

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane – Mira de Bejaia

Faculté de technologie

Département de génie électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master

Filière : Electrotechnique

Option : Commandes électrique et Electrotechnique industrielle

Thème

**Etude des performances d'un système de
pompage alimenté par un générateur
asynchrone à double alimentation dédié à
l'énergie éolienne**

Réalisé par:

**BELKACEMI Rachida
TENNICHE Yasmina**

Promoteurs :

**M^r : S. TAMALOUZT
M^r : K. IDJDARENE**

Année universitaire : 2018/2019

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qui nous a offert durant toutes ces longues années.

Nous tenons à adresser nos sincères et respectueux remerciements à monsieur K. Idjdarene et monsieur S. Tamalouzt pour leur temps, leur disponibilité, leur sacrifice et leur orientation qui nous ont permit d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepter d'évaluer ce travail.

Un grand merci à nos familles, pour leur soutien constant, leur présence et la confiance dont ils ont fait preuve.

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon cher père symbole du courage et de volenté, qui a consacré et sacrifié sa vie pour mon bien être.

A ma chère mère qui m'a soutenue et encouragée dans ma vie.

A mes chères sœurs.

A mon cher frère.

A toute ma famille.

A mon binôme Rachida.

A tous mes chères ami(e)s.

A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.

YASMINA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de mon cher père,

Ma chère maman,

Mes chers frères et sœurs,

Toute ma famille.

Mon binôme Yasmina.

Tous mes amis.

Rachida

Nomenclature

1. La turbine

- P_v : La puissance fournie par le vent (W).
- P_t : La puissance de la turbine éolienne (W).
- ρ : Masse volumique de l'aire (kg/m^3).
- S_t : La surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
- R : Rayon de la turbine éolienne(m).
- V_v : La vitesse du vent (m/s).
- Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
- C_p : Le coefficient de puissance.
- λ : Le rapport de la vitesse réduite au bout des pales.
- λ_{opt} : Le rapport optimal de la vitesse réduite au bout des pales.
- C_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
- β : L'angle de calage des pales (rad).

2. La machine

Grandeurs statoriques

Machine réelle

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statorique.
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statorique.
- R_s : Resistance d'une phase statorique.
- L_s : Inductance propre d'une phase statorique (H).
- ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).
- $[V_s]$: Vecteur des tensions statorique (V).
- $[i_s]$: Vecteur des courants statoriques.
- $[\Phi_s]$: Vecteur des flux statoriques.
- $[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
- $[L_{ss}]$: Matrice d'inductance statorique.

Machine modélisée

- V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
- i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
- Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

θ_s : Angle électrique entre la première phase statorique de la machine et l'axe (d) du repère de Park (rad).

Grandeurs rotoriques

Machine réelle

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotoriques(A).

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm).

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique (H).

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

$[V_r]$: Vecteur des tensions rotorique (V).

$[i_r]$: Vecteur des courants rotoriques.

$[\Phi_r]$: Vecteur des flux rotoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductance rotorique.

Machine modélisée

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

θ_r : Angle électrique entre la première phase rotorique de la machine et l'axe (d) du repère de Park (rad).

Grandeurs communes stator/rotor

Machine réelle

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

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

g : Glissement de la machine.

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle.

Machine modélisée

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

Grandeurs mécaniques

J : Inertie totale ramenée à l'arbre de moteur.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

C_{visq} : Couple de frottements visqueux.

C_g : Couple de la génératrice asynchrone.

G : Gain du multiplicateur.

3. Les convertisseurs

L'onduleur

V_a, V_b, V_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V).

$i_{ach}, i_{bch}, i_{cch}$: Courants de sortie (A).

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

4. Le bus continu

V_{dc} : Tension du bus continu.

i_c : Courant capacitif (A).

C : Capacité du bus continu (F).

5. La pompe

Q : Débit de la pompe (m^3/s).

H : Hauteur totale du pompage (m).

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

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

C_r : Couple résistant de la pompe (N.m).

6. Convention et abréviations

MAS : Machine asynchrone.

MADA : Machines asynchrones à double alimentation.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

S : Opérateur de Laplace.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu.

DTC : Commande direct du couple.

Liste des figures

Figures de chapitre I

Figure. I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure. I.2 Les composantes de l'aérogénérateur.....	4
Figure. I.3 Eolienne à axe horizontale.....	6
Figure. I.4 Eolienne à axe vertical.....	6
Figure. I.5 Caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent.....	9
Figure. I.6 Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique.....	12
Figure. I.7 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	13
Figure. I.8 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.....	14
Figure. I.9 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique.....	14
Figure. I.10 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	15
Figure. I.11 Les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA.....	17
Figure. I.12 Schéma de l'onduleur.....	19
Figure. I.14 Pompe à piston.....	20
Figure. I.15 Pompe centrifuge.....	21

Figures de chapitre II

Figure. II.1 Schéma représentatif de la chaîne de conversion proposé.....	23
Figure. II.2 Schéma de la turbine éolienne.....	24
Figure. II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	26
Figure. II.4 Schéma du modèle de la turbine.....	27
Figure. II.5 Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.....	28
Figure. II.6 Représentation simplifié de la MADA.....	29
Figure. II.7 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	32
Figure. II.8 Représentation schématique d'un onduleur relié à la machine.....	35
Figure. II.9 Schéma simple du circuit du bus continu.....	36

Figures de chapitre III

Figure. III.1 Stratégie de Commande Directe de Couple.....	41
Figure.III.2 Exemple de l'évolution de l'extrémité de \varnothing_s	44
Figure. III.3 Sélection du vecteur de tension.....	45
Figure. III.4 Contrôle du flux statorique.....	47
Figure.III.5 Correcteur à hystérésis de flux.....	48
Figure.III.6 Correcteur à hystérésis de couple à trois niveaux.....	49
Figure. III.7 Exemple d'évolution de l'extrémité \varnothing_r de pour $R_r I_r$ négligeable ($V_r = V_2$).....	50
Figure. III.8 Sélection du vecteur tension V_s selon la zone $N=i$	51

Figures de chapitre IV

Figure. IV.1 Caractéristique $C_p(\lambda)$	55
Figure. IV.2 vitesse du vent.....	56
Figure. IV.3 L'allure du glissement de la machine.....	56
Figure. IV.4 L'allure de la vitesse mécanique de la génératrice.....	57
Figure. IV.5 L'allure de la vitesse réduite.....	57
Figure. IV.6 L'allure du coefficient de puissance.....	58
Figure. IV.7 L'allure de la puissance mécanique.....	58
Figure. IV.8 allure de la puissance active statorique et rotorique.....	59
Figure. IV.9 Evolution du couple électromagnétique par rapport à sa référence.....	60
Figure. IV.10 Allure du flux rotorique.....	60
Figure. IV.11 trajectoire du flux rotorique estimé.....	61
Figure. IV.12 Evolution du module du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.....	61
Figure. IV.13 Trajectoire du flux statorique estimé.....	62
Figure. IV.14 Allure du flux statorique.....	63
Figure. IV.15 Allure des flux statoriques (\varnothing_α et \varnothing_β).....	64
Figure. IV.16 Zoom sur les flux statoriques (\varnothing_α et \varnothing_β).....	64
Figure. IV.17 Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.....	65
Figure. IV. 18 Allure de la vitesse de la pompe.....	66
Figure. IV.19 Allure du débit de la pompe.....	66

Liste des tableaux

Tableau. III.1 La table de commutation avec correcteur du couple à trois niveaux.....54

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur le système de pompage éolien	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	3
I.3. Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal)	4
I.4. Classification des éoliennes	5
I.4.1. Selon le type du capteur	6
I.4.2. Selon le mode de régulation	7
I.4.3. Selon le mode de fonctionnement	7
I.4.4. Selon l'accouplement mécanique.....	7
I.4.5. Selon les convertisseurs électromécaniques.....	8
I.5. Zones de fonctionnement d'une éolienne	9
I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	10
I.6.1. Avantages	10
I.6.2. Inconvénients	10
I.7. Application de l'énergie éolienne	11
I.8. Différents types de pompage éolien.....	11
I.8.1. Pompage éolien mécanique.....	11
I.8.2. Pompage éolien électrique.....	12
I.9. Configuration des systèmes de pompage éolien suivant le moteur d'entraînement	12
I.9.1. Machine asynchrone à cage (MAS)	13
I.9.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	14
I.9.2.1. Constitution de la MADA.....	15
I.9.2.2. Intérêt de la MADA	15
I.9.2.3. Différents modes de fonctionnement de la MADA	16
I.9.2.4. Domaines d'application de la MADA	17
I.9.2.5. Avantages et inconvénients	18
I.10. Convertisseurs statiques.....	19
I.10.1. Le convertisseur continu- alternatif (onduleur).....	19
I.11. Sous-système de pompage	20
I.11.1. Types de pompes utilisées	20

Chapitre II *Modélisation des éléments de pompage éolien*

1	II.1. Introduction	23
2	II.2. Description de la structure choisie	23
3	II.3. Modélisation de la vitesse du vent	24
4	II.4. Modélisation de la turbine éolienne	24
5	II.5. Modèle du multiplicateur	25
6	II.6. Modèle l'arbre de transmission	26
7	II.7. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT)	27
8	II.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	28
8.1	II.8.1. Hypothèses de travail	28
8.2	II.8.2. Mise en équations du modèle de la machine asynchrone à double alimentation	28
8.3	II.8.3. Transformation de Park	31
9	II.9. transformation de Concordia (repère α, β)	31
10	II.10. Application de la transformation de Park au modèle de MADA	32
11	II.11. Choix du référentiel	33
11.1	II.11.1. Référentiel lié au stator α, β	33
11.2	II.11.2 Référentiel lié au rotor x, y	34
11.3	II.11.3. Référentiel lié au champ tournant d, q	34
12	II.12. Modélisation de L'onduleur	34
13	II.13. Modélisation du bus continu	36
14	II.14. Modélisation du groupe moteur –pompe	36
14.1	II.14.1. Modélisation de la machine asynchrone à cage	36
14.2	II.14.2. Modélisation de pompe centrifuge	37
15	II.15. Conclusion	38

Chapitre III **Stratégie de commande et simulation**

III.1.	Introduction	40
III.2.	Le principe de la commande directe du couple	40
III.3.	Partitionnement algorithmique de la commande DTC	40
III.4.	Caractéristiques générales d'une commande directe de couple	41
III.5.	Avantages et inconvénients de la DTC	42

III.5.1. Avantages	42
III.5.2. Inconvénients.....	42
III.6. Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension	42
III.7. Stratégie de commande directe du flux et du couple de la MAS	43
III.7.1. Principe du contrôle du flux statorique.....	43
III.7.2 Principe du contrôle du couple statorique	44
III.7.3. Sélection du vecteur de tension	44
III.7.4. Structure du système de contrôle direct du couple :	45
III.7.4.1. Estimation du flux statorique	45
III.7.4.2. Estimation du couple électromagnétique	47
III.7.5. Correction du flux statorique et du couple électromagnétique	47
III.7.5.1. Correction du flux statorique	47
III.7.5.2. Correction du couple.....	48
III.8. Stratégie de commande directe du flux et du couple de la MADA.....	49
III.8.1. Principe du contrôle du flux rotorique.....	49
III.8.2. Principe du contrôle du couple électromagnétique.....	50
III.8.3. Sélection du vecteur de tension	50
III.8.4. Estimateur du flux rotorique.....	51
III.8.5. Estimation du couple électromagnétique.....	52
III.8.6. Elaboration du flux rotorique et du couple électromagnétique	52
III.8.6.1. Correction du flux rotorique	52
III.8.6.2. Correction du couple.....	53
III.9. Elaboration de la table de commutation	53
III.10. Conclusion.....	54
Chapitre IV Résultats de simulation	
IV.1. Introduction	55
IV.2. Résultats de simulation	55
IV.3 Conclusion	68
Conclusion générale	69

Introduction générale

La consommation d'énergie est toujours en augmentation à cause de nos différentes exigences domestiques et industrielles. Ce qui nous a poussé à chercher d'autres sources d'énergie plus disponibles, moins polluantes et durables.

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. Aujourd'hui, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique [1].

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones mais des études sont aussi réalisées dans le but de développer des machines spéciales [1].

La multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite. Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient des machines asynchrones. En effet, ces machines présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit. L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produite par rapport à celle fonctionnant à vitesse fixe pour maximiser la puissance captée, tout en utilisant la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) [2].

Les éoliennes basées sur les machines asynchrones à doubles alimentations (MADA) sont aujourd'hui plus largement utilisées ; Notamment dans les grands parcs éoliens à cause des avantages qu'elles présentent. La MADA fonctionne à une fréquence fixe pour des vitesses d'entraînement variable grâce à un contrôle des grandeurs rotoriques par des convertisseurs dimensionnés à des puissances réduites par rapport à celle de la machine asynchrone à cage.

L'énergie éolienne est utilisée dans plusieurs applications en site isolés telle que l'éclairage et le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes [3].

C'est dans ce contexte que ce travail sera effectué. Pour cela, ce mémoire aura comme objectif l'étude des performances d'un système de pompage alimenté par une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à l'énergie éolienne. Afin de bien situer notre travail, nous avons structuré ce mémoire suivant quatre chapitres :

Le premier chapitre, portera une présentation d'un état de l'art des aérogénérateurs, des généralités sur la classification selon la typologie des éoliennes et un aperçu sur le système de pompage et les différentes machines que le système éolien pourra en faire recours.

Dans le second chapitre, nous présenterons la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne proposée. En premier lieu, nous modéliserons la partie mécanique de l'éolienne, puis la machine asynchrone à double alimentation avec son alimentation et enfin, la modélisation du groupe motopompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge, sera présentée.

Dans le troisième chapitre, le principe d'une commande non linéaire basée sur la technique du contrôle direct du couple (DTC) sera présenté et développé pour le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation ainsi que pour le cas du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats de simulation du système proposé pour étude dans ce mémoire. Ces résultats sont obtenus à partir de l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les performances et la robustesse des stratégies de commande des différentes parties (production d'énergie et pompage) de ce système seront discutées et commentées.

Enfin, une conclusion générale et quelques perspectives seront présentées.

I.1. Introduction

Depuis ces dernières décennies, l'intérêt de l'utilisation des énergies renouvelables n'arrête pas d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus intéressé par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. La conversion de cette énergie en énergie électrique connaît un essor considérable. Cela est dû d'une part, à des contraintes d'ordre environnementales mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mise en œuvre pour assurer cette conversion. Il existe plusieurs systèmes qui utilisent les technologies éoliennes de différents types qui ont été conçus et développés. Sachant que nous nous intéressons à un système de pompage éolien.

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice peut fonctionner à vitesse variable. Elle permet alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent aujourd'hui, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que des performances spécifiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les éoliennes d'une manière générale, les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisée pour l'étude menée dans ce mémoire.

I.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent disponible en énergie mécanique ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise après au réseau électrique.

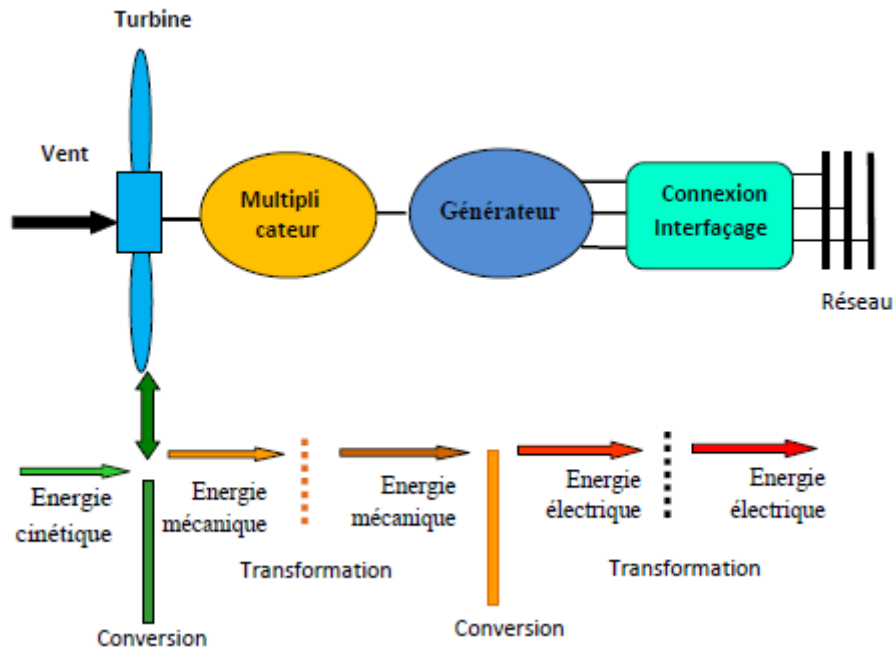


Figure. I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3. Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal)

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique puis elle sera transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité produite peut être envoyée au réseau de distribution ou stockée dans des batteries de condensateurs, utilisée par des charges isolées [4].

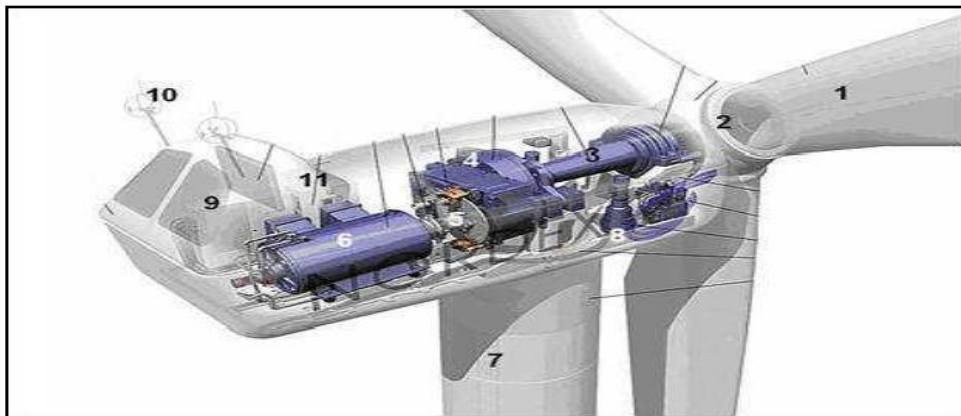


Figure. I.2 Les composantes de l'aérogénérateur.

1. **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

- 3. L'arbre primaire (ou arbre lent) :** relie les pales au multiplicateur.
- 4. Le multiplicateur :** il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5. L'arbre secondaire :** il mène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- 6. Le générateur électrique :** il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- 7. Le mât :** c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- 8. Le système d'orientation de la nacelle :** c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- 9. Le système de refroidissement :** il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- 10. Les outils de mesure du vent :** girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- 11. Le système de contrôle électronique :** il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- 12. Un transformateur :** se trouve au pied du mât.

I.4. Classification des éoliennes

Les générateurs éoliens peuvent être classés selon différentes catégories [5]:

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical) ;
- Le mode de régulation (Pitch ou stall) ;
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable);
- La nature de l'accouplement mécanique (la présence de multiplicateur de vitesse);
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, etc.).

I.4.1. Selon le type du capteur

Les éoliennes se divisent en général en deux grandes familles, selon l'orientation de leur axe de rotation :

- L'éolienne à axe horizontal.
- L'éolienne à axe vertical.

a. Eolienne à axe horizontal

Les aérogénérateurs aux axes horizontaux sont les descendantes directes des moulins à vent. Elles sont les plus utilisées aujourd'hui que les éoliennes aux axes verticaux pour leurs avantages économiques liés à leur installation et à leur fabrication. Elles sont formées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales de ces machines est généralement compris entre 1 et 3 et elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Les éoliennes qui sont constituées d'une ou de deux pales présentent l'avantage de peser moins, mais elles sont plus bruyantes et présentent un rendement plus petit. Il faut éviter un nombre pair de pales pour des raisons de stabilité [6].

b. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes aux axes verticaux ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité, ce genre de type d'éolienne est très peu répandu et assez mal connu car elles sont moins performantes que celles aux axe horizontaux. Elles présentent l'avantage d'avoir les parties de commande et le générateur au niveau du sol donc, l'intervention en cas d'incident est facile [6].



