

République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université A.MIRA

Bejaïa Faculté de
technologie

Département de
Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master en
Électrotechnique option Commande électrique*

Thème

**Étude d'un système de pompage éolien à base de
deux machine synchrone à aimants permanents**

Présenté par :

Mr : SLIMANOU Marouane

Mr : CHELGHOUM Idir

Devant le jury :

Mr : TAMALOUZT

Mr : MADI

Encadré par :

Mr : S. TARAFT

Co-Encadré par :

Mr : D. AOUZELLAG

**Année universitaire
2019/2020**

Remerciement

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à messieurs D. Aouzellag et S. Traft, qui n'ont pas hésité une seule seconde pour nous prendre en charge et nous orienter, et c'est grâce à eux que ce travail a pu voir le jour. Nous tenons à remercier monsieur le président et les membres de jury.

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

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont fournis, de près ou de loin, leur aide afin que nous nous puissions mener ce travail à bien.

Dédicaces 1

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, pour son sacrifice qu'elle a consenti pour mon instruction et mon bien être depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Mon père qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Mes chers frères, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Mes amis, et toutes la famille Slímanou.

Slímanou Marouane

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,
A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement et soutien moral,
A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,
Merci d'être toujours là pour moi.

CHELGHOU M Idir

Sommaire

Nomenclature.....	I
Listes des figures	A
Listes des Tableaux.....	C
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne et le pompage.....	3
I.1 Introduction	3
I.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	3
I.3 Energie éolienne.....	3
I.3.1 Origine du vent.....	3
I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne	4
I.3.3 Contexte actuel en Algérie	4
I.3.4 Types d'aérogénérateurs (éolienne)	4
I.3.5 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	5
I.4 Structure des éoliennes.....	6
I.4.1 Eoliennes à vitesse fixe	6
I.4.2 Eoliennes à vitesse variable.....	7
I.4.3 Utilité de la vitesse variable	8
I.5 Recherche du rendement maximum MPPT.....	8
I.6 Phases de fonctionnement d'une éolienne.....	9
I.7 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne.....	9
I.7.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch "	9
I.7.2 Système à décrochage aérodynamique " Stall "	10
I.7.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall".....	10
I.8 Types de générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens.....	11
I.8.1 Machine asynchrone à cage.....	11
I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	12
I.8.3 Machine synchrone.....	12
I.9 Convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens à base de la MSAP.....	13
I.9.1 Structure avec redresseur à diode (AC/DC)	13
I.9.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	14
I.9.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont.....	14
I.9.4 Structure avec redresseur MLI	15
I.10 Éoliennes de pompage.....	15
I.10.1 Eoliennes de pompage mécanique	16
I.10.2 Eoliennes de pompage électrique	16

I.11 Pompes hydrauliques.....	16
I.11.1 Description d'une pompe	16
I.11.2 Caractéristiques générales des pompes	16
I.12 Description de deux systèmes de pompage éolien étudiés.....	17
I.13 Conclusion.....	19
Chapitre II : Modélisation de la chaine étudiée	20
II.1 Introduction.....	20
II.2 Description du système étudié de pompage éolien	20
II.3 Modélisation et simulation des différentes parties du système étudié de pompage éolien.....	20
II.3.1 Modélisation du vent.....	20
II.3.2 Modélisation de la turbine utilisée	21
II.3.3 Modèle mécanique de l'arbre :.....	23
II.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	24
II.3.5 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park	26
II.3.6 Modélisation de convertisseur	28
II.3.7 Modélisation de la pompe centrifuge.....	31
II.3.8 Résultats de Simulations et interprétations	33
II.4 Conclusion	35
Chapitre III : Contrôle du système étudié.....	36
III.1 Introduction.....	36
III.2 Description du système à étudier	36
III.3 Contrôle du courant par hystérésis de redresseur	36
III.4 Commande MLI de l'onduleur	37
III.5 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents.....	38
III.5.1 Principe de la commande vectorielle.....	38
III.5.2 Stratégie de commande.....	39
III.6 Description de la première partie (générateur éolien)	40
III.6.1 Régulation de tension V_{dc}	40
III.6.2 Extraction de la puissance maximale de la turbine (MPPT).....	41
III.6.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	41
III.6.4 Limitation de la puissance captée par la turbine éolienne	42
III.8 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation de moteur synchrone à aimants permanents	43
III.9 Description de la deuxième partie (association motopompe).....	44
III.10 Description de la troisième partie	46
III.11 Conclusion	52
Chapitre IV : Etude de la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC.....	53

IV.1 Introduction	53
IV.2 But de ce travail.....	53
IV.3 Développement mathématique pour le couplage électrique.....	55
VI.4 Simulation et interprétation des résultats	57
VI.5 Étude comparative	59
IV.6 Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	61
Références bibliographiques.....	63
Annexe 1	67
Annexe 2.....	68

Nomenclature

NOTATIONS

I. La turbine

v : Vitesse du vent (m/s).

v_0 : Composante moyenne du vent.

w_k : Pulsation de l'harmonique.

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

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

p_v : Puissance du vent (W).

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

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

R : Rayon de la pale (m).

p_t : Puissance de la turbine éolienne (W).

λ : Vitesse spécifique.

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

C_p : Coefficient de puissance.

C_{p_max} : Coefficient de puissance maximal.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale.

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

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

J_t : Inertie de la turbine (kg.m²).

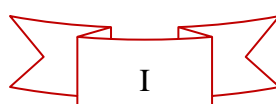
II. La GSAP

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

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

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

$[R_s]$: Matrices des résistances statoriques.



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

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

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

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

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

φ_f : Flux des aimants permanents (Wb).

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

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

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

f_g : Coefficient de frottement visqueux de la génératrice (N.m/rad.s).

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

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

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

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

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

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

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

P_1 : Nombre de paires de pôles de la GSAP.

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

III. La MSAP

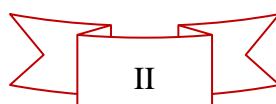
φ_{f_m} : Flux des aimants permanents du moteur (wb).

J_m : Inertie du moteur (kg.m^2).

Ω_m : Vitesse mécanique du moteur (rad/s).

f_m : Coefficient de frottement visqueux du moteur (N.m/rad.s).

C_{em_m} : Couple électromagnétique développé par le moteur (N.m).



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

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

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

P_2 : Nombre de paires de pôles du moteur.

L_{d_m}, L_{q_m} : Inductance direct et quadratique (H).

R_{s_m} : Résistance statorique du moteur (Ω).

IV. Convertisseurs

IV.1 Redresseur

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

i_{red} : Courant redressé (A).

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

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

i_{ca} : Courant de la capacité (A).

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

C : Capacité (F).

IV.2 Onduleur

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

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

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

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

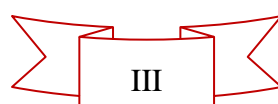
V_p, V_{ref}, r : Amplitude de tension de la porteuse, amplitude de tension de référence, et coefficient de réglage de tension respectivement.

V. Pompe

p_{mec} : Puissance mécanique (W).

K_r : Coefficient de proportionnalité.

C_r : Couple résistant (N.m).



P_h : Puissance hydraulique (W).

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

H : Hauteur manométrique (m)

Q : Débit volumique (m³/s)

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

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

VI. Régulateurs

K_p : Gain proportionnel.

K_i : Gain intégral.

Abréviations

MLI : Modulation de la largeur d'impulsion.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel intégrale.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents.

GAS : Génératrice asynchrone.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu (Direct curent).

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

GTO: Gate turn-off thyristor.

Listes des figures

Figure I.1 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)	4
Figure I.2 Schéma simplifié d'un aérogénérateur	6
Figure I.3 Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe.....	7
Figure I.4 Connexion d'un système à vitesse variable au réseau électrique	7
Figure I.5 Caractéristique de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	8
Figure I.6 Courbe typique de production d'énergie d'une turbine éolienne.....	9
Figure I.7 Variation de l'angle de calage d'une pale	10
Figure I.8 Flux d'air sur un profil de pale "Stall"	10
Figure I.9 Système éolien à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage	11
Figure I.10 Système éolien à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.....	11
Figure I.11 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation.....	12
Figure I.12 Système éolien à vitesse variable basé sur MSAP a grand nombre de paires pôles.....	13
Figure I.13 Éolienne à base d'une MSAP connectée à un redresseur à diodes	13
Figure I.14 Éolienne à base d'une GSAP connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur	14
Figure I.15 Éolienne à base d'une GSAP avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.....	14
Figure I.16 Éolienne à base d'une GSAP connectée à un redresseur à MLI.....	15
Figure I.17 Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau	15
Figure I.18 Domaines d'utilisation des pompes volumétriques et centrifuges	17
Figure I.19 Schéma global de la chaine étudiée	18
Figure I.20 Schéma global de la chaine étudiée sans les convertisseurs	19
Figure II.1 Schéma global de la chaine étudiée.....	20
Figure II.2 Allure utilisée de la vitesse du vent.....	21
Figure II.3 Turbine éolienne.....	22
Figure II.4 Caractéristiques $C_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne utilisée.....	23
Figure II.5 Représentations de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	26
Figure II.6 Convertisseur statique MLI.....	28
Figure II.7 Schéma simple du circuit du bus continu	29
Figure II.8 Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux	30
Figure II.9 Schéma d'une pompe centrifuge	32
Figure II.10 Schéma bloc de la GSAP en charge résistive.....	33
Figure II.11 Résultats de la simulation de GSAP sur une charge résistive	35
Figure III.1 Système global étudié.....	36
Figure III.2 Principe de contrôle du courant par hystérésis	37
Figure III.3 Schéma synoptique de la MLI	38

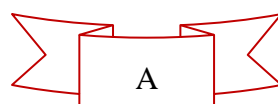
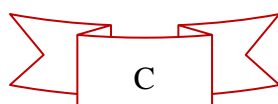


Figure III.4 Représentation spatiale de l'orientation du flux rotorique dans une MSAP	39
Figure III.5 Schéma bloc de commande de générateur éolien	40
Figure III.6 Schéma bloc de la régulation de V_{dc}	41
Figure III.7 MPPT sans asservissement de la vitesse	42
Figure III.8 Schéma bloc de régulation de l'angle de calage des pales	43
Figure III.9 Structure générale : (moteur-découplage par compensation)	44
Figure III.10 Commande découplée.....	44
Figure III.11 Schéma bloc de la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent	45
Figure III.12 Résultats de simulation de la turbine	47
Figure III.13 Résultats de simulation de la génératrice.....	49
Figure III.14 Résultats de simulation de la chaîne motopompe.....	51
Figure III.15 Allure de rendement global	52
Figure IV.1 Caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne.....	53
Figure IV.2 Caractéristique couple-vitesse de la pompe	54
Figure IV.3 Les caractéristiques puissance-vitesse turbine et pompe	54
Figure IV.4 Schéma du système global	55
Figure IV.5 Schéma bloc global du système de pompage éolien sans convertisseur AC/DC/AC.....	57
Figure IV.6 Allure des vitesses turbine et pompe	57
Figure IV.7 Allure du couple électromagnétique du MSAP et du couple résistant de la pompe.....	57
Figure IV.8 Allure des puissances de la turbine et de la pompe	58
Figure IV.9 Allure de la tension V_a et du courant i_a	58
Figure IV.10 Rendement global	58
Figure IV.11 Les caractéristiques (turbine et pompe) avec et sans convertisseurs	60

Listes des Tableaux

Tableau IV-1 Valeurs des puissances et vitesses (avec convertisseurs)..... 59
Tableau IV-2 Valeurs des puissances et vitesses (sans convertisseurs) 59
Tableau IV-3 Valeur des pertes de puissances (avec et sans convertisseurs)..... 59





Introduction générale



Introduction générale

L'énergie électrique est le facteur essentiel pour tout développement industriel. La demande en électricité ne cesse d'augmenter dans le monde entier [1]. Notre dépendance aux énergies fossiles ne peut continuer indéfiniment, surtout avec l'épuisement croissant des gisements des ressources énergétiques fossiles [2], et les problèmes de pollution causés par ces dernières qui sont un danger pour l'humanité et l'environnement.

Pour remédier aux problèmes auxquels fait face notre monde, les gouvernements de la plupart des pays ont fait appel au développement des énergies renouvelables qui sont des énergies propres non polluante (solaire, éolienne, hydraulique...etc.).

L'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique [2], elle est utilisée dans plusieurs application tels que : le pompage de l'eau.

Dans ce mémoire, on s'intéressera à l'étude d'un système de pompage éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), afin que cette énergie soit applicable au pompage. Ce type de machine présente un facteur de puissance élevé, un bon rendement et permet d'extraire un maximum d'énergie en éliminant le multiplicateur de vitesse, cela va faciliter son entretien.

Grace à l'évolution technologique de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable ont connu un développement considérable qui permet de s'adapter aux variations aléatoires de vent, améliorer la qualité de l'énergie électrique et augmenté le rendement énergétique.

Afin d'approfondir les points ci-dessus, notre mémoire est organisé en quatre chapitres :

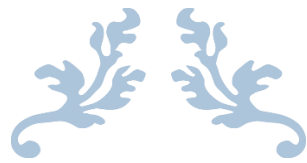
Le premier chapitre sera consacré pour l'état de l'Art sur l'énergie éolienne et le pompage, on évoquera le principe de fonctionnement d'un système éolien, structure des éoliennes à vitesse fixe ou à vitesse variable, les types de machines électriques et les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes éoliens pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, à la fin on présentera des généralités sur les pompes.

Le deuxième chapitre portera sur la modélisation de la chaine de conversion de l'énergie éolienne, doter d'une éolienne tripale à axe horizontal, génératrice synchrone à aimant permanent, redresseur, onduleur et une pompe centrifuge. A la fin de ce chapitre une simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent en charge sous Matlab/Simulink est présentée.

Le troisième chapitre présentera le but et la définition de la commande vectorielle appliqué à deux machines synchrones à aimant l'une en fonctionnement génératrice et l'autre en fonctionnement moteur, on appliquera aussi la technique MPPT à la turbine afin de produire un maximum de puissance et une limitation de puissance dans le cas où le vent dépasse la vitesse nominale. Les résultats de simulation de toute la chaine étudiée seront présentés à la fin de ce chapitre.

Dans le quatrième chapitre, l'étude et développement des modèles mathématiques en vue d'éliminer le convertisseur statique seront présentés, implémentés et simulés sous l'environnement Matlab/Simulink.

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



***Chapitre I : Généralités sur
l'énergie éolienne et le pompage***



Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne et le pompage

I.1 Introduction

Pour capter l'énergie cinétique du vent ils existent plusieurs technologies (capteur à axe horizontal et capteur à axe vertical) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Ces capteurs transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, les génératrices soit synchrone ou asynchrone sont là pour transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne seront présentés ainsi que les types de pompes.

I.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent est considéré comme l'une des premières sources d'énergie utilisée par l'humanité. Le cerf-volant ou encore le bateau à voile en sont des exemples, la marine à voile est la plus ancienne technologie, employé en mer Egée à l'antiquité [3].

La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 1700 ans avant J.-C. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent [4]. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age [3].

En 1891, le Danois Poul La Coura a découvert que les turbines éoliennes rapides comportant peu de pales sont plus efficaces pour la production de l'électricité [5]. Cette technologie est améliorée durant la première et la deuxième guerre mondiale avec une grande échelle par les ingénieurs danois [4].

Au cours de la dernière décennie, l'emploi de l'énergie éolienne a connu une hausse considérable. Parmi toutes les sources d'énergie, l'énergie éolienne est bien implantée avec une croissance forte.

I.3 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent.

I.3.1 Origine du vent

Le vent est un déplacement des masses de gaz qui se trouvent à la surface de n'importe quelle planète disposant d'une atmosphère [6]. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud [7].

I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est un aérogénérateur qui a pour but convertir l'énergie éolienne en une énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [8] :

- Au niveau de la turbine (rotor) l'énergie cinétique fournie par la force du vent fait tourner les pales (énergie mécanique) ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est réinjectée au réseau électrique.

I.3.3 Contexte actuel en Algérie

L'Algérie comme tous les autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier pour atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe Sonelgaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui est opérationnelle depuis 2012, est injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [9].

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie (voir figure I.1) [9].

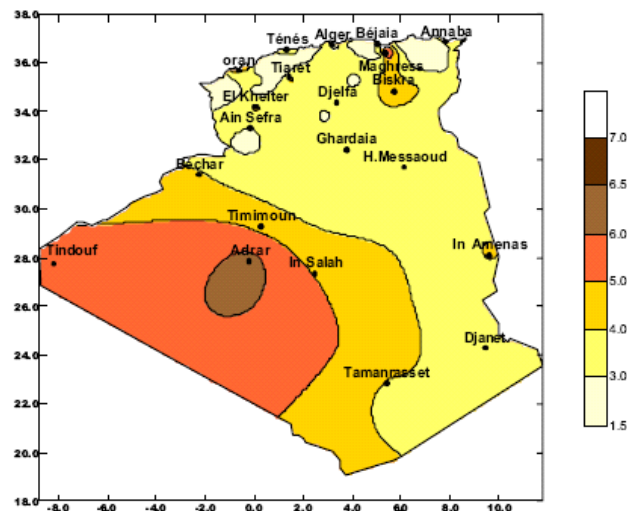


Figure I.1 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) [9]

I.3.4 Types d'aérogénérateurs (éolienne)

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice en deux types : un axe horizontal parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical perpendiculaire au sol.

I.3.4.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type de technologie est daté de plus de 4 000 ans. Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Son avantage est d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles, ici le rotor tourne autour d'un axe vertical, il existe deux types d'éolienne à axe vertical, les types Darrieus et les types Savonius [10].

I.3.4.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus utilisé aujourd'hui car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles comportent un très haut mât qui supporte généralement des hélices à deux ou trois pales orientées face au vent. En augmentant la hauteur du mât et le diamètre balayé par les pales, on peut obtenir d'assez grandes puissances [11].

I.3.5 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Les éoliennes se composent de trois principaux éléments [12] :

- **Rotor** : Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles construites en matériaux composites et réunies au niveau du moyeu. Il se prolonge dans la nacelle, pour constituer l'arbre lent (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique, etc.) ;
- **Mât (Tour)** : C'est un tube d'acier ou anneaux de béton surmonté d'un ou plusieurs tronçons en acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol, généralement il contient un transformateur qui permet d'élever la tension électrique de l'éolienne au niveau de celle du réseau électrique ;
- **Nacelle** : Elle regroupe plusieurs éléments fonctionnels tel que les arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le système de freinage et le système d'orientation de la nacelle qui place le rotor face au vent pour une production optimale d'énergie et le générateur.

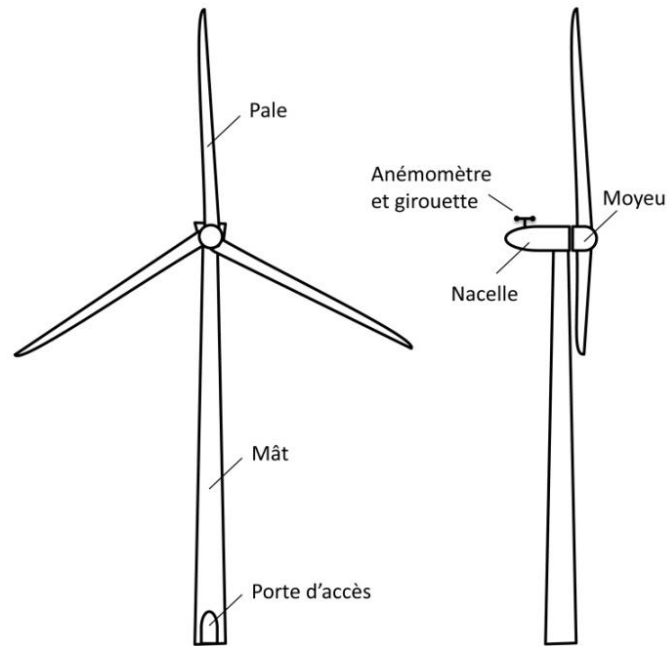


Figure I.2 Schéma simplifié d'un aérogénérateur

I.4 Structure des éoliennes

L'éolienne peut être à vitesse fixe comme elle peut être à vitesse variable :

I.4.1 Eoliennes à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est imposée par la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice, comme elle peut être couplée à une charge électrique isolée ou enfin peut être couplée à un système de stockage d'énergie (dans des accumulateurs) ou à un réseau autonome [13]. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales [13].

En conséquence, la puissance générée par cette éolienne peut avoir des caractères très fluctuants, ce qui n'offre pas de possibilité de réglage de la puissance générée par la turbine.

Cependant, cette puissance électrique produite peut être commandée par un système de stockage d'énergie électrique, compensateur synchrone statique (STATCOM). D'autre part, ce type de conversion d'énergie éolienne nécessite l'ajout de bancs de condensateurs de compensation d'énergie réactive afin de limiter la puissance réactive appelée au réseau ou à la charge électrique, un schéma de cette structure est illustré dans la figure I.3 [14].

Avantages :

- Système électrique plus simple ;
- Prix modéré et construction robuste ;

- Pas besoin de système électronique ;
- Plus fiable et moins d'entretien.

Inconvénients :

- Puissance générée par la turbine non optimale ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée ;
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.

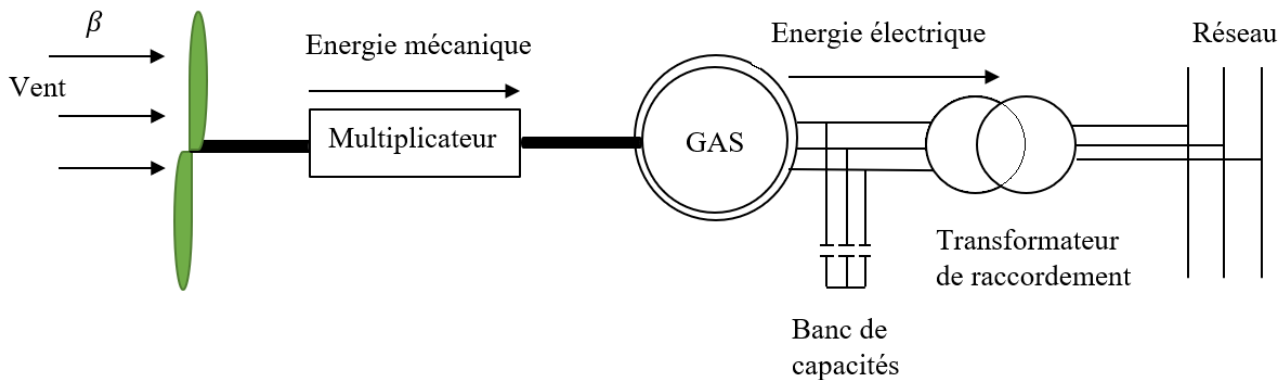


Figure I.3 Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe

I.4.2 Eoliennes à vitesse variable

Les structures à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées permettent d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne pour des vents faibles et moyens et augmente la capacité de production de la machine de 8 % à 15% [14].

Cette technologie nécessite l'électronique de puissance. Ici la vitesse de rotation doit être adaptée par rapport à la vitesse du vent afin de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les efforts mécaniques à vitesse variable du vent (voir figure I.4) [15].

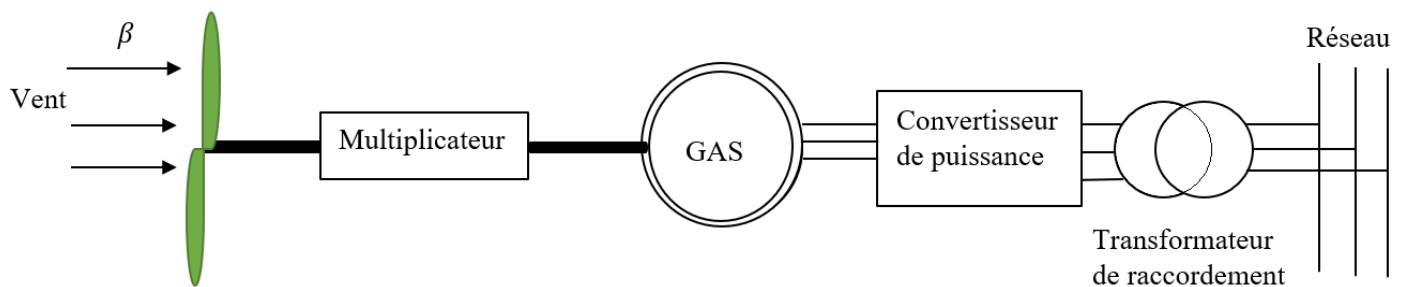


Figure I.4 Connexion d'un système à vitesse variable au réseau électrique

Avantages :

- Optimisation de rendement énergétique ;
- Optimisation de l'énergie captée ;
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.

Inconvénients :

- Coûts supplémentaires plus importants ;
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

I.4.3 Utilité de la vitesse variable

Les caractéristiques qui nous donnent la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent comme montrée dans la figure I.5.

Ces caractéristiques nous montrent clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance (rendement maximum) ne seraient pas exploités. Pour pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il faut ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [9].

