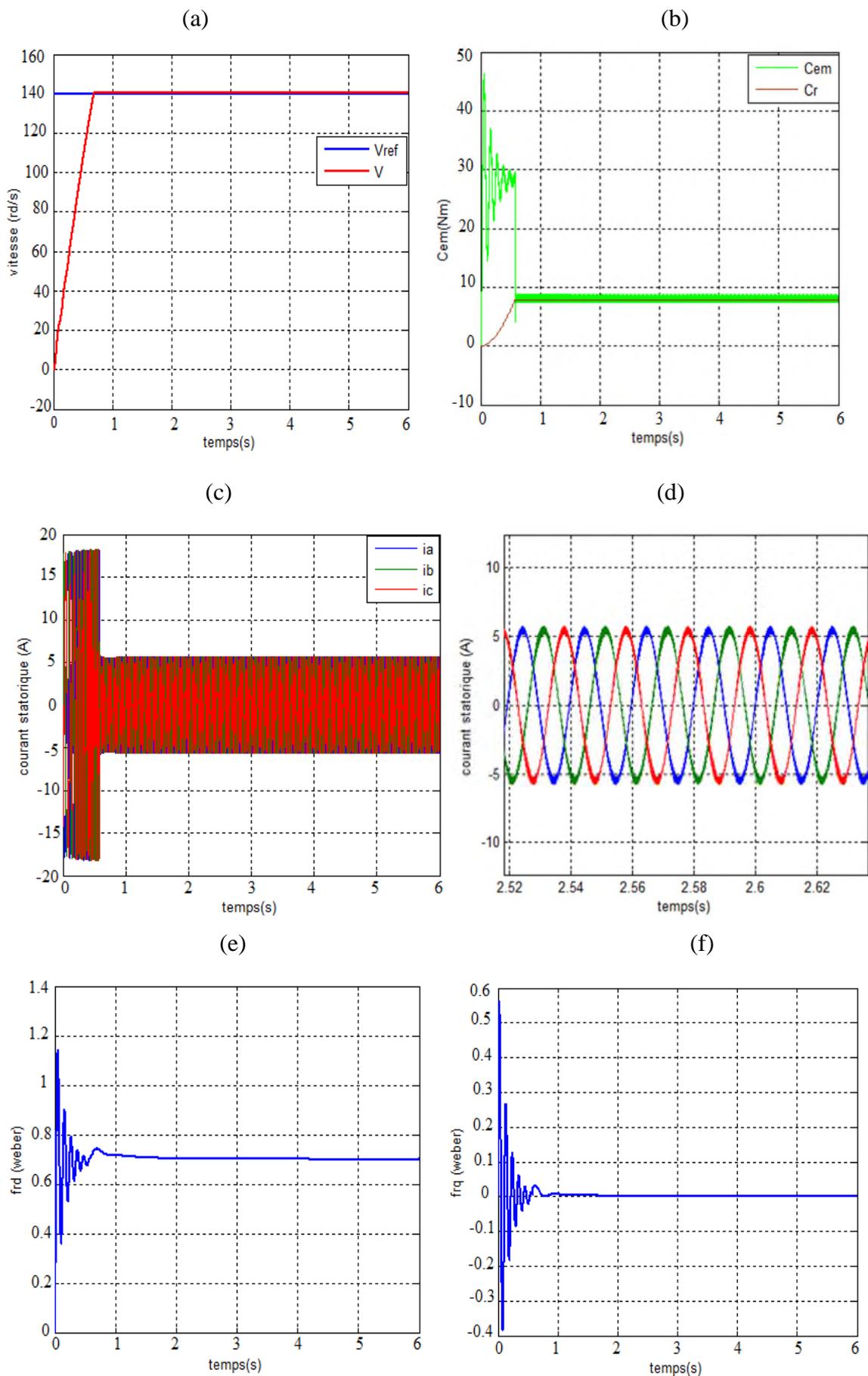
$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{J}{\tau} \\ K_{iv} = \frac{K_f}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.51})$$

On prend $\tau = \tau_r$

III.9.3 Description de la deuxième partie et Interprétation des résultats

La simulation du pompage éolien se fait sans connexion du générateur éolien. En appliquant la commande vectorielle à la MAS pour le contrôle du courant et la vitesse. L'orientation du flux rotorique sur l'axe d ce qui permet le découplage des grandeurs internes dans la machine pendant le régime transitoire et donc une bonne conversion d'énergie (électrique - mécanique).

La figure (III.11) représente l'évolution des caractéristiques de la MAS avec la régulation de vitesse par la méthode vectorielle indirecte, suivi de l'application de couple de charge de la pompe en imposant la vitesse de référence $\omega = 140 \frac{rd}{s}$. Celle-ci montre que: Au démarrage la vitesse rejoint sa valeur de consigne après le régime transitoire malgré l'application de la charge. Le couple électromagnétique $C_{em}(Nm)$ atteint la valeur maximale de $46.26Nm$ au démarrage par suite, au début du régime permanent, il se stabilise à la grandeur due au couple de charge $C_r = 9Nm$ avec une réponse très rapide. Les courants statoriques observent un courant d'appel d'environ 2 fois le courant nominal, et puis durant le régime permanent ils évoluent d'une façon sinusoïdale. Le courant en quadrature $i_q(A)$ évolue pendant le régime établi identiquement au couple électromagnétique. 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 c'est le cas flux direct durant le régime permanent et flux quadratique sera nul c'est le principe de la commande vectorielle.



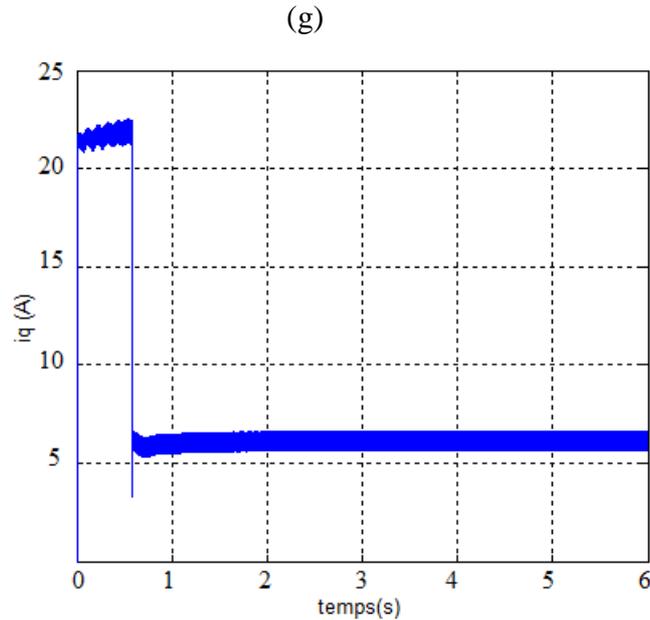


Figure III 11. Résultats de simulation de la deuxième partie

III.10 Description de la troisième partie

Dans cette partie, le système de pompage est connecté au générateur éolien tout en appliquant une vitesse de vent variable pendant 20h . 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 le control vectoriel, des convertisseurs (redresseur et onduleur), un bloc de commande vectorielle de la MAS munie d'un régulateurs PI classique pour la régulation de la vitesse du groupe motopompe.

