

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° : 2023/2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Électromécanique

SPECIALITE : Électromécanique

Thème

*Commande prédictive d'une chaîne de conversion
De l'énergie éolienne*

**Présenté Par : Hamouda Imad
Bouziane Abdellah**

Encadré Par : HadeF Mounir

Date de soutenance : 26/ 06/2024

Jury de Soutenance

Président : Mme. Ilham Hafsaoui

Grade : MCA

Univ MSB Jijel

Encadreur : M. HadeF Mounir

Grade : MCA

Univ MSB Jijel

Examineur : M. Boukhennaf Messaoud

Grade : MCB

Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

Remerciement

*Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études de Master en « électromécanique » au **département d'Electrotechnique**, à l'Université de Mohamed seddik ben Yahia de Jijel.*

*A son terme, et en premier lieu, nous remercions **ALLAH** le tout puissant de nous avoir bien guidés dans notre travail.*

*On adresse nos remerciements les plus sincères à notre encadreur **Dr. Hadej Mounir**, pour nous avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour leurs aide précieux, leurs soutien et leurs professionnalisme. Veuillez agréer monsieur l'expression de nos sentiments les plus respectueux,*

Nous voudrions aussi exprimer l'honneur que nous font les membres du jury, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

*Nous tenons à remercier ensuite la direction de l'université, et notre chef de département d'Electrotechnique, **Pr. Moussa Lefouifi**.*

Nous adressons également nos profondes considérations à tous ; qui de loin ou de près, ont aidé à la réussite de ce projet.

Enfin, nous tenons à remercier nos chères familles qui nous ont encouragés et aidés tout le long des années d'études.

DEDICACE

Au nom d'ALLAH tout puissant pour tous les bienfaits qu'il ne cesse d'accomplir dans nos vies, Que la paix et le salut soient son messager Mohamed, sa famille et ses compagnons.

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, qui ont tout le crédit.

À mes frères et sœurs.

À toute ma famille, des oncles et des oncles.

À tous mes amis.

À mes collègues de la promotion Électromécanique 2024.

Avec un grand MERCI pour notre Dr.Hadef Mounir

Hamouda Imad/ Bouziane Abdellah

Table des matières

Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des abréviations
Introduction générale

Chapitre I : État de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction.....2
I.2. Définition de l'énergie éolienne2
I.3. Historique.....3
I.4. Production mondiale de l'énergie éolienne4
I.5. L'énergie éolienne en Algérie5
I.6. Différents types d'éolienne6
I.6.1. Éoliennes à axe vertical6
I.6.2. Éoliennes à axe horizontal7
I.7. Taille des éoliennes9
I.8. Constitution d'une éolienne9
I.8.1. Principe9
I.8.2. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal10
I.9. Zone de fonctionnement d'une éolienne12
I.10. Eoliennes à vitesse fixe et variable13
I.10.1. Eolienne à vitesse fixe13
I.10.2. Eolienne à vitesse variable13
I.11. Principe de conversion de l'énergie éolienne14
I.11.1. La puissance du vent14
I.11.2. La limite de Betz17
I.12. Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.....18
I.13. Machines synchrones à aimant permanent19
I.14. Les avantages et les inconvénients19
I.14.1. Les avantage19
I.14.2. Les inconvénients20
I.15. Les avantage et Les inconvénients de l'énergie éolienne20

I.15.1. Les avantages de l'énergie éolienne	20
I.12. Les inconvénients de l'énergie éolienne	20
I.11. Conclusion	21

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

II.1. Introduction	22
II.2. Modélisation du vent	22
II.3. Modèle de la turbine	23
II.4. Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice	25
II.4.1. Modèle du multiplicateur	25
II.4.2. Équation mécanique de l'arbre	26
II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	27
II.5.1. Hypothèses simplificatrices	27
II.5.2. Modèle de MSAP triphasée	27
II.5.2.1 Equations électriques	28
II.5.2.2 Equations des flux magnétiques	28
II.5.3. Transformation de Park	29
II.5.3.1 Matrice de Park qui conserve les amplitudes	29
II.5.4 Equations de la machine dans le repère de Park	30
II.5.4.1 Equations des tensions	30
II.5.4.2 Equation des flux	30
II.5.4.3 Equations du couple électromagnétique	31
II.5.4.4 Equation mécanique	31
II.6. Redresseur à diodes	31
II.6.2. Etude de la tension de charge	32
II.6.2. Etude des courants	32
II.7. Hacheur boost	33
II.7.1 Fonctionnement	33
II.7.2 Modèle mathématique équivalent	33
II.8. Structure d'onduleur	35
II.9.2. Commande MLI	35
II.9. Modélisation de la pompe centrifuge	36
II.9.1 Hauteur manométrique totale	36
II.9.2 Pertes de charges linéaires	37
II.9.3 Pertes de charges singulières (locales).....	37

II.9.4 Lois de similitude	37
II.9.5 La puissance hydraulique	38
II.9.6 Caractéristiques des pompes centrifuges	38
II.9.6.1 La caractéristique hauteur – débit	38
II.9.6.2 La caractéristique Rendement – débit	38
II.9.6.3 La caractéristique Couple – vitesse.....	38
II.9.2 Pertes de charges linéaires	37
II.9.3 Pertes de charges singulières (locales).....	37
II.9.7 Choix de pompe	39
II.10. MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	39
II.10.1. MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne.....	40
II.10.1.1MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR	40
II.10.2. MPPT sans la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne	40
II.10.2.1. MPPT par la méthode de recherche de la montée colline (Hill climb).....	40
II.10.2.2. MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O)	41
II.10.2.3.Méthode incrémentation de la conductance (INC-CONDUCTANCE).....	42
II.11. Conclusion	58

Chapitre III :La Commande prédictive

III.1. Introduction	44
III.2. Principe de la commande prédictive.....	44
III.2.1.Description du contrôle prédictif du courant	45
III.2.1.1 Fonction de coût	46
III.2.1.2 Modèle d'onduleur	46
III.3. Commande prédictive de vitesse	48
III.4.Commande prédictive d'un hacheur Boost	51
III.5 Simulation de la commande prédictive d'une MSAP	53
III.6. Conclusion	57

Chapitre IV : Simulation du système de pompage éolien

IV.1. Introduction	58
IV.2. Système de pompage d'eau à vent (Wind Powered Water Pumping system(WPWPS)	58
IV.3. Chaine de pompage d'eau proposée	58

IV.3.1 Profil de vitesse du vent variable	60
IV.3.2 Profil de vitesse du vent aléatoire	63
IV.4. Conclusion	67
Conclusion générale	
Références bibliographiques	

Liste des Abréviations et des Symboles

Liste des abréviations

VAWT : les aérogénérateurs à axe vertical.

HAWT : les aérogénérateurs axe horizontal.

GSAP : Générateur synchrone à aimant permanent.

MAS : Générateur asynchrone.

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

MADA : Machine asynchrone à double alimentations.

DC : Courant continu.

AC : Courant Alternatif.

DC-DC : Convertisseurs continu/continu.

IGBT: Insulated gate bipolar transistor.

PI : Régulateur proportionnel intégral.

MPPT : Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

OTC: Optimal torque control.

TSR: Tip Speed Ratio.

HC: Hill Climb.

P&O: Perturb and observe.

Liste des symboles

E_c	L'énergie cinétique en (joule).
V	La vitesse du vent en (m/s).
m	La masse de l'air en (Kg).
ρ	la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1,25 (Kg/m ³)
P	La puissance en watts (W)
E	L'énergie en joule (j)
S	La surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m ²)
v	la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)
R	La longueur des pales en (m)
Ω	La vitesse angulaire des pales en (rad/s)
λ	Vitesse spécifique.
P_v	Puissance fournie par le vent.
$P_{éo}$	Puissance de la turbine.
C_p	Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
β	Angle de calage des pales.
Ω_t	Vitesse de la turbine éolienne.
V_v	Vitesse de vent.
C_t	Couple fourni par l'éolienne.
C_{t-opt}	Le couple optimal.
C_{em}	Le couple électromagnétique de la machine.
L	Inductance propre de chaque phase.
M	Inductance mutuelle entre deux phases de stator.
φ_f	Vecteur Flux des aimants permanents.
V_d, V_q	Tensions statoriques sur l'axe d, q respectivement.
θ	Angle électrique du rotor par rapport au stator de la génératrice.

Ld, Lq	Inductances cycliques statoriques sur l'axe d, q respectivement.
id, iq	Courants statoriques sur l'axe d, q respectivement.
Pe	Puissance électrique fournie par la machine.
P	Opérateur de Laplace.
Ud	Tension de Bus continu.
C	Capacité du bus continu.
$\Omega_{méc}$	Vitesse de générateur.
ω	Vitesse angulaire.
P	Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.
Cr	Couple résistant.
f	Coefficient de frottement.
Jt	Inertie de la turbine.
Jg	Inertie de la machine.
J	Inertie totale de l'éolienne.
C_1, C_2, C_3	fonctions des caractéristiques de la pompe.
ρ	La masse volumique de l'eau (1000kg/m^3).
np	Rendement de la pompe.
Pp	Puissance mécanique de la pompe.
Pu	Puissance utile.
λ	Coefficient de pertes de charges linéaires.
D	Diamètre de la tuyauterie (m).
L	Longueur de la tuyauterie (m).
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2).
v	Vitesse moyennes du fluide (m/s) qui est donnée par

Liste des figures

Chapitre I : État de l'art sur l'énergie éolienne

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent3

Figure I.2 : Capacité éolienne installée mondiale4

Figure I.3 : Cartographique des grandes régions de vent en Algérie5

Figure I.4 : Eolienne à axe vertical6

Figure I.5 : Eolienne à axe horizontal.....7

Figure I.6 : Types d'éoliennes à axe horizontal.....8

Figure I.7: Evolution de la taille des éoliennes9

Figure I.8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne10

Figure I.9 : Principales composants de l'éolienne à axe horizontal11

Figure I.10 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.....12

Figure I.11: Zone de fonctionnement d'une éolienne13

Figure I.12 : Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction de λ16

Figure I.13 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p 17

Figure I.14 : Variation de la vitesse du vent.....17

Figure I.15 : Variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse.....18

Figure I.16 : Classification des générateurs19

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Figure II.1 : Vitesse du vent en fonction du temps22

Figure II.2 : Eolienne connectée à une génératrice.....23

Figure II.3 : Caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$24

Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine26

Figure II.5 : Représentation symbolique de la MSAP.....27

Figure II.6 : Représentation de la MSAP dans le repère dq	29
Figure II.7 : Schéma électrique D'un redresseur triphasé non commandé.....	32
Figure II.8 : Schéma électrique d'un hacheur Boost	33
Figure II.9 : chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost	34
Figure II.10 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	34
Figure II.11 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	35
Figure II.12 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé	35
Figure II.13 : pompe centrifuge	36
Figure II.14 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.....	39
Figure II.15 : Principe de la méthode de lambda optimal (TSR).....	40
Figure II.16 : Principe de contrôle HCS.....	41
Figure II.17 : Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de tension	41
Figure II.18 : Organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance	43

Chapitre III : La Commande prédictive

Figure III.1 : Principe de la commande prédictive à modèle interne de référence.....	44
Figure III.2 : Diagramme du modèle prédictif de courant.....	46
Figure III.3 : Circuit d'alimentation de l'onduleur de source de tension	47
Figure III.4 : Vecteurs spatiaux de tension pour différents états de commutation.....	48
Figure III.5 : Vecteurs de tension générés par l'onduleur	48
Figure III.6 : Schéma bloc de contrôle prédictif de vitesse	49
Figure III.7 : Schéma électrique d'un hacheur boost	51
Figure III.8 : Hacheur boost, interrupteur S (ouvert et fermé).....	52
Figure III.9 : Réponse de la vitesse de rotation	54
Figure III.10 : Réponse du couple électromagnétique.....	55
Figure III.11 : Réponse des courants statoriques i_{abc}	56

Figure III.12 : Réponse des courants i_{dq}	56
 Chapitre IV : Simulation du système de pompage éolien	
Figure IV.1 : Schéma de pompage d'eau à vent	58
Figure IV.2 : Structure générale de la chaîne éolienne	59
Figure IV.3 : Profil de la vitesse du vent	60
Figure IV.4 : Puissance aérodynamique et la puissance de la pompe.....	60
Figure IV.5 : Vitesse de rotation du moteur	61
Figure IV.6 : Couple électromagnétique	61
Figure IV.7 : Courants statoriques i_{abc}	62
Figure IV.8 : Hauteur H.....	63
Figure IV.9 : Débit Q.....	63
Figure IV.10 : Profil de la vitesse du vent	64
Figure IV.11 : Puissance aérodynamique et la puissance de la pompe	64
Figure IV.12 : Vitesse de rotation du moteur	65
Figure IV.13 : Couple électromagnétique.....	65
Figure IV.14 : Courants statoriques i_{abc}	66
Figure IV.15 : Hauteur H.....	66
Figure IV.16 : Débit Q.....	67

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes9

Tableau I.1 : Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable14

Introduction générale



La demande mondiale en sources d'énergie propres et durables augmente rapidement. Dans ce contexte, l'énergie éolienne s'est imposée comme un leader pour l'avenir de la production d'électricité. Les éoliennes, piliers des systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE), captent efficacement l'énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie électrique utilisable. Ce processus de conversion joue un rôle crucial dans notre transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable [01].

Cependant, la variabilité inhérente et l'incertitude de la vitesse du vent présentent des défis importants. Les fluctuations de la vitesse du vent peuvent avoir un impact significatif sur la production d'électricité, introduire des contraintes mécaniques sur les composants de l'éolienne et compromettre l'efficacité globale du système. Les méthodes de contrôle traditionnelles peinent souvent à s'adapter efficacement à ces conditions dynamiques [02].

Les stratégies de contrôle conventionnelles pour les SCEE reposent généralement sur des techniques telles que le contrôle proportionnel-intégral-dérivé (PID). Bien que ces méthodes aient joué leur rôle par le passé, elles présentent des limitations face à la nature dynamique et imprévisible de l'énergie éolienne. Les algorithmes de contrôle PID fonctionnent en se basant sur les états passés et présents du système, offrant une capacité limitée à anticiper les futures variations de la vitesse du vent. Cette approche réactive conduit à une extraction d'énergie sous-optimale et à des problèmes de stabilité potentiels dans des conditions de vent changeant rapidement [03].

Le contrôle prédictif émerge comme un outil puissant pour pallier les lacunes des méthodes de contrôle traditionnelles dans l'énergie éolienne. Contrairement aux approches réactives, le contrôle prédictif utilise un modèle du système pour anticiper le comportement futur en se basant sur les mesures disponibles et les données historiques. Cette approche proactive permet au système de contrôle d'optimiser les actions de contrôle à l'avance, permettant aux SCEE de s'adapter efficacement aux fluctuations des conditions de vent [04].

Notre projet de fin d'études consiste à Commande prédictive d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Ce travail est organisé comme suit :

- Le premier chapitre parle sur État de l'art sur l'énergie éolienne, tel que la définition, le principe de fonctionnement, les types, les caractéristiques et enfin les avantages et les inconvénients.
- Le deuxième chapitre consiste à modélisation les éléments de la chaîne de conversion et les différentes méthodes de MPPT
- Le troisième chapitre parle sur les différents types de la commande prédictive à base de courant et de vitesse, ainsi que le modèle mathématique de chaque type de commande
- Le quatrième chapitre a été consacré à la simulation de la chaîne et interprétations des résultats de simulation

Chapitre I
État de l'art sur l'énergie
éolienne



I.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers ou transformée au moyen d'un dispositif par exemple aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne tels que la définition, le principe de fonctionnement, les types, les caractéristiques et enfin les avantages et les inconvénients.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.1).

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyenne fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance.

I.3. Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée par la flotte navale, les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau [06].

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 4000 ans avant Jésus-Christ. L'homme apprend à maîtriser le vent, les Chinois sont les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant Jésus-Christ. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge.

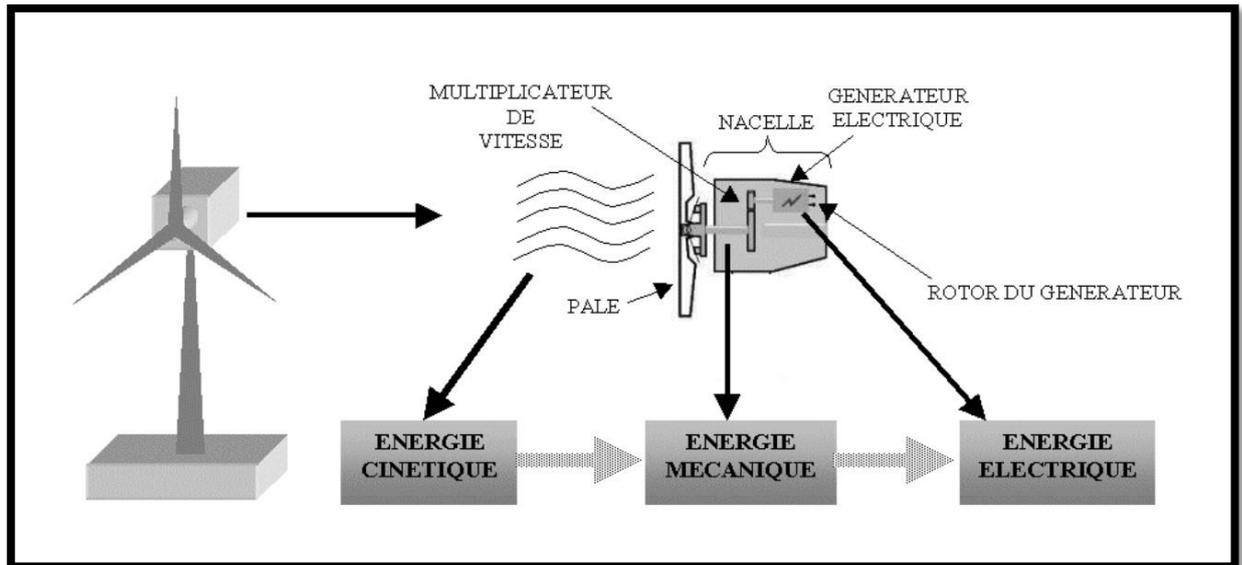


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

- **VII^{ème} siècle :** Utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain
- **L'an 1100 :** les premières éoliennes sont construites en Europe, elles sont inspirées de celle de Perse rencontrées lors des croisades ; et sont utilisées pour pomper l'eau et moulin le blé, ces moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal.
- **Dès le XIV^{ème} siècle :** des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique (la poussée) et la vitesse du rotor.
- **Au début du XVIII^{ème} siècle :** les turbines éoliennes font leur apparition au Canada grâce aux colons qui les utilisent pour moulin le grain. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé à plus de 30000 et dans toute l'Europe aux environs de 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent à disparaître progressivement.

Pendant la première moitié du XX^e siècle, les éoliennes sont confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique. En raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient

Ces dernières années, l'éolienne s'est surtout développée en Europe. Cette énergie est celle qui progresse le plus vite dans le monde, ceci en rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire, ce qui n'est pas le cas du charbon.

I.4. Production mondiale de l'énergie éolienne

La WWEA(World Wind Energy Association) a recueilli des statistiques sur les nouvelles installations éoliennes au cours des six premiers mois de 2023. Sur la base d'une enquête menée auprès des associations membres de la WWEA du monde entier, la WWEA a été en mesure de publier une estimation des installations mondiales à ce jour et une prévision pour la fin de 2023 (Fig. I.2).

Alors qu'au premier semestre 2022, 29,8 Gigawatt ont été ajoutés, le monde a installé 41,2 Gigawatt au cours de la même période de 2023, soit 38 % de plus qu'en 2022. Cela équivaut à un taux de croissance annuel de 11,4 %, si l'on compare la capacité installée totale fin juin 2022 et fin juin 2023.

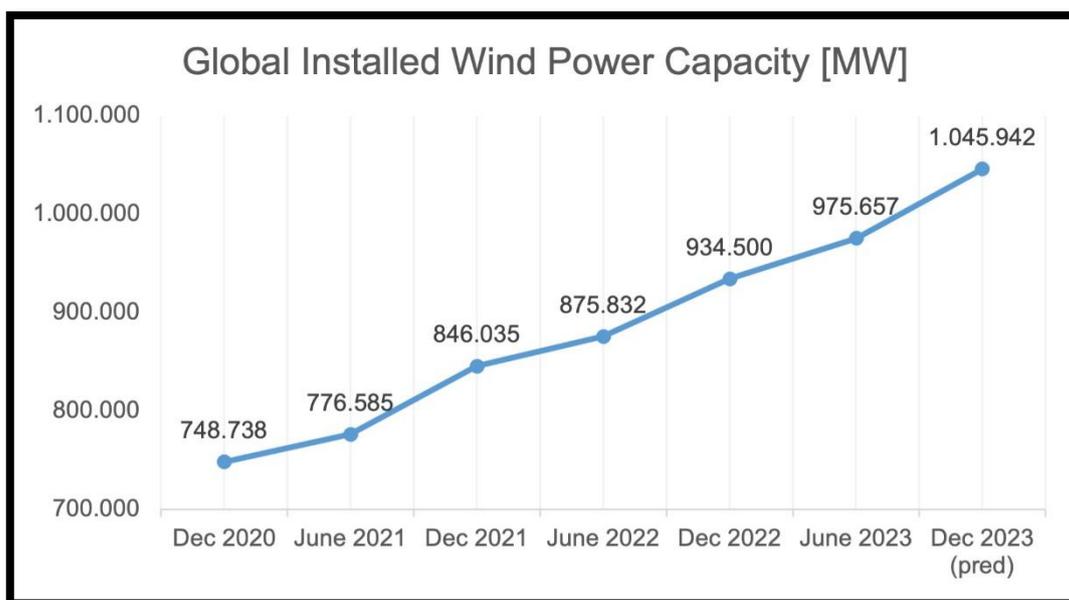


Figure I.2: Capacité éolienne installée mondiale [MW]

Avec cela, la capacité installée mondiale s'élevait à 976 Gigawatt en juin 2023, dont 100 Gigawatt ont été ajoutés au cours des douze mois de juillet 2022 à juin 2023. Le secteur affiche clairement une croissance plus dynamique au premier semestre 2023, avec une croissance semestrielle de 4,4 %, contre 3,5 % au premier semestre 2022 [07].

I.5. Energie éolienne en Algérie

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une présentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. La seconde est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers les pays [08]. L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar (Fig. I.3).

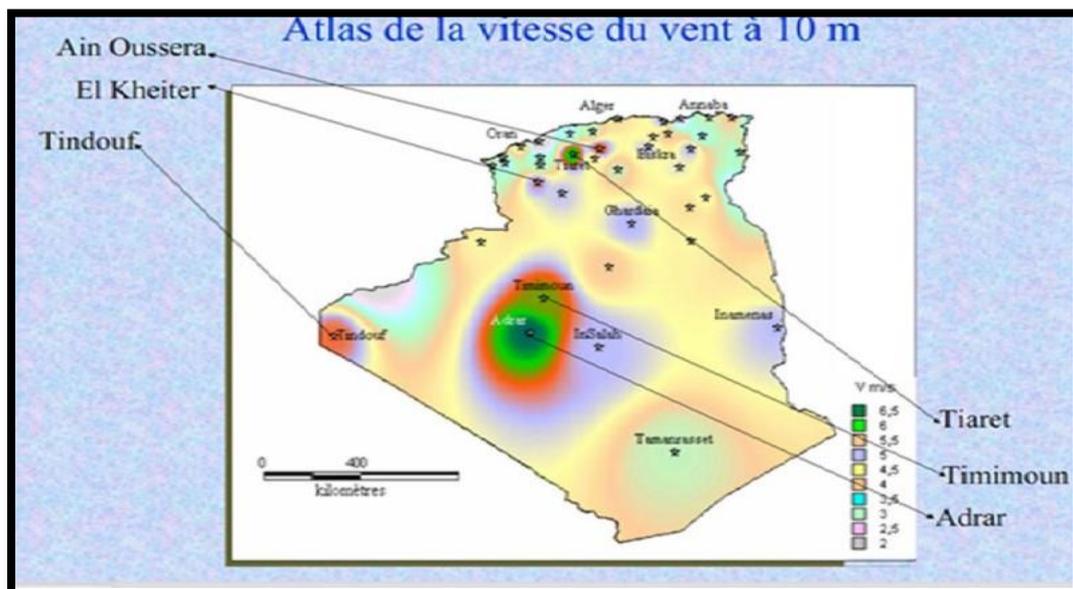


Figure I.3 : Cartographique des grandes régions de vent en Algérie [08].

Cette carte présente les zones les plus ventées pour installer des parcs éoliens qui permet d'alimenter des régions isolées. La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ [08].

I.6. Différents types d'éolienne

Il existe deux types fondamentaux d'éoliennes, selon la géométrie de l'arbre sur lequel est fixée l'hélice.

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal.