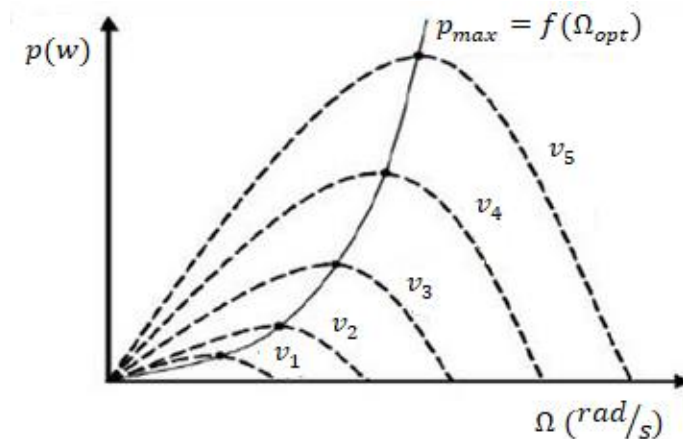


Figure I.5 Caractéristique de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

I.5 Recherche du rendement maximum MPPT

On doit profiter en utilisant l'éolienne de produire un maximum de puissance en exploitant l'énergie fournie par le vent, et pour faire cela de nombreux systèmes de commande de l'éolienne sont développés pour maximiser la conversion d'énergie parmi ces commandes, on note :

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

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

I.6 Phases de fonctionnement d'une éolienne

La courbe de production d'énergie d'un système de conversion d'énergie éolienne peut être divisée en quatre domaines [16] comme montrés dans la figure 1.6.

- Zone I : $v < v_D$: La vitesse du vent est trop faible. Absence de puissance ;
- Zone II : $v_D < v < v_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite.
- Zone III : $v_n < v < v_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine.
- Zone IV : $v > v_M$: La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

La conversion d'énergie doit être maximisée dans la zone II. En fait, deux contrôleurs différents sont demandés. Un pour la zone II, maximisation de la production d'énergie, et un pour la zone III, maintient la puissance produite constante à la puissance nominale [16].

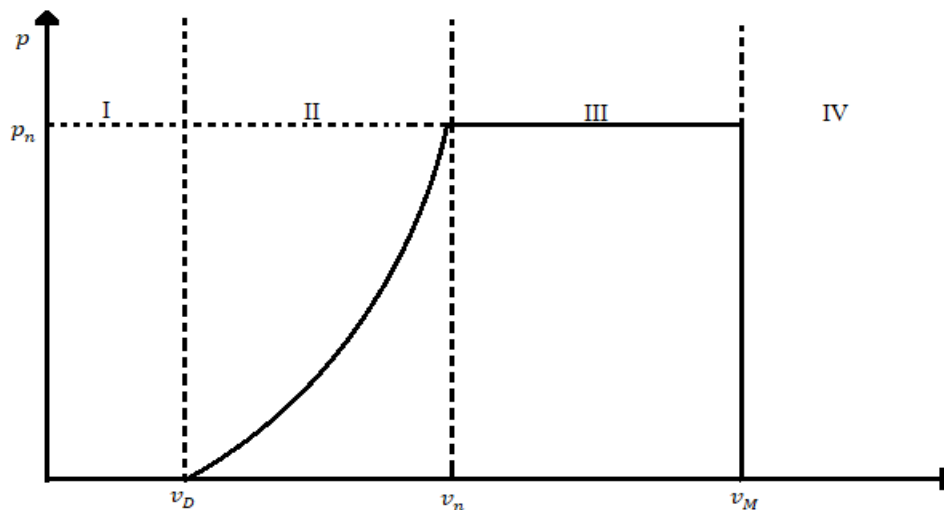


Figure I.6 Courbe typique de production d'énergie d'une turbine éolienne

I.7 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne

I.7.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch "

Le changement d'angle des pales face au vent est utilisé pour maintenir une vitesse de rotation constante comme illustré dans la figure I.7.

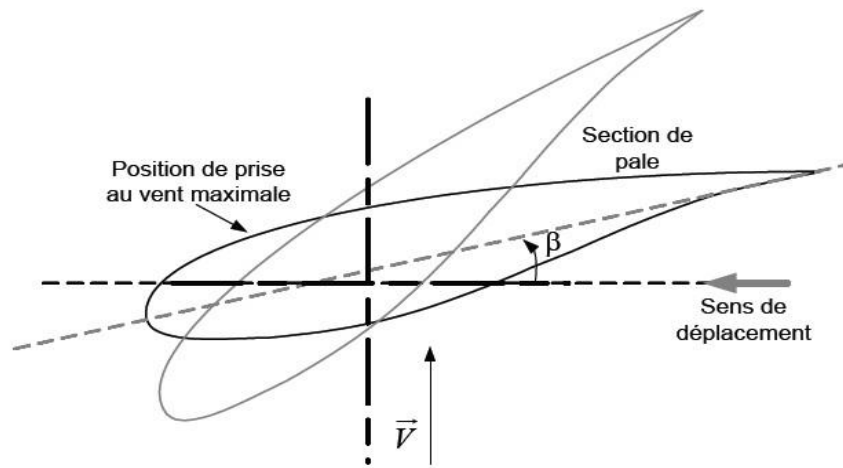


Figure I.7 Variation de l'angle de calage d'une pale [17]

Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Dans notre étude, on s'intéresse à ce système de régulation.

I.7.2 Système à décrochage aérodynamique " Stall "

Ce système de régulation est le moins coûteux et le plus utilisé car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor.

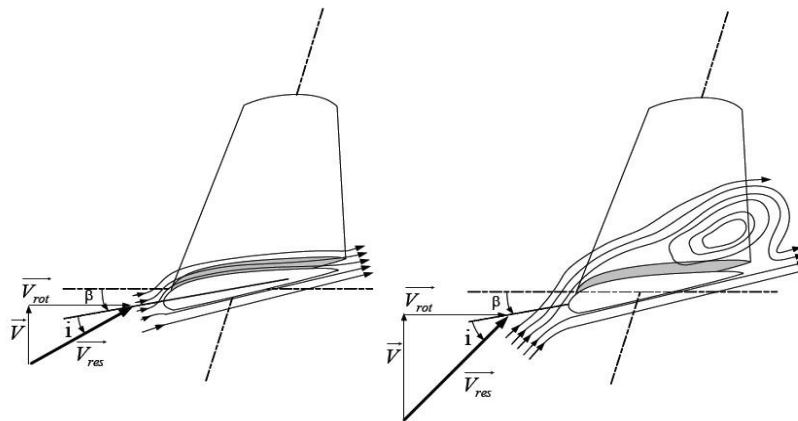


Figure I.8 Flux d'air sur un profil de pale "Stall" [30]

Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique, le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique [18].

I.7.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall"

Ce système de régulation utilise les deux systèmes de régulation "Stall" et " Pitch " en même temps pour avoir un meilleur contrôle sur la production de l'électricité, il est utilisé pour les éoliennes de grandes puissances [19].

I.8 Types de générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens

Il existe une grande variété de machines électriques utilisées dans les systèmes aérogénérateurs, pour choisir le type de ce dernier on doit prendre en compte de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore)

I.8.1 Machine asynchrone à cage

Les machines asynchrones à cage sont connues par la simplicité de leur fabrication et leur coût moins élevé. Elles présentent un taux de défaillance très peu élevé et sont moins exigeantes en termes d'entretien. Elles sont fabriquées en très grande quantité et dans une très grande échelle de puissance.

Ce type de machine peut être directement relié au réseau grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. C'est pour cela toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction (voir la figure I.9) [20].

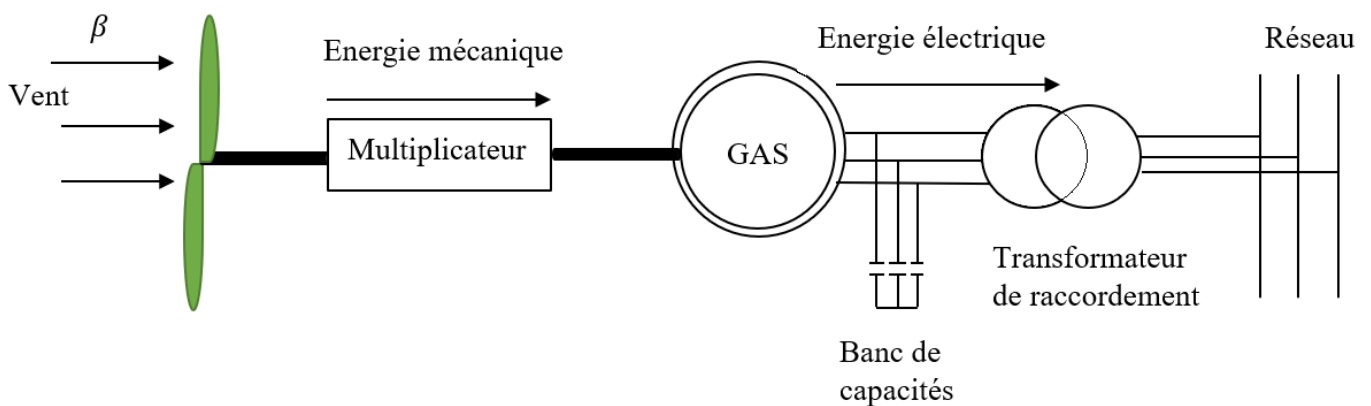


Figure I.9 Système éolien à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

Pour les aérogénérateurs fonctionnant à vitesse variable, l'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau est obligatoire, malgré son prix élevé, permet de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine (voir la figure I.10) [20].

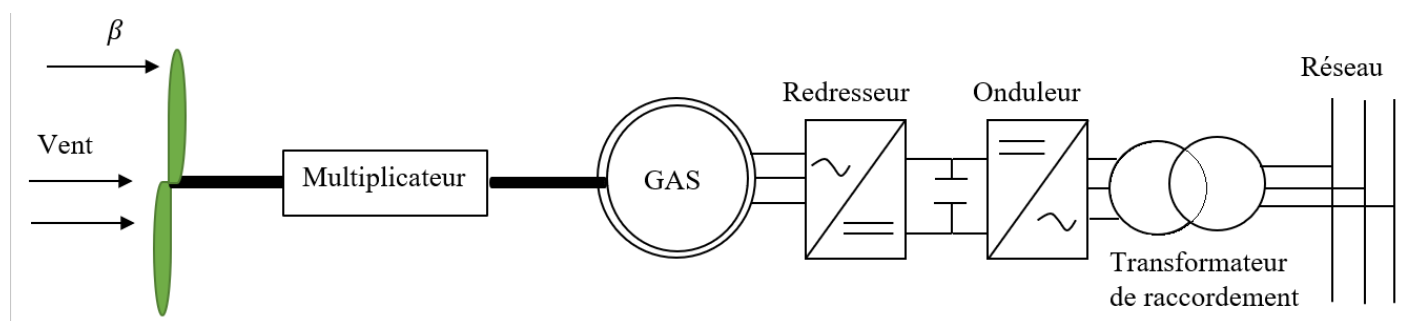


Figure I.10 Système éolien à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage

Il est nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur de vitesse car la vitesse de rotation est peut élever dans les aérogénérateurs à grande puissance et rayon de pales important [21].

I.8.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation a la particularité de dispoé de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est reliev directement au réseau possédant une tension et une fréquence fixe et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance qui permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA est reliev au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, composer d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, ce dernier est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine [22]. Ces machines nécessitent un multiplicateur de vitesse et leur robustesse est légèrement diminuée à cause de systèmes à bagues et balais, mais le fonctionnement à vitesse variable reste un avantage suffisant (voir la figure I.11) [20].

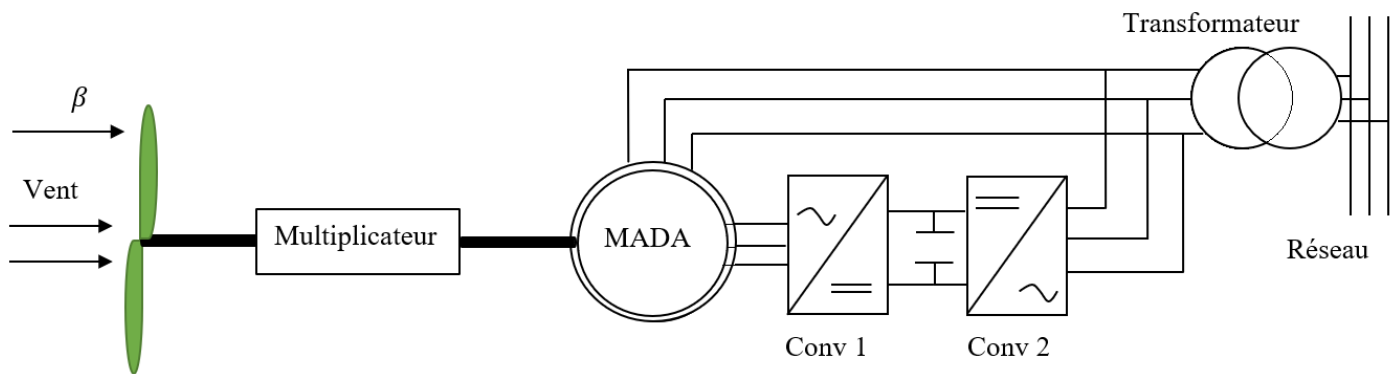


Figure I.11 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation

I.8.3 Machine synchrone

a. Machine synchrone à rotor bobiné

Le circuit d'excitation de l'inducteur de la machine synchrone à rotor bobiné demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive et un entretien régulier à cause du système bagues et balais ce qui est un inconvénient [21]. Le fonctionnement direct sans engrenages de la machine synchrone à rotor bobiné multipolaire à vitesse variable implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [14].

b. Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est la plus performante de toutes les machines électriques. C'est pour cela que la plupart des systèmes éoliens dans la catégorie des petites turbines utilisent les générateurs à aimants permanents et fonctionnent à vitesse variable, vu le facteur de puissance élevé et le

bon rendement ainsi que la simplicité de la MSAP grâce au système d'auto excitation basé sur les aimants permanents.

Les génératrices synchrones qui sont généralement utilisées dans les systèmes éoliens sont à structure montées en surface et à structure à aimants encastrés [14]. L'aimantation permanente à plusieurs pôles de cette machine lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse (voir figure I.12). Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible [13].

Dans notre étude, on s'intéresse à cette structure de l'éolienne à base une MSAP.

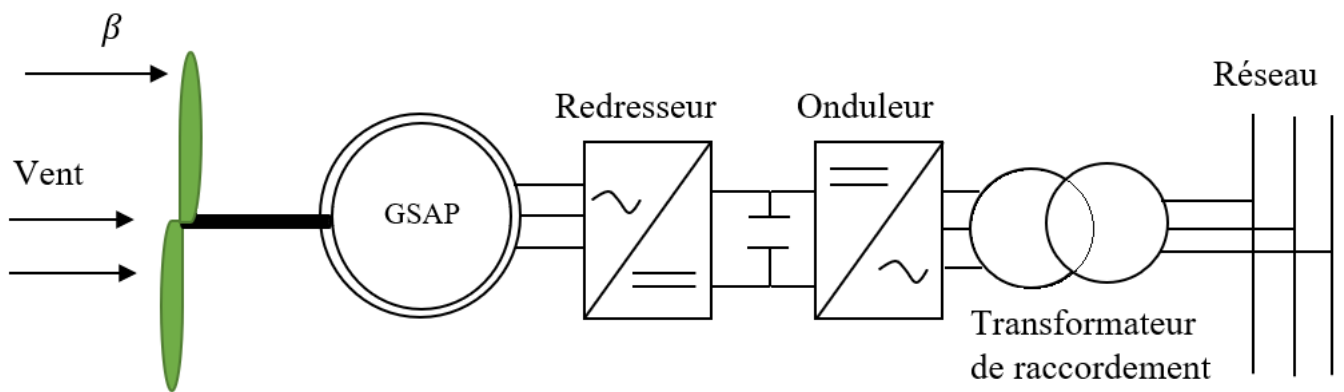


Figure I.12 Système éolien à vitesse variable basé sur MSAP a grand nombre de paires pôles

I.9 Convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens à base de la MSAP

I.9.1 Structure avec redresseur à diode (AC/DC)

Cette structure est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes et elle est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Dans cette configuration, aucun composant n'est commandé, elle a peu de capteurs donc son coût est réduit. Elles nécessitent un choix très précis de tous les paramètres (paramètres de la machine et tension continue) par une conception système dédiée et ce malgré son fonctionnement qui est naturel (voir la figure I.13) [19].

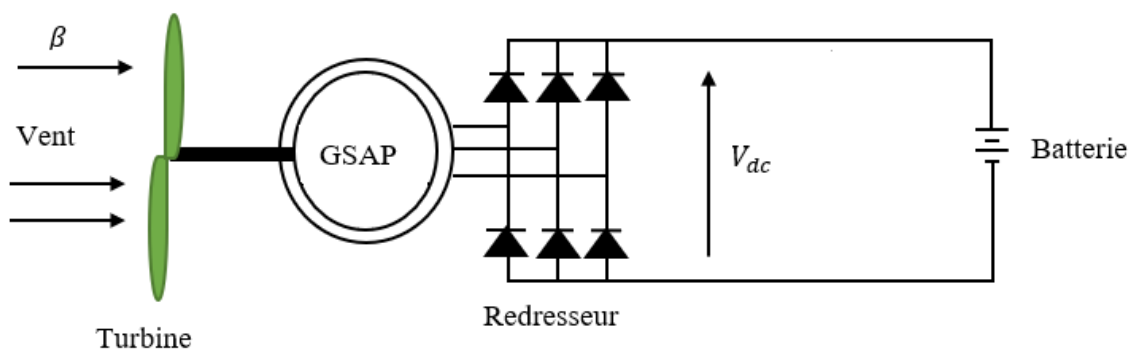


Figure I.13 Éolienne à base d'une MSAP connectée à un redresseur à diodes

I.9.2 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 du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une GSAP 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 [19] (voir la figure I.14).

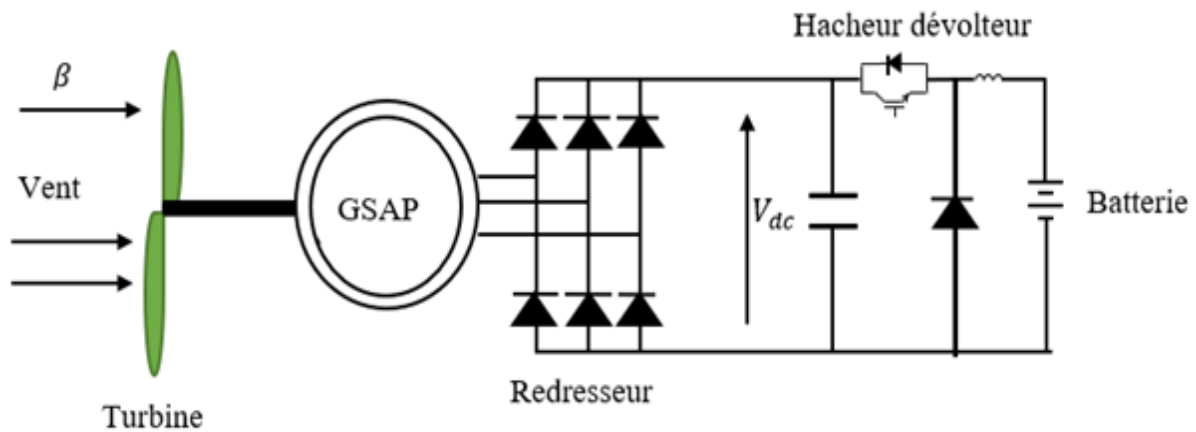


Figure I.14 Éolienne à base d'une GSAP connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur

I.9.3 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Notre but est toujours l'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 . 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 (voir la figure I.15) [19].

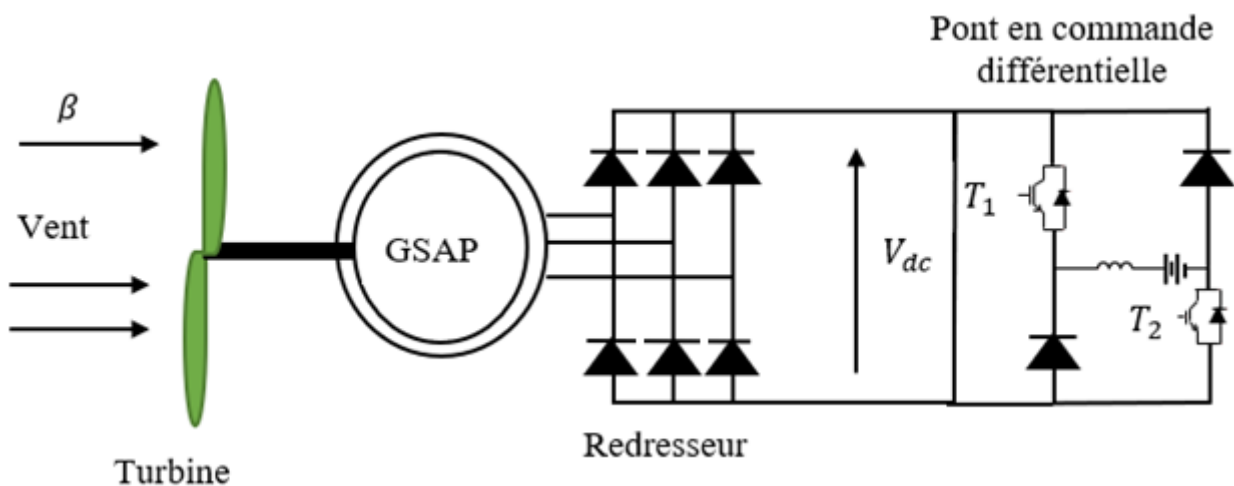


Figure I.15 Éolienne à base d'une GSAP avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

I.9.4 Structure avec redresseur MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure I.16, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [19], pour notre cas on étudiera cette structure dans les chapitres à venir.

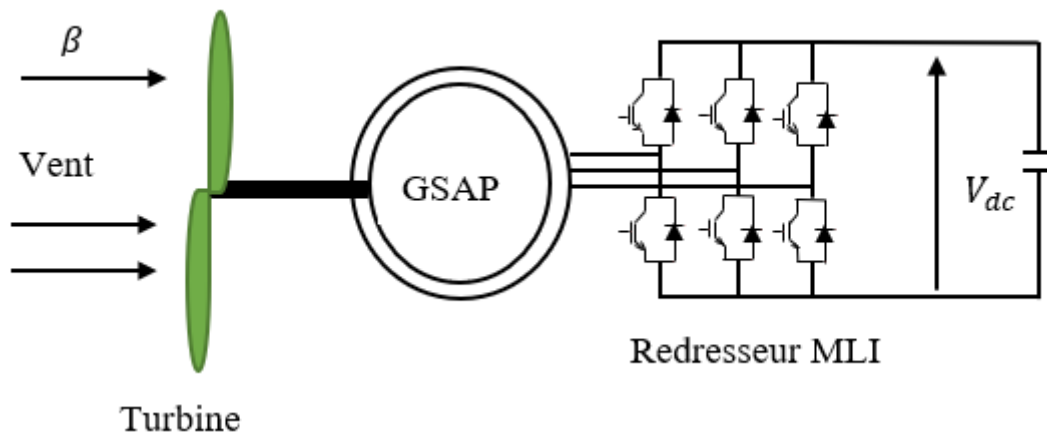


Figure I.16 Éolienne à base d'une GSAP connectée à un redresseur à MLI

I.10 Éoliennes de pompage

Il existe deux types d'éoliennes de pompage, l'éolienne de pompage mécanique, elles sont les premiers à être utilisées, et l'éolienne de pompage électrique (voir figure I.17).

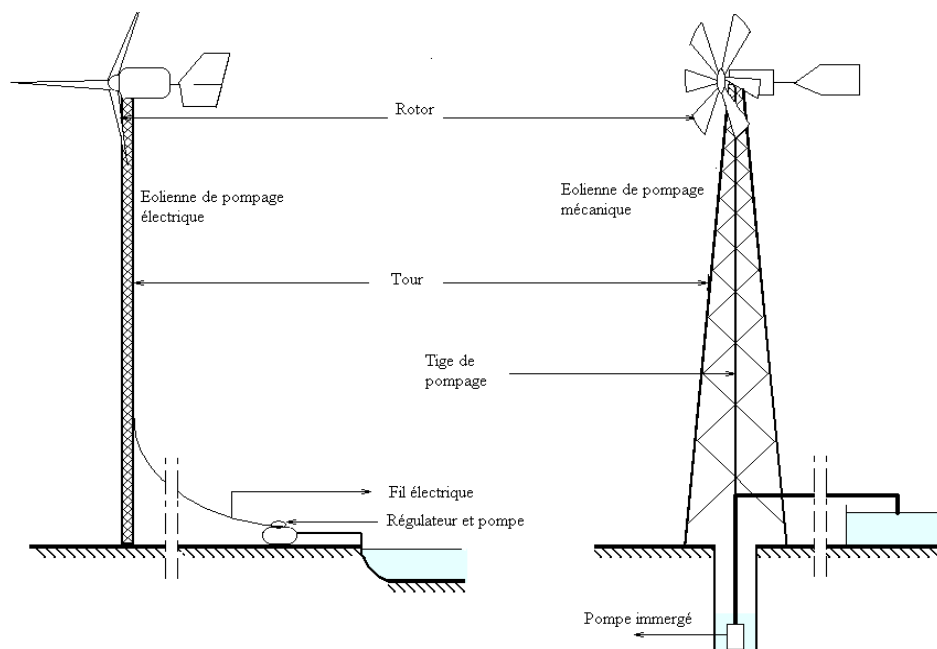


Figure I.17 Représentation schématique des systèmes éoliens mécanique et électrique pour le pompage de l'eau [7]

I.10.1 Eoliennes de pompage mécanique

On utilise pour l'éolienne de pompage mécanique un système traditionnel appelé bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède généralement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement [7]. Le principe du système consiste à transformer le mouvement rotatif de la bielle en mouvement alternatif (rectiligne) qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne [7].

Il est évident que le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Ce système a ses avantages et ses inconvénients. Ses avantages sont : fiables, leur entretien est facile et ils ont un coût de revient abordable. Son inconvénient principal se résume dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, l'eau pompée est transportée à une certaine distance de ce puits.

I.10.2 Eoliennes de pompage électrique

Contrairement au système précédent dans celui-ci on n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Dans le système éolien électrique qui entraîne une électropompe après la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang ou un système d'irrigation). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne sont pas munies de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [24].