Figure. I.3 Eolienne à axe horizontale



Figure. I.4 Eolienne à axe vertical

I.4.2. Selon le mode de régulation

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, deux types de régulation permettent de limiter cette vitesse sous les noms de « Pitch Control » et « Stall Control » [2].

- **Pitch control** : C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales qui est réalisé par l'orientation des pales et la variation de la surface apparente au vent.
- **Stall Control** : C'est un régulateur par décrochage aérodynamique, c'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle.

I.4.3. Selon le mode de fonctionnement

Il existe deux grands types de fonctionnement des éoliennes, aérogénérateur à vitesse fixe et à vitesse variable. Les avantages de ces deux types de fonctionnement sont [7] :

a. Fonctionnement à vitesse fixe

- ✓ Système électrique plus simple ;
- ✓ Plus grande fiabilité ;
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- ✓ Système électrique de commande n'est pas nécessaire ;
- ✓ Système moins cher.

b. Fonctionnement à vitesse variable

- ✓ Meilleur rendement énergétique ;
- ✓ Réduction des oscillations du couple ;
- ✓ Moins d'efforts mécaniques supportés par le convertisseur de puissance ;
- ✓ Meilleure qualité de puissance électrique.

I.4.4. Selon l'accouplement mécanique

a. Eolienne à attaque indirecte

La vitesse de la turbine est très inférieure à celle de la génératrice, c'est pourquoi la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur dont le rôle est d'adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. Des problèmes de vibration, de bruits et de coûts de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs [5].

b. Eolienne à attaque directe

Les éoliennes à attaque directe sont composées d'une génératrice qui est connectée directement à l'axe de la turbine. Il y a deux raisons principales pour l'usage des générateurs à attaque directe dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse sont tous les deux réduits [5].

I.4.5. Selon les convertisseurs électromécaniques

Diverses chaînes de production fréquentent pour la production d'électricité par aérogénérateur. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable.

Les deux type de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne son des machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.

a. Générateur Synchrone à Aimants Permanents

Les aérogénérateurs basés sur les génératrices asynchrones ou à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessité d'un système de balais et de bagues pour la MADA et un multiplicateur pour les deux types, induisant des coûts significatifs de maintenance. Pour limiter ces inconvénients, certains architectes ont développé des éoliennes basés sur des machines synchrones qui présentent un grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine pour éviter le multiplicateur. En plus, le système de bague et balais est éliminé car la génératrice est équipée d'aimants permanents. L'inconvénient de cette structure est sa connexion au réseau qui nécessite des convertisseurs de puissances dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice [8].

b. Générateur asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est largement utilisée contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone occupe aujourd'hui une grande partie des éoliennes installés dans le monde. Dans la plupart ,des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice, mais cette MAS à cage est tout à fait réversible, ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la, rendent tout à fait convenable pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [9].

c. Générateur asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un Stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

Ce genre de machine est utilisé comme génératrice dans la majorité des projets de centrale éolienne, car il permet de fonctionner sur une vaste plage de vitesses de vent [Int1].

Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et son rotor est pareillement relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Les convertisseurs sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine [9].

I.5. Zones de fonctionnement d'une éolienne

La courbe de puissance détermine la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses du vent. Généralement fournie par les constructeurs, elle permet de définir quatre zones de fonctionnement [2]:

La zone I : C'est la zone de démarrage de la machine, la puissance électrique est assez faible et la vitesse mécanique atteint presque 70% du synchronisme.

La zone II : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale.

La zone III : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale.

La zone IV : La vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .

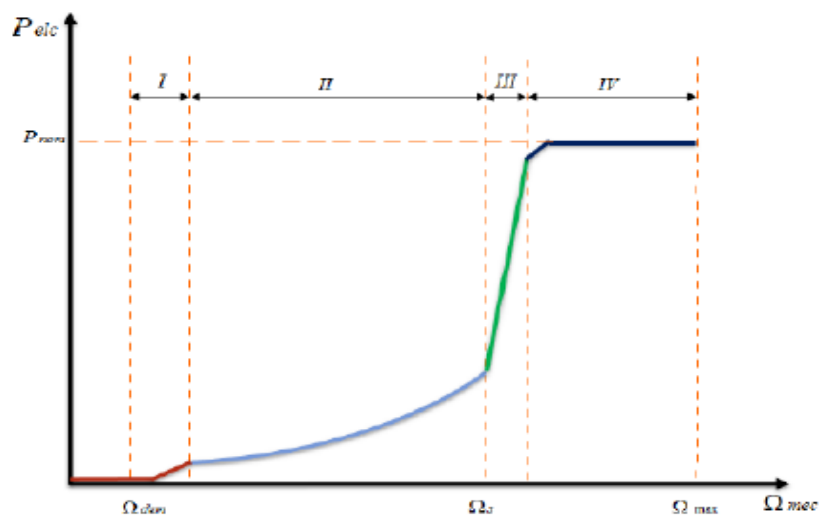


Figure. I.5 Caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent.

I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients [10]:

I.6.1. Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable, écologique, économique, et inépuisable, cette énergie respecte l'environnement ;
- ✓ Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂ ;
- ✓ L'énergie éolienne ne présente pas des risques comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets radioactifs ou toxiques ;
- ✓ 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 ;
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est aujourd'hui de 20 à 25 ans ;
- ✓ Cette énergie est la moins chère parmi les énergies renouvelables ;

I.6.2. Inconvénients

L'énergie éolienne a désavantages :

- ✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ;
- ✓ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux ;
- ✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique;
- ✓ La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne ;
- ✓ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien ;
- ✓ Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques.

I.7. Application de l'énergie éolienne

La technologie de systèmes éoliens, très faible et très souple est destinée depuis des siècles à de multiples usages. On cite:

- La signalisation maritime ;
- Le dessalement ;
- La télécommunication ;
- La radio fusion ;
- Les communautés éloignées ;
- L'usage domestique ;
- Finalement le pompage qui est à présent le plus répandu des usages.

I.8. Différents types de pompage éolien

L'utilisation de système de pompage éolien est une solution pour satisfaire les besoins en eau dans un site isolé est assez bien venté. Un tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité. Deux types de systèmes de pompage existent :

I.8.1. Pompage éolien mécanique

Le principe de fonctionnement est le suivant : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entraîné par un système de bielle-manivelle, et une pompe à piston plongée au fond du puits (figure I.6). C'est un système qui convient assez bien pour les zones peu ventées, avec des besoins en eau journaliers n'excédant pas les 20 m³ et des profondeurs de puits ne dépassant pas les 50 m. Avec des puits plus profonds, les quantités d'eau pompées sont faibles, et les risques de rupture de la tringlerie de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécaniques [11].

I.8.2. Pompage éolien électrique

Plusieurs systèmes de pompage éolien électrique existent, mais le plus courant est sans conteste, celui dont la configuration est la suivante (figure I. 6): un rotor éolien, muni de 2 à 3 pales est couplé à une génératrice alimentant un group motopompe. Généralement, les deux machines électriques, soit de type asynchrone, alors que la pompe peut être de surface ou submersible. Pour un site isolé et assez bien venté, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau peut s'avérer indispensable et très compétitive par rapport à d'autres sources d'énergie. Du point de vue du taux d'accroissement des performances ainsi que la diversification des configurations des solutions électriques, le système de pompage électrique se montre plus utilisé, et surtout dans les puits profonds à grand débit [11].

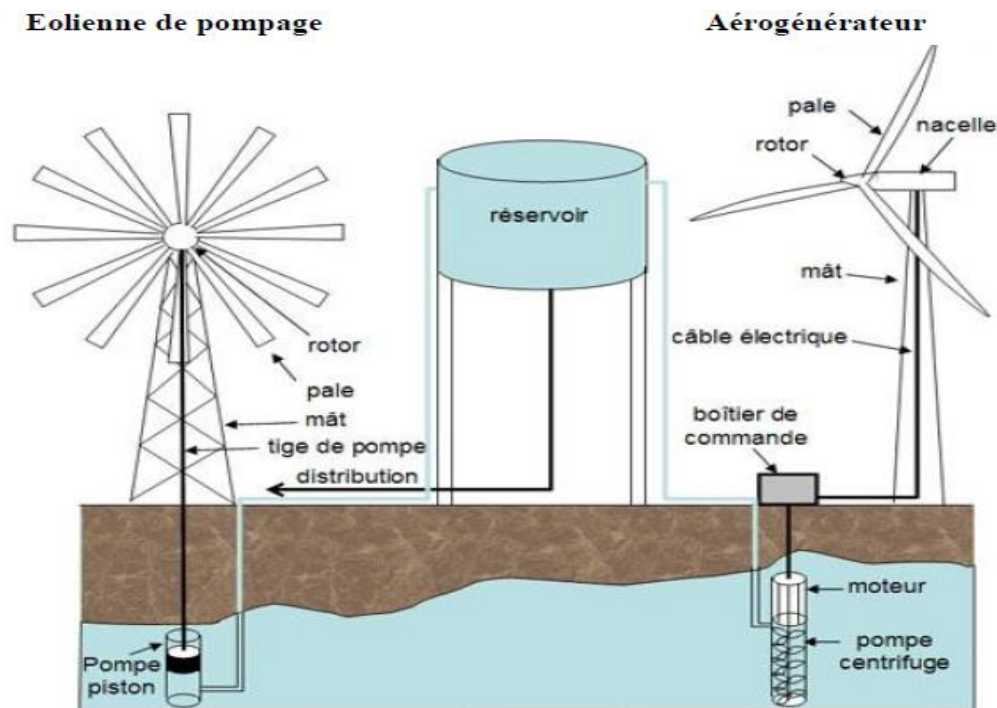


Figure I.6 Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique.

I.9. Configuration des systèmes de pompage éolien suivant le moteur d'entraînement

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur, qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

Dans notre étude, on s'intéresse à la machine asynchrone à double alimentation et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

I.9.1. Machine asynchrone à cage (MAS)

Les machines asynchrones sont les plus simples à réaliser et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un

rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée, mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc rarement exploitée. La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante. Le maintien de cette vitesse fixe, permet de contrôler l'énergie réactive des condensateurs d'auto-amorçage, et ce au détriment du rendement de conversion, contrairement au système fonctionnant à vitesse variable. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [11].

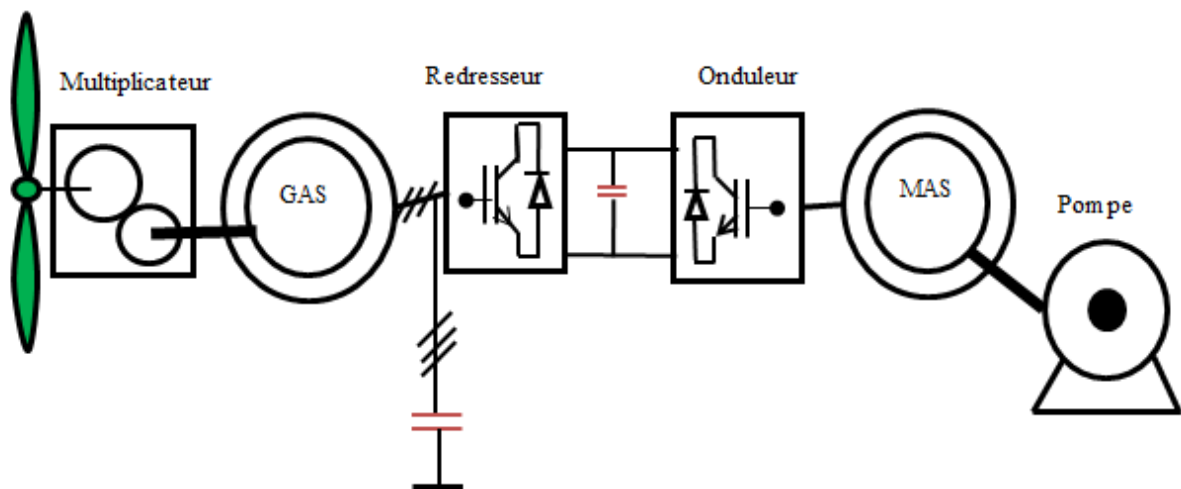


Figure. I.7 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.9.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Dans cette configuration, le stator de la génératrice est couplé directement au moteur d'entraînement, alors que le rotor est lié au stator via deux convertisseurs statiques en cascade, assurant une vitesse variable en dessous et en dessus du synchronisme.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage, avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil, alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important [11].

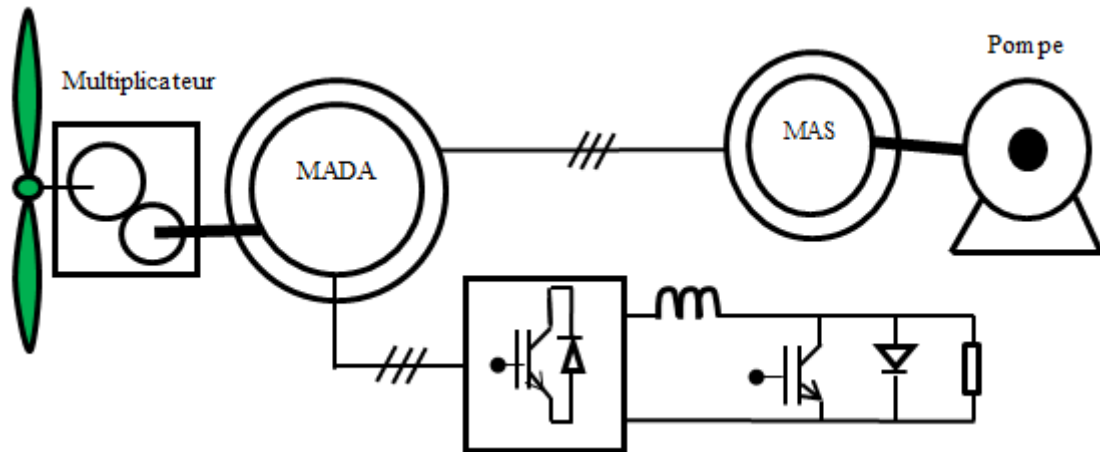


Figure. I.8 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.

Une autre solution très intéressante, permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30 % autour de la vitesse de synchronisme, consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux convertisseurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur. En général, le dimensionnement de la chaîne de rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30 % de la plage de vitesse [11].

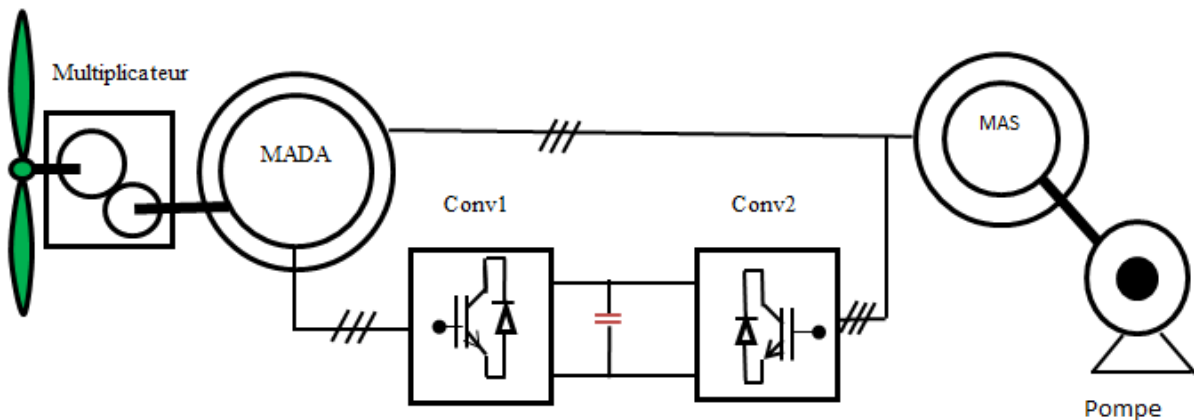


Figure. I.9 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique

I.9.2.1. Constitution de la MADA

La machine asynchrone à rotor bobiné (MADA) présente un stator identique à celui des machines triphasées classiques constitué de tôles magnétiques empilés munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Cette machine, son origine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont

accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [12].

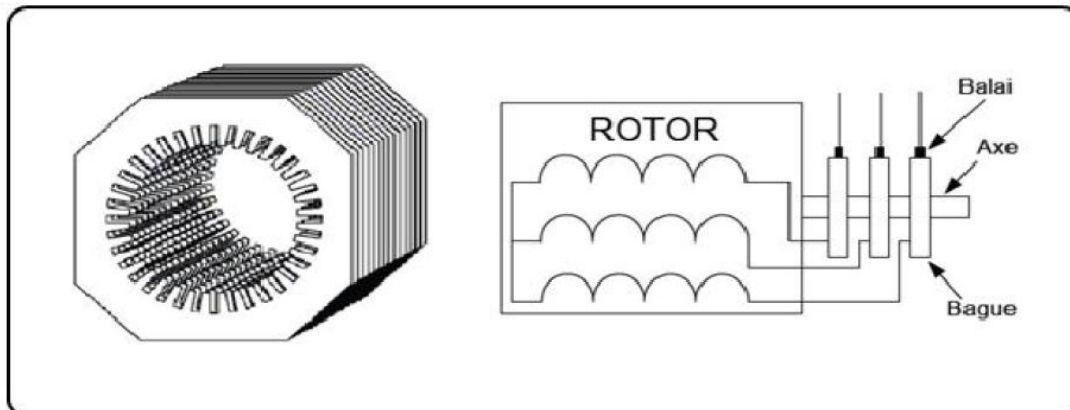


Figure. I.10 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

I.9.2.2. Intérêt de la MADA

La connexion directe au réseau des machines asynchrones impose la vitesse de rotation à rester constante de façon à ce que la machine reste proche de sa vitesse synchronisme. Cette limitation entraîne une efficacité réduite pour des applications en éolienne aux vitesses de vent élevé.

La présence du convertisseur de puissance entre le stator et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine, ce qui permet de fonctionner à vitesse variable.

Pour une application éolienne où l'utilisation de la MADA est intense, la vitesse de rotation du rotor est réglée en fonction de la vitesse du vent. En conséquence, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesse de vent, ce qui permet de tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

La configuration électrique des aérogénérateurs utilisant les machines asynchrones ont subi une grande évolution, ce qui a mené aujourd'hui à une utilisation extensif de la MADA dans 80% des aérogénérateurs installés [13].

I.9.2.3. Différents modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est parfaitement commandable si toutefois, le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor, parce que la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo synchrones et hyper synchrones. On distingue quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

Le principe de fonctionnement de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure ci-dessous. Dans cette dernière, P_s , P_r et P_m présentent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique [14], [15].

❖ **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :**

L'énergie absorbée du réseau est convertie partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est transmise au réseau par les contacts glissants du rotor. L'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor pour les moteurs à cage. Dans ce mode, la puissance P_r est fournie par le rotor.

❖ **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La puissance statorique est transmise au réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage n'ont pas la possibilité d'avoir ce genre de fonctionnement car ce dernier n'est capable d'être acquis qu'à l'aide d'un support d'accès au rotor à travers un circuit électronique. Dans ce cas la puissance P_r est absorbée par le rotor.

❖ **Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :**

L'énergie mécanique est envoyée à l'arbre de la génératrice asynchrone à double alimentation, cette dernière elle fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Pour avoir ce fonctionnement, l'énergie de glissement arrivant du réseau doit d'être transmise au rotor. Pour le fonctionnement générateur hypo synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable et une fréquence du stator qui est imposée par le réseau. Il est confirmé qu'une machine à cage est incapable d'avoir ce genre de fonctionnement, car ce dernier n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor. Dans ce mode, la puissance P_r est absorbée par le rotor.

❖ **Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :**

La puissance mécanique totale offerte à la génératrice est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g * P_m)$ est envoyée à travers son rotor. Dans ce mode, la puissance P_r est fournie par le rotor.