I.6.1. Eoliennes à axe vertical

Les recherches sur ce type d'éoliennes sont nombreuses, car il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et sa chaîne de conversion (multiplicateur mécanique et générateur) se trouve au niveau du sol, ce qui facilite les interventions de maintenance. Trois structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, à savoir : le rotor Savonius, le rotor Darrieus et le rotor en H (ou rotor de Musgrove) (Fig. I.4)[09]

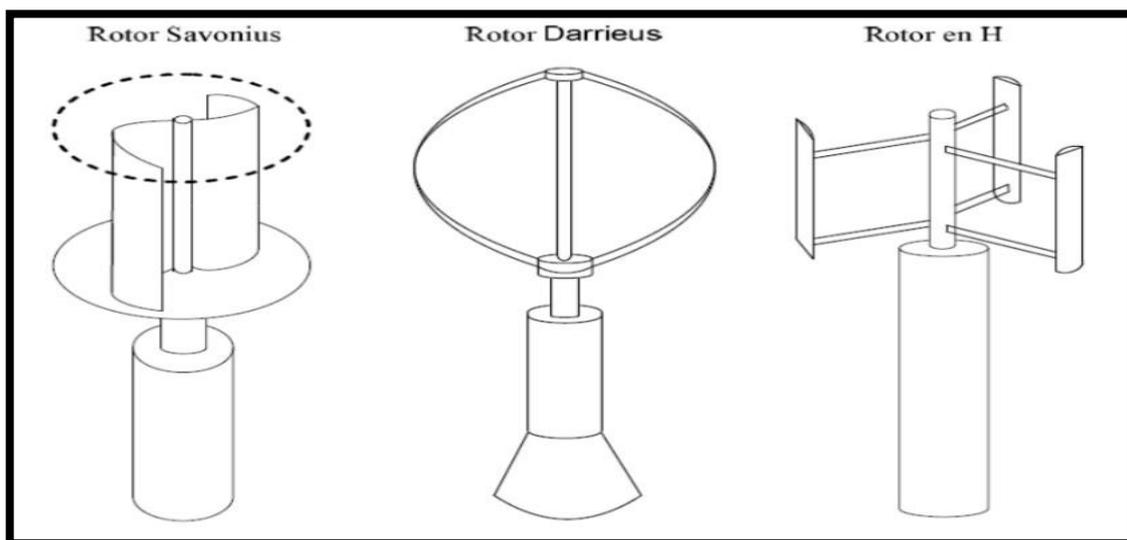


Figure I.4: Eoliennes à axe vertical

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [10]

Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [10]

I.6.2. Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales et une nacelle regroupant toute la chaîne de conversion. Le gros avantage de cette structure est son rendement aérodynamique plus élevé que celui de l'éolien à axe vertical. En plus, elle peut démarrer de façon autonome et présente un faible encombrement au niveau du sol. Les différentes constructions des aérogénérateurs à axe horizontal utilisent des voilures à deux pales, trois pales (les plus courantes, ou multi-pales) (Fig. 1.5) [09]



Figure I.5 : Eoliennes à axe horizontal

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal comme le montre la Figure (1.6) [09].

- **Amont (Upwind) :**

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif, (gouvernail pour les très petites puissances et système actif pour les grandes puissances).

- **Aval (DownWind) :**

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Bien que le rotor de cette structure soit auto-orientable, la disposition en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs rendements et une bonne stabilité pour les fortes puissances.

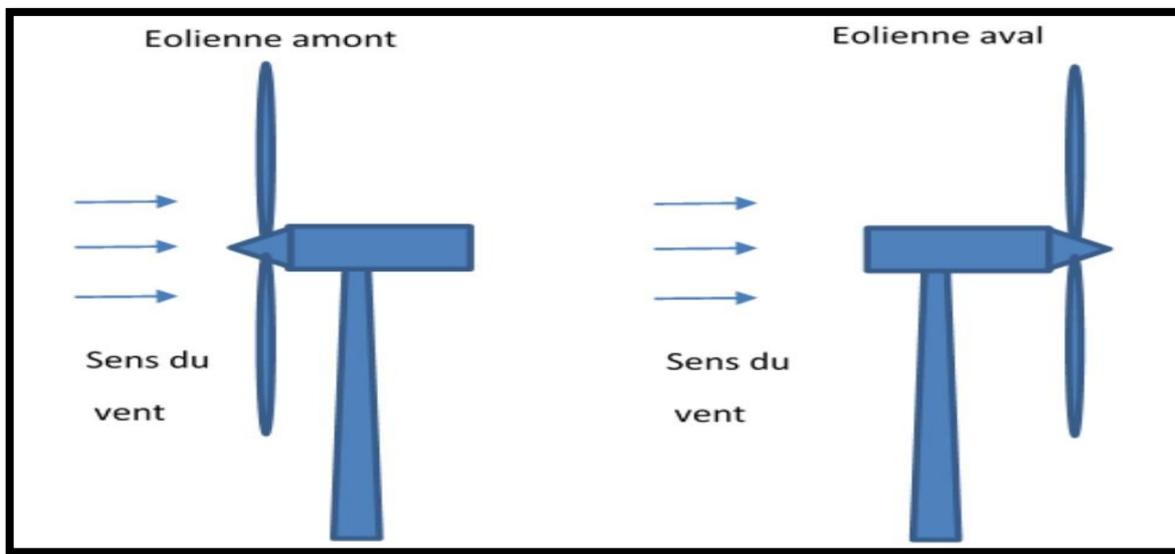


Figure I.6 : Types d'éoliennes à axe horizontal

Avantage

Parmi les avantages on a :

- Rendement élevé
- Moins chères
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage [10]

Inconvénients

L'inconvénient majeur est la conception la plus complexe à exiger en raison du besoin de commandes des pales. Cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [10]

I.7. Taille des éoliennes

Face à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique mondiale, les constructeurs ont la tendance de produire des turbines éoliennes de plus en plus puissantes et donc de plus grandes tailles, puisque la puissance captée par la turbine est fonction du carré du rayon du rotor (Fig. I.7). Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories, Le Tableau (1.1) montre cette catégorisation [5]:

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes [11]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

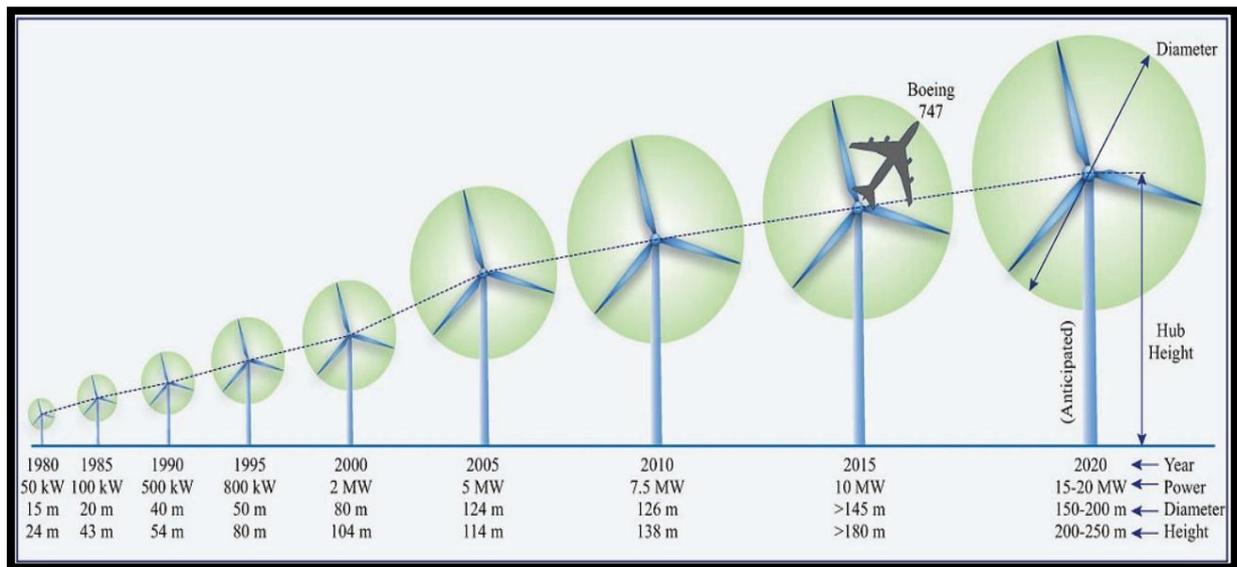


Figure I.7 : Evolution de la taille des éoliennes [12].

I.8. Constitution d'une éolienne

I.8.1.Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes : au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie

cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc avoir une conversion et transmission régulière de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine [13].

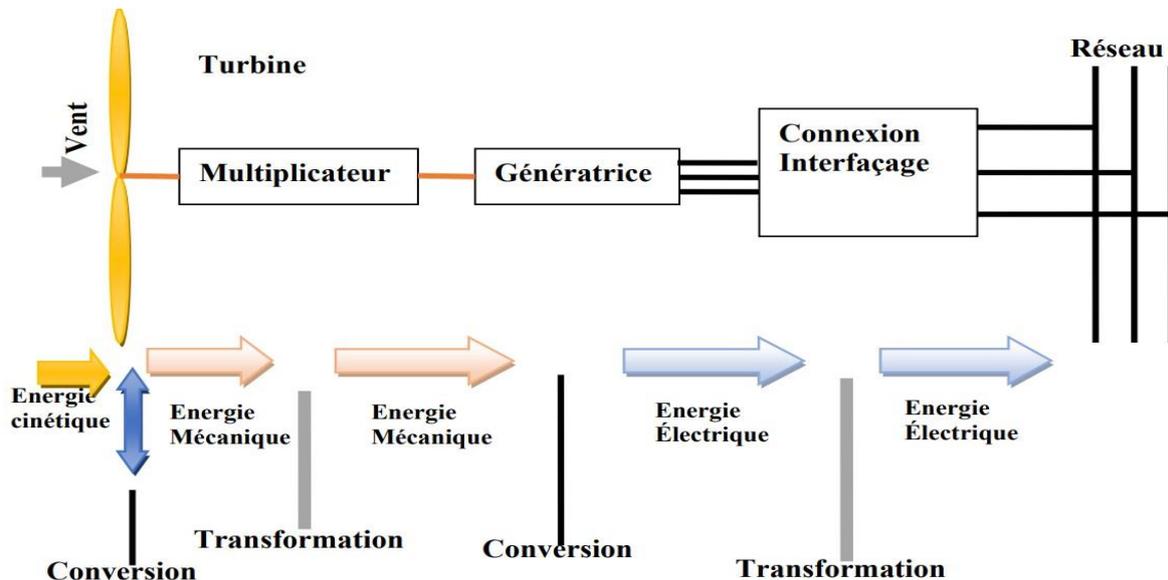


Figure I.8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

I.8.2. Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

En générale, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat) la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu (Fig. I.9).

Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur),[14].

Une nacelle :

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles

électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. Les différents composants d'une nacelle (Fig. I.10).

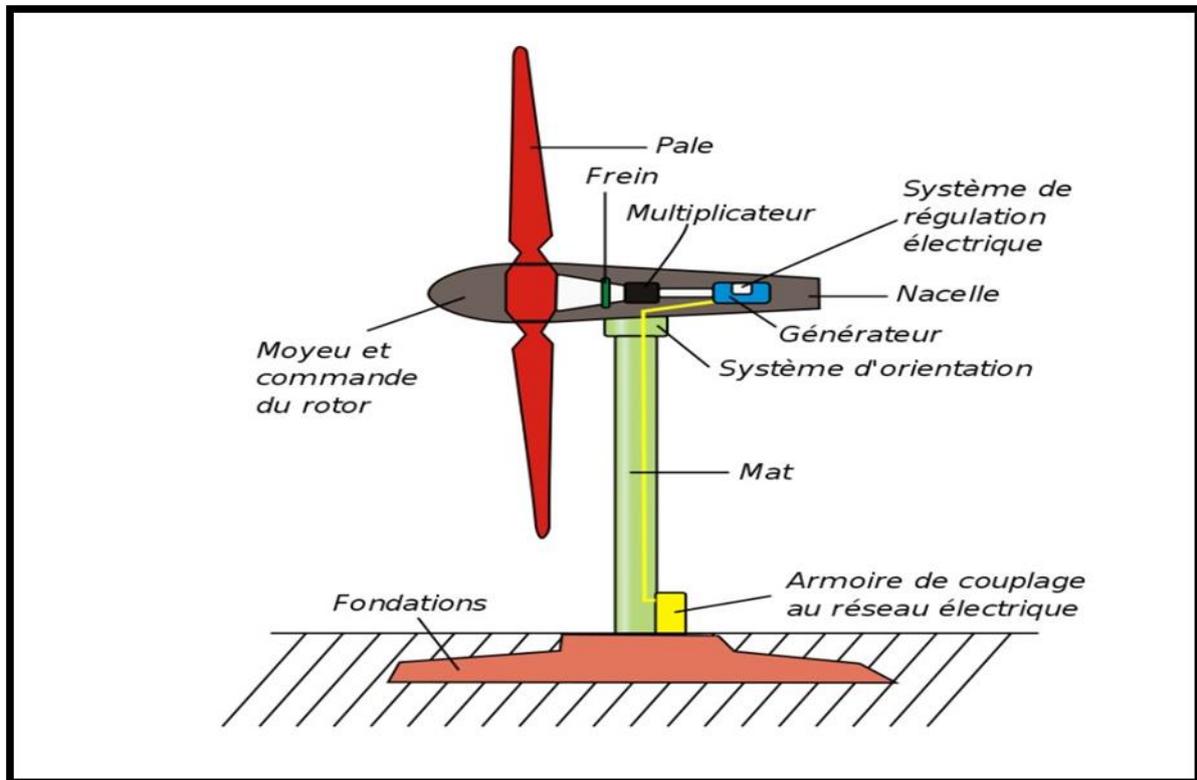


Figure I.9 : Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal.

- ✓ **Le multiplicateur de vitesse :** il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ✓ **L'arbre secondaire :** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ✓ **La génératrice :** c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique
- ✓ **Divers dispositifs de refroidissement :** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu [14].

Les pales :

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité [15].

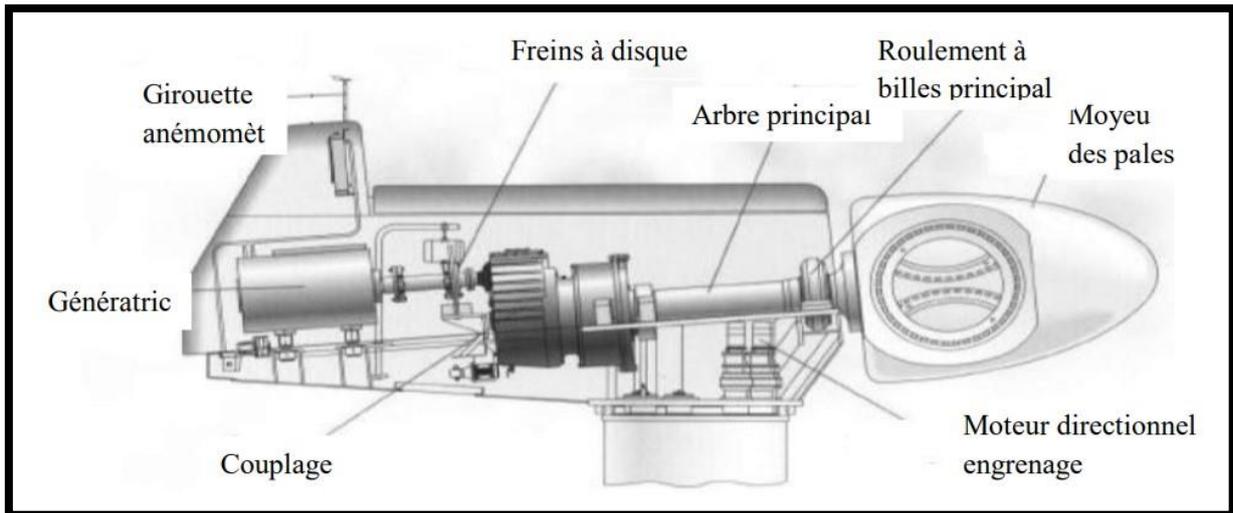


Figure I.10 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

Le moyeu :

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent[15].

I.9. Zone de fonctionnement d'une éolienne

L'éolienne comme toutes autres machines, elle a des caractéristiques qui déterminent son comportement en fonctionnement nominal, mais ces caractéristiques ne sont pas toujours respectées à cause de la variation de la vitesse du vent. Des stratégies sont appliquées pour l'extraction de la puissance maximale disponible en cas de fonctionnement en dehors des paramètres nominaux de cette dernière. La figure I.11, représente la caractéristique de la turbine éolienne, qui est la puissance extraite par la turbine du vent en fonction de la variation de la vitesse de vent[16].

Zone I : $V < V_D$:

La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie captée est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_n$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite (appelées généralement MPPT).

Zone III : $V_2 < V < V_M$:

La puissance incidente devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de point de fonctionnement nominal. Cette phase correspond au fonctionnement dit « à pleine charge ».

Zone IV : $V > V_M$:

La vitesse du vent devient trop forte pour les capacités opérationnelles de l'installation. La turbine est donc arrêtée et la puissance extraite est nulle.

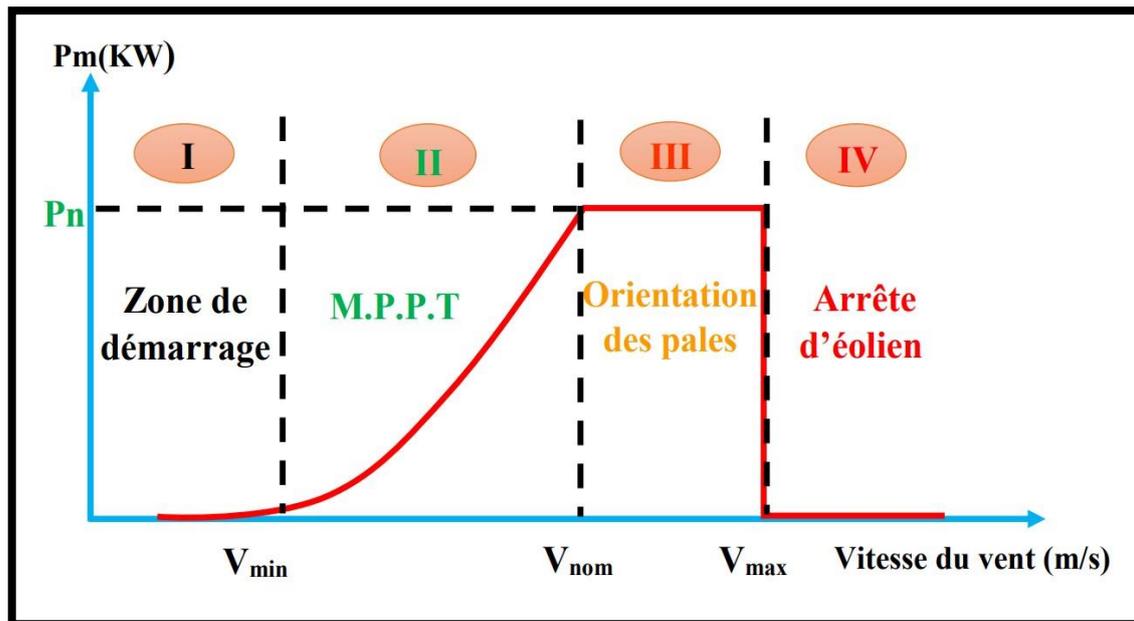


Figure I.11 : Zone de fonctionnement d'une éolienne.

I.10. Eoliennes à vitesse fixe et variable

I.10.1. Eolienne à vitesse fixe

Une éolienne à vitesse fixe désigne le fait que le rotor de celle-ci possède toujours la même vitesse angulaire d'opération, peu importe la vitesse du vent. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ce type d'éolienne n'offre pas la possibilité du réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

I.10.2. Eolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du

réseau électrique. Les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le montre le Tableau (I.2), les principaux avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevée, une énergie électrique de bonne qualité, ne présentant aucune nuisance pour le réseau électrique ainsi que le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique.

Tableau I.2: Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable [17].

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Simple, robuste, fiable - Faible coût de construction et maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement de conversion d'énergie faible - Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure - Fluctuation importante de la puissance
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fort rendement de conversion d'énergie - Puissance électrique de meilleure qualité - Stress mécanique réduit 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs - Contrôle du système plus compliqué

I.11. Principe de conversion de l'énergie éolienne

I.11.1. La puissance du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre. L'énergie cinétique des particules d'air d'une masse m et qui se déplacent à une vitesse V est donnée par [18] :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

E_c : L'énergie cinétique en (joule).

V : La vitesse du vent en (m/s).

m : La masse de l'air en (Kg).

Si on applique cette relation sur les éoliennes donc on doit préciser sur la masse qui tourne les pâles de l'éolienne, cette masse est donnée par la formule :

$$m = \rho V_{oL} \quad (I.2)$$

Avec :

ρ : la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1,25 (Kg/m³)

V_{oL} : le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en (m³) donné par

$V_{oL} = S e$, où S est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²) et e est l'épaisseur des pâles en (m)

Donc on peut introduire l'énergie théoriquement récupérable par les éoliennes donnée par la formule :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho S e V^2 \quad (I.3)$$

Sachant que la puissance P est donnée par: $p = \frac{E}{T}$ et $\frac{e}{T} = V$, donc la formule (I.1) s'écrit :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.4)$$

Avec :

P : La puissance en watts (W)

E : L'énergie en joule (j)

T : Le temps en seconde (s)

ρ : La masse volumique de l'air en (Kg/m³)

S : La surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m²)

V : La vitesse du vent primaire en (m/s)

Ce qui nous montre que la puissance absorbée de l'éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et de carrée de rayon de rotor (la longueur de la pale). Une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent donc il y a un coefficient que nous sommes obligées d'en tenir compte dans notre formule c'est le coefficient de puissance C_p .

Donc la formule (I.4) sera [19] :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.5)$$

Ce coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines car il est proportionnel à la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β (l'angle du vent par rapport à l'axe de pale). La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne est donnée par la formule : $v = R \Omega$

Avec :

v : C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

R : La longueur des pales en (m)

Ω : La vitesse angulaire des pales en (rad/s)

Les éoliennes ont différentes longueurs de pales donc chaque éolienne est caractérisée par sa vitesse résultante de déplacement des pales. On peut introduire maintenant le rapport entre cette vitesse v et la vitesse du vent primaire par la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{v} \quad (I.6)$$

Cette vitesse est une caractéristique importante pour les éoliennes, chaque éolienne a sa vitesse spécifique nominale (λ_{nom}) et d'après cette vitesse on peut classer les éoliennes. (Figure. I.12)

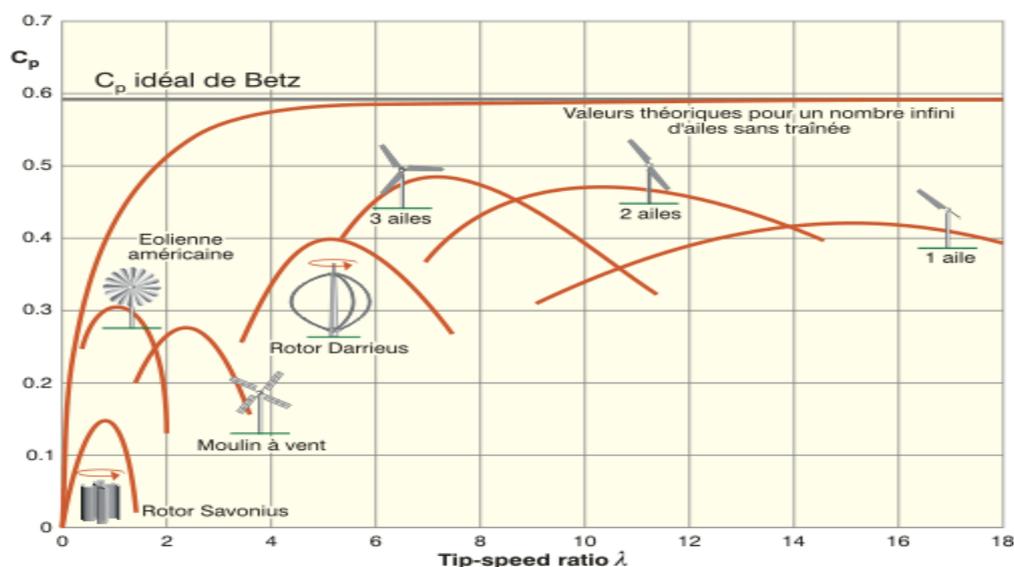


Figure I.12 : Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction de λ

Les éoliennes tri pales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent égale à 3 m/s.

L'autre paramètre qui influe sur le coefficient de puissance est l'angle de calage β . La figure I.13 illustre la variation du C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β .