I.11 Pompes hydrauliques

I.11.1 Description d'une pompe

Une pompe est une machine tournante qui réalise un transfert d'énergie entre son arbre propre, et un fluide en mouvement, celui-ci toute en vainquant la gravité. Ce transfert provoque une augmentation de l'énergie du fluide par fourniture d'énergie mécanique sur l'arbre de la machine.

I.11.2 Caractéristiques générales des pompes

Les caractéristiques des pompes sont [25] :

- Le débit fourni (Q) par une pompe est le volume d'eau qu'elle refoule par unité de temps. Il s'exprime en litres par minute (l/min) ou, en mètres cubes par heure (m^3/h) ;
- La hauteur manométrique (H) qui tient compte des pertes de charge du circuit hydraulique ainsi que la différence entre le niveau d'aspiration et le niveau de refoulement. Ce paramètre est exprimé en mètres de fluide (mètres de colonne d'eau) et diminue généralement en fonction du débit pompé. I.11.3

Classification des pompes

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales selon le débit et la pression voulue comme le montre la figure I.19:

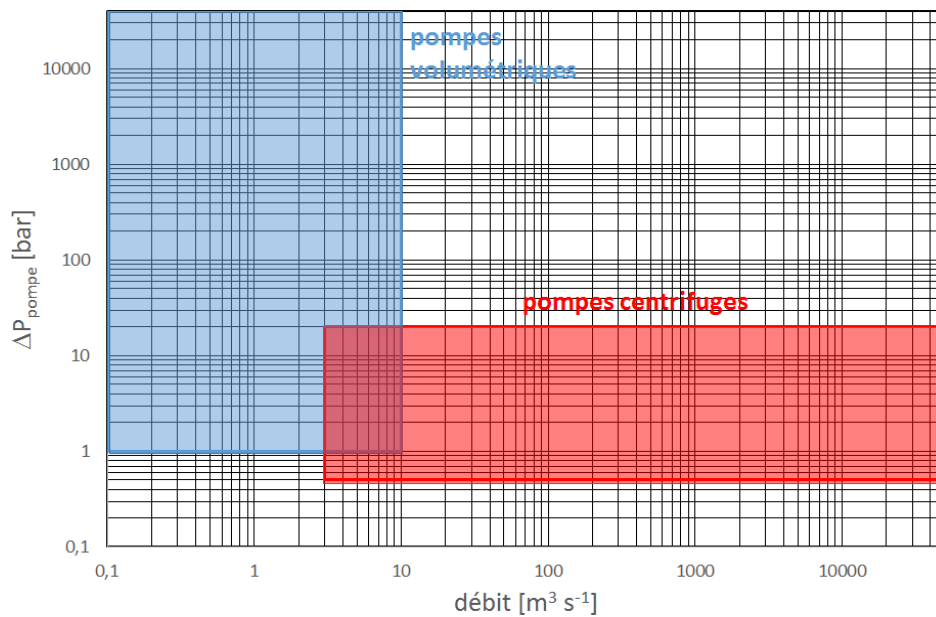


Figure I.18 Domaines d'utilisation des pompes volumétriques et centrifuges [26]

a. Pompe volumétrique

Dans ces machines volumétriques (à déplacement positif), un certain volume de fluide est, dans une première étape, forcé dans un espace fini où il est enfermé sous pression par un moyen mécanique. Il est ensuite, dans une seconde étape, relâché ou forcé en dehors de cet espace, et le cycle reprend de nouveau. Donc, dans ce type de machine, l'écoulement du fluide est intermittent et le débit dépend des dimensions de l'espace qui reçoit le fluide et de la fréquence avec laquelle il est rempli et vidé [23].

b. Pompe centrifuge

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmis au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

La pompe centrifuge est le type de pompe le plus utilisé, grâce à la large gamme d'utilisation. Sa robustesse, et son coût de production très rétréci et la simplicité de construction.

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

I.12 Description de deux systèmes de pompage éolien étudiés

Le système de pompage éolien électrique à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur deux MSAP est illustré sur la figure I.20. La turbine éolienne entraîne la GSAP sans multiplicateur de vitesse, laquelle est

raccordé à un groupe motopompe basé sur un moteur synchrone à aimants permanents au travers de deux convertisseurs statiques triphasés à base des IGBT, on étudiera aussi la possibilité d'éliminer les deux convertisseurs statiques dans le chapitre IV, dans ce cas les deux machines synchrones à aimants permanents joueront le rôle d'une synchromachine (Selsyns).

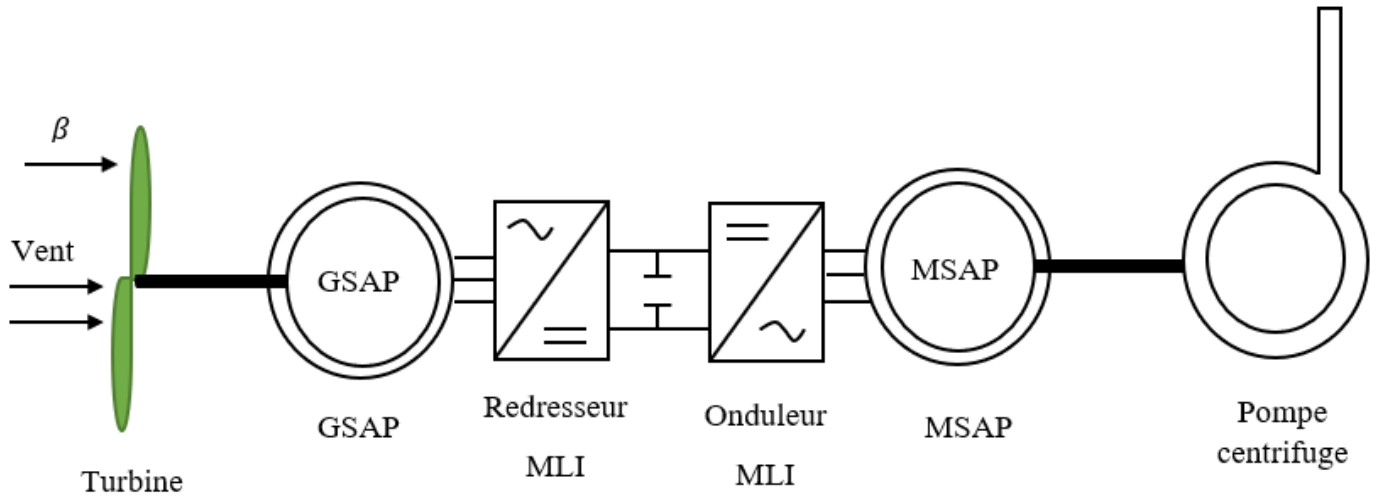


Figure I.19 Schéma global de la chaîne étudiée

On appelle synchromachine (Selsyns) un dispositif admettant d'assurer le synchronisme des mouvements de deux ou plusieurs arbres mécaniques sans liaison mécanique (dont l'un transmetteur et l'autre ou les autres sont récepteurs), lorsque la liaison mécanique, pneumatique ou hydraulique est difficile à réaliser ou n'est pas fiable. Ces dispositifs de liaison synchrone susceptible de réaliser des auto-synchronisations.

Les deux MSAP (transmetteur et récepteur) sont mis en parallèle comme illustre la figure I.21. Lorsque les enroulements statoriques occupent des positions identiques. Dès lors, le moindre déplacement de transmetteur (GSAP) mènera à des f.é.m. statoriques différentes, donc à la naissance de courants statoriques de circulation ; d'après la loi de Lenz, ces courants tendent à réduire la cause de leur apparition.

Si le rotor du transmetteur est décalé d'un angle et les f.e.m du transmetteur et du récepteur (MSAP) sont décalées aussi d'un angle électrique et le récepteur tournera aussi de même angle mécanique (si le couple moteur de la machine est suffisant).

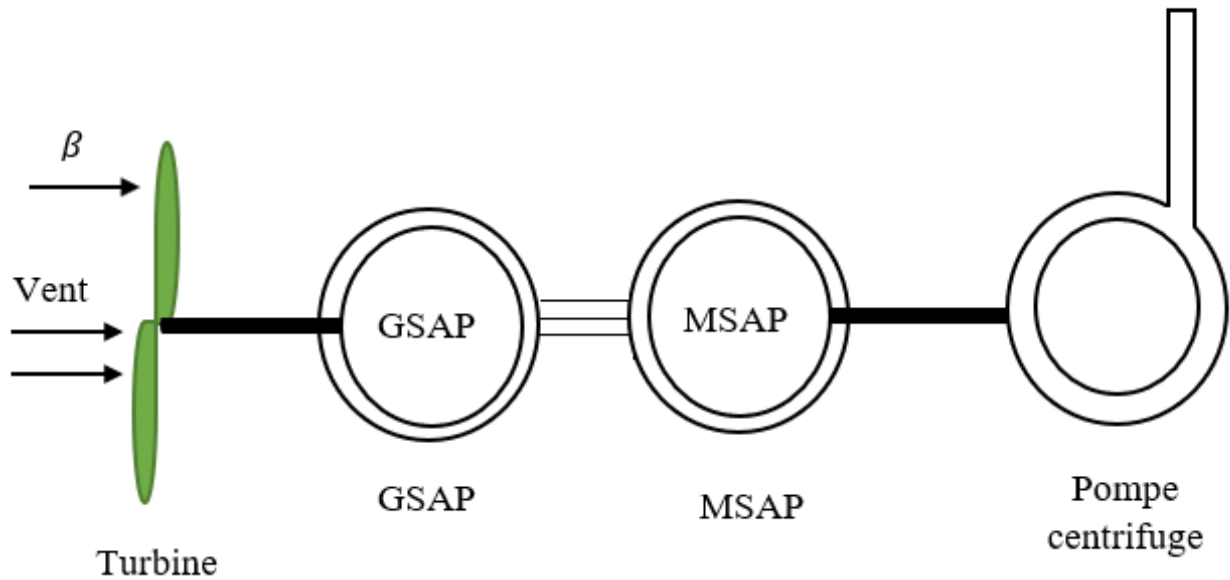


Figure I.20 Schéma global de la chaîne étudiée sans les convertisseurs

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons récapitulé une vue générale sur l'énergie éolienne, ainsi que les différentes configurations ont été présentées, les pompes et leurs classifications ont été citées, ainsi on a présenté quelques convertisseurs les plus utilisés, aussi quelques machines les plus répandues 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 chapitre suivant sera consacré à la modélisation de chaque composant du système de pompage éolien.



***Chapitre II :Modélisation de la
chaine étudiée***



Chapitre II : Modélisation de la chaîne étudiée

II.1 Introduction

Afin de pouvoir étudier le système de pompage éolien de petite puissance sur une plateforme de simulation, il est nécessaire de modéliser mathématiquement les différents constituants de ce système de conversion d'énergie à base de deux MSAP, en se basant sur un nombre d'hypothèses simplificatrices.

Ce chapitre sera consacré à la modélisation du vent et des différents éléments de la chaîne de conversion., une description du système étudié sera présentée avant la modélisation pour connaître ses constituants.

II.2 Description du système étudié de pompage éolien

Le schéma général d'un système de pompage peut être représenté par la figure II.1 est constitué principalement par :

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

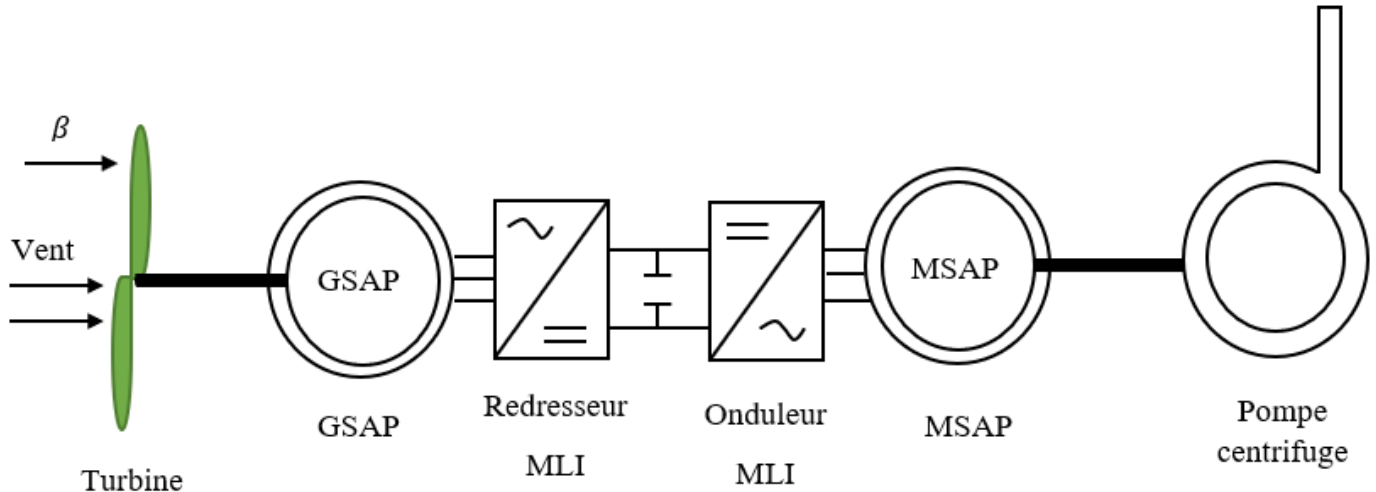


Figure II.1 Schéma global de la chaîne étudiée

II.3 Modélisation et simulation des différentes parties du système étudié de pompage éolien

II.3.1 Modélisation du vent

Il faut d'abord choisir un bon emplacement géographique pour faire un projet de production éolienne. Les propriétés dynamiques du vent sont intéressantes pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie éolienne, car sa puissance, dans les conditions idéales, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [21].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [27].

$$v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

Cette fonction du vent peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [27] :

$$v(t) = v_0 + \sum_{k=1}^i a_k \cdot \sin(b_k \omega_k \cdot t) \quad (\text{II.2})$$

Avec v_0 : Composante moyenne ; a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k ; ω_k : Pulsation de l'harmonique ; i : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

Dans cette étude, nous représentons l'évolution de la vitesse du vent utilisé par la figure II.2 :

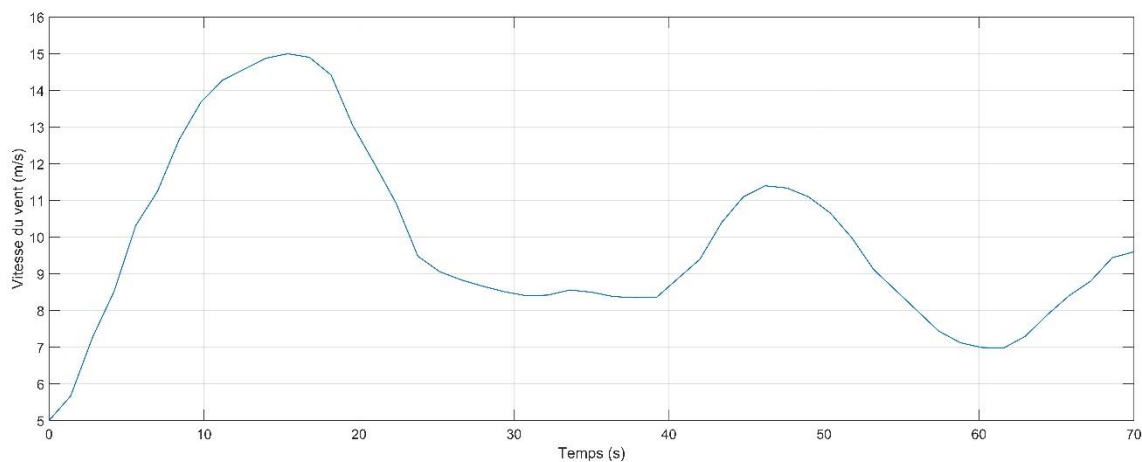


Figure II.2 Allure utilisée de la vitesse du vent

II.3.2 Modélisation de la turbine utilisée

Considérons une turbine éolienne à trois pales à axe horizontal, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie cinétique du vent [28].

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [28], [29] :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée.

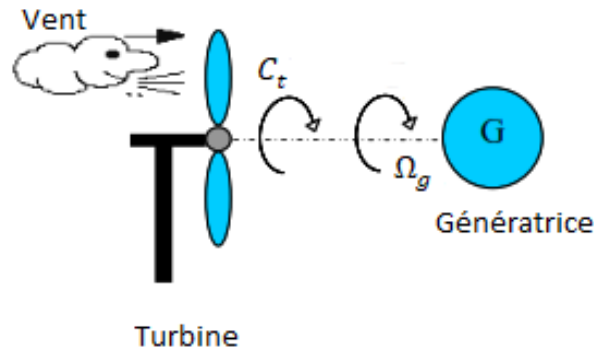


Figure II.3 Turbine éolienne

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine ;
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine ;
- La vitesse de la turbine et l'angle de calage.

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique fournie par une masse d'air m , qui se déplace à une vitesse linéaire v , est donnée par la formule suivante [30] :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II.3})$$

En considérant que cette masse m traverse un volume cylindrique dont la base est la surface balayée par les pales de la turbine de rayon R , et en exprimant cette masse m par en fonction de la masse volumique, on obtient l'expression de la puissance du vent suivante :

$$p_v = \frac{1}{2}\rho\pi R^2v^3 \quad (\text{II.4})$$

Où : ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 kg/m^3 en atmosphère normale) ; R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ; m : Masse d'air traversant la surface en une seconde ; v : Vitesse du vent.

D'après la théorie d'ALBERT BETZ, l'énergie récupérable est égale aux $16/27$ de l'énergie cinétique totale. Ceci est connu comme la limite de Betz [31].

Donc la puissance du vent récupérée sur les pales est donnée par :

$$p_t = \frac{1}{2}C_p(\lambda, \beta)\rho\pi R^2v^3 \quad (\text{II.5})$$

Où : C_p : Coefficient de puissance.

La caractéristique de C_p de l'éolienne étudiée est donnée par la formule approximée suivante [32] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (\text{II.6})$$

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

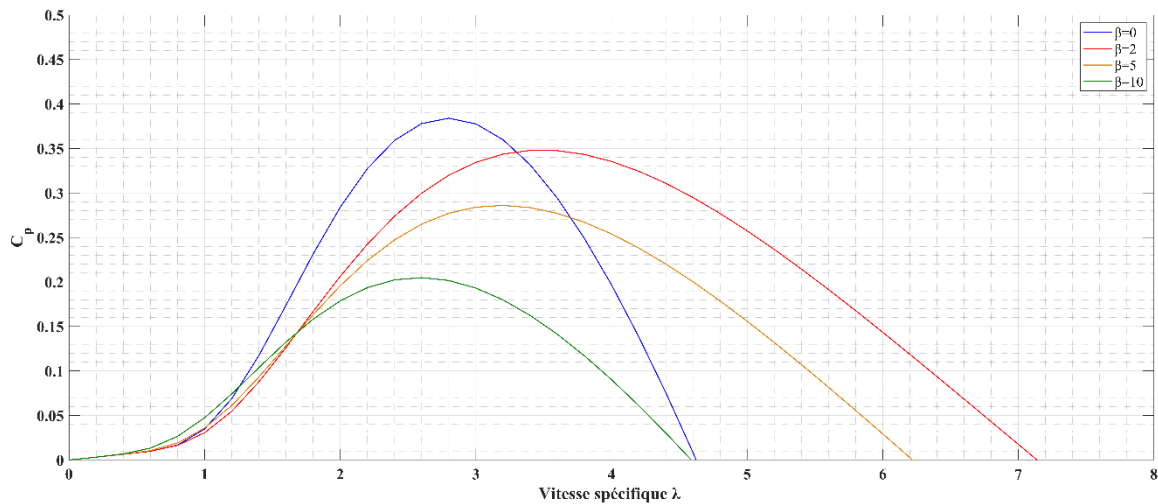


Figure II.4 Caractéristiques $C_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne utilisée

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine $\Omega_t \cdot R$ et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.7})$$

Avec : Ω_t ; Vitesse de la turbine ; λ : Ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

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

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

II.3.3 Modèle mécanique de l'arbre :

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

$$J = J_t + J_g \quad (\text{II.9})$$

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

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.10})$$

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

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

$$\Omega_g = \Omega_t \quad (\text{II.11})$$

II.3.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Parmi les pièces importantes d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne la génératrice. Actuellement, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés. Elle nous permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour les systèmes éoliens en augmentant le nombre de paires de pôles, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées car ces aimants permanents ont l'avantage d'annuler les pertes à effet Joule au niveau du rotor et d'améliorer les performances dynamique le facteur de puissance et le rendement de ces machines [2].

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles :

- Absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- Distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator ;
- Hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés ;
- Effet d'encoche négligeable ;
- Résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air [2].

II.3.4.1 Equations électriques

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

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Où : $[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$: Vecteur tension des phases statoriques ; $[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courant des phases statoriques ; $[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Ou bien on peut réécrire sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} [\varphi_s]_{abc} \quad (\text{II.14})$$

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

II.3.4.2 Equations magnétiques

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

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II.15})$$

Où :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_0 & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Où :

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

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

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

On peut réécrire le système (II.14) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II.19})$$

II.3.4.3 Equation mécanique

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

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad (\text{II.20})$$

II.3.5 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park

Pour passer du système triphasé (abc) vers le système biphasé (d, q, o), on utilise pour notre cas la transformation de Park modifiée qui est égale au produit de la matrice de rotation de Park par la matrice de transformation de Concordia.

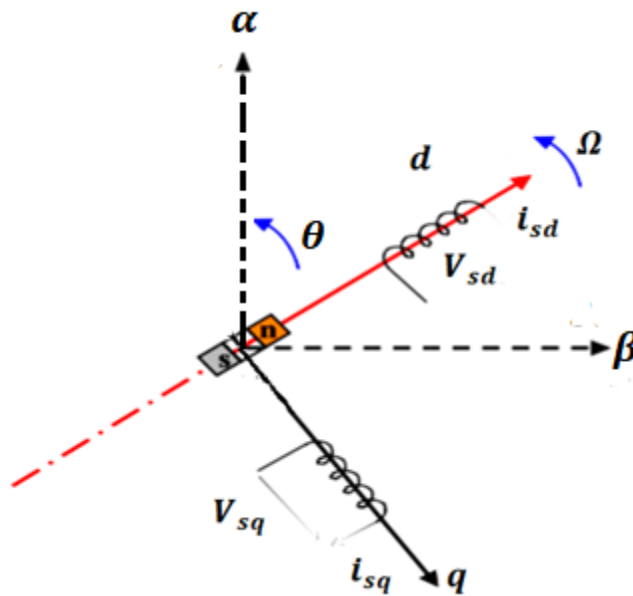


Figure II.5 Représentations de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

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

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

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

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

Le changement de variable effectué, les équations des tensions sont [2] :

$$[v_{dqo}] = [p(\theta)][v_{abc}] \quad (\text{II.22})$$

$$[v_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[v_{dqo}] \quad (\text{II.23})$$

II.3.5.1 Equations électriques

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

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P\Omega_g \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + P\Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

II.3.5.2 Equations magnétiques

Les équations de flux magnétiques sont données comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

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

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.24), on aboutit à :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P\Omega_g L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} P\Omega_g + P\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.3.5.3 Expression du couple électromagnétique

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

$$P_a = (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant v_{sd} et v_{sq} par leur expression (II.26), on obtient :

$$P_a(t) = [(R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2))] + \left[i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right] + [\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}] \omega_e \quad (\text{II.28})$$

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

Où :

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

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

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

Donc, on peut écrire :

$$C_{em} = P(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + P\phi_f i_{sq} \quad (II.29)$$

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

$$C_{em} = P(\phi_f i_{sq}) \quad (II.30)$$

II.3.6 Modélisation de convertisseur

Le développement des composants de puissance (électronique de puissance) comme les thyristors, les GTO et les IGBT a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique qui ont un impact majeur sur l'industrie.

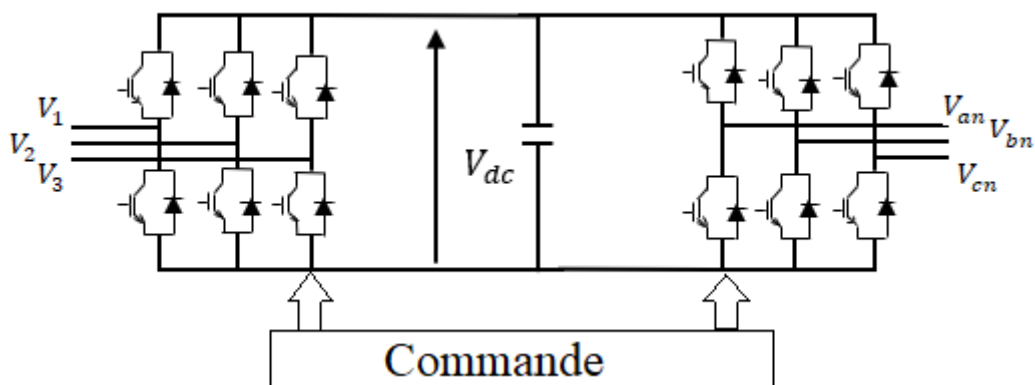


Figure II.6 Convertisseur statique MLI

II.3.6.1 Redresseur à commande MLI

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique, il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif en un signal continu.

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

$$S_j = \begin{cases} 1, & \bar{S}_j = 0 \\ 0, & \bar{S}_j = 1 \end{cases} \quad ; j = 1,2,3 \quad (II.31)$$

Les tensions de phase d'entrée et les courants de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , V_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c [33] :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (II.32)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par [34] :

$$\begin{cases} U_{12} = (s_1 - s_2)V_{dc} \\ U_{23} = (s_2 - s_3)V_{dc} \\ U_{31} = (s_3 - s_1)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

D'où, on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{2.s_1 - s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_2 = \frac{-s_1 + 2.s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_3 = \frac{-s_1 - s_2 + 2.s_3}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec : V_{dc} : Tension redressée ; s_1, s_2, s_3 : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

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

$$i_{red} = s_a \cdot i_a + s_b \cdot i_b + s_c \cdot i_c \quad (\text{II.35})$$

Avec : i_{red} : Courant redressé.