Dans notre étude, on a regulé la tension de bus continu afin de ne pas perturbé l'onduleur et à partir de bilan de puissance on déduit la vitesse de reference afin de reguler la vitesse de la MAS. Pour cela on a supposé que les convertisseurs sont ideals, le rendement de la MSAP et MAS sont 0.94 et 0.86 respectivement.

A partir de bilan de puissance, on a :

$$P_m = \eta_{MSAP} \eta_{MAS} P_t \quad (III.51)$$

En remplaçant (III.51) dans (II52), on aura :

$$\eta_{MSAP} \eta_{MAS} P_t = K_r \omega_r^3 \quad (III.52)$$

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

$$\omega_{r_ref} = \sqrt[3]{\frac{\eta_{MSAP} \cdot \eta_{MAS} \cdot P_t}{K_r}} \quad (III.53)$$

La figure (III.12) représente le schéma global du système de pompage éolien avec sa commande.

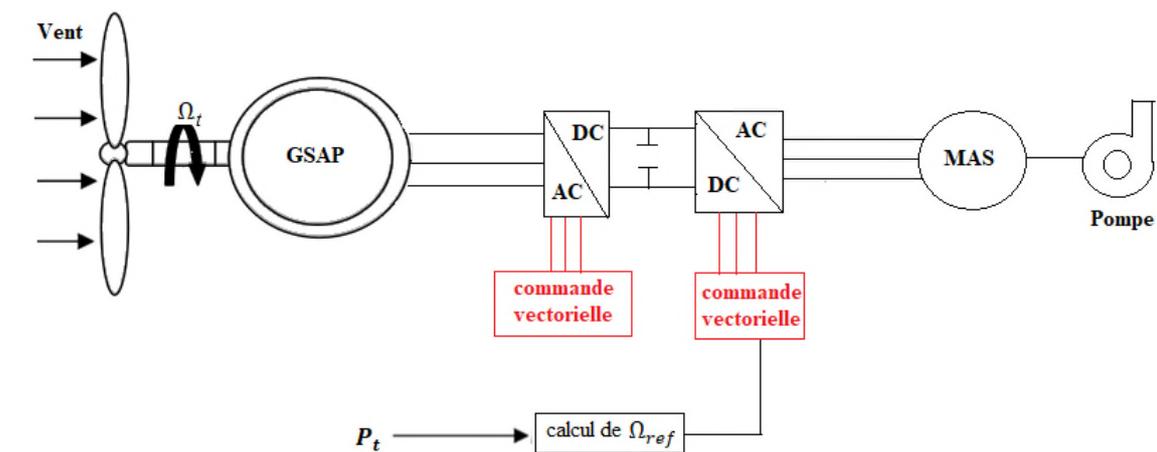
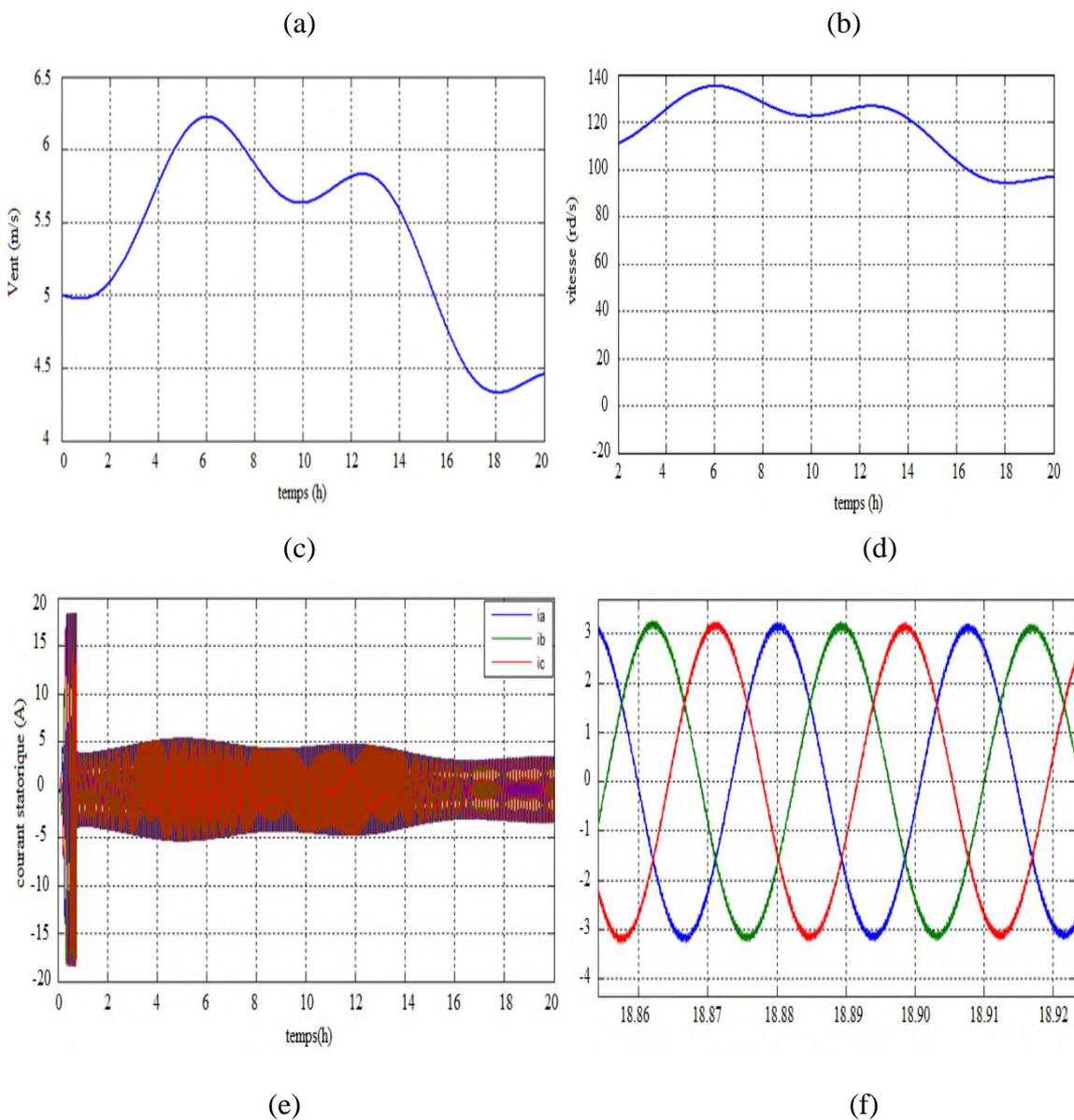
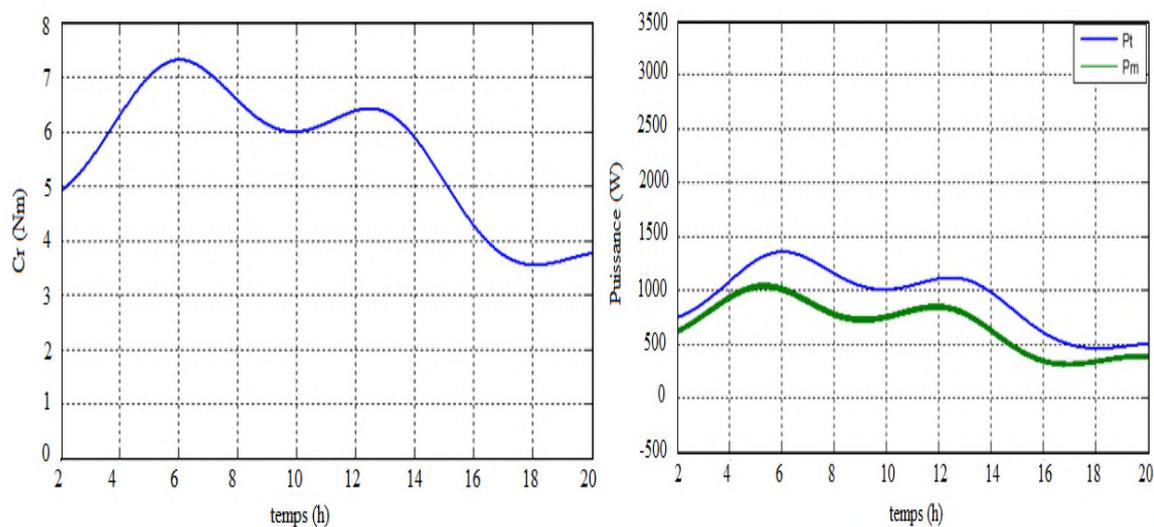