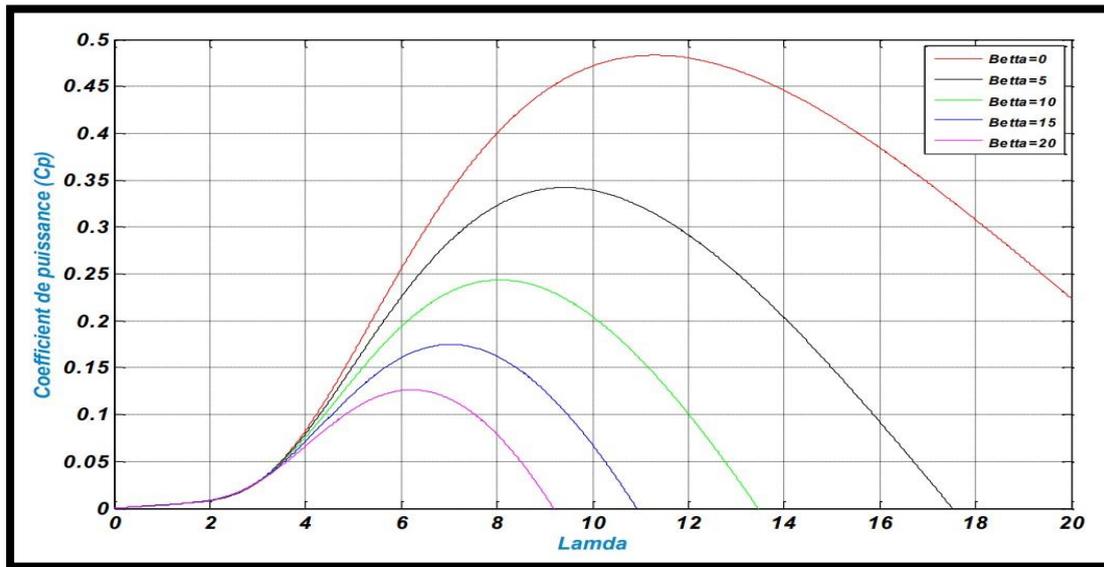


Figure I.13 : Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

I.11.2. Limite de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure I.14 sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor v_2 soit $V = \frac{v_1 + v_2}{2}$ [20].

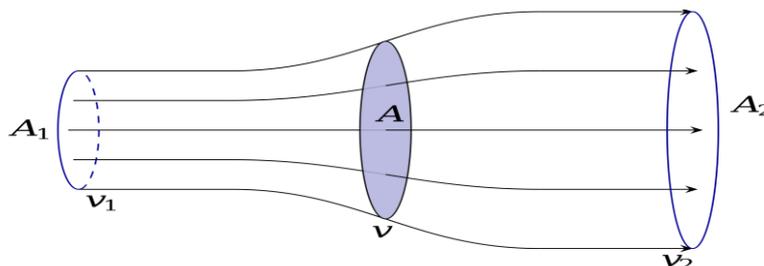


Figure I.14 : Variation de la vitesse du vent

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (I.7)$$

P_0 : est la puissance totale d'un flux d'air non perturbé en watts (W)

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure I.15), on s'aperçoit que le ratio P_m / P_0 appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16 / 27$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ [20].

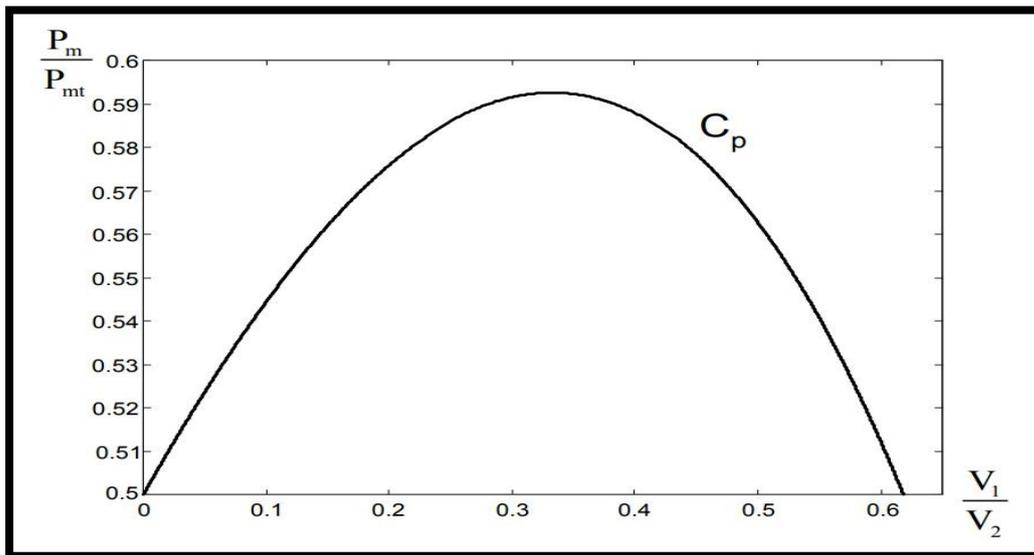


Figure I.15 : Variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse

I.12. Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Aujourd'hui, on utilise plus fréquente les turbines éoliennes pour la production d'électricité, c'est pourquoi l'utilisation d'une génératrice électrique est jugée indispensable. De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse fixe ou variable. Ces générateurs peuvent être classés selon différents aspects tels que (à vitesse constante ou à vitesse variable, avec ou sans convertisseur électronique de puissance et avec ou sans de multiplicateur de vitesse. La figure (I.1) montre la classification des générateurs utilisés dans un système éolien.

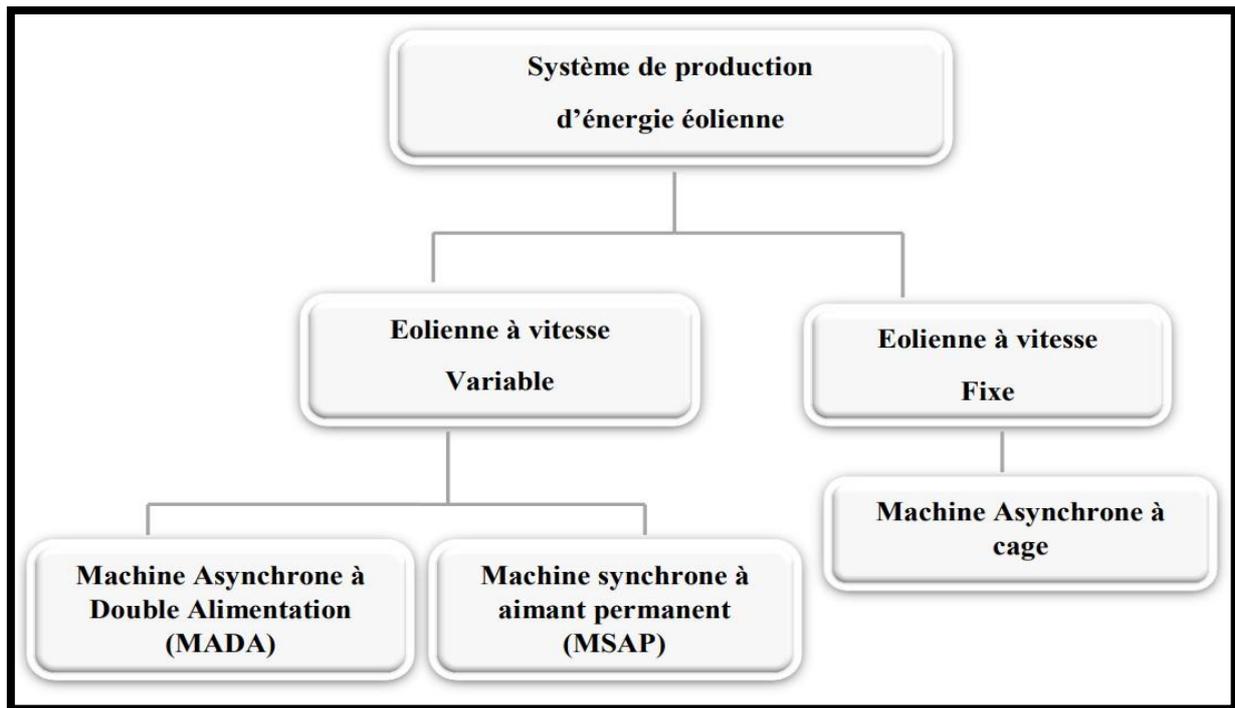


Figure I.16: Classification des générateurs [22].

I.12.1. Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones.

I.12.2. Avantages et les inconvénients

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique [24]:

I.12.2.1. Avantages

- Rendement et facteur de puissance élevés.
- Puissance massique importante
- Augmentation de la fiabilité.
- Absences des contacts glissants.

I.12.2.. Inconvénients

- Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante.
- Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne sont :

I.13.1. Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées. Contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant

I.13.2. Inconvénients de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie dépendante de mouvement des masses d'airs donc elle est irrégulière (intermittente).
- L'éolienne a des effets sur le paysage (au niveau de l'esthétique).
La pollution visuelle et sonore, l'éolienne produit de bruit à 500 mètres de distance et le volume sonore d'environ 35 décibels
- Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

- La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations [26].

I.14. Conclusion

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la vitesse du vent en électricité. Dans ce chapitre nous avons donné une brève présentation de l'énergie éolienne, le gisement éolien Algérien a été brièvement présenté ainsi que les différents types des éoliennes, le principe de fonctionnement d'une éolienne et enfin les avantages et les inconvénients l'énergie éolienne. Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation de toute la chaîne de conversion éolienne de petite puissance.

Chapitre II
Modélisation de la chaîne
de conversion éolienne



II.1. Introduction

Après avoir présenté les différents types d'éoliennes, et les systèmes de conversion d'énergie éolienne, on s'intéresse dans cette partie à modéliser les éléments de la chaîne de conversion constituée d'une turbine éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), redresseur, hacheur Boost, onduleur de tension et le groupe MSAP- pompe. Nous terminerons ce chapitre par la présentation de quelques techniques de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

II.2. Modélisation du vent

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par (II.1)

$$Vv(t) = A + \sum_{k=1}^i a \sin(\omega t) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ω : pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

La figure II.1 représente la vitesse du vent simulée par l'équation :

$$v(t) = 9 + 0.2\sin 0.1047t + 2\sin 0.2665t + \sin 1.2930t + 0.2\sin(3.6645t)$$

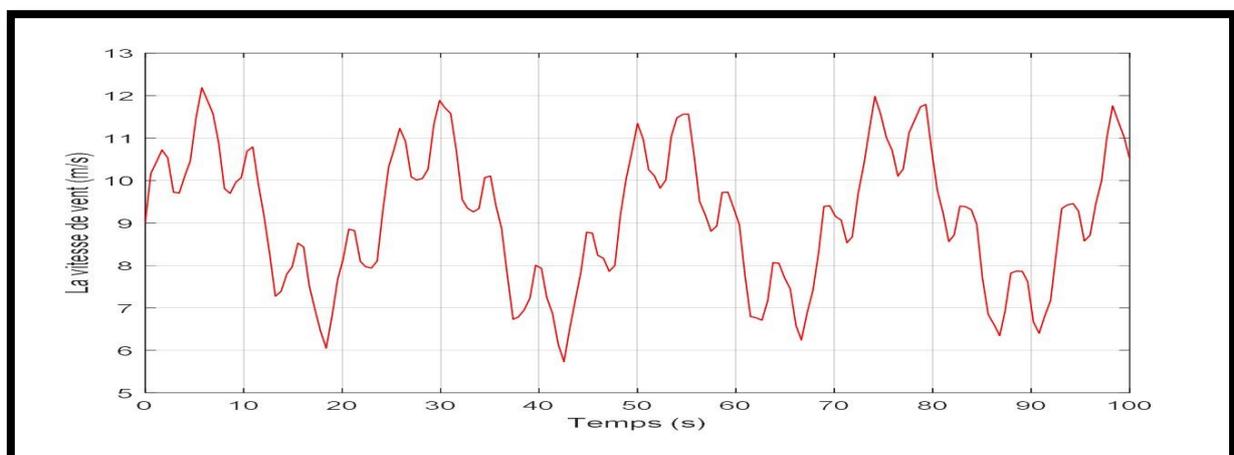


Figure II.1 : Vitesse du vent en fonction du temps

Cette figure montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (100s) entre deux valeurs ($V=12\text{m/s}$) comme valeur maximale et ($V= 6\text{m/s}$) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

II.3. Modèle de la turbine

Le modèle de la turbine doit décrire la dynamique mécanique réelle de la turbine, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Une turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique (Fig. II.2)[28].

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissances C_p :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent} \quad (\text{II. 2})$$

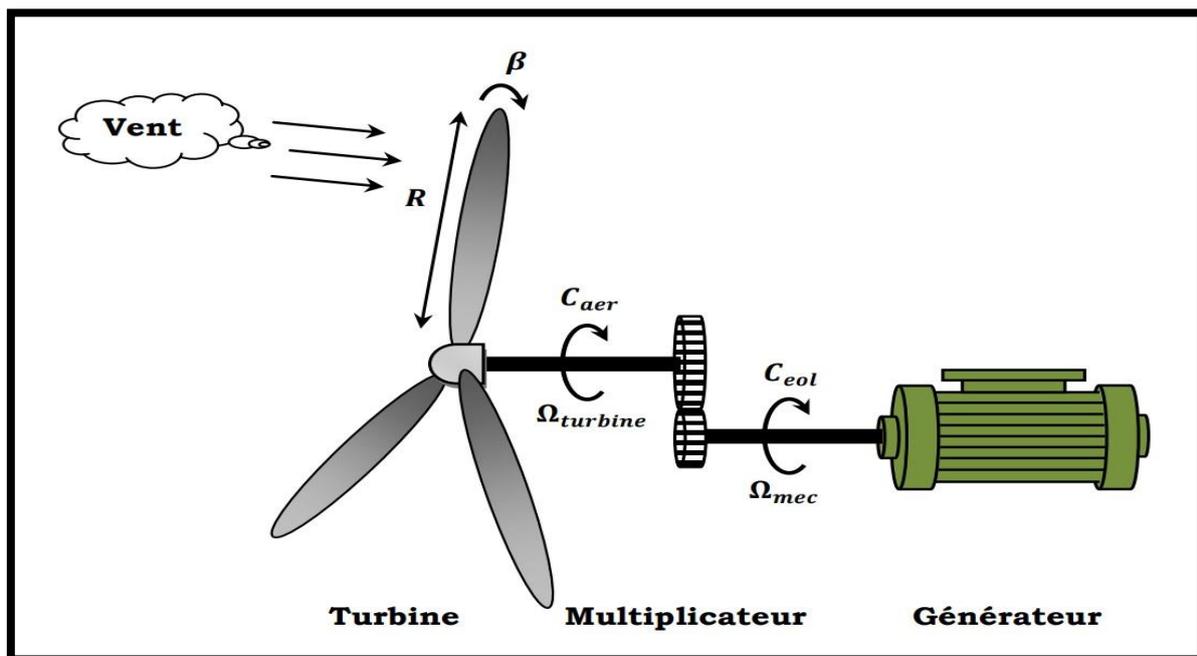


Figure II.2 :Eolienne connectée à une génératrice.

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$. Le coefficient C_p différé pour chaque éolienne dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{v} \quad (\text{II. 3})$$

La puissance récupérée par l'éolienne est déterminée par l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{2} C_p (\lambda \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

- C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance.
- ρ : La masse volumique de l'air ($\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$).
- R : Le rayon de la turbine.
- V : La vitesse moyenne au niveau de la turbine.
- λ : La vitesse spécifique.
- V : Vitesse du vent [m/s].
- R : Rayon d'une pale de la turbine [m].

Plusieurs approximations numériques ont été développées dans la littérature pour déterminer une expression du coefficient C_p . On cite parmi ces approximations celles parus respectivement dans la référence [29].

Première expression :

$$C_p = \frac{1}{2} (\gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\gamma} \quad (\text{II. 5})$$

Où : $\gamma = \frac{9VW}{4\Omega}$, γ est le rapport de vitesse périphérique.

et β représente l'angle d'attaque de la pale en degré

Deuxième expression :

$$C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda'} - 0.58 - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{18.5}{\lambda'}} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}$$

Troisième expression :

$$C_p = (0.44 - 0.167\beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15(0.3\beta)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta \quad (\text{II. 7})$$

Quatrième expression :

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{115}{\lambda'} - 0.4 \cdot \beta \right) - e^{\frac{21}{\lambda'}} + 0.0068\lambda \quad (\text{II. 8})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Cette dernière expression fait partie de la bibliothèque de SIMULINK, et donc sera celle utilisée pour valider le modèle notre système éolien. La courbe de cette dernière formule est donnée par la (Figure II.3) Plusieurs courbes sont représentées sur cette figure dépendant de l'angle d'attaque β .

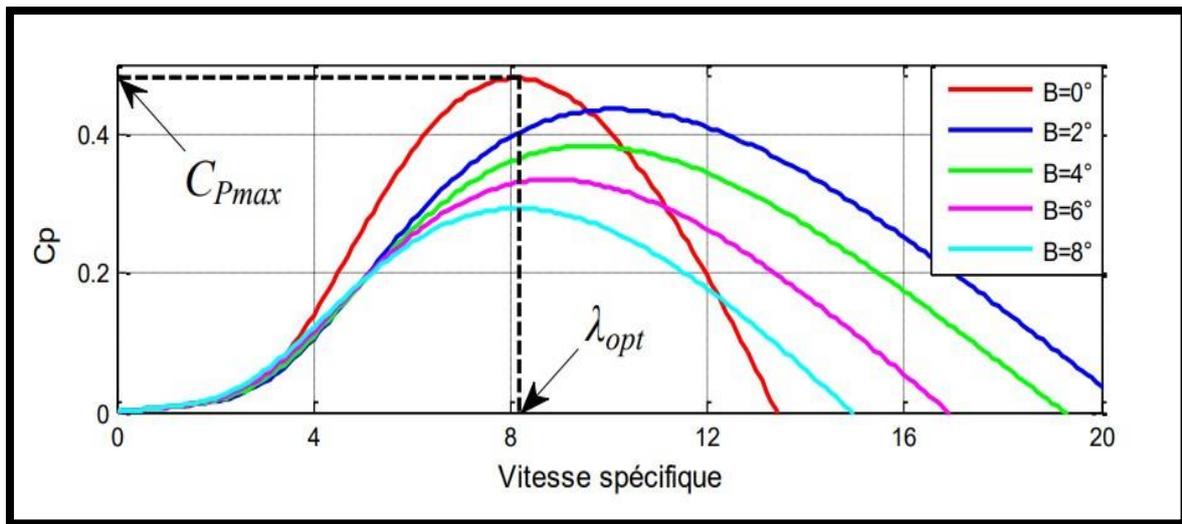


Figure II.3 : Caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$.

Le modèle le plus basique consiste à supposer un fonctionnement quasi-statique en mode générateur de couple éolien C_{eol} . Une équation du générateur de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l'expression(II.9) :

$$C_{eol} = C_{mec} = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} R^3 V^2 \tag{II.9}$$

II.4.Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice

II.4.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur (Fig. II.4). Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [30]:

$$Gg = \frac{Gt}{G} \tag{II.10}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.11}$$

Où :

Gg: Couple issu du multiplicateur.

Ω_{mec} : Vitesse mécanique du générateur (rad/s)

G: Gain du multiplicateur.

II.4.2. Équation mécanique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique considère l'inertie totale J_t constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_t}{G} + J_g = cet \tag{II.12}$$

L'absence de multiplicateur de vitesse se justifie par la génératrice synchrone à aimants permanents retenue qui possède un grand nombre de paires de pôles [31].

$$\begin{cases} Ct - Cme - f \nu \Omega_g = J_t \frac{d\Omega_g}{dt} \\ \frac{\Omega_t}{G} = \Omega_g \\ J_t = J_{pales} + J_g + J_{arbre} = Cet \end{cases} \tag{II.13}$$

Avec :

$Cm = f \nu \Omega_g$: Couple de frottement.

$f \nu$: Coefficient de frottements visqueux dans la génératrice

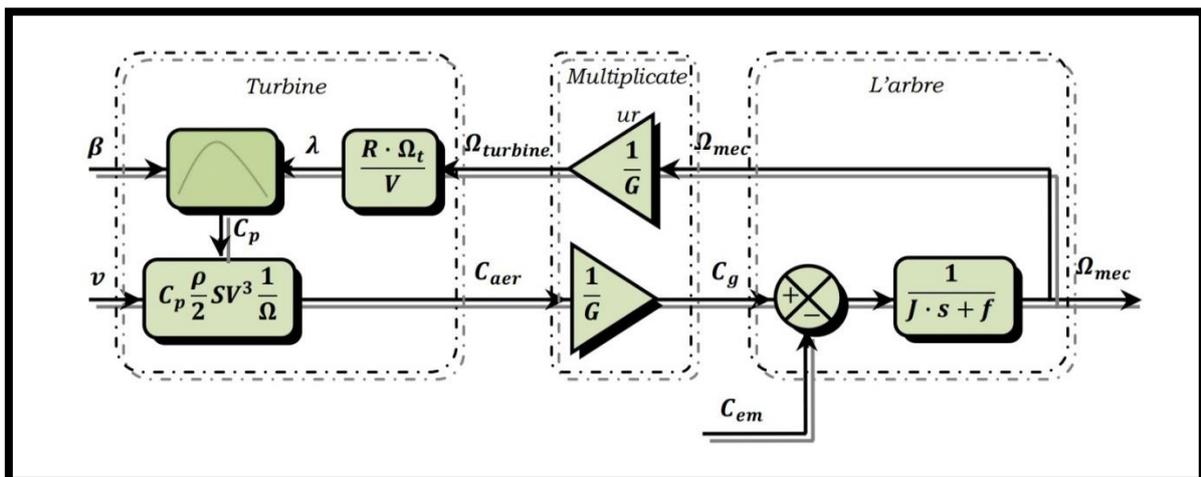


Figure II.4 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Le modèle mathématique de la MSAP est un système à six équations différentielles à coefficients variables, est un système d'équations très complexe à étudier. L'utilisation de la transformation de Park, sous certaines hypothèses simplificatrices, permet de contourner cette difficulté. Elle donne une représentation biphasée équivalente de la machine triphasée ce qui réduit considérablement la complexité du modèle en vue de commande [31].

II.5.1. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices admises dans le modèle de la machine synchrone à aimants permanents sont [28]:

- ✚ Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- ✚ La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases
- ✚ La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- ✚ Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- ✚ L'effet de peau et de la température est négligé.

II.5.2. Modèle de MSAP triphasée

La machine synchrone à aimants permanents est représentée par la Figure II.5. Elle se compose de trois enroulements statoriques décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$ et des aimants permanents qui créent l'excitation au rotor.

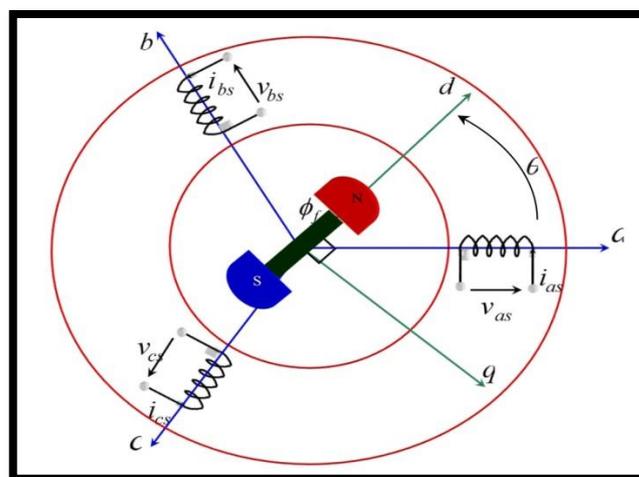


Figure II.5 : Représentation symbolique de la MSAP [31].

II.5.2.1 Equations électriques

L'ensemble des équations électriques régissant le fonctionnement de la machine est donné par :

$$\begin{cases} v_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

On peut aussi l'écrire sous la forme matricielle, comme [28] :

$$[v]_{abc} = [R_s][i]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi]_{abc} \quad (\text{II. 15})$$

Avec:

$[\mathcal{V}]_{abc} = \begin{bmatrix} \mathcal{V}_a \\ \mathcal{V}_b \\ \mathcal{V}_c \end{bmatrix}$: Vecteur des tensions statoriques ; $[i]_{abc} = \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix}$: Vecteur des courants statoriques

$[R_s] = \begin{bmatrix} Ra & 0 & 0 \\ 0 & Rb & 0 \\ 0 & 0 & Rc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix}$: Résistances des phases statoriques;

$[\varphi]_{abc} = \begin{bmatrix} \varphi a \\ \varphi b \\ \varphi c \end{bmatrix}$: Vecteur flux des phases statoriques

II.5.2.2 Equations des flux magnétiques

Les équations des flux s'écrivent :

$$[\varphi]_{acc} = [L_{ss}] \cdot [i]_{abc} + [\varphi_j] \quad (\text{II. 16})$$

$[L_{ss}]$: Matrice inductance (propre et mutuelle statoriques), donnée par

$$[L_{ss}] = [L_{so}] \equiv \begin{bmatrix} Ls_s & Ms_s & Ms_s \\ Ms_s & Ls_s & Ms_s \\ Ms_s & Ms_s & Ls_s \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

$[\varphi]$: Vecteur du flux créé par les aimants permanents.