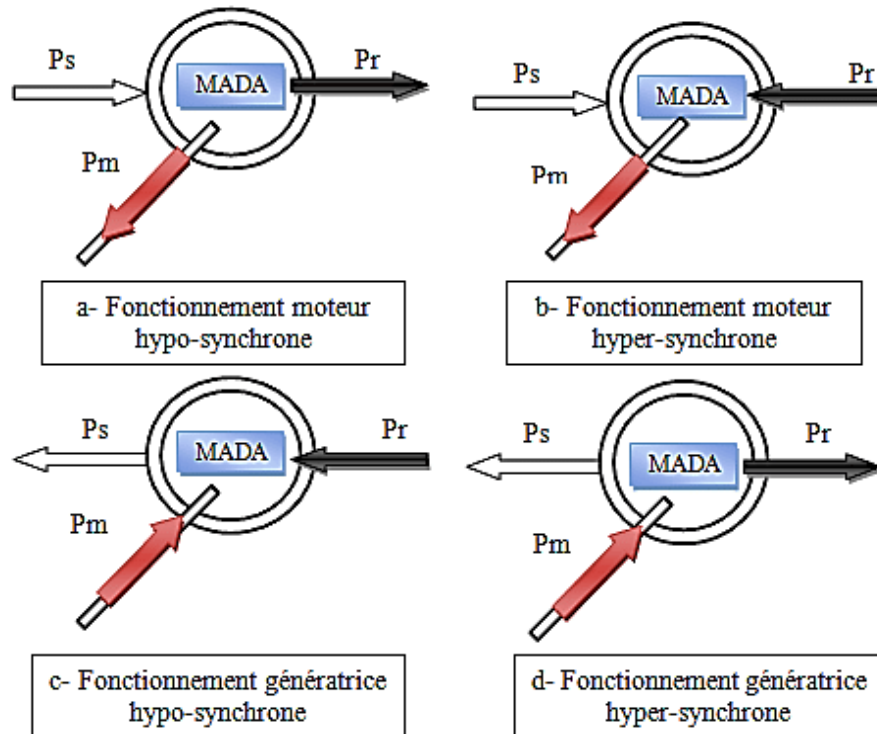


Figure. I.11 Les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA.

I.9.2.4. Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est plus utilisée, elle occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ses nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable surtout dans les systèmes éoliens [16].

Parmi ces domaines d'application on cite :

- ✓ Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions;
- ✓ Les centrales hydrauliques à vitesse variable;
- ✓ Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage :

- ✓ La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- ✓ La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime;
- ✓ L'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges, etc.

Les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, par exemple la traction électrique.

I.9.2.5. Avantages et inconvénients

❖ Avantages de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire, elle présente plusieurs avantages qui sont liés à sa structure, sa stratégie de commande et ses applications, nous citons [17]:

- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou d'injection d'énergie dans les enroulement de la machine ;
- ✓ La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement ;
- ✓ Cette machine est économique par rapport à la machine asynchrone à cage, non seulement elle ne consomme pas l'énergie réactive mais elle fournit cette énergie ;
- ✓ Permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ;
- ✓ Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse et encore sa possibilité de démarrage sans appel de courant important.

❖ Inconvénients de la MADA

Parmi ses inconvénients, nous citons [18] :

- ✓ La MADA est plus volumineuse que celle à cage, souvent elle est plus longue à cause de la présence des balais ;
- ✓ L'utilisation d'un nombre des convertisseurs par rapport à la machine à cage ;
- ✓ Le coût de la machine est plus important que celui de la machine à cage.

I.10. Convertisseurs statiques

I.10.1. Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur de type continu /alternatif permettant de délivrer des courants et des tensions alternatives à partir d'une source d'énergie électrique continue [Int2].

- **Onduleurs autonomes** : il délivre une tension et une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour leur fonctionnement.

- **Onduleurs non autonomes** : c'est un montage redresseur qui comporte que des thyristors (pont de Graetz) en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est connecté.

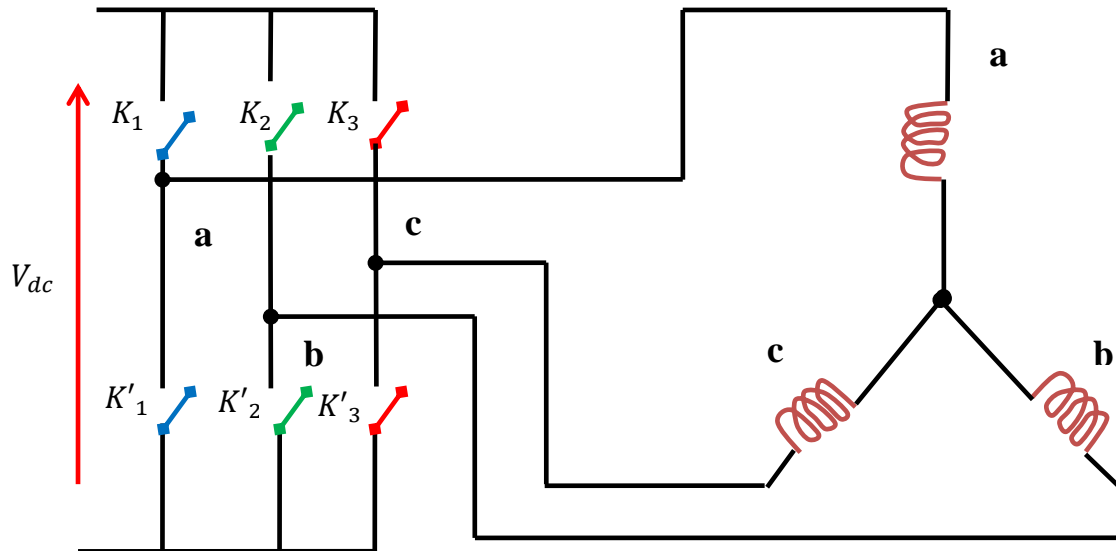


Figure. I.12 Schéma de l'onduleur.

I.11. Sous-système de pompage

I.11.1. Types de pompes utilisées

Une pompe est une machine qui transforme une énergie mécanique en énergie hydraulique. Il existe plusieurs types disponibles pour les systèmes de pompage. On distingue deux types de pompes : les pompes à piston et les pompes centrifuges.

a. Pompes à piston

Ce sont les pompes volumétriques les plus utilisés. La roue de l'éolienne sur laquelle sont fixées des pales tourne sous l'action du vent. Cette roue est fixée sur un arbre dont le mouvement de rotation est transformé en mouvement vertical alternatif par l'intermédiaire d'un plateau manivelle ou d'une bielle. Le va et vient ainsi créés entraînent en contrebas par l'intermédiaire d'une tringle d'acier un piston de la pompe à eau généralement immergée du forage. Le couple de fonctionnement nécessaire étant très élevé, il faut pouvoir utiliser le moindre souffle de vent. L'hélice devra donc comporter un assez grand nombre de pales.

Celui-ci varie le plus souvent entre 15 et 18. La courbure et le nombre de pales assurent à l'éolienne un démarrage plus ou moins facile par vent assez faible et conditionnent pour une large part son rendement [Int3].



Figure. I.13 Pompe à piston.

b. Pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont des machines utilisées pour transporter des liquides par l'augmentation d'un débit spécifique à une certaine pression. La pompe centrifuge consiste à convertir l'énergie mécanique de moteur d'abord en énergie cinétique puis en énergie de pression.

Le débit de cette pompe est varié proportionnellement à la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse. Pour garantir un bon débit, il faut que la vitesse de rotation du moteur soit très rapide. La puissance consommée est proportionnelle à $Q.HMT$, variera dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera généralement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (varie de 10 à 100 mètres) [3].



Figure. I.14 Pompe centrifuge.

Dans notre système qu'on va étudier, on utilise un groupe motopompe qui est constitué d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil et d'une pompe centrifuge avec un débit et une hauteur bien déterminée.

I.12. Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a présenté quelques généralités et définitions sur l'énergie éolienne destinées au pompage. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement et un aperçu sur le système de pompage et les différentes machines et convertisseurs adaptés à un système éolien. Enfin nous avons donné un état d'art du pompage éolien.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

II.1. Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage éolien, nous procédons à la modélisation du système qui sera étudié.

La modalisation permet d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Alors, ce chapitre sera réservé pour la modalisation de la chaîne de conversion proposée élément par élément, qui nous servira par la suite à la mise en œuvre de tous ces éléments sous l'environnement MATLAB/Simulink.

II.2. Description de la structure choisie

La structure proposée est constituée d'une turbine éolienne et d'une génératrice asynchrone à double alimentation, des convertisseurs d'électronique de puissance, une MAS ainsi une pompe centrifuge.

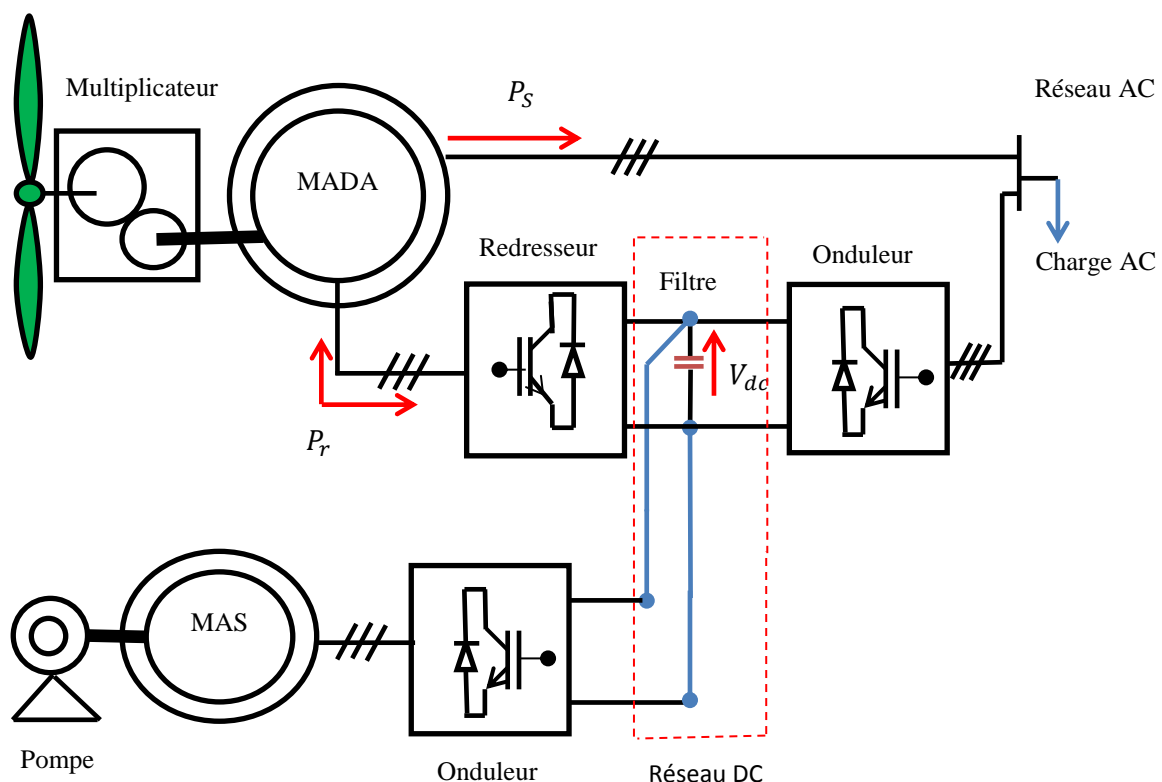


Figure. II.1 Schéma représentatif de la chaîne de conversion proposé.

II.3. Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante.

Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent, car la puissance éolienne dans les conditions optimales, est en fonction de la vitesse du vent au cube [19].

Le vent peut être donc modélisé comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

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

II.4. Modélisation de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R , elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique (Figure. II.2).

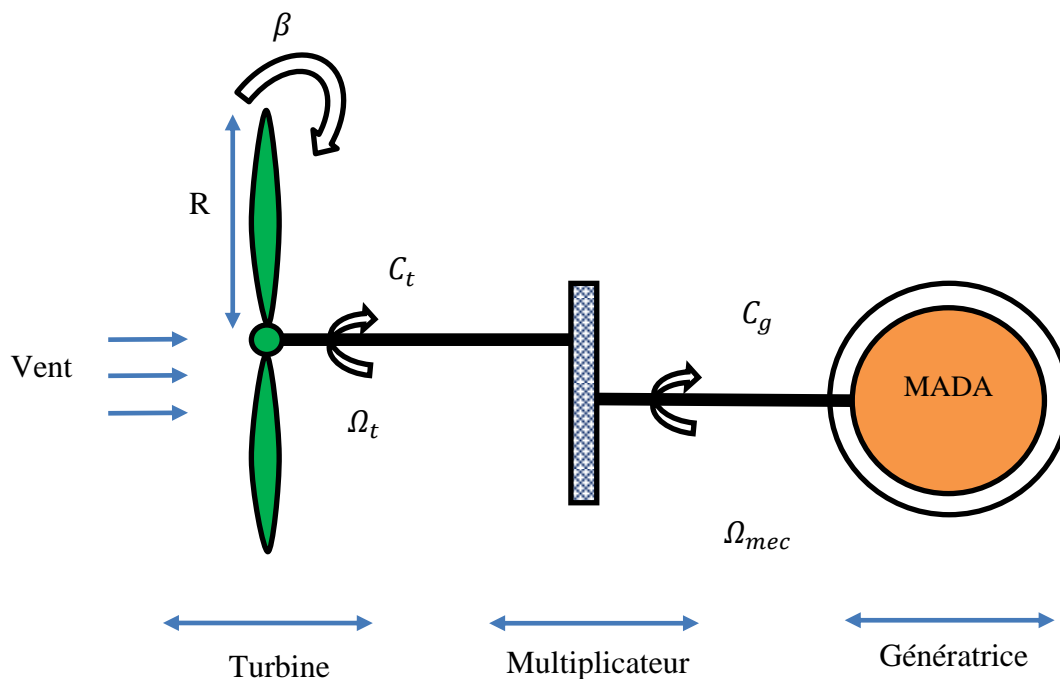


Figure. II.2 Schéma de la turbine éolienne.

La puissance du vent captée par les pales est définie de la manière suivante [20] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_t \cdot v_v^3 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

ρ : La densité de l'air qui est égale à 1,22 kg/m³.

S_t : La surface balayée par la turbine (m²). $S_t = \pi R^2$.

v_v : La vitesse du vent (m/s).

R : Rayon de la surface balayée par la turbine ou la longueur d'une pale.

La vitesse de vent V_v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_t , s'exprimant par [21]:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S_t \cdot v_v^3 \quad (\text{II.3})$$

Où λ est défini par :

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

Avec :

C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine.

λ : vitesse réduite au bout des pales.

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{II.5})$$

Si on remplace la puissance de la turbine par sa valeur, on aura :

$$C_t = \frac{\pi}{2\lambda} \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v_v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.6})$$

II.5. Modèle du multiplicateur

Pour adapter la vitesse (moyenne) de la turbine à la vitesse de la génératrice (GADA). On utilise un multiplicateur entre la turbine et la GADA, ce dernier est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [11] :

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (\text{II.7})$$

Le couple sur l'arbre de la machine est :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

G : Le gain de multiplicateur.

C_g : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.

Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice.

II.6. Modèle l'arbre de transmission

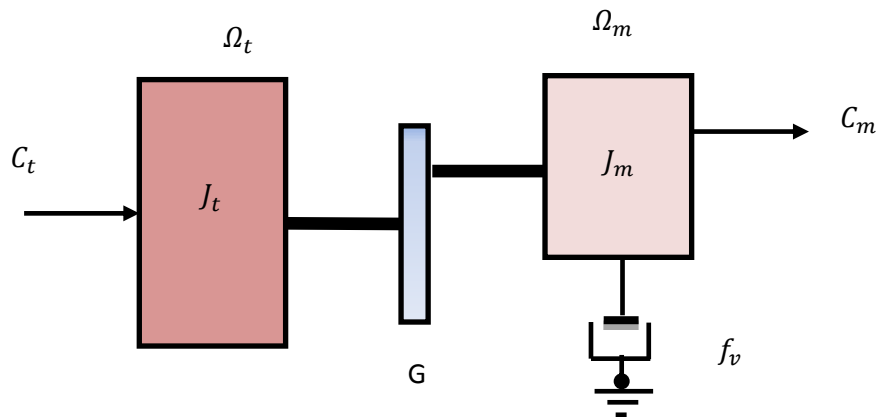


Figure. II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine.

D'après la Figure (II.3), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par [2] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

J : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

C_{mec} : C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , le couple de frottement visqueux C_{visq} et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{visq} \quad (\text{II.10})$$

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_v :

$$C_{visq} = f_v \Omega_{mec} \quad (\text{II.11})$$

A partir des équations (II.4, II.6, II.7, II.8, II.9), nous déduisons aisément le schéma bloc du modèle de la turbine :

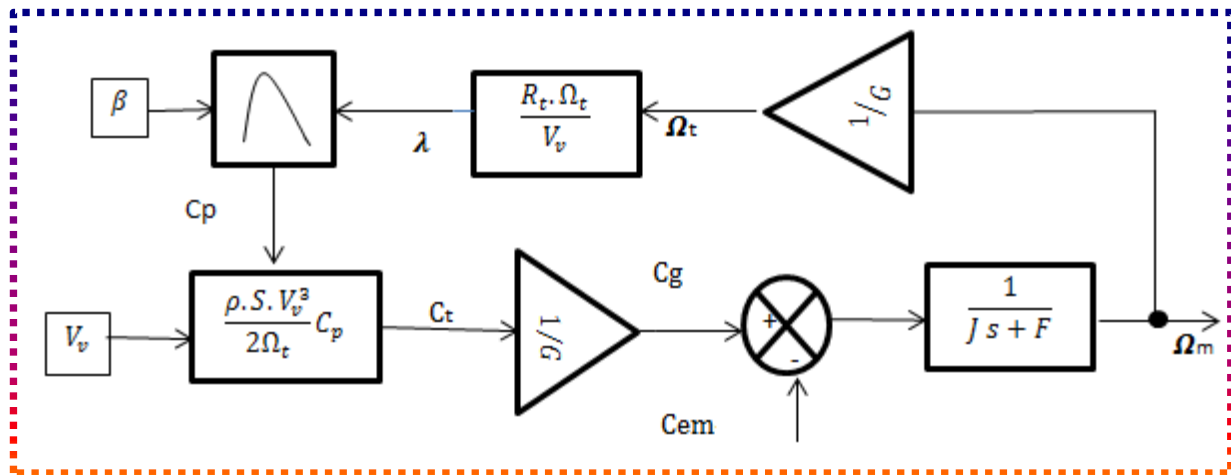


Figure. II.4 Schéma du modèle de la turbine.

II.7. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT)

MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur pour une source variée (la vitesse du vent dans notre cas). La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme parabolique. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

L'asservissement de vitesse nécessite le calcul de la vitesse du vent. Or une mesure précise de cette dernière est difficile à réaliser. En se basant sur le rapport de vitesse optimale (λ_{opt}) pour lequel le coefficient de puissance est maximal (C_{pmax}), on obtient la relation du couple électromagnétique de référence suivante [5].