Figure III 12.Schéma synoptique du système de pompage éolien de la troisième partie

III.10.1 Simulation et interprétation des résultats





(g)

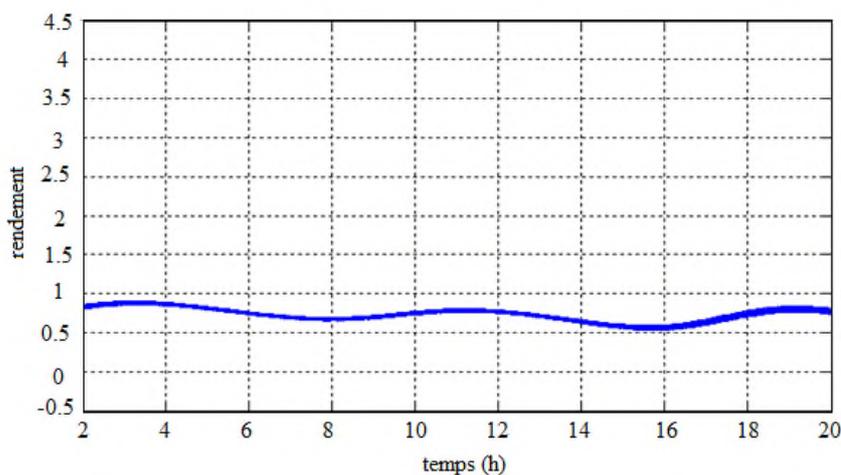


Figure III 13. Résultats de simulation de la troisième partie

D'après les résultats obtenus on remarque que la vitesse ,le couple résistant la puissance de la turbine,la puissance mecanique,les courant statorique et le rendement globab suit le profil du vent appliqué.

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents. Cette commande nous a permet, de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur afin de garantir une tension constante et stable au site isolé quelques soit les perturbations engendrées par la vitesse du vent. Une technique MPPT appliqué à la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie et de garder le fonctionnement à tous moment au point optimal quelque soit les variations 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 chaine de pompage avec une commande en puissance.

Malgré les performances et la fiabilité de convertisseur AC/DC/AC et les avantages qui offrent, c'est que son coût élevé représente un obstacle pour lui. À la lumière de ce constat, dans le prochain chapitre on propose une étude sur la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC dans le système pompage éolienne.

CHAPITRE IV

Etude de la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC

Chapitre IV : Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

IV.1 Introduction

Bien que la conversion indirecte de fréquence en utilisant une cascade Redresseur Filtre-Onduleur soit une technique bien établie. Et En raison d'une évolution incessante des outils de production, les industriels deviennent de plus en plus exigeants sur la fiabilité, la disponibilité et la facilité d'entretien de ces outils. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, ces convertisseurs devient plus en plus performants et fiables surtout avec l'apparition de la famille des transistors tel que (IGBT, MOSFET...) à l'avantage qui sont commandables et de fonctionner à fréquence élevée qui facilite le filtrage.

En effet, les perturbations provoquées par ces convertisseurs sont bien connues, il s'agit d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération des courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques. Les incidences sont à l'origine de la réduction de sa capacité de transport et de l'augmentation des pertes et aussi le cout élevé. Donc dans ce chapitre une étude sur la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC dans un système pompage éolien et une simulation sous logiciel PSIM sera présentée.

IV.2 But de ce travail

La figure (IV .1) représente la caractéristique $p = f(v)$ de l'éolienne. On remarque que, pour chaque vitesse du la turbine correspondant à un point maximum de puissance de puissance. En reliant ces points, on obtient une caractéristique qui s'approche de la caractéristique couple vitesse de la pompe centrifuge, pour cette raison on a pensé à éliminer complètement le convertisseur statique AC/DC/AC et faire un coulage électrique entre la MSAP et la MAS afin de commander le système en esclave et faire l'MPPT à partir de la pompe.