L'expression des flux total dans les trois phases « a, b, c » est donnée par :

$$\begin{cases} \varphi a \\ \varphi b \\ \varphi c \end{cases} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{cases} ia \\ ib \\ ic \end{cases} + \begin{cases} \varphi fa \\ \varphi fb \\ \varphi fc \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

En remplaçant les expressions des flux total (II.19) dans le système (II.14), on obtient

$$\begin{cases} \mathcal{V}_a \\ \mathcal{V}_b \\ \mathcal{V}_c \end{cases} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{fa} \\ \varphi_{fb} \\ \varphi_{fc} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

$$[v]_{abc} = [R_s][i]_{abc} = [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i]_{abc} + \frac{d}{dt} [\varphi_f]_{acb} \quad (II.20)$$

$[\varphi]_{abc}$: Représente le vecteur des flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

Et pour :

$$\frac{d\varphi_{fa}}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = e_{fa} \cdot \omega_r \quad (II.21)$$

Avec :

e_{fa} : Force électromotrice produite dans la phase statorique a

ω_r : Vitesse électrique de rotation du rotor.

II.5.3. Transformation de Park

La transformation de Park physiquement, peut être expliquée par une transformation de trois enroulements dans un système triphasé (a,b,c) de la machine vers deux enroulements dans un système diphasées (d,q) et d'une composante homopolaire (o), qui n'est pas prise en compte dans le modèle usuel de la machine (système équilibré), la Figure II.6 illustre son principe.

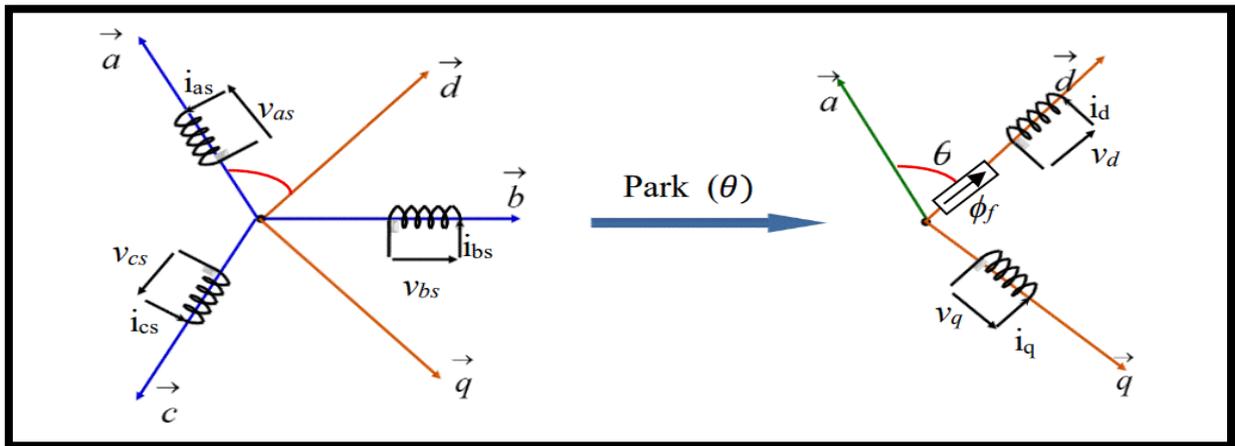


Figure II.6 : Représentation de la MSAP dans le repère dq

II.5.3.1 Matrice de Park qui conserve les amplitudes

La matrice de Park $P(\theta)$ qui conserve les amplitudes est la suivante

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

Cette matrice permet de passer du référentiel (abc) fixe lié au stator au référentiel (dq0) mobile avec une vitesse Ωr . Les sens des axes a,b,c sont obtenus à partir des axes (d, q) à travers la transformation inverse de Park $P^{-1}(\theta)$. La matrice inverse est donnée par :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

Cette matrice permet le passage inverse, c'est-à-dire du référentiel (dq) au référentiel (abc).

II.5.4 Equations de la machine dans le repère de Park

II.5.4.1 Equations des tensions

En appliquant la transformation de Park dans le système (II.14), on aura :

$$[V_{dq0}] = [p(\theta)][V_{abc}] = [p(\theta)][R_s][\hat{i}_{abc}] + [p(\theta)] \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (\text{II. 24})$$

D'où :

$$[V_{dq0}] = [p(\theta)] \cdot [R_s] \cdot [p(\theta)]^{-1} [i_{dq0}] + [p(\theta)] \cdot [p(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\varphi_{dq0}] + [p(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [p(\theta)]^{-1} \right) \cdot [\varphi_{dq0}] \quad (\text{II. 25})$$

Après simplification, le système (II.24) devient

$$[V_{dq0}] = [R_s][i_{dq0}] \frac{d}{dt} [\varphi_{dq0}] + w_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\varphi_{dq0}] \quad (\text{II. 26})$$

Le système est équilibré et neutre non relié, les équations statoriques de la machine dans le référentiel de Park s'écrivent donc :

$$\begin{cases} v_d = R_s \cdot i_d - w_r \cdot \varphi_q + \frac{d\varphi_d}{dt} \\ v_q = R_s \cdot i_q - w_r \cdot \varphi_d + \frac{d\varphi_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

II.5.4.2 Equation des flux

En appliquant la transformation (II.22) au système (II.16), on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

II.5.4.3 Equations du couple électromagnétique

L'équation du couple électromagnétique est donc :

$$C_{em} = \frac{p_{mec}}{\Omega_r} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II. 29})$$

Le modèle global de la machine MSAP convention moteur s'écrit :

$$\begin{cases} V_d = R_S i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - w_r L_q i_q \\ V_q = R_S i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + w_r (L_d i_d + i_q \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

En convention génératrice les sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park sont inversés, on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} V_d = -R_S i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d + w_r L_q i_q \\ V_q = -R_S i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - w_r (L_d i_d + i_q \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation.

II.5.4.4 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{II. 32})$$

Avec :

C_{em} : Couple électromagnétique (couple moteur).

C_r : Couple de charge (couple résistant).

f : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie.

p : Nombre de paires de pôles.

Ω : Vitesse de rotation mécanique de la MSAP.

II.6. Redresseur à diodes

La structure à étudier est le redresseur triphasé en pont avec l'indice de pulsation égal à six, son schéma est illustré dans la Figure II.7 Le pont redresseur étant alimenté par une source triphasée.

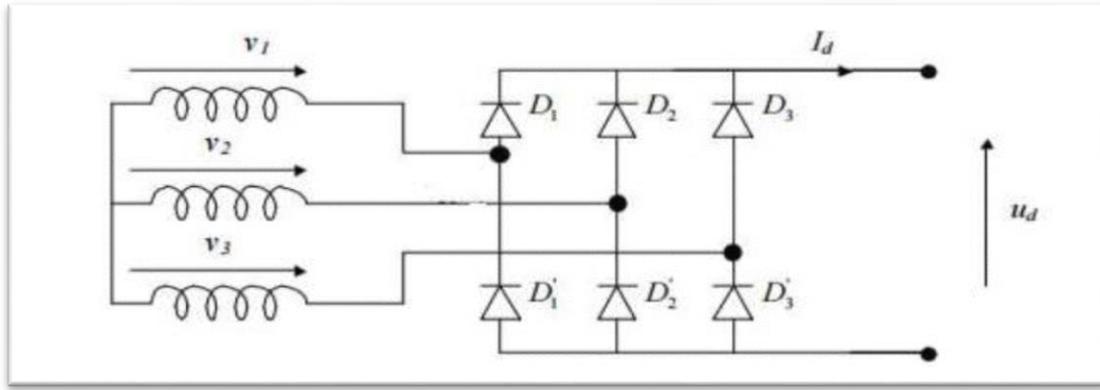


Figure II.7 : Schéma électrique d'un redresseur triphasé non commandé [29].

Les tensions simples d'un signal triphasé équilibré sont :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - 4\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II. 33)$$

II.6.1. Etude de la tension de charge

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D_1 conduit, l'une des deux diodes D'_2 et D'_3 conduit également. Il vient que D_1 conduit lorsque V_1 est plus positive que V_2 et V_3 , ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j); j = 1,2,3$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$\begin{aligned} D_i \text{ conduit si } V_i &= \text{Max}(V_j); j = 1,2,3; i = 1,2,3 \\ D'_i \text{ conduit si } V_i &= \text{Min}(V_j); j = 1,2,3; i = 1,2,3 \end{aligned}$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_{ch} à la sortie du redresseur est :

$$V_{ch} = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); j = 1,2,3$$

II.6.2. Etude des courants

Chaque enroulement secondaire est connecté à deux diodes $D_i, D'_i; i = 1,2,3$. Il est parcouru par (I_{ch}) pendant l'intervalle (T/q) ou la diode du premier groupe conduit, et par $(-I_{ch})$ pendant l'intervalle (T/q) ou c'est celle du second groupe qui conduit. Ainsi par exemple pour la première phase on donne [29] :

- $I_{S1} = +I_{ch}$, quand D_1 conduit.

- $I_{S1} = -I_{ch}$, quand D'_1 Conduit.
- $I_{S1} = 0$, quand D_1, D'_1 ne conduisent pas.

$$I_{S1(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_{ch}}{n \cdot \pi} \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{6}\right) \cdot \sin(n \cdot \omega t) \quad (\text{II. 34})$$

II.7. Hacheur Boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive) (Fig. 8). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [32].

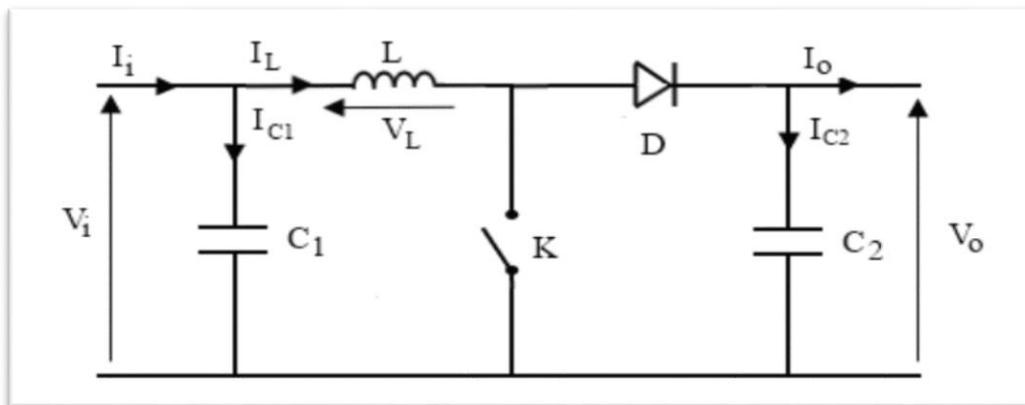


Figure II.8 : Schéma électrique d'un hacheur Boost

II.7.1 Principe de Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D (Fig. II.9). On a alors $V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à:

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (\text{II. 35})$$

II.7.2 Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K (Fig.II.10), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d $(0, \alpha T_e)$ [32].

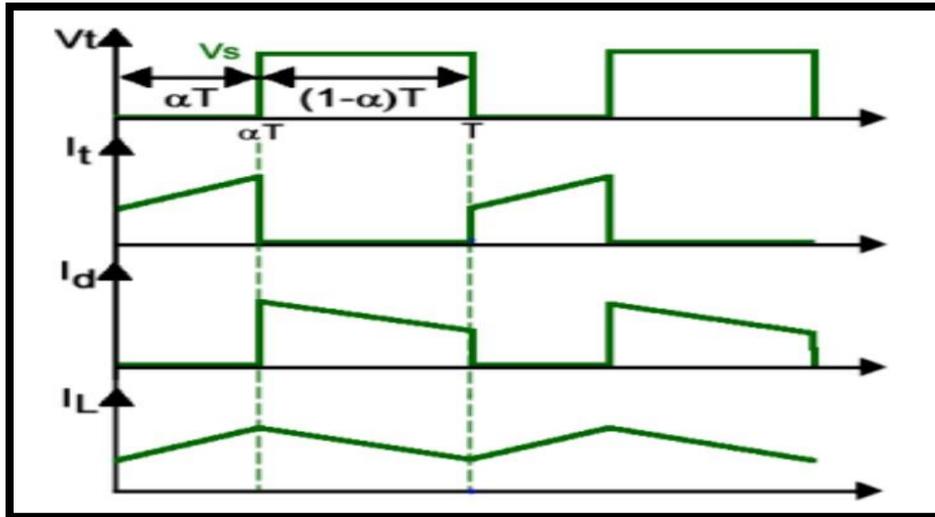


Figure II.9 : chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost

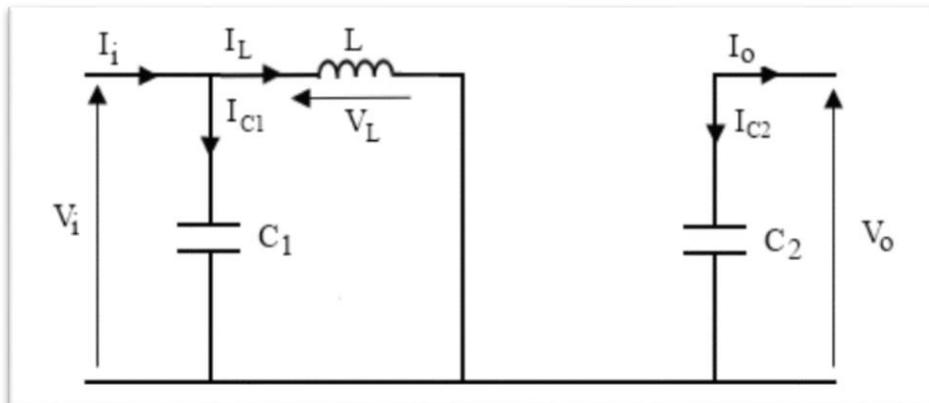


Figure II.10 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.36}$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent du Boost est le suivant:

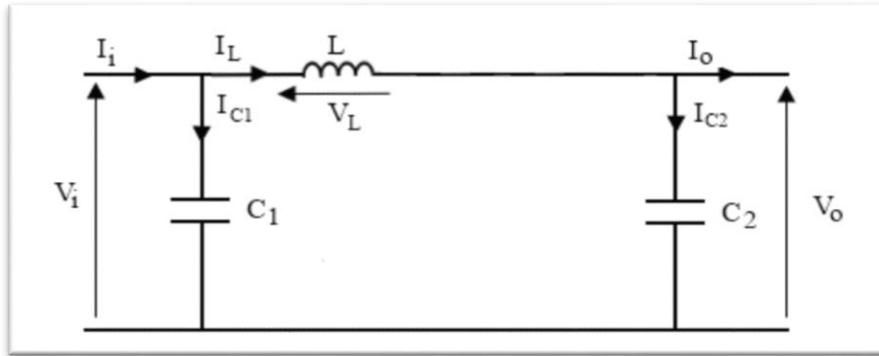


Figure II.11 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$\begin{aligned}
 I_{C1}(t) &= C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\
 I_{C2}(t) &= C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{II. 37}$$

II.8. Structure d'onduleur

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue V_e (Fig. II. 12). Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [33].

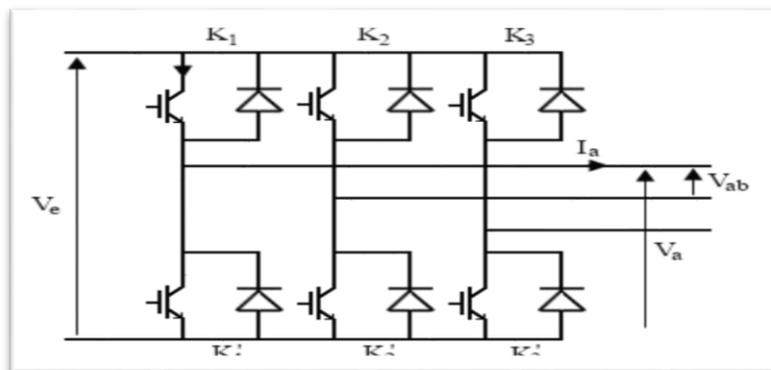


Figure II.12: Structure d'un onduleur triphasé

II.8.1. Commande MLI

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant

II.9. Modélisation de la pompe centrifuge

Il existe une grande variété de pompes conçues pour fonctionner avec des systèmes éoliens de pompage et répondre à une diversité de besoins. La pompe choisie dans le système éolien décrit précédemment, est une pompe centrifuge qui sert à aspirer de l'eau et de la refouler, et ce en amplifiant sa pression (Fig. II.13) [34].

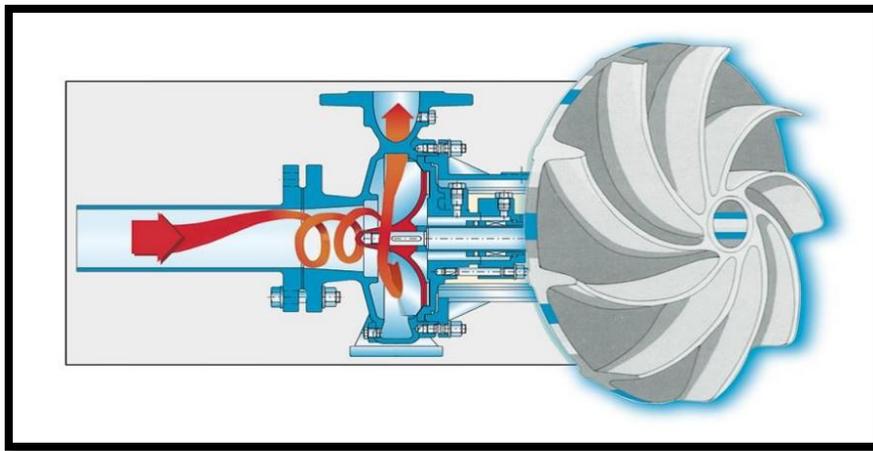


Figure II.13: Pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation :

$$f(H, Q, w) = 0 \quad (\text{II. 38})$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante.

II.9.1 Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale dépend fortement de la hauteur géodésique qui est la hauteur nette de transport d'eau. De plus de la hauteur géodésique, d'autres facteurs influent sur la hauteur manométrique totale à savoir les pertes de charge linéaires (ΔH_1) et singulières (ΔH_2) dans les conduites. Cette hauteur peut être exprimée sous cette formule :

$$H = H_g + \Delta H \quad (\text{II. 39})$$

II.9.2 Pertes de charges linéaires

Ce sont les pertes d'eau dans la tuyauterie donnée par la formule :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (\text{II. 40})$$

Avec :

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L: Longueur de la tuyauterie (m).

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

Les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation. Ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation et quand le diamètre de la conduite augmente, elles diminuent considérablement.

II.9.3 Pertes de charges singulières (locales)

Ces pertes dues essentiellement aux divers changements de section qui correspondent aux accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques, elles peuvent être exprimées par [34]:

$$\Delta H = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad (\text{II. 41})$$

K_{fr} : Constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_g + K_{fr} Q^2 \quad (\text{II. 42})$$

II.9.4 Lois de similitude

Les lois de similitude sont exprimées pour une pompe donnée tournant à différentes vitesses par :

A. Le débit est proportionnel à la vitesse $Q = f(N)$

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{N_1}{N} \quad (\text{II. 43})$$

B. Les hauteurs sont proportionnelles au carré de la vitesse : $H = f(N^2)$

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{N_1}{N}\right)^2 \quad (\text{II. 44})$$

C. La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse : $P = f(N^3)$

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{N_1}{N}\right)^3 \quad (\text{II. 45})$$

II.9.5 Puissance hydraulique

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (\text{II. 46})$$

II.9.6 Caractéristiques des pompes centrifuges

II.9.6.1 La caractéristique hauteur – débit

Elle sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale H en fonction du débit Q et prenant comme paramètre la vitesse de rotation ω . Le faisceau de courbe parabolique identifié par l'expression de PFLEIDER-PETERMAN exprimé par [34] :

$$H = C_1 \cdot \omega^2 + C_2 \cdot \omega \cdot Q + C_3 \cdot Q^2 \quad (\text{II. 47})$$

Les coefficients C_1, C_2 et C_3 sont des fonctions des caractéristiques de la pompe.

II.9.6.2 La caractéristique Rendement – débit

Le rendement d'une telle machine est le rapport de la puissance hydraulique P_h empruntée au fluide, à la sortie de-la pompe, à celle disponible sur l'arbre à l'entrée (mécanique) P_{ab} :

$$n = \frac{P_h}{P_{ab}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_{ab}} \quad (\text{II. 48})$$

II.9.6.3 La caractéristique Couple – vitesse

La pompe centrifuge est caractérisée par un couple résistant, évoluant telle que la forme quadratique de la vitesse d'entraînement, il est décrit par :

$$Cr = A \cdot \omega^2 \quad (\text{II. 49})$$

Avec :

A : Coefficient en fonction de la vitesse et de la puissance nominale.

II.9.7 Choix de pompe

L'intersection de la courbe du système avec la courbe de performance $H(Q)$ de la pompe définit le point de fonctionnement [35]. Une pompe centrifuge doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation. Les données nécessaires pour un dimensionnement correct sont les suivantes :

- Le débit désiré. La hauteur géométrique à l'aspiration
- La hauteur géométrique au refoulement NPSH (vérification de la pompe au phénomène de cavitation).

II.10 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher le maximum de puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du point d'opération sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse.

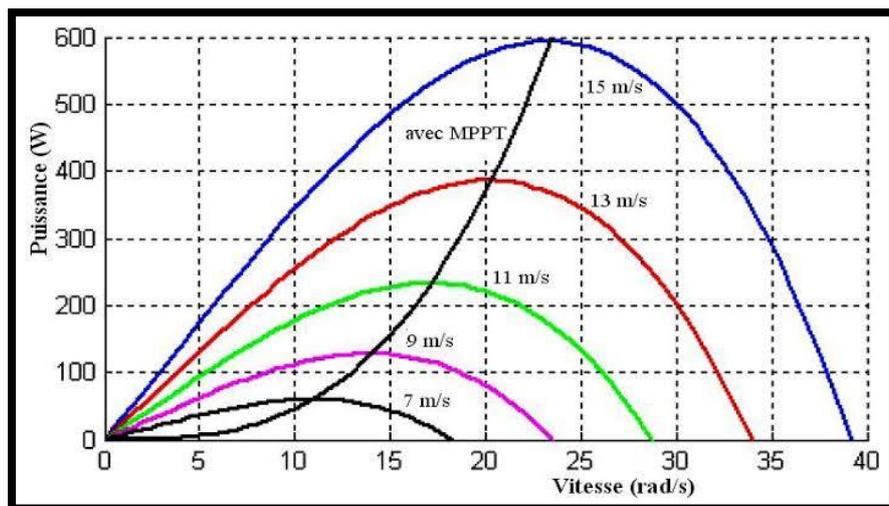


Figure II.14: Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

La figure II.14 présente l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la machine pour différentes valeurs de la vitesse du vent, et pour un angle de calage $\beta = 0$. La vitesse optimale est atteinte lorsque le coefficient de puissance C_p est maximal. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation, On peut déduire la puissance maximale qu'on peut obtenir [36].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{V_m^2}{\lambda^2} C_p \quad (\text{II.50})$$

II.10.1. MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil de pâles. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux

II.10.1.1 MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR)

Le TSR optimal pour une éolienne donnée est constant indépendamment de la vitesse du vent. Si TSR reste constamment à la valeur optimale, il est garanti que l'énergie extraite sera maximisée. Le schéma de principe est illustré sur la figure II.15 [37].

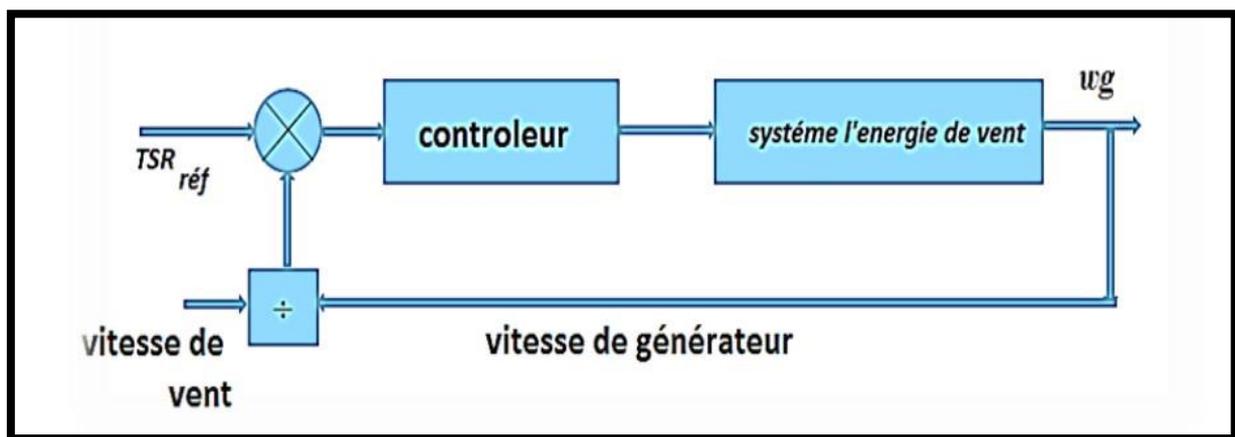


Figure II.15: Principe de la méthode de lambda optimal (TSR).

II.10.2 MPPT sans la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique C_p , λ_{opt} , une structure avec convertisseur à commande MLI est utilisée.

II.10.2.1 MPPT par la méthode de recherche de la montée colline (Hill climb)

L'algorithme de contrôle HCS recherche en permanence de la puissance crête de l'éolienne. En fonction de l'emplacement du point de fonctionnement et relation entre les variations de puissance et de vitesse, l'algorithme de suivi calcule le signal de commande

optimum pour entraîner le système à un point de puissance maximale. La figure II.18 montre le principe de l'HCS[28].