II.3.6.2 Modèle de bus continu

A l'intermédiaire du redresseur et de l'onduleur de tension se trouve le bus à tension continue ; puisqu'il faut imposer une tension continue constante à l'entrée de l'onduleur (figure II.7).

Le condensateur C est le principal élément constitutif de ce circuit intermédiaire (bus continu). Il sert de condensateur-tampon à l'entrée de l'onduleur pour prendre en charge les variations rapides du courant d'entrée de l'onduleur. Ce condensateur a aussi la tâche de lisser la tension continue redressée.

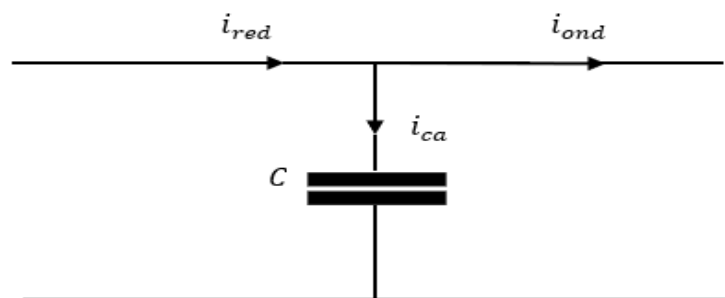


Figure II.7 Schéma simple du circuit du bus continu

On peut écrire le courant du bus continu sous la forme :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{ca} \quad (\text{II.36})$$

Le courant dans la capacité peut aussi être écrit comme suit :

$$i_{ca} = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II.37})$$

On remplace i_{red} par sa valeur :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = s_a \cdot i_a + s_b \cdot i_b + s_c \cdot i_c - i_{ond} \quad (II.38)$$

II.3.6.3 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur triphasé est un convertisseur statique assure la conversion à partir d'une tension continue à son entrée à des tensions alternatives et de fréquences variables, il est constitué des cellules de commutation généralement à transistor IGBT ou à thyristor GTO pour les grandes puissances [35].

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

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques s_i ($i = a, b, c$).

En appelant T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

Si $s_i = +1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert ;

Si $s_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

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

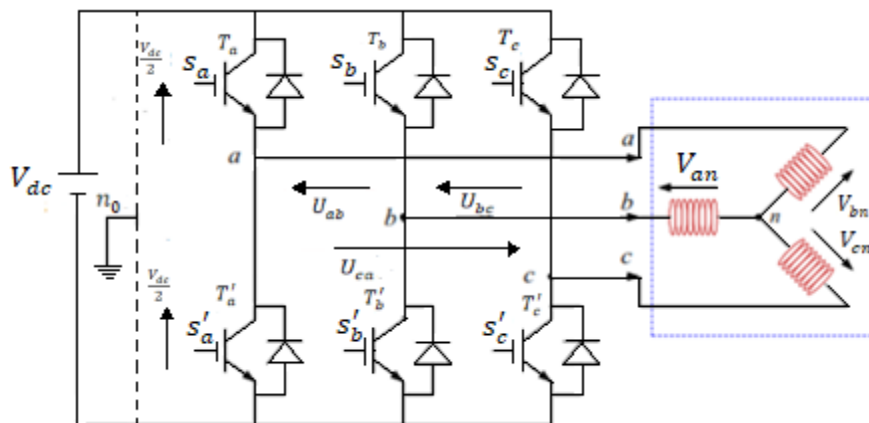


Figure II.8 Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur alimenté par une tension parfaite donne à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs [36].

Soit "n", le point neutre du coté alternatif, alors les trois tensions composées :

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (II.39)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

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

$$\begin{cases} V_{an_0} = V_{an} + V_{nn_0} \\ V_{bn_0} = V_{bn} + V_{nn_0} \\ V_{cn_0} = V_{cn} + V_{nn_0} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

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

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{II.43})$$

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

$$V_{in} = s_i \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = (s_i - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (\text{II.44})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (s_a - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{bn_0} = (s_b - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{cn_0} = (s_c - \frac{1}{2})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

En remplaçant II.43 dans II.42, on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

II.3.7 Modélisation de la pompe centrifuge

Dans ce mémoire, on a choisi d'utiliser les pompes centrifuges parce que la caractéristique couple-vitesse de la pompe centrifuge s'approche de la caractéristique puissance-vitesse de la turbine éolienne, elles sont

connues par leur simplicité, elles n'ont pas besoins de vanne ni de nombreuses pièces mobiles. Cela facilite leur production et réduit son entretien, [37]. Elles forment des dispositifs robustes. À caractéristiques égales, elles présentent souvent un rendement élevé sur une large plage de vitesse, sont plus fiables et moins bruyantes que les machines alternatives [38].

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe.

Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [38].

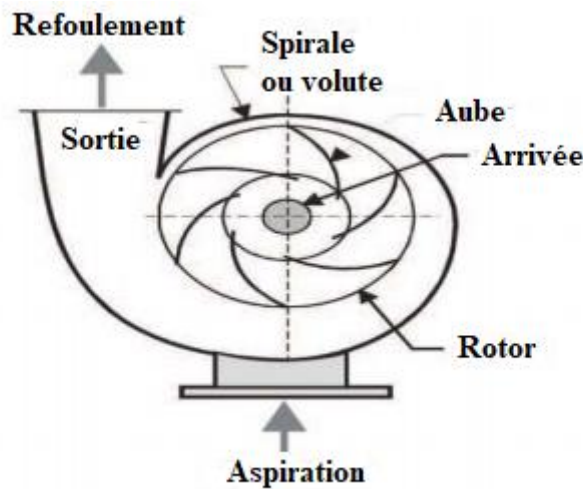


Figure II.9 Schéma d'une pompe centrifuge [39]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse. Elle oppose un couple résistant tel que [38] :

$$C_r = K_r \Omega^2 + C_s \tag{II.48}$$

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

En négligeant le couple statique (C_s) l'équation (II.48), le couple résistant devient :

$$C_r = K_r \Omega^2 \tag{II.49}$$

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

$$P_{mec} = K_r \Omega^3 \tag{II.50}$$

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

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \tag{II.51}$$

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

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

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{mec}} \quad (II.52)$$

II.3.8 Résultats de Simulations et interprétations

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux vitesses ont été appliquées au générateur qui alimente une charge nominale purement résistive ($R=75 \text{ } (\Omega)$), Les paramètres de la génératrice sont donnés dans l'annexe A.

D'après la Figure.II.11, (a, b, c, d et e) on a constaté que l'augmentation de la vitesse mécanique provoque une augmentation dans les courbes de courant, tension, le couple et la puissance en négatif (mode génératrice). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie et la charge alimentée, on peut voir aussi que les tensions et courants statoriques sont parfaitement sinusoïdaux.

Le Schéma bloc de la simulation est représenté dans la figure II.10 :

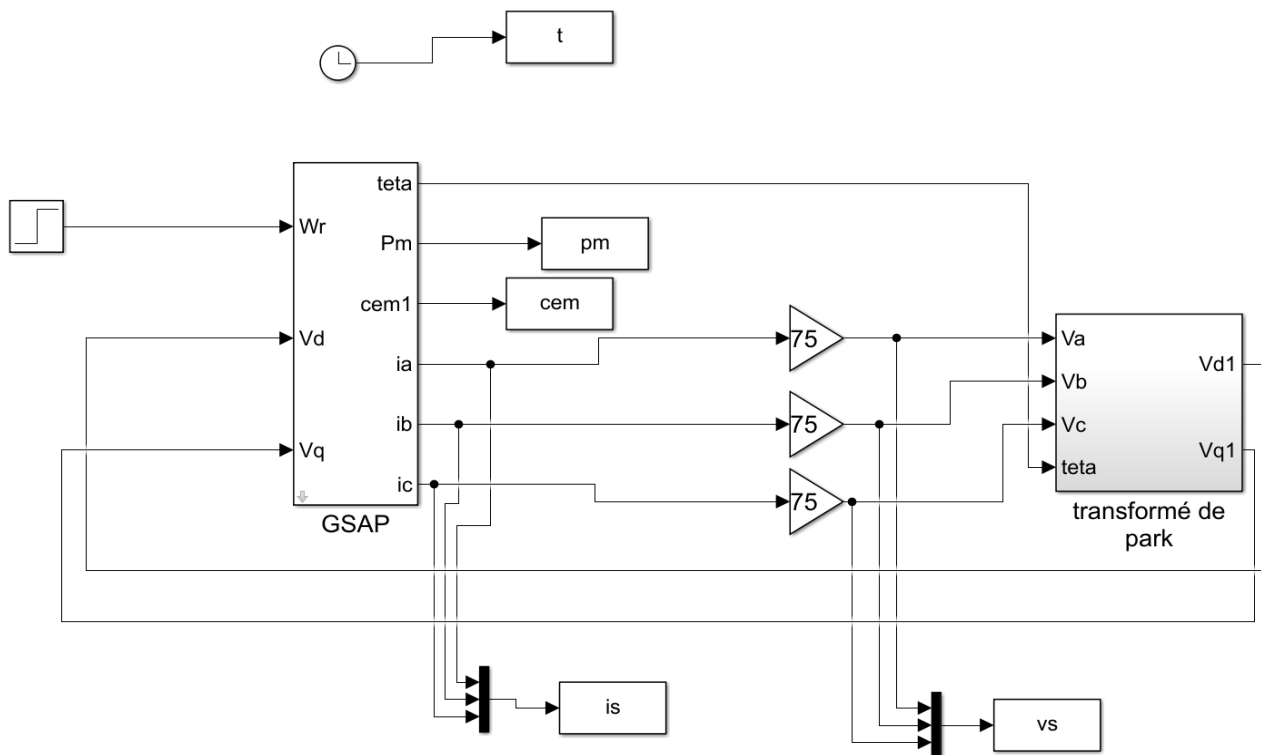
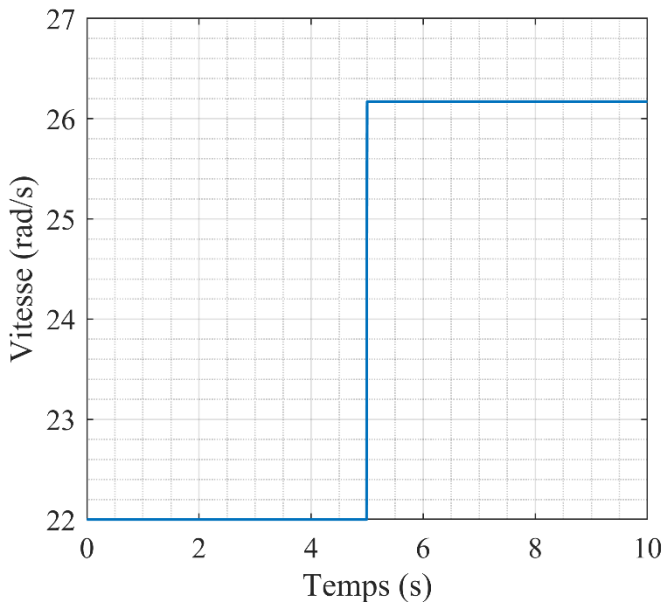
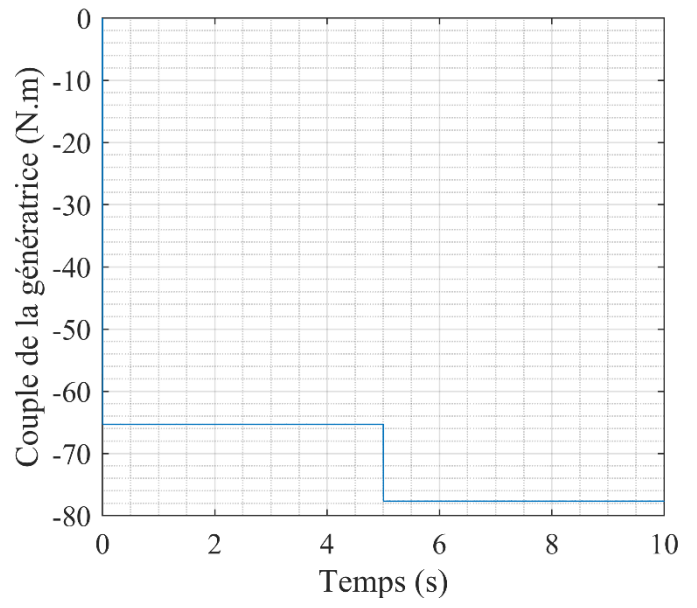


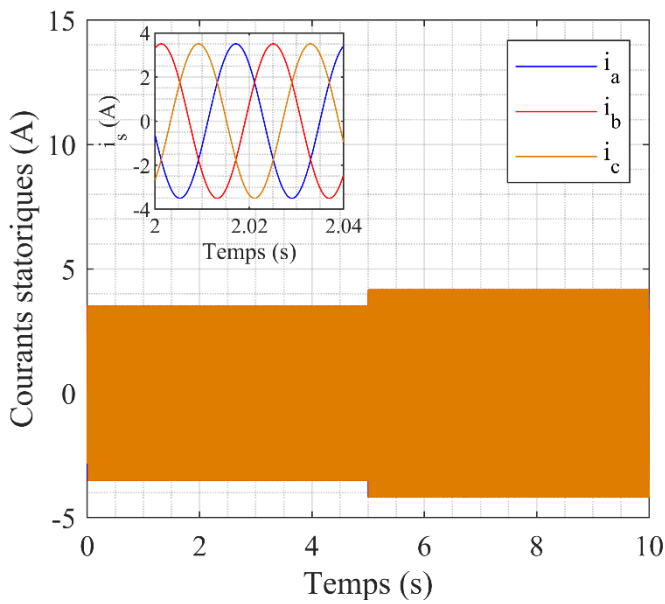
Figure II.10 Schéma bloc de la GSAP en charge résistive



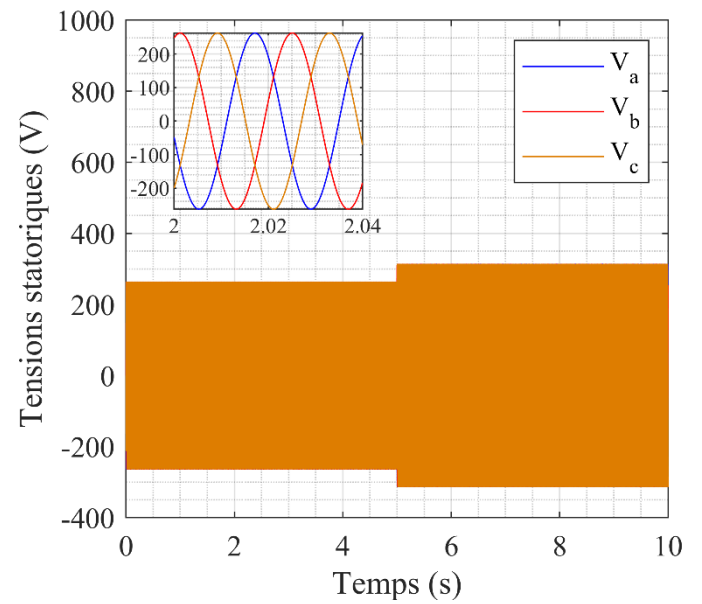
(a)



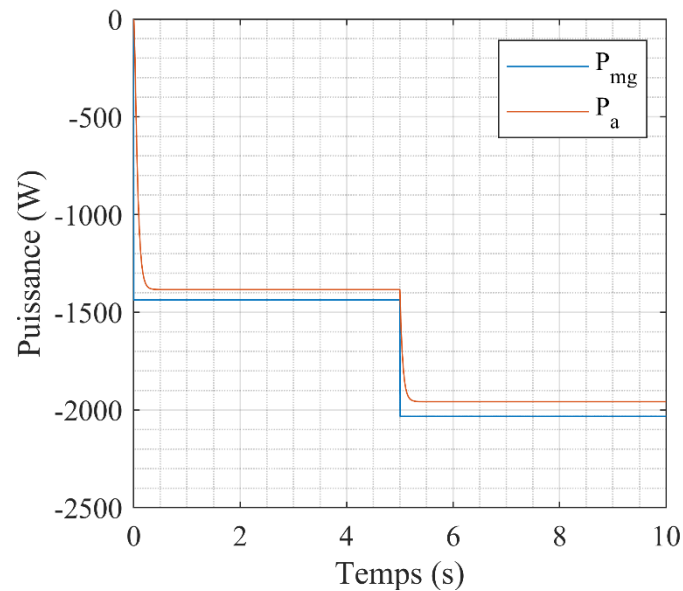
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure II.11 Résultats de la simulation de GSAP sur une charge résistive : a- Vitesse appliqué à la GSAP ; b- Couple électromagnétique de la GSAP ; c- Courants statoriques ; d- Tensions statoriques ; e- Puissance de la GSAP

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de pompage éolien qui est constitué d'une turbine à axe horizontale tripales connecté à une génératrice synchrone à aimants permanents sans multiplicateur de vitesse, deux convertisseurs statiques une motopompe à base d'une MSAP, ainsi leur modélisation, en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, afin de faciliter l'accès à la simulation du système global qui sera étudié dans le chapitre suivant. Une Simulation de la GSAP en charge a été effectuée.

Le chapitre suivant sera consacré au contrôle de la chaîne étudiée.



***Chapitre III : Contrôle du système
étudié***



Chapitre III : Contrôle du système étudié

III.1 Introduction

Ce chapitre sera divisé en trois parties, la première partie sera consacré au contrôle de générateur éolien on appliquera la commande vectorielle à la machine synchrone à aimants permanents fonctionnant en mode génératrice alimenté par une turbine éolienne associée à un redresseur à commande à hystérésis et la régulation du bus continu, une commande MPPT est appliqué à la turbine éolienne, en cas où nous auront des vents forts qui dépassent la puissance nominale de la turbine, la commande "Pitch contrôle" intervient pour limité la puissance en jouant sur l'angle de calage des pales. Dans la deuxième partie, un contrôle de la motopompe sera présenté, une commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation et une régulation de la vitesse de la MSAP, la troisième partie sera consacré à la simulation de tous la chaine étudiée.

III.2 Description du système à étudier

Le vent fait tourner les pales de la turbine qui est relié à la génératrice synchrone à aimants permanents qui est connecté aussi à un redresseur MLI (transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique), la motopompe à base moteur synchrone à aimants permanents est alimentée par un onduleur MLI, dans cette chaine on appliquera la commande vectorielle au générateur éolien et à la motopompe.

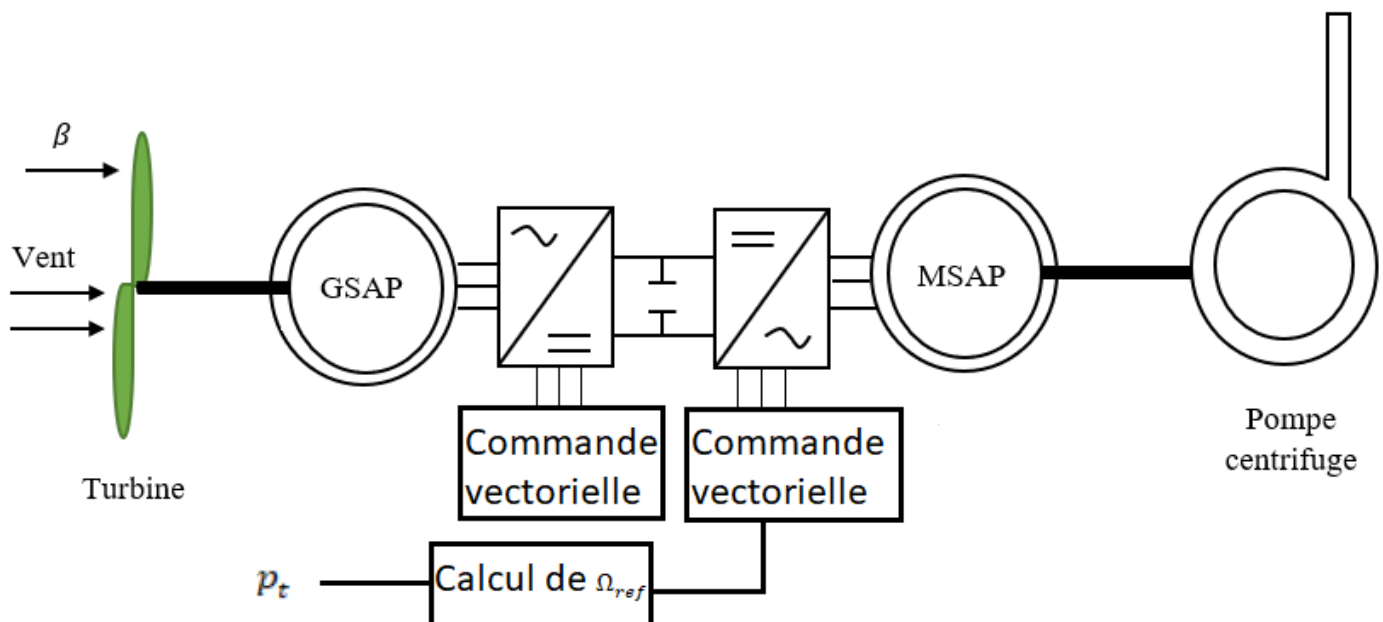


Figure III.1 Système global étudié

III.3 Contrôle du courant par hystérésis de redresseur

La commande à hystérésis exploite la nature non linéaire du redresseur MLI. Les états de commutation des interrupteurs de puissance sont déterminés par comparaison entre la grandeur mesurée et sa référence, en

considérant une largeur d’hystérésis donnée pour l’erreur. Cette stratégie peut être utilisée dans des applications simples telles que le contrôle du courant par hystérésis [40].

Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente des courants réels et des courants de référence comme illustré sur la figure III.2. La sortie du comparateur à hystérésis est reliée à la logique de commande du redresseur et donne directement l’ordre de commande aux 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 de puissance, en plus l’utilisation de ce type de contrôle génère des subharmoniques de courant dans les applications avec filtre actif [41].

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

Si $\epsilon_k \geq \Delta_i \Rightarrow s_k = 0$

Si $\epsilon_k \leq -\Delta_i \Rightarrow s_k = 1$

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

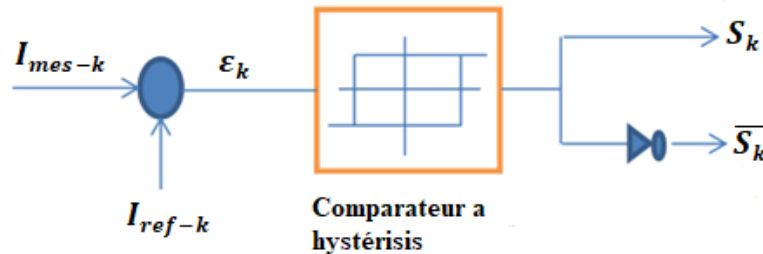


Figure III.2 Principe de contrôle du courant par hystérésis

III.4 Commande MLI de l’onduleur

L’onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions le plus sinusoïdal possible, à cet effet, différentes stratégies de commande permettant de déterminer les trois fonctions logiques (s_a, s_b, s_c).

Dans ce travail, on s’intéresse à la méthode sinus-triangle qui s’avère la plus adéquate pour la commande des machines électriques. Elle assure le réglage simultanément de la fréquence et la tension, et minimiser les oscillations de la vitesse, du couple et du courant [12].

Elle consiste à calculer la largeur d’une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Son principe se repose sur la comparaison de deux ondes ; la première triangulaire d’amplitude fixe et de fréquence très élevée (appelée porteuse) ou onde de modulation V_p la deuxième sinusoïdale d’amplitude variable et de fréquence F qui détermine la fréquence de la tension

de sortie (appelée référence) V_{ref} . Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension r (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation m (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [12].

$$\text{Où : } r = \frac{V_{ref}}{V_p} \text{ et } m = \frac{F_p}{F_{ref}}$$

Avec : F_p : Fréquence de la porteuse ; F_{ref} : Fréquence de référence ; V_p : Amplitude de tension de la porteuse ; V_{ref} : Amplitude de tension de référence.

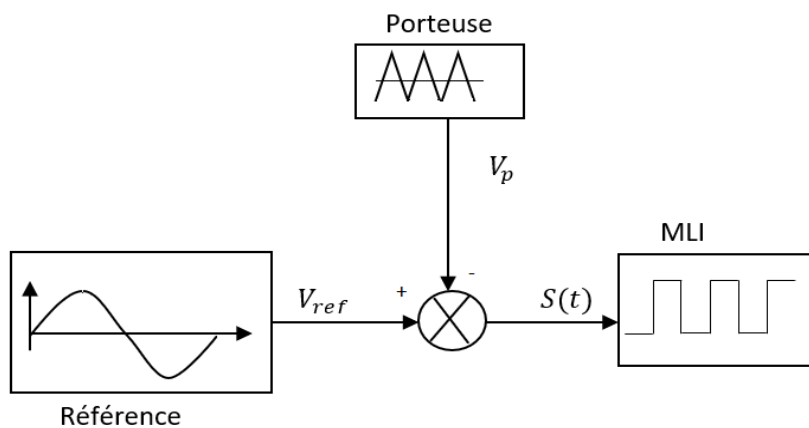


Figure III.3 Schéma synoptique de la MLI

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

Par le découplage entre la production du couple électromagnétique et la magnétisation en flux la machine à courant continu est parfaitement adaptée aux traitements à vitesse variable.