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \cdot C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{méc}^2 \quad (II.12)$$

Ce qui correspond à une puissance mécanique optimale illustrée par l'équation:

$$P_{méc-opt} = C_{em-ref} \cdot \Omega_{méc} = \frac{1}{2} \cdot C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{méc}^3 \quad (II.13)$$

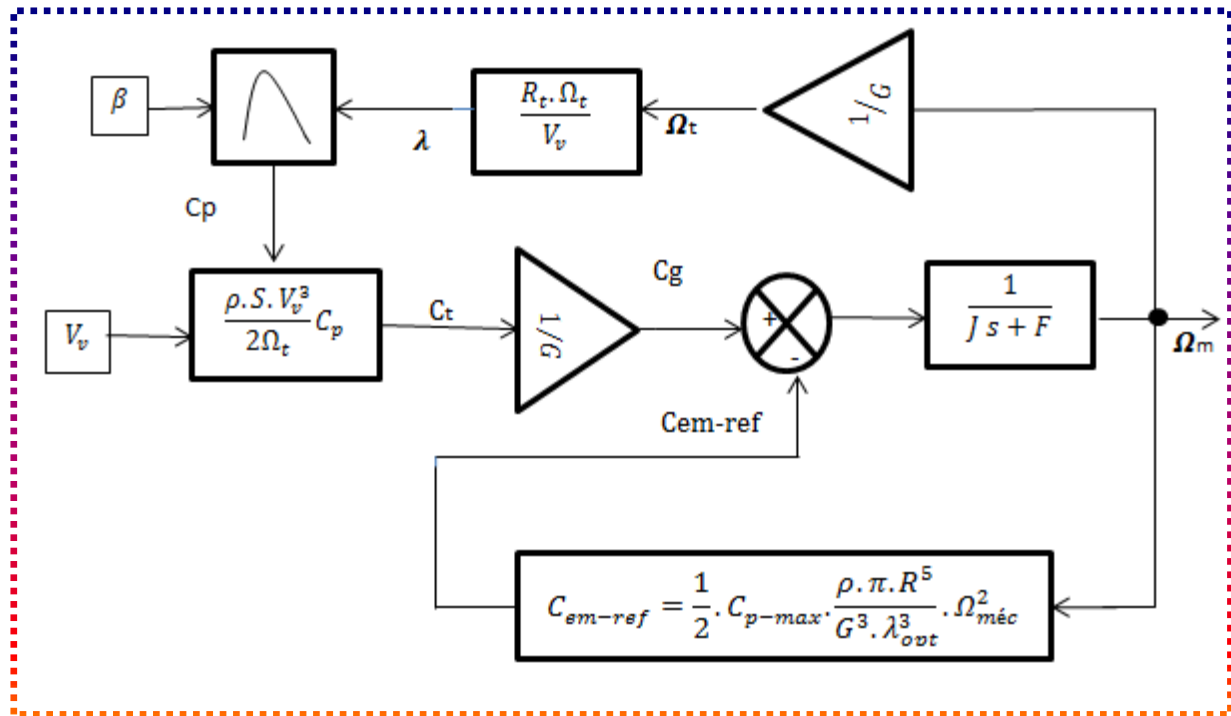


Figure. II.5 Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.

II.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.8.1. Hypothèses de travail

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses, qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine. Et pour cela on considère quelques hypothèses simplificatrices [22]:

- ✓ Nous supposons que nous travaillons en régime non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaires des courants ;
- ✓ Nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.é.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux ;
- ✓ Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau ;
- ✓ Le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié ;
- ✓ Nous considérons que la machine est parfaitement symétrique.

II.8.2. Mise en équations du modèle de la machine asynchrone à double alimentation

En tenant compte du schéma équivalent de la machine asynchrone à double alimentation, figure (II.6) ainsi les hypothèses citées précédemment, on peut écrire les équations électriques et magnétiques de la MADA.

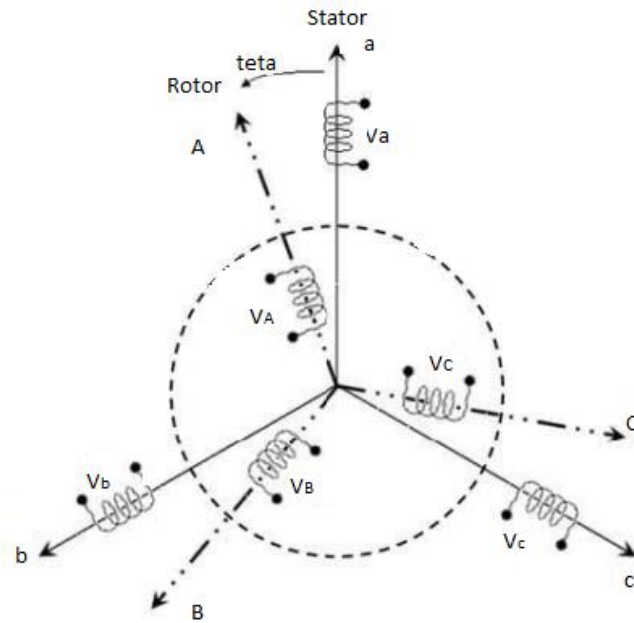


Figure. II.6 Représentation simplifié de la MADA.

❖ Les équations électriques

D’après les conditions précédentes les équations sous forme matricielle peuvent s’écrire, pour le stator et le rotor :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \end{cases} \tag{II.14}$$

Tel que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix},$$

$$[\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec :

R_s et R_r sont respectivement les résistances statorique et rotorique par phase.

V_s et V_r sont respectivement les tensions statorique et rotorique par phase.

ϑ_s et ϑ_r sont respectivement les flux statorique et rotorique par phase.

i_s et i_r sont respectivement les courants statorique et rotorique par phase.

❖ Les équations magnétiques

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [\vartheta_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\vartheta_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$: Matrices d'inductances statorique et rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle $[M_{sr}]^t = [M_{rs}]$.

L_s et L_r : Inductances propres d'une phase du stator et du rotor respectivement.

M_s et M_r : Inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

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

❖ Equation mécanique

La loi fondamentale de la dynamique permet d'écrire l'équation de la machine comme suit :

$$C_{em} - C_r - f_v \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.16})$$

II.8.3. Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système biphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution. Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux [2].

Cette dernière est défini par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ permet de ramener les variables de repère triphasée (a, b, c) sur les axes d'un repère tournant (d, q, o) les grandeurs statorique et rotorique sont alors exprimées dans un même repère.

Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \quad (\text{II.17})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La matrice inverse de Park :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

II.9. transformation de Concordia (repère(α , β))

Si on pose $\theta = 0$ dans les équations précédentes, les matrices de Park deviennent les matrices de Concordia [23] :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Et

$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Les transformations de Concordia sont utilisées pour faire le passage entre le système triphasé abc en un système fictif (α, β).

Les transformations de Concordia sont données par ces relations :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_h \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_h \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

II.10. Application de la transformation de Park au modèle de MADA

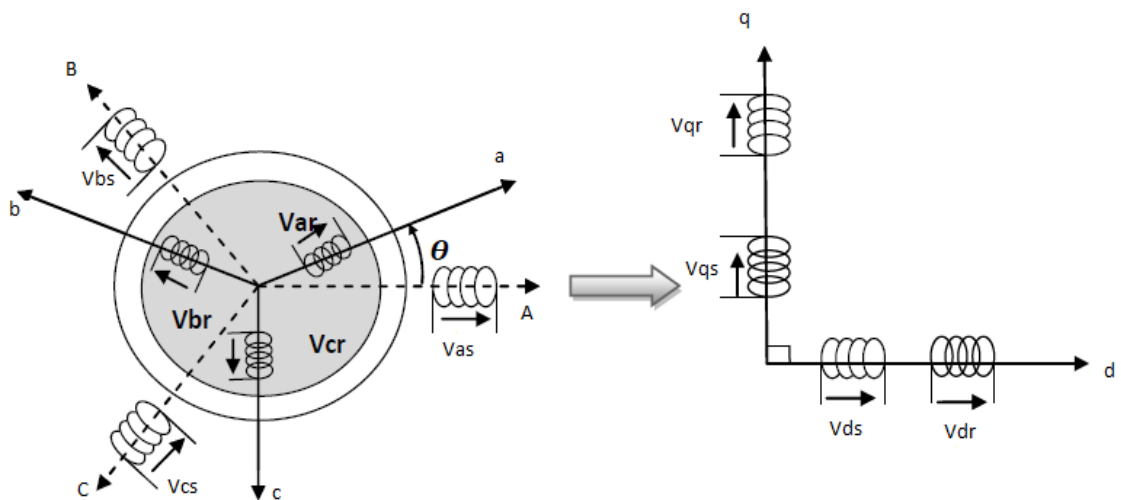


Figure. II.7 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

L'application de la transformation de Park au modèle de la MADA nous permet d'aboutir aux équations suivantes :

❖ Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (II.23)$$

❖ **Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \varnothing_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varnothing_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varnothing_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \varnothing_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique de la machine.

$L_s = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor de la machine.

❖ **Expression du couple électromagnétique**

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

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (i_{qr} \varnothing_{ds} - i_{dr} \varnothing_{qs}) \quad (\text{II.25})$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles de la machine.

II.11. Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel se fait selon le problème à étudier. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique [23] :

- ✓ Référentiel lié au stator ;
- ✓ Référentiel lié au rotor ;
- ✓ Référentiel lié au champ tournant.

II.11.1. Référentiel lié au stator (α, β)

Ce référentiel est choisi dans le cas où la variation de vitesse de rotation est importante (les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques).

Dans ce cas [24] :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varnothing_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varnothing_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\varnothing_{r\alpha}}{dt} + \omega_m \varnothing_{r\beta} \\ V_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d\varnothing_{r\beta}}{dt} - \omega_m \varnothing_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.11.2 Référentiel lié au rotor (x, y)

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante et dans certaines commandes effectuées pour le contrôle des grandeurs rotorique.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\phi_{sx}}{dt} - \omega_m \phi_{sy} \\ V_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\phi_{sy}}{dt} + \omega_m \phi_{sx} \\ V_{rx} = R_r i_{rx} + \frac{d\phi_{rx}}{dt} \\ V_{ry} = R_r i_{ry} + \frac{d\phi_{ry}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

II.11.3. Référentiel lié au champ tournant (d, q)

L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

Il est alors plus facile de faire la régulation de ces grandeurs [23].

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

II.12. Modélisation de L'onduleur

L'onduleur, qui est un dispositif d'électronique de puissance est le cœur de l'organe de commande de la machine en imposant aux bornes de la machine des tensions de fréquence réglable. Il est constitué de trois bras, chaque bras est composé de deux composants électroniques de puissance reliés en série qui peuvent être des thyristors GTO ou des transistors IGBT. Chaque composant est antiparallèle avec une diode qui permet d'écouler l'énergie emmagasinée dans la machine à l'arrêt ou pendant le freinage et c'est ainsi qu'elle le protège. La structure à trois bras est représentée sur la figure ci-dessous. Le vecteur de tension délivré dépend de l'état logique des interrupteurs S_a, S_b, S_c doivent être contrôlés de manière complémentaire [3].

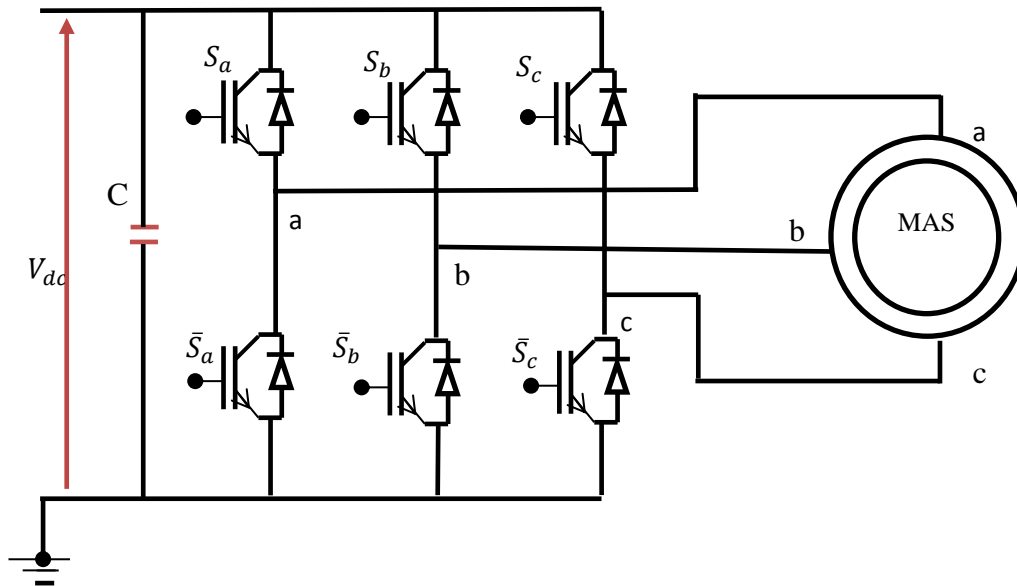


Figure. II.8 Représentation schématique d'un onduleur relié à la machine.

Pour simplifier l'étude de l'onduleur, on s'opposera que :

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- ✓ La charge est équilibrée couplée en étoile ;
- ✓ La commande des interrupteurs d'une cellule est complémentaire, donc on peut attribuer à chaque bras de l'onduleur une variable logique ($S_i = a, b, c$) définie par :

$S_i = 1 \longrightarrow$ L'interrupteur supérieur du bras i est amorcé.

$S_i = 0 \longrightarrow$ L'interrupteur supérieur du bras i est bloqué.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.8), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

Donc les tensions à la sortie de l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$i_{dc} = S_a \cdot i_{ach} + S_b \cdot i_{bch} + S_c \cdot i_{cch} \quad (\text{II.30})$$

II.13. Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. La figure (II.9), représente le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectée les deux convertisseurs.

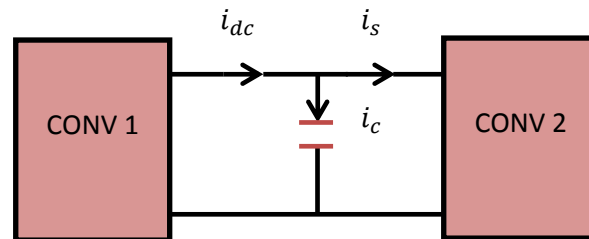


Figure. II.9 Schéma simple du circuit du bus continu.

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{dc} - i_s \quad (\text{II.31})$$

On a également :

$$V_{dc} = \int \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc}(t_0) \quad (\text{II.32})$$

Où :

u_{dc} : La tension aux bornes de la capacité.

$u_{dc}(t_0)$: La valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

C : Capacité du bus continu.

II.14. Modélisation du groupe moteur –pompe

II.14.1. Modélisation de la machine asynchrone à cage

Le modèle de la MAS est équivalent au modèle de la machine asynchrone à double alimentation, exposé précédemment. La seule différence réside dans le fait que ces enroulements sont en court-circuit par conséquent les tensions diphasées rotorique du modèle que l'on rappelle ci-après sont nulles.

Rappel du modèle diphasé de la MAS

Equations électriques [9] :

❖ Equation électrique

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ V_{qs} = 0 = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

❖ Equation magnétique

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

❖ Equation mécanique

$$C_{em} = C_r + f_v \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.35})$$

❖ Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (i_{dr} \phi_{qs} - i_{qr} \phi_{ds}) \quad (\text{II.36})$$

II.14.2. Modélisation de pompe centrifuge

La pompe centrifuge est définie principalement par un couple résistant de ventilation, variant avec le carré de vitesse [3]:

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$K_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (\text{II.38})$$

Tel que :

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (w).

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

K_r : Constante qui dépend de la pompe.

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

$$P_{hyd} = \rho \cdot H \cdot g \cdot Q \quad (\text{II.39})$$

Tel que :

P_{hyd} : La puissance hydraulique (w).

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

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

H : Hauteur manométrique (m).

Q : Débit volumique (m^3/s).

La puissance mécanique est donnée par l'équation suivante :

$$P_{\text{mec}} = P_{\text{hyd}} \cdot \eta_{\text{pm}} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

P_{mec} : Puissance mécanique (w).

η_{pm} : Rendement globale du groupe moteur pompe (%).

II.15. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modalisation de la chaîne de conversion électrique qui est basé sur une machine asynchrone à double alimentation.

En premier lieu, on a présenté le modèle de la partie mécanique (turbine, multiplicateur), puis la modélisation des convertisseurs statique, ensuite la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en utilisant la transformation de Park. Puis l'ensemble motopompe.

Les modèles exposés dans ce chapitre seront dédiés à la commande que nous allons essayer d'exposer dans le chapitre suivant, on parle ici d'une commande direct du couple (DTC).

III.1. Introduction

La commande DTC (Direct Torque Control) est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine électrique. Cette commande est proposé par Takachachi et Depenbroken 1985 comme concurrentielles des méthodes classiques [25]. Son but est de contrôler le flux et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, de flux ou de couple. Les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants alimentant la machine. Le flux et le couple électromagnétique sont totalement estimés à partir de ces mesures.

Dans ce chapitre, on donnera le principe générale du contrôle directe du couple, après on développera les règles de comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple) et la structure de contrôle. On terminera ce chapitre par l'élaboration de la table et l'algorithme de commande.

III.2. Le principe de la commande directe du couple

Le principe de la DTC est basé sur la détermination directe de la séquence de commande à appliquer à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique [26]. Dans ce cadre, deux comparateurs à hystérésis sont utilisés et qui permettent de comparer les valeurs estimées avec les valeurs de références, après on commande directement les états de l'onduleur à travers une table de sélection prédéfinie.

III.3. Partitionnement algorithmique de la commande DTC

En vue de cette première description de la commande, un partitionnement algorithmique a pu s'opérer naturellement. En effet, on retrouve bien le groupement par blocs et sous blocs algorithmiques, soit [24] :

- **Bloc de traitement :** Ce bloc sert à calculer les composantes de Concordia des courants et des tensions à partir de la tension continue et les courants réel de la machine (transformation du modèle triphasés en modèle biphasé).
- **Bloc d'estimation :** Ce bloc permet d'estimer le flux et le couple ainsi que l'estimateur de position sectorielle du flux.

- **Bloc de régulation :** Ce bloc composé de deux comparateurs à hystérésis, l'un à deux niveaux pour le flux et l'autre à trois niveaux pour le couple. Il a comme entrée les valeurs estimées du flux et du couple.
- **Bloc de modulation :** Ce bloc composé de la table logique de commutation. Il a comme entrées la position sectorielle et les sorties des correcteurs flux et couple

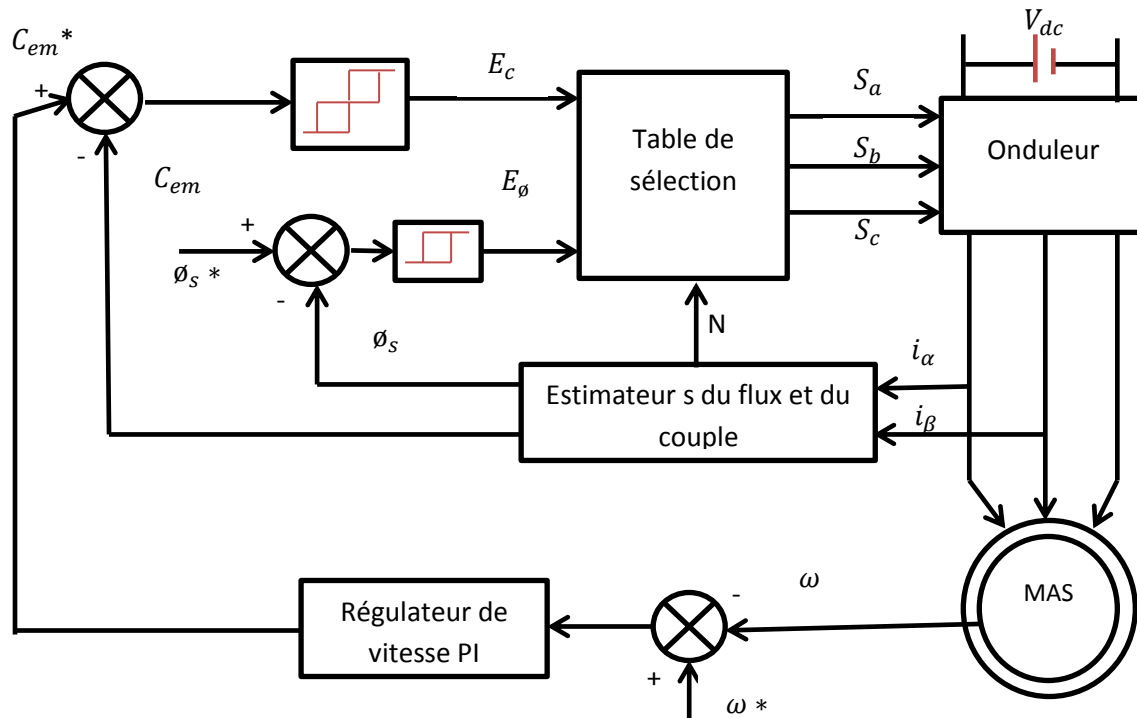


Figure. III.1 Stratégie de Commande Directe de Couple.

III.4. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple

Par nature la commande directe du couple présente les caractéristiques suivantes [27] :

- La DTC basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur ;
- La commande indirecte des intensités et tensions du stator de la machine ;
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches de formes sinusoïdales ;
- Une réponse dynamique du couple de la machine très rapide ;

- L'existence d'oscillations du couple qui dépendent de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis ;
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis.