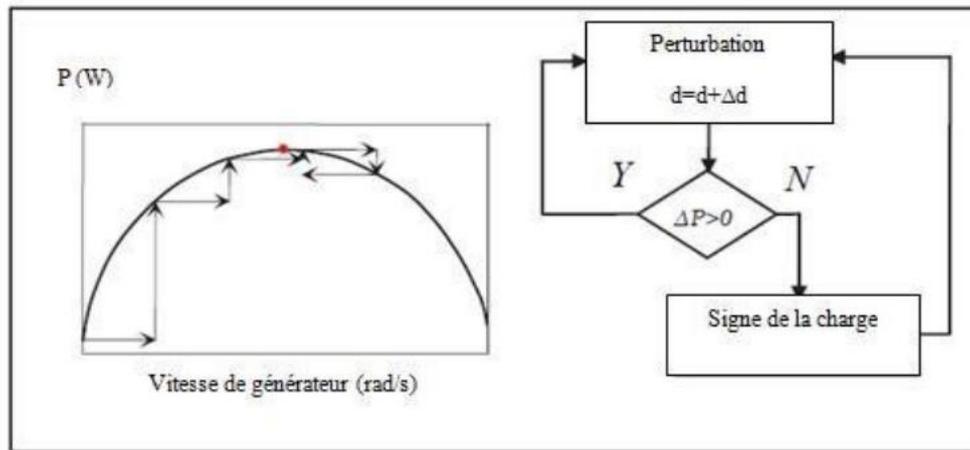


Figure II.16: Principe de contrôle HCS.

II.10.2.2.MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O)

L’algorithme P&O est l’un des plus simples. Il consiste à l’introduction d’une petite perturbation du rapport cyclique. Si une augmentation de la puissance électrique est enregistrée par l’augmentation du rapport cyclique, alors ce dernier va être augmenté encore une fois avec le même pas que le précédent. Si par contre une diminution de la puissance est enregistrée suite à l’augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique est alors inversée. Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien [37].

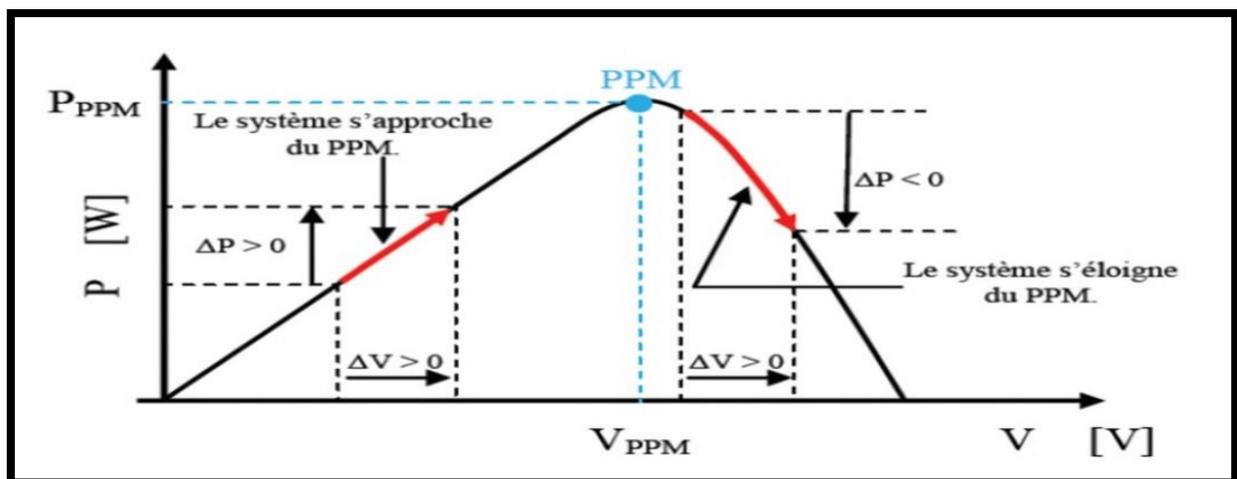


Figure II.17: Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de tension.

II.10.2.3. Méthode incrémentation de la conductance (INC-CONDUCTANCE)

Le principe de cette technique est basé sur la connaissance de la valeur de rapport de conductance $G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ et sa dérivé dG pour savoir la position de point de fonctionnement par rapport au PPM, si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, (MPP) [38].

On a la conductance :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{II. 50}$$

du point PPM on a la dérivée de la puissance de sortie P_{pv} par rapport à la tension de sortie du panneau V_{pv} :

$$\frac{dP_{pv}}{dV_v} = \frac{d(V_{pv} \times I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} = I + V \frac{dI}{dV} \tag{II. 65}$$

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche de PPM

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} < 0$, le point de fonctionnement est à droite de PPM

On trouve la variation du courant par rapport à la tension comme suit :

$$I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} \tag{II. 51}$$

On déduit

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est sur le PPM.

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est à gauche de PPM.

Si $I_{pv} + V \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \times V_{pv} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$, le point de fonctionnement est à droite du PPM

La Fig. II.18 illustre l'organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance

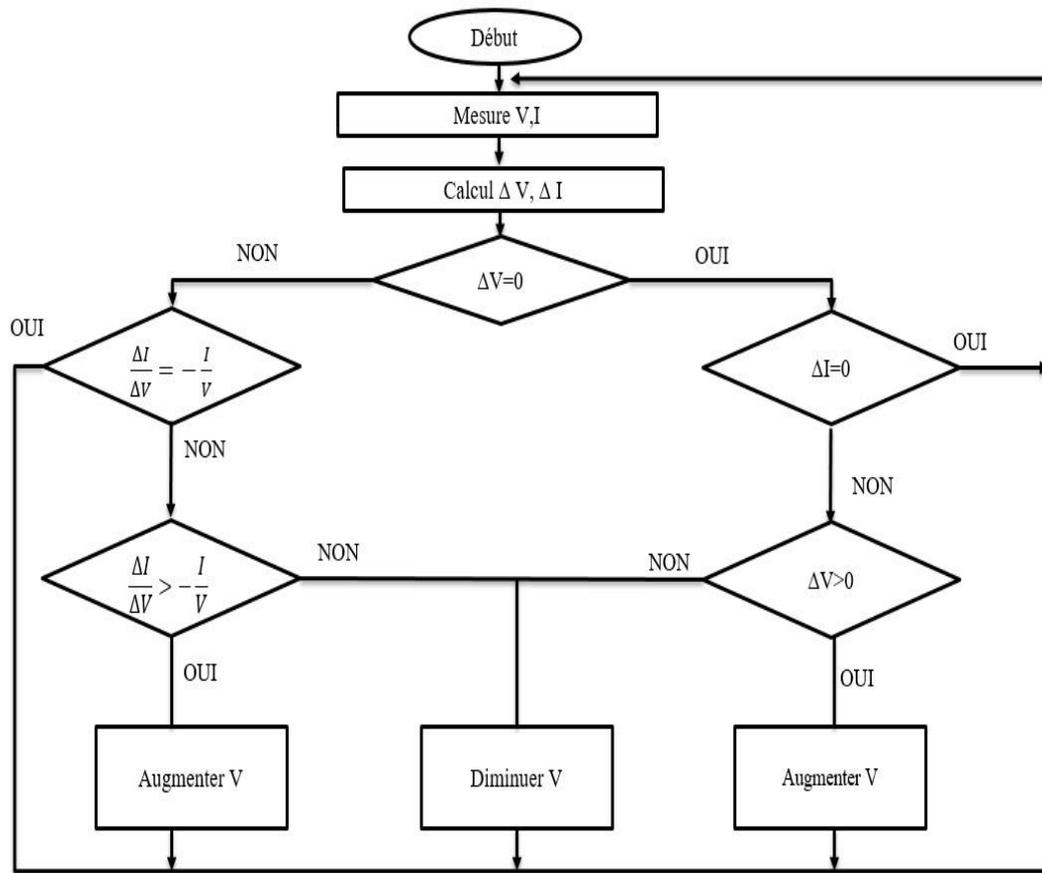


Figure II.18 Organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance [38].

II.11. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté une modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne dédiée pour le pompage d'eau. Nous avons décrit en premier lieu la modélisation de tous les éléments de la chaîne éolienne ; le vent, la turbine éolienne, l'arbre mécanique, la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi que les différents éléments d'électronique de puissance tels que le redresseur, le hacheur Boost et l'onduleur de tension. En second lieu, différentes les techniques de maximisation de la puissance ont été étudiées.

Chapitre III
Commande prédictive



III.1. Introduction

Le principe de base d'une loi de commande prédictive est de prédire les futures sorties d'un système, grâce aux valeurs courantes et passées ainsi que les valeurs futures optimales de contrôle prédictif. Ce dernier se calcule par une méthode d'optimisation, qui prend en compte une fonction de coût, laquelle dépend aussi des références futures, et éventuellement des contraintes. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description de la commande prédictive à base de modèle, ensuite les résultats de simulation de la commande prédictive de vitesse d'une MSAP seront présentés et discutés.

III.2. Principe de la commande prédictive

La commande prédictive, appelée aussi : compensation ou correction anticipatrice, est une technique de commande avancée. Elle a pour objectif ; la commande des systèmes industriels complexes comportant plusieurs entrées et sorties, où le simple régulateur PI est insuffisant. Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du processus commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel, afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de commande à modèle interne [40]. De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

- L'utilisation d'un modèle permettant de prédire le comportement futur des variables jusqu'à un horizon.
- Une fonction de coût qui représente le comportement souhaité du système. L'actionnement optimal est obtenu en minimisant la fonction de coût.

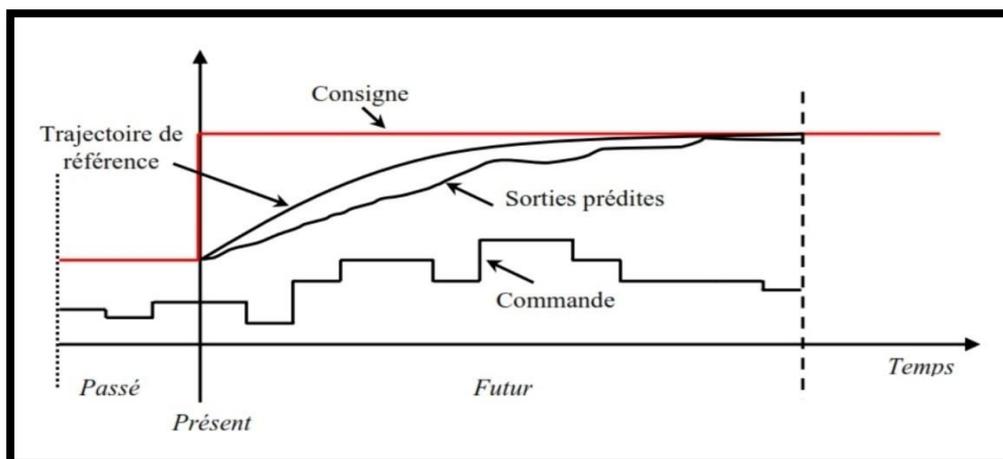


Figure III.1: Principe de la commande prédictive à modèle interne de référence [40].

III.2.1 Description du contrôle prédictif du courant

La stratégie de contrôle prédictif proposée est basée sur le fait que seul un nombre fini d'états de commutation possibles peut être généré par un convertisseur de puissance statique et que les modèles du système peuvent être utilisés pour prédire le comportement des variables pour chaque état de commutation. Pour que la sélection de l'état de commutation approprié soit appliquée, un critère de sélection doit être défini. Ce critère de sélection est exprimé comme une fonction de coût qui sera évaluée pour les valeurs prédites des variables à contrôler [41]. La prédiction de la valeur future de ces variables est calculée pour chaque état de commutation possible. L'état de commutation qui minimise la fonction de coût est sélectionnée.

Cette stratégie de contrôle peut être résumée dans les étapes suivantes :

- ✓ Définir une fonction de coût g .
- ✓ Construire un modèle du convertisseur et ses éventuels états de commutation.
- ✓ Construire un modèle de charge pour la prédiction.

Un modèle à temps discret de la charge est nécessaire pour prédire le comportement des variables évaluées par la fonction de qualité, c'est-à-dire les courants de charge.

Un schéma de principe de la stratégie de contrôle prédictif appliqué au contrôle de courant pour un onduleur triphasé est illustré à la figure (III.2). Le contrôle de courant est effectué dans les étapes suivantes [41].

- 1) La valeur du courant de référence $i^*(k)$ est obtenu (à partir d'une boucle de commande externe) et le courant de charge $i(k)$ est mesuré.
- 2) Le modèle du système (bloc1) est utilisé pour prédire la valeur du courant de charge dans le prochain intervalle d'échantillonnage $i(k+1)$ pour chacun des différents vecteurs de tension.
- 3) Dans ce cas, la fonction de coût g évalue l'erreur entre les courants de référence et les courants prévus dans le prochain intervalle d'échantillonnage. La tension qui minimise l'erreur de courant est sélectionnée et appliquée à la charge.

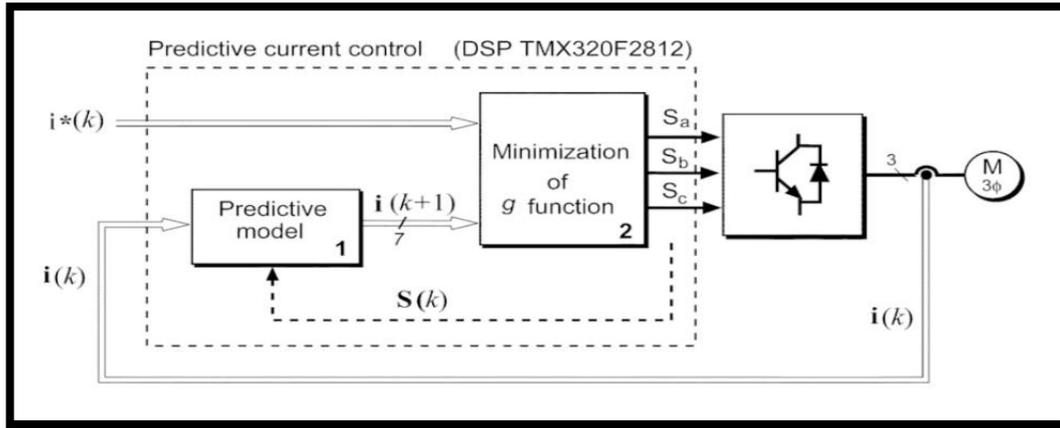


Figure III.2: Diagramme du modèle prédictif de courant [41].

III.2.1.1 Fonction de coût

La définition de coût est l'une des étapes les plus importantes dans la conception d'une commande MPC, car elle permet non seulement de sélectionner les objectifs de contrôle de l'application, mais également d'inclure toutes les contraintes requises. Pour le contrôle de courant, une fonction de coût simple peut être définie comme

$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p| \tag{III.1}$$

Où i_{α}^p et i_{β}^p sont les composantes $\alpha\beta$ du vecteur de courant de charge prédit $\mathbf{i}(\mathbf{k} + 1)$, i_{α}^* et i_{β}^* sont composantes $\alpha\beta$ du courant de référence.

III.2.1.2 Modèle d'onduleur

Le circuit de puissance de l'onduleur est illustré sur la figure III.3. L'énergie électrique est fournie par une source continue CC, avec une tension V_{dc} , et est transformée en courant alternatif CA en contrôlant le flux de courant à travers les commutateurs S_1 - S_6 . Les états de commutation du convertisseur sont déterminés par les signaux de commande $S_a, S_b,$ et S_c comme suit ($S_a=S_1, S_b=S_2, S_c=S_3$) :

$$\begin{aligned} S_a &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_1 \text{ activé et } S_4 \text{ désactivé} \\ 0, & \text{si } S_1 \text{ désactivé et } S_4 \text{ activé} \end{cases} \\ S_b &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_2 \text{ activé et } S_5 \text{ désactivé} \\ 0, & \text{si } S_2 \text{ désactivé et } S_5 \text{ activé} \end{cases} \\ S_c &= \begin{cases} 1, & \text{si } S_3 \text{ activé et } S_6 \text{ désactivé} \\ 0, & \text{si } S_3 \text{ désactivé et } S_6 \text{ activé} \end{cases} \end{aligned} \tag{III.2}$$

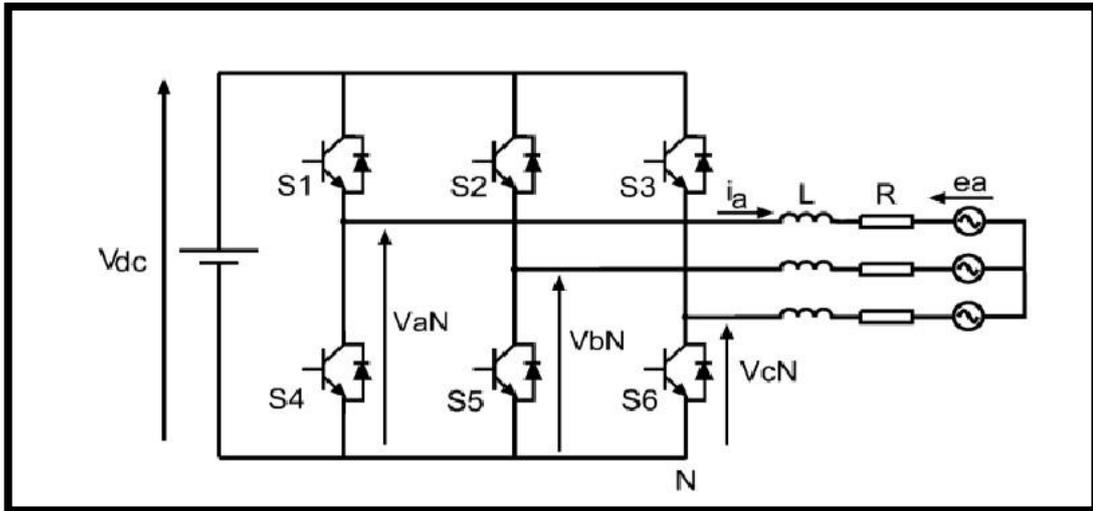


Figure III.3: Circuit d'alimentation de l'onduleur de tension [42].

Et peut être exprimée sous forme vectorielle par :

$$\mathbf{S} = \frac{2}{3}(S_a + \mathbf{a}S_b + \mathbf{a}^2S_c) \tag{III. 3}$$

où : $\mathbf{a} = e^{j2\pi/3}$.

Les vecteurs de tension de sortie générés par l'onduleur sont définis par :

$$\mathbf{v} = \frac{2}{3}(v_{aN} + \mathbf{a}v_{bN} + \mathbf{a}^2v_{cN}) \tag{III.4}$$

v_{aN} , v_{bN} , et v_{cN} sont les tensions phase-neutre de l'onduleur (Figure III.3). Ensuite, le vecteur de tension de charge v peut être lié au vecteur d'état de commutation \mathbf{S} par :

$$\mathbf{v} = V_{dc}\mathbf{S} \tag{III.5}$$

Où : V_{dc} est la tension du bus continu DC.

En considérant toutes les combinaisons possibles des signaux de commande S_a , S_b , et S_c , huit états de commutation et, par conséquent, huit vecteurs de tension sont obtenus (Fig. III.4). Notons que $\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_7$, ce qui ne donne que sept vecteurs de tension différents, comme le montre la Figure III.5.

Un modèle plus précis du modèle de convertisseur pourrait être utilisé pour des fréquences de commutation plus élevées. Il peut s'agir de temps mort, de tension de saturation du transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) et de chute de tension directe de diode, par exemple.

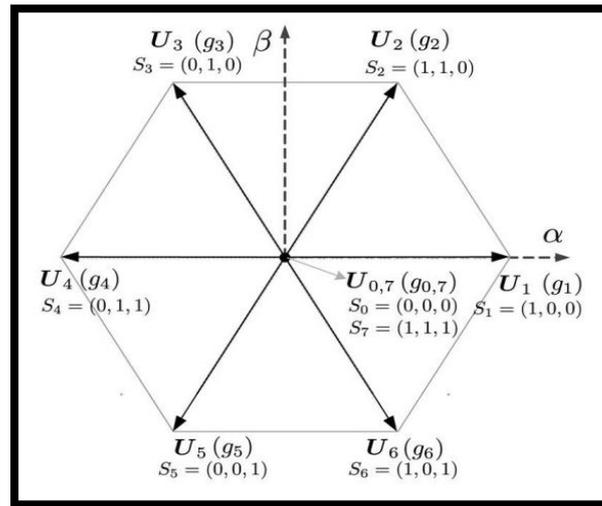


Figure III.4: Vecteurs spatiaux de tension pour différents états de commutation [43].

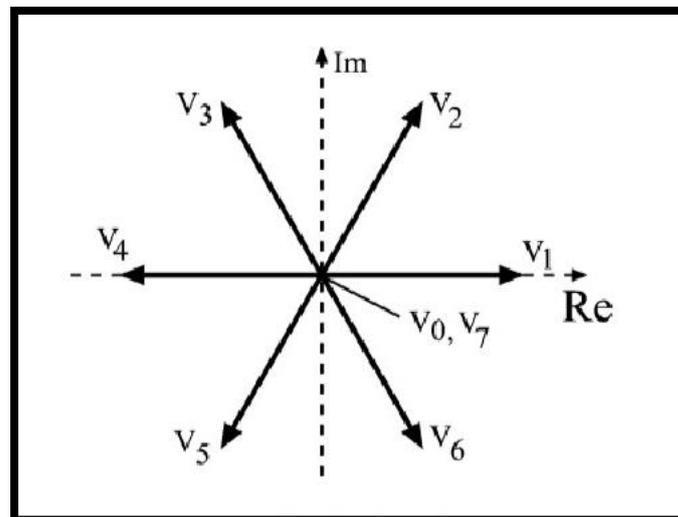


Figure III.5: Vecteurs de tension générés par l'onduleur [42].

III.3. Commande prédictive de vitesse

Le modèle basé sur le contrôle prédictif de la vitesse est utilisé pour contrôler la vitesse et le courant en même temps. Le modèle de prédiction avec compensation de vitesse est utilisé pour prédire les états futurs de la machine synchrone à aimants permanents. Une fonction de coût à contraintes multiples avec des facteurs de poids réglables dynamiquement, est conçue pour réaliser le suivi de la vitesse et s'assurer que les points de fonctionnement actuels restent sur la trajectoire de la commande à couple maximal par ampère (MPTA). La fonction de coût est utilisée pour sélectionner l'état du commutateur optimal qui est appliqué au convertisseur statique (onduleur de tension).

La structure de base de la méthode de contrôle prédictive de vitesse est illustrée sur la figure (III.6):

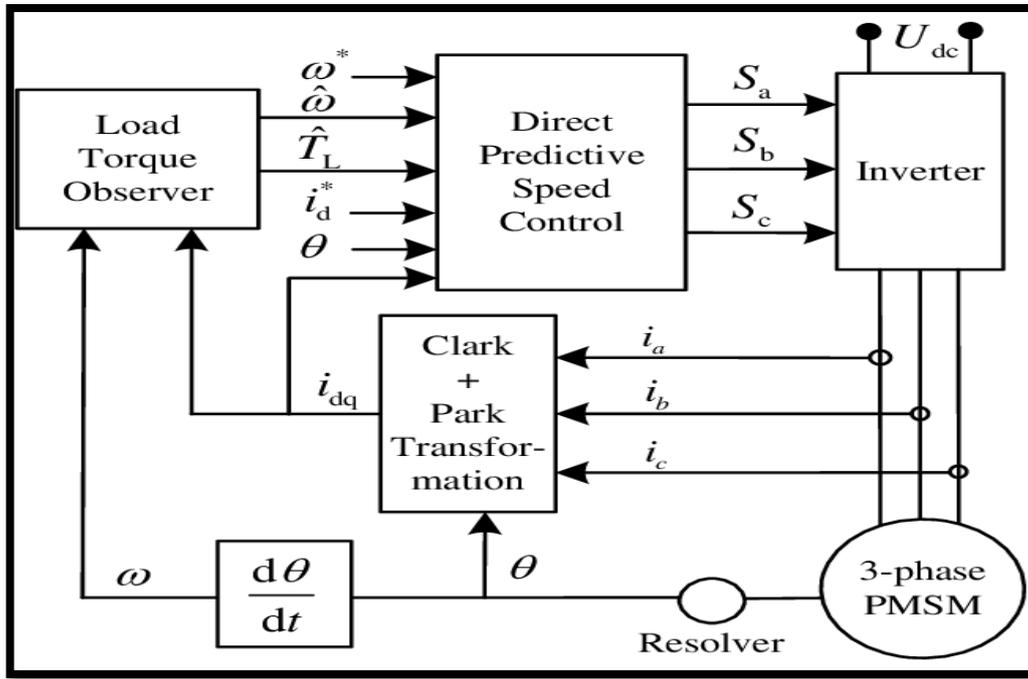


Figure III.6: Schéma bloc de contrôle prédictif de vitesse [43].