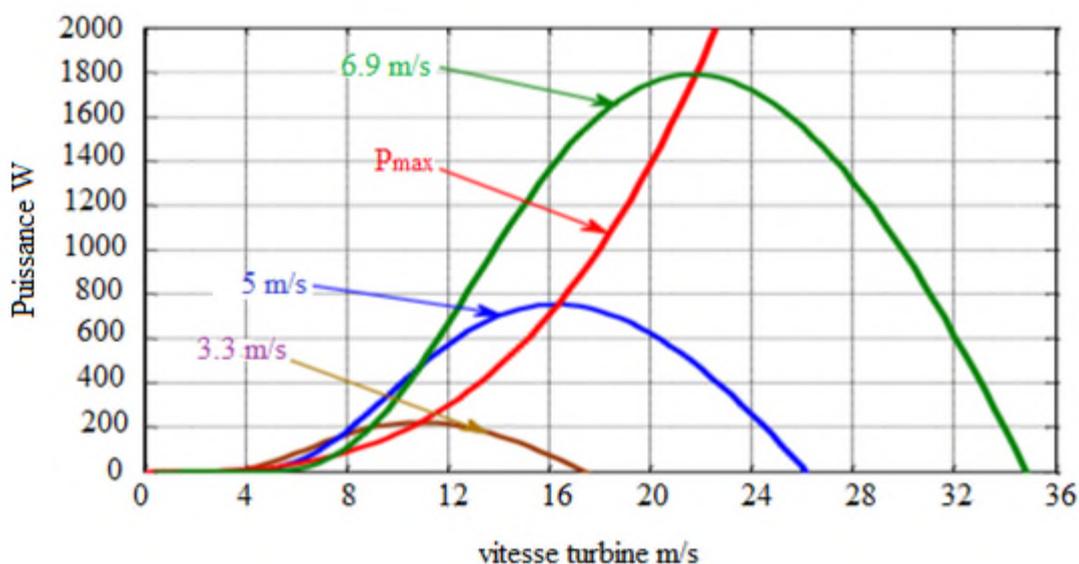


Figure IV 1. Caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne

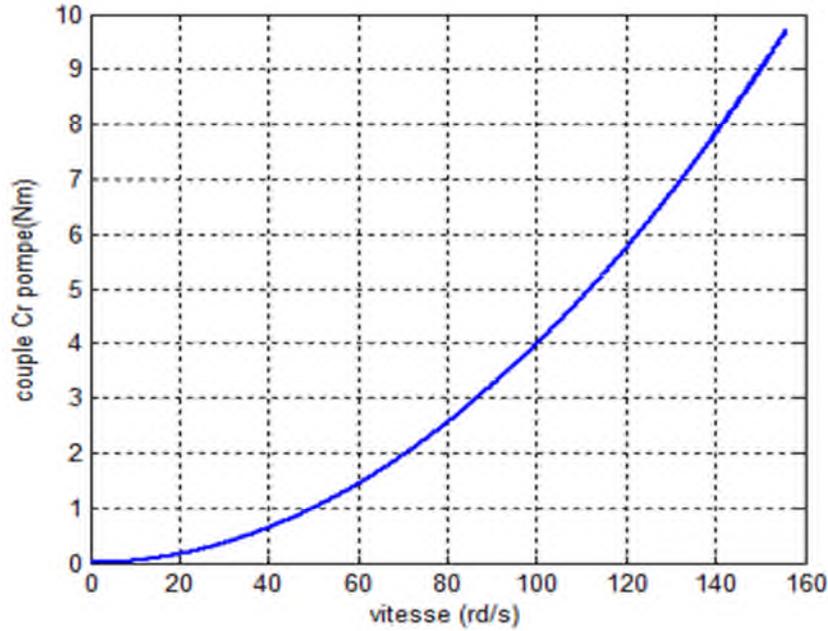


Figure IV 2.Caractéristique couple-vitesse de la pompe étudiée

IV .3 Développement mathématique pour le couplage électrique

La méthode d'analyse emploie la transformation de Park. Les équations des tensions et les flux des deux machines (MSAP et MAS) sont comme suit

$$\text{MSAP:} \begin{cases} V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega_{mec} L_q i_q \\ V_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d p \Omega_{mec} + p \Omega_{mec} \varphi_{sf} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{MAS:} \begin{cases} V_{ds} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{qs} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Et on a les équations magnétiques pour la machine asynchrone

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = i_{sd} L_s + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = i_{sq} L_s + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = i_{rd} L_r + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = i_{rq} L_r + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

En remplaçant les équations magnétiques dans les équations électriques de la machine asynchrone, on obtient :

Chapitre IV Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} + M \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s i_{sq} + M i_{rq}) \\ V_{qs} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + M \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s (L_s i_{sd} + M i_{rd}) \\ V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + M \frac{di_{sd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(i_{rq} L_r + M i_{sq}) \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + M \frac{di_{sq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(i_{rd} L_r + M i_{sd}) \end{array} \right. \quad (IV.4)$$

Afin d'éliminer le convertisseur statique et faire un couplage électrique entre la machine synchrone et asynchrone, le chemin mathématique est fait de cette façon :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = V_{ds} \\ V_q = V_{qs} \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} i_d = -i_{ds} \\ i_q = -i_{qs} \end{array} \right. \quad (IV.5)$$

En remplaçant (IV.5) dans (IV.4), on obtient le système global (MSAP+MAS) :

$$\text{MSAP+MAS} \left\{ \begin{array}{l} V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega_{mec} L_q i_q \\ V_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_{sd} p \Omega_{mec} + p \Omega_{mec} \varphi_{sf} \\ V_{ds} = R_s (-i_d) + L_s \frac{-di_d}{dt} + M \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s (-i_q) + M i_{rq}) \\ V_{qs} = R_s (-i_q) + L_s \frac{-di_q}{dt} + M \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s (L_s (-i_d) + M i_{rd}) \\ V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + M \frac{-di_d}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(i_{rq} L_r + M (-i_q)) \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + M \frac{-di_q}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(i_{rd} L_r + M (-i_d)) \end{array} \right. \quad (IV.6)$$

D'après les condition de (IV.5) , le système (IV.6) devient

$$\left\{ \begin{array}{l} R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \Omega_{mec} L_q i_q = R_s (-i_d) + L_s \frac{-di_d}{dt} + M \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s (L_s (-i_q) + M i_{rq}) \\ R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_{sd} p \Omega_{mec} + p \Omega_{mec} \varphi_{sf} = R_s (-i_q) + L_s \frac{-di_q}{dt} + M \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s (L_s (-i_d) + M i_{rd}) \\ 0 = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + M \frac{-di_d}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(i_{rq} L_r + M (-i_q)) \\ 0 = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + M \frac{-di_q}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(i_{rd} L_r + M (-i_d)) \end{array} \right. \quad (IV.7)$$