III.5. Avantages et inconvénients de la DTC

Comme les autres commandes, la DTC présente nombreux avantages. Cependant, elle possède aussi des inconvénients qu'il faut prendre au sérieux lors de toute initiative d'exploration afin que ceux-ci ne deviennent pas frein à son application.

III.5.1. Avantages

Parmi les avantages de la Commande DTC on peut citer [23] :

- ✓ Une excellente dynamique du couple ;
- ✓ Une bonne robustesse vis-à-vis des variations des paramètres du rotor de la machine ;
- ✓ Absence d'utilisation des transformations de Park et de son inverse ;
- ✓ Absence des blocs de calculs de la modulation de tension MLI ;
- ✓ Absence de découplage des courants par rapport aux tensions de commande ;
- ✓ Absence de nécessité de connaître l'angle de position rotorique. Seul le secteur dans lequel se trouve le flux statorique est nécessaire ;
- ✓ Absence de nécessité d'utiliser un capteur de vitesse pour l'implémenter.

III.5.2. Inconvénients

Les inconvénients peuvent être résumés par les points suivants [23] :

- ✓ L'existence des ondulations souvent importantes de couple et de flux,
- ✓ La fréquence de commutation n'est pas contrôlée,
- ✓ La nécessité d'utiliser des estimateurs de flux statorique et de couple,
- ✓ Un fonctionnement mal contrôlé à basse vitesse,
- ✓ Les courants statoriques sont mal contrôlés en régimes transitoires.

III.6. Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension

Un onduleur de tension triphasée permet d'atteindre sept positions distinctes dans le plan de phase correspondant aux huit séquences de la tension de sortie, on cherche donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs. Comme nous disposons de trois bras, il y a donc $2^3 = 8$

possibilités pour le vecteur V_s . Deux vecteurs (V_0 et V_7) correspondent au vecteur nul : (S_a, S_b, S_c) = (0,0,0) et (S_a, S_b, S_c) = (1,1,1) [20].

En utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, le vecteur de la tension peut s'écrire sous la forme :

$$V = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}] \quad (\text{III.1})$$

III.7. Stratégie de commande directe du flux et du couple de la MAS

III.7.1. Principe du contrôle du flux statorique

L'expression du flux statorique déduite de la loi de Faraday est donnée par la relation suivante [29]:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad (\text{III.2})$$

Soit encore :

$$\phi_s(t) = \phi_s(0) + \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt \quad (\text{III.3})$$

Entre deux commutations de l'onduleur, le vecteur tension sélectionnée est toujours le même, d'où :

$$\phi_s(t) = \phi_s(0) + V_s T_e - \int_0^t (R_s I_s) dt \quad (\text{III.4})$$

Pour les grandes vitesses, la chute de tension due à la résistance du stator peut être négligée (la chute de tension $R_s I_s$ est négligeable devant la tension V_s appliquée), soit [29] :

$$\phi_s(t) = \phi_s(0) + V_s T_e \quad (\text{III.5})$$

Ou encore :

$$\Delta\phi_s = \phi_s(t) - \phi_s(0) = V_s T_e \quad (\text{III.6})$$

On constate alors sur un intervalle $[0, T_e]$, que l'évolution du vecteur ϕ_s en direction et l'amplitude dépend directement du vecteur V_s sélectionné pendant T_e .

En choisissant une séquence correcte du vecteur V_s , sur des intervalles de temps successifs de durée T_e , on peut donc faire suivre à l'extrémité du vecteur ϕ_s la trajectoire désirée [28].

Il est alors possible de fonctionner avec un module du flux Φ_s pratiquement constant. Pour cela, il suffit de faire suivre à l'extrémité de Φ_s une trajectoire presque circulaire.

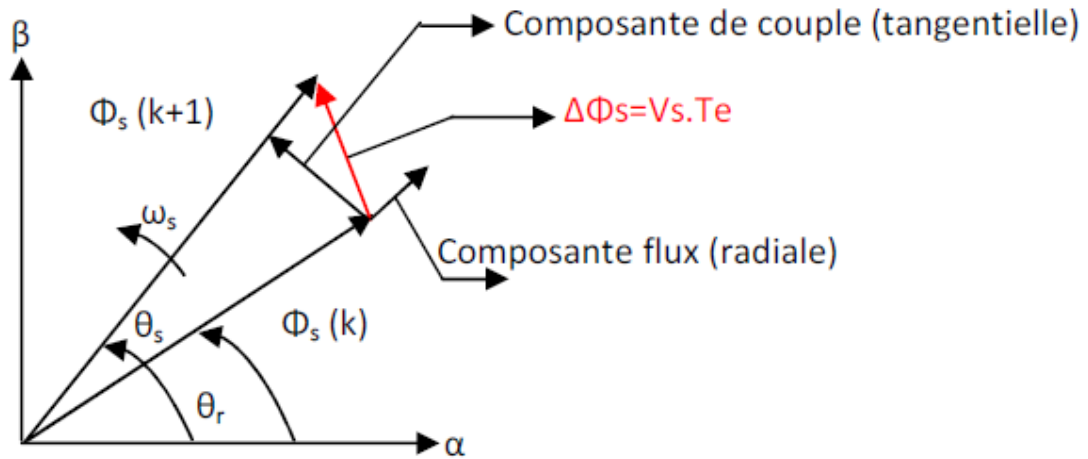


Figure. III.2 Exemple de l'évolution de l'extrémité de Φ_s .

La composante radiale du vecteur tension agit sur l'amplitude du vecteur flux et la composante tangentielle du vecteur tension agit sur le couple.

III.7.2 Principe du contrôle du couple statorique

En faisant intervenir les flux statorique et rotorique, le couple électromagnétique est exprimé par [29] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\vec{\Phi}_s * \vec{\Phi}_r) = \frac{3}{2} P |\Phi_s| |\Phi_r| \sin \delta \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$\vec{\Phi}_s$: Vecteur de flux statorique ;

$\vec{\Phi}_r$: Vecteur de flux rotorique ramené au stator ;

δ : Angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs et de leur position relative. Si l'on parvient à contrôler correctement le flux en module et en position, on assure un découplage entre le contrôle du couple électromagnétique et le flux statorique.

III.7.3. Sélection du vecteur de tension

Le choix du vecteur tension statorique V_s dépend de la variation souhaitée pour le module de Φ_s , du sens de rotation de Φ_s et de l'évolution souhaitée pour le couple.

L'espace d'évolution de Φ_s est décomposé en six zones i , avec $i = [1, \dots, 6]$ telles qu'elles sont représentées sur la «Figure. III.3» [30].

Lorsque le flux se trouve dans une zone i ($i = 1 \dots 6$), le contrôle du flux statorique et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivantes :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors ϕ_s croît et C_{em} croît,
- Si V_{i-1} est sélectionné alors ϕ_s croît et C_{em} décroît,
- Si V_{i+2} est sélectionné alors ϕ_s décroît et C_{em} croît,
- Si V_{i-2} est sélectionné alors ϕ_s décroît et C_{em} décroît,
- Si V_0 ou V_7 sont sélectionnés, alors la rotation du flux $\vec{\phi}_s$ est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux $\vec{\phi}_s$ reste inchangé.

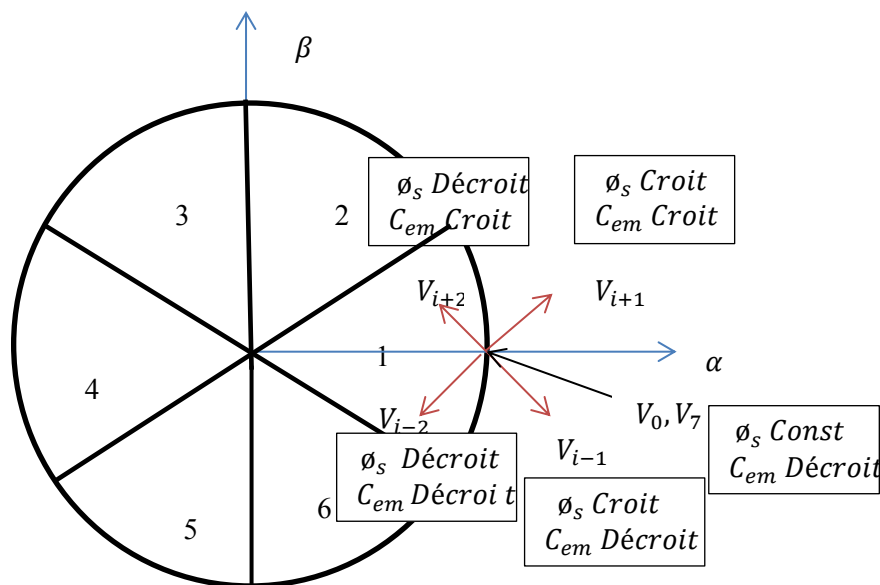


Figure. III.3 Sélection du vecteur de tension.

III.7.4. Structure du système de contrôle direct du couple :

Le vecteur tension de la sortie de l'onduleur est déduit à partir des écarts du couple et du flux, estimés par rapport à leurs références et de la position du vecteur $\vec{\phi}_s$. Il est donc nécessaire d'estimer le flux statorique et le couple électromagnétique avec la meilleure précision possible pour obtenir de bonnes performances du système.

III.7.4.1. Estimation du flux statorique

A partir des courants et des tensions statoriques de la machine, on peut estimer le flux statorique [28].

A partir de l'équation suivante :

$$\phi_s = \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt \quad (\text{III.8})$$

La projection de l'expression du flux statorique exprimé sur l'axe (α, β) est donnée par :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \phi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Les composantes du vecteur tension sont obtenues à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur V_{dc} et les états des interrupteurs (S_a, S_b, S_c) . En appliquant la transformé de Clark, On obtient :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)] \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

De même pour les composantes du vecteur courant statorique sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux composantes triphasées mesurées i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

- Le module du flux statorique s'écrit :

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad (\text{III.12})$$

- La position du vecteur flux statorique s'écrit :

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}}\right) \quad (\text{III.13})$$

III.7.4.2. Estimation du couple électromagnétique

Le couple est obtenu à partir des composantes des courants statoriques et du flux déjà estimées par [28] :

$$C_{em} = P(\Phi_{s\alpha}i_{s\beta} - \Phi_{s\beta}i_{s\alpha}) \quad (\text{III.14})$$

III.7.5. Correction du flux statorique et du couple électromagnétique

III.7.5.1. Correction du flux statorique

Le but du correcteur du flux statorique est de maintenir l'extrémité du vecteur $\vec{\Phi}_s$ dans une couronne circulaire comme le montre la « figure III.4 » [31].

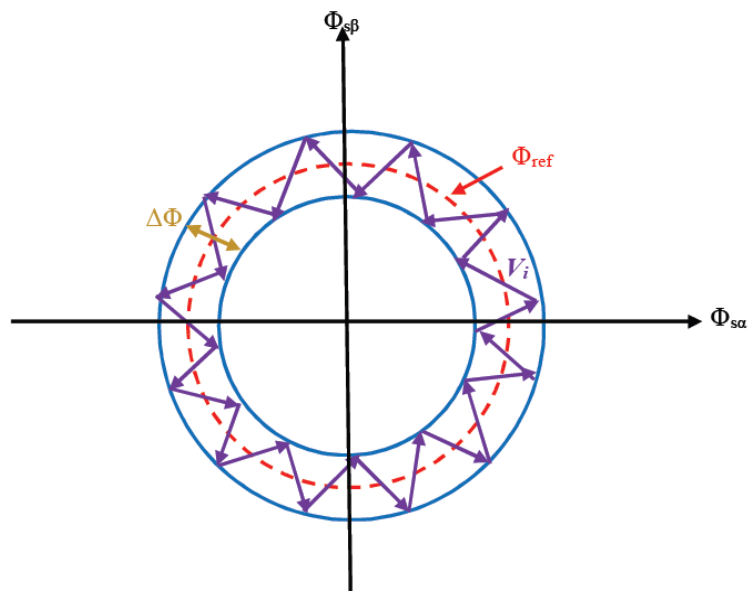


Figure. III.4 Contrôle du flux statorique.

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution de $\vec{\phi}_s$ afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques.

$$|\phi_{s_ref} - \phi_s| < |\Delta\phi_s| \quad (\text{III.15})$$

Avec

ϕ_{s_ref} : Consigne de flux.

$\Delta\phi_s$: Largeur d'hystérésis du correcteur.

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne (Cflx) « figure III.5 » indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée (Cflx=1) ou diminuée (Cflx=0) de façon à maintenir l'écart entre le flux et sa référence dans la bande à hystérésis :

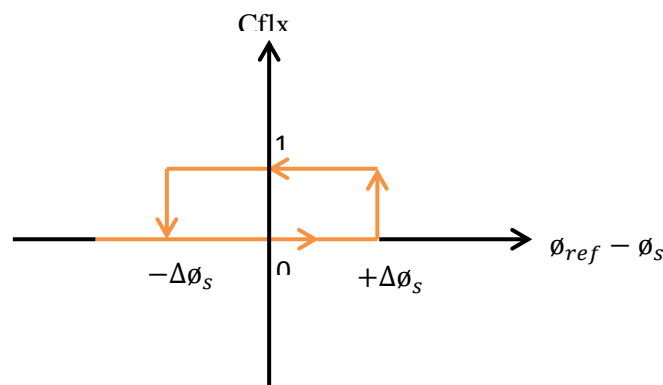


Figure. III.5 Correcteur à hystérésis de flux.

III.7.5.2. Correction du couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites souhaitables indiquées dans l'équation suivante [31] :

$$|C_{em_ref} - C_{em}| < |\Delta C_{em}| \quad (\text{III.16})$$

Avec :

C_{em_ref} : Le couple de référence.

ΔC_{em} : La bande d'hystérésis du correcteur.

Cependant la différence avec le contrôle de flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine. Et pour remédier à ce problème on utilise un comparateur à hystérésis à trois niveaux qui permet de contrôler le moteur dans les deux sens de rotation soit pour le couple positif ou négatif.

La sortie du correcteur représente par la variable booléenne $ccpl$ indique directement si :

- $Ccpl = 1$: L'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue pour une consigne positive.
- $Ccpl = -1$: L'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue pour une consigne négative.
- $Ccpl = 0$: L'amplitude du couple doit être diminuée.

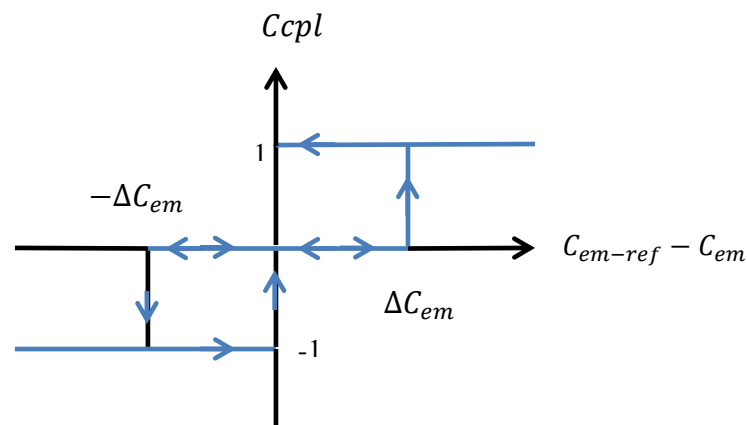


Figure. III.6 Correcteur à hystérésis de couple à trois niveaux.

III.8. Stratégie de commande directe du flux et du couple de la MADA

III.8.1. Principe du contrôle du flux rotorique

D'après la loi de Faraday, l'expression de flux rotorique est donnée par la relation suivante :

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\phi_r}{dt} \implies \phi_r(t) = \phi_r(0) + \int_0^t (V_r - R_r i_r) dt \quad (\text{III.17})$$

Sur un intervalle $[0, T_e]$, correspondant une période d'échantillonnage T_e , les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixe. Par conséquent, on peut écrire [25] :

$$\phi_r(t) = \phi_r(0) + V_r T_e - \int_0^t (R_r I_r) dt \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$\phi_r(0)$: Le vecteur de flux à l'instant $t=0$.

On considérant la chute de tension ($R_r I_r$) est négligeable devant la tension V_r , on aura :

$$\phi_r(t) = \phi_r(0) + V_r T_e \quad (\text{III.19})$$

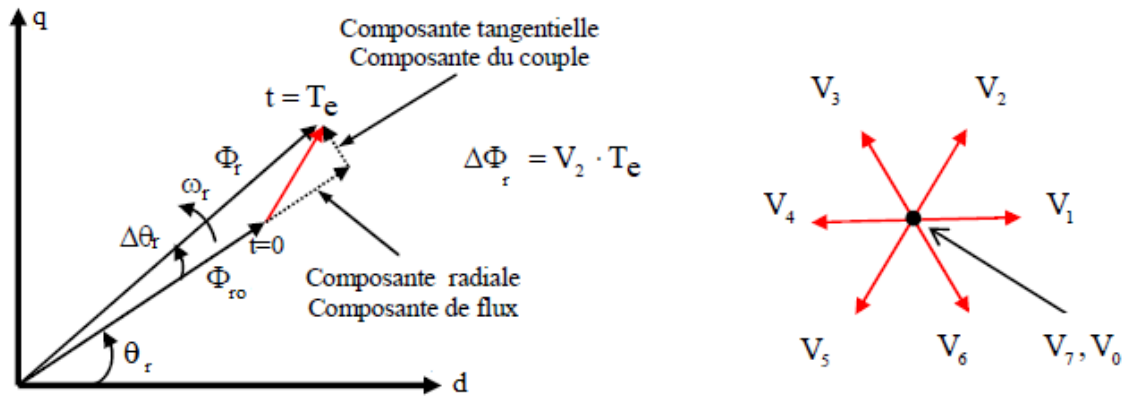


Figure. III.7 Exemple d'évolution de l'extrémité ϕ_r de pour $R_r I_r$ négligeable ($V_r = V_2$).

III.8.2. Principe du contrôle du couple électromagnétique

Commander les interrupteurs de l'onduleur en très bref temps pour un vecteur de tension désiré permet d'obtenir une variation du couple rapide en changeant le vecteur flux rotorique. Alors, la production du couple, en utilisant le vecteur flux, devient plus évidente ainsi que son contrôle.

Le couple électromagnétique est proportionnelle au produit vectoriel des vecteurs de flux statorique et rotorique d'après cette équation [20] :

$$C_{em} = K(\vec{\phi}_s * \vec{\phi}_r) = K|\phi_s||\phi_r| \sin \delta \quad (\text{III.20})$$

Avec :

δ : Angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

Puisque le stator est relié directement au réseau, le vecteur flux statorique tourne à la vitesse de synchronisme, en plus si on néglige la chute de tension au niveau de la résistance statorique, l'amplitude de flux peut être considérée comme constante. Si on limite encore le flux rotorique dans la bande d'hystérésis autour de sa consigne, le couple sera fonction de l'angle de déphasage entre ces deux flux. Donc, si on veut régler le couple on peut agir sur la position de vecteur de flux rotorique on appliquant le vecteur de tension qu'il faut.

III.8.3. Sélection du vecteur de tension

Le choix du vecteur tension rotorique V_r dépend de la variation souhaitée pour le module de Φ_r , du sens de rotation de Φ_r et de l'évolution souhaitée pour le couple.

L'espace d'évolution de Φ_r est décomposé en six zones i , avec $i = [1, \dots, 6]$ telles qu'elles sont représentées sur la «Figure. III.8».

Lorsque le flux se trouve dans une zone i ($i = 1 \dots 6$), le contrôle du flux rotorique et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivantes [20],[25] :

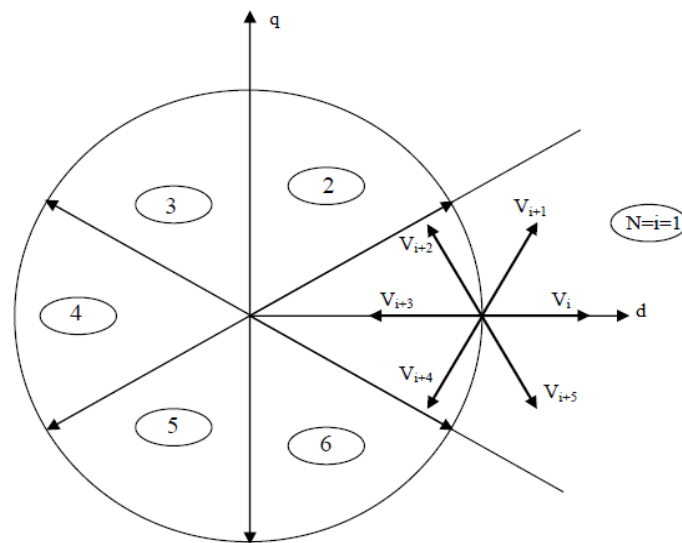


Figure. III.8 Sélection du vecteur tension V_s selon la zone $N=i$.

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position i , les deux vecteurs tensions V_i et V_{i+3} ne sont jamais utilisés. Ce qui signifie que lors du déplacement du flux Φ_r . Sur une zone $N=i$ un bras de l'onduleur ne commute jamais et permet ainsi de diminuer la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs du convertisseur.

III.8.4. Estimateur du flux rotorique

Le flux rotorique peut être estimé à partir des mesures des grandeurs rotoriques courant et tension [20].

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \int_0^t (V_{rd} - R_r i_{rd}) dt \\ \Phi_{rq} = \int_0^t (V_{rq} - R_r i_{rq}) dt \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

On obtient les tensions V_{rd} et V_{rq} à partir des commandes (S_a , S_b , S_c) et la mesure de la tension V_{dc} et les courants i_{rd} et i_{rq} sont obtenues à partir de la mesure des courants réels rotorique (i_{ra} , i_{rb} , i_{rc}) par application de la transformé de park :

$$\begin{cases} V_{rd} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} [S_a - \frac{1}{2}(S_b - S_c)] \\ V_{rq} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Et

$$\begin{cases} i_{rd} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{ra} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

- Le module du flux rotorique est :

$$\Phi_r = \sqrt{\Phi_{rd}^2 + \Phi_{rq}^2} \quad (\text{III.24})$$

- La position du vecteur flux rotorique s'écrit :

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{rq}}{\Phi_{rd}} \right) \quad (\text{III.25})$$

III.8.5. Estimation du couple électromagnétique

Le couple est obtenu à partir des composantes des courants rotoriques et du flux déjà estimées, la relation du couple est donnée par [20]:

$$C_{em} = P(\Phi_{rd} i_{rq} - \Phi_{rq} i_{rd}) \quad (\text{III.26})$$

III.8.6. Elaboration du flux rotorique et du couple électromagnétique

III.8.6.1. Correction du flux rotorique

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur $\vec{\Phi}_r$ dans une couronne circulaire, c'est-à-dire l'amplitude de flux est à l'intérieur d'une bande définie comme l'erreur acceptable ainsi considérée comme un paramètre de correcteur [25].

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne (Cflx) :

- Cflx=1 l'amplitude du flux doit être augmentée.
- Cflx=0 l'amplitude du flux doit être diminué.

L'erreur doit être maintenue à l'intérieure de la bande d'hystérésis $\Delta\Phi_r$ du correcteur :

$$|\phi_{r_ref} - \phi_r| < |\Delta\phi_r| \quad (III.27)$$

Avec :

ϕ_{r_ref} : Consigne de flux.

$\Delta\phi_r$: Largeur d'hystérésis du correcteur.

III.8.6.2. Correction du couple

Le correcteur de couple permet de maintenir le couple dans les limites souhaitables indiquées dans l'équation suivante [20] :

$$|C_{em_ref} - C_{em}| < |\Delta C_{em}| \quad (III.28)$$

Avec :

C_{em_ref} : Le couple de référence.

ΔC_{em} : La bande d'hystérésis du correcteur.

La sortie du correcteur représentée par la variable booléenne $ccpl$ indique directement si :

- $ccpl = 1$: L'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue pour une consigne positive.
- $ccpl = -1$: L'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue pour une consigne négative.
- $ccpl = 0$: L'amplitude du couple doit être diminuée.

III.9. Elaboration de la table de commutation

La table de commutation permet de définir le vecteur qu'il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteurs et de la position du vecteur flux statorique (pour la machine asynchrone) et le flux rotorique (pour la MADA) [25], [27].

Tableau. III.1 La table de commutation avec correcteur du couple à trois niveaux.

Cflx	ccpl	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

III.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter le principe des commandes du contrôle direct du couple qui seront appliqués au système de pompage éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil et au système de production d'énergie basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation. Le chapitre suivant sera consacré à l'application de ces commandes et à la présentation des résultats de simulation.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de simulation obtenus sous l'environnement MATLAB/SIMULINK du système étudié seront présentés et interprétés. Ces résultats vont nous permettre de vérifier les performances du système proposé.

IV.2. Résultats de simulation

Le système étudié dans ce travail est constitué d'une machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement autonome, la génératrice débite sur une charge (groupe motopompe), alors que le rotor est alimenté par l'intermédiaire de deux convertisseurs statiques. Ce dispositif d'électronique de puissance permet la réversibilité du transfert de l'énergie entre le nœud charge, stator et le rotor.

Les résultats de simulation obtenus avec le système proposé sont montrés sur les figures ci-dessous. L'aérogénérateur de ce système est basé sur une MADA de 7.5 KW et pour l'extraction de maximum de puissance l'algorithme MPPT est appliqué à l'éolienne fonctionnant à vitesse variable. La caractéristique $C_p(\lambda)$ de la turbine éolienne est représentée sur la figure suivante :

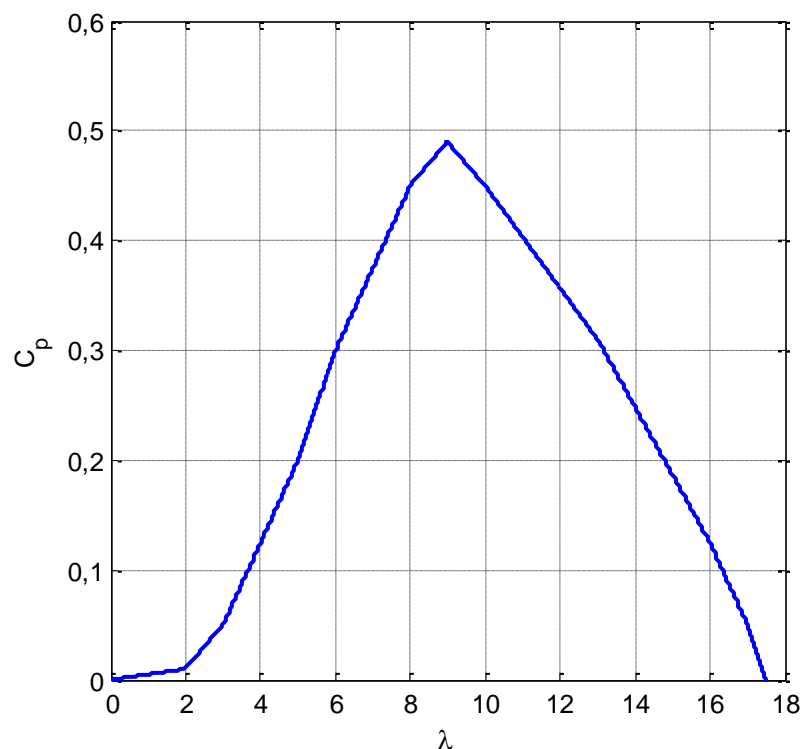


Figure. IV.1 Caractéristique $C_p(\lambda)$.

Le vent est une grandeur aléatoire, par conséquent en faisant varier le profil de vent d'une manière à faire fonctionner la génératrice dans ces trois modes de fonctionnement (figure. IV.2) hypo-synchrone, synchrones et hyper-synchrone comme l'indique l'allure de glissement (figure IV.3) ainsi que celle de la vitesse mécanique de la génératrice (figure IV.4).

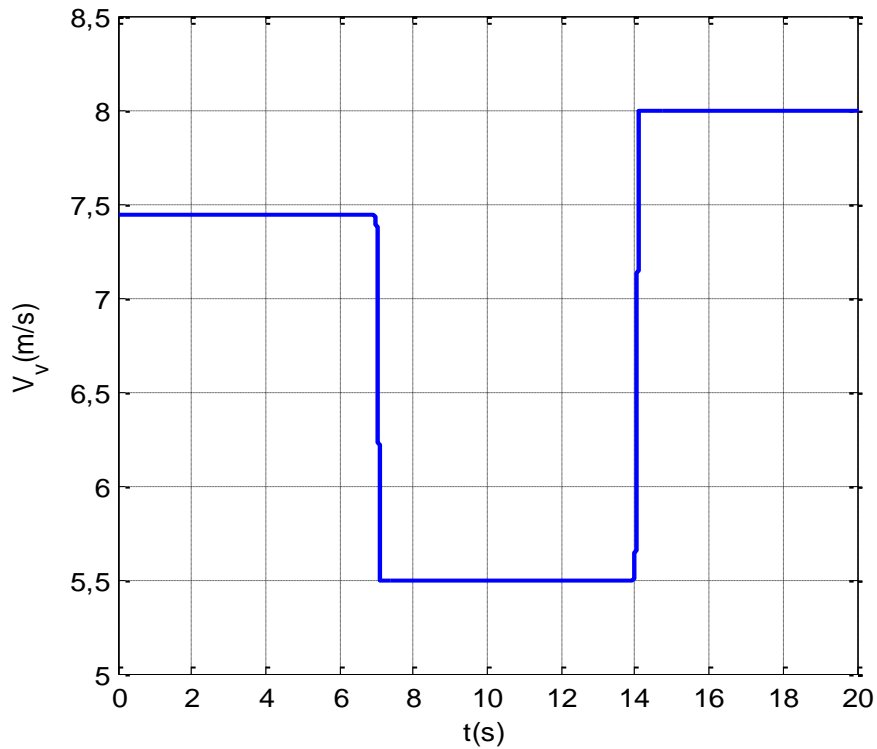


Figure. IV.2 Vitesse du vent.

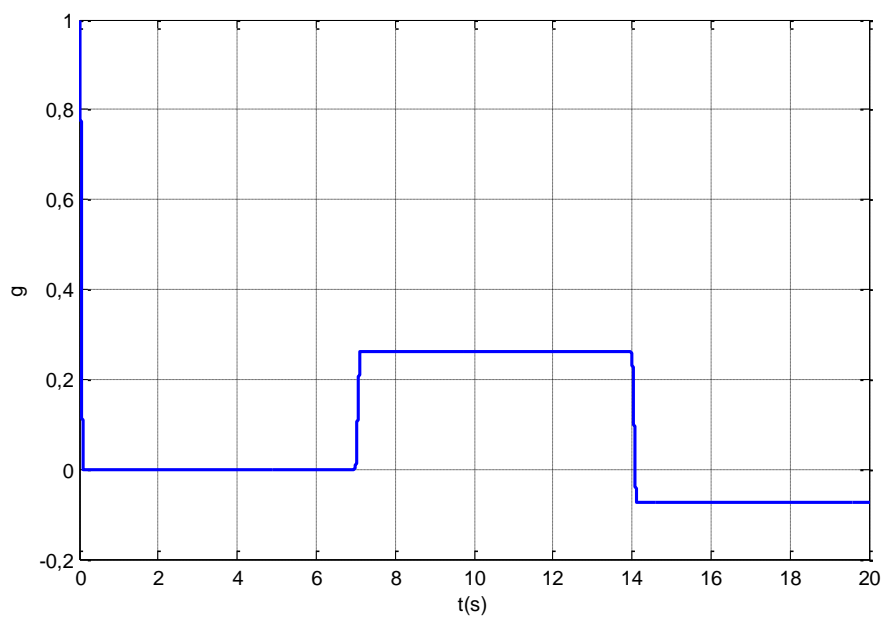


Figure. IV.3 L'allure du glissement de la MADA.

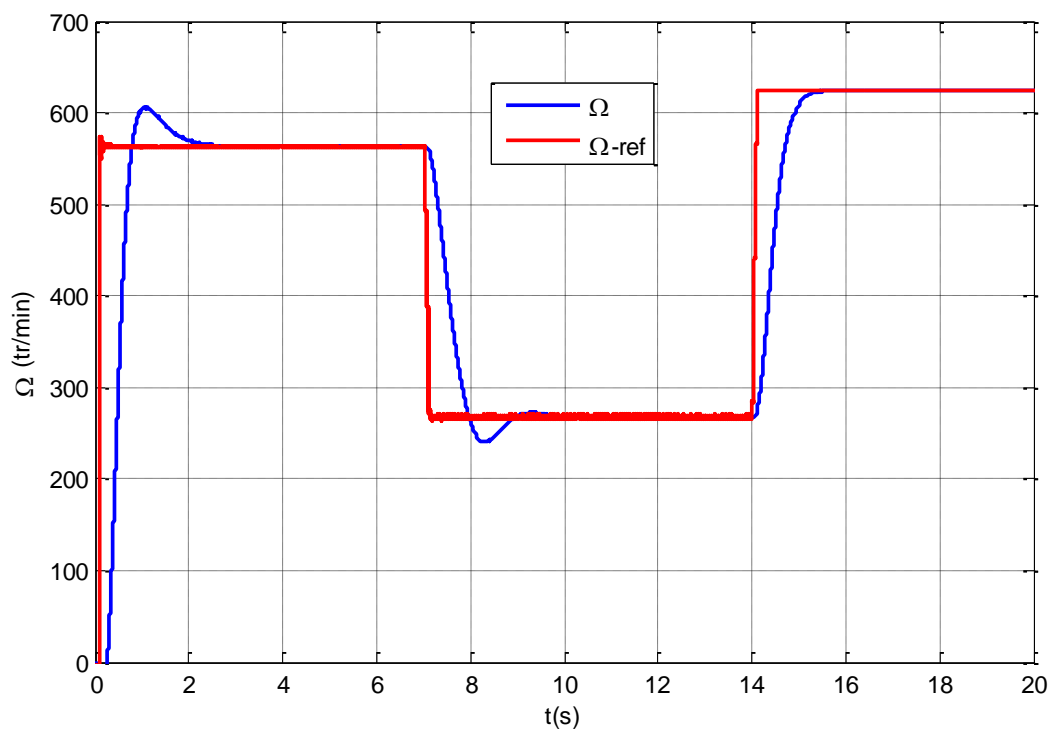


Figure. IV.4 L'allure de la vitesse mécanique de la génératrice.

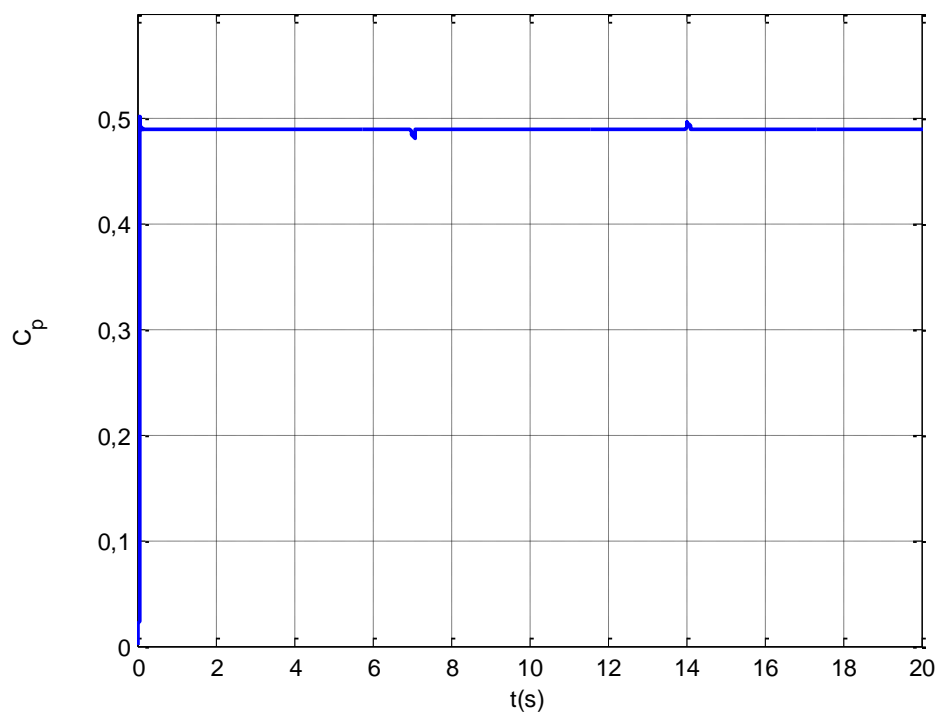


Figure. IV.5 L'allure de la vitesse réduite.

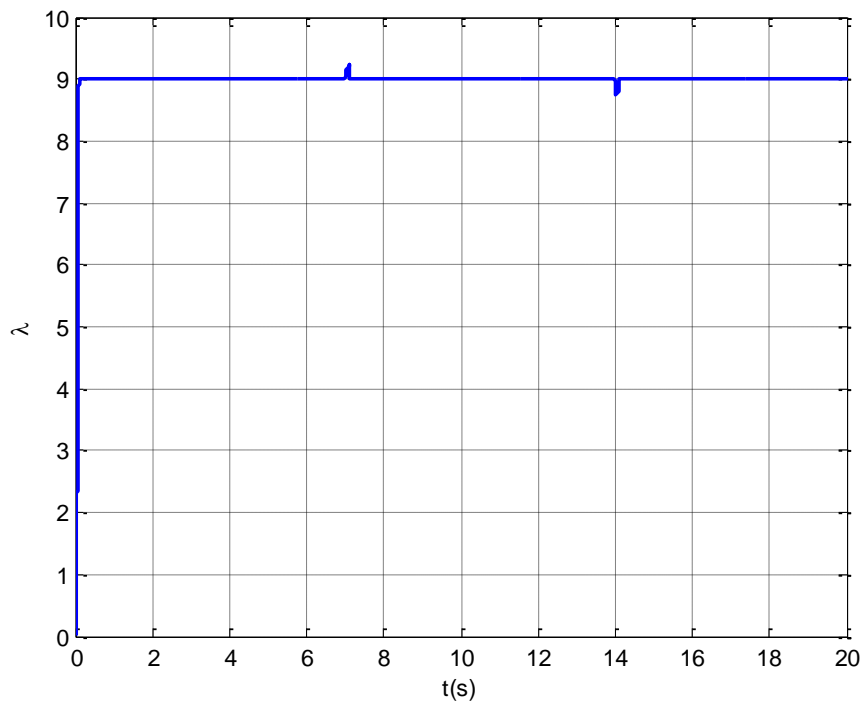


Figure. IV.6 L'allure du coefficient de puissance.

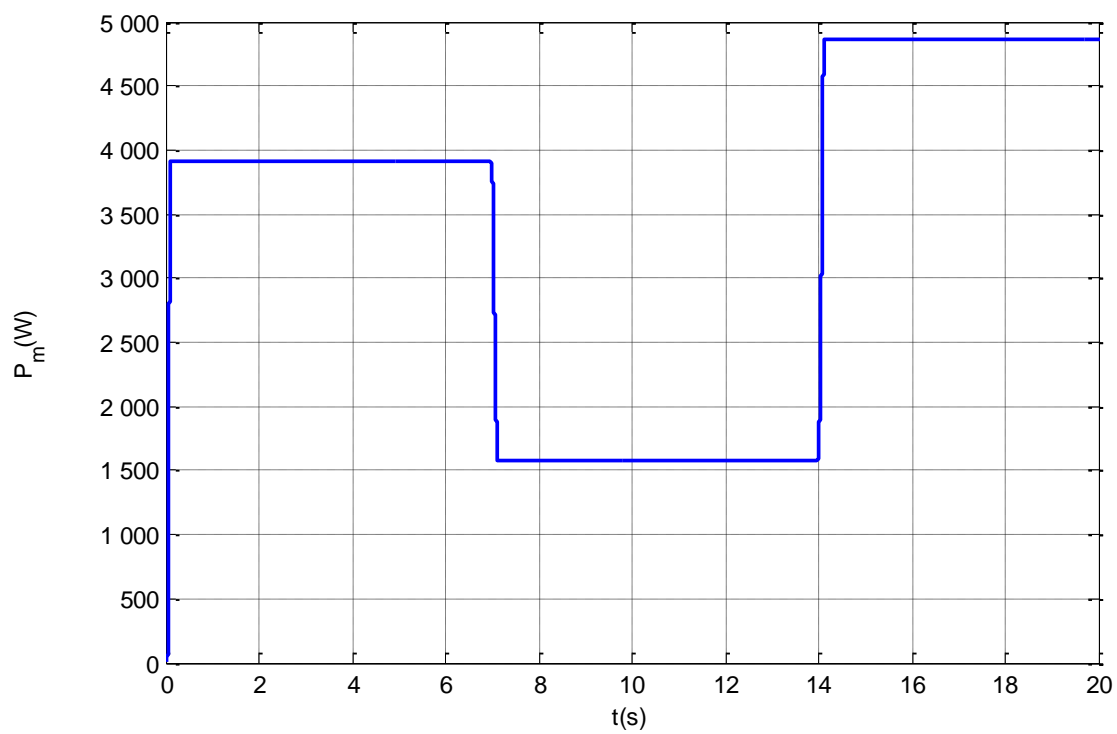


Figure. IV.7 L'allure de la puissance mécanique.

La figure (IV.4) montre que la vitesse de la rotation de la génératrice varie en fonction du vent. L'algorithme MPPT appliqué à permet de garder le rapport de vitesse à sa valeur optimal ($\lambda_{opt} = 9$) comme montre la figure (IV.5), cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximal quel que soit la vitesse du vent, ainsi un rendement aérodynamique optimale et extraire un maximum de puissance (Figure. IV.6). La figure IV.7, nous donne l'allure de la puissance mécanique fournie par la turbine éolienne correspondant à la puissance maximale extraite du vent.

La figure (IV.8) montre que la puissance statorique est toujours fournie au réseau ($P_s < 0$) quelle que soit le régime de fonctionnement de la machine, par contre la puissance active rotorique, son écoulement dépend de signe du glissement. Pour un fonctionnement hypo synchrone ($g > 0$), la puissance rotorique est absorbée par le rotor et dans le cas de l'hyper synchrone ($g < 0$), la puissance est renvoyée au réseau. Cela justifie les notions théorique décrite par la figure (I.11(c et d)).

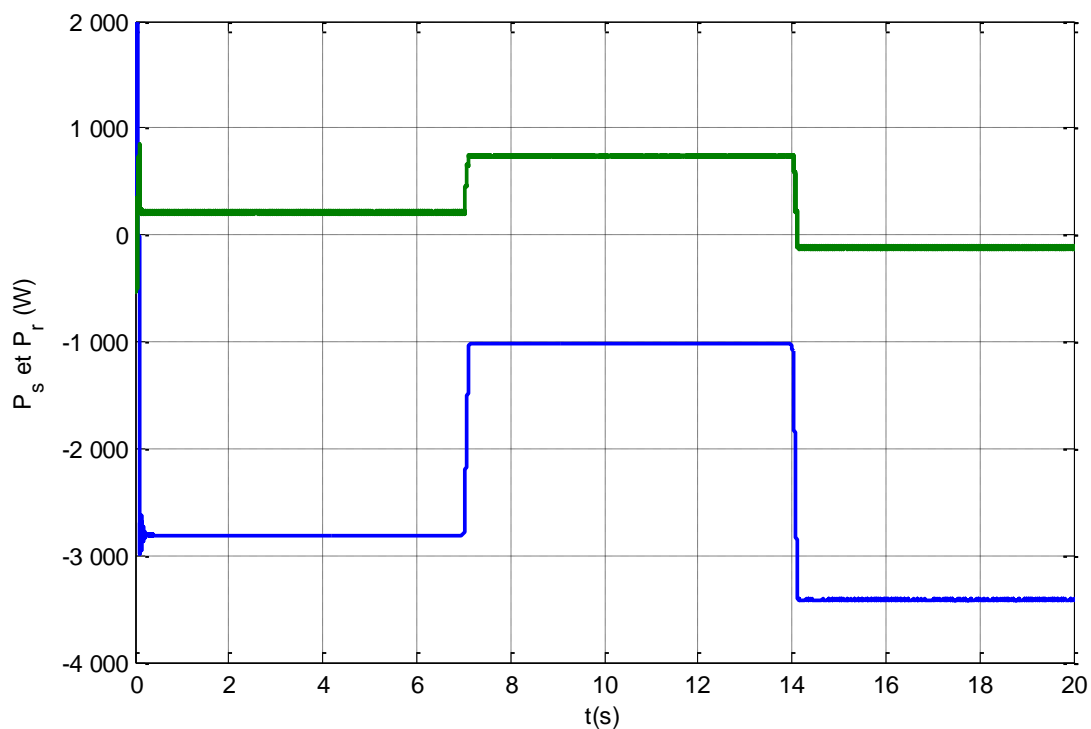


Figure. IV.8 Allure de la puissance active statorique et rotorique.

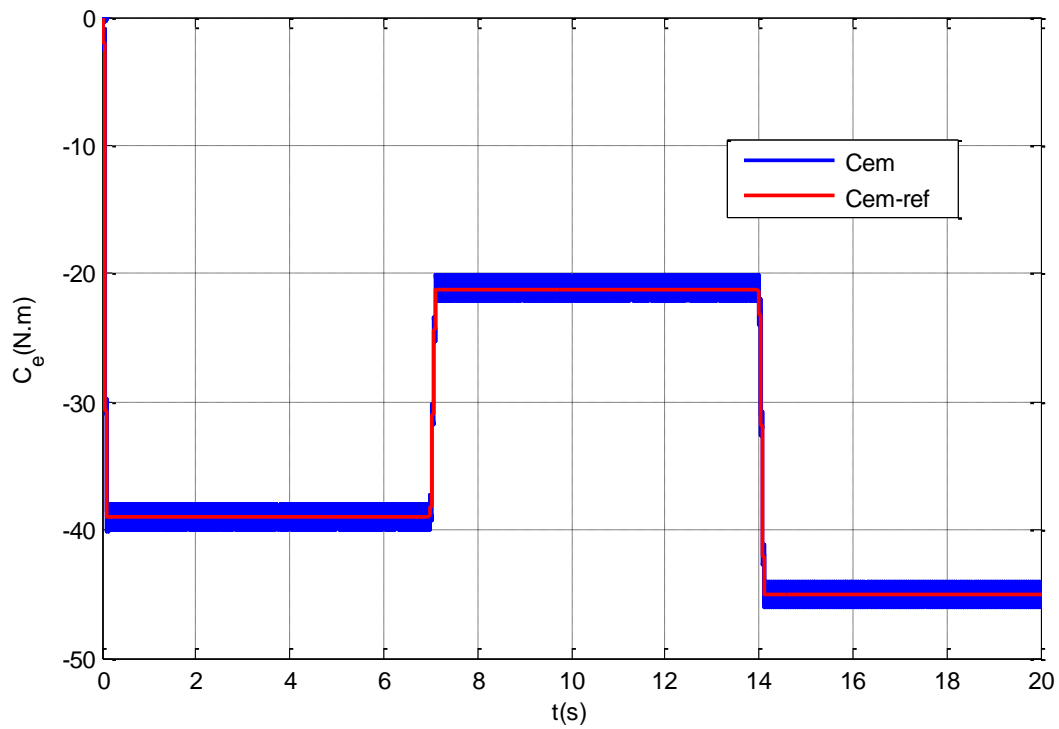


Figure. IV.9 Evolution du couple électromagnétique par rapport à sa référence.

La figure (IV.9) montre que le couple électromagnétique suit parfaitement sa consigne et varie en fonction du vent de manière à maximiser le coefficient de puissance.

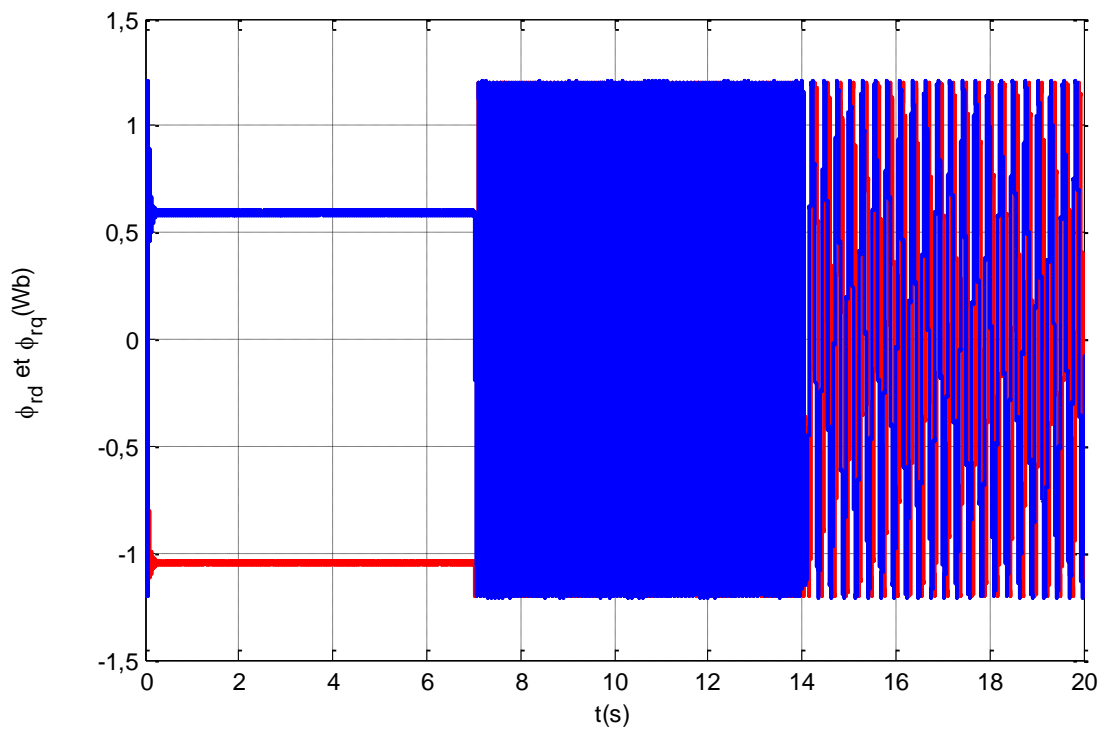


Figure. IV.10 Allure du flux rotorique.

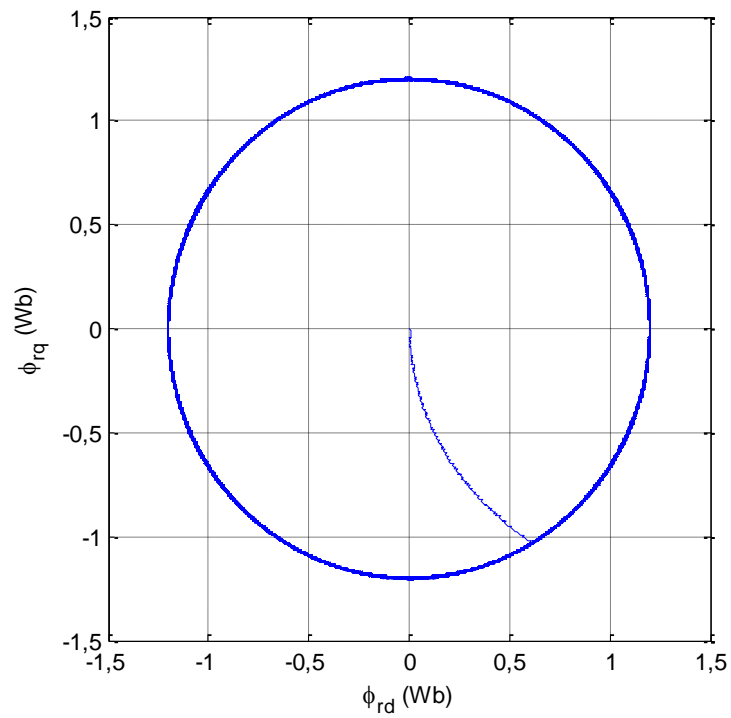


Figure. IV.11 Trajectoire du flux rotorique estimé.

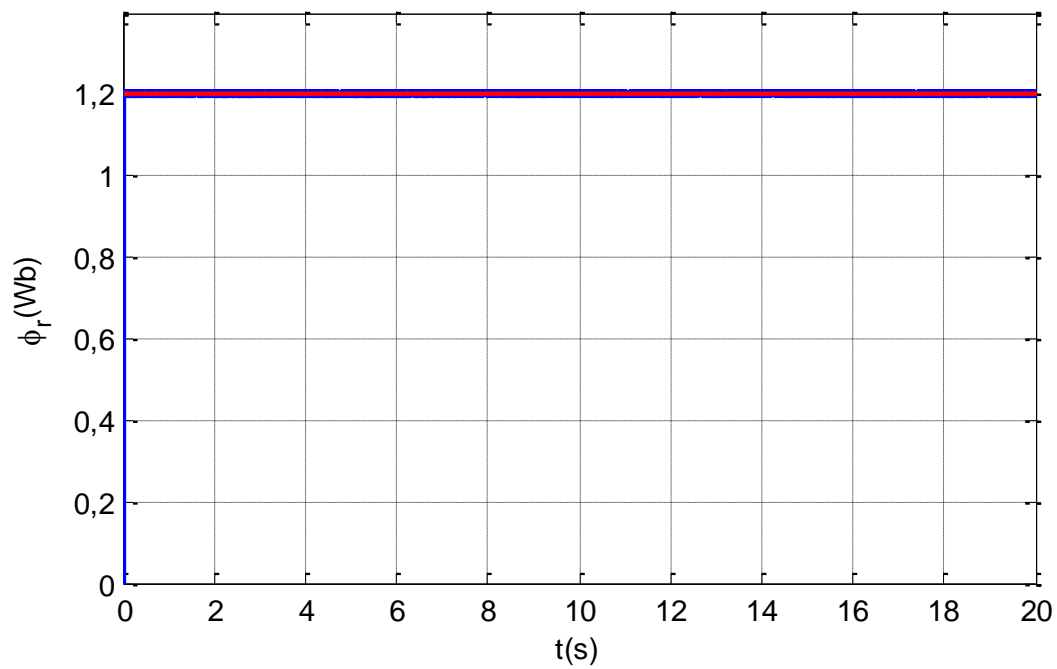


Figure. IV.12 Evolution du module du flux rotorique estimé par rapport à sa référence.

Sur la figure (IV.11), on remarque que la trajectoire du flux est parfaitement circulaire, ce qui justifie que son module est constant comme la montre la figure (IV.12), malgré la variation du couple électromagnétique, cela signifie que le couple et le flux sont découplés. La figure (IV.10) montre que pour un $g = 0$ nous avons des composantes de flux rotorique continue de valeur constante.

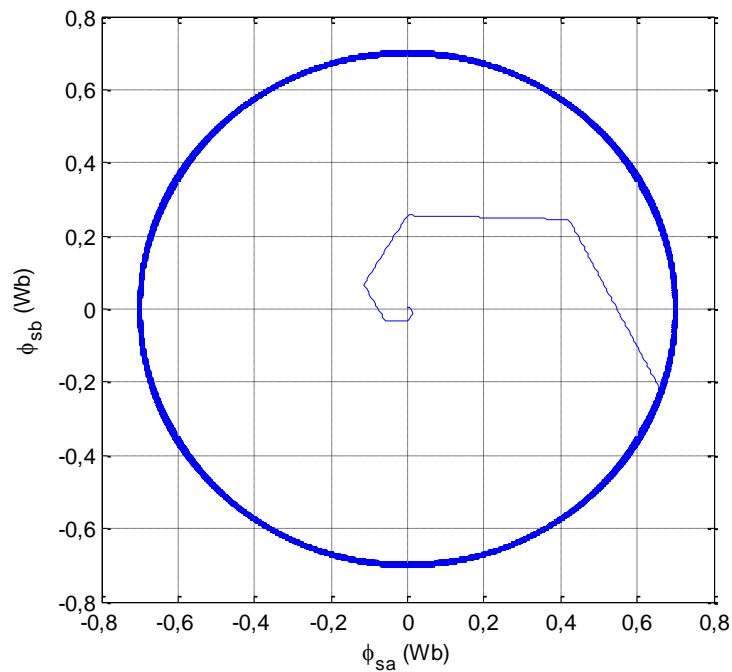


Figure. IV.13 Trajectoire du flux statorique estimé.

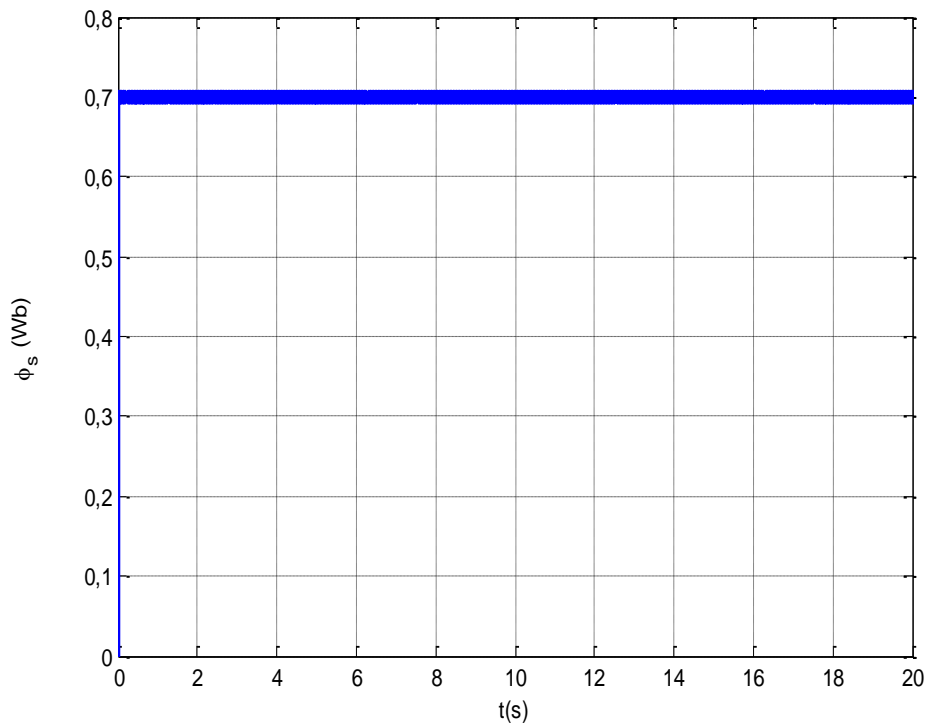


Figure. IV.14 Allure du flux statorique.

Sur la figure (IV.13), on remarque que la trajectoire du flux statorique est parfaitement circulaire, ce qui justifie que son module est constant comme la montre la figure (IV.14), malgré la variation du couple électromagnétique, cela signifie que le couple et le flux statorique sont découplés. Les allures circulaires du flux statorique induisent des flux ($\phi_{s\alpha}$) et ($\phi_{s\beta}$) d'allures sinusoïdales (figures (IV.15) et (IV.16)).

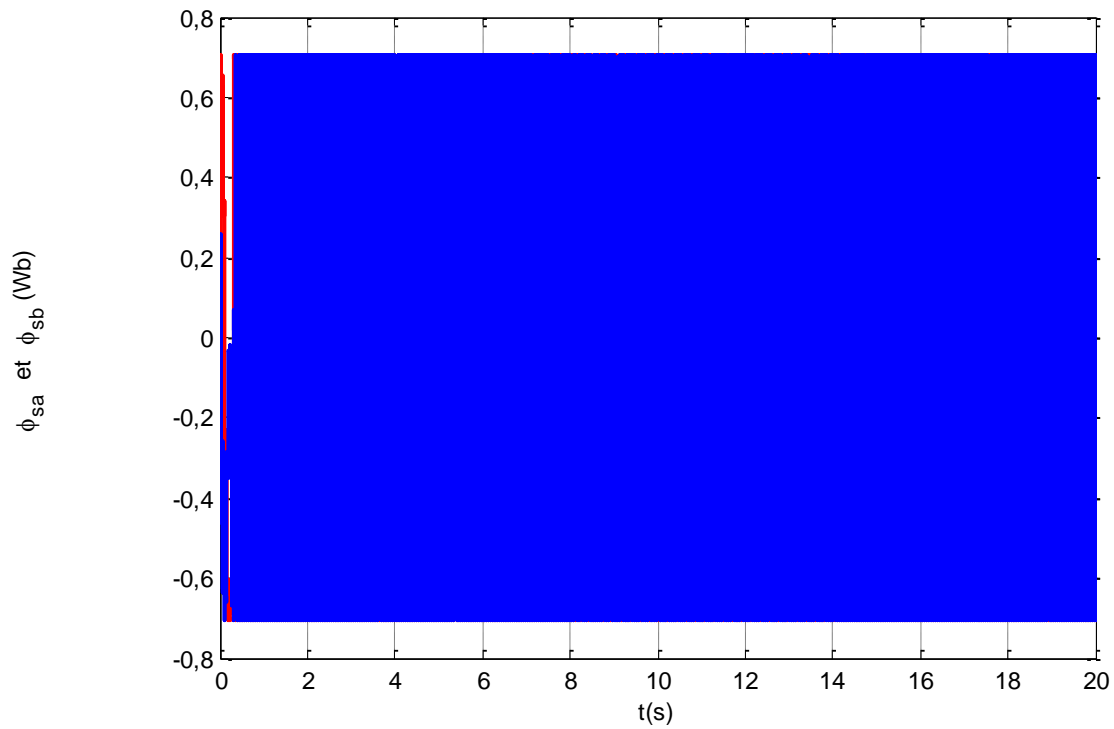


Figure. IV.15 Allure des flux statoriques (ϕ_{α} et ϕ_{β}).

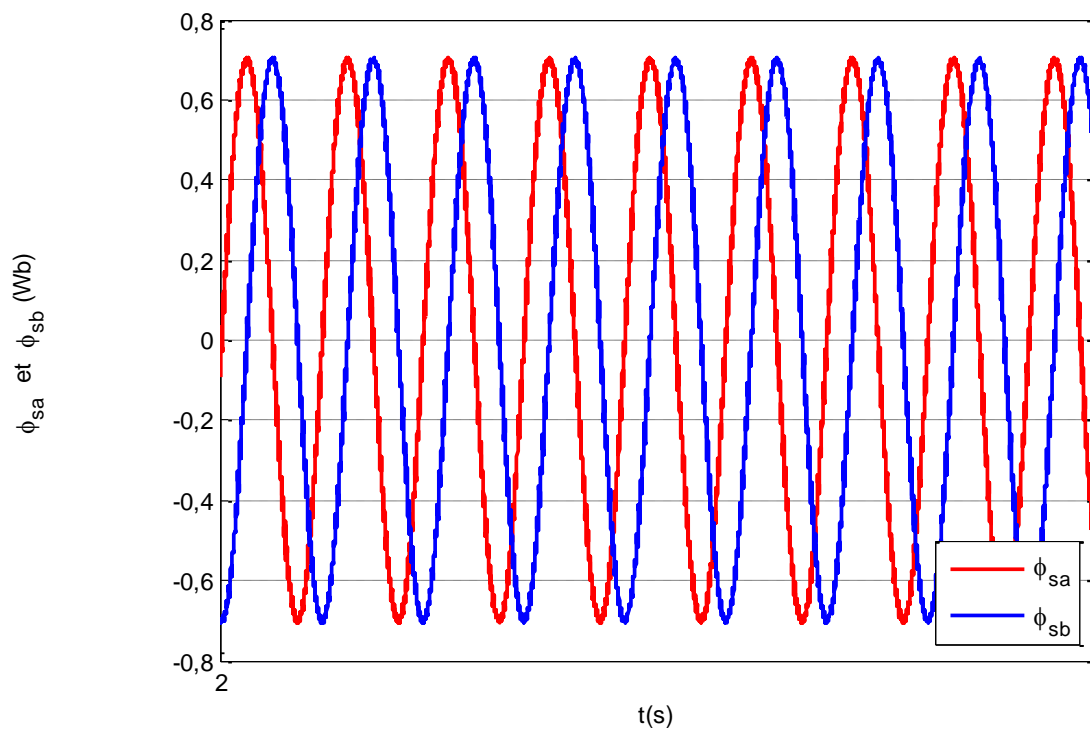


Figure. IV.16 Zoom sur les flux statoriques (ϕ_{α} et ϕ_{β}).

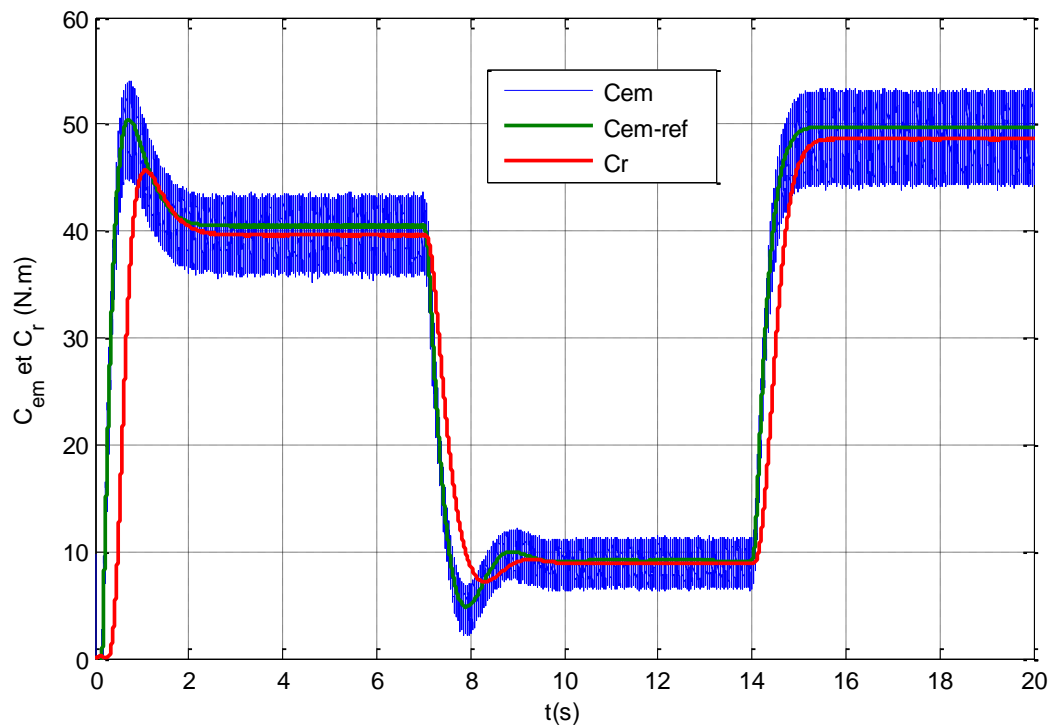


Figure. IV.17 Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.

La figure (IV.17) présente les allures du couple électromagnétique et sa référence ainsi que le couple résistant. On constate que le couple C_{em} et C_{em-ref} ne présentent pas d'ondulation au régime transitoire.

La figure (IV.19) représente l'allure de la vitesse de la pompe, on constate que la vitesse suit sa référence et suit dans son évolution l'allure de la puissance mécanique de la génératrice et cela est dû au mode de pompage adopté dans ce travail c.-à-d. le pompage au file du vent.

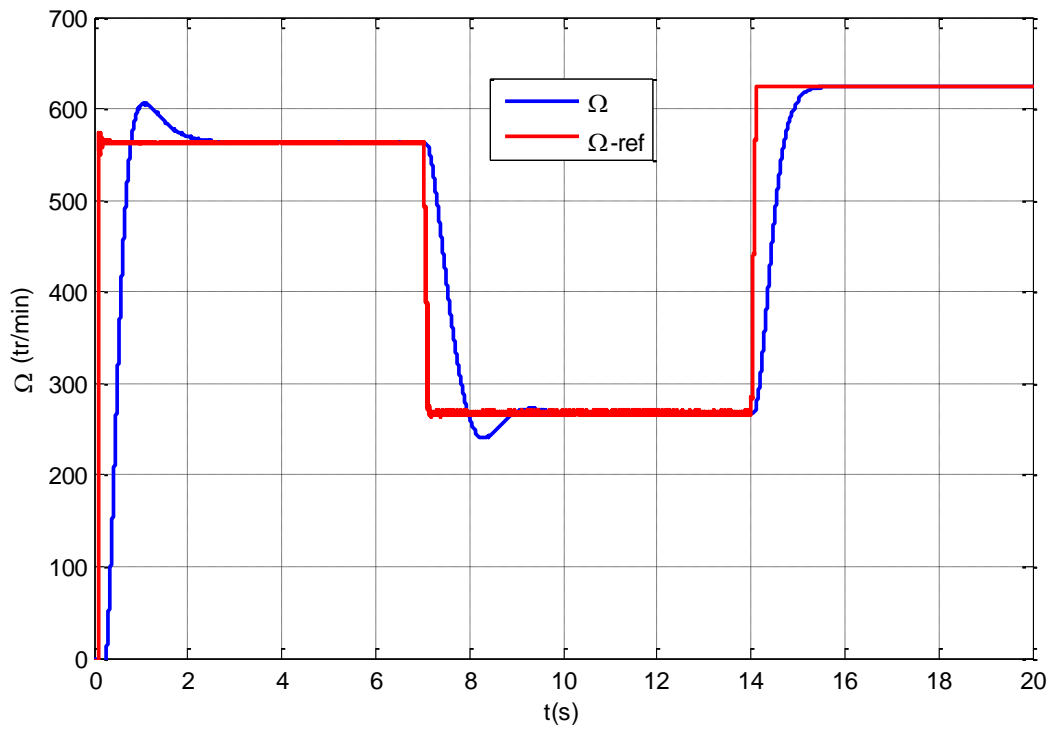


Figure. IV. 18 Allure du la vitesse de la pompe.

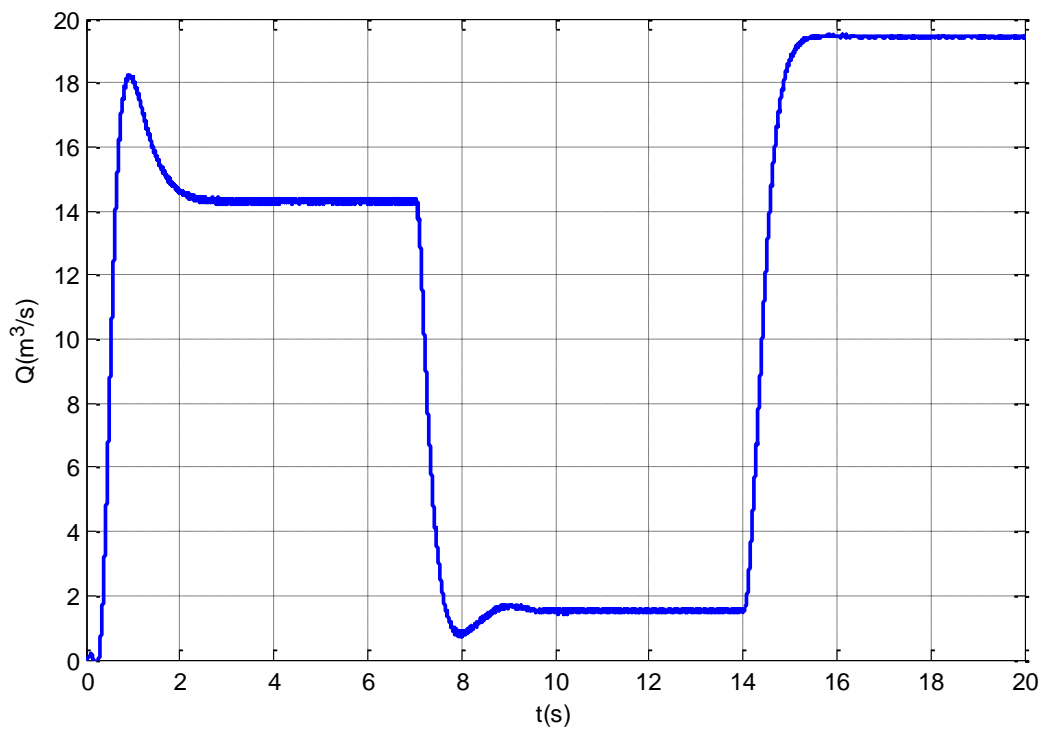


Figure. IV.19 Allure du débit de la pompe.

La figure (IV.19) représente l'allure du débit, on voit bien que son évolution est similaire a celle de la vitesse de la pompe.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus à partir de la simulation du système étudié. Ces résultats nous ont permis de montrer l'efficacité de la technique de commande exploitée dans ce travail à savoir le contrôle direct du couple appliqué pour la MADA et la MAS.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude, la modélisation et puis la simulation d'un système de pompage basé sur une génératrice asynchrone à cage d'écurieil dédié à l'énergie éolienne dont l'aérogénérateur est basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation.

Pour se placer dans le contexte général du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, le premier chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur le système éolien, et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage, puis nous avons cité ces avantages et inconvénients, les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés.

Au chapitre deux, nous avons illustré un schéma globale du système a étudié, puis nous avons modélisé les différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne à axe horizontale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que l'ensemble moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du principe du contrôle direct du couple et à l'implantation de la commande du système global. Le contrôle du système global est basé sur deux réglages; le premier concerne le générateur avec son système d'alimentation commandé par la technique DTC, qui se base sur l'estimation du flux rotorique et du couple électromagnétique. Le second, concerne la MAS qui alimente la pompe avec son système d'alimentation commandé par la DTC, qui se base sur l'estimation du flux statorique et du couple électromagnétique.

Enfin, le dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats de simulations obtenus après application de la commande directe du couple pour les deux sous-systèmes constituant le système globale étudié (production et pompage) et l'interprétation de ces derniers.

Etant donné que la méthode DTC utilise des régulateurs hystérésis ce qui est l'un de ses plus grands inconvénients de futurs développements peuvent être orienté vers l'utilisation des techniques de la DTC basé sur la modulation vectorielle (DTC-SVM). L'intelligence artificielle, tel que les réseaux de neurones ou d'autre peuvent être d'un grand apport afin d'améliorer les performances du système étudié.

Annexes

a. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation [25]

Puissance nominale : $P = 7.5 \text{ KW}$
 Tension statorique nominale : $U_{ns} = 415 \text{ V}$
 Tension rotorique nominale : $U_{nr} = 440 \text{ V}$
 Vitesse nominal: $N_n = 970 \text{ tr/min}$
 Nombre de paires de pôles : $p = 3$
 Résistance statorique : $R_s = 1.06 \Omega$
 Résistance rotorique : $R_r = 0.8 \Omega$
 Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.2065 \text{ H}$
 Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.081 \text{ H}$
 Inductance mutuelle : $M = 0.0664 \text{ H}$

b. Paramètres de la turbine[25]

Puissance nominale : $P = 7.5 \text{ KW}$
 Rayon de la turbine : $R_t = 3.24 \text{ m}$
 Vitesse nominal de la turbine: $\Omega_{tn} = 296 \text{ tr/min}$
 Vitesse maximal de la turbine: $\Omega_{t \max} = 8 \text{ tr/min}$
 Vitesse minimal de la turbine: $\Omega_{t \min} = 5.5 \text{ tr/min}$
 Moment d'inertie : $J = 0.075 \text{ Kg. m}^2$
 Le gain de multiplicateur : $G = 5.065$

c. Paramètres de la machine asynchrone modélisée [3]

Les caractéristiques électriques :

Rotor de type de cage d'écureuil
 Nombre de paires de pôles : 4
 230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn
 Résistance statorique : $R_s = 1,07131 \Omega$
 Résistance rotorique : $R_r = 1,29511 \Omega$
 Inductance propre statorique : $l_s = 8,9382 \text{ mH}$
 Inductance propre rotorique : $l_r = 4,8613 \text{ mH}$
 Inductance mutuelle : $M = 0.10474$

Les paramètres mécaniques.

Moment d'inertie : $J = 0,23 \text{ kg.m}^2$

Coefficient de frottement : $f = 0,0025 \text{ N.m/rad.s}$

d. Paramètres de la Pompe Centrifuge [3]

Vitesse nominale : $\omega_n = 78,5 \text{ rad/s}$

Puissance mécanique : $P_m = 5,5 \text{ kW}$

Rendement globale du groupe moteur pompe : $\eta = 0,55$

Masse volumique d'eau : $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Accélération de la pesanteur : $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

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

Bibliographie

- [1] S. Belakehal «Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables» Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [2] Tria Fatma Zahra « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques » Mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2013.
- [3] M. Behnous et L. Nasri «Contrôle d'un système de pompage éolien » Mémoire de Master de l'Université A. Mira-Bejaia, Algérie, 2016.
- [4] T. SAHBANI « Modélisation, simulation et commande d'un système de jumelage éolien/photovoltaïque à génératrice synchrone à aimants permanents», Mémoire, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, 2018.
- [5] K. Idjdarene « Analyse et Contrôle d'une Chaîne de Conversion Electrique par Energie Eolienne » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2005.
- [6] L. Riachy « Contribution à la commande d'un onduleur multi niveaux, destinée aux énergies renouvelables en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques. Energie électrique »Thèse de doctorat, Université Normandie, France, 2017.
- [7] Merabet Boulouiha Houari « Contribution à l'étude et la commande d'une éolienne pour la production de l'énergie électrique » Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf-Oran, 2013.
- [8] A. TAMAARAT «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2015.
- [9] F. Poitiers « étude et commande de Génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne »Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [10] M. Djallal Boudhouche et M. Ouennoughi « Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2016.
- [11] A. Guettaf « Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien »Thèse doctorat, Université Mohamed Khi der-Biskra, 2013.
- [12] H. Bennani « Machine asynchrone à double alimentation Les lois de commande en régime permanent »Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université Laval, 2011.
- [13] Y. Kourane et K. Gani «Commande vectorielle d'une MADA dédiée à l'énergie éolienne » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, Algérie, 2015.

- [14] S. Drid « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie & Expérimentation »Thèse de doctorat, Université de Batna, 2005.
- [15] H. Bekhada « Commande robuste d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel »Thèse de doctorat, Université du Québec, 2018.
- [16] Belhoul Talit «Etude et contrôle des aérogénérateurs à base des machines asynchrones double alimentées connectées à un réseau électrique autonome » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, Algérie, 2013.
- [17] T. Amarouche et M. Benhaddad « Contribution à la commande d'un aérogénérateur » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2014.
- [18] G. Salloum « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation »Thèse de doctorat, École doctorale : G.E.E.T., 2007.
- [19] Z. Aftis et Y. Aslouni « Commande non linéaire d'un système de pompage éolien » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira Bejaia, 2017.
- [20] A. Berbache et F. Sahel « Etude des performances d'une chaine Eolienne Basée Sur une Génératrice à Double Alimentation » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2009.
- [21] A. Gaillard «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service» Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [22] L. Baghli « Modélisation et commande de la machine asynchrone » notes de cour, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.
- [23] M. Lamine Zegai « Synthèses des techniques de commande DTC associe à l'intelligence artificielle appliquée au contrôle d'un moteur asynchrone alimenté par onduleur multi-niveaux » Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf-Oran, 2018.
- [24] Y. Kebbati « Développement d'une méthodologie de conception matériel à base de module générique VHDL/VHDL-AMS en vue d'une integration de systemes de commande électriques »Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2005.
- [25] S. TAMALOUZT « Contribution à l'étude, conception et la commande des convertisseurs électromagnétiques double alimentation »Thèse doctorat, Université A. Mira-Béjaia, 2017.

[26] A. Benzaioua « Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée » Thèse doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2014.

[27] K. Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome » Thèse de doctorat, Université A. Mira-Bejaia, 2010.

[28] R. Toufouti « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone » Thèse doctorat, Université Mentouri-Costantine, 2008.

[29] S. Gdaim « Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes » Thèse doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2013.

[30] L. Benyoub et H. Adrar « Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone en utilisant la carte dSPACE 1104 » Mémoire de Magister, université A. Mira-Bejaia, 2013.

[31] M. HADEF, cour commande électrique master 1, Université de Jijel.

SITES Internet

[site 1] <https://electronique1.blogspot.com/2011/02/la-machine-asynchron-double.html>.

[site2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Onduleur>.

[site3] <http://www.wikiwater.fr/e-42-les-pompes-a-energie-eolienne.html>.