Le modèle mathématique de la MSAP dans le repère de Park d'axe d-q est dérivé comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{1}{L_q} u_q - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\ T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \\ \frac{d}{dt} \omega_r = \frac{p}{J} T_e - \frac{p}{J} T_L - \frac{B}{J} \omega_r \end{cases} \quad (III.6)$$

Avec :

- i_d : Courant statorique d'axe d.
- i_q : Courant statorique d'axe q.
- u_d : Tension de l'axe direct d.
- u_q : Tension de l'axe en quadrature q.
- ω_r : La vitesse angulaire rotorique.
- T_e : Le couple électromagnétique.
- T_L : Le couple résistant.
- R : Résistance statorique.
- L_d, L_q : Inductances de l'axe d et q respectivement.
- p : Nombre de paires de pôles.

λ_m : Flux magnétique permanent.

J : Moment d'inertie.

Considérant le fait que l'algorithme de contrôle est calculé à chaque cycle. Les états tels que les courants d-q et la vitesse du rotor au temps tk sont utilisées pour calculer le futur état au temps $tk+1$. Il faut donc un modèle discret pour prédire les états futurs. La méthode de discrétisation d'Euler directe avec un pas d'échantillonnage T_s est employée. Les courants d'axes d et q du système (III.6) peuvent être discrétisés comme suit [42] :

$$i_q(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_d(k) + \frac{L_q T_s}{L_d} \omega_r(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k) \quad (\text{III.7})$$

$$i_d(k+1) = -\frac{L_d T_s}{L_q} \omega_r(k) i_d(k) + \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_q(k) + \frac{T_s}{L_q} u_q(k) - \frac{\lambda_m T_s}{L_q} \omega_r(k) \quad (\text{III.8})$$

Avec:

$i_d(k), i_q(k)$: Les courants au temps t_k .

$i_q(k+1), i_d(k+1)$: Les courants au temps t_{k+1} .

Le couple électromagnétique au temps t_k et le couple estimé au temps t_{k+1} peuvent être calculés par :

$$T_e(k) = \frac{3}{2} p \left(\lambda_m i_q(k) + (L_d + L_q) i_d(k) i_q(k) \right) \quad (\text{III.9})$$

$$\hat{T}_e(k+1) = \frac{3}{2} p \left(\lambda_m i_q(k+1) + (L_d + L_q) i_d(k+1) i_q(k+1) \right) \quad (\text{III.10})$$

Ainsi, le couple moyen entre le temps t_k et t_{k+1} peut être obtenu avec :

$$\underline{T}_e(k) = \frac{1}{2} \left(T_e(k) + \hat{T}_e(k+1) \right) \quad (\text{III.11})$$

L'équation de la vitesse du système (III.6) peut être discrétisée comme suit :

$$\omega_r(k+1) = \left(1 - \frac{BT_s}{J}\right) \omega_r(k) + \frac{pT_s}{J} T_e(k) - \frac{pT_s}{J} T_L(k) \quad (\text{III.12})$$

$\omega_r(k)$: La vitesse angulaire au temps t_k

$\omega_r(k+1)$: La vitesse angulaire au temps t_{k+1}

L'expression de la fonction de coût pour le modèle de contrôle de vitesse est donnée par :

$$g = \lambda_i (i_d(k+1))^2 + \lambda_w (\omega_r^* - \omega_r(k+1))^2 + Fc \quad (\text{III.13})$$

λ_i et λ_w sont des facteurs de pondération, F_c : est un terme de contrainte.

Le terme lié à la contrainte F_C est donné par :

$$FC = \begin{cases} \infty & \text{si } \sqrt{i_d^2(k+1) + i_q^2(k+1)} > I_{\max} \\ 0 & \text{si } \sqrt{i_d^2(k+1) + i_q^2(k+1)} < I_{\max} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

On peut voir que F_C sera 0 si l'amplitude du courant statorique est inférieure à une limite maximale prédéfinie I_{\max} et deviendra infini lorsque le courant statorique dépassera la limite. Le terme d'erreur de vitesse améliore encore les performances en régime permanent de la vitesse. En fait, ce terme sert à lisser la vitesse et sans ce terme, le système peut fonctionner aussi. Par conséquent, le facteur de pondération de ce terme, λ_w , est généralement fixé à une petite valeur. Le terme lié à la contrainte, qui a été défini en (III.14), garantit que le courant statorique ne dépassera pas la valeur maximale autorisée.

III.4. Commande prédictive d'un hacheur Boost

Appliquée à la plupart des convertisseurs de puissance, et particulièrement les hacheurs, l'analyse de la réponse dynamique montre que la technique MPC effectue des processus de contrôle de tension avec de légers dépassements et donne de meilleurs résultats que les méthodes conventionnelles. Les convertisseurs élévateurs DC/DC sont des circuits électroniques de puissance généralement utilisés pour augmenter la tension d'entrée. Par conséquent, ils sont particulièrement préférés dans les sources de conversion de l'énergie éolienne. La figure III.6 illustre le schéma électrique d'un hacheur Boost où l'interrupteur, le condensateur et la diode sont considérés comme des éléments idéaux.

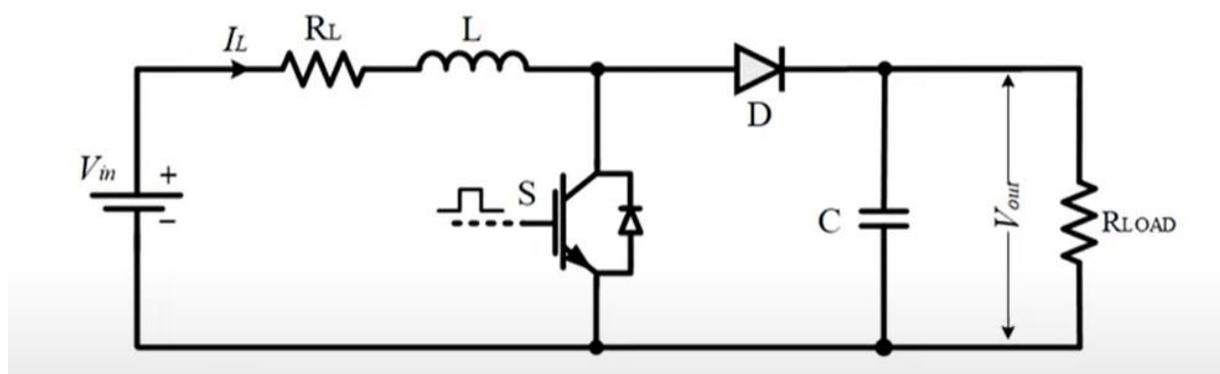


Figure III.7: Schéma électrique d'un hacheur boost

Le convertisseur peut être analysé selon deux états possibles du commutateur, dont les schémas sont présentés séparément sur la figure III.7 et la figure III. 8. Lorsque l'interrupteur est activé, le courant d'inductance (i_L) peut être calculé avec l'équation (III.15). La figure III.8 illustre le modèle de circuit pour la position OFF du commutateur. Dans ce cas, la charge est alimentée à la fois par l'inducteur et par la source d'entrée. Ainsi, le courant d'entrée peut être exprimé avec l'équation (III.16).

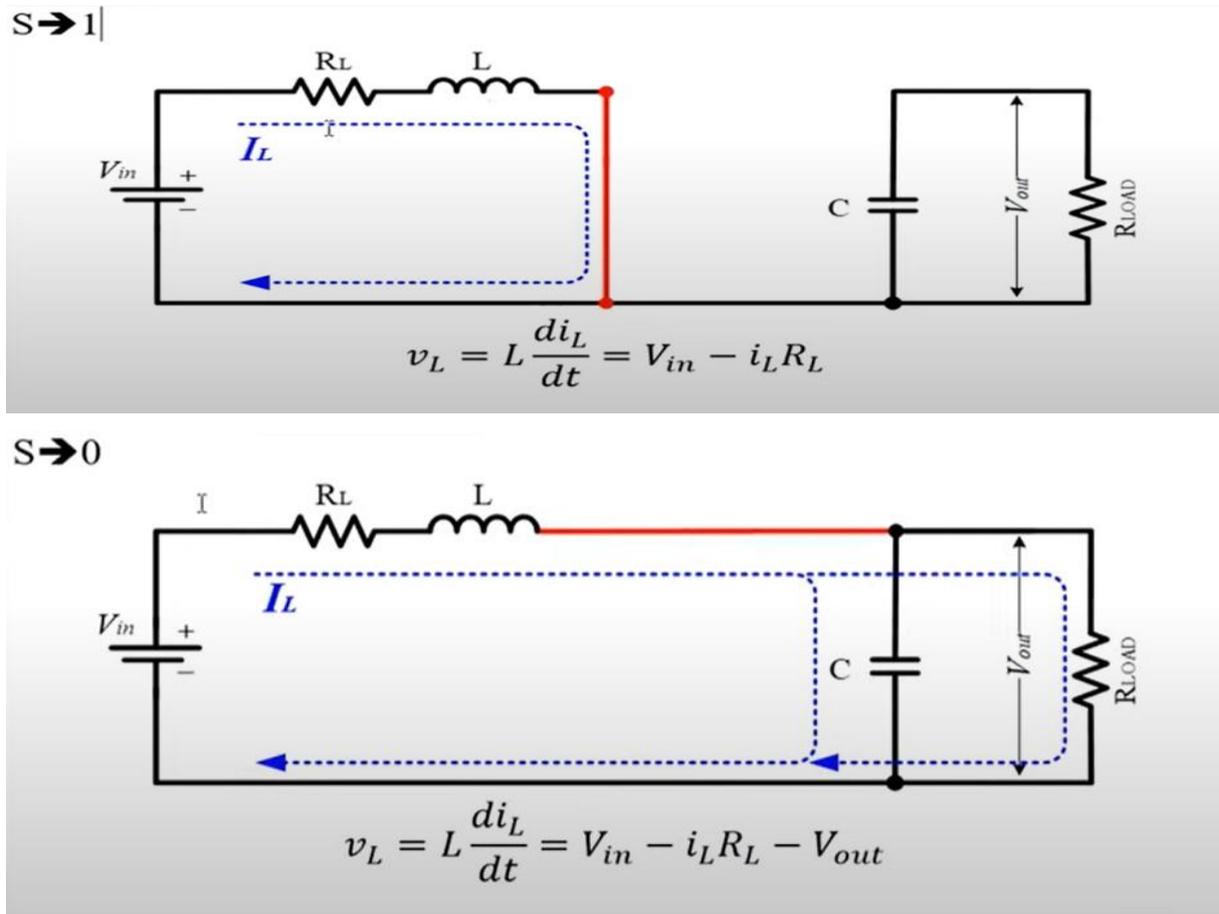


Figure III.8:Hacheur boost, interrupteur S(ouvert et fermé)

$$S \rightarrow 1 \rightarrow v_L = L \frac{di_L}{dt} = (V_{in} - i_L R_L)S \tag{III.15}$$

$$S \rightarrow 0 \rightarrow v_L = L \frac{di_L}{dt} = (V_{in} - i_L R_L - V_{out})(1 - S) \tag{III.16}$$

Les équations (III.15) et (III.16) peuvent être combinées comme dans l'équation (III.17), qui donne le courant d'entrée pendant une période de commutation.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [V_{in} - i_L R_L - V_{out} (1 - S)] \tag{III.17}$$

Pour obtenir la fonction de coût, la méthode MPC en temps discret peut être appliquée en trois étapes comme suit) :

- Modélisation du convertisseur pour tous les états de commutation possibles.
- Obtention du modèle à temps discret pour les prédictions dans chaque période d'échantillonnage.
- Définir les fonctions de coût.

Pour obtenir le modèle en temps discret dans un deuxième temps, certaines méthodes de discrétisation sont utilisées dans la littérature. Parmi elles, la méthode d'approximation d'Euler par différence directe donnée dans l'équation (III.18) est largement utilisée dans les systèmes du premier ordre. En combinant les équations (III.17) et (III.18), l'équation (III.19) peut être obtenue pour prédire la prochaine valeur du courant d'inductance.

$$\frac{di_L}{dt} \approx \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_S} \quad (\text{III. 18})$$

$$i_L(k+1) = \frac{T_S}{L} [V_{in} - i_L R_L - V_{out} (1 - S)] + i_L(k) \quad (\text{III. 19})$$

Fonction de coût:

Dans cette étude, la fonction de coût donnée dans l'équation (III.20) est utilisée. Afin de déterminer cette fonction dans la méthode MPC, l'erreur entre la valeur de référence et la valeur prédite est calculée comme le montre l'équation.

$$g = |i_L^*(k) - i_L(k+1)| \quad (\text{III. 20})$$

III.5 Simulation de la commande prédictive d'une MSAP

Afin d'évaluer les performances de la commande prédictive de vitesse proposée, des simulations ont été effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink sur une machine synchrone à aimants permanents dont les paramètres sont répertoriés dans l'Annexe. La fréquence d'échantillonnage est réglée à 10 kHz. Pour la simulation, deux situations sont considérées pour le processus de démarrage, à vide et en charge, puis les changements de vitesse/charge sont appliqués au système d'entraînement pour étudier les réponses dynamiques. Les figures (III.9, III.10, III.11 et III.12) respectivement de la vitesse, du couple, des courants statoriques i_{abc} et i_{dq} , illustrent les performances dynamiques de la commande proposée.

➤ t=0s à t=0.2s

Les performances en régime permanent de la machine sont étudiées à vide et en charge. À vide la vitesse du moteur se stabilise à 104 rad/s au bout d'un très court temps, la valeur moyenne des courants statoriques est pratiquement nulle. Le couple électromagnétique est parfaitement nul. A t=0.1s on a appliqué une charge de 5N.m, il est clair d'après les résultats de simulation que le rejet de perturbation a pris un temps inférieure à 1ms. l'amplitude du courant de phase atteint 8 A, les formes d'onde actuelles des courants iabc sont sinusoïdales. Le couple électromagnétique présente un pic moins de 10 N.m, les ondulations sont très faibles. Le courant id est pratiquement nul et le courant iq est l'image du couple Ce.

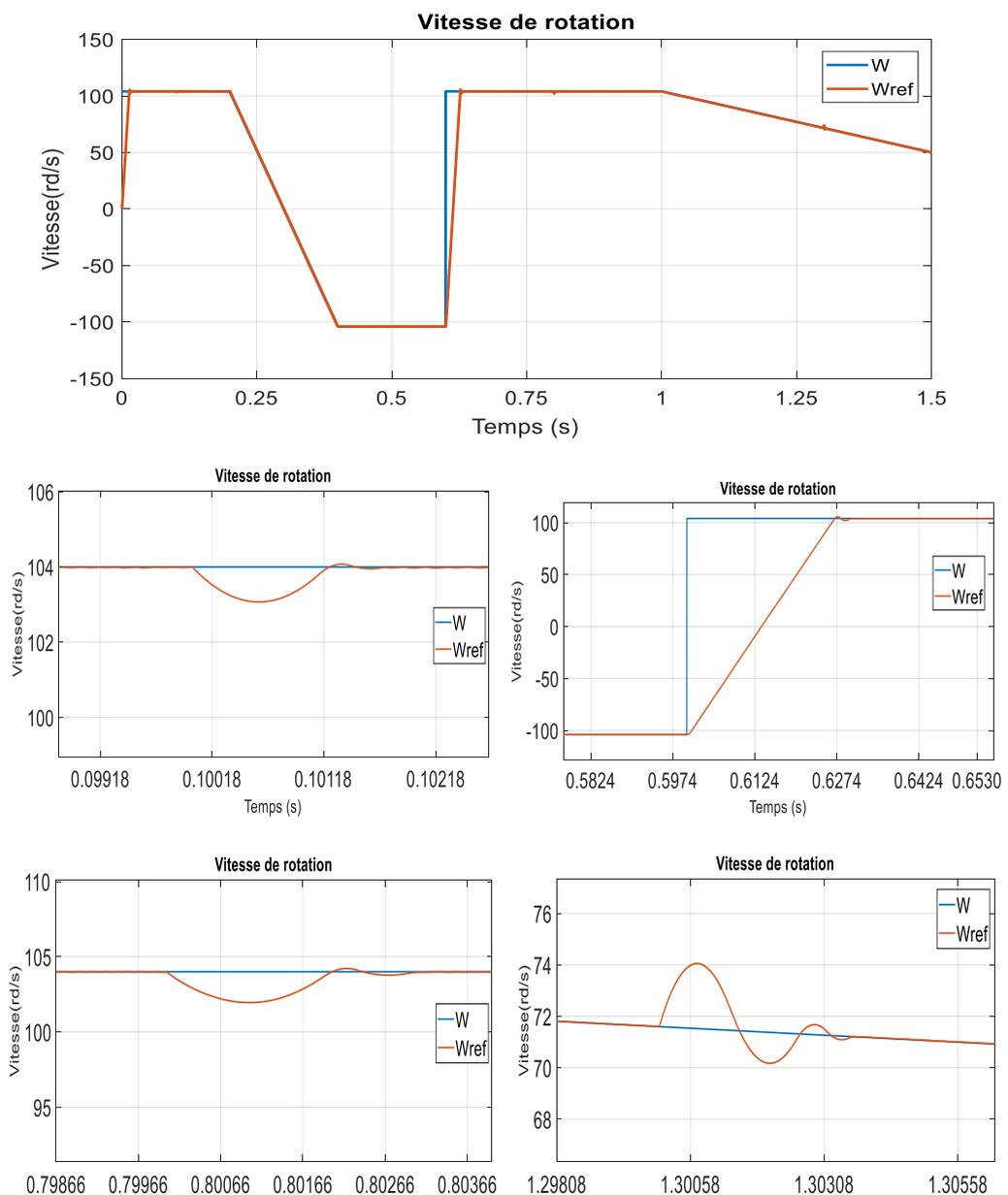


Figure III.9: Réponse de la vitesse de rotation

➤ t=0.2s à t=0.8s

Les performances de la technique PSC sont examinées à vide avec inversion du sens de rotation de la MSAP de $t=0.2s$ à $t=0.4s$ de $104m/s$ à $-104 m/s$, et à $t=0.6s$ de $-104m/s$ à $104m/s$. Il est clair d'après les figures que la vitesse suit bien sa référence sans aucun dépassement, le couple présente des faibles ondulations où on note une valeur de $-1 N.m$ dû à l'inversion de la vitesse, ce qui implique une valeur d'environ $1.5A$ des courants i_{abc} . A $t=0.6s$ le couple et les courants i_{abc} impliquent des picsallants respectivement jusqu'aux $14.5N.m$ et $20 A$. Le courant i_d reste toujours nul et le courant i_q a la forme du couple C_e .

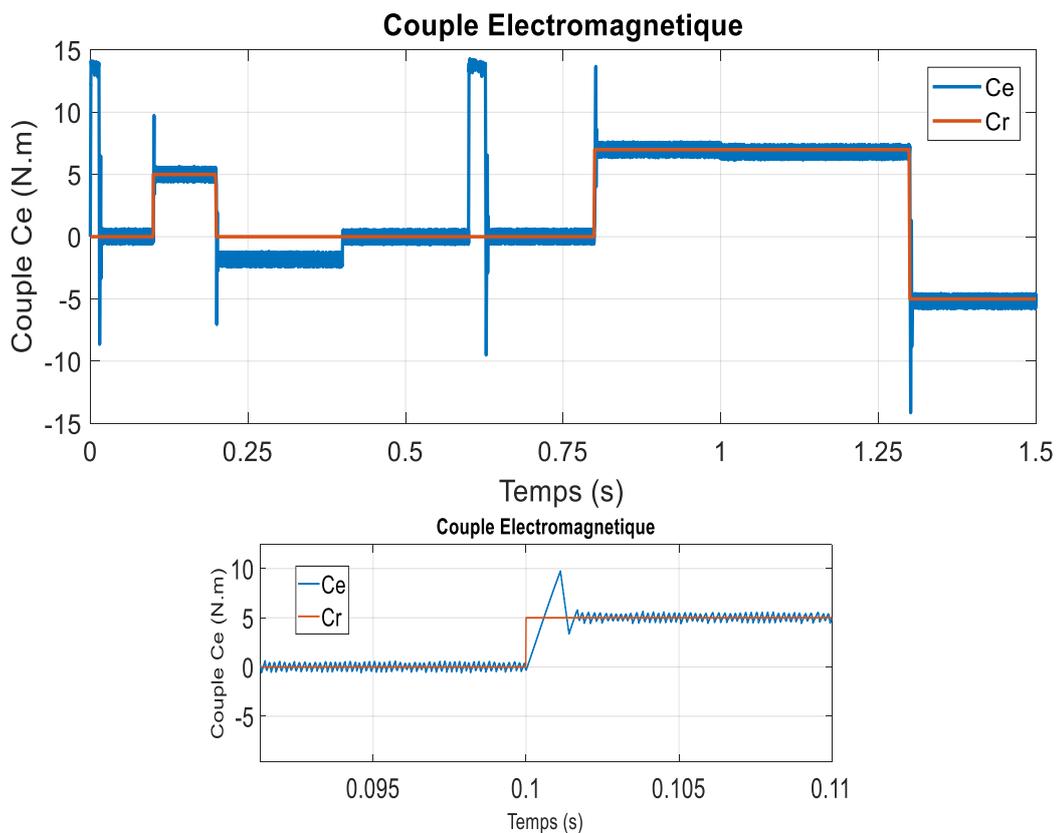


Figure III.10:Réponse du couple électromagnétique

➤ t=0.8s à t=1s

Dans ce troisième cas on a appliqué une charge de $7N.m$. on remarque un rejet de perturbation rapide comme dans le premier cas ($t=0.1s$ à $t=0.2s$). Le couple présente un pic d'environ $14 N.m$ et rapidement rejoint sa référence avec des faibles ondulations. La forme des courants statoriques est pratiquement sinusoïdale et on note un pic d'environ $20 A$ lors de l'application de la charge. Le courant $i_d=0A$ et le courant i_q présente des faibles ondulations.

➤ t=1ss à t=1.5s

Dans ce dernier cas, on a appliqué un changement de vitesse avec une charge de -12N.m à t=1.3s. Les figures illustrent clairement les performances de la commande prédictive de vitesse, avec une bonne poursuite du couple et la vitesse de leurs références. On note des faibles ondulations pour le couple et un rejet rapide de perturbation pour la vitesse. Les courants statoriques ont tous une forme sinusoïdale. Mêmes remarques que précédemment s'appliquent pour les courants i_d et i_q .

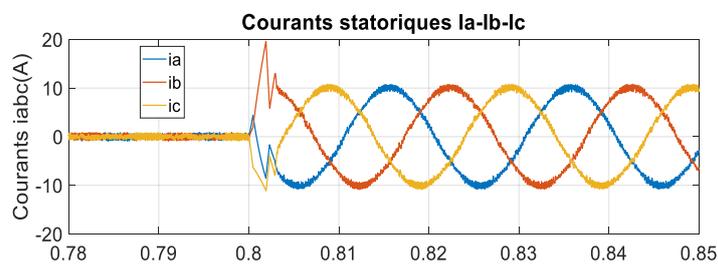
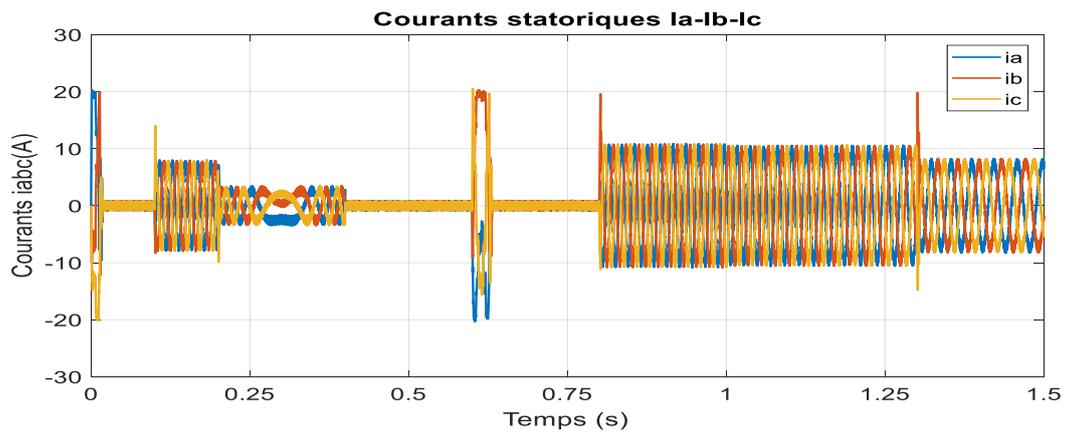


Figure III.11: Réponse des courants statoriques i_{abc}

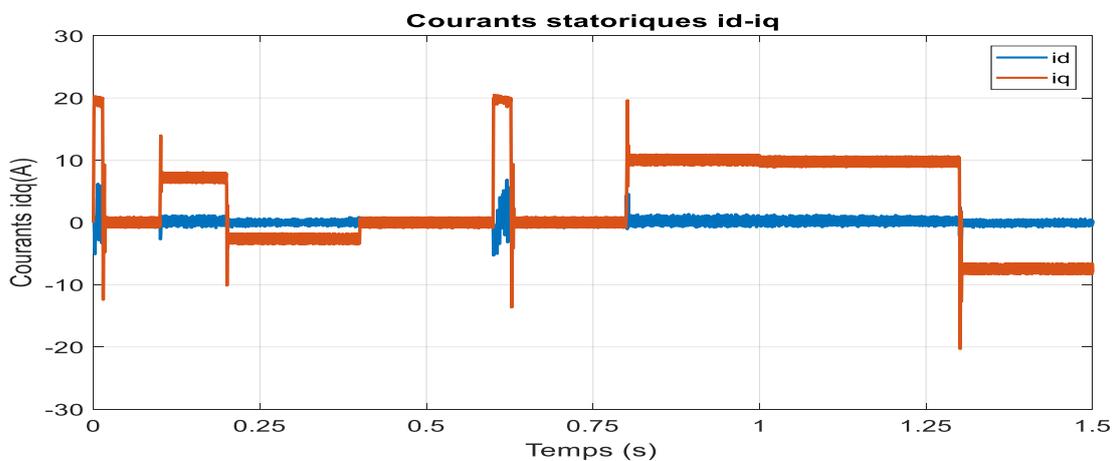


Figure III.12: Réponse des courants i_{dq}

III.6. Conclusion

Ce troisième a été consacré à la commande prédictive, où on a pu donner dans un premier temps un aperçu général sur la commande prédictive du courant et de la vitesse. Dans un deuxième temps, un modèle de la commande prédictive d'un hacheur boost a été présenté. Ce modèle sera utilisé par la suite dans le dernier chapitre. Enfin, pour terminer ce chapitre, on a effectué une simulation numérique de la technique proposée. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de cette technique en termes de rapidité, robustesse, ainsi que les bonnes performances dynamiques qui ont présenté les grandeurs de la MSAP.