Toutefois, la présence du système (balai et collecteur) limite la puissance et la vitesse maximale, d'autre part, elle présente des difficultés de maintenance et des interruptions de fonctionnement. Pour toutes ces raisons, la MSAP tend à se substituer à la machine à courant continu. Cette évolution est motivée par d'indéniables qualités de robustesse et de fiabilité. L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée [1]. Les méthodes utilisées pour assurer cette commande consistent pour une MSAP à pôles lisses, à maintenir le courant i_{ds} à une valeur nulle et à contrôler la vitesse et/ou la position en agissant sur le courant i_{qs} , c'est-à-dire sur le couple développé par la machine.

III.5.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle ou commande à orientation de flux rotorique est basée sur le choix d'un repère de référence, lié au flux rotorique. Si on décompose le courant statorique en ses composantes i_{sd} suivant l'axe

du flux rotorique et i_{sq} en quadrature avec ce flux, on met en évidence une commande découplée du flux et du couple [43].

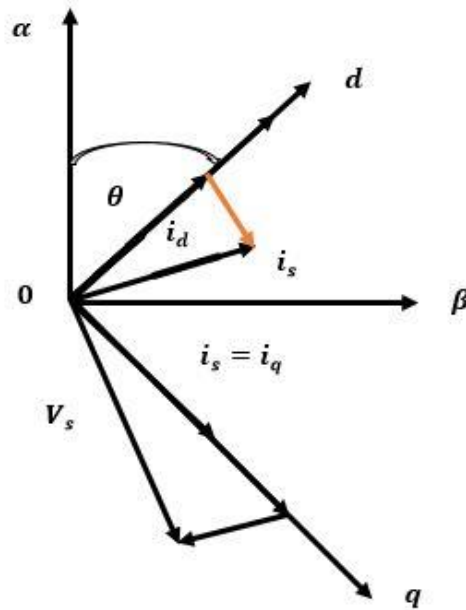


Figure III.4 Représentation spatiale de l'orientation du flux rotorique dans une MSAP

III.5.2 Stratégie de commande

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la MSAP, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_{sd} à zéro est la plus répandue car elle nous permet d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d et de travailler à couple maximal.

En imposant le courant $i_{sd} = 0$, le système d'équation (II.26) devient :

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

Le couple de l'équation (II.30) est simplifié en une expression linéaire donné par :

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

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

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

Dans le cas de notre machine, les pôles sont lisses ($L_d = L_q$) et sans amortisseurs, le couple électromagnétique ne dépend que de la composante du courant sur l'axe q. La puissance absorbée est optimisée pour un couple donné si $i_{sd} = 0$.

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

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

Le générateur éolien est contrôlé par une commande vectorielle tout en imposant ($i_{sd_ref} = 0$), une commande Pitch contrôle et une commande MPPT sans asservissement de vitesse ont été appliquée à la turbine pour avoir un maximum de puissance et limité la puissance en cas des vent forts.

Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure III.5. Le couple électromagnétique C_{em_ref} de référence est obtenu à partir de la régulation de la vitesse, Le couple dépend seulement du courant i_{sq} . Donc, on peut contrôler le couple uniquement par la composante i_q , le courant i_{sq_ref} est obtenu par la relation (III.3), les courants de référence i_{a_ref} , i_{b_ref} et i_{c_ref} sont obtenus en appliquant la transformation de Park inverse au courant i_{sd_ref} et i_{sq_ref} , ces courants de référence sont comparés à celle de la génératrice, en passant après par un régulateur à hystérésis pour commander le redresseur MLI .

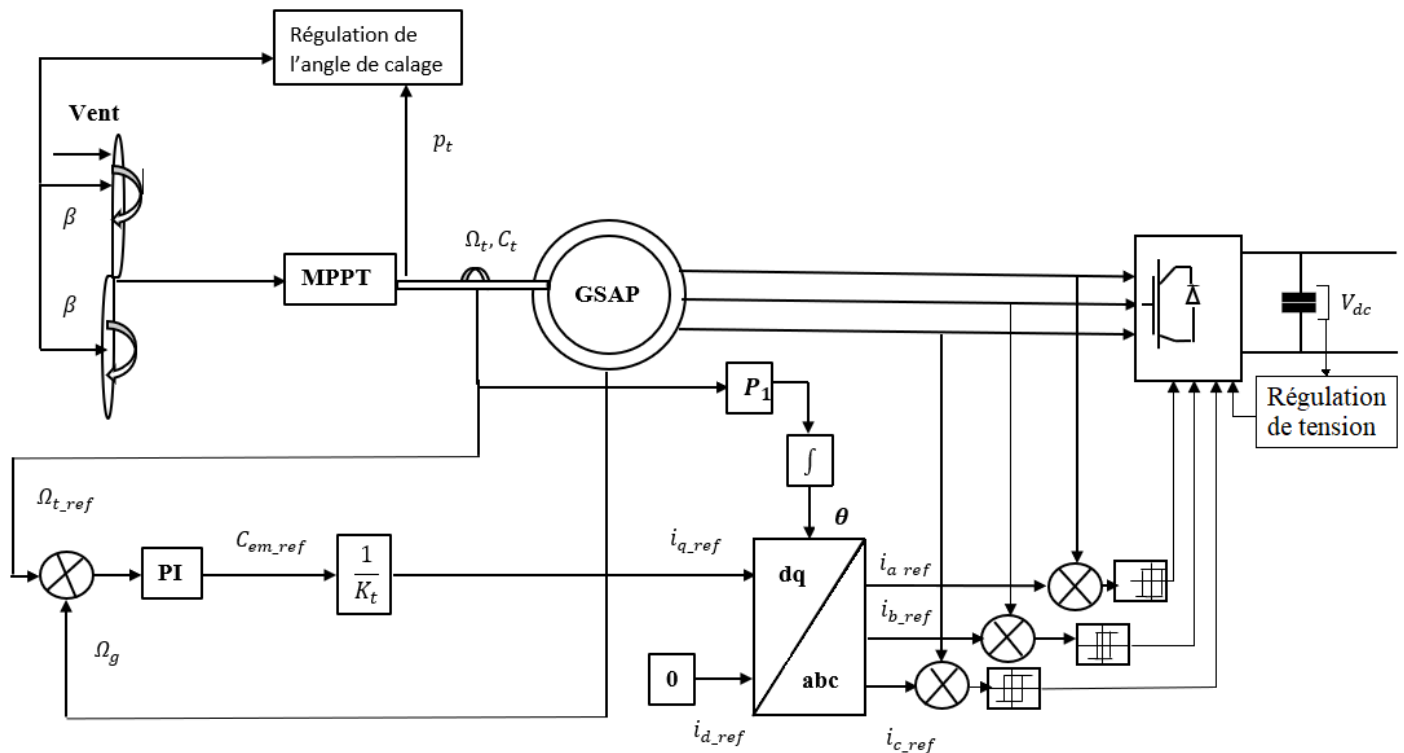


Figure III.5 Schéma bloc de commande de générateur éolien

III.6.1 Régulation de tension V_{dc}

La régulation de la tension continue est assurée par un régulateur de type PI. Ce dernier corrige l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence, la figure III.6 montre le schéma bloc de la régulation de tensions de bus continu.

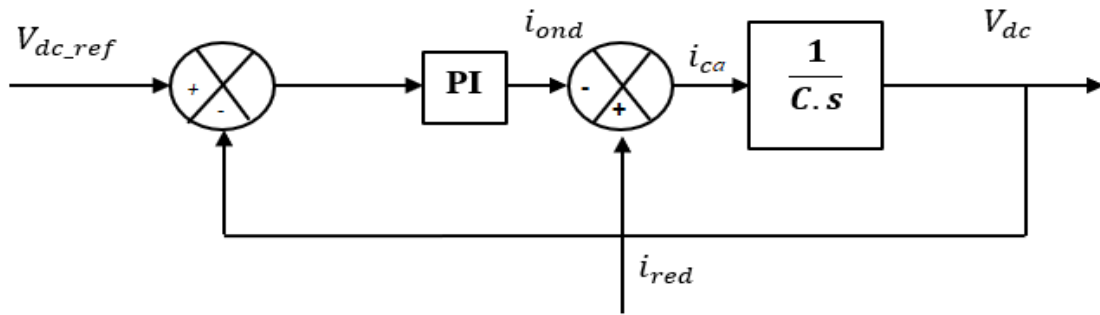


Figure III.6 Schéma bloc de la régulation de V_{dc}

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

La caractéristique puissance / vitesse d'une turbine éolienne est non linéaire ce qui mène à un couplage non parfait entre le générateur et la turbine [12]. Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

III.6.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Le dispositif de commande dans ce cas doit imposer un couple de référence de manière à permettre à la GSAP de tourner à une vitesse réglable afin d'assurer un point de fonctionnement optimal en termes d'extraction de puissance. Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne λ doit être maintenu à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ($C_p = C_{p,max}$). La valeur de la vitesse spécifique est définie comme étant :

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

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

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

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

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

Le couple de la turbine est donné par :

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

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire $\lambda = \lambda_{opt}$ le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

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

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

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent [28].

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

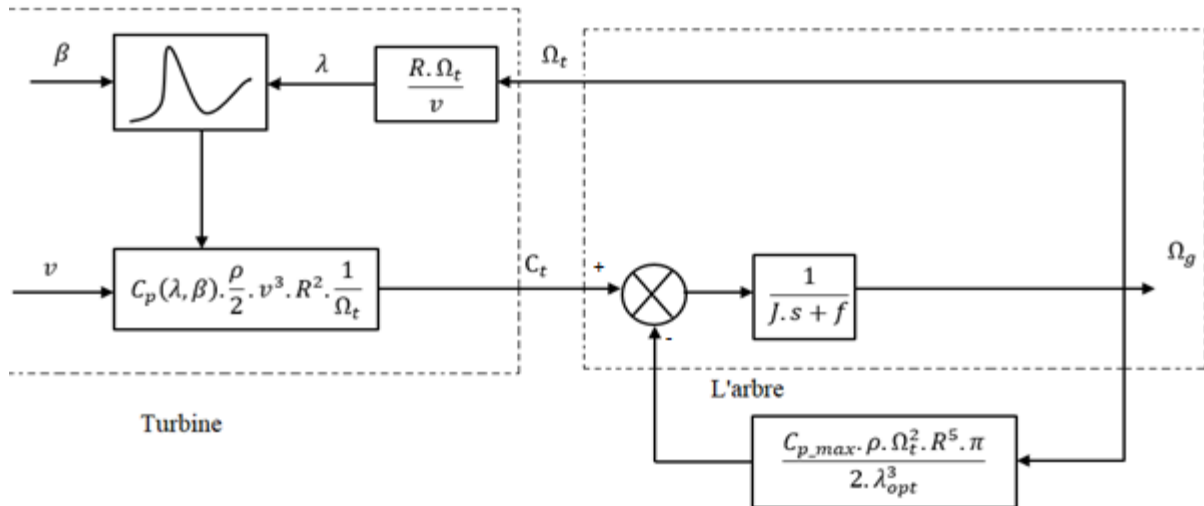


Figure III.7 MPPT sans asservissement de la vitesse

III.6.4 Limitation de la puissance captée par la turbine éolienne

Dans le cas où le vent est fort et dépasse la vitesse nominale de la turbine, la puissance doit être limitée et pour faire cela le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance extraite en jouant sur l'angle de calage des pales. Dans notre système, les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch control).

Le système d'orientation des pales est généralement donné par une fonction de 1^{er} ordre [28].

Le principe peut être décrit par le modèle suivant :

$$\frac{\beta(p)}{C_{ref_β} - C_{r_β}} = \frac{1}{J_p \cdot s + f_p} \tag{III.9}$$

Où : $C_{r_β}$: Couple résistant appliqué sur les pales ; $C_{ref_β}$: Couple de référence appliqué sur les pales ; J_p : Inertie de la pale ; f_p : Coefficient de frottement.

Si la vitesse du vent ne passe pas la vitesse nominale de la turbine, le système d'orientation ne se déclenche pas, au cas contraire le système intervient et l'angle de calage peut varier entre 0° et 35° [42].

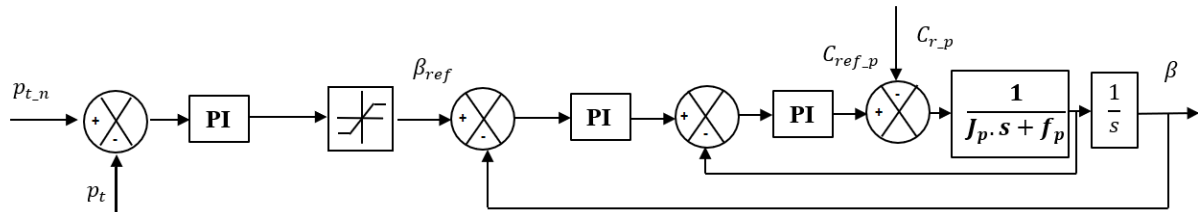


Figure III.8 Schéma bloc de régulation de l'angle de calage des pales

III.8 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation de moteur synchrone à aimants permanents

Pour justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, il est utile d'examiner tout d'abord le modèle du moteur synchrone à aimants permanents dans le repère de Park donné par les équations [2] :

$$\begin{cases} v_{sd_m} = R_{s_m} i_{sd_m} + L_{d_m} \frac{di_{sd_m}}{dt} - P\Omega_m L_{q_m} i_{sq_m} \\ v_{sq} = R_{s_m} i_{sq_m} + L_{q_m} \frac{di_{sq_m}}{dt} + P\Omega_m L_{d_m} i_{sd_m} + P\Omega_m \varphi_{f_m} \end{cases} \quad (III.10)$$

$e_d = P_2 \Omega_m \cdot L_q i_{sq_m}$: f.e.m de la machine sur l'axe d.

$e_q = P_2 \Omega_m \cdot (L_{d_m} i_{sd_m} + \varphi_f)$: f.e.m de la machine sur l'axe q.

Le but de la compensation c'est de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer facilement les coefficients des régulateurs. Le principe de ce découplage est basé sur l'introduction de termes compensatoires e_d et e_q [28] :

$$\begin{cases} V_{sd_m} = V_{sd1_m} - e_d \\ V_{sq_m} = V_{sq1_m} + e_q \end{cases} \quad (III.11)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{sd1_m} = L_{d_m} \frac{di_{sd_m}}{dt} + R_{s_m} i_{sd_m} \\ V_{sq1_m} = L_{q_m} \frac{di_{sq_m}}{dt} + R_{s_m} i_{sq_m} \end{cases} \quad (III.12)$$

On a donc les courants i_{sd_m} et i_{sq_m} sont découplés. Le courant i_{sd_m} ne dépend que de V_{sd1_m} et i_{sq_m} ne dépend que de V_{sq1_m} , à partir de l'équation (III.12) les courant i_{sd_m} et i_{sq_m} s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_{sd_m} = \frac{V_{sd1_m}}{R_{s_m} + s \cdot L_{d_m}} \\ i_{sq} = \frac{V_{sq1_m}}{R_{s_m} + s \cdot L_{q_m}} \end{cases} \quad (III.13)$$

Le schéma général du découplage par compensation est illustré dans la figure (III.9)

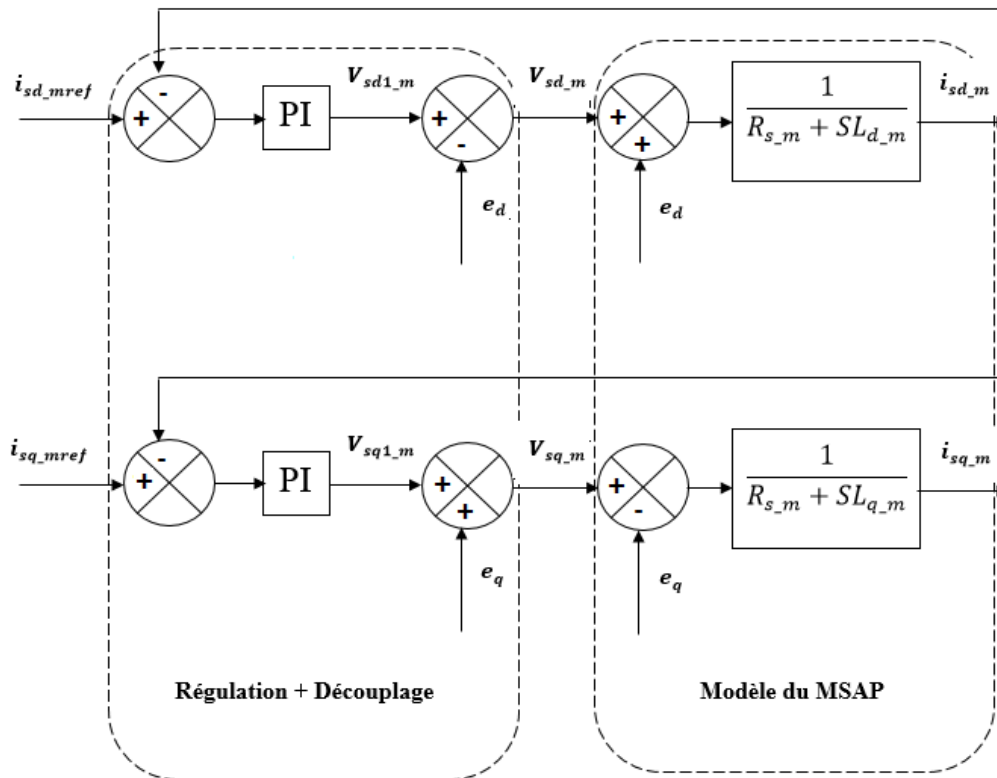


Figure III.9 Structure générale : (moteur-découplage par compensation)

Les actions sur les axes d et q sont donc découplés et sont représentées par la figure (III.10) :

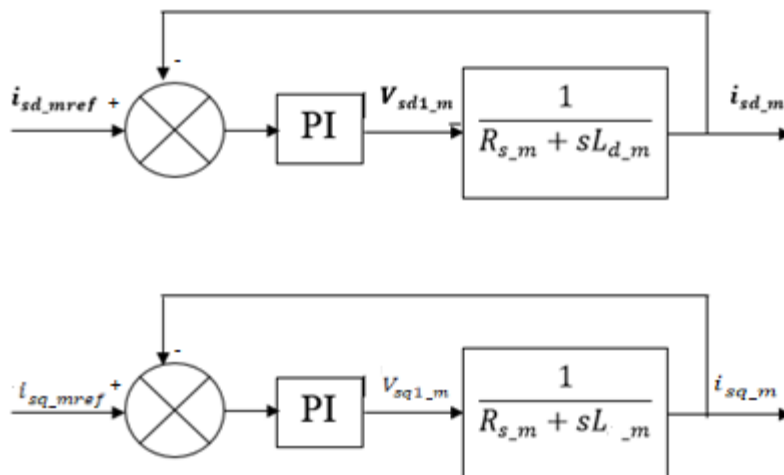


Figure III.10 Commande découplée

III.9 Description de la deuxième partie (association motopompe)

Les courants de référence i_{sd_mref} et i_{sq_mref} sont comparés séparément avec les courants réels du moteur synchrone à aimants permanents et les erreurs résultantes sont appliquées à l'entrée des régulateurs PI. Les sorties des régulateurs de courant sont appliquées à un bloc de découplage pour générer les tensions

de référence V_{sd_mref} , V_{sq_mref} et par la transformation de Park, on aura les références des tensions V_a, V_b, V_c de la commande MLI. Ces tensions sont comparées avec une porteuse triangulaire pour générer les signaux de l'onduleur MLI, le couple résistant de la pompe est relié au moteur synchrone à aimant permanent.

La vitesse de référence Ω_{ref} est obtenue à partir du bilan de puissance de la chaîne étudiée.

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

$$p_{mec} = \eta_{GSAP} \cdot \eta_{MSAP} \cdot p_t \tag{III.14}$$

En remplaçant (III.14) dans l'équation (II.50), on aura :

$$\eta_{GSAP} \cdot \eta_{MSAP} \cdot p_t = K_r \omega^3 \tag{III.20}$$

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

$$\Omega_{ref} = \sqrt[3]{\frac{\eta_{GSAP} \cdot \eta_{MSAP} \cdot p_t}{K_r}} \tag{III.21}$$

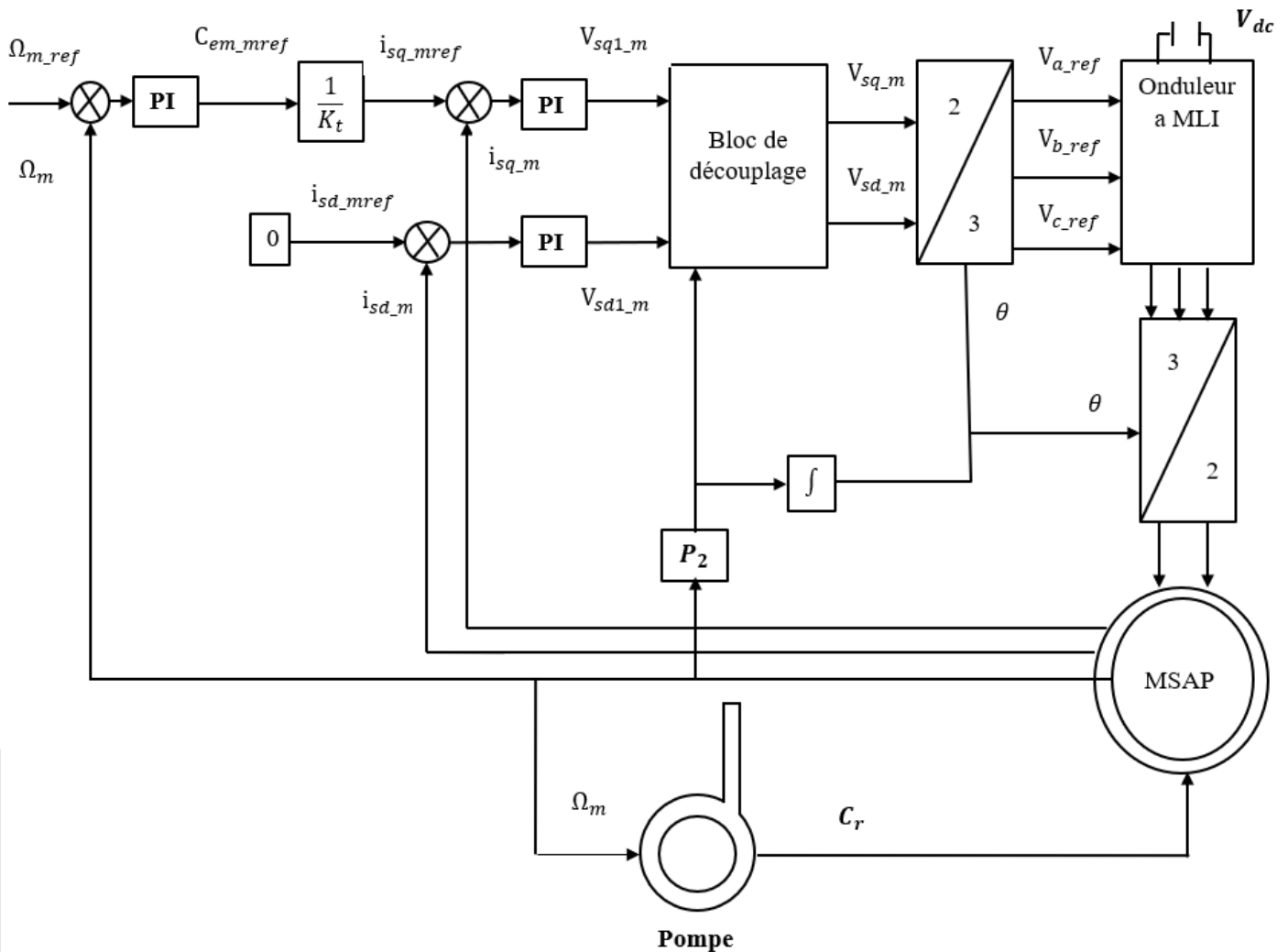
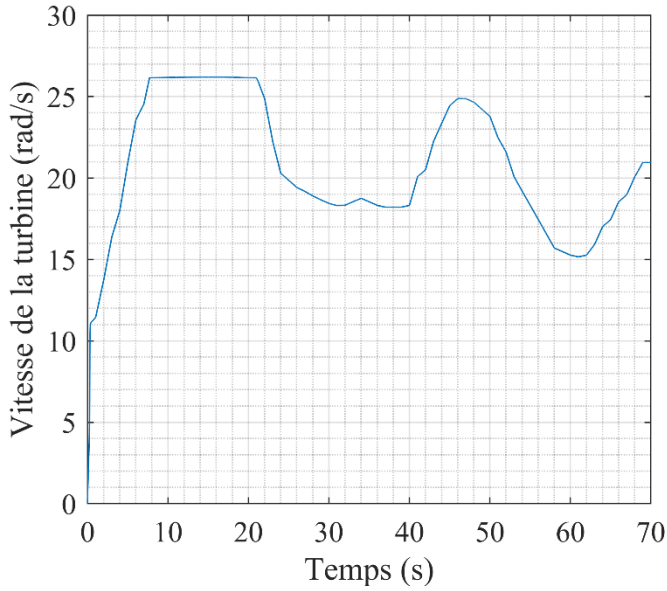


Figure III.11 Schéma bloc de la commande vectorielle du moteur synchrone à aimant permanent

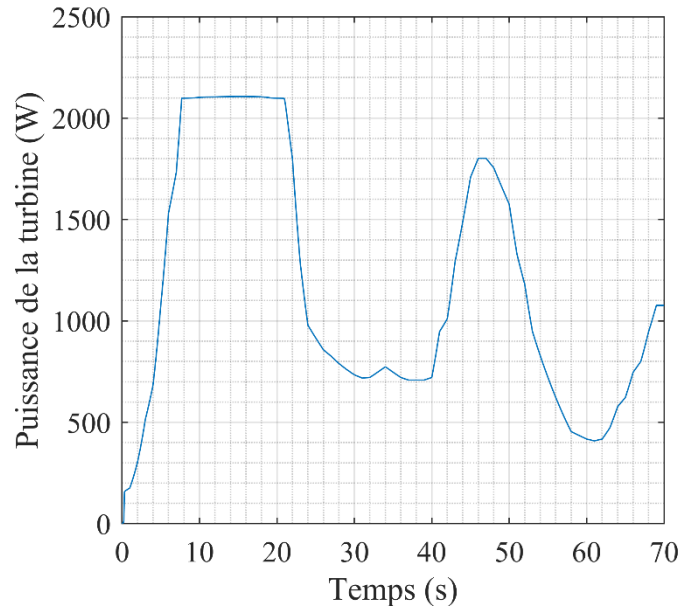
III.10 Description de la troisième partie

Cette partie sera consacrée à la simulation du système global illustré dans la figure III.1.

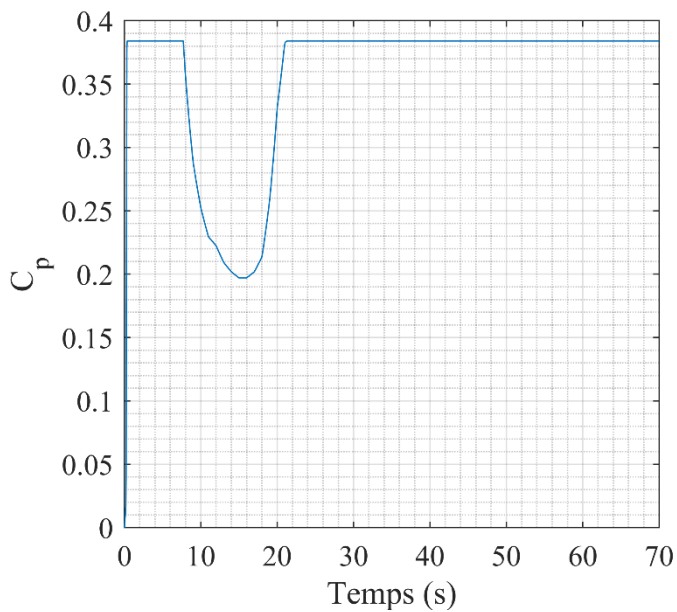
On applique le profil du vent donné sur la figure II.2, les résultats de simulation de la chaîne complète les résultats de simulation obtenus sont résumés sur la figure III.12, figure III.13 et figure III.14:



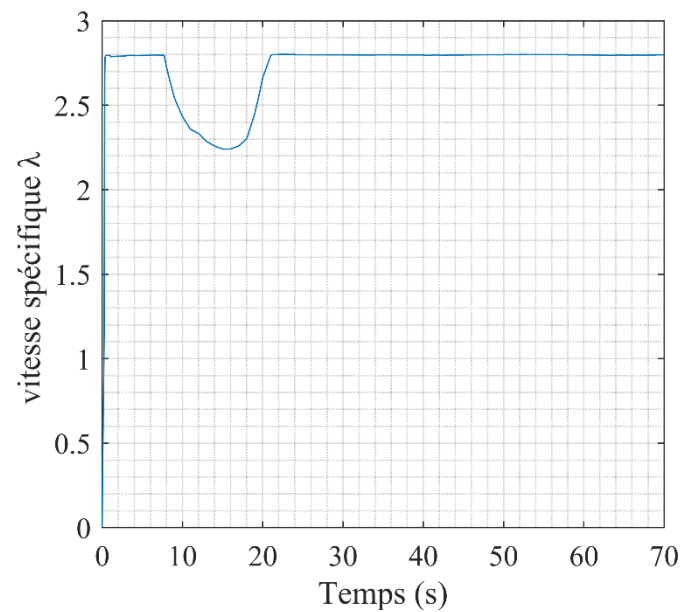
(a)



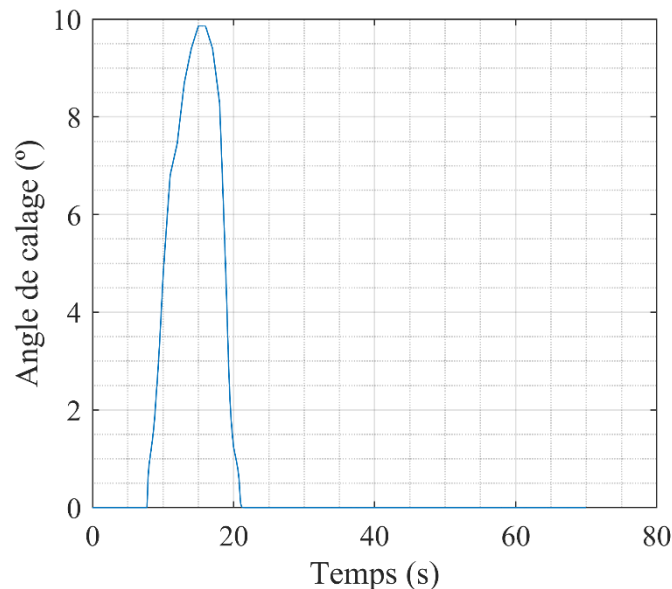
(b)



(c)



(d)

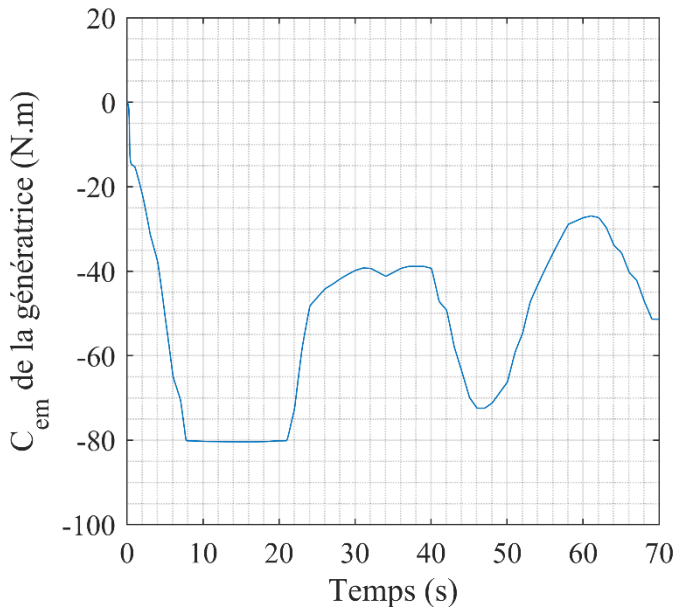


(e)

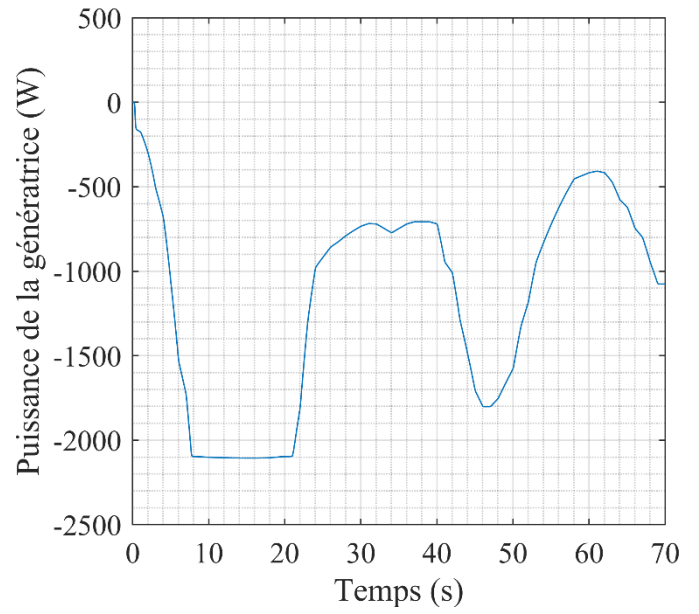
Figure III.12 Résultats de simulation de la turbine

Les figures III.12 (a, b, c, e, f) montrent l'évolution de la vitesse de la turbine, la puissance de la turbine, le coefficient de puissance, la vitesse spécifique et l'angle de calage, la vitesse obtenue ainsi que la puissance suivent leurs caractéristiques optimales (pour des vitesses du vent inférieures à (12 m/s) qui correspond à la vitesse nominale de la turbine) ce qui explique l'efficacité de la MPPT appliqué (figure III.12a, b). Lorsque la vitesse du vent dépasse (12 m/s), la puissance et la vitesse sont limitées respectivement à (2100 W) et (26.17 rad/s) grâce à la régulation de l'angle de calage, le coefficient de puissance C_p est maintenu à sa valeur maximale (0.384) et diminue durant les phases de limitation de puissance (figure III.12c) ce qui correspond dans ce cas à une diminution aussi de la vitesse spécifique λ (figure III.12e). L'angle de calage durant la phase de limitation de puissance augmente jusqu'à où le vent atteint sa valeur maximale, puis il diminue jusqu'à 0 (sortir de la zone de limitation de puissance).

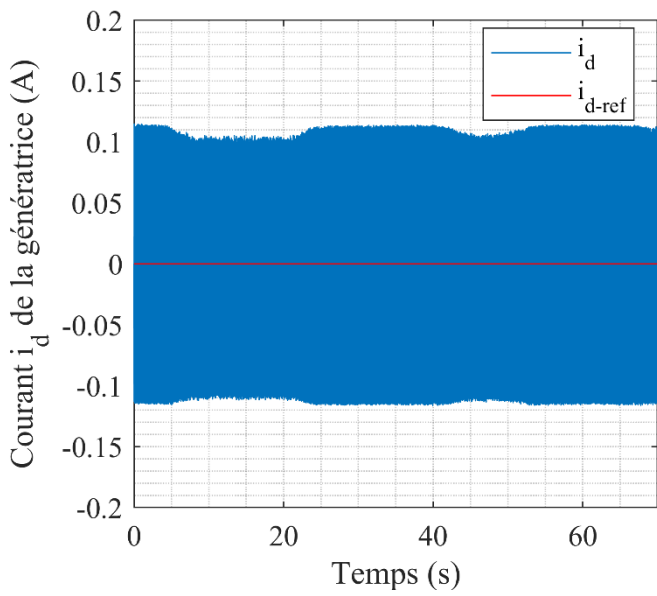
Les figure (III.13, a, b, c, d, e) montre l'évolution de couple électromagnétique, puissance, les courants directes et en quadrature de la génératrice et la tension de bus continu V_{dc} :



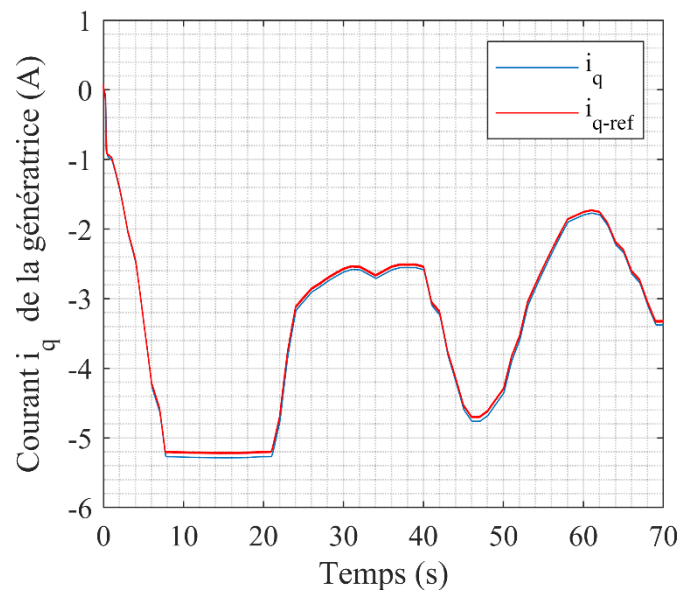
(a)



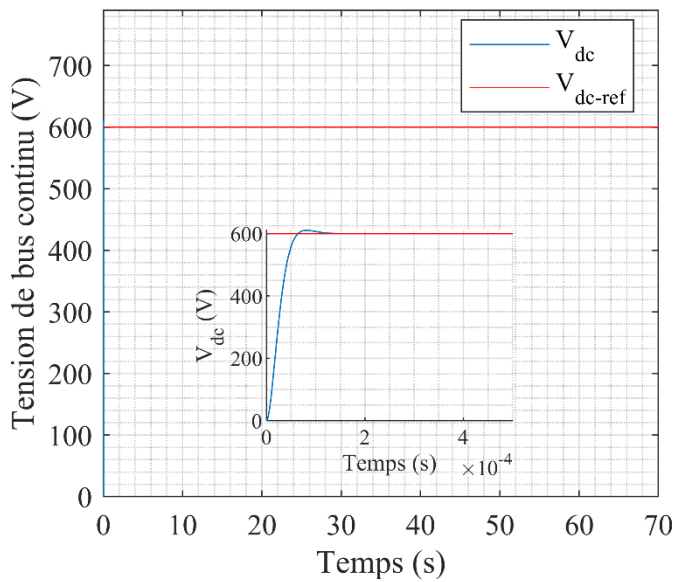
(b)



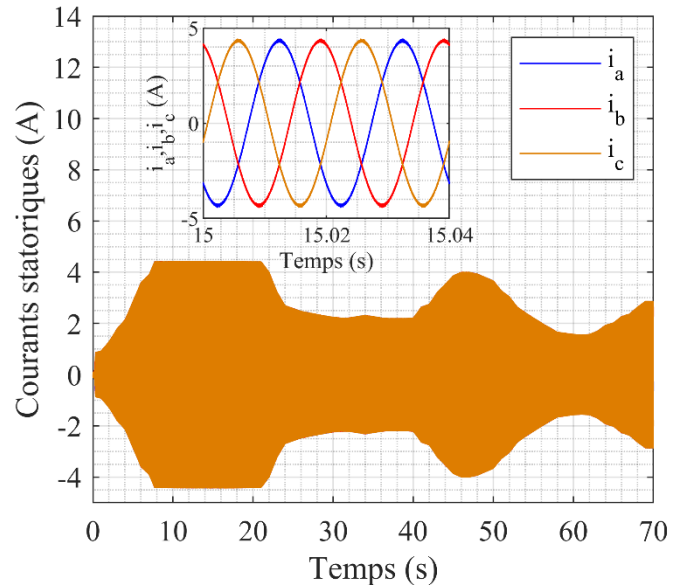
(c)



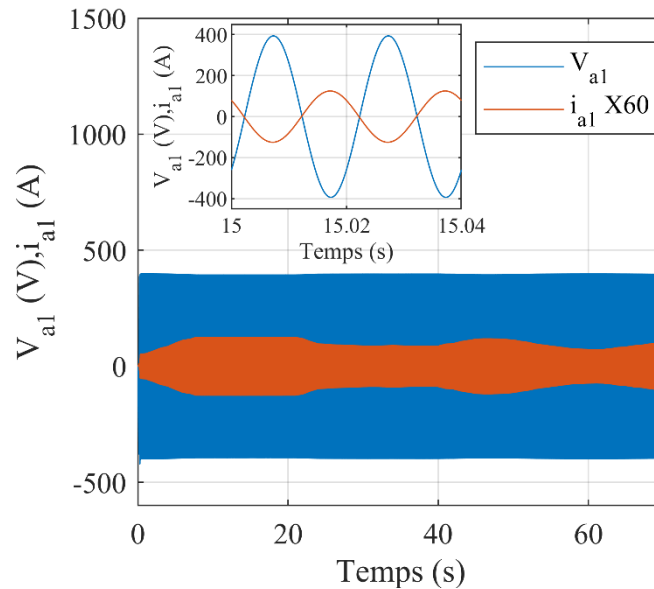
(d)



(e)



(f)



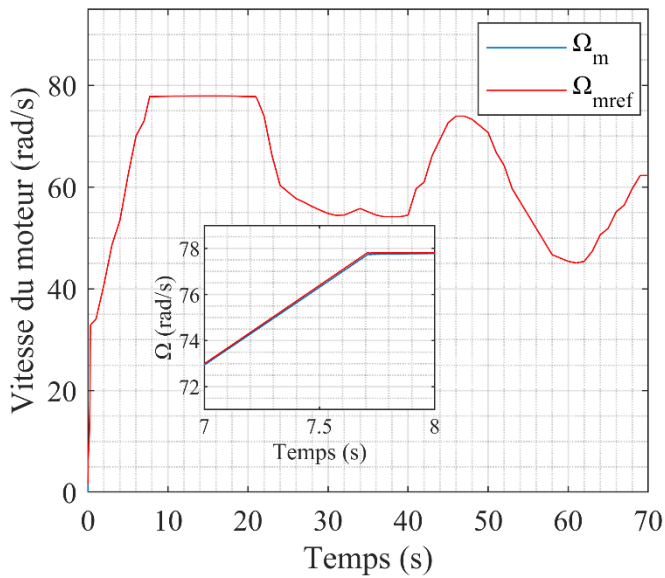
(g)

Figure III.13 Résultats de simulation de la génératrice

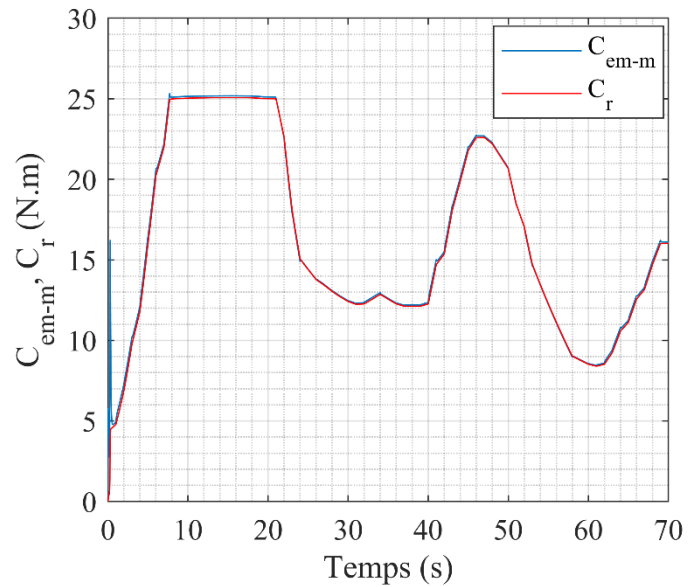
On remarque que la puissance et le couple de la génératrice sont de signe négatif ce qui confirme le fonctionnement du générateur, la tension du bus continu est bien régulée et suit sa consigne (fixé à 600v). On remarque aussi que le courant i_{sd} est pratiquement nul et le courant i_{sq} suit sa référence et suit l'évolution du couple de la génératrice ce qui confirme la commande vectorielle appliquée à la MSAP. On observe les courants (figure III.13. f) générés par la GSAP sont des courants sinusoïdaux avec des amplitudes et des fréquences variables suivant la variation de la vitesse du vent.

La figure (III.13.g) montre la tension et le courant d'une phase, sur le zoom on voit 2 périodes, on remarque que leur fréquence est de 50 Hz. Le déphasage angulaire de π entre l'onde du courant et celle de la tension.

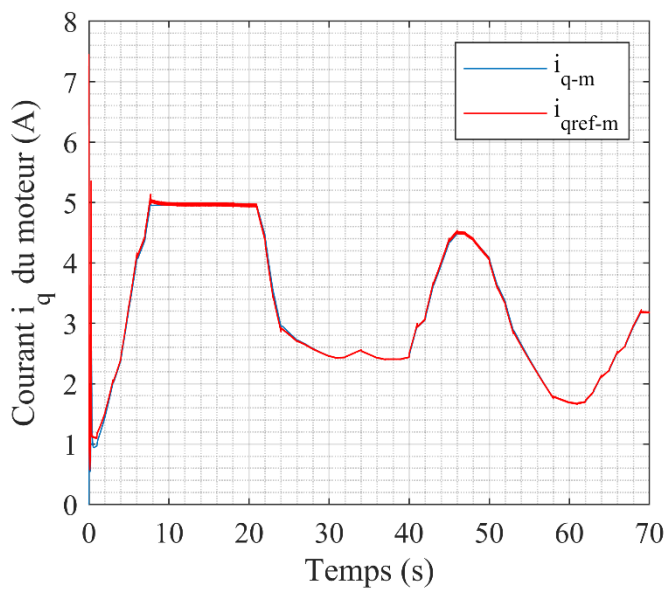
La figure (III.14) représente l'évolution des caractéristiques MSAP avec la régulation de vitesse, suivi de l'application de couple de charge de la pompe.



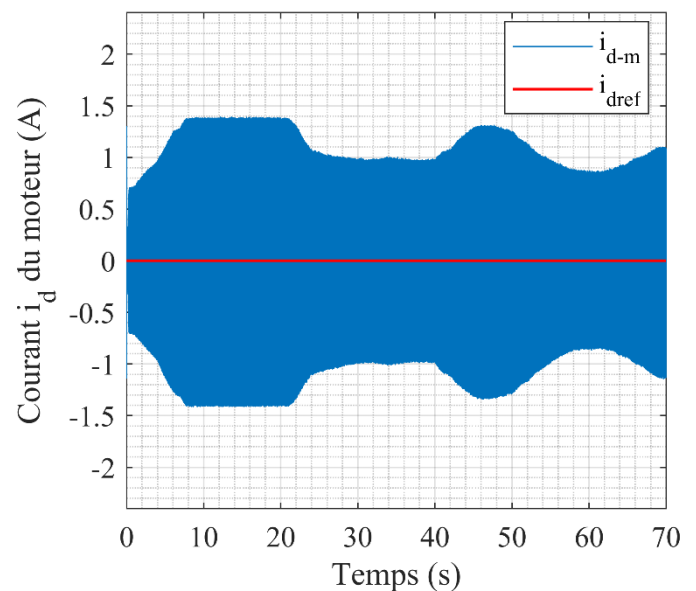
(a)



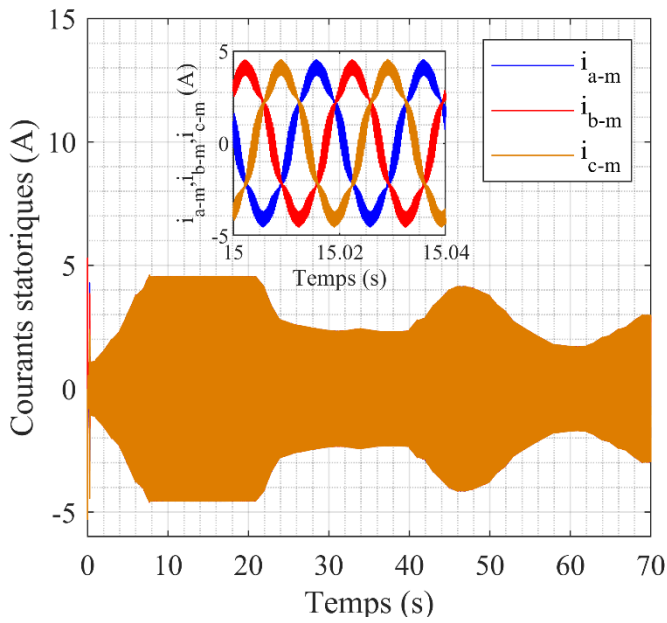
(b)



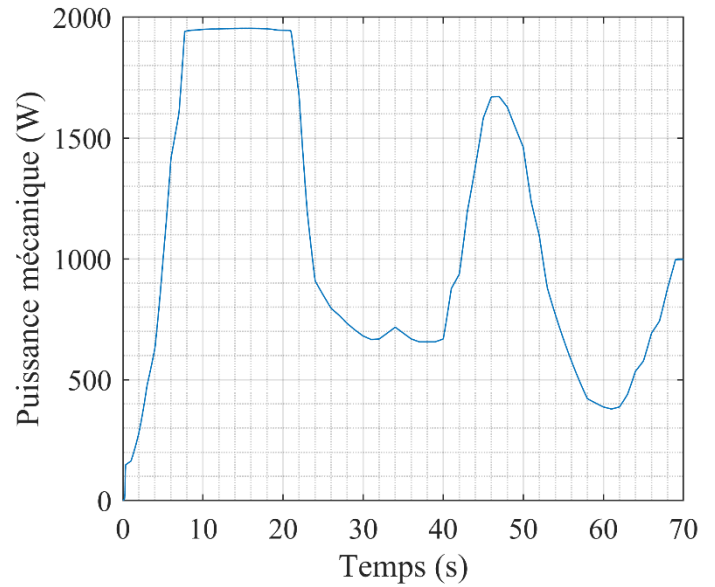
(c)



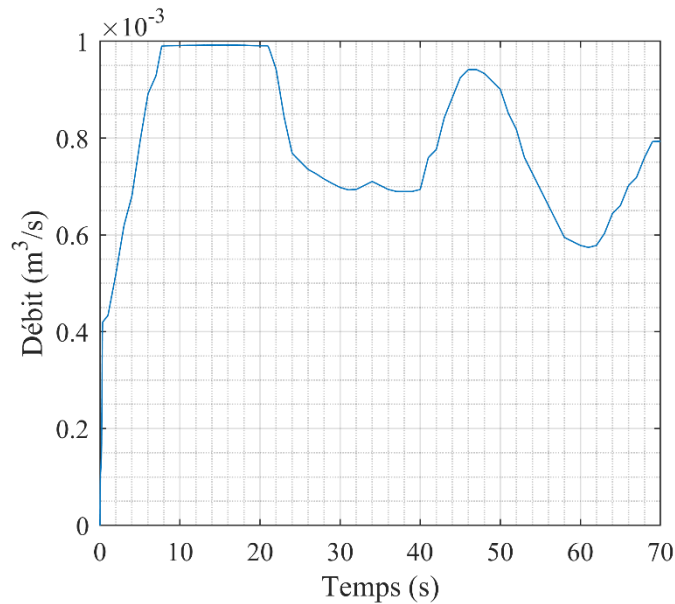
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure III.14 Résultats de simulation de la chaîne motopompe : a-Vitesse du moteur, b-Couple électromagnétique et couple résistant, c-Courant en quadrature, d-Courant d'axe direct, e-Courants statoriques, f-Puissance mécanique de la pompe, g- Débit

On remarque que l'allure de la vitesse du moteur suit parfaitement sa référence qui est atteinte très rapidement avec un temps de réponse acceptable (figure III.14-a). Le couple électromagnétique après le régime transitoire est égal au couple de charge imposé par la pompe (figure III.14-b). Les courants statoriques observent un courant d'appel grand, et puis durant le régime permanent ils évoluent d'une façon sinusoïdale (figure III.14-e). Le courant en quadrature évolue pendant le régime établi identiquement au

couple électromagnétique et suit sa référence (figure III.14-c). Le courant direct suit sa référence et il est pratiquement nul (figure III.14-d).

La puissance de la pompe et le débit suivent l'allure de vent avec une limitation de puissance grâce à l'angle de calage (figure III.14-f, g).

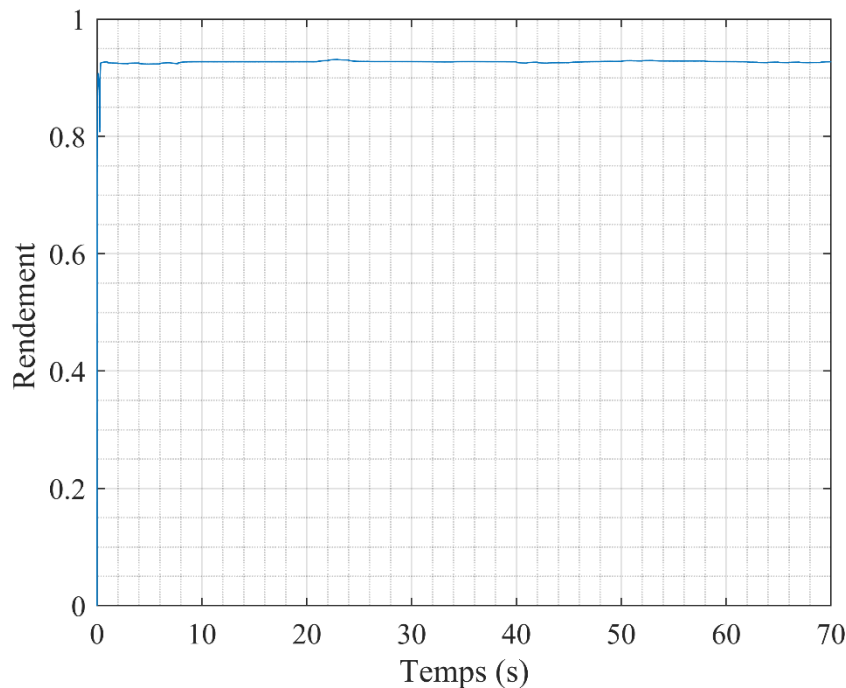


Figure III.15 Allure de rendement global

Depuis la figure III.15 on voit que le rendement global du système est à l'environ de 93 %.

III.11 Conclusion

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

La deuxième partie a été consacrée à la commande vectorielle par découplage et régulation des courants de la MSAP qui entraîne une pompe centrifuge, l'objectif est la régulation de la vitesse. La troisième partie est dédiée à la simulation de toute la chaîne de pompage avec une commande en puissance.

Malgré les avantages et les performances des convertisseurs statiques mais certains inconvénients existent tel que son coût élevé et les harmoniques qui surgissent. Dans le prochain chapitre on étudiera la possibilité d'éliminer le convertisseur AC/DC/AC pour notre système de pompage éolien.



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



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

IV.1 Introduction

Les convertisseurs statiques présentent des inconvénients tels que :

- Le coût qui est élevé,
- Les courants alternatifs qui sont non sinusoïdaux et qui présentent beaucoup d'harmoniques.

Dans ce chapitre, on étudiera la possibilité d'éliminer le convertisseur statique (AC/DC/AC) du système de pompage éolien et faire un couplage électrique de la génératrice et du moteur, pour faire cela un modèle mathématique sera présenté et une comparaison entre le système de pompage éolien avec le convertisseur AC/DC/AC et sans le convertisseur AC/DC/AC sera présenté aussi.

IV.2 But de ce travail

En représentant la caractéristique $p = f(V)$ de l'éolienne et en reliant les points maximums de puissance correspondant à chaque vitesse de la turbine, on obtient une caractéristique qui s'approche de la caractéristique couple-vitesse de la pompe centrifuge.

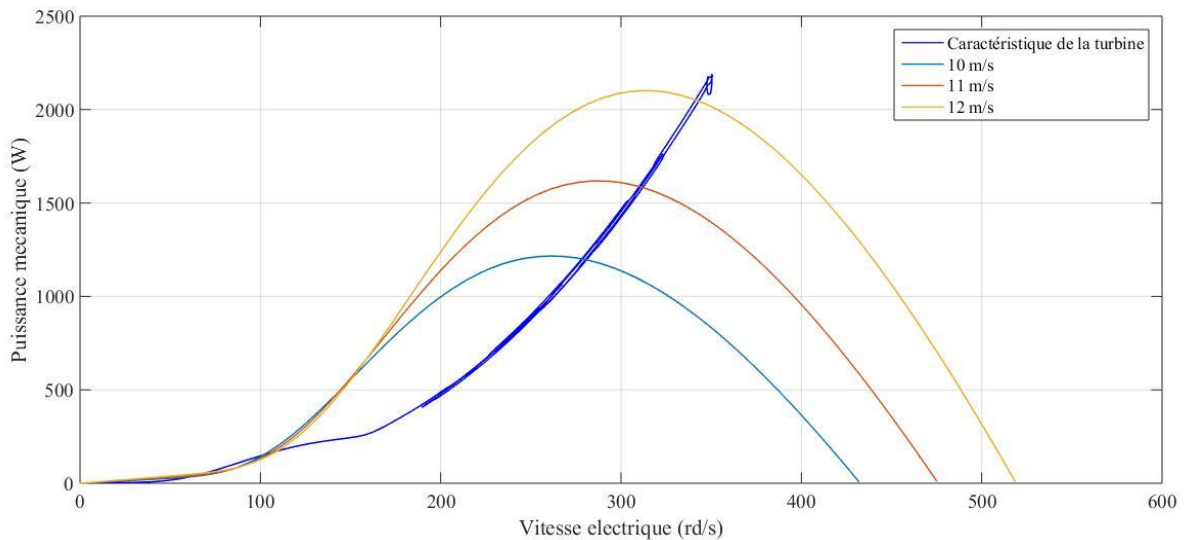


Figure IV.1 Caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne

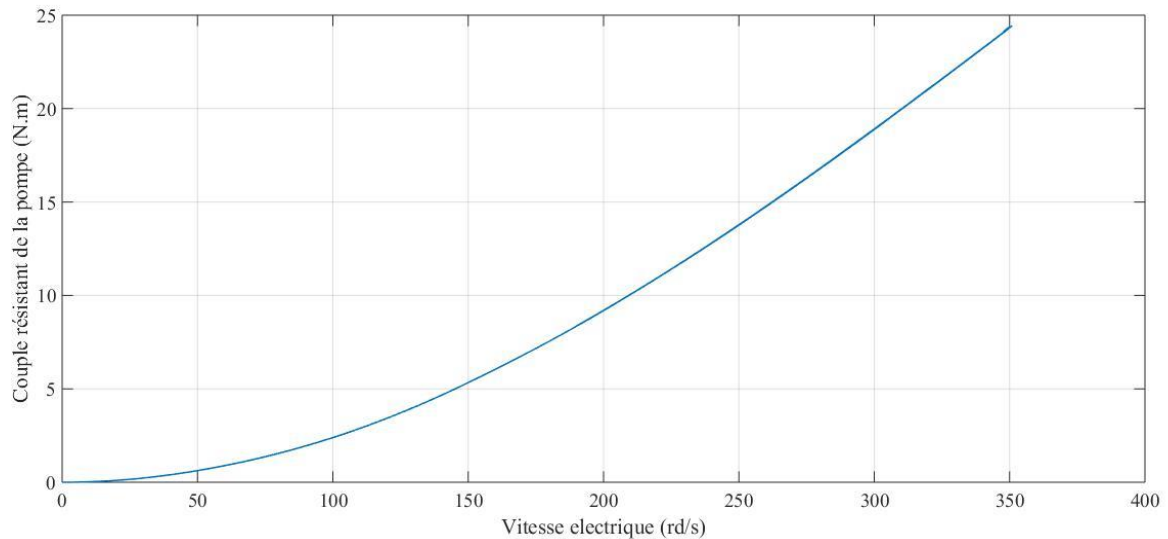


Figure IV.2 Caractéristique couple-vitesse de la pompe

Afin de comparer entre la caractéristique de la turbine et celle de la pompe, on va utiliser les vitesses électriques car elles sont égales ($\omega_{eturbine} = \omega_{emoteur}$).

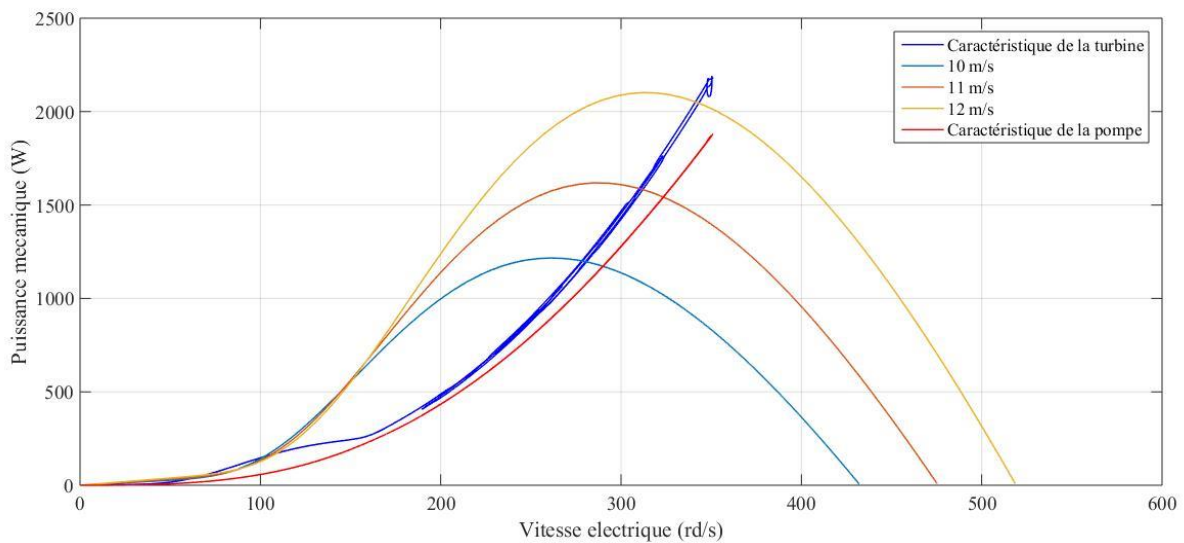


Figure IV.3 Les caractéristiques puissance-vitesse turbine et pompe

La figure IV.3 nous a permis de voir le rapprochement des deux caractéristiques (turbine et pompe). Pour chaque vitesse électrique, on remarque que la puissance mécanique de la turbine est toujours supérieure à la puissance mécanique de la pompe ($P_t > P_p$) et cela est dû à cause des pertes de puissances.

Dans ce chapitre, on va éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC et commander le système en esclave en faisant un couplage électrique entre la génératrice synchrone à aimants permanents et le moteur synchrone à aimants permanents. Un schéma du système global est illustré dans la figure ci-dessous :

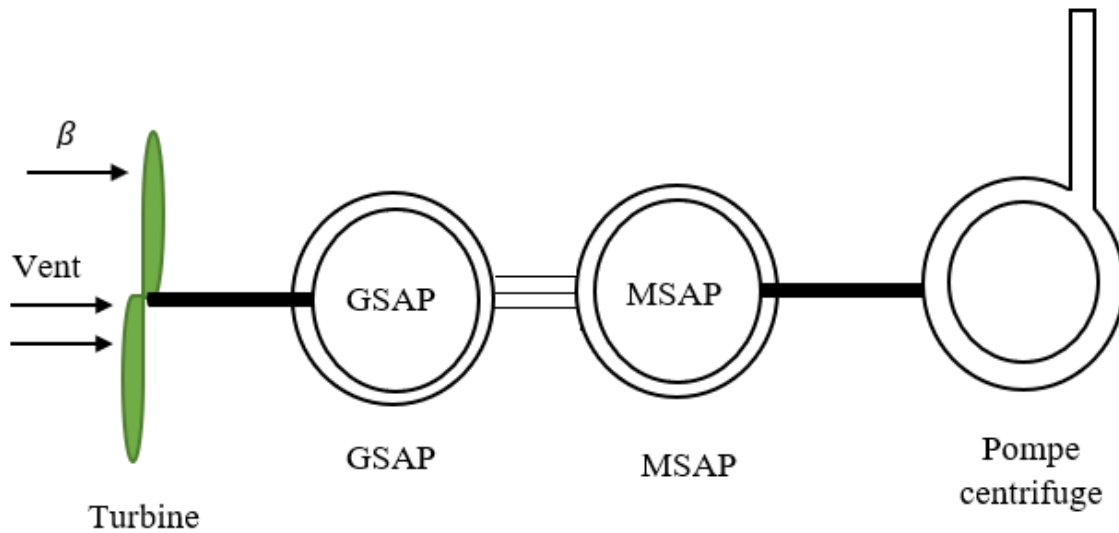


Figure IV.4 Schéma du système global

IV.3 Développement mathématique pour le couplage électrique

Les équations sont exprimées dans un référentiel lié au champ tournant dans le repère de Park [1]. Les équations des tensions et les flux des deux machines synchrones à aimants permanents sont :

La première machine :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P_1 \Omega_g \varphi_{sq} \\ V_{sq1} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + P_1 \Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad (IV.1)$$

Avec : P_1 : Nombre de paire de pôles de la première machine.

Les expressions des flux magnétiques sont sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (IV.2)$$

La deuxième machine :

$$\begin{cases} V_{sd_m} = R_{s_m} i_{sd_m} + \frac{d\varphi_{sd_m}}{dt} - P_2 \Omega_m \varphi_{sq_m} \\ V_{sq_m} = R_{s_m} i_{sq_m} + \frac{d\varphi_{sq_m}}{dt} + P_2 \Omega_m \varphi_{sd_m} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Avec : P_2 : Nombre de paire de pôles de la deuxième machine.

Les expressions des flux magnétique sont sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd_m} = L_{d_m} i_{sd_m} + \varphi_{f_m} \\ \varphi_{sq_m} = L_{q_m} i_{sq_m} \end{cases} \quad (IV.4)$$

En remplaçant les équations (IV.2) et (IV.4) dans (IV.1) et (IV.3) respectivement, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P_1 \Omega_g L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_{s1} i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} P_1 \Omega_g + P_1 \Omega_g \varphi_f \\ V_{sd_m} = R_{s_m} i_{sd_m} + L_{d_m} \frac{d}{dt} i_{sd_m} - P_2 \Omega_m L_{q_m} i_{sq_m} \\ V_{sq_m} = R_{s_m} i_{sq_m} + L_{q_m} \frac{d}{dt} i_{sq_m} + L_{d_m} i_{sd_m} P_2 \Omega_m + P_2 \Omega_m \varphi_{f_m} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Pour faire le couplage électrique entre les deux machines synchrones à aimants permanents et avoir la possibilité d'éliminer le convertisseur statique, il faut procéder de cette façon :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd_m} \\ V_{sq} = V_{sq_m} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} i_{sd} = -i_{sd_m} \\ i_{sq} = -i_{sq_m} \end{cases} \quad (IV.7)$$

En remplaçant (IV.7) dans (IV.5), on aura le système global suivant :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P_1 \Omega_g L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} P_1 \Omega_g + P_1 \Omega_g \varphi_f \\ V_{sd} = R_{s_m} (-i_{sd}) + L_{d_m} \frac{d}{dt} (-i_{sd}) - P_2 \Omega_m L_{q_m} (-i_{sq}) \\ V_{sq} = R_{s_m} (-i_{sq}) + L_{q_m} \frac{d}{dt} (-i_{sq}) + L_{d_m} (-i_{sd}) P_2 \Omega_m + P_2 \Omega_m \varphi_{f_m} \end{cases} \quad (IV.8)$$

En simplifiant le système d'équation (IV.8), on obtient :

$$\begin{cases} R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - P_1 \Omega_g L_q i_{sq} = R_{s_m} (-i_{sd}) + L_{d_m} \frac{d}{dt} (-i_{sd}) - P_2 \Omega_m L_{q_m} (-i_{sq}) \\ R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d i_{sd} P_1 \Omega_g + P_1 \Omega_g \varphi_f = R_{s_m} (-i_{sq}) + L_{q_m} \frac{d}{dt} (-i_{sq}) + L_{d_m} (-i_{sd}) P_2 \Omega_m + P_2 \Omega_m \varphi_{f_m} \end{cases} \quad (IV.9)$$

En ajoutant les deux équations mécaniques de la turbine et de la pompe, on aura le système suivant :

$$\begin{cases} (R_s + R_{s_m}) i_{sd} + (L_d + L_{d_m}) \frac{d}{dt} i_{sd} - (P_1 \Omega_g L_q + P_2 \Omega_m L_{q_m}) i_{sq} = 0 \\ (R_s + R_{s_m}) i_{sq} + (L_q + L_{q_m}) \frac{d}{dt} i_{sq} + (P_1 \Omega_g L_d + P_2 \Omega_m L_{d_m}) i_{sd} + P_1 \Omega_g \varphi_f - P_2 \Omega_m \varphi_{f_m} = 0 \\ J_g \frac{d\Omega_g}{dt} + f_g \Omega_g = C_t - C_{em} \\ J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em_m} - C_p - f_m \cdot \Omega_m \end{cases} \quad (IV.10)$$

Les expressions des couples électromagnétiques des deux machines sont données comme suit :

$$C_{em} = P_1 [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + i_{sq} \varphi_f] \quad (IV.11)$$

$$C_{em_m} = P_2 [(L_{d_m} - L_{q_m}) i_{sd} i_{sq} - i_{sq} \varphi_{f_m}] \quad (IV.12)$$

Le schéma global est réalisé sous Matlab/Simulink comme illustré dans la figure (VI.4) :

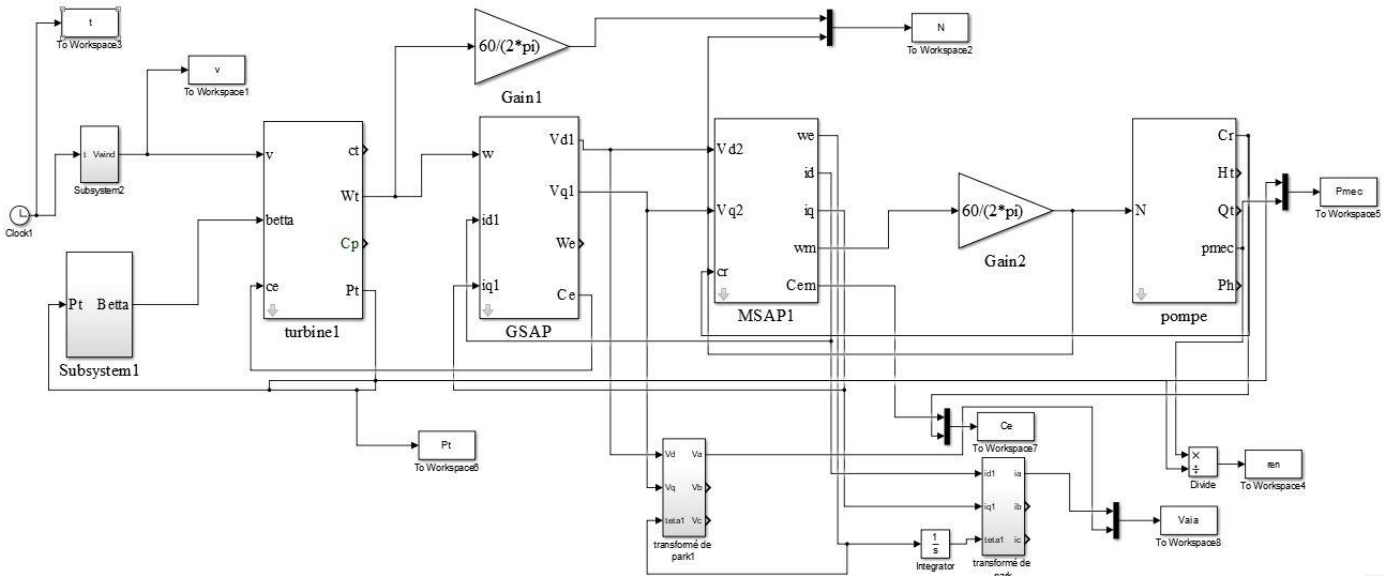


Figure IV.5 Schéma bloc global du système de pompage éolien sans convertisseur AC/DC/AC

VI.4 Simulation et interprétation des résultats

On applique le profil du vent présenté dans la figure II.2, on obtient les résultats suivants :

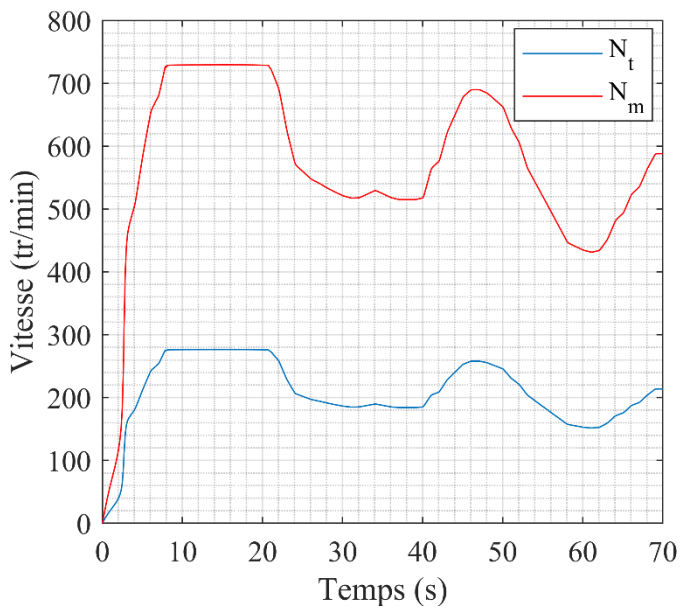


Figure IV.6 Allure des vitesses turbine et pompe

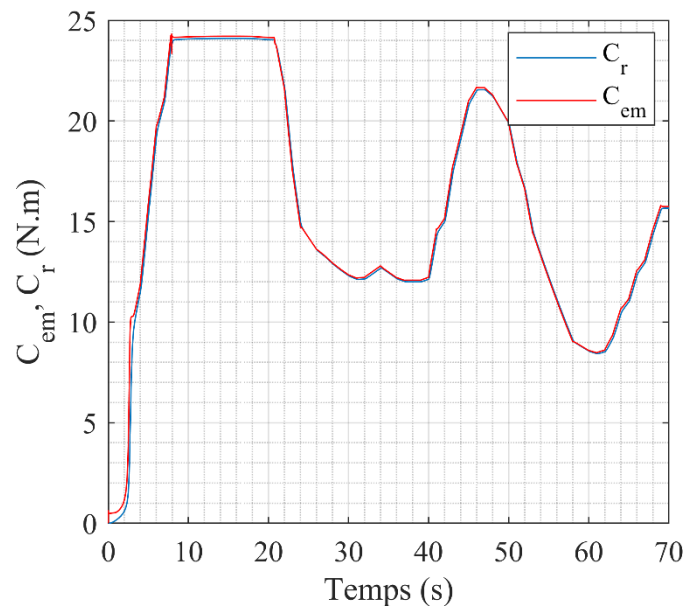


Figure IV.7 Allure du couple électromagnétique du MSAP et du couple résistant de la pompe

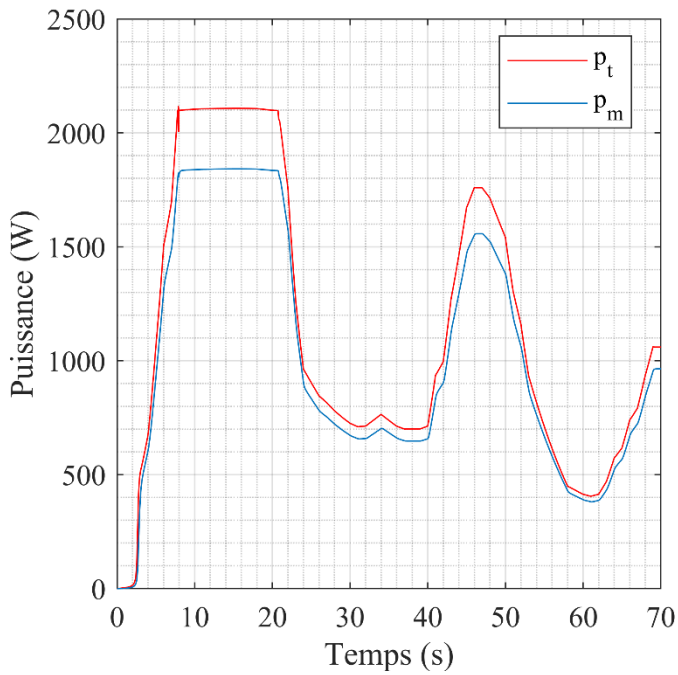


Figure IV.8 Allure des puissances de la turbine et de la pompe

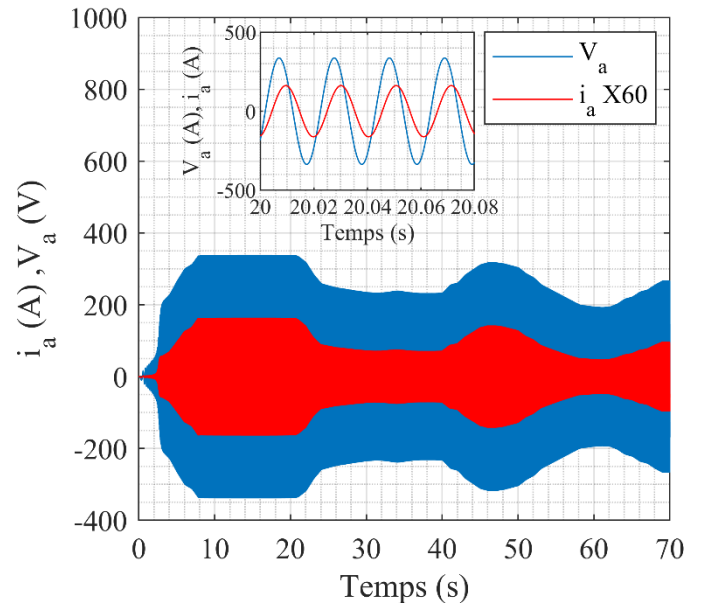


Figure IV.9 Allure de la tension V_a et du courant i_a

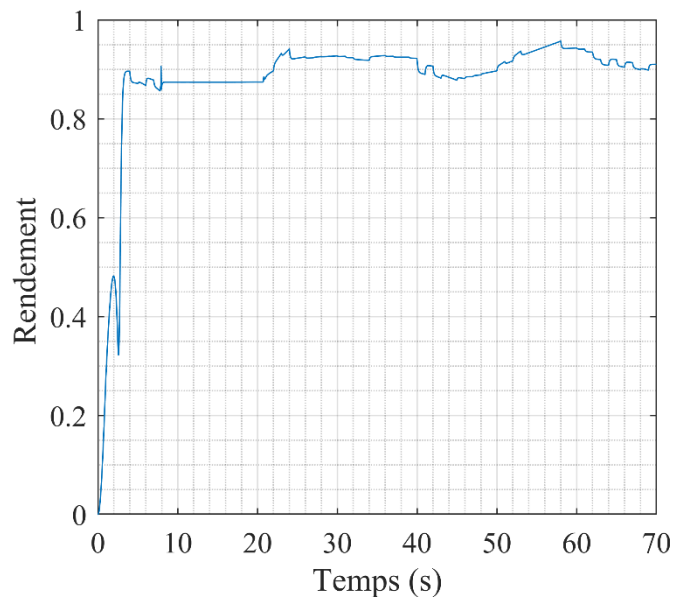


Figure IV.10 Rendement global

D'après les résultats de simulation, on remarque que les vitesses (turbine et MSAP), les puissances (turbine et pompe), le couple électromagnétique du MSAP et le couple résistant de la pompe, suivent le profil du vent, et l'angle de calage nous a permis de limiter la puissance de la turbine à 2.1 kW.

VI.5 Étude comparative

Dans cette étude on va comparer entre les puissances (turbine et pompe) avec convertisseur et sans convertisseur ainsi que leurs vitesses pour différentes vitesses de vent. (Voir les tableaux IV.1 Et IV.2)

- **Avec convertisseur**

Tableau IV-1 Valeurs des puissances et vitesses (avec convertisseurs)

Vent (m/s)	Puissance de la turbine (W)	Puissance de la pompe (W)	Vitesse de la turbine (rad/s)	Vitesse du moteur (rad/s)
6	262.72	243.73	13.08	38.93
7	417.2	386	15.26	45.41
8	622.75	576.74	17.44	51.89

- **Sans convertisseur**

Tableau IV-2 Valeurs des puissances et vitesses (sans convertisseurs)

Valeurs des puissances et vitesses (sans convertisseurs)

Vent (m/s)	Puissance de la turbine (W)	Puissance de la pompe (W)	Vitesse de la turbine (rad/s)	Vitesse du moteur (rad/s)
6	261.71	241.99	13.55	38.84
7	414.78	381.45	15.91	45.2
8	617.65	563.52	18.32	51.5

- ❖ **Pertes de puissance**

Tableau IV-3 Valeur des pertes de puissances (avec et sans convertisseurs)

	Avec convertisseurs	Sans convertisseurs
Vitesse de vent (m/s)	Pertes de puissance (ΔP)	Pertes de puissance (ΔP)
6	7.23%	7.54 %
7	7.48%	8.03%
8	7.39%	8.77%

D'après les tableaux ci-dessus on remarque que les puissances dans les deux systèmes éoliens (avec et sans convertisseurs) sont très proches et que l'erreur entre les deux systèmes est presque de 1%. Donc,

l'élimination de convertisseur n'as pas influencé trop sur le rendement global du système, les résultats sont satisfaisants.

Les caractéristiques puissance-vitesse de la turbine et de la pompe avec et sans convertisseurs statiques pour différentes vitesses de vent sont montrées dans la figure ci-dessous :

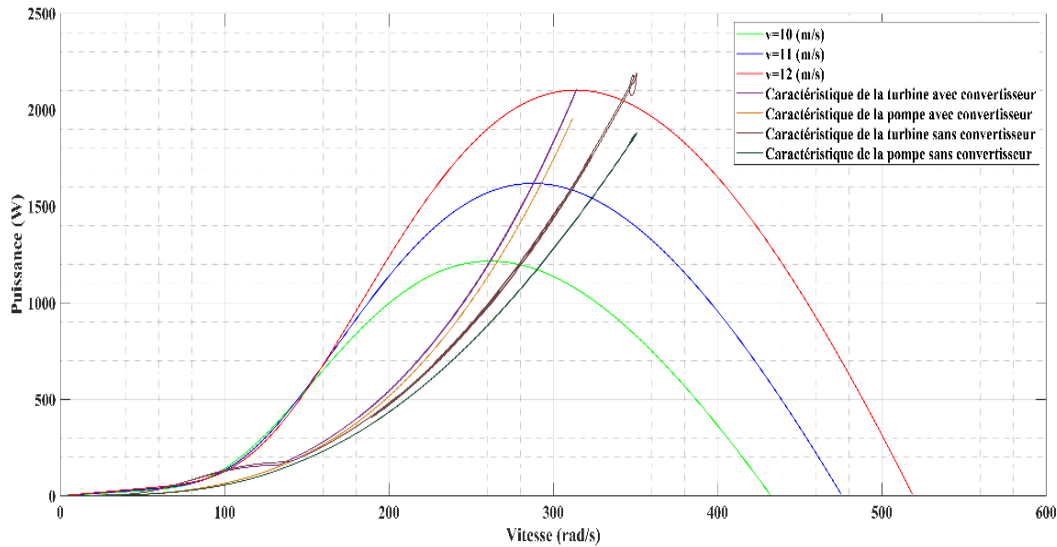


Figure IV.11 Les caractéristiques (turbine et pompe) avec et sans convertisseurs

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a expliqué le but de ce travail ainsi que le modèle mathématique pour faire le couplage électrique entre la GSAP et le MSAP afin d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC et commander le système en esclave.

Une simulation sous Matlab/Simulink, interprétation des résultats et une étude comparative entre le système éolien avec et sans convertisseurs ont été présentés.



Conclusion générale



Conclusion générale

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire master a porté sur l'étude d'un système de pompage éolien, qui est composé d'une turbine éolienne, d'une GSAP, des convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe (pompe centrifuge et une machine synchrone à aimants permanents). Ce travail est subdivisé en quatre chapitres :

Dans le contexte d'énergie éolienne un état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne est présenté dans le premier chapitre. Nous avons parlé des différents types d'éoliennes existants avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. On a également présenté les différents types de convertisseurs et pompes utilisés puis on a illustré un schéma global du système à étudier. Dans ce mémoire notre choix a été porté sur une turbine éolienne à attaque direct basé sur un générateur synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles à vitesses variables.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents composants d'un système de pompage éolien à vitesse variable (vent, turbine éolienne à axe horizontal, GSAP, redresseur, bus continu, onduleur, MSAP et pompe). Ensuite, une modélisation de GSAP dans les repères (naturel et Park) a été réalisée, cette dernière a été validée par simulation sous Matlab Simulink dans des conditions où la GSAP alimente une charge parfaitement résistive.

Le troisième chapitre traite le contrôle et la simulation de la chaîne de pompage éolienne, nous avons défini le principe de la commande vectorielle appliqué à la GSAP, En profitant des capacités de cette technique de commande pour la régulation de la tension du bus continu à la sortie du redresseur à MLI. L'exploitation de la stratégie de commande MPPT permet de maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimale quelques soient les variations de la vitesse du vent qui sont inférieures à la vitesse nominale. La limitation de puissance est réalisée au niveau de la turbine par la technique Pitch Control. Nous avons donné le principe de la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation de moteur synchrone à aimants permanents.

L'objectif du quatrième chapitre est l'étude de la possibilité d'éliminer le convertisseur statique AC/DC/AC, faire un couplage électrique entre la génératrice synchrone à aimants permanents et la machine synchrone à aimants permanents et faire une commande en esclave qui dépend de la source primaire (vent) et observer le comportement de notre système dans la deuxième zone de maximisation de puissance pour voir que la caractéristique couple-vitesse de la pompe est similaire à la caractéristique puissance-vitesse de la turbine éolienne, les résultats obtenus confirment les performances souhaitées en régime établie.

On a confirmé la possibilité d'éliminé le convertisseur statique AC/DC/AC en faisant une comparaison entre les puissances mécaniques du système éolien avec convertisseur et sans convertisseur et l'erreur de puissance entre les deux systèmes (avec et sans convertisseur) est de 1%.

Finalement, on peut envisager à la lumière de ce travail :

- Faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie ;
- Dimensionnement optimal des machines et de la pompe centrifuge ;
- Validation des résultats théoriques par voie expérimentale



Bibliographies



Références bibliographies

- [1] Billel Meghni « Contribution à l'amélioration de performances d'une chaîne énergétique éolienne » Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015 ;
- [2] Fateh Louar « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016 ;
- [3] Abdelkarim Chemidi « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme » Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2015 ;
- [4] Farid Boumaraf « Commande d'un aérogénérateur-apport des techniques de l'intelligence artificielle » Thèse de doctorat, Université de Batna 2014 ;
- [5] Gabriel-Octavian Cimuca « Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliennes » Thèse de Doctorat, École nationale supérieure d'arts et métiers Centre de Lille, 2005 ;
- [6] Sidi Mohammed Boudia « Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'Atlas des vents en Algérie » Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Blekaïd, Tlemcen, 2013 ;
- [7] Nachida Kasbadji Merzouk « Évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse de vent en Algérie » Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 2006 ;
- [8] Ridha Cheikh « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de Doctorat, Université Mohammed Khider, Batna, 2018 ;
- [9] Tarak Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Ecole Centrale de Lille, 2011 ;
- [10] Traoré Moussa « Développement d'un simulateur numérique de rotors d'éoliennes application à une chaîne de conversion éolienne utilisant une machine synchrone à aimants permanents » Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître en sciences appliquées, Québec, 2016 ;
- [11] Said Azzouz « Amélioration de la commande d'un système éolien à base d'une machine MADA utilisant les techniques intelligentes » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019 ;

- [12] Said Chikha « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 2017 ;
- [13] Arnaud Davigny « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007 ;
- [14] Issam Attoui « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2015 ;
- [15] Liuchen Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne » IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5 ;
- [16] Mahieddine HACIL « Amélioration des performances des énergies éoliennes » Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, Constantine 2012 ;
- [17] Pascal Krafczyk « Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA » Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Université de Lorraine, 2013 ;
- [18] Frédéric Poitier « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003 ;
- [19] Kassa Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolien autonomes » Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA-Bejaia, Université Lille 1, 2010 ;
- [20] Belkacem Toual « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable » Mémoire de Magister, Université de Batna, 2010 ;
- [21] Adam Mirecki. « Étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005 ;
- [22] Sabrina Ben aicha « Etudes théorique et expérimentale d'une génératrice synchrone utilisées dans une chaîne éolienne à axe vertical » Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014 ;
- [23] Ammar Hachemi « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage » Thèse de Doctorat Université Mohamed Khider, Biskra, 2017 ;
- [24] Abdelkader Abdelhafid Hariz « Etat de l'art sur les énergies solaire et éolienne en Algérie » Thèse de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra, 2010 ;
- [25] Amine Daoud « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran 2013 ;

- [26] http://gpip.cnam.fr/ressources-pedagogiques-ouvertes/hydraulique/co/1div_pompes_16.html .Consulté le 12/09/2020
- [27] Abderrazak Guettaf « Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013 ;
- [28] Salma El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005 ;
- [29] Ludovic Leclercq « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2004 ;
- [30] Soltane Belakehal, « Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010 ;
- [31] Mohamed Lamine Fadda « Contribution à la modélisation et au diagnostic intelligent des systèmes de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de 8 Mai 1945 Guelma, 2017 ;
- [32] Adnane Zaimi « Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone a aimants permanents » Mémoire d'Ingénieur, Conservation national des arts et métiers, centre du Maroc 2014 ;
- [33] S. Belakehal, A. Bentounsi, « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pages : 149 – 161, Université Mentouri de Constantine,2010 ;
- [34] F. Kendouli et al., « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » Revue des Énergies Renouvelables Vol. 14 N°1, pages : 109 - 120, Université Mentouri de Constantine, 2011 ;
- [35] Azzouz Tamaarat « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA ». Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2015 ;
- [36] Said AZZOUZ « Amélioration de la commande d'un système éolien à base d'une machine MADA utilisant les techniques intelligentes » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2019 ;
- [37] <http://www.f-gros.com/comment-fonctionnent-les-pompes-centrifuges-avantages-et-inconvenients-des-pompes-centrifuges/#:~:text=Le%20plus%20grand%20avantage%20des,avec%20un%20minimum%20d'entretien> consulté le 14/09/2020 ;
- [38] Narimene Debili « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université Constantine I,2015 ;

- [39] Ammar Hachemi « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage » Thèse de Doctorat, Université de Blida, 2017 ;
- [40] Hayette Mesloub « Commande DTC Prédicative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2016 ;
- [41] Toufik Rekioua « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents » Thèse de Doctorat de l'INPL Nancy, 1991 ;
- [42] Aziz Ramli « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basé sur une MSAP » Mémoire de Magister, Université Abderrahmane MIRA-Bejaia, 2010 ;
- [43] Akkila BOUKHELIFA « Les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue d'un control vectoriel » mémoire de magistère, Ecole nationale polytechnique, 2007.



ANNEXES



Annexe 1

Paramètres de la turbine éolienne

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

$$C_p = 0.384$$

$$\lambda = 2.8$$

$$R = 1.283m$$

$$P_n = 2.1 kW$$

Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents

$$P_n = 2kW$$

$$R_s = 2.875 \Omega$$

$$L_d = 0.0085 H$$

$$L_q = 0.0085 H$$

$$\varphi = 1.2677 Wb$$

$$P = 12$$

Paramètres du moteur synchrone à aimants permanents

Puissance nominale $P_n = 2kW$

Tension 220/380V

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

Nombre de pair de pôles $P = 4$

Résistance statorique $R_s = 2.875 \Omega$

Inductance direct $L_d = 0.0085 H$

Inductance en quadrature $L_q = 0.0085 H$

Coefficient de frottement $f = 0.0014$

Inertie $J = 0.07$

Annexe 2

Régulation du courant i_{sd}

La commande de la MSAP s'accomplit en contrôlant les courants i_{ds} et i_{qs} la boucle de régulation de la vitesse qui entre dans la composition du système impose le courant de référence i_{qs} . Le courant i_{ds} est gardé nul, la commande est effectuée par les régulateurs (PI) qui maintiennent les courants de sortie égaux aux courants de référence imposés pour annuler l'erreur statique ($\varepsilon = 0$).

$$\text{Sachant que : } i_{sd_m} = \frac{V_{sd1_m}}{R_{s_m} + sL_{d_m}}$$

Et que la forme générale du régulateur est déjà donnée à l'équation.

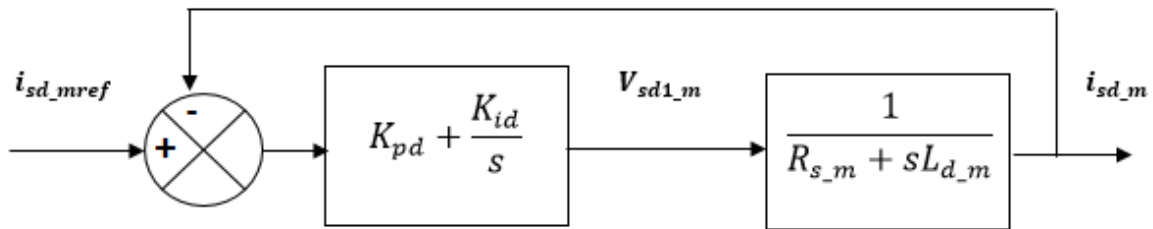


Figure A.1 Boucle de régulation du courant i_{sd_m} .

La dynamique du moteur relative à la partie électrique est égale à :

$$\frac{1}{R_{s_m} + sL_{d_m}} = \frac{1}{R_{s_m}} \frac{1}{(1 + sT_{ed})} \quad (\text{A2.1})$$

$$\text{Avec : } T_{ed} = \frac{L_d}{R_s}$$

La fonction de Transfert en boucle ouverte (FTBO) est :

$$FTBO = K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \frac{1}{(R_{s_m} + sL_{d_m})} = K_{pd} \frac{(1 + sT_{id})^{-1} \frac{1}{R_{s_m}}}{sT_{id}R_{s_m}(1 + s\frac{L_{d_m}}{R_{s_m}})} \quad (\text{A2.2})$$

$$FTBO = K_{pd} \frac{1 + sT_{id}}{sT_{id}} \frac{\frac{1}{R_{s_m}}}{(1 + sT_{ed})} \quad (\text{A2.3})$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$sT_{id} = sT_{ed} \quad (\text{A2.3})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant :

$$FTBO = K_{pd} \frac{\frac{1}{R_{s_m}}}{sT_{id}} = \frac{K_{id}}{(sR_{s_m})} \quad (\text{A2.4})$$

La fonction de Transfer en boucle fermé (FTBF) est donnée par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} \quad (A2.5)$$

$$FTBF = \frac{1}{1+\frac{K_{id}}{s.R_{s_m}}} \quad (A2.6)$$

$\tau_d = \frac{L_{d_m}}{R_{s_m}}$: Constante de temps électrique de l'axe d en boucle fermé.

En imposant le temps de réponse $T_r = 3\tau_d$ (Critère de $\pm 5\%$)

Donc :

$$T_r = 3 \frac{R_{s_m}}{K_{id}} \quad (A2.7)$$

T_r : Temps de réponse imposé.

D'où :

$$k_{id} = 3 \frac{R_{s_m}}{T_r} \quad (A2.8)$$

$$\frac{L_{d_m}}{R_{s_m}} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (A2.9)$$

$$\text{Donc : } K_{pd} = \frac{L_{d_m}.K_{id}}{R_{s_m}} = \frac{3.L_{d_m}}{T_r} \quad (A2.10)$$

Régulation du courant i_{sq}

La boucle de régulation sur l'axe d est présentée par la figure suivante :

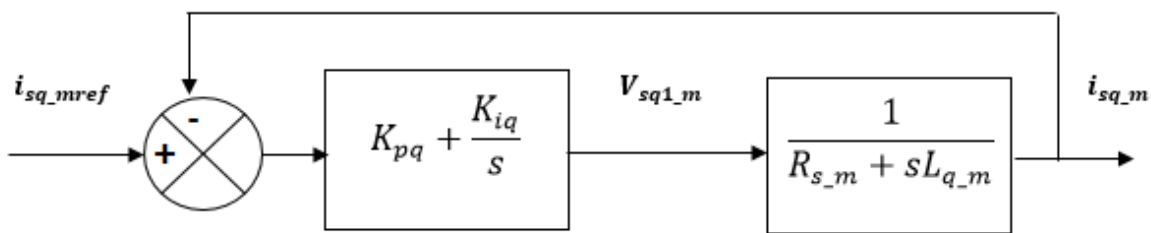


Figure A2.2 Boucle de régulation du courant i_{sq_m} .

Pour la régulation du courant i_{sq_m} , on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant i_{sd_m} . $FTBO$ est exprimée par :

$$FTBO = K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \frac{1}{(R_{s_m} + s.L_{q_m})} = K_{pq} \frac{(1+s.T_{iq})\frac{1}{R_{s_m}}}{s.T_{iq}R_{s_m}(1+s\frac{L_{q_m}}{R_{s_m}})} \quad (A2.11)$$

Avec : $T_{iq} = \frac{L_{q.m}}{R_{s.m}}$

La FTBF est donné par :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau_q} \tag{A2.12}$$

$\tau_q = \frac{R_{s.m}}{K_{iq}}$: Constante de temps électrique de l'axe q de la machine.

$$T_r = 3 \frac{R_{s.m}}{K_{iq}} \tag{A2.13}$$

$$k_{iq} = 3 \frac{R_{s.m}}{T_r} \tag{A2.14}$$

$$\frac{L_{q.m}}{R_{s.m}} = \frac{K_{pq}}{K_{iq}} \tag{A2.15}$$

$$K_{pq} = \frac{L_{q.m}.K_{iq}}{R_{s.m}} = \frac{3.L_{q.m}}{T_r} \tag{A2.16}$$

Régulation de vitesse

A partir de l'équation du mouvement :

$$J_m \frac{d\omega}{dt} + f_m \cdot \omega = C_{em.m} - C_r \tag{A2.17}$$

Le régulateur de vitesse prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée et il agit sur le couple (c'est-à-dire que sa sortie est le couple de référence).

Après transformation de Laplace de l'équation du mouvement on trouve :

$$\omega = \frac{\frac{1}{J_m}}{s + \frac{f_m}{J_m}} (C_{em.mref} - C_r) \Rightarrow \omega = \frac{K}{\tau.s+1} (C_{em.m} - C_r) \tag{A2.18}$$

Avec : $K = \frac{1}{f_m}$; $\tau = \frac{J_m}{f_m}$

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous :

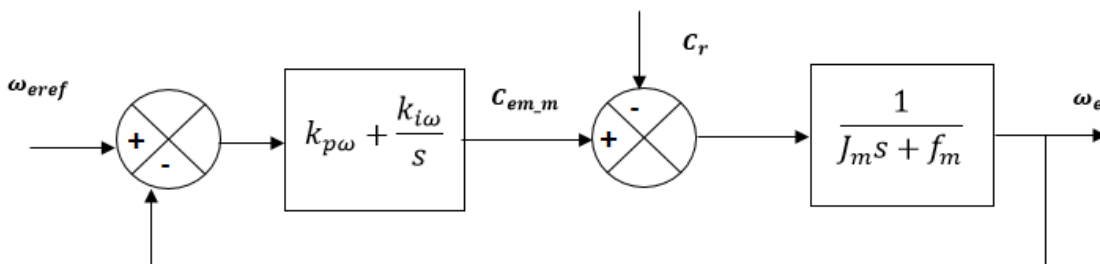


Figure A.3 Boucle de régulation de vitesse.

$F_\omega(s)$: La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F_{\omega}(s) = k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s} \quad (\text{A2.19})$$

La FTBF est donné par :

$$FTBF(s) = \frac{(K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s}) \cdot (\frac{K}{\tau s + 1})}{1 + (K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s}) \cdot (\frac{K}{\tau s + 1})} \quad (\text{A2.20})$$

Après les calculs on obtient :

$$FTBF(s) = \frac{\frac{K_{p\omega} \cdot K}{\tau} \cdot s + \frac{K_{i\omega} \cdot K}{\tau}}{s^2 + (\frac{K_{p\omega} \cdot K + 1}{\tau}) \cdot s + \frac{K_{i\omega} \cdot K}{\tau}} \quad (\text{A2.21})$$

La FTBF possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0} p^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) p + 1 = 0 \quad (\text{A2.21})$$

Où :

ω_0 : Pulsation propre du système,

ξ : Facteur d'amortissement.

Par identification terme à terme entre l'équation (A2.20) et (A2.21) on trouve :

$$\begin{cases} k_{p\omega} = \frac{2\xi\omega_0 - 1}{K} \\ k_{i\omega} = \frac{\omega_0^2 \tau}{K} \end{cases} \quad (\text{A2.22})$$

Pour la détermination des caractéristiques du régulateur, on choisit un facteur d'amortissement égal à 0.7 et on définit la pulsation des oscillations non amorties à partir de la dynamique souhaitée.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude d'un système de pompage éolien à base de deux machines synchrones à aimants permanents l'une fonctionne en génératrice (GSAP) et l'autre fonctionne en moteur (MSAP).

L'objectif principal de ce travail est de faire une comparaison entre le système de pompage éolien avec convertisseur statique (AC/DC/AC) et le système de pompage éolien sans convertisseur statique (AC/DC/AC).

Enfin, en comparant entre les puissances des deux systèmes de pompage éoliens (avec et sans convertisseur) on a trouvé une erreur de puissance de 1% ce qui confirme la possibilité d'éliminer le convertisseur statique (AC/DC/AC).

Mots clés

Machine synchrone à aimants permanents – Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) – moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) – Convertisseur statique (AC/DC/AC).

Abstract

The work presented in this dissertation deals with the study of a wind pumping system based on two synchronous machines with permanent magnets, one operates as a generator (GSAP) and the other operates as a motor (MSAP).

The main objective of this work is to make a comparison between the wind pumping system with static converter (AC / DC / AC) and the wind pumping system without static converter (AC / DC / AC).

Finally, by comparing the powers of the two wind pumping systems (with and without converter) we found a power error of 1% which confirms the possibility of eliminating the static converter (AC / DC / AC).

Keywords

Permanent magnet synchronous machine - Permanent magnet synchronous generator (GSAP) - Permanent magnet synchronous motor (MSAP) - Static converter (AC / DC / AC).