Afin de simplifié les équations (IV.7) et d'ajouter les deux équations mécanique afin d'avoir le nombre d'équation égal au nombre d'inconnu le système (IV.7) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} (R + R_s) i_d + (L_d + L_s) \frac{di_d}{dt} - M \frac{di_{rd}}{dt} - p \Omega_{mec} L_q i_q + \omega_s (M i_{rq} - L_s i_q) = 0 \\ (R + R_s) i_q + (L_q + L_s) \frac{di_q}{dt} - M \frac{di_{rq}}{dt} + p \Omega_{mec} L_d i_d + p \Omega_{mec} \varphi_{sf} \\ \quad - \omega_s (M i_{rd} - L_s i_d) = 0 \\ R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + M \frac{-di_d}{dt} - (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{rq} - M i_q) = 0 \\ R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + M \frac{-di_q}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(L_r i_{rd} - M i_d) = 0 \\ J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g = C_g - C_r \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{j} (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_r) \end{array} \right. \quad (IV.8)$$

L'expression des deux couples sera représentée comme suit :

Chapitre IV Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{pM}{L_r}(\varphi_{rd}(-i_q) - \varphi_{rq}(-i_d)) \\ C_g = p[(L_q - L_d)i_d i_q + i_q \varphi_{sf}] \end{cases} \quad (IV.9)$$