IV.1. Introduction

Les simulations de fonctionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne sous l'environnement Matlab/Simulink permettent de prévoir le comportement de la machine et l'influences de ses différents paramètres sur son fonctionnement et son comportement et à la validation des modèles mathématiques des différents éléments dans la chaîne de conversion considéré et de la commande appliquée. Dans ce dernier chapitre, en se basant sur le logiciel Matlab, nous allons présenter une simulation numérique d'une chaîne de pompage d'eau à base de l'énergie éolienne, afin de valiser la technique de la commande prédictive abordée dans le troisième chapitre.

IV.2. Système de pompage éolien (Wind Powered Water Pumping system (WPWPS)

L'énergie éolienne peut être bien exploitée par un moulin à vent traditionnel et en même temps, elle peut être bien utilisée pour le pompage de l'eau. De plus, la plus grande flexibilité des petits systèmes d'énergie éolienne les rend prédominants dans les systèmes de pompage d'eau. Dans WPWPS, les éoliennes convertissent l'énergie éolienne reçue en énergie mécanique. Son interface est constituée d'un engrenage élévateur et d'un couplage qui transmet l'énergie au générateur. Cette sortie doit alimenter une batterie puis un onduleur qui est utilisé pour convertir la tension continue en tension alternative. La représentation schématique du système de pompage d'eau alimenté par l'énergie éolienne est présentée sur la figure IV.1.

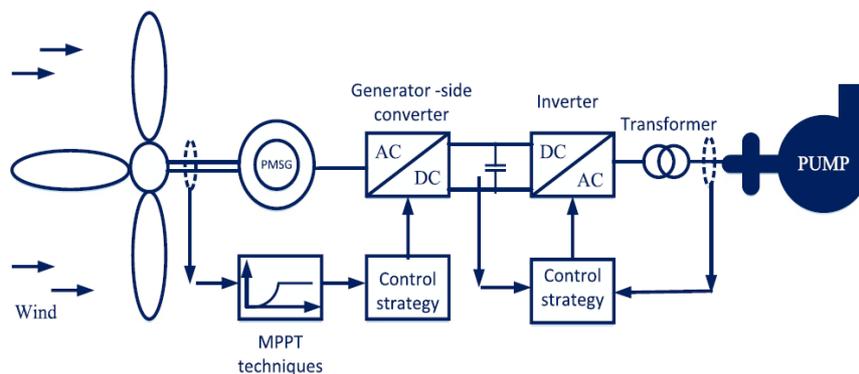


Figure IV.1:Schéma de pompage éolien

IV.3. Chaîne de pompage d'eau proposée

La figure IV.2 illustre la structure générale du système de pompage éolien électrique proposé. Il se compose d'une éolienne, d'un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP), d'un

redresseur AC/DC triphasé non commandé, d'un convertisseur élévateur DC-DC, d'un onduleur de tension triphasé, d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et d'une Pompe centrifuge. L'éolienne est couplée directement à la GSAP. L'énergie cinétique captée par l'éolienne est convertie en énergie électrique. La tension de sortie alternative de la génératrice GSAP est redressée en tension continue qui varie en amplitude et en fréquence avec la variation de la vitesse du vent. La tension de sortie DC est filtrée à l'aide d'un condensateur à l'entrée du convertisseur élévateur extrayant la puissance maximale, puis alimentant la MSAP qui transforme la puissance électrique en puissance mécanique afin d'entraîner la pompe centrifuge. La puissance de l'éolienne est réglée à l'aide d'une commande prédictive, afin d'atteindre sa valeur maximale avec la vitesse du vent disponible. La commande prédictive de vitesse est utilisée pour commander la MSAP. Les paramètres des éléments du système éolien sont répertoriés dans l'Annexe.

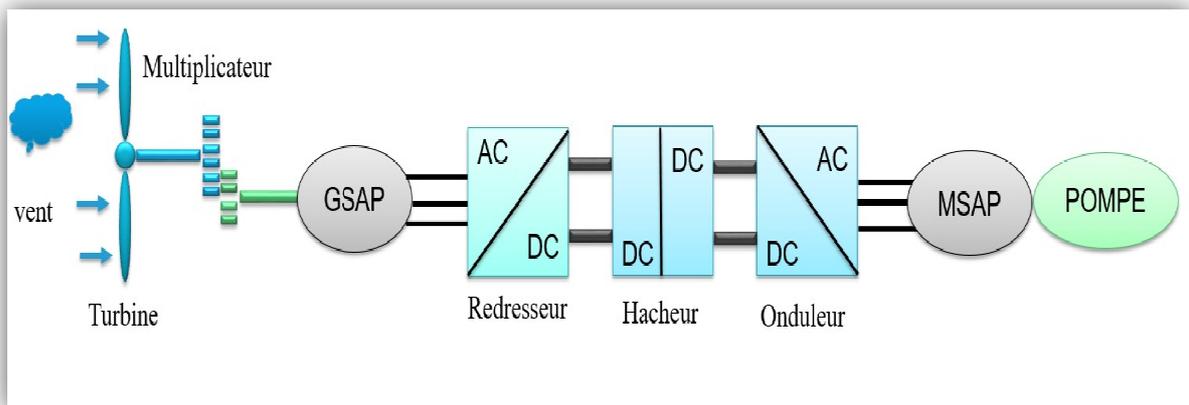


Figure IV.2: Structure générale de la chaîne éolienne

Notons que la pompe centrifuge est fréquemment utilisée pour les applications d'irrigation des fermes agricoles, en raison de sa conception plus simple, de son faible coût, de son faible entretien et de son débit d'eau et de ses hauteurs d'élévation importants. A ce stade là on a choisi une pompe avec un rendement de 54%. La hauteur de pompage est de 20m pour un débit de $3.01\text{m}^3/\text{s}$.

IV.4. Résultats de simulation

L'efficacité de la commande prédictive de vitesse suggérée est testée par simulation numérique sur une chaîne de conversion d'énergie éolienne dédiée au le pompage d'eau. Les simulations ont

été effectuées sous l'environnement Matlab/simulink suivant deux profils de la vitesse du vent, variable et aléatoire.

IV.3.1 Profil de vitesse du vent variable

La figure IV.3 montre le profil du vent utilisé. Les figures III.4-III.9 illustrent l'ensemble des résultats trouvés.

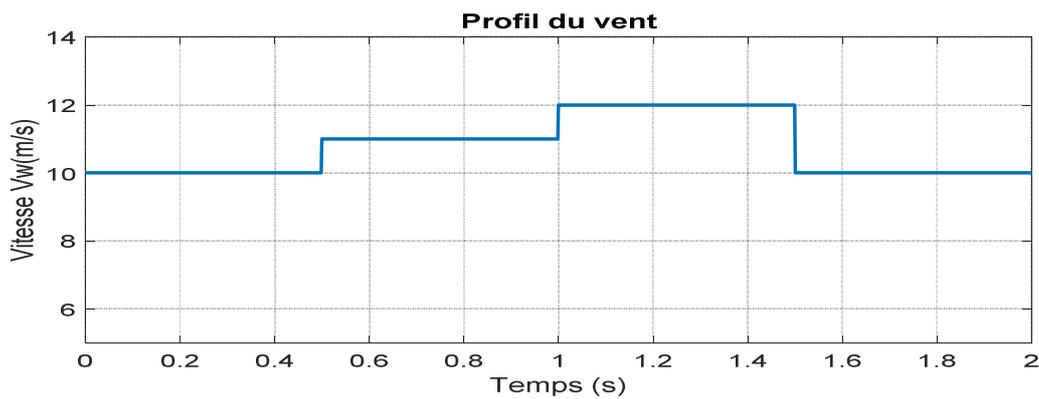


Figure IV.3: Profil de la vitesse du vent

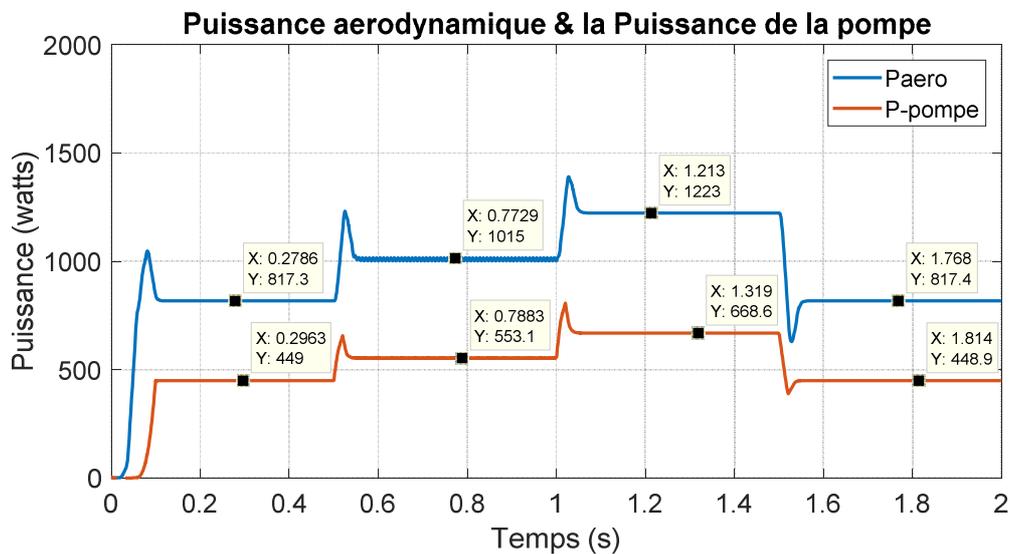


Figure IV.4: Puissance aérodynamique et la puissance hydraulique

En analysant l'ensemble des résultats, il est clair d'après la Fig. III. 4 que la puissance électrique produite par la turbine atteint sa valeur maximale plus efficacement et la puissance hydraulique

suit bien la puissance aérodynamique captée par la turbine. Ce qui montre l'efficacité de la commande prédictive utilisée pour contrôler le hacheur boost et la MSAP.

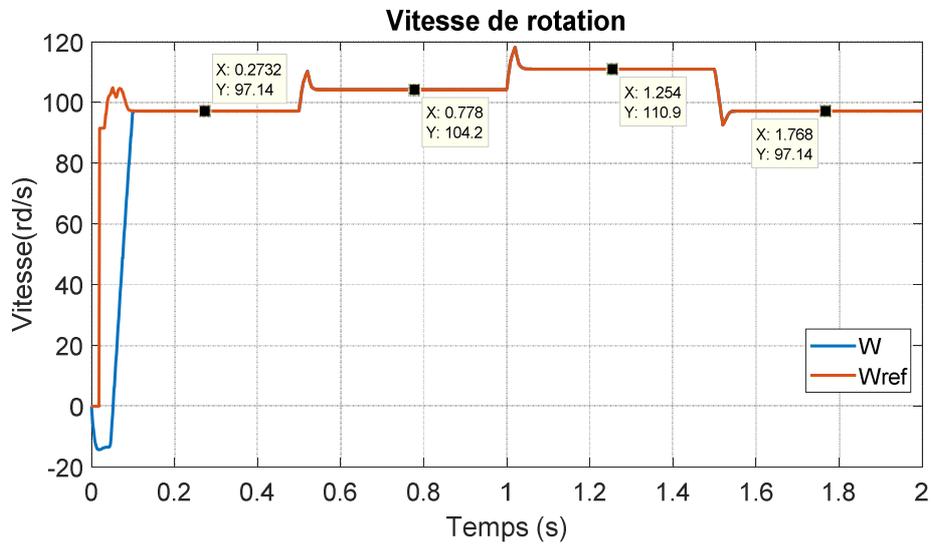


Figure IV.5: Vitesse de rotation du moteur

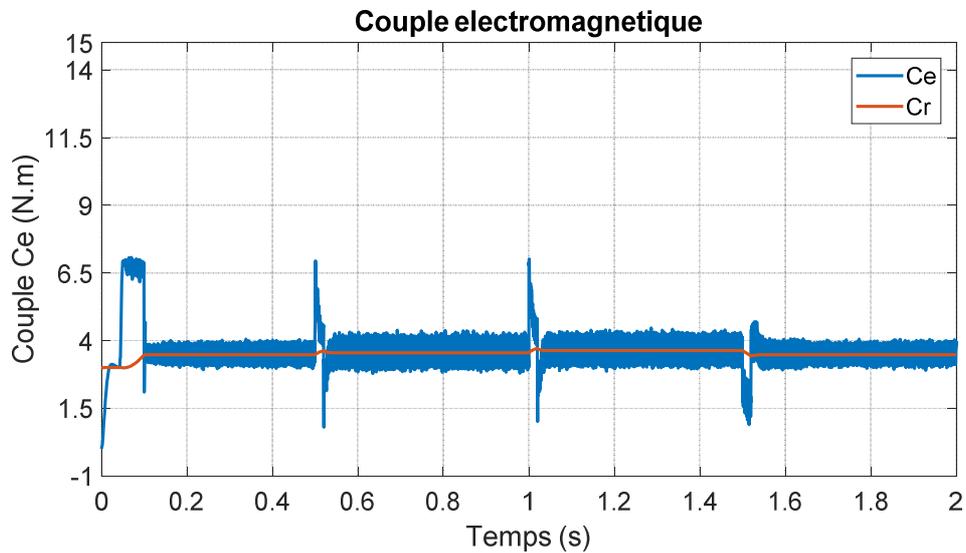


Figure IV.6: Couple électromagnétique

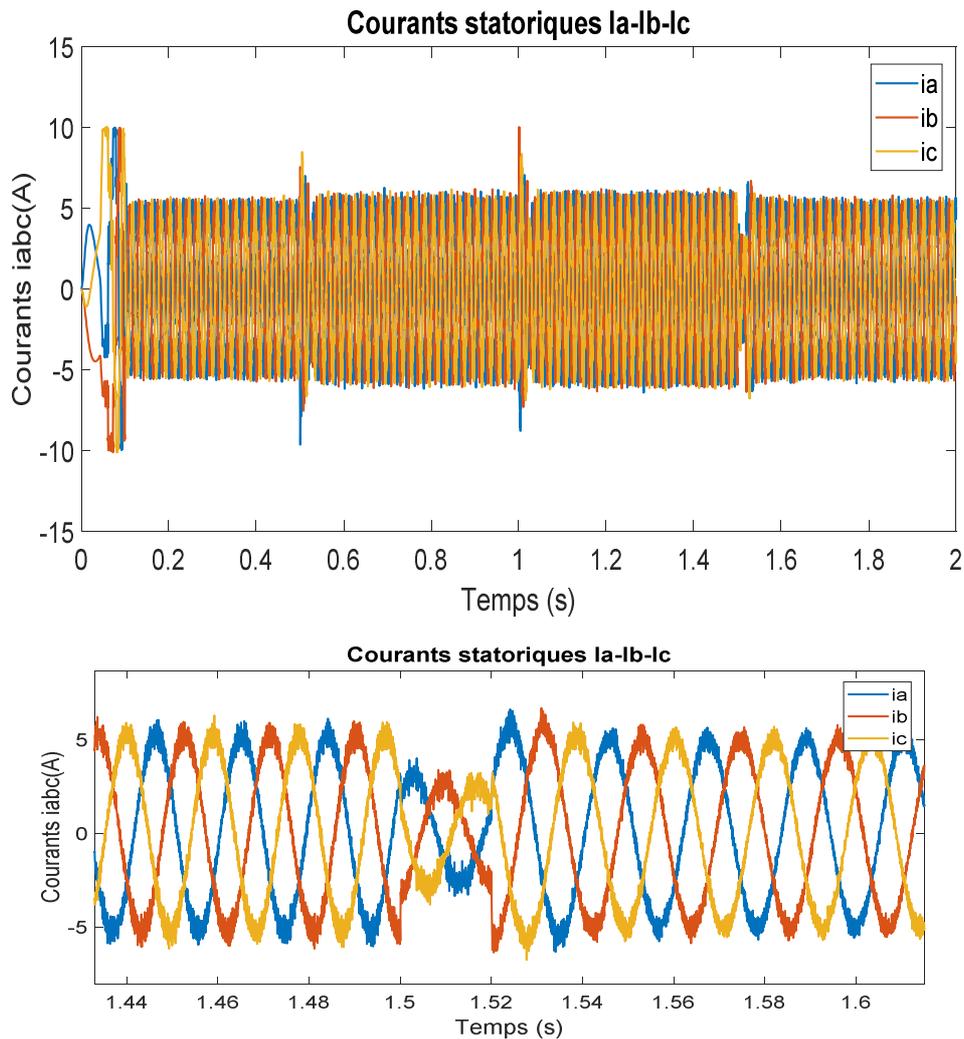


Figure IV.7: Courants statoriques iabc

La Fig. IV. 5 représente la réponse dynamique de la vitesse de rotation de la MSAP qui se stabilise au bout de 0.1s. On peut remarquer que cette vitesse suit bien sa référence donnée par le profil de vitesse du vent. Le couple de la machine atteint le niveau de charge rapidement avec des faibles ondulations et présente des pics à chaque changement de la vitesse du vent (Fig. IV.6). Comme le montre la Figure IV. 7 la forme des courants statoriques est parfaitement sinusoïdale. Les caractéristiques de la pompe centrifuge atteignent les valeurs désirées comme les montrent les figures IV.8 et IV.9

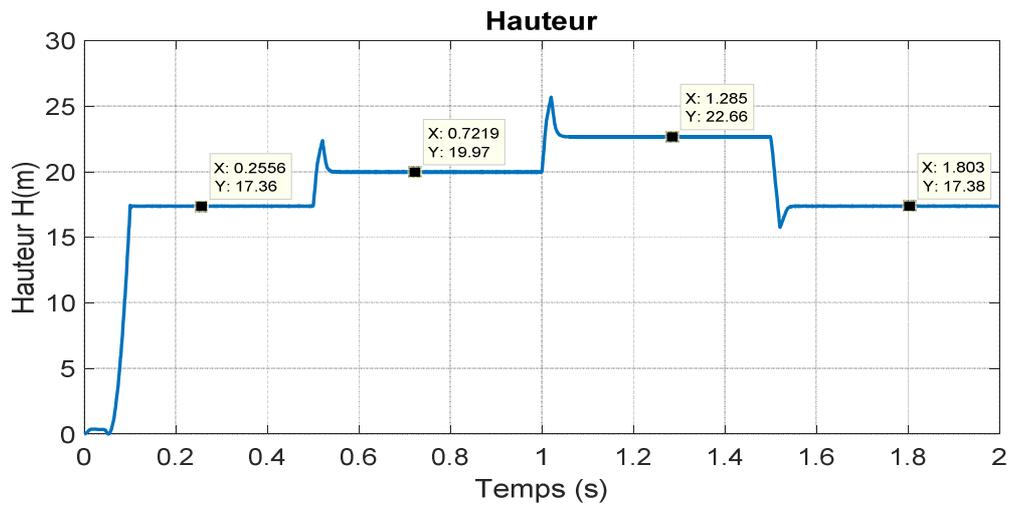


Figure IV.8: Hauteur H

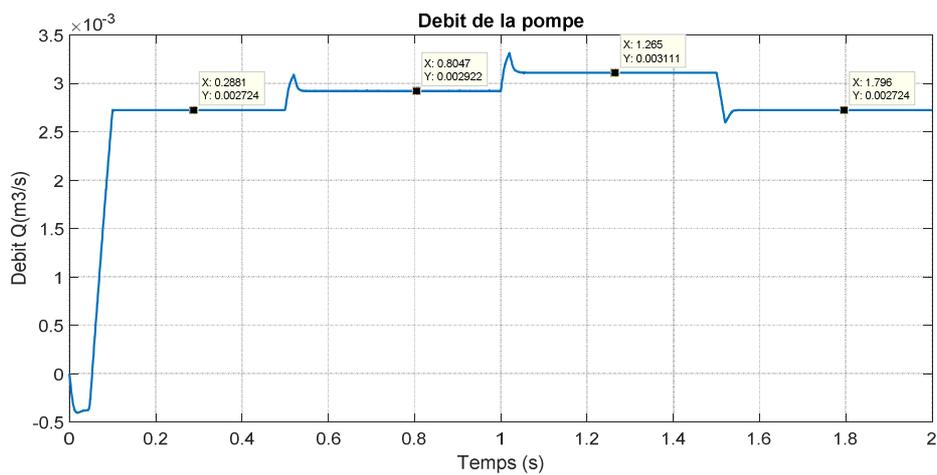


Figure IV.9: Débit Q

IV.3.2 Profil de vitesse du vent aléatoire

Dans un second temps la réponse du système de pompage éolien est étudiée en utilisant un changement aléatoire de la vitesse du vent, comme le montre la figure IV. 10. Les figures III.11-III.16 illustrent l'ensemble des résultats trouvés.

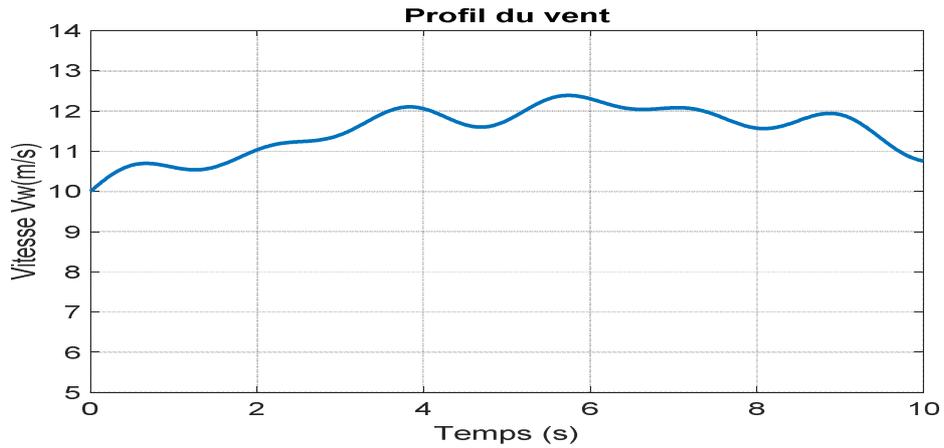


Figure IV.10: Profil de la vitesse du vent

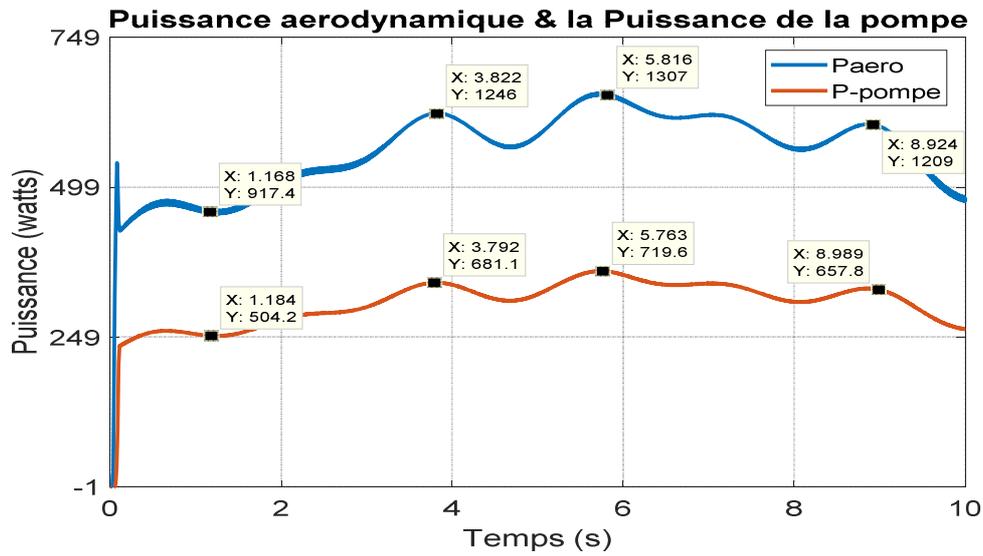


Figure IV.11: Puissance aérodynamique et la puissance hydraulique

D'après la figure IV. 11 la puissance électrique produite par la turbine atteint sa valeur maximale rapidement pendant une durée très courte du régime transitoire. De même pour la puissance hydraulique qui suit bien la puissance aérodynamique captée par la turbine.