La figure (IV.3) représente le schéma global de notre travail sous logiciel PSIM

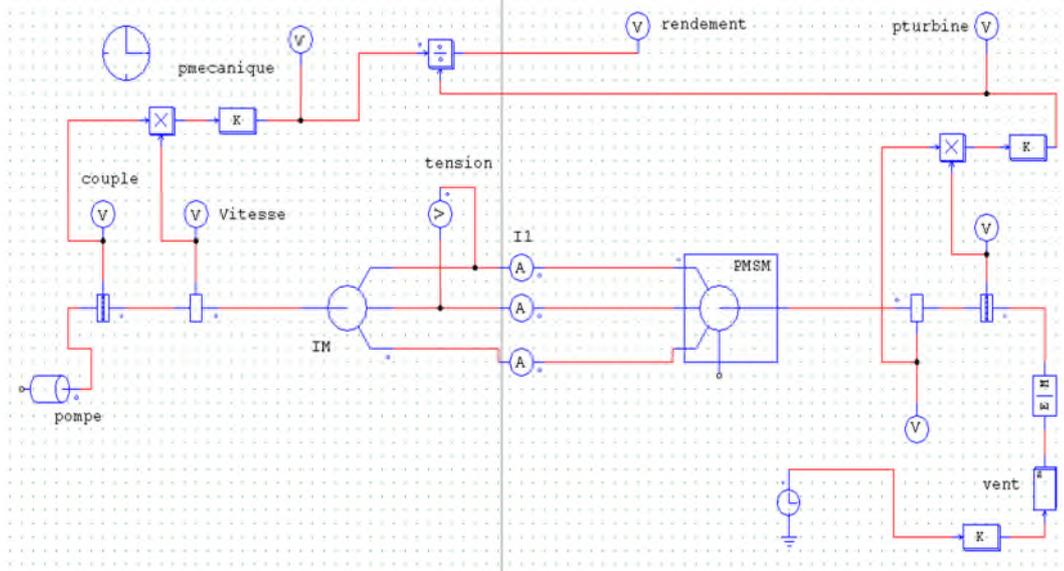


Figure IV 3.Schéma global sous logiciel PSIM

IV.4 Simulation interprétation des résultats

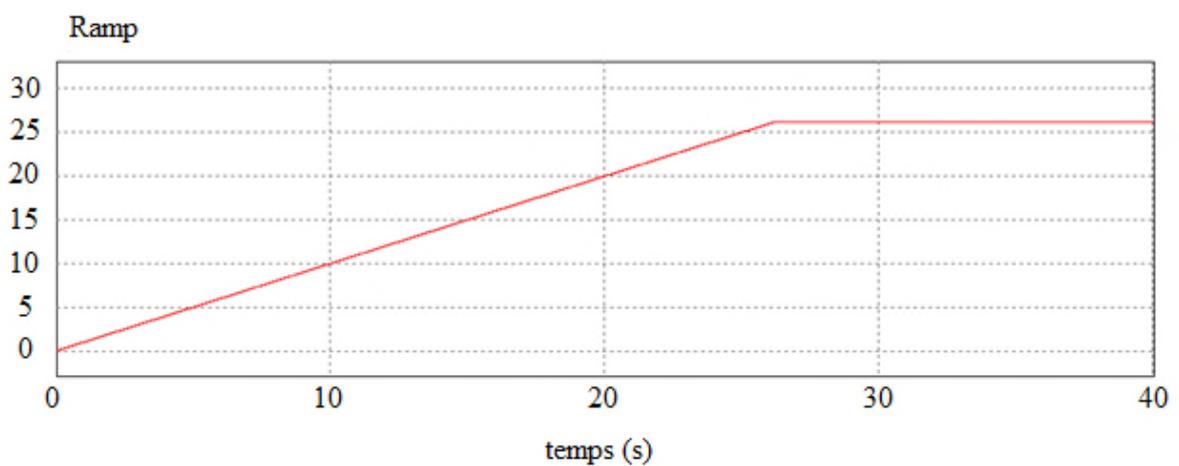


Figure IV 4.Variation de la vitesse de vent en fonction du temps

Chapitre IV Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

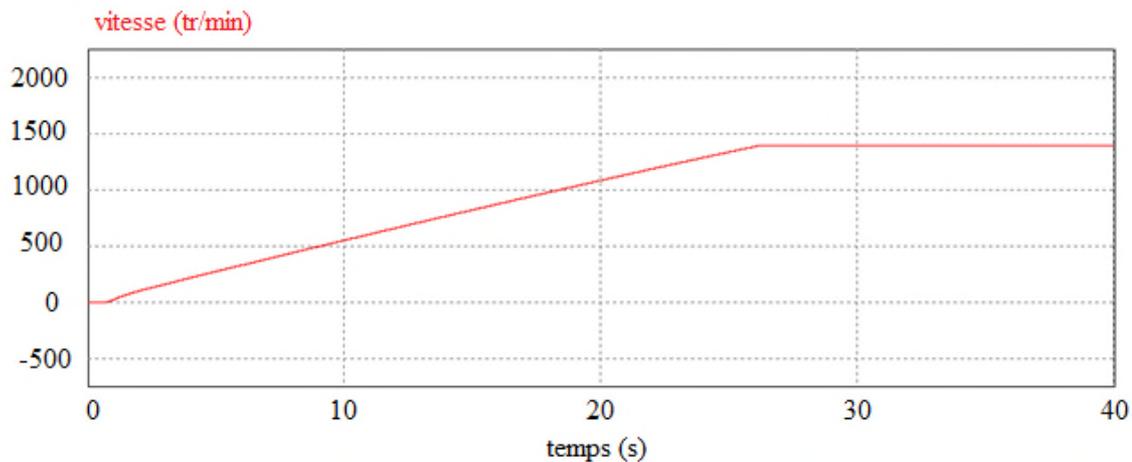


Figure IV 5. Allure de vitesse de la MAS

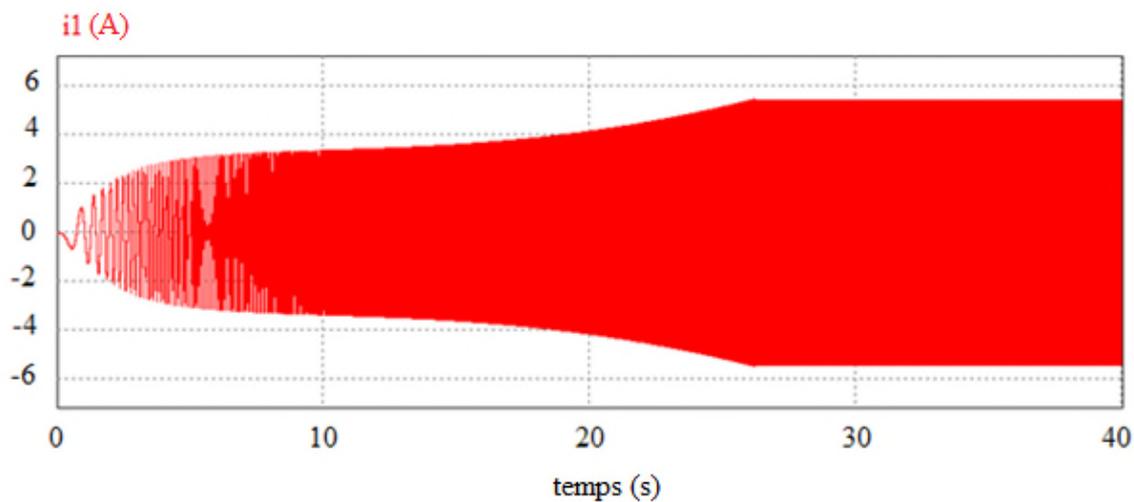


Figure IV 6. Allure de courant statorique

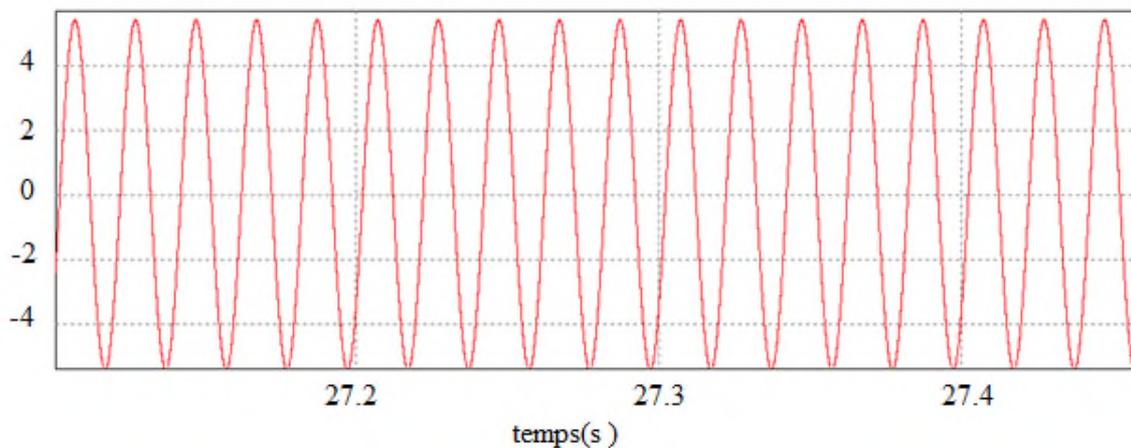


Figure IV 7. Zoom de l'allure de courant statorique

Chapitre IV Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

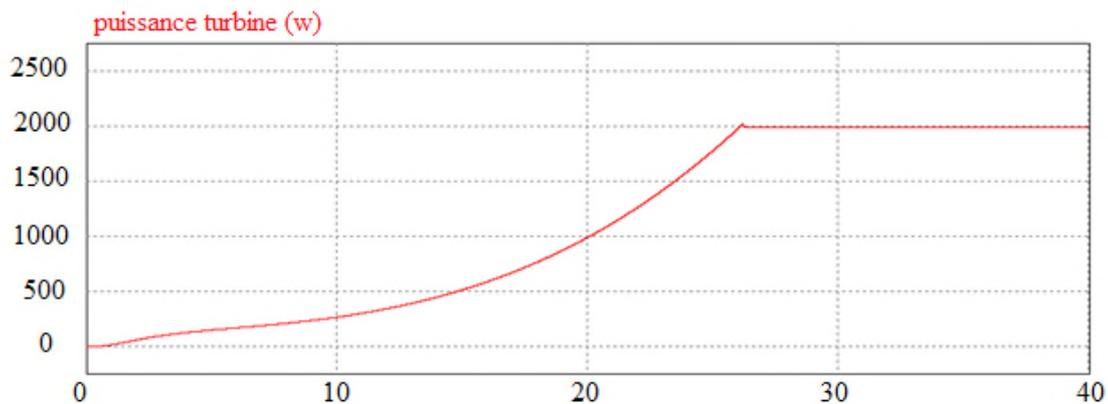


Figure IV 8.Allure de la puissance de la turbine

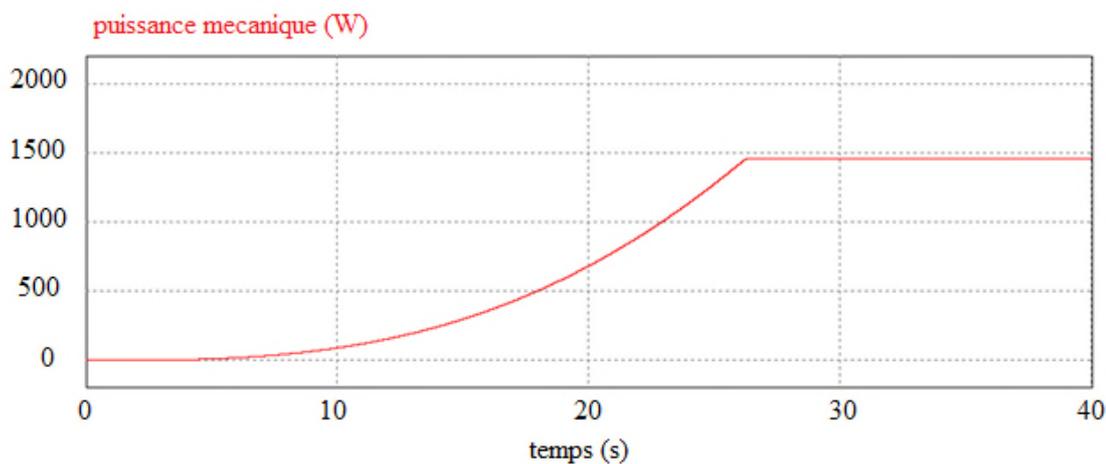


Figure IV 9.Allure du la puissance mécanique MAS

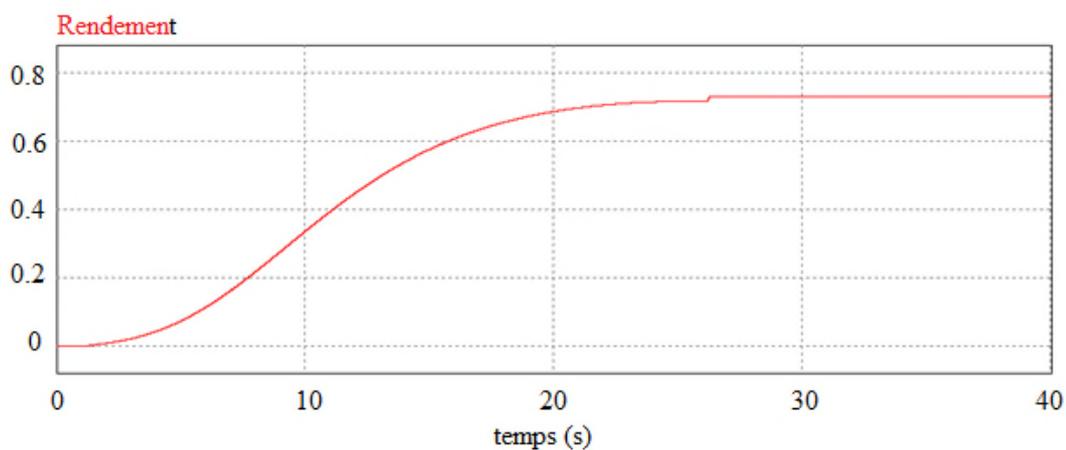


Figure IV 10.Allure de rendement global

Conclusion générale

Chapitre IV Etude la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC

D'après les résultats obtenus on remarque que la vitesse, la puissance de la turbine, la puissance mécanique, le courant statorique et le rendement global suit le profil du vent appliqué.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC, on a expliqué le but de ce travail et ainsi le chemin mathématique pour le couplage électrique entre les deux machines afin d'arriver à supprimer ce dernier.

Une simulation numérique sous logiciel PSIM ont été menées et des résultats ont été interprétés.

Conclusion générale

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

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien, et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage éolien, puis nous avons cité ces avantages et inconvénients, les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés puis on a illustré un schéma globale du système a étudié.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne à axe horizontale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone a aimant permanent. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord défini le principe de la commande vectorielle, puis nous avons développé quelques équations, permettent le découplage entre le flux et le couple, et on a expliqué le principe d'optimisation pour la turbine sans asservissement de vitesse et les schémas de principe sont illustré.

L'objectif du quatrième chapitre est d'étude la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC, faire un couplage électrique entre la génératrice synchrone et la machine asynchrone et faire une commande en esclave qui dépend de la source primaire (vent) et observer le comportement de notre système dans la zone deux de maximisation de puissance.

Les résultats obtenus confirment les performances souhaités en régime établie .Nous avons présentés des résultats de simulation pour un vent qui augment de façon linéaire puis il se stabilise à V_{vmax} .

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie ;
- Faire un système de control pour des vents fort ;
- Concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012.
- [2] Toual Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », thèse de doctorat de Université de Batna, 2010.
- [3] A. Guettaf « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [4] R. SWISHER, C. Real De Azua, J.Clendenin, « Strong winds on the horizon: Wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [5] B.Fellah «système de hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah» mémoire de magister de l'université Abou-Baker Belkaid, Tlemcen 2012
- [6]:Djeriri Youcef «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbés, Novembre 2015.
- [07] J. Vergauwe, A. Martinez, "Optimization of a Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)", international conference on renewable énergies and power quality (ICREPQ'09), Valencia (Spain), 15th to 17th April, 2009.
- [8] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [9]L. Gidwani, H. P. Tiwari, "Wind Energy Integration In Electrical Power Grid: Simulation of Transient Fault Behaviour and Analysis", JEE volume.
- [10] Djeriri Youcef «Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien» Mémoire de magister en Électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-abbés, Décembre 2009.
- [11] Hamecha Samira, «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister ; université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou le 25/06/2013.
- [12] A. El Khabote et A. Wardi, J.P. Compte. « Problématique de l'alimentation en eau des populations rurales au Maroc, 2012.
- [13] K.Idjdarene<< Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes >> Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010
- [14] L. Meziane, S. Oublaïd «Etude d'un system de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque)», Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2014.
- [15] Y. El Tous, "Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine", American journal of engineering and applied sciences, vol. 1(2), pp. 118-120, 2008.
- [16]Lourad Fateh ; « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie

Éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » thèse de doctorat ; université Bdji Mokhtar de Annaba ; 2016.

[17] Bellarbi Samir ; « Estimation technico-économique de la production d'électricité par Voie éolienne, intégrée aux réseaux interconnectés de transport électrique » ; thèse de doctorat en physique ; université Aboubekr Belkaid de Tlemcen.

[18] Ziami Adnane ; « optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimant permanents » ; conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc ; 03/06/2014.

[19] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[20] L. Leclercq « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un Réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

[21] B. Robyn, B. François, F. Degobert et J. P. Hautier « Commande Vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la Logique floue », Editions Technip, France, Juillet 2007.

[22] J. Martin « Energies éoliennes », Techniques de l'ingénieur, vol. B 1360,1990.

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

[24] A.Mirecki. « Étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée a une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[25] Kendouli Fairouz ; « centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique » ; thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique ; université Mentouri de Constantine ; 2012.

[26] V.Courtesuisse, «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique» Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008.

[27]: J.M.Hirtz, « Les stations de pompage d'eau », 6e édition, Association Scientifique et Technique pour l'eau et l'environnement, éditions Lavoisier TEC & DOC 1991.

[28] : G.Lemasson, « les machines transformatrices d'énergie », tome2, Delagrave, 1982.

[29] : B.Equer, « Le Pompage Photovoltaïque : Manuel de cours énergie solaire photovoltaïque», édition Ellipses 1993.

[30] : J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.S.Sy « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998.

[31] J.Royer, T.Djianko, E.Schiller, B.sada Sy « le pompage photovoltaïque » manuelle de cours a l'intention des ingénieurs et des techniciens bibliothèque nationale du canada, 1998.

[32]Mayouf Messaoud ; « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle

D'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents» ; université Hadj Lakhdar de Batna ; 20/04/2014.

[33] KY. Thierry, S. Maurice, « Système photovoltaïque dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte à goutte ». Mémoire de DEA en physique Appliquée, université d'Ouagadougou, 2010.

[34] A.Betka, « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », thèse de magister, centre universitaire, Biskra, 1997.

[35] N. Mezzai « Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolienne destiné aux systèmes de pompage d'eau », Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2015.

[36] K.Benlarbi, « Optimisation floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraînées par différents machines électriques », Thèse de magister, université de Batna 2003.

[37] A.Moussi, A.Saadi, « étude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », LARHYSS Journal, n°01, mai 2002.

[38] N. Hamdi « Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes », Mémoire de magister, Université de Constantine, 2008.

[39] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi ouzo, 2011.

[40] M.Kekouaz, « Commande vectorielle d'une machine synchrone à aimant permanents alimentée par un onduleur de tension », PFE, Université Annaba, 2000.

[41]R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski « Comparison of maximum peak power trackingalgorithms for a Small Wind turbine », Mathematics and Computers in Simulation 91 29– 40, 2013.

[42] Remli Aziz« Etude, Commande et Supervision d'un parc de source d'énergie décentralisées», thèse de doctorat de Université de Bejaia, 2017

[43] L.Aloui, «Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel », Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, Octobre 2006.

[44] Armand Boyette, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy1, 2009 I.

[45] T. Rekioua « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat de l'INPL Nancy (France), 1991.

Annexe

Annexe 1 : Paramètres de la machine asynchrone

La machine utilisé pour entrainer la pompe est machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Puissance nominale $P_n=1.5\text{kW}$.
- Tension 220/380V.
- La vitesse de rotation nominale $N=1486.9\text{tr/mn}$.
- Nombre de paire de pôle $p = 2$
- Inductance cyclique statorique $L_s = 0.274 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique $L_r = 0.274 \text{ H}$
- Inductance cyclique mutuelle $M = 0.258 \text{ H}$
- Résistance statorique $R_s = 4.850 \Omega$
- Résistance rotorique $R_r = 3.805 \Omega$
- Coefficient de frottement : $f = 0.00114 \text{ N.m.s/rad}$
- Inertie : $J = 0.031 \text{ kg.m}^2$

Annexe 2 : Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents

$P_m = 2 \text{ kW}$

$R = 5 \Omega$

$L_d = 25 \text{ mH}$

$L_q = 25 \text{ mH}$

$\Phi = 0.7022 \text{ Wb}$

$p = 12$

Annexe 3 : Paramètres de la turbine éolienne

$C_p = 0.46$

$\lambda = 8.1$

$R = 2.5$

$P_m = 2 \text{ KW}$

Annexe 4 : Paramètres de la pompe centrifuge

Vitesse nominal $\omega_n = 150 \text{ rd/s}$

Hauteur manométrique $H = 10 \text{ m}$

La gravitation $g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Annexe 5 : Contrôle des courants par hystérésis

Le principe de cette méthode de contrôle consiste à maintenir les courants réels à l'intérieur d'une bande de largeur donnée centrée autour des courants de référence. Ce control se fait par une comparaison permanente des courants réels et des courants de référence. La sortie du comparateur à hystérésis est reliée à la logique de commande du redresseur et donne directement l'ordre de commande des interrupteurs.

Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est libre et essentiellement variable ce qui provoque un niveau de bruit relativement important et des pertes, en plus l'utilisation de ce type de contrôle génère des subharmonique de courant dans les applications avec filtre actif [45].

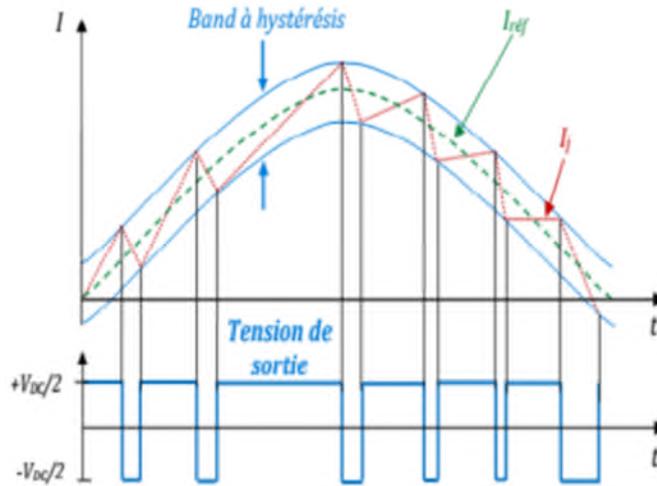


Figure : Illustration de la bande de courant a hystérésis

Annexe 6 : Régulation de la tension V_{dc}

Pour dimensionner le régulateur de tension, considérons le schéma suivant qui met en œuvre les boucles de tension et courant en cascade. En considérant le rendement du redresseur unitaire, il vient:

$$P_{dc} = 3P_g \implies V_{dc}i_{dc} = 3V_q i_q \quad (\text{A6.1})$$

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit:

$$P_{dc} = V_{dc}i_{dc} \quad (\text{A6.2})$$

On peut écrire :

$$i_{dc} = i_c + i_c \quad (\text{A6.3})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \\ i_c = \frac{V_c}{R_c} \end{cases} \quad (\text{A6.4})$$

Les équations (A6.1) et (A.3) permettent d'établir le modèle suivant

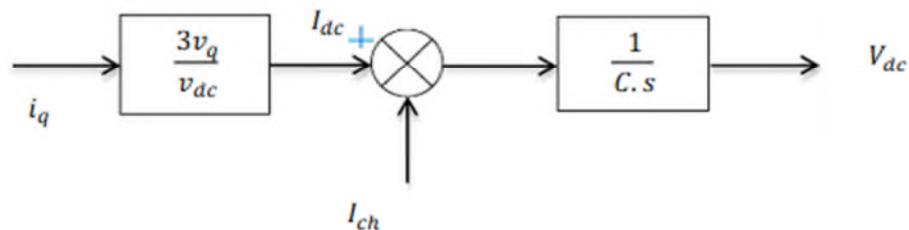


Fig. A6.1 : Modèle pour la boucle de tension.

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée en figure A6.2

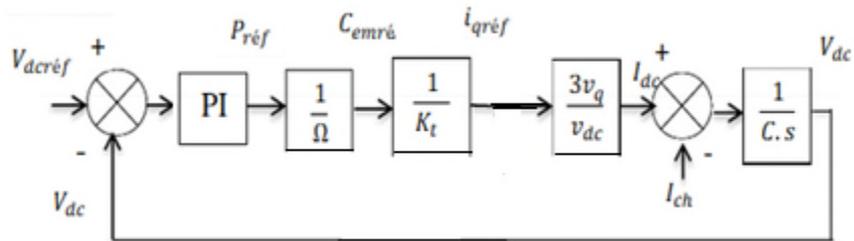


Fig. A6.2 : Modèle complet en boucle fermée pour la régulation de tension