On remarque bien sur la Fig. IV. 12 et la Fig. IV.13, les réponses dynamiques que présentent la vitesse de rotation de la MSAP ainsi que le couple électromagnétique. La vitesse suit bien sa référence qui est fonction de la puissance aérodynamique, donc fonction du profil de vitesse du vent. Le couple de la machine atteint le niveau de charge très rapidement avec des faibles ondulations sans aucun pic sauf au démarrage. Les courants statoriques ont une forme purement sinusoïdale

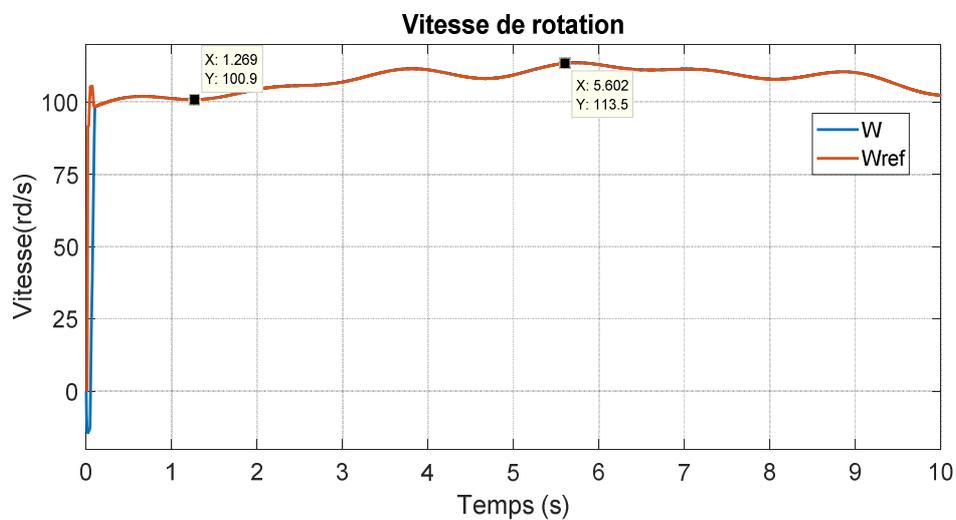


Figure IV.12: Vitesse de rotation du moteur

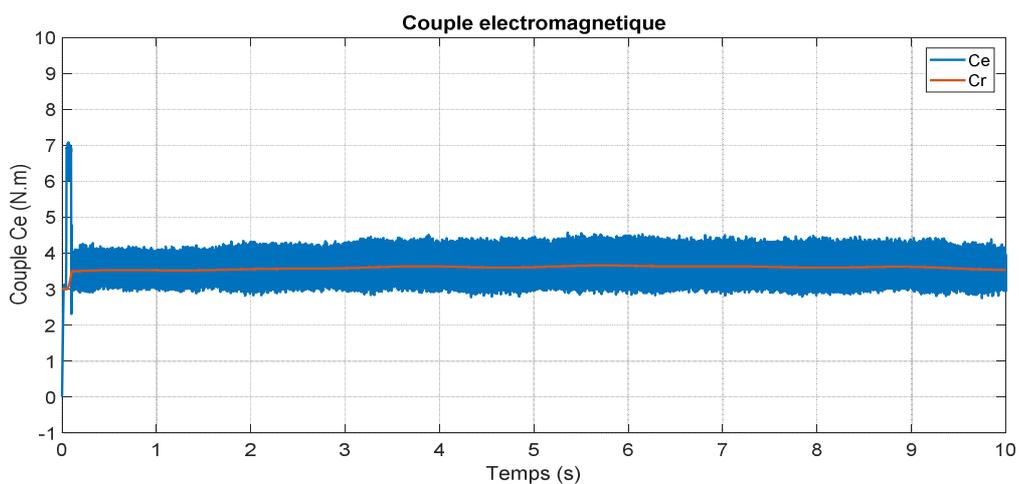


Figure IV.13: Couple électromagnétique

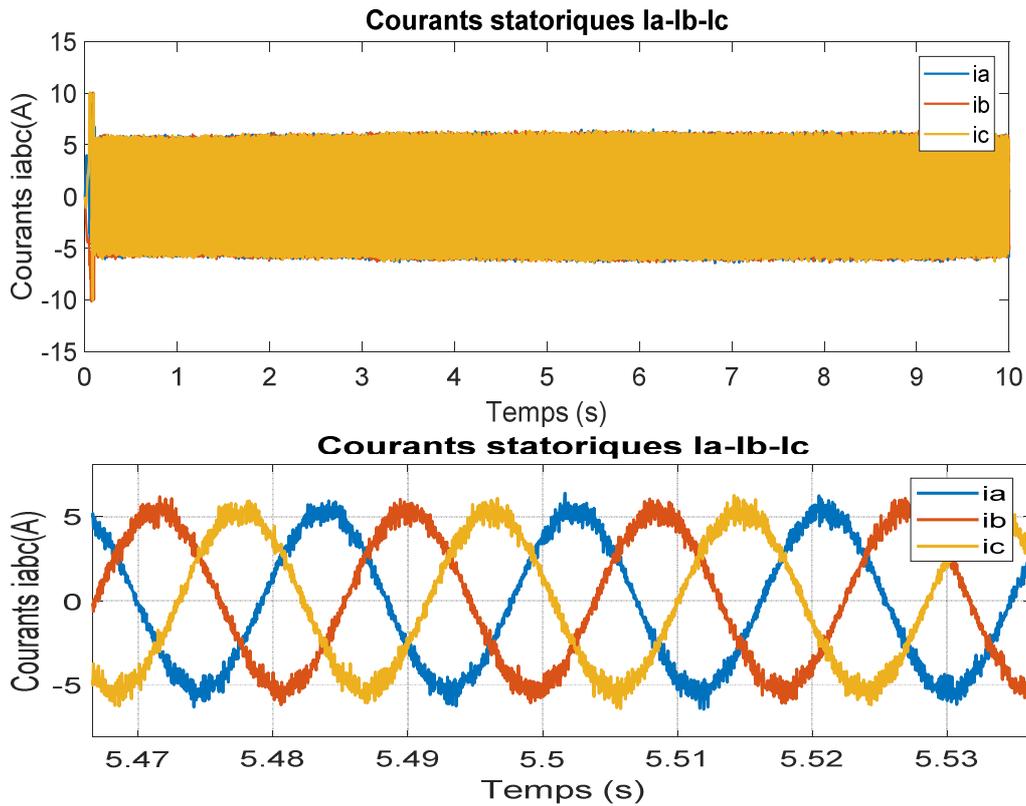


Figure IV.14: Courants statoriques iabc

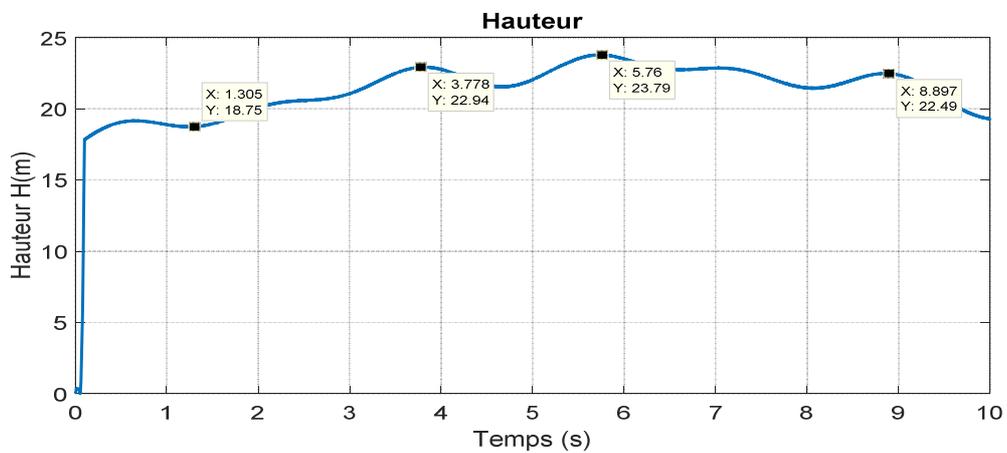


Figure IV.15: Hauteur H

Les caractéristiques de la pompe centrifuge atteignent rapidement les valeurs désirées comme les montrent les figures IV.8 et IV.9.

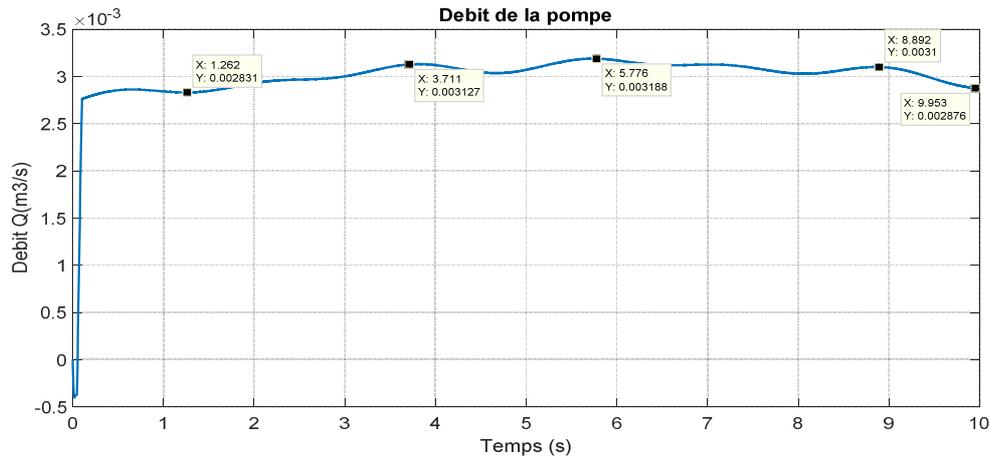


Figure IV.16: Débit Q

L'algorithme MPPT proposé qui est basée sur la commande prédictive, cependant, a pu suivre efficacement le point de puissance maximale aux différents niveaux de la vitesse du vent. De plus, l'algorithme a présenté un temps transitoire très court, indiquant sa réponse rapide aux changements des conditions environnementales.

IV.4. Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à la validation numérique de la commande prédictive de vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents implantée dans un système de conversion de l'énergie éolienne. Le système étudié est dédié aux applications de pompage d'eau pour l'irrigation des fermes agricoles. Avec un faible dépassement et faibles ondulations, la stratégie proposée présente une excellente capacité de suivi de vitesse. Les résultats obtenus par simulation ont vérifié la faisabilité et l'efficacité de la technique proposée. La mise en œuvre réussie de l'algorithme dans de telles conditions met en évidence sa robustesse et sa fiabilité, et souligne son potentiel d'utilisation dans des applications du monde réel.

Conclusion générale



Dans ce mémoire, nous avons étudié la commande prédictive d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. L'objectif principal était de développer une stratégie de commande efficace pour optimiser les performances du système en termes de production d'énergie, de stabilité et de robustesse. Le but de ce travail

Premièrement, nous avons commencé par

Et à la fin de cette étude, nous avons Modélisation mathématique de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne : Nous avons développé un modèle mathématique détaillé de la chaîne de conversion, incluant la turbine éolienne, la génératrice, le convertisseur AC/DC, le convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC, un system de pompage (MSAP et pompe centrifuge)

Par la suite, Nous avons conçu une stratégie de commande prédictive basée sur le modèle mathématique de la chaîne de conversion. Cette stratégie permet d'anticiper le comportement du système et de prendre des décisions de commande optimales en temps réel.

Enfin, nous avons réalisé des simulations numériques pour valider les performances de la stratégie de commande prédictive. Les résultats obtenus montrent que la stratégie proposée permet d'améliorer significativement les performances du système en termes de production d'énergie, de stabilité et de robustesse.

Les travaux réalisés dans ce mémoire apportent une contribution significative à l'avancement de l'état de l'art dans le domaine de la commande prédictive des chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Les principaux apports de ce mémoire sont

- Développement d'une nouvelle stratégie de commande prédictive efficace et robuste.
- Validation des performances de la stratégie proposée par des simulations numériques.
- Mise en évidence des avantages de la commande prédictive pour les chaînes de conversion de l'énergie éolienne.

Les perspectives de ce travail concernent la mise en œuvre expérimentale de la stratégie de commande prédictive sur un système réel. Il s'agira également de développer des stratégies de commande prédictives plus sophistiquées pour tenir compte de contraintes supplémentaires telles que les limites de courant et de tension.

Références bibliographique



- [01] Errouissi, R., Al-Durra, A., Debouza, M.: A novel design of PI current controller for PMSG-based wind turbine considering transient performance specifications and control saturation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 65(11), 8624–8634 (2018)
- [02] Kumar, D., Chatterjee, K.: A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 957–970 (2016)
- [03] Alizadeh, M., Kojori, S.S.: Augmenting effectiveness of control loops of a PMSG (permanent magnet synchronous generator) based wind energy conversion system by a virtually adaptive PI (proportional integral) controller. *Energy* 91, 610–629 (2015).
- [04] Yaramasu V, Wu B. Predictive Control of Three-Level Boost Converter and NPC Inverter for High Power PMSG-Based Medium Voltage Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Trans Power Electron* 2014:1–11
- [05] Frédéric poitiers. « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat. Université de Nantes -2003.
- [06] TAHIR Khaled, SEMSAR Salim. « Machine asynchrone double étoile dédié à un système éolien ». Mémoire de master. UNIVERSITE A.MIRA DE BEJAIA -2019/2020.
- [07]WWEA «Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne»07 novembre2023 (wwindea.org)
- [08] AHMIDAT Zana, KOUIDRI Zahra, « Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux », Mémoire de master, Université D'adrar,2019/2020
- [09]GASMI Hamza. « Contribution à l'amélioration de la commande des chaines de conversion éoliennes ». THÈSE DOCTORAT. Université 8 Mai 1945 Guelma -2022-2023.
- [10] K . DJAMILA, Y.ZIDELMAL, « Commande linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de master, Université D'Adrar,2019/2020
- [11] J. Tekobon, M. El Mokadem, « Système multi physique de simulation pour l'étude de la production de l'énergie basée sur le couplage éolien offshore-hydrolien », Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2006
- [12]ChikhaSaid« Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 2017
- [13] Z.Samir ,B.Ayoub , O. illias « Commande prédictive d'une génératrice asynchrone à double alimentation ». MASTER ACADEMIQUE. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued-2021.

- [14] BENKHALED Bilal. « Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne ». Mémoire de master. UNIVERSITE DE M'SILA-2012 / 2013.
- [15] BRAHAM Ikram, SEHAILIA Amani. « Commande DTC d'une éolienne à base d'une MSAP». Mémoire de master. Université cheikh Iarbitebessi - tebessa -2022/2023.
- [16] A Abderrahim, B Moussa. « Etude d'une éolienne de petite puissance à base d'une machine synchrone à aimants permanents». Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira - Bejaia - 2017/2018.
- [17] Bouhenna amina « Etude de l'impact des techniques de commande et des topologies des convertisseurs statiques avancées sur le comportement d'un réseau électrique décentralisé », thèse de doctorat, université de Relizane, Relizane, 2021/2022
- [18] T, Azzouz « Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation », mémoire magister de l'université Mohamed Khider Biskra, 2009.
- [19] Redjem Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », thèse magistère de l'université Mentouri de Constantine, 2007.
- [20] ARAMA Mohamed Amin. «Commande non linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation». Mémoire de master. Université Ahmed Draïa Adrar - Adrar - 2020/2021.
- [21] L. Khettache. «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique». Mémoire de master. Universit2 de Batna, 2007.
- [22] H. Li, Z. Chen, «Overview of Different Wind Generator Systems and their Comparison», IET Journals & Magazines on Renewable Power Generation, Vol. 2, Issue 2, PP. 123-138, 2008.
- [23] K.Idjdaren « Contribution A L'étude Et La Commande De Génératrices Asynchrones A Cage Dediees A Des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » thèse doctorat l'Université Abderrahmane MIRA – Bejaia.
- [24] BOUMARAF Farid, «Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle», Thèse de doctorat en Electrotechnique, UNIV de Batna, Algérie, 2014.
- [25] Hita Yassine. « Etat de l'art sur l'énergie éolienne». Mémoire de master. Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger -Alger -2023.
- [26] BOUDISSA MALIKA, BOUDJEMIL HOURIA. « Commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone à aimants permanents». Mémoire de master. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU - TIZI-OUZOU - 2016/2017.

- [27] HAMECHA Samira, Ep. BOUREKACHE. « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ». Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou - TIZI-OUZOU - 2013.
- [28] Boulouf mohammed, Heouaine soufyane. « Contrôle d'un système éolien par des techniques intelligentes ». Mémoire de Master. Université Mohamed Seddiki Ben Yahia - Jijel - 2020 /2021.
- [29] Z .Salah Eddine. « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau ». Mémoire de Master. Université BADJI MOKHTAR- ANNABA - 2017.
- [30] M .CHAIMA,L. INESS « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne». Mémoire de Master. Université Larbi Tébessi– Tébessa – 2020/2021.
- [31] OULED ALI Omar « Commande directe du couple de la machine synchrone à aimants permanents par l'utilisation des techniques intelligentes (logique floue, réseaux de neurones, algorithme génétique et PSO)». thèse doctorat. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL-ABBES –2021.
- [32] Abouchabana Nabil, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009
- [33] M.N.Mchalikh et CH. Hmada «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Master Université de Biskra.
- [34] BOULEMNAKHAR Yasseret BOUDJADAR Seyyidali «Simulation Des Défauts D'une Chaîne De Pompage Photovoltaïque» Mémoire de Master ,Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel-2021.
- [35] L. BERRAMDANE, Y. BOUASSIDA, R. MOHAMED, « Étude d'un système de pompage photovoltaïque modélisation et simulation » Mémoire Master, Université Annaba, 2018.
- [36] H. TAMISSA, N. TOUTI, « Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride », Mémoire De Master, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.
- [37]TEBBAL Abderezzak ET SEKHRI Miloud, « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent», Mémoire De Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2019.
- [38] K.Ibrahim, A.Yasser.« Commande prédictive d'une chaîne de pompage photovoltaïque». Mémoire de master. Université Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2023.

- [39] BOUREZG ISLAM. « Application de la commande prédictive pour l'équilibrage des sources de tension d'entrée d'un onduleur multi-niveaux». Mémoire de master. Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel,2019-2020.
- [40]HemzaBouaouaou. « Modélisation, étude et commande d'un système hybride de conversion des énergies renouvelables». thèse doctorat. Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel,2019-2020.
- [41] RODRIGUEZ, Jos, PONTT, Jorge, SILVA, Csar A., et al. Predictivecurrent control of a voltage source inverter. IEEE transactions on industrial electronics, 2007, vol. 54, no 1, p. 495-503.
- [42] MA, Zhixun, SAEIDI, Saeid, et KENNEL, Ralph. FPGA implementation of model predictive control with constant switching frequency for PMSM drives. IEEE transactions on industrial informatics, 2014, vol. 10, no 4, p. 2055-2063.
- [43] Gao, X., Abdelrahem, M., Hackl, C. M., Zhang, Z., & Kennel, R. (2019). Direct predictive speed control with a sliding manifold term for PMSM drives. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(2), 1258-1267

Annexe

Paramètres de la turbine éolienne :

Nombre de pales	3
Puissance nominale	2.5 KW
angle β	0
Vitesse du vent	12m/s
Rayon de la turbine	1.5 m
Masse volumique de l'air	1.25 Kg/m ³

Paramètres de la GSAP :

Nombre de paires de pôles	4
Résistance statorique	0.00837 ohm
Inductance statorique	0.0003446 H
Flux des aimants permanents	0.175Wb
Coefficient de frottement	0.01197 N.m.s

Paramètres du hacheur Boost :

Inductance (H)	130e ⁻³
Condensateur C_i (F)	1400e ⁻⁶
Condensateur C_{out} (F)	604e ⁻⁶
Résistance R (Ω)	149

Spécifications de la pompe centrifuge :

w_n	2900t_r/min
P_p	1KW
Q_n	3.05l/s
H	20 m
a_0	$7.1 * 10^{-4} \text{m}(\text{rad}/\text{sec})^2$
a_1	$- 1.84127\text{m}/(\text{rad}/\text{sec})(\text{m}^3/\text{sec})$
a_2	$209.5238 * 10^3 \text{m}/\text{m}^3/\text{sec}^2$

Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents :

V	240V
P_m	1500W
R_a	1.4 Ω
L_d	0.0059H
L_q	0.0059H
C_e	4.5N.m
W	1000 t_r /min
f	0.0003881N.(m/rad).s ⁻¹
J	0.00176N.m
P	3

Résumé :

L'utilisation de la source d'énergie éolienne dans les secteurs isolés et les zones rurales est une meilleure solution pour produire l'énergie électrique nécessaire à des applications telles que les systèmes de pompage. La plus grande flexibilité des petits systèmes d'énergie éolienne les rend prédominants dans les systèmes de pompage d'eau. Ce mémoire se concentre sur l'étude et la simulation d'une commande prédictive de vitesse appliquée dans un système de conversion de l'énergie éolienne dédié au pompage d'eau. La commande prédictive de vitesse (Predictive Speed Control (PSC)) est présentée comme une alternative efficace au contrôle vectoriel (Field Oriented Control (FOC)) et la commande directe du couple (Direct Torque Control (DTC)), notamment avec le récent développement massif des microprocesseurs et des techniques de modélisation. Contrairement au FOC, le PSC ne nécessite ni régulateurs proportionnels-intégraux (PI), ni modulation vectorielle spatiale, garantissant une réponse rapide du couple et une fréquence de commutation plus basse souhaitée dans les variateurs moyenne et haute tension. Les résultats de la simulation numérique ont confirmé que la méthode proposée peut suivre les changements de vitesse du vent avec une grande précision et une dynamique transitoire minimale. La présente étude peut être utilisée comme base pour des travaux futurs dans lesquels des sources d'énergie supplémentaires (photovoltaïques, batteries) peuvent être incorporées en faveur de l'étude de la fiabilité du système tout en adoptant différents types d'algorithmes de gestion et de contrôle de l'énergie.

Mots clés :

Système de conversion de l'énergie éolienne, pompage d'eau, commande prédictive de vitesse, machine synchrone à aimants permanents.

Abstract :

Using wind energy source in remote areas and rural areas is a better solution to produce the electrical energy needed for applications such as pumping systems. The greater flexibility of small wind power systems makes them predominant in water pumping systems. This dissertation focuses on the study and simulation of predictive speed control applied in a wind energy conversion system dedicated to water pumping. Predictive Speed Control (PSC) is presented as an effective alternative to vector control (Field Oriented Control (FOC)) and direct torque control (DTC), particularly with the recent development massive microprocessors and modeling techniques. Unlike FOC, PSC requires neither proportional-integral (PI) regulators nor space vector modulation, ensuring fast torque response and lower switching frequency desired in medium and high voltage drives. The numerical simulation results confirmed that the proposed method can track wind speed changes with high accuracy and minimal transient dynamics. The present study can be used as a basis for future work in which additional energy sources (photovoltaic, batteries) can be incorporated in favor of the study of system reliability while adopting different types of management algorithms and energy control.

Keywords:

Wind energy conversion system, water pumping, predictive speed control, permanent magnet synchronous machine.

ملخص يعد استخدام مصدر طاقة الرياح في المناطق النائية والمناطق الريفية حلاً أفضل لإنتاج الطاقة الكهربائية اللازمة لتطبيقات مثل أنظمة الضخ. إن أكبر قدر من المرونة لأنظمة طاقة الرياح الصغيرة تجعلها سائدة في أنظمة ضخ المياه. تركز هذه الأطروحة على دراسة ومحاكاة التحكم التنبؤي بالسرعة المطبق في نظام تحويل طاقة الرياح كبديل فعال للتحكم في المتجهات (التحكم الموجه (PSC) المخصص لضخ المياه. يتم تقديم التحكم التنبؤي بالسرعة، خاصة مع التطوير الأخير للمعالجات الدقيقة (DTC) والتحكم المباشر في عزم الدوران (FOC) نحو المجال، ولا تعديل ناقل الفضاء، (PI) منظمات تناسبية تكاملية PSC، لا يتطلب FOC الضخمة وتقنيات النمذجة. على عكس مما يضمن استجابة عزم الدوران السريعة وتردد التحويل المنخفض المطلوب في محركات الجهد المتوسط والعالي. أكدت نتائج المحاكاة العددية أن الطريقة المقترحة يمكنها تتبع التغيرات في سرعة الرياح بدقة عالية وبحد أدنى من السديناميكيات العابرة. يمكن استخدام الدراسة الحالية كأساس للعمل المستقبلي حيث يمكن دمج مصادر الطاقة الإضافية (الخلايا الكهروضوئية والبطاريات) لصالح دراسة موثوقية النظام مع اعتماد أنواع مختلفة من خوارزميات الإدارة والتحكم في الطاقة.

الكلمات المفتاحية: نظام تحويل طاقة الرياح، ضخ المياه، التحكم التنبؤي بالسرعة، آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم.