

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

Université de TLEMCEM
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique

Mémoire

Présenté par :

M^{me} Kelkoul Bahia

Pour obtenir le grade de

Magister API

Option : Automatique

Thème

**Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une
Machine Asynchrone à Double Alimentation**

Soutenu le : 29/06/2011

Devant le jury d'examen:

A. Chermitti	Président	M.C	Université de TLEMCEM
A. Meghabber	Encadreur	M.C	Université de TLEMCEM
B. Yacoubi	Co- Encadreur	M.AA	Université de TLEMCEM
S.M Meliani	Examineur	M.C	Université de TLEMCEM
A. Kharrous	Examineur	M.C	Université de TLEMCEM

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je remercie vivement Messieurs A. Meghabber, Maître de conférence à l'Université de technologie de Tlemcen pour avoir encadrer mon travail, ainsi que pour ses observations enrichissantes et B. Yacoubi, Maître Assistant à l'Université de technologie de Tlemcen pour avoir dirigé ce travail ainsi que pour ses nombreux conseils et son soutien tout au long de cette thèse qui m'ont été une aide précieuse.

Je tiens à remercier Monsieur A. Chermitti, Maître de conférence à l'Université de technologie de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie Messieurs S.M Meliani et A. Kharrous, Maîtres de conférence à l'Université de technologie de Tlemcen pour avoir accepté d'être membres de jury pour ce travail.

Je remercie mes parents à qui je dédie ce mémoire pour m'avoir soutenu le long de mes études avec leurs précieux conseils. Ce mémoire est également dédié à mon mari Ghouti (tu vois, une thèse il y a bien une fin finalement) pour le soutien qu'il m'a apporté, sans oublier ma fille Nour El Houda.

Je remercie mes beaux parents, mes frères, mes sœurs ainsi que leurs familles sans oublier mes beaux frères, mes belles sœurs et leurs familles.

Je dédie aussi ce travail à mes cousines et mes amies et à tout ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragée.

CDV : Commande Directe de la Vitesse.

CIV : Commande Indirecte de la Vitesse.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions.

PI : proportionnel-Intégral

MCC : Machine à courant continue

MAS : Machine asynchrone

ρ : densité volumique de l'air	kg.m ³
S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne	m ²
C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne	-
R : rayon de la turbine	m
λ : rapport de vitesse de la turbine	-
β : Angle de calage des pales d'une éolienne	°
α : Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal	°
P_m : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice	W
V : vitesse du vent	m/s
Ω_{tur} : Vitesse de rotation de la turbine	rd/s
Ω_{mec} : Vitesse de rotation de la génératrice	rd/s
λ_{opt} : Valeur optimale de λ	-
C_{aer} : Couple aéroturbine éolien	N.m
J_t : inertie de la turbine	kg.m ²
J_g : inertie de la génératrice	kg.m ²
J_T : inertie total sur l'arbre	kg.m ²
f_T : coefficient des frottements	N.m/s
C_{mec} : couple de la génératrice	N.m
C_{em} : couple électromagnétique	N.m
C_{vis} : couple visqueux	N.m
R_s : résistances statorique par phase	Ω
R_r : résistances rotorique par phase	Ω
L_s : Inductances propres statorique	H
L_r : Inductances propres rotorique	H
M_s : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques	H
M_r : Inductances mutuelles entre deux phases rotoriques	H
M_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.	H
M : inductance magnétisante	
ϕ_{ds}, ϕ_{qs} : flux statoriques diphasés dans un repère tournant	Wb

ϕ_{dr}, ϕ_{qr} : flux rotoriques diphasés dans un repère tournant	Wb
I_{ds}, I_{qs} : Courants statoriques diphasés dans un repère tournant	A
I_{dr}, I_{qr} : Courants rotoriques diphasés dans un repère tournant	A
g : Glissement d'une machine asynchrone	
f : Fréquence du réseau électrique	Hz
C_r : Couple résistant	N.m
ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques	rd/s
ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques	rd/s
θ_s : Angle relatif à la pulsation statorique ω_s .	rd
θ_r : Angle relatif à la pulsation statorique ω_r .	rd
σ : Coefficient de dispersion	-
P_s : Puissance active statorique	W
Q_s : Puissance réactive statorique	VAR
Ω : Vitesse de rotation de la machine	rd/s

Glossaire

Nomenclature

Introduction générale.....5

Chapitre Un

Les systèmes éoliens pour la production de l'énergie électrique

I. Introduction.....	8
II. Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes.....	8
1. Principe.....	8
2. Eléments constitutifs d'une éolienne.....	9
3. Différents types d'éoliennes.....	10
III. Phases de fonctionnement d'une éolienne.....	11
IV. Intérêt du contrôle.....	12
V. Structures des systèmes éoliens.....	14
1. Fonctionnement à vitesse fixe	14
2. Fonctionnement à vitesse variable.....	15
3. Eolienne à machine asynchrone à cage.....	16
4. Eolienne à machine asynchrone à double alimentation.....	16
5. Autres machines.....	17
VI. Aérogénérateur étudié.....	17
VII. Modélisation de la turbine.....	20
VIII. Simulation de la partie mécanique de l'éolienne.....	24
IX. Conclusion.....	26

Chapitre Deux

Commande de la turbine éolienne

I. Introduction.....	28
II. Stratégies de commande.....	28
1. Action à charge partielle.....	28
1.1 Commande de rapport de vitesse λ	29
1.2 Commande de puissance.....	30
1.3 Méthode du gradient.....	32
1.4 Commande par logique floue.....	33

2. Action en pleine charge (contrôle de l'angle de calage).....	34
III. Mise en œuvre de la commande.....	34
1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	35
2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	38
IV. Simulation de la commande de la turbine éolienne.....	42
1. Simulation de la commande directe de la vitesse mécanique.....	42
2. Simulation de la commande Indirecte de vitesse mécanique.....	43
V. Conclusion.....	44

Chapitre Trois

Modélisation de la MADA et sa stratégie de commande

I. Introduction	46
II. Présentation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	47
1. Constitution de la MADA.....	47
2. Fonctionnement de la MADA.....	47
2.1 Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone.....	48
2.2 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone.....	48
2.3 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.....	49
2.4 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.....	50
III. Avantages et inconvénients de la MADA.....	50
IV. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	52
1. Hypothèses.....	52
2. Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation	52
3. Modèle de la MADA dans le référentiel de Park	53
V. Association de la MADA avec un onduleur à MLI.....	55
VI. Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive.....	59
1. Application de la commande vectorielle à flux orienté.....	60
VII. Résultat de Simulation de la MADA.....	65
1. Simulation d'une MADA alimentée par un réseau triphasé.....	65
2. Simulation d'une MADA associée à un onduleur MLI.....	66
3. Simulation d'une MADA sans onduleur avec application de d'une charge.....	67

4. Simulation d'une MADA alimentée par un onduleur avec application de C_r	68
VIII. Analyse des résultats.....	69
IX. Conclusion.....	70

Chapitre Quatre

Commande de la génératrice asynchrone à double alimentation

I. Introduction	72
II. Hypothèse de travail.....	72
III. Définition de cahier de charge.....	74
IV. Mise en œuvre de la régulation.....	74
1. Synthèse du régulateur PI.....	74
2. Commande RST.....	77
2.1. Objectif de la commande RST.....	78
2.2. Synthèse de la commande RST.....	78
2.2.1 Principe.....	78
2.2.2 Résolution de l'équation de Bézout.....	80
2.2.3 Stratégie de placement de pôles robuste.....	82
V. Application du régulateur RST à notre système (MADA).....	85
VI. Résultats de Simulations de la commande de la MADA par PI et RST.....	91
1. suivi de consigne	92
2. Sensibilité aux perturbations.....	93
3. Robustesse.....	95
VII. Conclusion.....	97

Conclusion générale et Perspectives	98
---	----

Annexes.....	10
--------------	----

1

Annexe 1 : Loi de Betz	102
------------------------------	-----

Annexe 2 : Paramètre de la turbine.....	105
---	-----

Annexe 3 : Transformation de Park.....	106
--	-----

Annexe 4 : Paramètre de la MADA.....	110
--------------------------------------	-----

Annexe 5 : Schéma simulink de commande directe de la vitesse mécanique d'une turbine éolienne	111
Schéma simulink de commande indirecte de la vitesse mécanique d'une turbine éolienne.....	112
Bibliographie.....	113

La production d'énergie électrique liée aux énergies renouvelables, essentiellement celle qui est produite par l'énergie éolienne, joue le rôle de complément aux productions d'énergies classiques. Cette dernière est utilisée depuis des siècles, elle s'est développée en conséquence des problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles et du progrès technologiques des aérogénérateurs.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet de diminuer le coût de production d'électricité par des aérogénérateurs et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans ce cadre, le présent mémoire a pour objectif de concevoir les lois de commande des turbines éoliennes utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible afin d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Le premier chapitre est consacré à la description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie. Une modélisation de la turbine éolienne sera présentée. A la fin de ce chapitre on fera des simulations sur la partie mécanique de l'éolienne.

Le second chapitre présente deux stratégies de commande de la vitesse mécanique de la turbine éolienne pour maximiser la puissance extraite en zone 2, zone d'extraction maximale de la puissance (MPPT).

Le troisième chapitre présente une étude sur la machine asynchrone à double alimentation et son fonctionnement en génératrice. Une modélisation dans un repère diphasé lié au champ tournant et une stratégie linéaire de commande (commande vectorielle) en puissances active et réactive statorique seront détaillées.

Le quatrième chapitre met en œuvre la commande vectorielle basée sur deux régulateurs linéaires de philosophie différente : Proportionnel Intégral afin d'annuler l'erreur statique et régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles. Ces deux

régulateurs seront comparés en termes de poursuite de trajectoire, robustesse et sensibilité aux perturbations. Les résultats obtenus dans ces investigations sont présentés, ils nous permettront de conclure sur les méthodes et outils utilisés et d'envisager les perspectives et suites à donner à ce travail.

Chapitre un

I. Introduction :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul LaCour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [48].

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évolué. Ceci a permis à l'énergie éolienne de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Leurs stratégies de commande permettent de capter un maximum d'énergie sur une grande plage de variation de vitesse de vent afin d'améliorer la rentabilité des systèmes éoliens. La recherche a un rôle important à jouer dans ce sens et on peut notamment y introduire plus d'intelligence.

Ce premier chapitre présente une description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie. Le choix de l'aérogénérateur que nous allons étudier et la modélisation de la turbine éolienne seront présentés. Afin d'illustrer le fonctionnement de la partie mécanique d'une éolienne on fera des simulations sur cette partie dont les résultats seront présentés et discutés.

II. Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes :

1. Principe :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (1.1). L'ensemble de la chaîne de Conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [2], [22].

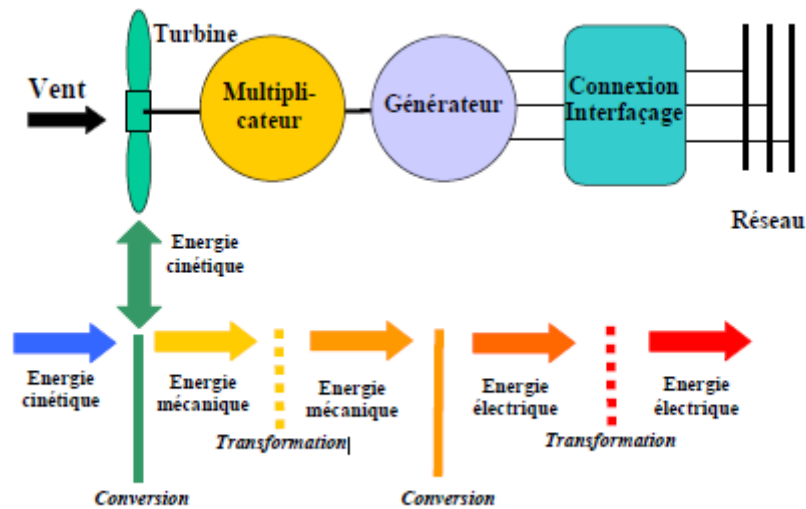


Figure (1.1) : Principe de la conversion d'énergie

2. Eléments constitutifs d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, Une éolienne classique est constituée principalement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacune de ces éléments doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système avec un faible coût d'investissement:

- **La tour ou le mât** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.
- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone
- **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent. Plus le diamètre du rotor est grand, plus la surface balayée est importante [4], [6], [23], [27].

3. Différents types d'éoliennes :

Les aérogénérateurs sont à **axe horizontal** ou **vertical**. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axes horizontales. Les éoliennes à **axe vertical** ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol facilement accessibles mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [2], [32], [48].

Les éoliennes à **axe horizontal** dont l'arbre est parallèle au sol sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Ce type d'éoliennes sont simples du point de vue mécanique et nécessitent un « encombrement » au sol relativement faible pour le montage et la fixation de la tour [2], [6]. Le tableau (1.1) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [44].

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

Tableau (1.1) : classification des turbines éoliennes [44]

III. Phases de fonctionnement d'une éolienne :

La figure (1.2) montre les zones de fonctionnement caractéristiques mesurées sur une éolienne de 1.5 MW [31]:

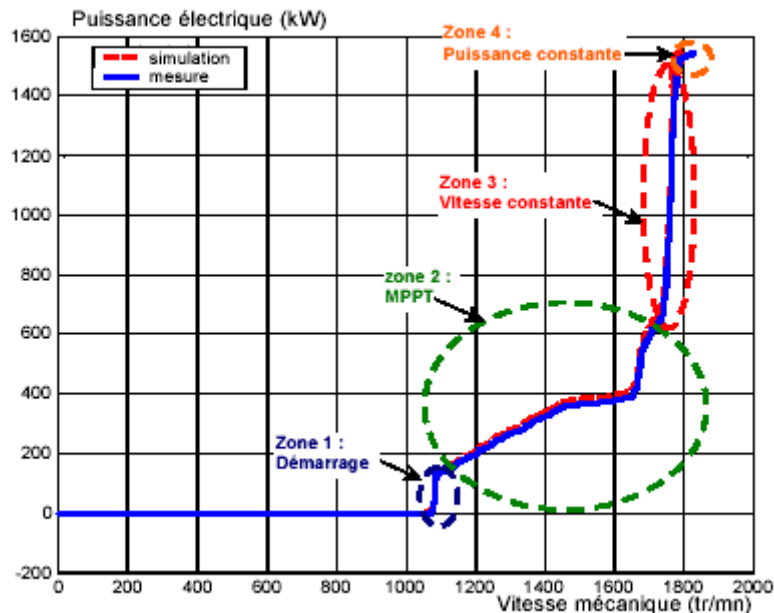


Figure (1.2) : Zone de fonctionnement caractéristiques d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

On définit les zones de fonctionnement des éoliennes suivant la vitesse du vent :

- **Zone 1 ($V < V_1$)** : c'est la zone de démarrage de la machine. La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste assez faible.

V_1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

- **Zone 2 ($V_1 < V < V_2$)** : est la zone d'extraction maximale de la puissance (**MPPT : Maximum Power Point Tracking**). Elle correspond au **fonctionnement à Charge Partielle (CP)**. Dans cette zone l'angle de calage des pales β reste constant afin d'obtenir un C_p maximal ainsi la puissance maximale est capté pour chaque vitesse de vent.

V_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s.

- **Zone 3 ($V_2 < V < V_3$):** Elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante. L'angle de calage des pales varie. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale. Cette zone correspond au **fonctionnement à Pleine Charge (PC)**.

V_3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

- **Zone 4 ($V > V_3$):** La vitesse du vent devient trop forte. La puissance est limitée à sa valeur maximale (1550 kW) grâce au système d'orientation des pales [6], [22], [44], [61].

Dans ce mémoire on s'intéresse au fonctionnement de la zone 2 ou phase **MPPT**. Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse.

IV. Intérêt du contrôle :

La figure (1.3) illustre les caractéristiques non linéaires (puissance mécanique- vitesse mécanique). Pour chaque vitesse du vent il y a une courbe associée. L'éolienne, à qui appartiennent ces caractéristiques, fonctionne, sans commande, avec un vent dont la vitesse est comprise entre une valeur minimale ($V_{\min}=7$ m/s) et une valeur maximale ($V_n=13.5$ m/s). Si la vitesse du vent est inférieure à V_{\min} l'éolienne consomme de l'énergie électrique en mode moteur. Si la vitesse du vent est supérieure à V_n l'éolienne produit un excès de puissance électrique ce qui soumet le générateur à des contraintes électriques dangereuses.

Si l'éolienne est à vitesse fixe et la vitesse du vent varie entre V_{\min} et V_n , la puissance de la turbine correspond aux points 3, 2 et 1 de la caractéristique illustrée sur la figure (1.3). La puissance maximale dans le cas 2 et 3 se trouve ailleurs, par conséquent si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de régler la vitesse de la génératrice aux valeurs correspondante aux point 6, 5, 4. Ainsi la vitesse de la turbine doit être variable en fonction de la vitesse du vent. Cette technique d'extraction maximale de la puissance MPPT consiste à ajuster le couple électromagnétique pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} .

Deux politiques de contrôle, selon la vitesse du vent, permettent de maximiser l'exploitation de l'éolienne :

1. Pour maximiser la puissance, lorsque la vitesse du vent est inférieure à sa valeur nominale, la vitesse mécanique de l'éolienne est contrôlée ce qui correspond aux points 4, 5 et 6 par exemple. Cette commande permet aussi de commencer la production de l'énergie avec des vitesses du vent inférieures à V_{min} , par exemple cette éolienne à vitesse variable commence à produire de l'énergie dès la vitesse du vent qui égale à ($V_{on}=4$ m/s) [34].

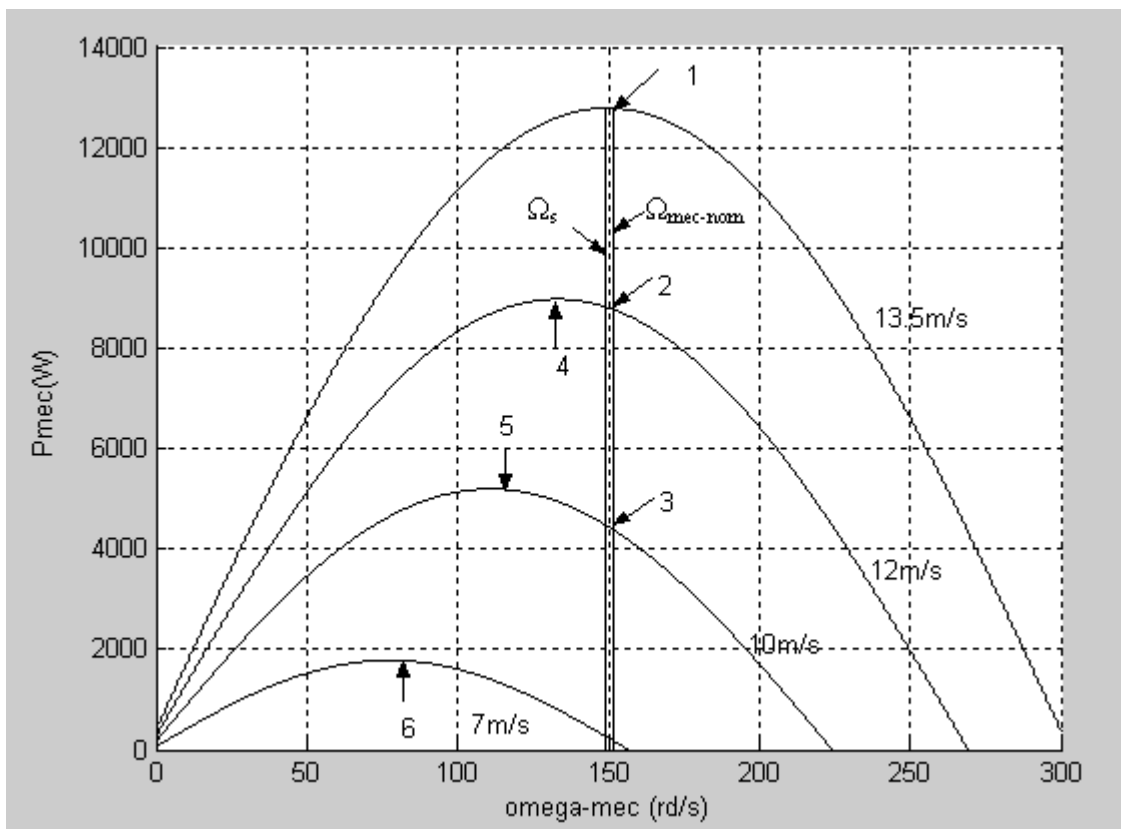


Figure (1.3) : Caractéristique (puissance- vitesse mécanique)

2. Pour fonctionner avec un vent dont la vitesse est supérieure à une valeur nominale et augmenter l'énergie électrique, l'angle des pales de l'éolienne est contrôlé afin de conserver la puissance produite proche de sa valeur nominale. Cette commande permet de fonctionner avec des vitesses du vent supérieures à V_n , à condition que l'éolienne supporte les contraintes mécaniques.

Résumé :

La commande de l'éolienne permet de l'exploiter au maximum. La puissance électrique sera optimisée tout en fonctionnant sur une plage de vitesse plus importante.

V. Structures des systèmes éoliens :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [48] :

1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (figure 1.4). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control) [31].

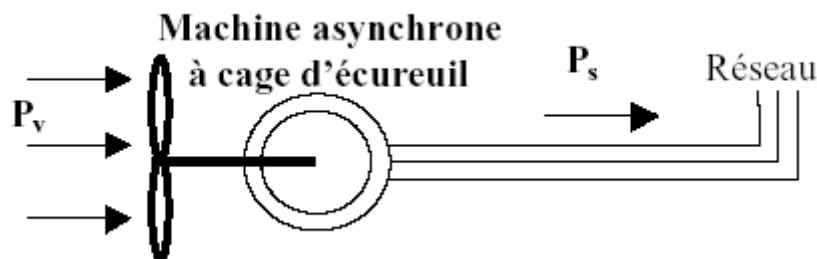


Figure (1.4) : éolienne à vitesse fixe.

Parmi ses avantages :

- Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins cher [48].

2. Fonctionnement à vitesse variable :

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique **synchrone** ou **asynchrone** [34].

Les machines **synchrone** : elles sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires) . Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [48].

La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines **asynchrones**. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuse. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné) [1], [2], [34].

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité [48]
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique) [48], [31].
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés .En conséquence, pour de faibles vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente [30].
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique [31].
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien [6].

2.1. Eolienne à machine asynchrone à cage :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la figure (1.5).

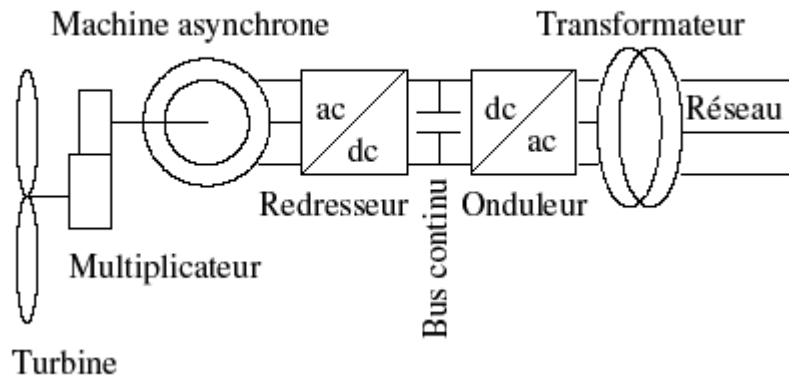


Figure (1.5) : Eolienne à MAS pilotée au stator

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la figure (1.5)). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes [34].

2.2. Eolienne à machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique (figure 1.6). Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la 1^{ère} configuration [2], [34].

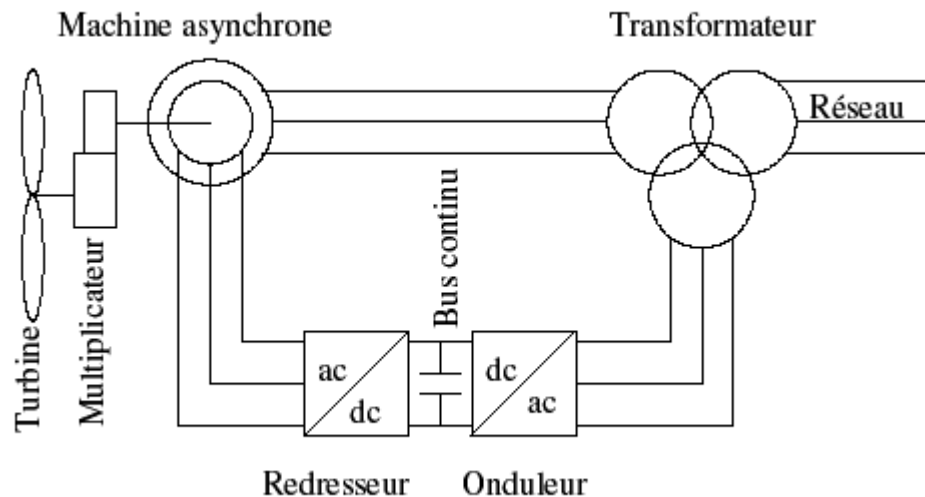


Figure (1.6) : Eolienne à MADA pilotée au rotor [34]

2.3. Autres machines :

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les **machines à courant continu** présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids [2]. Les générateurs à **réductances variables** sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes [2], [7], [48], [34].

VI. Aérogénérateur étudié :

La technologie des aérogénérateur s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi, de nos jours, il existe de nombreuses sortes d'aérogénérateur. On précise dans ce chapitre le type d'éolienne étudié dans cette thèse.

La machine asynchrone à cage d'écureuil, par ses qualités de robustesse, de coût et de simplicité, semble bien adaptée à l'utilisation dans un système éolien. Lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction

entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées [48]. Une solution consiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Le dispositif peut alors fonctionner à vitesse variable car quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension est redressée puis un onduleur côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. Ainsi elle permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite et de son rendement énergétique comme on l'a indiqué sur la figure (1.7). L'inconvénient principal de ce genre de système le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs [2], [48].

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [6], [13], [48].

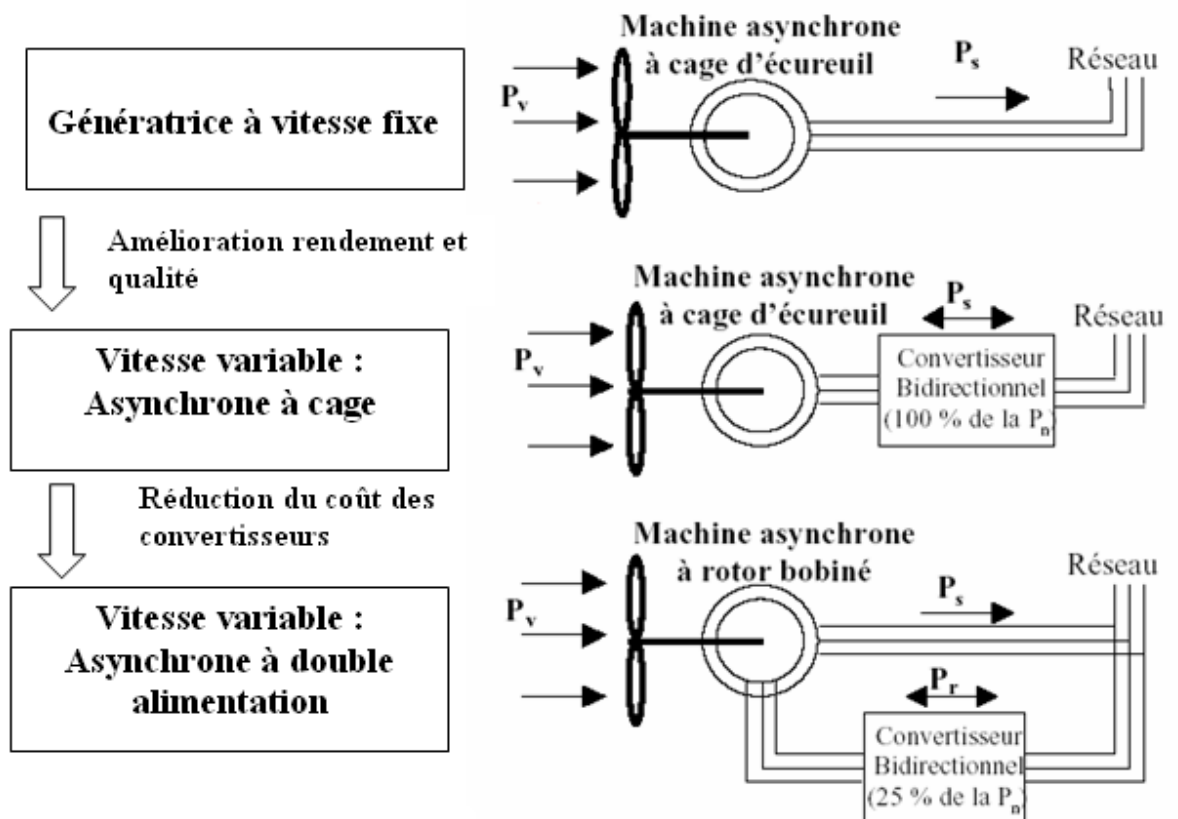


Figure (1.7) : Evolution de la configuration électrique

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des Générateurs Asynchrones Doublement Alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette thèse. Cette machine est également étudiée dans :

[2] : Il a proposé une étude et commande d'une génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Il a commencé à présenter une étude sur la machine asynchrone à cage d'écurueil auto-excitée, ensuite il a présenté une étude sur la machine asynchrone à double alimentation ainsi il a proposé une stratégie de commande vectorielle à flux statorique orienté utilisant trois régulateurs linéaires (Proportionnel Intégral), régulateur RST et régulateur LQG.

[6] : Il étudié la commande d'un système éolien à base d'une machine asynchrone doublement alimentée. Son étude porte sur une éolienne fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au rotor par un convertisseur MLI. Cette commande vectorielle (flux rotorique orienté) est basée sur trois régulateurs linéaires : Proportionnel Intégral, régulateur polynomial RST et régulateur Linéaire Quadratique Gaussien. Ensuite il a proposé une association énergie éolienne-solaire dont le but d'extraire un maximum de puissance du système éolien.

[13] : Il a traité une étude et une simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne, permettant de fournir au réseau une puissance constante, basée sur une unité de stockage d'énergie et une MADA. La commande de cette dernière est faite par un contrôle vectoriel indépendant des puissances active et réactive.

[33] : Ce mémoire présente une étude par simulation de la commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et à flux statorique orienté. Pour commander la machine, l'auteur a utilisé un régulateur de vitesse de type PI classique en premier lieu ; puis un régulateur PI flou.

[34] : cette thèse est un travail de modélisation, commande, observation et simulation des systèmes électriques multimachines. L'auteur a étudié la commande de trois types d'éolienne : MAS à vitesse fixe, à vitesse variable et MADA.

[48] : Elle a présentée une commande d'un aérogénérateur à vitesse variable et régulation pitch dans les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne pour la machine asynchrone à cage et la MADA.

VII. Modélisation de la turbine :

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière: chaque turbine à un comportement spécifique [22].

La turbine que nous allons étudier est une éolienne de 15 KW. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 6,8.

L'évolution du coefficient de puissance C_p dépend des caractéristiques aérodynamiques de la turbine éolienne ainsi que des conditions de fonctionnement [2]. Pour un angle de calage β fixe, le coefficient de puissance C_p peut être exprimé en fonction de rapport de vitesse λ (figure 1.8). Pour un angle de calage variable, le coefficient de puissance peut être exprimé en fonction de λ et β [41], [42], [43].

Pour notre cas les variations de C_p sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante [30]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.3 - 0.00167 \cdot \beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(10 - 0.3 \cdot \beta)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta \quad (1.1)$$

λ : le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur} R}{V} \quad (1.2)$$

β : Angle de calage (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation : Annexe I, figure A1.3.)

Où :

Ω_{tur} : Vitesse angulaire mécanique de la turbine (rad/s).

V : Vitesse du vent (m/s).

R : Rayon de la turbine ou longueur de pale en (m).

La caractéristique correspondante à ce polynôme est donnée sur la Figure (1.8) :

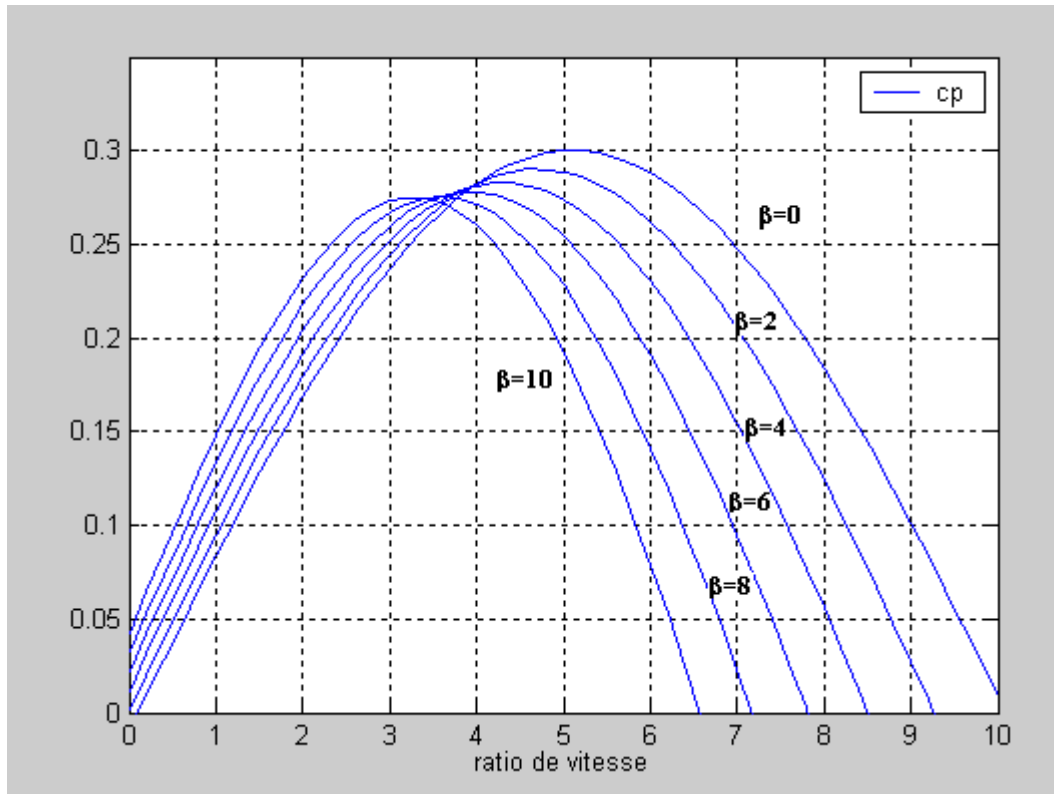


Figure (1.8) : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne pour différents angles de calage β ($^\circ$).

Sur la figure (1.8), plusieurs courbes sont distinguées mais nous nous intéressons à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 4,9, C_{pmax} = 0,3, \beta = 0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance (C_{p-max}) et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique dans le vent traversant, à une vitesse V traversant une surface $A = \pi R^2$ s'exprime par la relation suivante [9], [27], [48]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1.3)$$

L'aéroturbine ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance [48]. C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission calculée selon la relation [2], [9]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.4)$$

ρ : Densité de l'air 1.225 (kg.m⁻³) à la pression atmosphérique à 15°C.

Le couple C_{aer} produit par cette éolienne est alors déduit [17]:

$$C_{aer} = \frac{P_m}{\Omega_{tur}} = \frac{1}{2\Omega_{tur}} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.5)$$

Modèle du multiplicateur :

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn). Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/ mn) [34].

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{tur} \quad (1.6)$$

Où : Ω_{mec} est la vitesse angulaire de rotation de la génératrice (rad / s) ou (tr/mn).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [17], [34] :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{aer} \quad (1.7)$$

Où :

G : rapport de multiplication (-).

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m).

Modèle de l'arbre :

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante :

$$J_T \frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} = \sum C = C_T - C_{vis} \quad (1.8)$$

Le couple de frottement visqueux est modélisé par :

$$C_{vis} = f_T \Omega_{mec} \quad (1.9)$$

Où :

J_T : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$).

f_T : Coefficient de frottements visqueux total.

Le couple total de l'éolienne est donné par :

$$C_T = C_{mec} + C_{em} \quad (1.10)$$

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA (positif : car c'est un couple entraînant) [23], [31].

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (1.11)$$

La Figure (1.9) montre le synoptique global du modèle de l'éolienne :

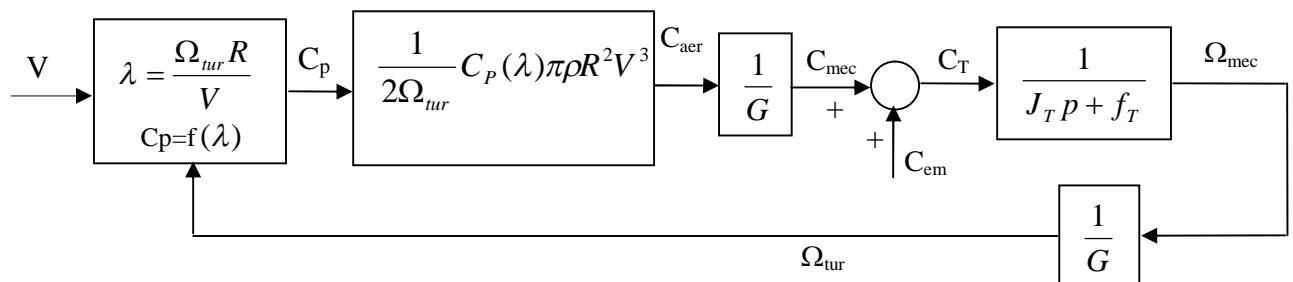


Figure (1.9) : schéma bloc d'une turbine éolienne

VIII. Simulation de la partie mécanique de l'éolienne :

Dans cette simulation on ne va pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement simuler la partie mécanique de l'éolienne. Ainsi on observe le couple produit à la sortie du multiplicateur et la puissance mécanique produite en fonction de l'évolution de la vitesse du vent et la vitesse mécanique de l'éolienne.

On suppose une diminution de la vitesse de vent (à $t=50s$) la vitesse du vent passe de 13m/s à 15m/s pour valider le modèle établi précédemment. Nous ferons une modification de la vitesse mécanique Ω_{mec} pour illustrer le fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Tous ces résultats sont présentés à la figure (1.10), pour une éolienne tripale de 15 KW dont la longueur d'une pale est de 3 mètres et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 6.8.

À $t=50s$: la vitesse du vent passe de 13(m/s) à 15(m/s).

Pour: $t < 40s$ et $t > 65s$: $\Omega_{mec} = 150$ (rd/s)

$40s < t < 65s$: $\Omega_{mec} = 170$ (rd/s)

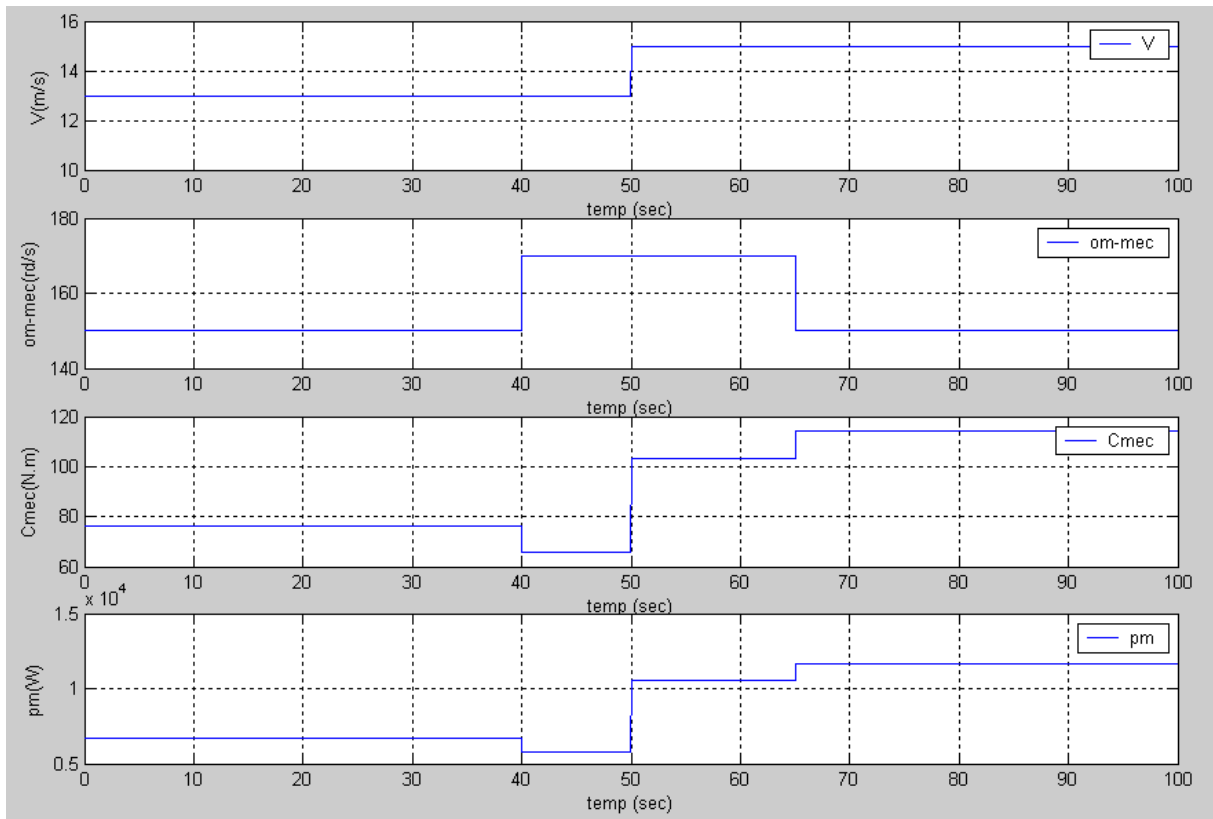


Figure (1.10) : Simulation de la partie mécanique de l'éolienne

D'après les résultats obtenus, on constate que la variation de la vitesse du vent et la vitesse mécanique influent sur l'évolution du couple et de la puissance mécaniques.

IX. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales de l'énergie éolienne. Ainsi que la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. Afin d'améliorer son rendement et diminuer le coût, nous avons choisit d'étudier une éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation. Ainsi nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec cette machine. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité pour être exploité en simulations.

Les simulations de la partie mécanique de l'éolienne ont montré l'évolution du couple et la puissance mécaniques produits en fonction de la variation de la vitesse du vent et la vitesse de mécanique de l'éolienne.

Ce chapitre est une partie essentielle qui va nous diriger vers la commande de la turbine éolienne en zone 2 (zone de l'extraction maximale de la puissance) qui va être étudié dans le chapitre suivant.

Chapitre deux

I. Introduction :

Après avoir modélisé la turbine éolienne et simulé la partie mécanique de cette dernière dans le chapitre précédent, on va présenter dans ce chapitre deux stratégies de commande de la turbine éolienne en zone 2 (zone d'extraction de la puissance maximale): commande directe de la vitesse ou commande avec asservissement de vitesse où on contrôle la vitesse mécanique par un régulateur PI et commande indirecte de la vitesse mécanique ou commande sans asservissement de vitesse où le couple électromagnétique est contrôlé de façon à poursuivre la courbe du rendement maximal. Les résultats de simulation de ces deux stratégies seront présentés et discutés.

II. Stratégies de commande :

Il existe deux stratégies de commande suivant les zones de fonctionnement de l'éolienne :

1. Action à charge partielle :

Elle est utilisée dans la zone 2 du fonctionnement de l'éolienne. L'objectif est de capter le maximum d'énergie possible. Un rendement énergétique maximal est assuré par un rendement aérodynamique maximal. Ce rendement dépend de la vitesse spécifique λ , c'est-à-dire du rapport entre la vitesse en bout de pale (proportionnelle à la vitesse de rotation de l'aéroturbine) et la vitesse du vent. Pour optimiser la capture de l'énergie contenue dans le vent dans cette zone de fonctionnement, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation du rotor s'adapte à la vitesse du vent afin que la vitesse spécifique soit optimale [48].

Lorsque l'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent, on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum (figure 2.1). Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum, technique que l'on retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [22], [23].

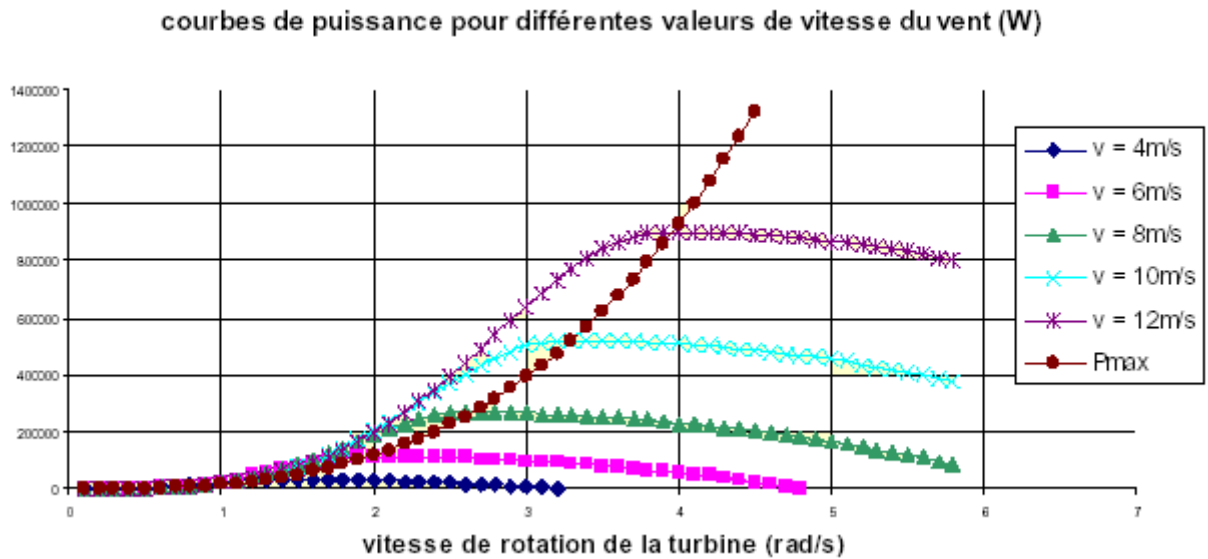


Figure (2.1) : Réseau de courbes puissance - vitesse de rotation de la turbine paramétré par la vitesse du vent.

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire pour générer $(\Omega_{tur})_{ref}$ (commande de rapport de vitesse, commande en puissance) ou elle n'est pas nécessaire pour générer $(\Omega_{tur})_{ref}$ (méthode du gradient). Les commandes utilisant la logique floue ne sont que le prolongement de ces différentes stratégies [22], [39].

1.1. Commande de rapport de vitesse λ :

L'objectif prioritaire de cette commande est de maintenir λ à sa valeur optimale $\lambda = \lambda_{opt}$. C'est pour cette valeur que le coefficient de puissance est égal à sa valeur maximale. Le but, comme pour les autres méthodes, est donc de rester constamment au point $(\lambda_{opt}, C_{p-max})$. Il s'agit donc de faire varier la vitesse de rotation de la turbine Ω_{tur} en fonction des variations de la vitesse du vent V . Ceci permet de travailler continuellement avec un rendement aérodynamique optimal. C'est un des avantages principaux des éoliennes à vitesse variable par rapport à celles fonctionnant à vitesse fixe [6], [22].

D'après la relation (1.2), il existe une relation très simple entre λ et la vitesse de rotation de la turbine:

$$\Omega_{tur} = \frac{\lambda}{R} V \quad (2.1)$$

Par conséquent, si la vitesse de vent évolue, on obtient la vitesse de référence avec la formule suivante :

$$\Omega_{tur-ref} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V \quad (2.2)$$

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre. De plus, la fiabilité de la méthode tient de la justesse de la courbe de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent [22].

1.2. Commande de puissance :

La base de la méthode est de comparer la puissance disponible P_{disp} et la puissance maximale P_{max} pour une vitesse de rotation Ω_{tur} donnée :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p(V, \Omega_{tur}) \cdot V^3 \quad (2.3)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot (C_p)_{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{tur}^3 \quad (2.4)$$

L'algorithme est le suivant :

On considère que l'on se trouve au point **A** (Figure 2.2). On suppose qu'à un instant t_1 , la vitesse du vent varie et passe de V_1 à V_2 . Le but est d'aller au point **B**, correspondant au nouveau point où la puissance est maximale.

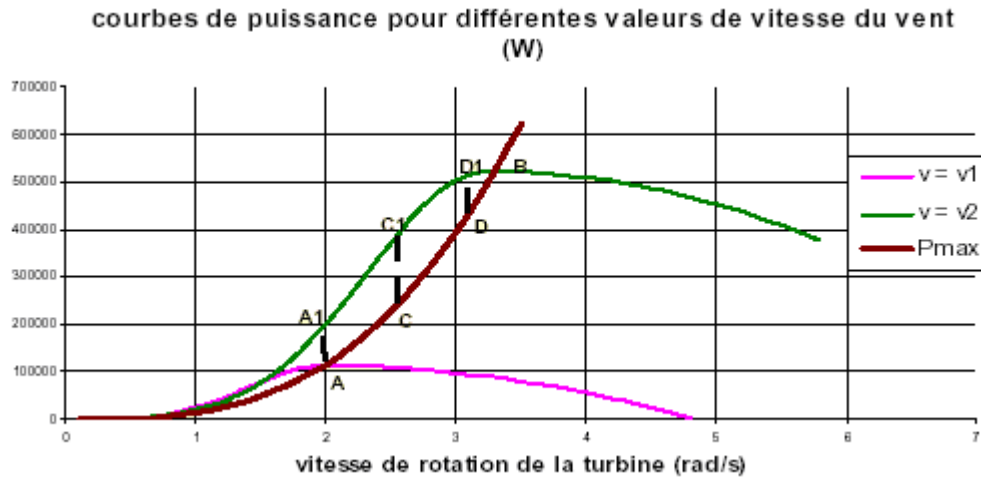


Figure (2.2) : Evolution du point de fonctionnement pour la commande en puissance

Etat 1 : point A (état initial)

Vitesse du vent : V_1

Vitesse de rotation de la turbine : Ω_{tur1}

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p \cdot (V_1, \Omega_{tur1}) \cdot V_1^3 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot (C_p)_{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{tur1}^3 = P_{max} \quad (2.5)$$

Etat 2 :

Vitesse du vent : V_2

Vitesse de rotation de la turbine : Ω_{tur1}

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p \cdot (V_2, \Omega_{tur1}) \cdot V_2^3 = P(A_1) \quad (2.6)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot (C_p)_{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{tur1}^3 = P(A) \quad (2.7)$$

On voit graphiquement que $P(A_1) > P(A)$. Il existe donc une puissance d'accélération qui va faire augmenter la vitesse de rotation Ω_{tur} . On se retrouve au point C.

Etat 3 : point C

Vitesse du vent : V_2

Vitesse de rotation de la turbine : Ω_c

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p \cdot (V_2, \Omega_c) \cdot V_2^3 = P(C_1) \tag{2.8}$$

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot (C_p)_{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_c^3 = P(C) \tag{2.9}$$

On voit graphiquement que $P(C_1) > P(C)$. La vitesse de rotation Ω_{tur} continue à augmenter. On se retrouve au point D.

Etat 4 : point B (état final)

Vitesse de rotation de la turbine : Ω_{tur2}

Graphiquement, on voit que P_{disp} et P_{max} convergent vers P_B .

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p \cdot (V_2, \Omega_{tur2}) \cdot V_2^3 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot (C_p)_{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_{tur2}^3 = P_{max} \tag{2.10}$$

1.3. Méthode du gradient :

Cette méthode vient de l’observation de la courbe donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, comme l’exemple donné (Figure 2.3). Pour agir sur la vitesse de rotation Ω_{tur} de la turbine, on s’intéresse au sens de variation de la grandeur $(dP/(d\Omega_{tur}))$. Ce gradient vaut 0 lorsque l’on a atteint le maximum de la courbe, point que l’on recherche. On le déduit à partir de l’équation (2.11) [22].

$$\frac{dP}{d\Omega_{tur}} = \frac{dP}{dt} \cdot \left(\frac{d\Omega_{tur}}{dt} \right)^{-1} \tag{2.11}$$

$\frac{d\Omega_{tur}}{dt}$	<0	>0
$\frac{dP}{dt}$	Augmenter Ω Cas 1	Diminuer Ω Cas 2
<0	Augmenter Ω Cas 1	Diminuer Ω Cas 2
>0	Diminuer Ω Cas 3	Augmenter Ω Cas 4

Tableau (2.1) : Tableau des commandes à effectuer.

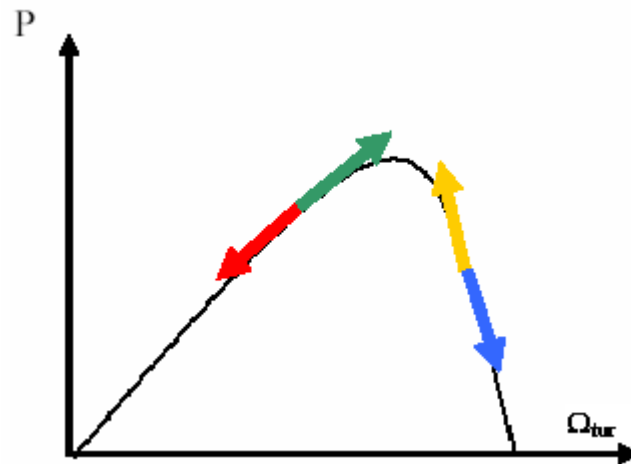


Figure (2.3) : Courbe de la puissance en fonction de la vitesse.

La commande C à appliquer s'écrit :

$$C = \frac{d\Omega_{tur}}{dt} \oplus \frac{dP}{dt} \quad (2.12)$$

1.4. Commande par logique floue :

Cette méthode est en fait une amélioration des méthodes où l'incrément (ou le décrétement) de vitesse est constant (méthode du gradient, commande en puissance). Par exemple, la méthode du gradient permet de savoir si, au pas suivant, il faut augmenter ou diminuer la référence de vitesse. Cette variation (positive ou négative) $\Delta\Omega_{tur}$ est constante, choisie de façon à trouver un compromis entre une recherche rapide de l'optimum et des oscillations faibles autour de cet optimum en régime établi. La commande par logique floue reprend les bases de la méthode du gradient pour savoir dans quelle direction aller, mais avec une variation de vitesse de référence $\Delta\Omega_{tur}$ [22].

Autres méthodes :

On peut citer deux autres procédés :

- Une méthode dérivée de celle du gradient, en travaillant directement sur la courbe $C_p(\lambda)$ de la figure (2.3) et en proposant une méthode de recherche à pas adaptatif.
- Une méthode basée sur la théorie des modes glissants, donnant des résultats intéressants au prix de calculs mathématiques importants.

2. Action en pleine charge (contrôle de l'angle de calage) :

En charge totale, la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale (vitesse du vent correspondante à la puissance nominale). L'objectif consiste à limiter la puissance extraite à la valeur correspondante à la puissance nominale de la machine en jouant sur l'angle de calage β des pales [22], [48]. Le mécanisme de positionnement des pales consiste à orienter les pales suivant un angle de référence $(\beta)_{ref}$ par l'intermédiaire d'un système hydraulique ou électrique. Le choix de cet angle provient en général d'une boucle externe visant à réguler soit la vitesse de la turbine, soit la puissance mécanique générée.

Comme le montre la figure (2.4), le mécanisme de contrôle de l'angle de calage calcule le couple C_β à appliquer sur les pales pour atteindre une référence $(\beta)_{ref}$ donnée, en prenant en compte le couple résistant C_r du au vent [22].

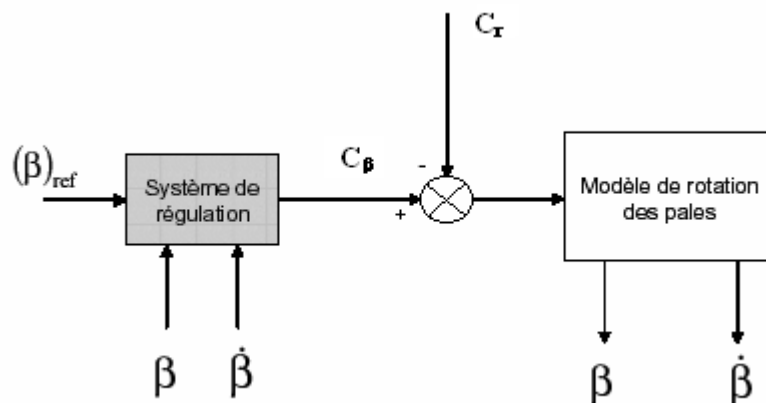


Figure (2.4) : Système de régulation des pales

III. Mise en œuvre de la commande :

Une thèse est largement insuffisante pour traiter tous les problèmes de commande liés à un tel système, ainsi on se limite à étudier la commande de l'aérogénérateur à vitesse variable dans la zone 2 ou le fonctionnement à charge partielle avec la technique MPPT afin d'assurer l'accroissement du rendement énergétique. C'est un fonctionnement relatif à des vitesses de vent comprises entre 2,5 m/s et 15 m/s et l'angle de calage est fixe. Pour cela on propose deux stratégies de commande de la turbine éolienne pour maximiser la puissance

extraite, ces deux stratégies de commande consistent à contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Tracking.

1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse (Commande Directe de Vitesse) :

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, on va utiliser un asservissement de vitesse.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice [29].

Un régulateur PI suffit pour répondre à ce cahier des charges.

On suppose le couple électromagnétique égale à sa référence:

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad (2.13)$$

D'après la relation (1.8), (1.9) et (1.10) :

$$\frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} = \sum C = \frac{1}{J_T} (C_{mec} + C_{em} - f\Omega_{mec}) \quad (2.14)$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em_ref} = C(p)(\Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.15)$$

Avec : $C(p)$ est le correcteur du système.

La vitesse mécanique de référence est exprimée d'après (1.6) par la relation suivante :

$$\Omega_{mec_ref} = G\Omega_{tur_ref} \quad (2.16)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du rapport de vitesse λ_{opt} (on fixe l'angle de calage β à 0°) d'après la courbe de la figure (1.8).

D'après (2.2), on a :

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \tag{2.17}$$

Finalement on obtient le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique présenté sur la figure (2.5) :

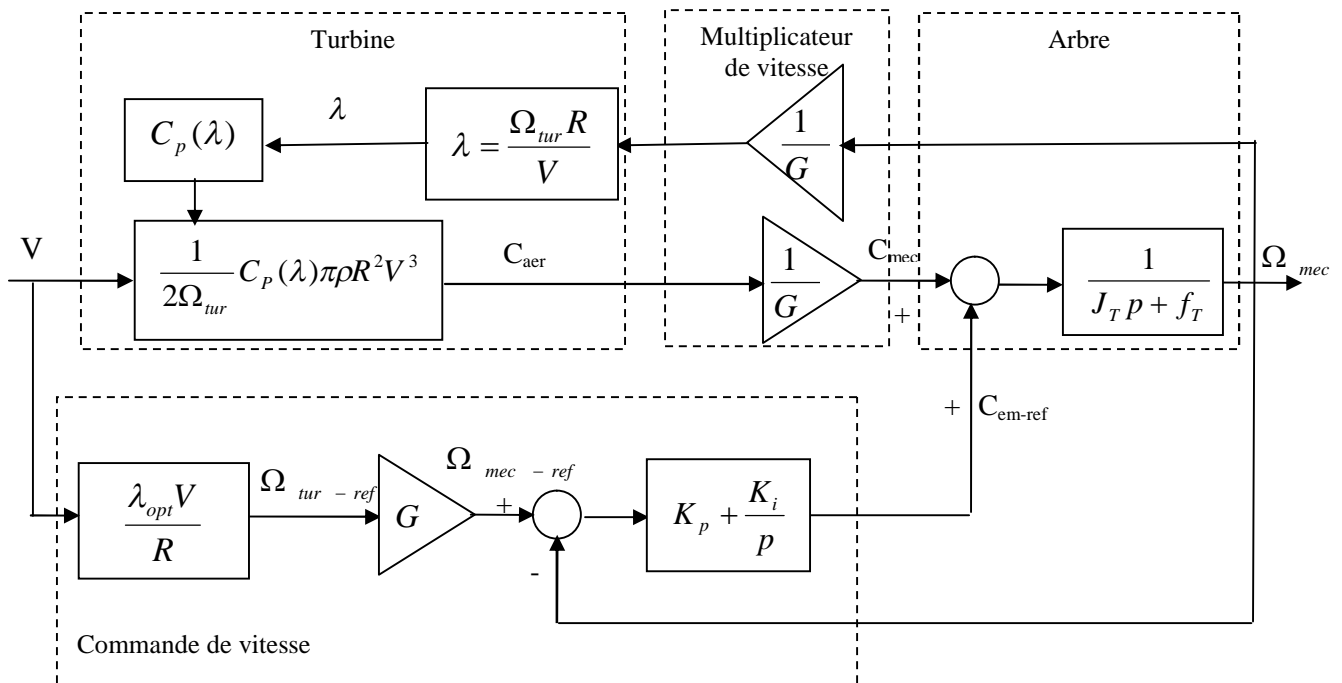


Figure (2.5): schéma bloc de la commande de vitesse d'une turbine éolienne

- Calcul du correcteur de la vitesse de la turbine :

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par:

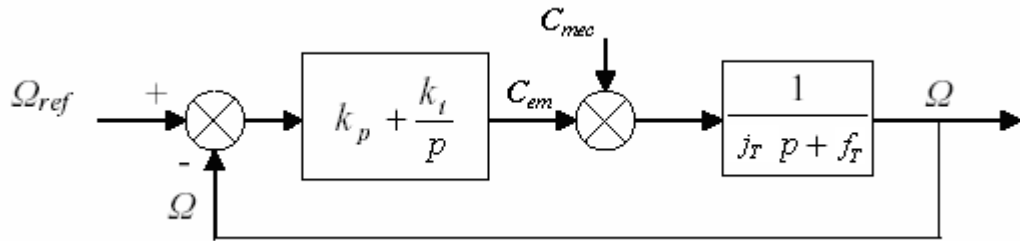


Figure (2.6) : Régulation de la vitesse.

On propose un correcteur PI, sa fonction de transfert est donnée par:

$$\left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) = \frac{K_p}{p} \left(p + \frac{K_i}{K_p}\right) \quad (2.18)$$

On suppose que la perturbation est nulle:

$$C_{mec}=0 \quad (2.19)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{p} \left(p + \frac{K_i}{K_p}\right) \left(\frac{1}{J_T p + f_T}\right) \quad (2.20)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{K_p \left(p + \frac{K_i}{K_p}\right)}{J_T p^2 + (f_T + K_p)p + K_i} \quad (2.21)$$

La $FTBF_{\Omega}$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) p + 1 \quad (2.22)$$

Alors :

$$\frac{J_T}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (2.23)$$

$$\frac{f + K_p}{K_i} = \frac{2\zeta}{\omega_0} \quad (2.24)$$

Alors :

$$K_i = J_T \cdot \omega_0^2 \quad (2.25)$$

$$K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_0} - f_T \quad (2.26)$$

ζ : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimal on choisit le coefficient d'amortissement $\zeta=0.7$ [15], [38].

Le temps de réponse à 5% est donné par [15], [28]:

$$t_r = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (2.27)$$

On prend le temps de réponse $\frac{1}{2}$ de τ_m pour assurer la rapidité du correcteur avec :

$$\tau_m = \frac{J_T}{f_T} \quad (2.28)$$

τ_m : Constante de temps du système à régler.

Alors :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi(\tau_m / 2)} \quad (2.29)$$

Enfin on peut déduire les valeurs de K_i et K_p .

Remarque :

On doit augmenter K_i pour atténuer l'action du couple éolien C_{mec} .

2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse : (Commande Indirecte De Vitesse)

Une mesure erronée de la vitesse conduit forcément à une dégradation de la puissance captée selon la stratégie de commande précédente. Dans ce paragraphe on présente une méthode de maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse (ou commande indirecte de vitesse). Elle est illustrée sur la figure (2.7). Elle est déduite de l'expression des équations aérodynamiques et mécaniques de l'éolienne sur le point de fonctionnement lié à un C_p maximum [48].

Lorsque l'éolienne fonctionne sur le point de fonctionnement optimal, alors :

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_{tur}}{V}, C_p = C_{p_max} \quad (2.30)$$

D'après (1.5) le couple capté par la turbine est donné par :

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V^3 \frac{C_{p_max}}{\Omega_{tur}} \quad (2.31)$$

En remplaçant la vitesse de vent par l'expression suivante:

$$V = \frac{R\Omega_{tur}}{\lambda_{opt}} \quad (2.32)$$

On obtient alors:

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{R^5}{(\lambda_{opt})^3} C_{p_max} \Omega_{tur}^2 = K_{opt_t} \Omega_{tur}^2 \quad (2.33)$$

Avec :

$$K_{opt_t} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{R^5}{(\lambda_{opt})^3} C_{p_max} \quad (2.34)$$

On constate que sur le point de fonctionnement optimal, le couple aérodynamique est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de l'éolienne [48].

D'après la relation (1.8), (1.9) et (1.10), on a :

$$J_T \frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} = C_{em} + C_{mec} - f_T \Omega_{mec} \quad (2.35)$$

En réécrivant cette équation en régime permanent, on obtient [30]:

$$0 = C_{em} + C_{mec} - f_T \Omega_{mec} \quad (2.36)$$

Donc :

$$C_{em} = -C_{mec} + f_T \Omega_{mec} \quad (2.37)$$

On remplaçant l'expression (1.7) de C_{mec} dans cette équation :

$$C_{em} = -\frac{C_{aer}}{G} + f_T \Omega_{mec} \quad (2.38)$$

Soit encore :

$$C_{em} = -\frac{K_{opt-t}}{G} \Omega_{tur}^2 + f_T \Omega_{mec} \quad (2.39)$$

Avec :

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.40)$$

Finalement, on obtient l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em}^* = -\frac{K_{opt-t}}{G^3} \Omega_{mec}^2 + f_T \Omega_{mec} = -K_{opt} \Omega_{mec}^2 + f_T \Omega_{mec} \quad (2.41)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{K_{opt-t}}{G^3} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{R^5}{(\lambda_{opt})^3 G^3} C_{P-max} \quad (2.42)$$

C'est cette expression qui mène à la commande illustrée sur la figure (2.7), où le couple électromagnétique de référence est généré de sorte à suivre la courbe de rendement maximal.

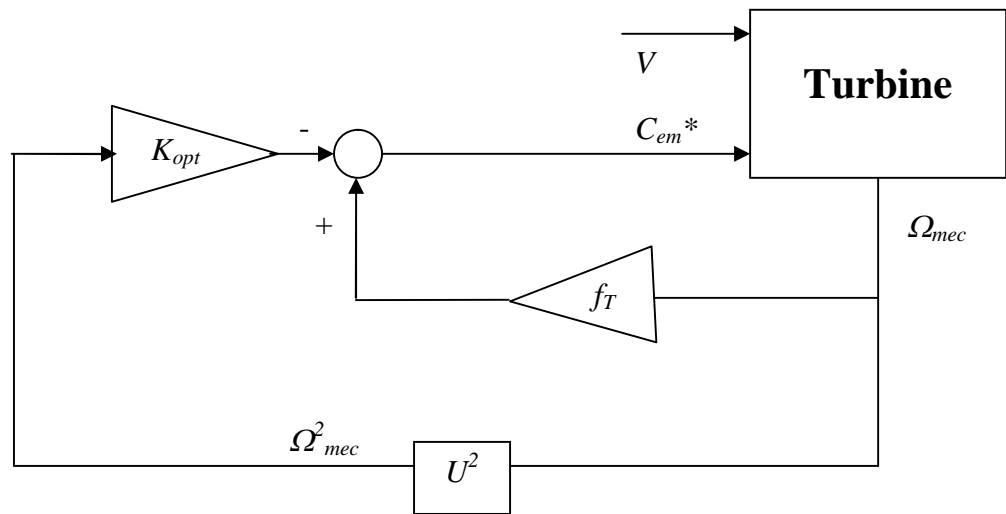


Figure (2.7) : Commande Indirecte de la Vitesse

Remarque :

Un des inconvénients de cette méthode est que K_{opt} dépend de paramètres pouvant légèrement varier dans le temps, tel que f_T , ρ , λ_{opt} et C_{p_max} .

L'inconvénient principal est tout de même que la dynamique du système en boucle fermée ne compense pas la dynamique du système mécanique, ce qui conduit à une réponse relativement lente du système par rapport à des variations du vent. En effet C_{em}^* est généré par l'intermédiaire de Ω_{mec} qui ne prend en compte les changements de Ω_{tur} , qu'avec un retard dépendant du comportement dynamique du système mécanique.

IV. Simulation de la commande de la turbine éolienne :

1. Simulation de la commande directe de la vitesse mécanique:

Après avoir simulé le schéma de la commande directe de la vitesse de la figure (2.5) du 1^{er} chapitre sous *MATLAB_SIMULINK* avec les paramètres donnés en annexe 2, nous avons obtenu les résultats illustrés sur la figure (2.8).

À $t=60$ la vitesse de vent passe de 12.5m/s à 14m/s.

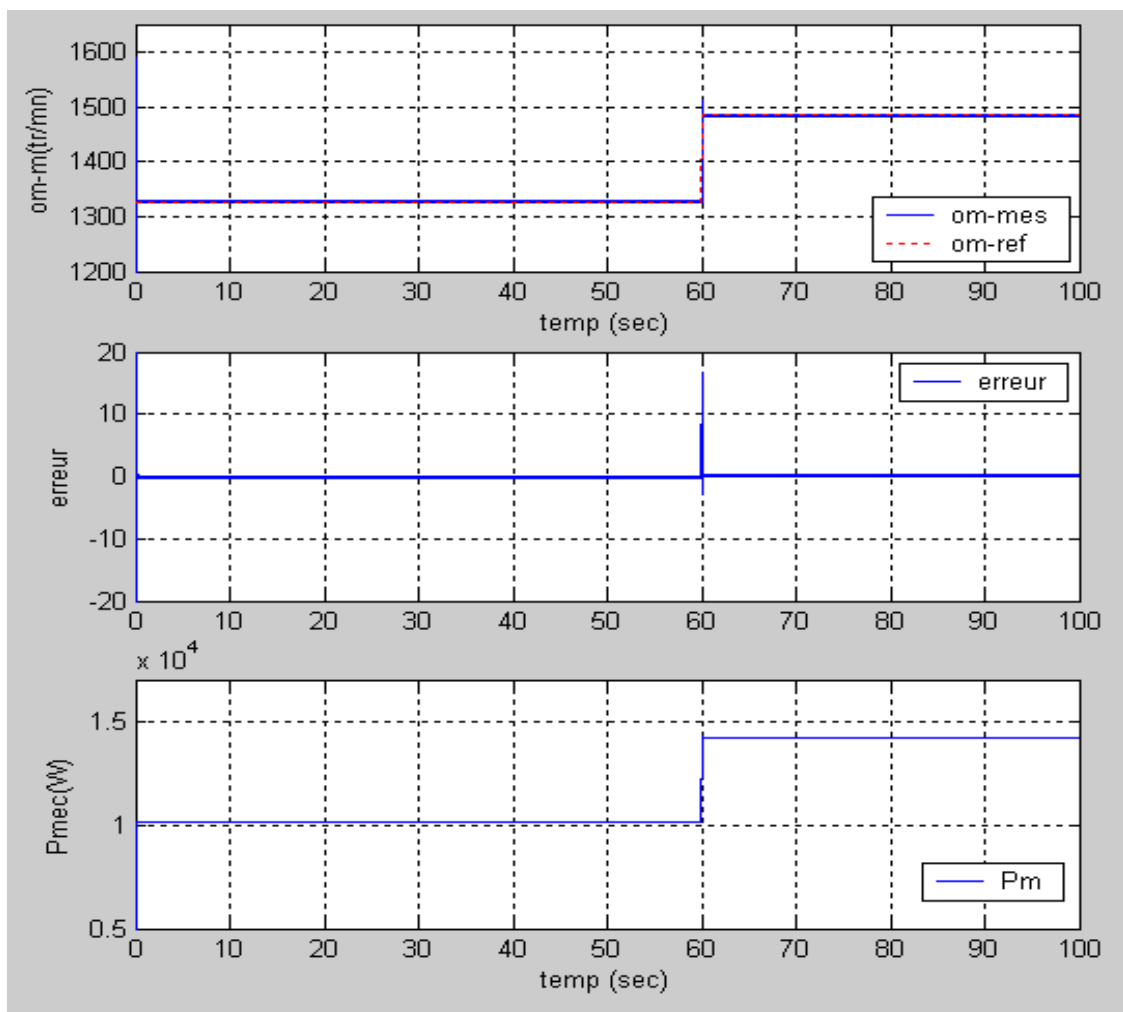


Figure (2.8) : Résultat obtenu avec la structure de Commande Directe de Vitesse avec le régulateur PI

D'après les résultats obtenus avec la Commande directe de vitesse, on observe clairement que l'erreur entre la vitesse mécanique mesurée et la vitesse mécanique de

référence est presque nulle surtout en régime permanent où les deux vitesses sont confondues. Ils montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent ce qui implique un bon rendement énergétique.

2. Simulation de la commande Indirecte de vitesse mécanique:

Après avoir simulé le schéma de la commande Indirecte de la vitesse de la figure (2.7) du 1^{er} chapitre sous *MATLAB_SIMULINK* avec les paramètres donnés en annexe 2, nous avons obtenu les résultats illustrés sur la figure (2.9).

À $t=60s$ la vitesse de vent passe de 12.5m/s à 14m/s.

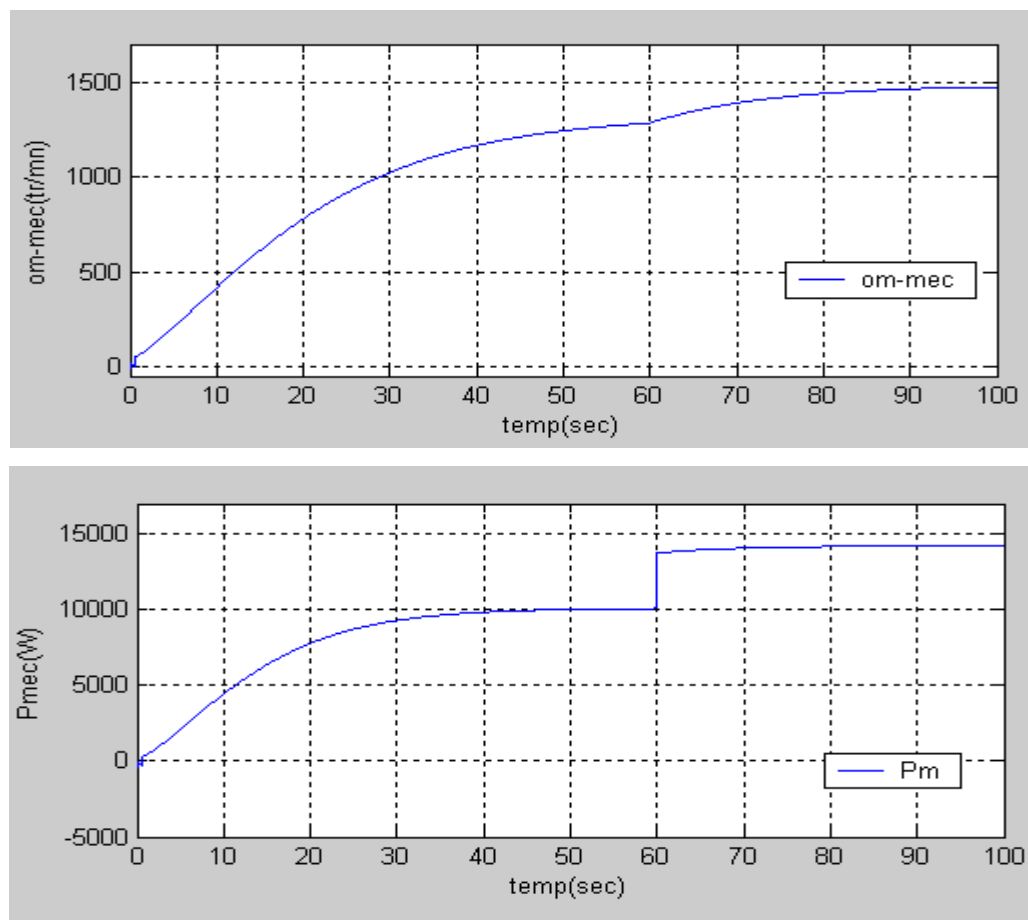


Figure (2.9) : résultats obtenus avec la structure de Commande Directe de Vitesse mécanique

Les résultats correspondant à la commande Indirecte de la vitesse mécanique montrent que les variations de la vitesse mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent mais avec une réponse relativement lente du système par rapport à ces variations. L'énergie

captée par cette méthode est presque la même avec la commande directe de vitesse mais avec un retard dans la celle –ci. Ce qui implique que le rendement de la CIV atteinte de temps en temps des rendements inférieurs à 95%.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux structures de commande de l'éolienne en zone 2 car c'est la zone d'extraction maximale de la puissance. La vitesse de rotation peut être contrôlée directement, par une Commande Directe de Vitesse (CDV) avec un régulateur PI, où on cherche à faire varier la vitesse de rotation de la turbine par l'intermédiaire de celle de la MADA pour que le coefficient de puissance soit toujours maximal. On optimise ainsi le rendement énergétique du système (puissance extraite du vent), ou indirectement par une Commande Indirecte de Vitesse (CIV) où le couple électromagnétique est contrôlé de façon à poursuivre la courbe du rendement maximal. L'angle de calage est maintenu à sa valeur constante optimale tout le long de la zone.

Les essais de simulation faits sur la commande la vitesse mécanique de l'éolienne en zone 2 nous ont permis de comparer les deux méthodes : Commande Directe de Vitesse et Commande Indirecte de Vitesse. Or la première méthode permet une meilleure poursuite de la vitesse de rotation optimale, et donc l'obtention d'un meilleur rendement aérodynamique que la deuxième.

Chapitre trois

I. Introduction :

Les génératrices asynchrones sont largement répondues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, particulièrement dans des régions isolées. Afin de permettre une production d'électricité optimale pour différentes vitesses de vent et de vitesses de l'éolienne, nous avons choisit la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui présente plusieurs avantages en comparaison avec la machine à cage. Elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, de plus le contrôle des tensions rotoriques nous permet de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

La première étape de la synthèse d'une loi de commande est la modélisation du procédé à contrôler (MADA). Le modèle doit être capable de représenter fidèlement les différentes dynamiques présentées. Cette modélisation est établie en termes d'équations différentielles et est basée essentiellement sur la transformation de *Park*. Puisque les machines asynchrones dans les systèmes industriels ne sont pas directement alimentées par le réseau électrique, un onduleur de tension est prévu.

Les lois de commande scalaires sont encore utilisées, mais la commande vectorielle permet d'améliorer les performances de cette machine (plus de dynamique, robustesse par rapport aux perturbations externes,...) [33].

Le comportement de la machine asynchrone est celui d'un système non linéaire. Sa dynamique est rapide, ses paramètres varient pendant le fonctionnement et elle est sujette à des perturbations inconnues. Toutes ces caractéristiques rendent la commande de cette machine complexe. Par conséquent, la poursuite de trajectoires prédéterminées, la robustesse aux variations des paramètres et le rejet de perturbations inconnues avec une réponse performante sont les objectifs à satisfaire lors d'une mise en oeuvre d'une stratégie de commande. On propose alors la synthèse d'une loi de commande linéaire (commande vectorielle) par l'hypothèse d'orientation du flux [34].

II. Présentation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation :

1. Constitution de la MADA:

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé (figure 3.1). Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant: la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [11].

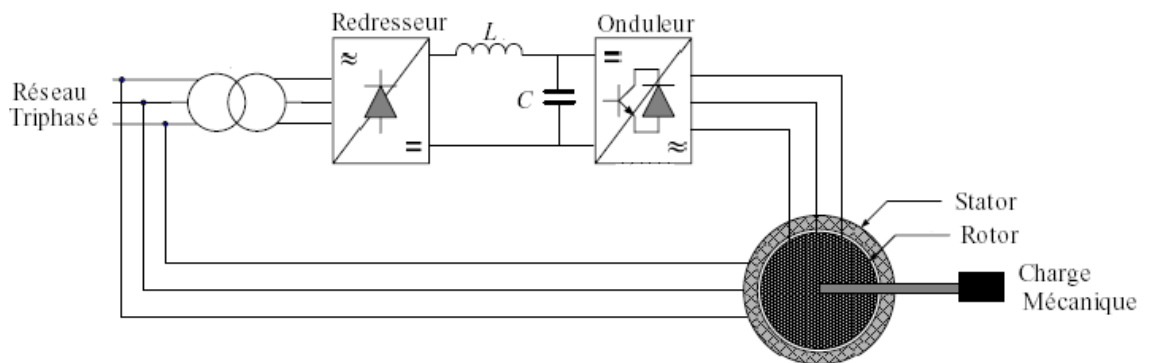


Figure (3.1): Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique

2. Fonctionnement de la MADA:

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [7],[13]. Notons

qu'en fonctionnement génératrice la puissance P_s absorbée par le stator et la puissance du réseau sont négatives [11].

2.1 fonctionnement en mode générateur hyposynchrone :

La figure (3.2) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone a cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [2], [7], [13].

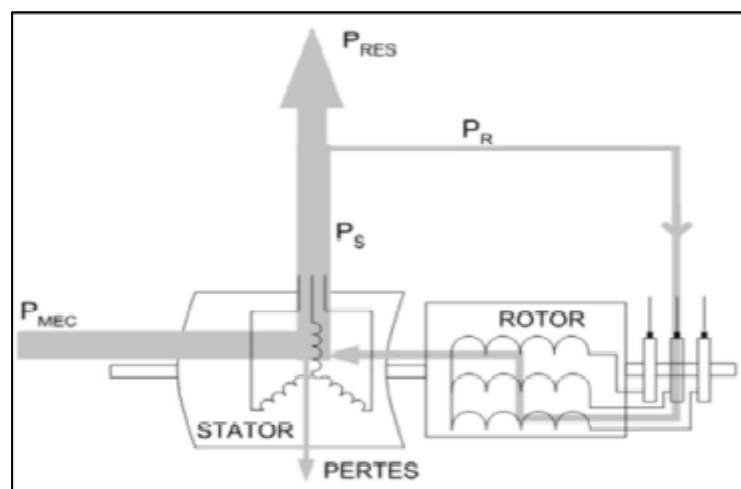


Figure (3.2) : fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

2.2 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone :

La figure (3.3) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor [2], [7], [13].

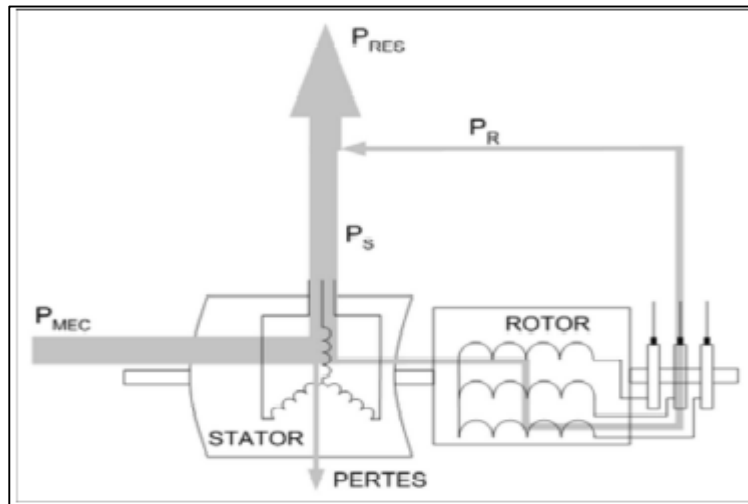


Figure (3.3) : fonctionnement en mode générateur hypersynchrone.

2.3 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone :

La figure (3.4) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor [2], [13].

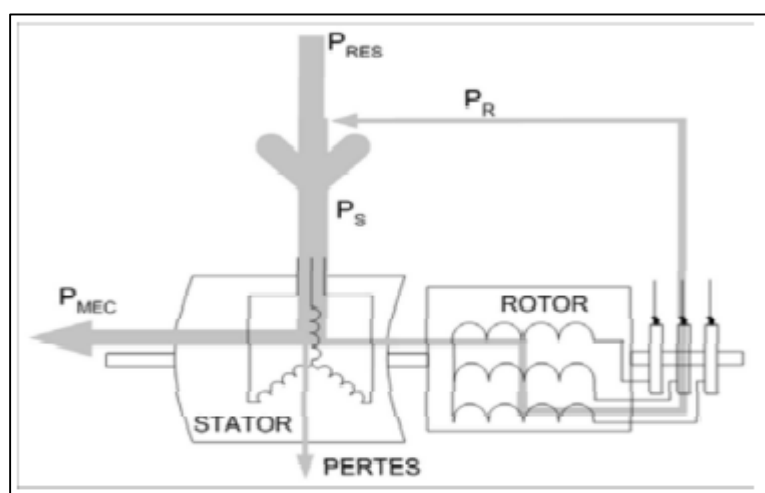


Figure (3.4) : fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

2.4 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone :

La figure (3.5) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

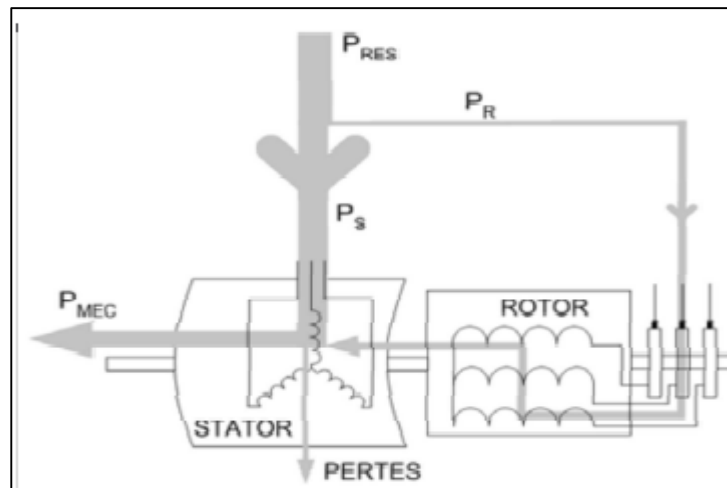


Figure (3.5) : fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.

III. Avantages et inconvénients de la MADA :

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

1. Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- 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.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [2], [20], [33], [36].

2. Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer.

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multiconvertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Nous utilisons un nombre des convertisseurs (parfois on utilise deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (toujours un redresseur et un onduleur).

- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [2], [20], [33], [36].

IV. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent [2], [36].

1. Hypothèses :

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [2]. Elles sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande, mais elles écartent le modèle obtenu de la réalité du processus à représenter [26] :

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré [2], [3], [7].

2. Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation:

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent [12] :

$$\begin{cases} [V_s]_3 = R_s [I_s]_3 + \frac{[d\phi_s]_3}{dt} \\ [V_r]_3 = R_r [I_r]_3 + \frac{[d\phi_r]_3}{dt} \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

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

l_s , l_r : Inductances propres statorique et rotorique.

M_s , M_r : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.

M_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$\begin{cases} [\phi_s]_3 = L_s [I_s]_3 + M [I_r]_3 \\ [\phi_r]_3 = M [I_s]_3 + L_r [I_r]_3 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (3.3)$$

Où :

L_s , L_r et M représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et magnétisante exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

3. Modèle de la MADA dans le référentiel de Park :

En utilisant la transformée de Park modifiée (Concordia et Park : voir annexe 1) pour la conservation de puissance sur les flux et les tension des équations de la génératrice asynchrone à double alimentation, nous obtenons le modèle diphasé de cette génératrice dans le référentiel d-q lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la MADA [2], [12], [13]. les courants sont en signe (-) pour avoir un fonctionnement génératrice de la MADA d'après [14], [36].

Equations électriques:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = -R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = -R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.4)$$

Equations des flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = -L_s I_{ds} - M I_{dr} \\ \phi_{qs} = -L_s I_{qs} - M I_{qr} \\ \phi_{dr} = -L_r I_{dr} - M I_{ds} \\ \phi_{qr} = -L_r I_{qr} - M I_{qs} \end{cases} \quad (3.5)$$

Equation mécanique:

$$C_{em} = C_r + j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (3.6)$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques :

$$\Rightarrow C_{em} = -\frac{pM}{L_s} (I_{dr} \phi_{qs} - I_{qr} \phi_{ds}) \quad (3.7)$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (3.8)$$

Après avoir présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère diphasé tournant (d-q), on fera maintenant la simulation d'une MADA fonctionnant en génératrice. La figure (3.6) présente le schéma bloc de cette machine présentée sous MATLAB-SIMULINK dont ces paramètres mécaniques sont donnés en annexe 4.

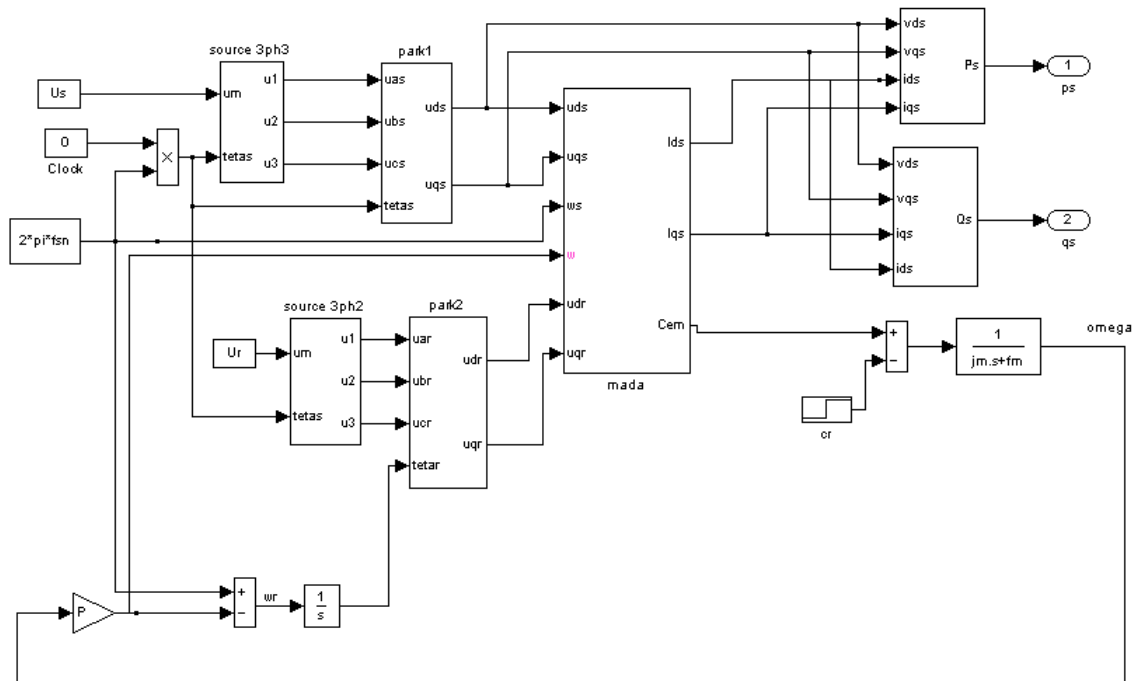


Figure (3.6) : Schéma bloc de la MADA en génératrice sans onduleur dans le référentiel (d-q)

V. Association de la MADA avec un onduleur à MLI:

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur (Figure 3.7), ce dernier a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées, parmi celle-ci, la modulation de largeur d'impulsions MLI triangulo-sinusoidal qui s'avère d'un grand intérêt pour la commande des machines électriques. En effet elle permet le réglage simultanément de la fréquence et de la tension, ainsi que de réduire ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants et par conséquent limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [2], [6] [24], [51].

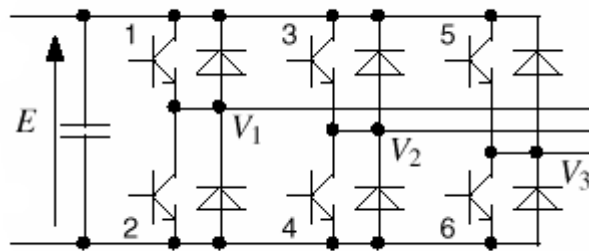


Figure (3.7): Onduleur MLI triphasé

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance) [6], [24].

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux (Figure 3.8) :

- ✚ Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- ✚ Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [24].

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [24].

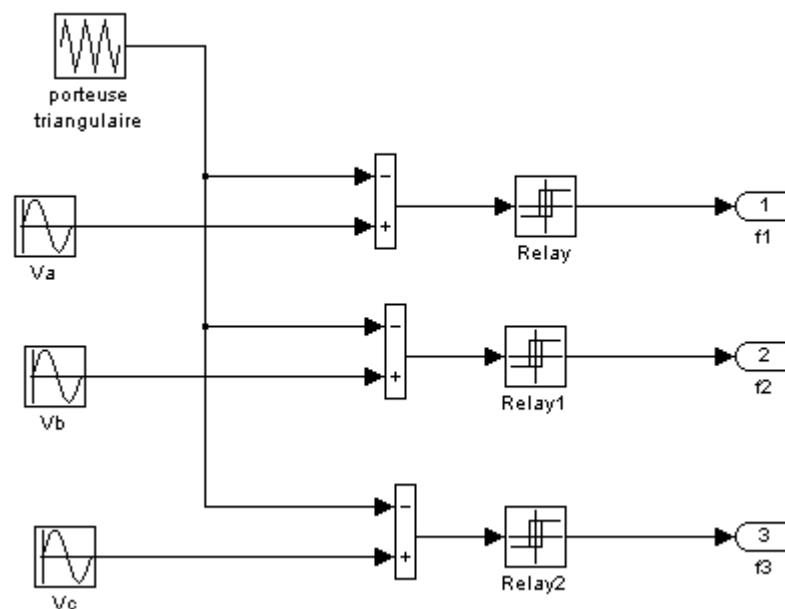


Figure (3.8): Génération des Signaux de commande MLI de l'onduleur

Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse 0, sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse [6], [25].

La figure (3.9) représente les deux signaux à comparer (modulante et porteuse).

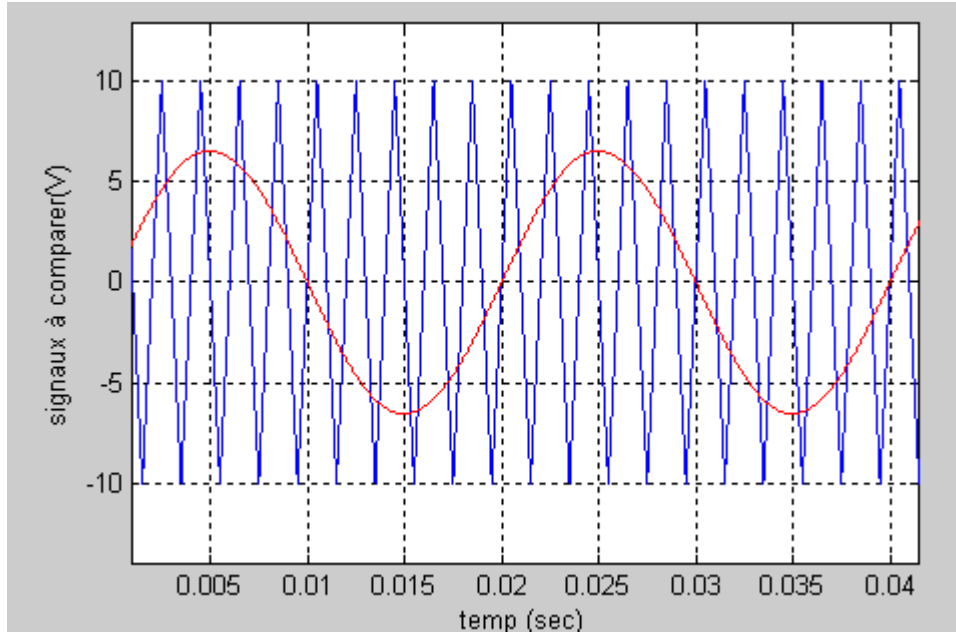


Figure (3.9): Allure des signaux modulés et porteuse.

Dans notre application, nous nous intéresserons au fonctionnement génératrice hyposynchrone, de façon à ne traiter le transfert de puissance rotorique dans une seule direction (réseau vers rotor). Le convertisseur côté réseau sera donc un simple redresseur unidirectionnel. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique.

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur. Celui-ci est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante [2], [17], [45], [51]:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} E \quad (3.9)$$

Où f_1 , f_2 et f_3 sont des fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur (1 lorsque l'interrupteur haut d'un bras de l'onduleur est fermé, 0 quand il est ouvert) et E est la tension du bus continu. Dans notre étude, côté rotor, nous nous limiterons à un transfert de puissance du réseau vers le rotor. Le bus continu est donc fixe et imposé par l convertisseur côté réseau sur lequel il n'y a pas de commande. Il fonctionne donc comme un simple redresseur [2], [45].

-L'indice de modulation « m » défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse (fréquence de découpage) à la fréquence f de la tension de référence [47] :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (3.10)$$

$$r = \frac{A_m}{A_p} < 1 \quad (3.11)$$

Avec :

A_m : Amplitude de tension du signal de référence (modulante).

A_p : amplitude de tension du signal de la porteuse.

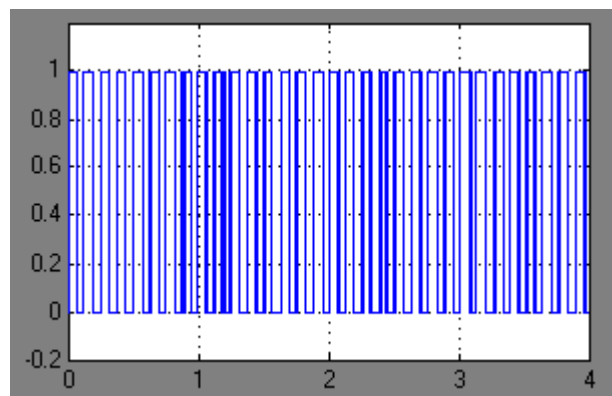


Figure (3.10): Signal de commande d'un interrupteur de l'onduleur MLI

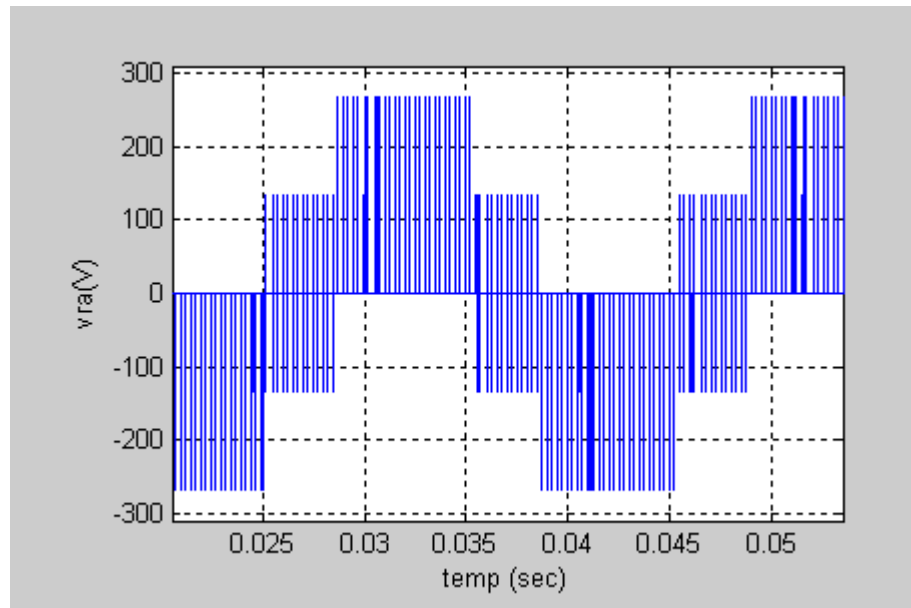


Figure (3.11): Tension d'une phase rotorique de la MADA associé à un onduleur MLI

Pour compléter l'étude théorique présentée précédemment, une simulation numérique est indispensable. Les programmes sont testés dans l'environnement *MATLAB-SIMULINK*. Pour les paramètres de la génératrice à double alimentation définis en Annexe. Les résultats obtenus sont illustrés dans La fin de ce chapitre, figures (3.15), (3.16), (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.21) et (3.22).

VI. Commande vectorielle de la MADA en puissances active et réactive:

La commande par orientation de flux (FOC) proposée par Blaschke en 1972, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. Elle a été ces dernières années la voie de recherche la plus importante et la mieux adaptée aux exigences industrielles. L'idée fondamentale de cette méthode est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Elle se base sur un contrôle effectif de l'état magnétique de la machine et du couple électromagnétique [5], [25], [40].

Le couple électromagnétique résulte une différence de produits de deux grandeurs, réalisés à partir des courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} et des flux statoriques ϕ_{ds} , ϕ_{qs} , comme le rappelle l'expression (3.7). Ainsi le simple choix du repère tournant de Park (d-q) sur Φ_s (orientation du flux statorique) ou Φ_r (orientation du flux rotorique), crée un découplage naturel des grandeurs d, q qui donne une réponse très rapide du couple et permet de

considérer, d'un point de vue de la conservation, la machine asynchrone comme l'association mécanique de deux moteurs à courant continu ; dans le premier ϕ_{ds} jouant le rôle du flux inducteur, I_{qr} celui du courant d'induit, respectivement ϕ_{qs} et I_{dr} dans le second. C'est le principe de la commande vectorielle [6], [10], [37], [33], [51].

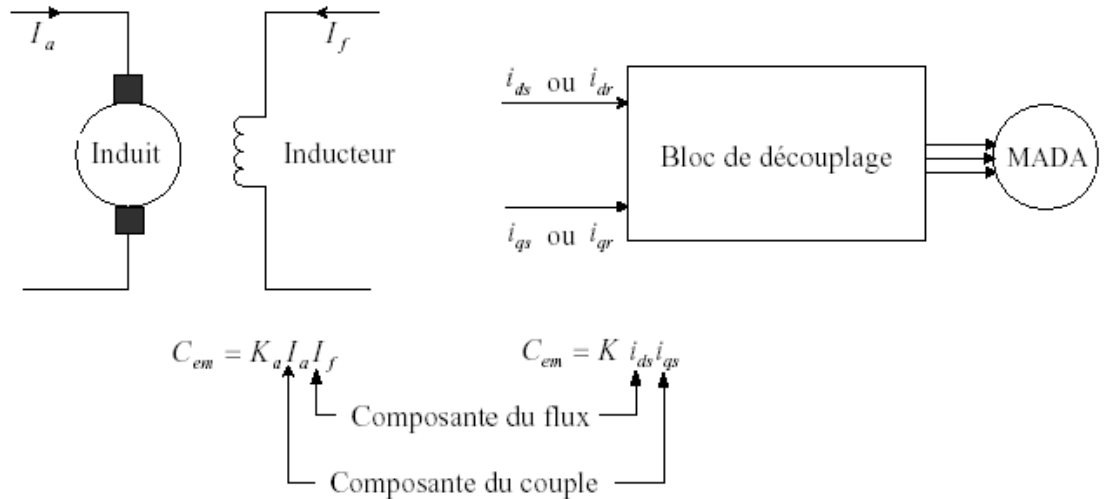


Figure (3.12) : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC [33]

Dans le présent travail, nous nous limiterons à l'utilisation de la méthode de commande vectorielle par orientation du flux statorique. Dans l'hypothèse où le flux ψ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q [2].

1. Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [13].

Pour une approche linéaire classique, la difficulté réside dans la non linéarité en sortie, la commande vectorielle contourne cette difficulté par l'orientation du flux statorique suivant

l'axe d du référentiel tournant [2], [25] (figure 3.13). D'après [2], [8], [9] et [38] Cette orientation conduit à :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad \text{et} \quad \Phi_{qs} = 0 \tag{3.12}$$

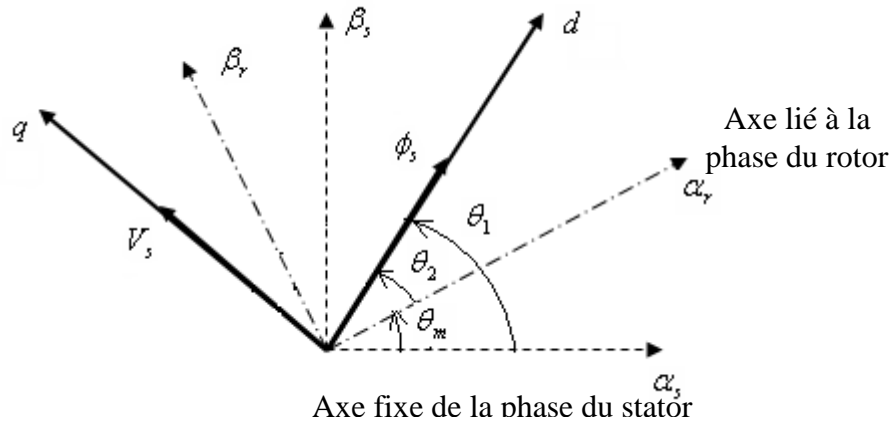


Figure (3.13) : Orientation du flux statorique sur l'axe d

Le couple électromagnétique de l'équation (3.7) s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \Phi_{ds}) \tag{3.13}$$

Et l'équation des flux statoriques d'après (3.5) devient :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_s = -L_s I_{ds} - M I_{dr} \\ 0 = -M I_{qr} - L_s I_{qs} \end{cases} \tag{3.14}$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (3.13) montre que le couple électromagnétique C_{em} produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique I_{qr} [2],[13].

De plus, la résistance statorique peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes [7],[14].

Ainsi on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3.15)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant (donc sa dérivée est nulle) [2], [38], on a :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (3.16)$$

Ainsi les courants statoriques sont exprimés en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.17)$$

D'après les équations (3.15) et (3.16) on a :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.18)$$

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (3.17) les flux rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = -(L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = -(L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad (3.19)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

Les expressions des flux rotoriques d'axe d et q de l'équation (3.19) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (3.4), on obtient alors:

$$\begin{cases} V_{dr} = -R_r I_{dr} - (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = -R_r I_{qr} - (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (3.20)$$

Où : $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$ représente le glissement de la génératrice.

Avec : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ le coefficient de dispersion.

Finalement on obtient :

$$\begin{cases} I_{dr} = \left(\frac{-1}{R_r + pL_r \sigma} \right) \left[V_{dr} - (g\omega_s L_r \sigma) I_{qr} \right] \\ I_{qr} = \left(\frac{-1}{R_r + pL_r \sigma} \right) \left[V_{qr} + (g\omega_s L_r \sigma) I_{dr} - g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \right] \end{cases} \quad (3.21)$$

Remarque :

Le troisième terme dans les deux équations (3.20) peut être négligé car son influence est très faible [2], [35].

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent [2], nous pouvons donc écrire:

$$\begin{cases} V_{dr} = -R_r I_{dr} + g\omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} = -R_r I_{qr} - g\omega_s L_r \sigma I_{dr} + g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (3.22)$$

D'après les équations (3.8), (3.16) et (3.17):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -\frac{V_s \psi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3.23)$$

A partir des équations précédentes nous pouvons élaborer un schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler :

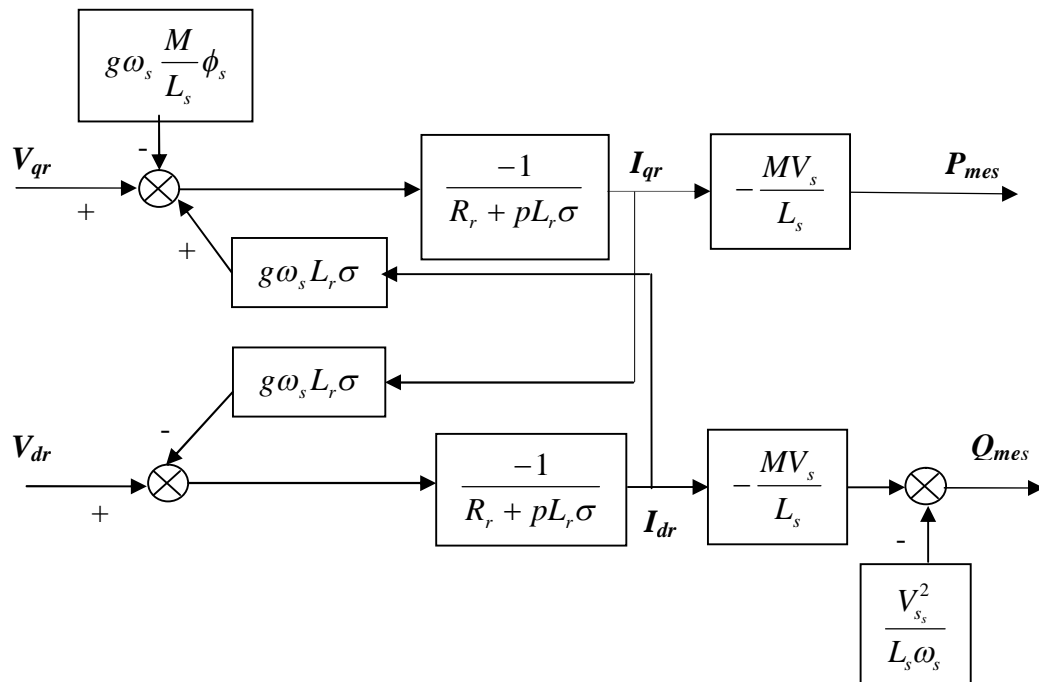


Figure (3.14) : schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique.

VII. Résultat de Simulation de la MADA :

1. Simulation d'une MADA relié directement au réseau triphasé (sans onduleur):

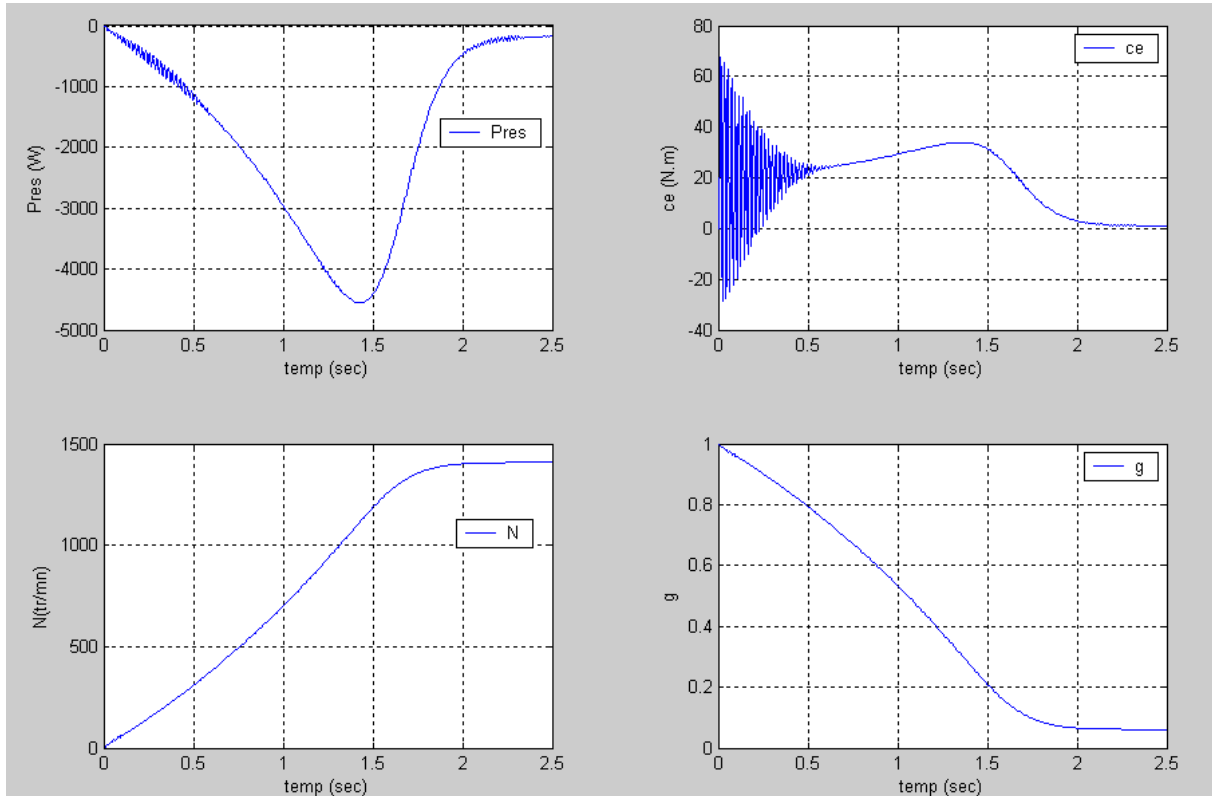


Figure (3.15) : Résultat de simulation d'une MADA en mode génératrice relié directement au réseau triphasé

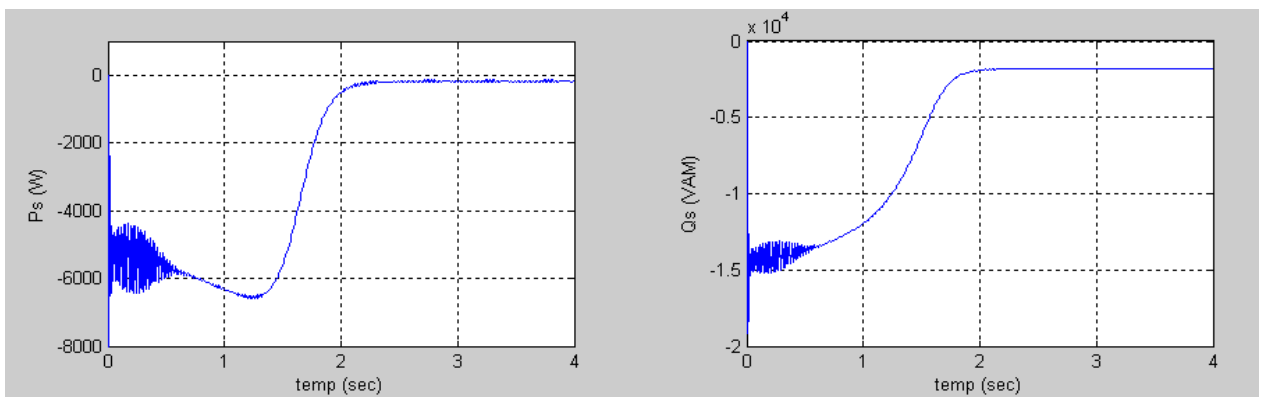


Figure (3.16): Résultat de simulation de P_s et Q_s d'une MADA relié directement au réseau triphasé

2. Simulation d'une MADA associée à un onduleur MLI:

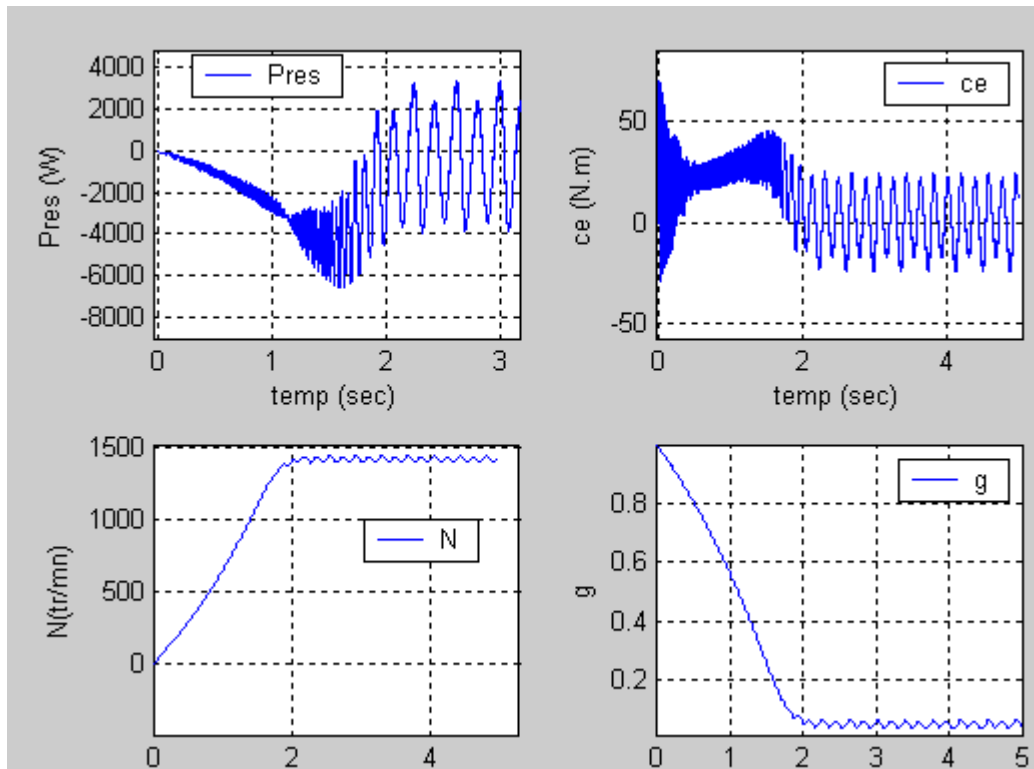


Figure (3.17) : Résultat de simulation d'une MADA en mode génératrice associée à un onduleur MLI

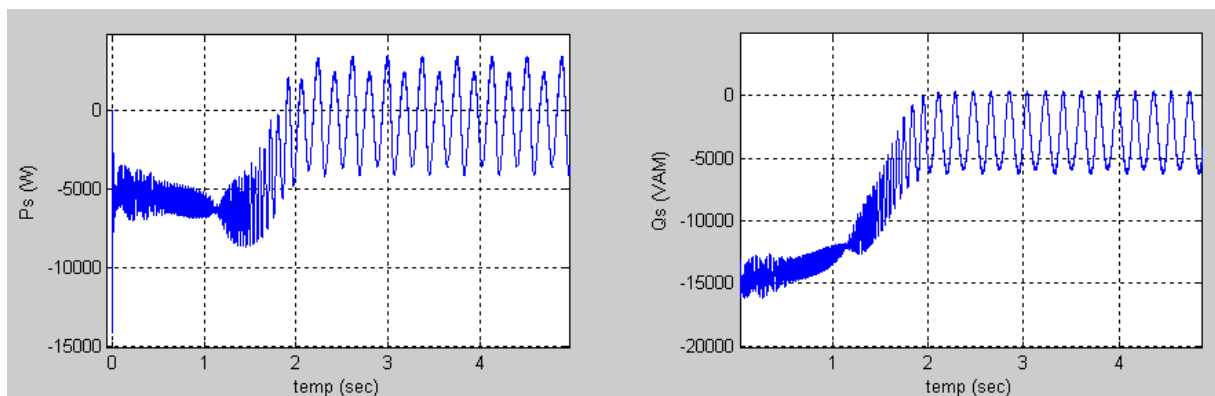


Figure (3.18): Résultat de simulation de P_s et Q_s d'une MADA associée à un onduleur MLI

3. Simulation d'une MADA relié directement au réseau triphasé avec application d'une charge :

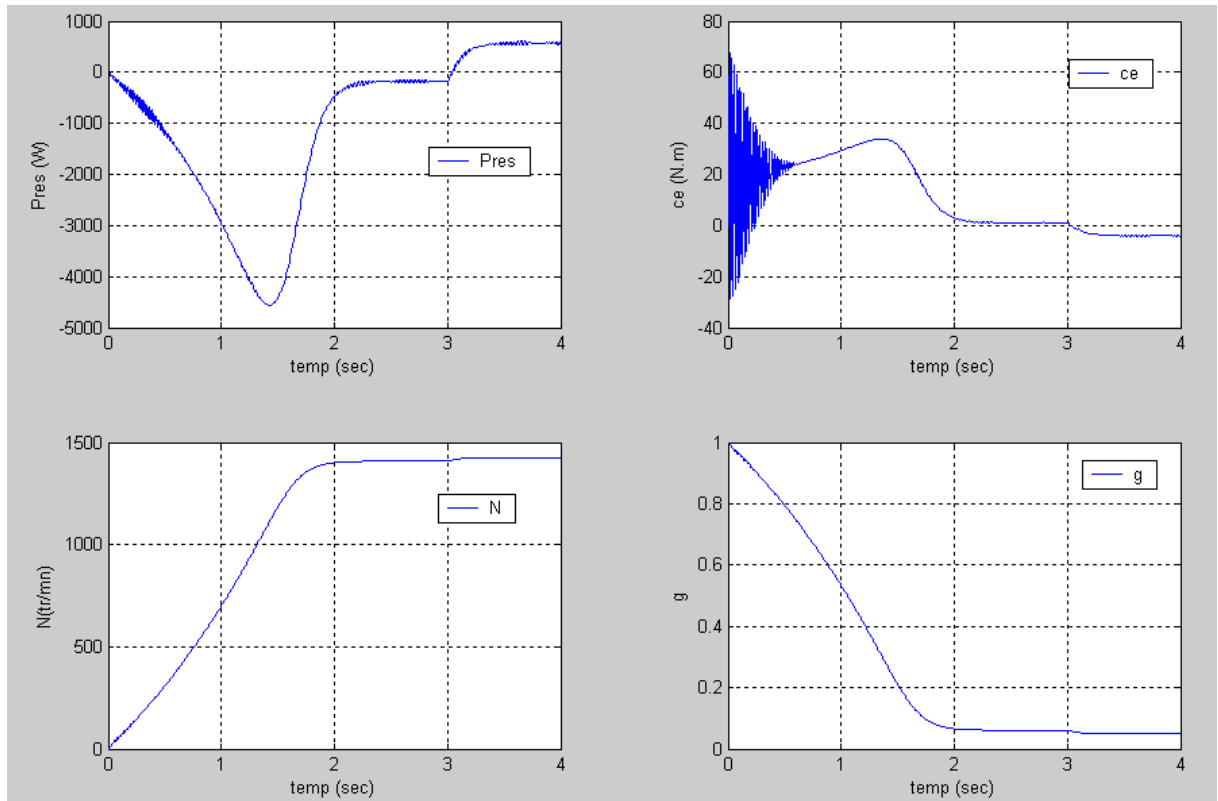


Figure (3.19) : Résultat de simulation d'une MADA en génératrice (sans onduleur) avec application d'un couple de charge $C_r=10N.m$ à $t = 3s$

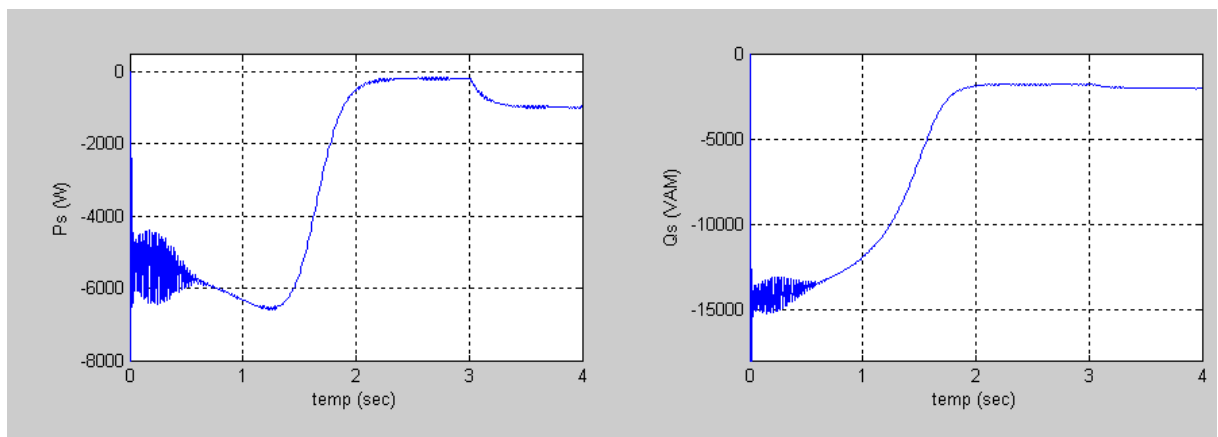


Figure (3.20) : Résultat de simulation de P_s et Q_s d'une MADA (sans onduleur) avec $C_r=10N.m$ à $t = 3s$

4. Simulation d'une MADA associée à un onduleur avec application d'une charge :

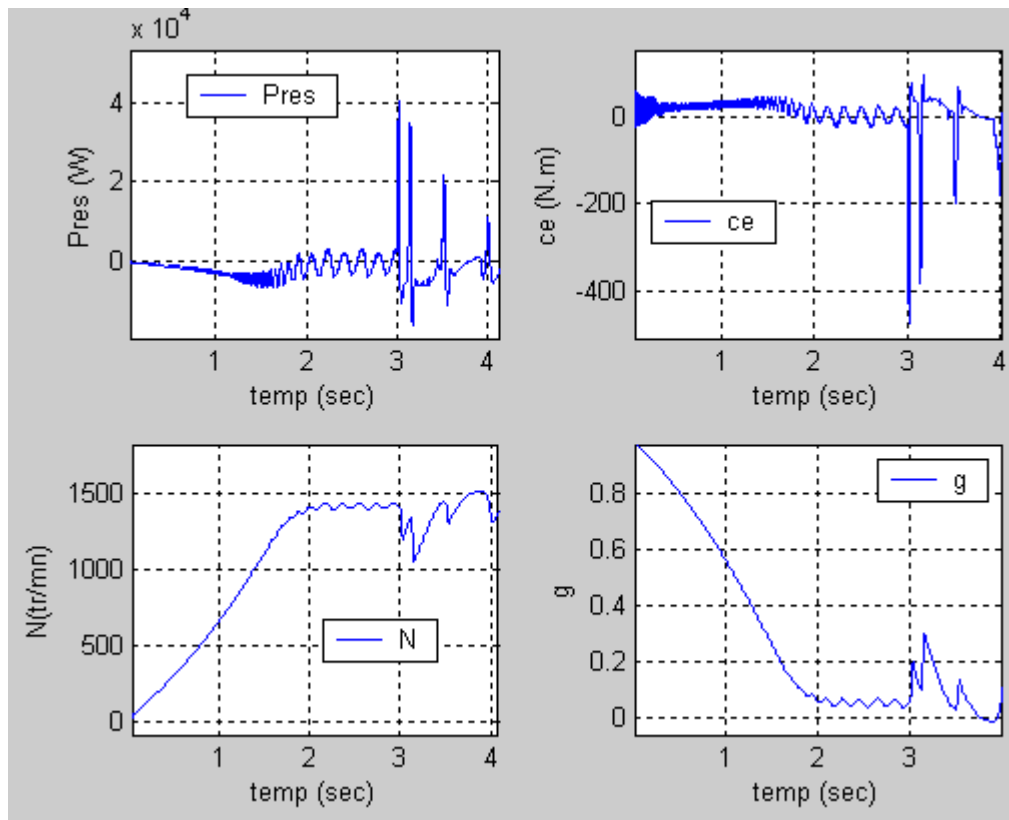


Figure (3.21) : Résultat de simulation d'une MADA en génératrice associée à un onduleur à MLI avec $C_r=10N.m$ à $t = 3s$

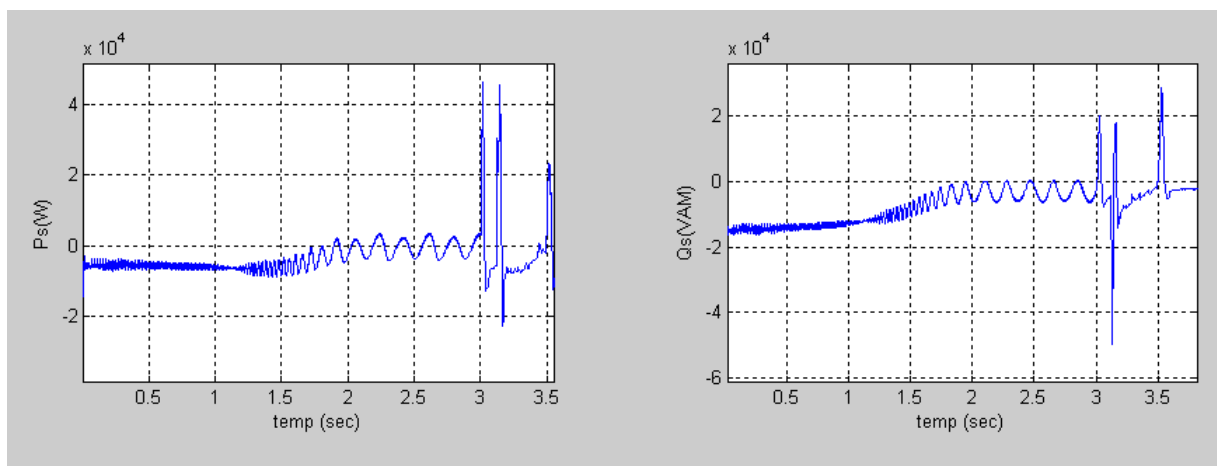


Figure (3.22) : Résultat de simulation de P_s et Q_s d'une MADA associée à un onduleur avec $C_r=10N.m$ à $t = 3s$

VIII. Analyse des résultats :

En première étape, on a simulé le fonctionnement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation alimentée directement par le réseau 220/380V sans application du couple de charge. L'examen des courbes montre:

- ✓ Pendant le régime transitoire, la vitesse est légèrement pulsatoire, présentant au premier instant de démarrage des battements, et atteint sa valeur nominale de 1500 *tr/mn*.
- ✓ L'allure de la courbe du couple présente au démarrage des battements importants dans un intervalle de temps court, puis se stabilisé à zéro puisque la machine est à vide.
- ✓ Pour les puissances P_s et Q_s au début de démarrage on voit des pics de puissances assez important, ensuite ils se stabilisent à leurs valeurs nominales après un temps assez court.
- ✓ En fonctionnement génératrice de la MADA la puissance active statorique (P_s) est négatives, elle alimente le réseau. Pour le fonctionnement hyposynchrone la puissance active débitée par le rotor (P_r) est négative et elle est transmise du réseau au rotor ainsi que le glissement (g) est positif ce qui est le contraire pour le fonctionnement hypersynchrone (P_r positive et g négatif).

En deuxième étape, nous appliquons à $t = 3s$ une charge $C_r = 10 N.m$. On remarque que les caractéristiques suivent cette variation puis se stabilisent au régime permanent.

Pour l'association onduleur-MADA on remarque la présence des pulsations dans les réponses de la machine, ces pulsations sont liées aux harmoniques des courants injectés par l'onduleur.

IX. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure de la machine asynchrone à double alimentation que nous avons choisit grâce à ces avantages pour être utilisée dans un système éolien (réduction du coût, amélioration du rendement énergétique et l'opportunité d'avoir plusieurs degré de liberté qui facilite sa commande). Après avoir modélisé cette dernière, notre choix s'est porté sur une stratégie linéaire de commande appliquée à l'asservissement en puissances active et réactive statoriques d'une génératrice asynchrone à double alimentation: commande vectorielle (à flux statorique orienté).

Les simulations de la MADA nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone en mode génératrice, et faire la différence entre la MADA alimenté par un réseau triphasé et celle associée à un onduleur à MLI.

Chapitre quatre

I. Introduction :

La modélisation de la Génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) et sa mise en équation nécessaire à la commande en puissances active et réactive ont été mises en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande.

Les régulateurs ont, d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleur. La première priorité dans le choix de tout régulateur est de s'assurer que ce dernier nous puisse garantir une bonne stabilité tout en assurant une précision satisfaisante et acceptable [8].

Dans ce chapitre on va étudier la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée en génératrice en utilisant deux types de régulateurs : Le régulateur **Proportionnel-Intégral** afin d'annuler l'erreur statique. Il servira de référence de comparaison car c'est le plus utilisé et le plus simple à synthétiser dans le domaine des réglages industriels. Afin de comparer ces performances à d'autres régulateurs plus élaborés, nous effectuons également la synthèse d'un régulateur **RST** basé sur la théorie du placement de pôles. Il permet de prendre en compte un modèle de perturbation.

Des simulations seront réalisées pour comparer ces deux régulateurs linéaires en termes de suivie de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse vis à vis des variations de paramètres.

II. Hypothèse de travail :

D'après le chapitre précédent, on a obtenu le schéma bloc du système interne simplifié de la MADA après l'orientation du flux statorique suivant L'axe d (figure 4.1) avec des perturbations $(-g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s)$ et $(\frac{V_s^2}{L_s \omega_s})$ qui vont être compensées.

Le terme $g\omega_s \frac{M_s \phi_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $L_s \sigma$ représentés sur la figure (3.14) chapitre 2 est minime ce qui nous permet de commander chaque axe indépendamment avec chacun son propre régulateur ainsi nous obtenons deux systèmes monovariabiles comme le montre la figure (4.1) [2].

Remarque :

On considère que la dynamique de l'onduleur est très rapide par rapport à celle de la machine. Dans ce cas, le modèle de l'onduleur est réduit à son gain statique $K_{ond}=1$ ce qui permet de réduire l'ordre du système [2] :

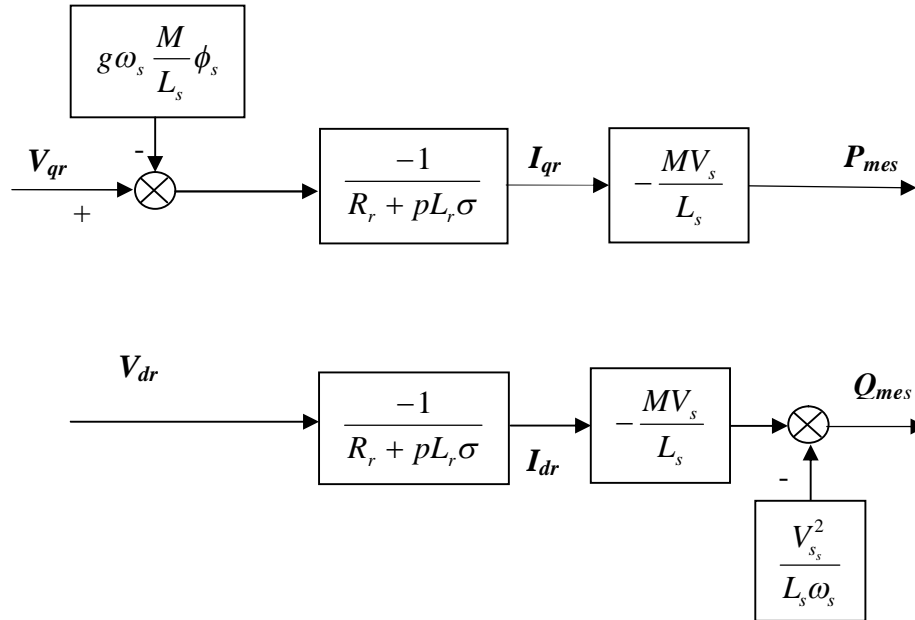


Figure (4.1) : schéma bloc de la MADA avec orientation du flux statorique et découplage des deux axes d, q.

✚ Bloc de compensation :

Avant la synthèse des régulateur on ajoute un bloc de compensation après le régulateur PI afin de compenser les perturbations, dont les équations sont données comme suit [24]:

$$\begin{cases} e_d = +g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \\ e_q = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \frac{L_s}{MV_s} (R_r + pL_r \sigma) \end{cases} \quad (4.1)$$

En régime permanent $p \rightarrow 0$:

$$\Rightarrow \begin{cases} e_d = g\omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \\ e_q = \frac{R_r V_s}{M \omega_s} \end{cases} \quad (4.2)$$

III. Définition de cahier des charges :

Les principaux objectifs de la commande sont:

- **Précision:** on quantifié la Précision en comparant le signal de sortie au signal d'entrée. le signal résultant, souvent noté $\varepsilon(t)$ représente donc la différence entre la consigne et la mesure. En régime permanent, on parlera de la précision statique ou encore d'erreur statique.
- **Rapidité:** on peut juger de la rapidité d'un système en mesurant sur sa réponse indicielle, soit le temps de réponse (à 5 % ou 10%), soit le temps de montée ou encore on considérant ces deux grandeurs à la fois.
- **Rejet de perturbation:** une perturbation est un signal parasite qui vient modifier le comportement du système et que l'on traite comme une entrée subie. Rejeter une perturbation c'est faire en sorte que celle-ci n'affecte pas (ou pas trop longtemps) ,le fonctionnement du système.
- **Desensibilisation vis-à-vis de variations paramétriques :** on dira qu'un système est sensible aux variations d'un paramètre k si ses propriétés ou son comportement sont affectés par ces variations [39], [52].

La boucle de régulation de notre système doit répondre au cahier des charges suivant :

- Erreur statique nulle.
- Dynamique exigée.

Un correcteur à action proportionnelle et intégrale suffit pour l'obtention de performances tout à fait satisfaisantes. Ce correcteur introduit un pôle à l'origine. L'action de ce correcteur se fait sur les basses fréquences. La présence d'un intégrateur annule l'erreur statique, mais il ralentit le système et le déstabilise s'il est mal placé. Il n'influe pratiquement plus la phase pour les hautes fréquences.

IV. Mise en œuvre de la régulation :

1. Synthèse du régulateur PI :

Le correcteur proportionnel-intégral est une combinaison des deux actions proportionnel et intégral. Il a pour effet d'améliorer en même temps le régime permanent et le régime transitoire [28].

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statorique (figure 4.1), on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. Dans notre étude, on considère que la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s est par conséquent constante. Alors nous n'avons pas besoin de placer un régulateur entre les courants rotoriques et les puissances [2], [13].

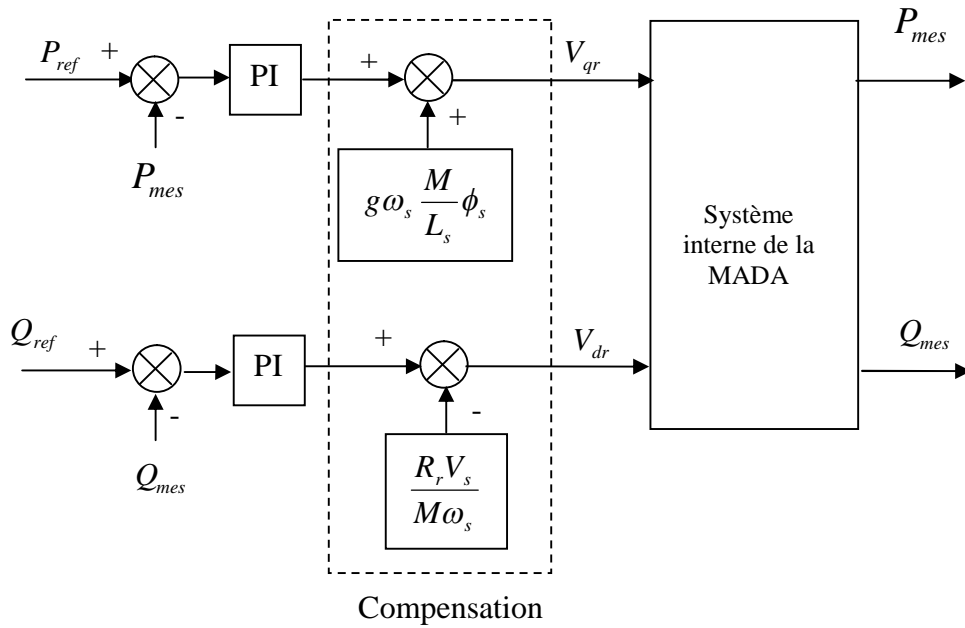


Figure (4.2): Schéma bloc de la commande de la MADA avec les régulateurs PI.

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par l'équation suivante :

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \tag{4.3}$$

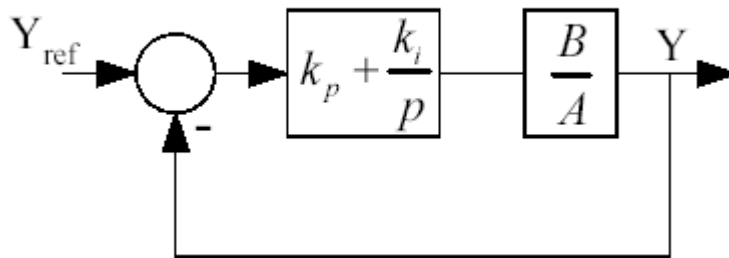


Figure (4.3): Schéma bloc d'un système régulé par PI.

Avec :

$$A = L_s R_r + p L_s L_r \sigma ; B = M V_s \quad (4.4)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = (k_p + \frac{k_i}{p}) (\frac{M V_s}{L_s (R_r + p L_r \sigma)}) \quad (4.5)$$

Exprimons les pôles et les zéros de cette fonction de transfert :

$$FTBO = \frac{k_p}{p} (p + \frac{k_i}{k_p}) \frac{M V_s}{L_s L_r \sigma (p + \frac{R_r}{L_r \sigma})} \quad (4.6)$$

Nous obtenons :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \frac{\frac{M V_s}{L_s L_r \sigma}}{p + \frac{R_r}{L_r \sigma}} \quad (4.7)$$

Pour éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, on utilise la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, on posant :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{L_r \sigma} \quad (4.8)$$

On obtient :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{M V_s}{L_s L_r \sigma}}{p} = \frac{1}{\tau_r p} \quad (4.9)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} \quad (4.10)$$

paramètres de synthèse T_c et T_f qui présentent respectivement un horizon de commande et un horizon de filtrage à partir desquelles sera définie la région des pôles en boucle fermée [2], [18], [50].

2.1. Objectif de la commande RST :

La régulation RST est basée sur un algorithme de commande largement diffusé, et dont la structure à 3 branches R, S et T permet :

- ✓ de gérer indépendamment les dynamiques de poursuite (asservissement) et la dynamique de réjection de perturbation (régulation).
- ✓ de spécifier indépendamment les temps de montée et le dépassement sur la consigne.
- ✓ d'obtenir une régulation robuste vis à vis : des variations du processus, des changements des points de consigne et des variations des produits.

Et en final,

- ✓ d'obtenir des mesures plus proches de la consigne imposée et, en conséquence, des gains potentiels en précision, qualité, énergie, matières premières [19].

2.2 Synthèse du régulateur RST :

2.2.1 Principe :

La régulation du système par placement de pôles robuste consiste à placer une fonction de transfert $\frac{R}{S}$ sur la boucle de retour et une fonction $\frac{T}{S}$ appliquée à la référence, où R, S et T sont des polynômes [2].

La figure (4.4) montre le système corrigé de fonction de transfert $\frac{B}{A}$ avec la commande RST :

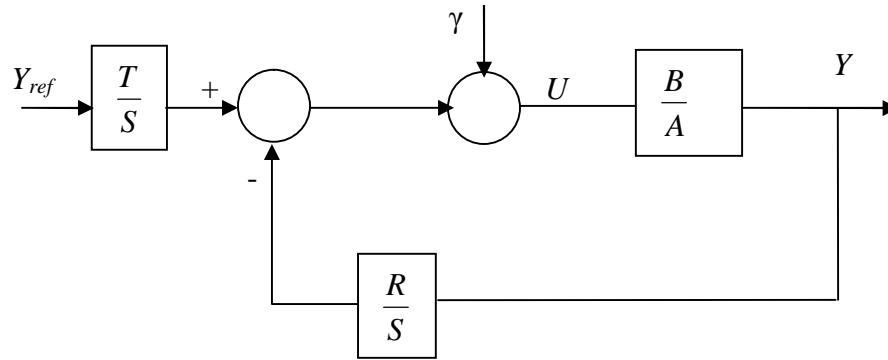


Figure (4.4) : Schéma bloc d'un système régulé par un RST

La fonction de transfert en boucle fermée, résultant de la Fig. (4.4), est représentée par l'équation (4.14):

$$Y = \frac{BT}{AS + BR} Y_{ref} + \frac{BS}{AS + BR} \gamma \quad (4.14)$$

On distingue alors le transfert en poursuite $T_{\frac{Y}{Y_{ref}}}$ et le transfert en régulation $T_{\frac{Y}{\gamma}}$:

$$T_{\frac{Y}{Y_{ref}}} = \frac{BT}{AS + BR} \quad (4.15)$$

$$T_{\frac{Y}{\gamma}} = \frac{BS}{AS + BR} \quad (4.16)$$

Le principe du placement de pôles consiste à spécifier un polynôme arbitraire $D(p)$ et à calculer les polynômes $S(p)$ et $R(p)$ de sorte que nous ayons l'équation (4.16), appelée *équation de Bézout* ou équation *diophantine* [21], [50].

$$D(p) = A(p)S(p) + B(p)R(p) \quad (4.17)$$

La dynamique de la régulation et du rejet de perturbation est fixée par les pôles de $D(s)$. Il faut les choisir afin d'assurer un rejet de perturbation satisfaisant (en terme de rapidité et de dépassement) [2], [6].

Il y a deux conditions à satisfaire :

a- Rejet de la perturbation :

Supposons que la perturbation γ soit de type constante. D'après l'équation (4.16), pour que la perturbation soit rejetée il faut que la fonction de transfert $T_{\frac{Y}{\gamma}}$ soit nulle en régime permanent [21], [49], [50]. Pour cela nous imposons :

$$S(0)=0 \quad (4.18)$$

Car pour des raisons de stabilité en régime permanent, le terme $D(0)$ ne peut pas être nul [2], [49]. Cela implique que $S(p)$ doit se fractionner en :

$$S(p) = pS'(p) \quad (4.19)$$

b- Suivi de la consigne :

Il permet de définir les termes du polynôme $T(p)$. En régime permanent, l'objectif de la commande est d'obtenir un gain statique unitaire c-à dire [21], [49], [50]:

$$\frac{Y}{Y_{ref}} = 1 \Rightarrow \lim_{p \rightarrow 0} \frac{BT}{AS + BR} = 1 \quad (4.20)$$

Pour cela il suffit de choisir un polynôme $T(p)$ qui vérifie :

$$T(0)=R(0) \quad (4.21)$$

Car on a : $S(0)=0$ d'après (4.18).

2.2.2 Résolution de l'équation de Bézout :

Il convient d'abord d'analyser les degrés des polynômes du régulateur RST . Le système d'origine $(B/A)(p)$ et le régulateur $(R/S)(p)$ étant propres, le degré de $D(p)$ est déterminé par celui du produit $(A(p). S(p))$, ce qui implique donc :

$$deg(D) = deg(AS) = deg(A) + deg(S) \quad (4.22)$$

La théorie du placement de pôles robuste montre qu'en choisissant un régulateur strictement propre c-à dire:

$$\deg(S) = \deg(R) + 1 \quad (4.23)$$

L'égalité des coefficients des puissances de (p) dans chacun des deux membres de l'équation (4.17) se traduira par un système d'équations linéaires, en nombre égal à $(\deg(D) + 1)$. Pour que ce système ait une solution, quels que soient les coefficients du polynôme $D(p)$, il faut que le régulateur présente au moins autant de degrés de liberté que d'équations. Or, nous disposons de :

- $\deg(R)+1$ coefficients pour $R(p)$,
- $\deg(S)$ coefficients pour $S(p)$, car $S(0)=0$ d'après (4.18)

Le total doit être égal ou supérieur à $(\deg(D) + 1)$, d'où :

- $\deg(R)+\deg(S)+1 \geq \deg(D)+1 = \deg(A)+\deg(S)+1$

On peut en déduire l'inégalité :

- $\deg(R) \geq \deg(A)$

Afin que la solution soit unique et pour un régulateur **strictement propre** $\deg(S) = \deg(R)+1$,

nous aurons finalement :

$$\begin{cases} \deg(S) = \deg(A) + 1 = n + 1 \\ \deg(R) = \deg(A) = n \\ \deg(D) = 2n + 1 \end{cases} \quad (4.24)$$

Avec : $\deg(A)=n$

Le choix d'un régulateur propre ou strictement propre est une option à la discrétion du Concepteur. Le choix d'un régulateur d'ordre $n+1$ permet d'avoir une réponse fréquentielle $|R(j\omega)/S(j\omega)|$ décroissante avec une pente de -20 dB par décade au lieu de rester constante pour un régulateur simplement propre. Cela permet au régulateur de filtrer les bruits à haute fréquence par l'effet passe-bas [48].

Où $C(p)$ est de degré n . Cela permet de répartir les modes en boucle fermée en pôles de filtrage (zéros de $F(p)$) et pôles de commande (poursuite) (zéros de $C(p)$).

Dans l'objectif de réaliser cette factorisation, deux paramètres de synthèse sont employés :

- un horizon de commande : T_c
- un horizon de filtrage : T_f

Avec le pôle de polynôme de commande est défini par :

$$p_c = -\frac{1}{T_c} \quad (4.28)$$

Et le pôle de polynôme de filtrage est :

$$p_f = -\frac{1}{T_f} \quad (4.29)$$

Nous déduisons alors les pôles de commande à partir des pôles en boucle ouverte, en effectuant dans l'ordre, comme le montre la Figure (4.5), les opérations suivantes :

- (1) Les zéros instables de $A(p)$ sont remplacés par leurs symétriques par rapport à l'axe imaginaire,
- (2) Les zéros complexes peu amortis sont ramenés à l'amortissement spécifié,
- (3) Les zéros trop lents (à droite de la verticale d'abscisse $(-1/T_c)$) sont ramenés sur cette verticale,
- (4) Les zéros restants demeurent inchangés.

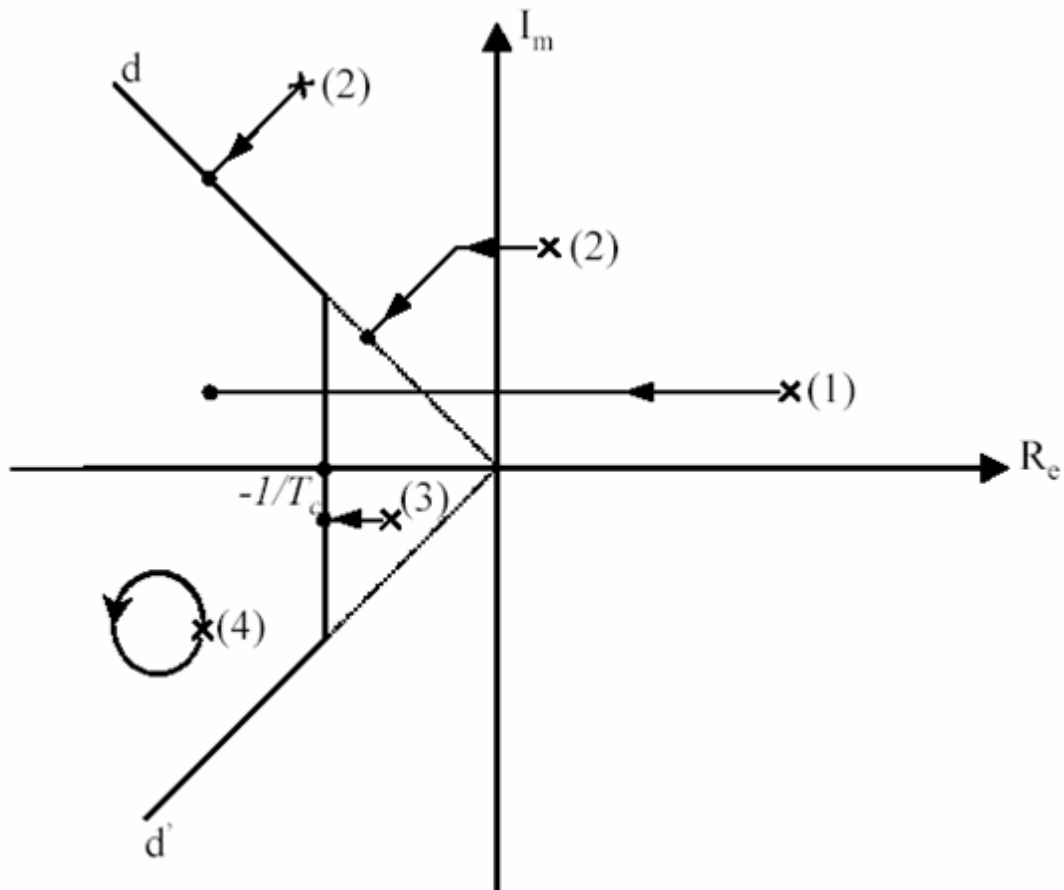


Figure (4.5) : Construction des zéros de $C(p)$ à partir de ceux de $A(p)$ [49]

Nous reconstituons alors le polynôme $C(p)$ à partir des nouveaux zéros obtenus. Les zéros du polynôme $F(p)$ se déduisent à partir du paramètre de synthèse spécifié T_f , selon la même procédure que pour $C(p)$. Pour un régulateur strictement propre, un pôle nul ($p=0$) s'ajoute aux zéros de $A(p)$ et les $n+1$ zéros de $F(p)$ se déduisent dans ce cas de ceux de $p.A(p)$ suivant toujours la même procédure [49].

L'angle du secteur, défini par les droites d et d' , dans la Figure (4.5) fixe l'amortissement des pôles placés. Dans ce travail, un secteur de (90°) ($2 \times 45^\circ$) est choisi pour fixer l'amortissement des pôles placés à $0,707$.

Nous pouvons associer à T_c et T_f un certain nombre de règles simples que nous allons énumérer :

- Si le temps de réponse en asservissement est trop grand, diminuer T_c ,
- Pour augmenter la robustesse et la marge de stabilité, augmenter T_c ou T_f ou les deux,

- Nous avons souvent intérêt à déstabiliser les horizons T_c et T_f pour accroître la robustesse,
- Si la commande est trop sensible aux bruits des capteurs, augmenter T_f ,
- Si la commande est très sollicitée en mode asservissement, augmenter T_c , ou prévoir un pré-filtrage adoucisseur de la référence [49].

Calcul de $T(p)$:

Pour dissocier poursuite et régulation, nous cherchons alors à faire dépendre le terme

$\frac{BT}{AS + BR}$ uniquement de C . Pour cela, On pose $T=hF$ (où h est un réel) [2].

Nous avons alors :

$$\frac{BT}{AS + BR} = \frac{BT}{D} = \frac{BhF}{CF} = \frac{Bh}{C} \quad (4.30)$$

or : $T(0)=R(0)$, soit :

$$h = \frac{T(0)}{F(0)} = \frac{R(0)}{F(0)} \quad (4.31)$$

V. Application du régulateur RST à notre système (MADA):

Le système d'origine $\frac{B(p)}{A(p)}$ de la MADA est modélisé d'après (4.4) par la relation suivante :

$$\frac{B(p)}{A(p)} = \frac{MV_s}{L_s R_r + pL_s L_r \sigma} \quad (4.32)$$

On se basant sur la relations (4.24), on en déduit les degrés de $R(p)$, $S(p)$ et $D(p)$ comme suit :

$$\begin{cases} \deg(R) = \deg(A) = 1 \\ \deg(S) = \deg(A) + 1 = 2 \\ \deg(D) = \deg(A) + \deg(S) = 1 + 2 = 3 \end{cases} \quad (4.33)$$

Notons que le régulateur est strictement propre, ce qui donne :

$$\begin{cases} A = a_0 p + a_1 \\ B = b_0 \\ D = d_0 p^3 + d_1 p^2 + d_2 p + d_3 \\ R = r_0 p + r_1 \\ S = s_0 p^2 + s_1 p + s_2 \end{cases} \quad (4.34)$$

Avec : $a_0 = L_s \cdot L_r \sigma$; $a_1 = L_s R_r$; $b_0 = M \cdot V_s$

- pour assurer un rejet de perturbation, on suppose que $S(0)=0$, ce qui implique que:

$$s_2 = 0 \quad (4.35)$$

Conformément à la stratégie du placement de pôles robustes, le degré du polynôme $D(p)$ nous oblige à placer trois pôles. Ce polynôme est tout d'abord décomposé en produit de deux polynômes $C(p)$ et $F(p)$ d'après (4.27) [2].

Afin de placer ces pôles, nous commençons à reconstituer le polynôme $C(p)$ d'ordre n à partir de la projection du pôle du système d'origine sur l'abscisse $(-1/T_c)$. Le polynôme $F(p)$, d'ordre égal à $(deg(D)-deg(C))$, est obtenu à partir de la projection des pôles sur l'abscisse $(-1/T_f)$ [49].

Le degré des polynômes $C(p)$ et $F(p)$ est de :

$$\blacksquare \text{ Deg}(C)=n=1 \quad (4.36)$$

$$\blacksquare \text{ deg}(F)= \text{deg}(D)-\text{deg}(C)=3-1=2 \quad (4.37)$$

Les deux abscisses sont choisies pour que les objectifs de régulation soient satisfaits. Connaissant les polynômes $F(p)$ et $C(p)$, le polynôme de stabilité arbitraire se calcule en appliquant la relation : $D(p)=C(p).F(p)$. En résolvant la relation de **Bézout** (4.17), nous pouvons en déduire les polynômes $R(p)$, $S(p)$, $T(p)$ de notre régulateur RST .

Le choix de ces pôles est alors basé sur les pôles de la boucle ouverte. Le rôle du pôle de commande étant d'accélérer le système, on le choisit de façon arbitraire, 7 fois supérieur au Pôle du polynôme A, soit :

$$p_c = 7 p_A \quad (4.38)$$

Avec p_A pôle de A(p) donné par :

$$P_A = \frac{-R_r}{L_r \sigma} \quad (4.39)$$

Alors l'horizon de commande est donné par :

$$-\frac{1}{T_c} = p_c = -7 \frac{R_r}{L_r \sigma} \quad (4.40)$$

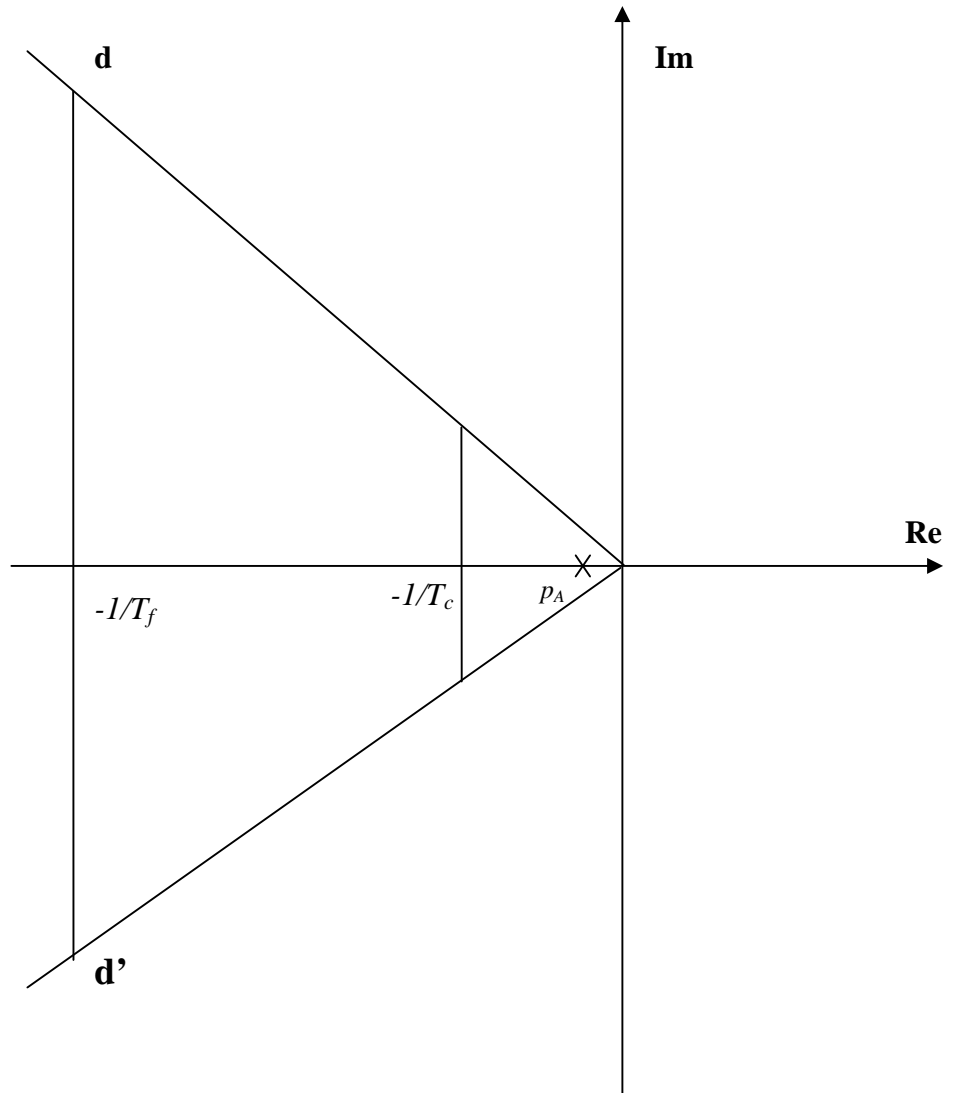


Figure (4.6) : Construction des zéros de $C(p)$ et de $F(p)$ à partir de ceux de $A(p)$ appliqué à la MADA

Pour accroître la robustesse du régulateur, nous avons tout intérêt à déséquilibrer les horizons de commande T_c et de filtrage T_f , de plus, afin de rendre la commande moins sensible aux différents bruits pouvant être amené notamment par les capteurs, nous choisissons T_c neuf fois supérieur à T_f soit :

$$T_f = \frac{1}{9} T_c \quad (4.41)$$

Alors l'horizon de filtrage est donné par :

$$-\frac{1}{T_f} = p_f = -9\frac{1}{T_c} = 63\frac{R_r}{L_r\sigma} \quad (4.42)$$

D'après l'équation (4.34), il reste 4 termes inconnus (2 pour S et 2 pour R). L'équation de Bézout ($D = AS + BR$) permet d'obtenir un système de quatre équations à quatre inconnues où les coefficients de D sont liés aux coefficients de R et de S par la matrice de **Sylvester** :

$$\begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

Ce système possède une solution unique.

On a $s_2 = 0$ d'après (4.35)

D'après les relations (4.36) et (4.37), on obtient un pôle pour la commande et un pôle double pour le filtrage. Ce qui donne :

$$D(p) = (p - p_c)(p - p_f)^2 \quad (4.44)$$

$$\Rightarrow D(p) = p^3 - (2p_f + p_c)p^2 + (p_f^2 + 2p_c p_f)p - p_c p_f^2 \quad (4.45)$$

D'après (4.43), on a:

$$D(p) = (a_0 s_0)p^3 + (a_1 s_0 + a_0 s_1)p^2 + (a_1 s_1 + b_0 r_0)p + b_0 r_1 \quad (4.46)$$

Et par identification avec (4.46), on obtient :

$$\begin{cases} a_0 s_0 = 1 \\ a_1 s_0 + a_0 s_1 = -2p_f - p_c \\ a_1 s_1 + b_0 r_0 = p_f^2 + 2p_c p_f \\ b_0 r_1 = -p_c p_f^2 \end{cases} \quad (4.47)$$

Finalement, on obtient :

$$\begin{cases} s_0 = \frac{1}{a_0} \\ s_1 = -\frac{2p_f + p_c + a_1 s_0}{a_0} \\ r_0 = \frac{p_f^2 + 2p_c p_f - a_1 s_1}{b_0} \\ r_1 = \frac{-p_c p_f^2}{b_0} \end{cases} \quad (4.48)$$

pour avoir un gain statique unitaire afin de garantir le suivie de consigne on suppose :

$$T(0) = R(0) \quad (4.49)$$

D'après (4.31)

$$h = \frac{T(0)}{F(0)} = \frac{r_1}{p_f^2}$$

Et :

$$T = hF \quad (4.50)$$

$$T = \frac{r_1}{p_f^2} (p - p_f^2) \quad (4.51)$$

L'avantage d'utiliser un régulateur de type RST est la possibilité d'améliorer considérablement la qualité du filtrage tout en gérant le compromis entre les performances de la poursuite de trajectoire et celles du rejet de perturbations. Allié à une stratégie de placement de pôles robustes, le réglage de la loi de commande se résume au choix des horizons de filtrage et de commande (T_f , T_c). Cependant, les inconvénients à utiliser ce type de régulateur résident tout d'abord dans son ordre élevé et ensuite dans l'impact peu explicite des paramètres de synthèse sur les performances de l'asservissement.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures (4.8, 4.9, 4.10), on a procédé aux essais suivants :

1. suivi de consigne :

Nous appliquons des échelons de puissance active et réactive comme référence tandis que la machine est entraînée à vitesse fixe de 1450 tr /mn.

À $t=2s$: échelon de la puissance active P_{ref} passe de 0 à -5000W.

À $t=3s$: échelon de puissance réactive Q_{ref} passe de 0 à 2000VAR.

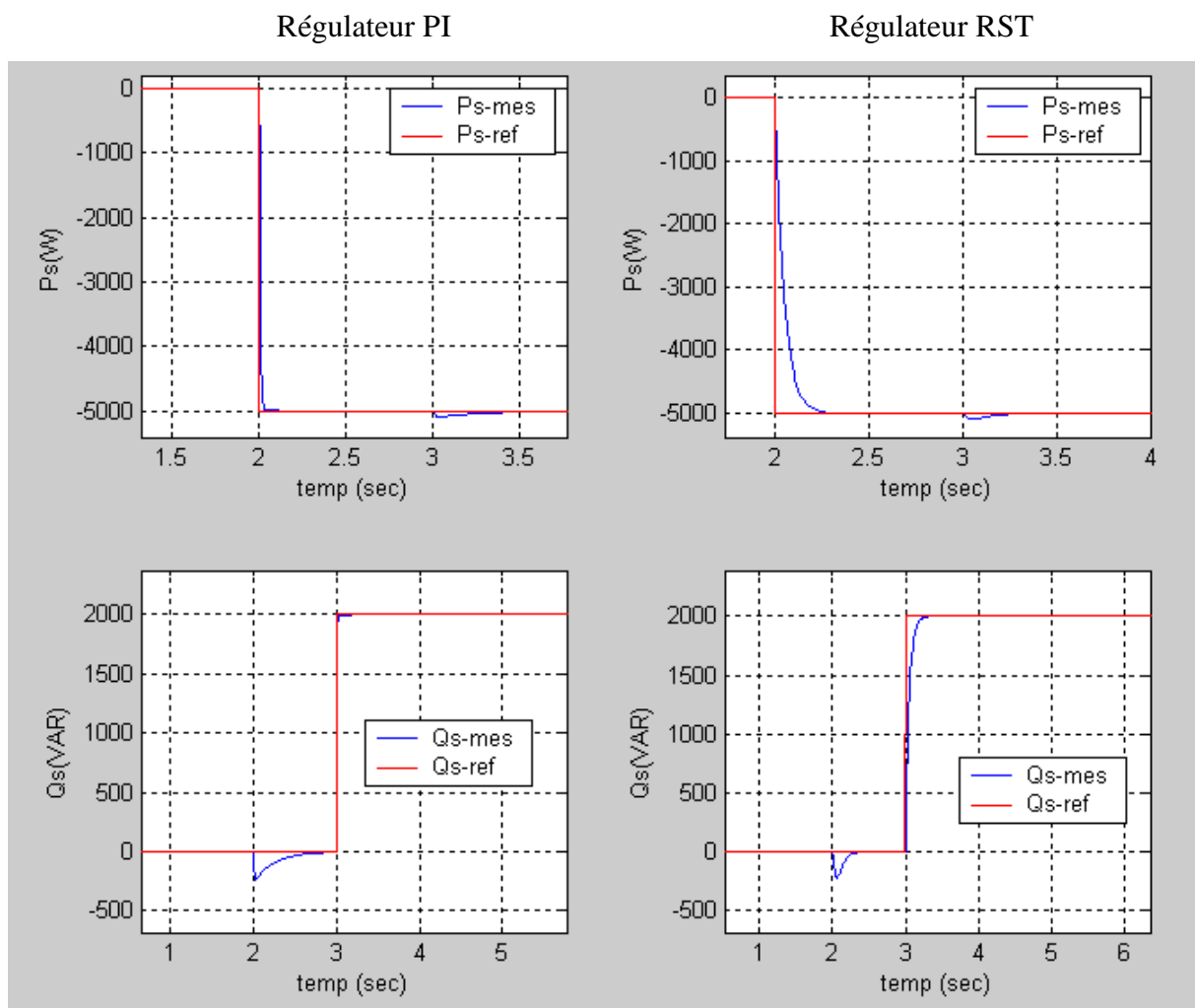


Figure (4.8) : Suivi de consigne de puissances active et réactive avec le régulateur PI et RST

D'après la figure (4.8), on observe clairement la poursuite des consignes pour les puissances avec les deux régulateurs PI et RST avec un temps de réponse très rapide. Il n'y a pas une grande différence entre ces deux régulateurs sauf que les dépassements sont réduits avec le régulateur RST par rapport au régulateur PI.

2. Sensibilité aux perturbations :

Cet essai consiste à faire varier la vitesse de rotation de la machine brusquement à $t=3s$ ou elle passe de 1350 à 1450 tout en laissant les puissances actives et réactives constantes et on vérifie dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne.

La machine est entraînée 1350 tr/mn.

Consigne de puissance active :-5000W.

Consigne de puissance réactive : 2000 VAR.

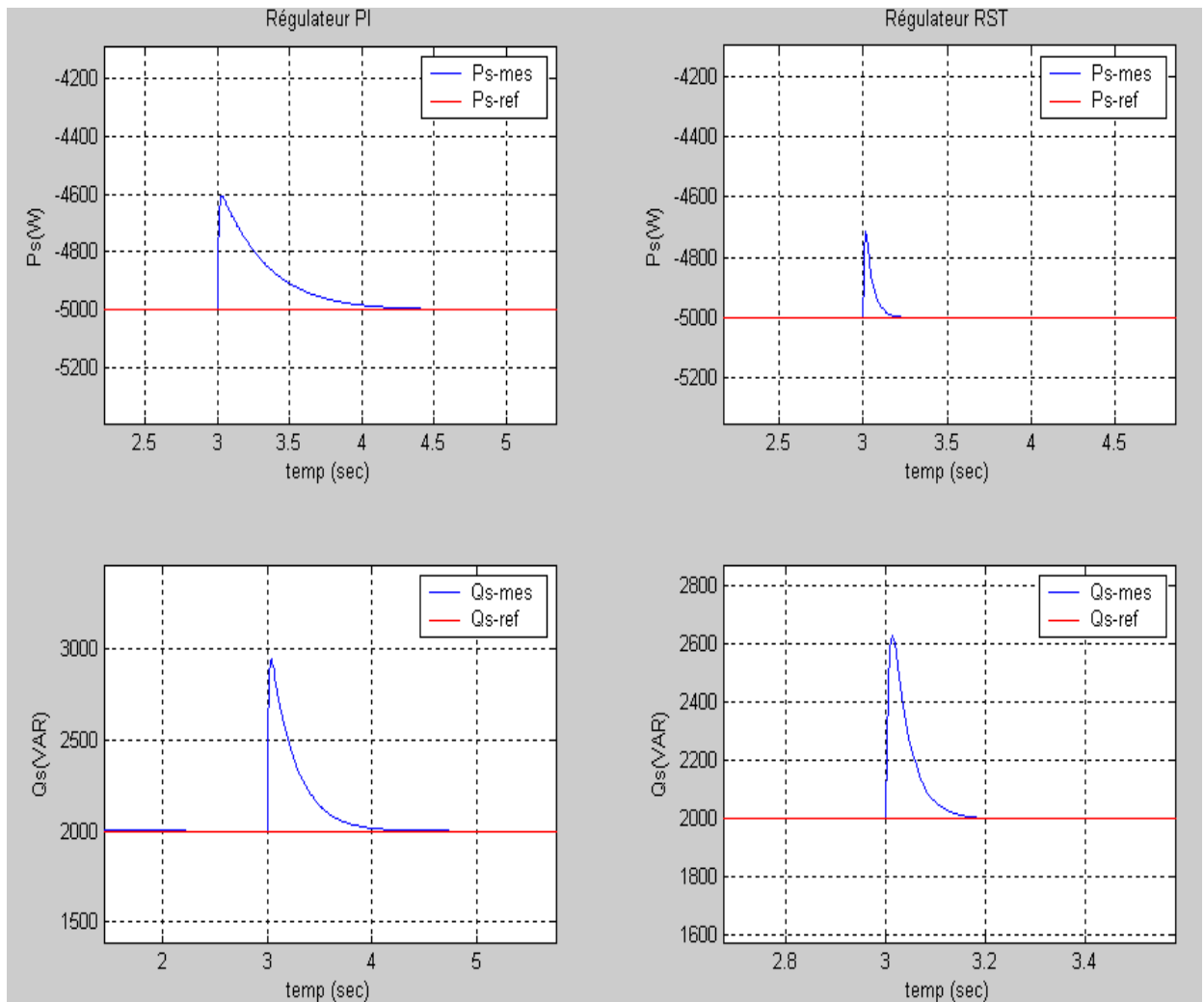


Figure (4.9) : effet de variation brusque de la vitesse sur P_s et Q_s

Les figures (4.9) présentent l'effet d'une variation brusque de la vitesse de rotation de la génératrice sur les puissances active et réactive. Cet effet de variation est clair sur les puissances pour les deux régulateurs. En effet, la synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral est basée uniquement sur les fonctions de transfert et aucune prise en compte des perturbations n'est prévue. Les mesures de puissances montrent alors un écart important par rapport à la valeur de la référence et un temps de retour à l'état initial supérieur à 100 ms.

3. Robustesse :

Plusieurs phénomènes physiques provoquent des variations des paramètres du modèle de la machine asynchrone. Entre autres, une élévation de température augmente les valeurs des résistances. Pour faire cet essai on fait varier les paramètres du modèle de la MADA utilisée car les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert de paramètres fixes. Mais en réalité ces paramètres sont variables à cause de différents phénomènes physiques.

La machine est entraînée à 1485 tr/mn.

On pose :

$$R'_r = 2.R_r, \quad L'_s = L_s / 2, \quad L'_r = L_r / 2, \quad M'_{sr} = M_{sr} / 2$$

À $t=2s$: échelon de puissance réactive Q_{ref} passe de 0 à 2000VAR.

À $t=2,5s$: échelon de puissance active P_{ref} passe de 0 à -5000W.

À $t=2,8s$: la vitesse passe brusquement de 1350 à 1450.

Les résultats sont illustrés sur la figure (4.10) :

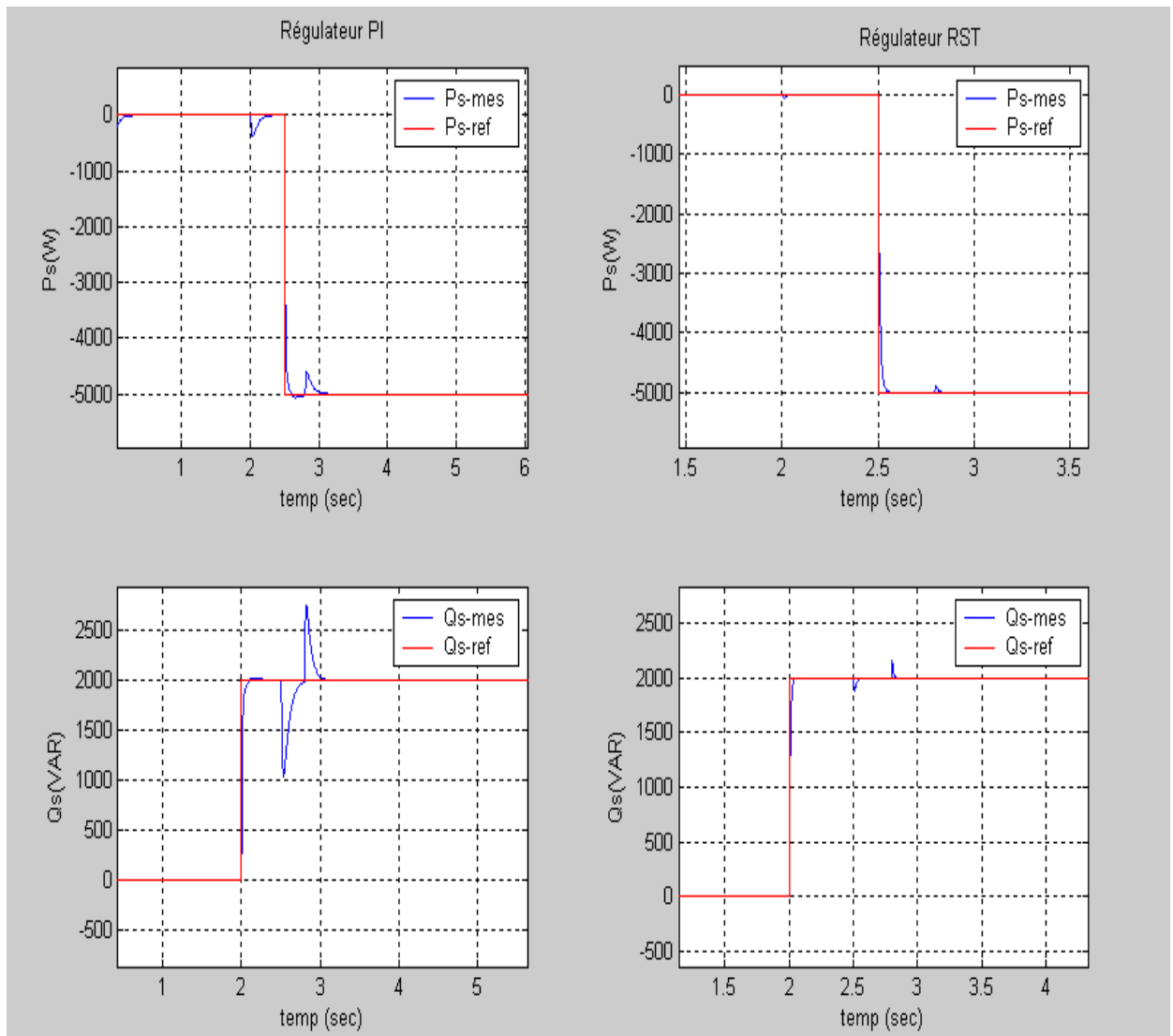


Figure (4.10) : effet de variation des paramètres de la MADA sur P_s et Q_s avec le régulateur PI et RST

On observe que l'influence des variations des paramètres (figure 4.10) est plus importante sur le régulateur PI que sur le régulateur RST. Et on observe nettement le couplage entre les deux axes ainsi que la perturbation (variation de la vitesse). Le régulateur RST montre l'apparition éventuelle de perturbations et rejette par conséquent plus efficacement les effets de la variation brusque de vitesse.

VII. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse. Il nous a permis d'établir la synthèse de deux régulateurs linéaires de philosophies différentes pour la commande de la MADA utilisée en génératrice. Un régulateur Proportionnel-Intégral afin d'annuler l'erreur statique mais il ne sert pas de limiter les perturbations pour cela on a proposé un autre régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles robustes et qui assure un très bon rejet de perturbations. Le but de ces régulateurs est de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la génératrice et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotoriques.

Pour les résultats obtenus sur la commande de la MADA en génératrice, les différences entre les deux régulateurs sont peu significatives en ce qui concerne le suivi de consigne et la robustesse bien que le régulateur RST semble mieux limiter l'amplitude des oscillations transitoires (dépassement réduit et temps de réponse rapide). Face aux perturbations, le régulateur PI, qui ne les prend pas en compte dans sa synthèse se montre moins performant que le RST.

Conclusion Générale et perspective

I. Conclusion générale:

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier deux parties importantes de l'éolienne : turbine et MADA. Par conséquent deux commandes ont été élaborées :

1- La commande de la vitesse mécanique de la turbine en zone 2 c'est la zone d'extraction maximale de la puissance (MPPT : Maximum Power Point Tracking) qui correspond au fonctionnement à charge partielle. Dans cette zone l'angle de calage des pales reste constant afin d'obtenir un coefficient de puissance maximal ainsi un rendement énergétique maximal.

Deux structures de commandes sont envisagées :

a) Commande Directe de Vitesse (CDV) ou commande avec asservissement de vitesse utilisant un régulateur PI, elle consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Cette méthode a montré un très bon suivi de consigne, ce qui donne un meilleur rendement énergétique.

b) Commande Indirecte de Vitesse (CIV) où commande sans asservissement de vitesse dont on contrôle le couple électromagnétique de façon à poursuivre la courbe du rendement maximal. On conclue d'après les résultats que cette méthode était moins performante que la première.

2- La commande vectorielle des puissances statoriques fournies par la Machine Asynchrone à Double Alimentation dont deux régulateurs linéaires ont été étudiés et comparés afin d'analyser leurs performances en terme de suivi de consigne, rejet de perturbations et de robustesse vis-à-vis des variations de paramètres : le régulateur PI qui a un rôle important en précision mais il insuffisant pour le rejet des perturbations et le régulateur RST qui s'est montré le plus efficace face à ce dernier (rejet des perturbations).

II. Perspectives envisageables :

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à compléter le travail réalisé ici ou d'ouvrir de nouveaux axes de travail sont envisageables :

- Etudier d'autres types de stratégies et d'autres méthodes en zones 1, 3 et 4 du fonctionnement de l'éolienne.
- Etudier et synthétiser la commande de la MADA en utilisant le régulateur LQG (Linéaire Quadratique Gaussien) et faire la comparaison avec les deux régulateurs étudiés.
- Synthétiser une commande mixte PI-RST afin de minimiser le coût.
- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique.

Annexes

I. Annexe 1 :

1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (A1-1) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$,

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [2], [6]:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{A1.1})$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{A1.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (A1.2) :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{A1.3})$$

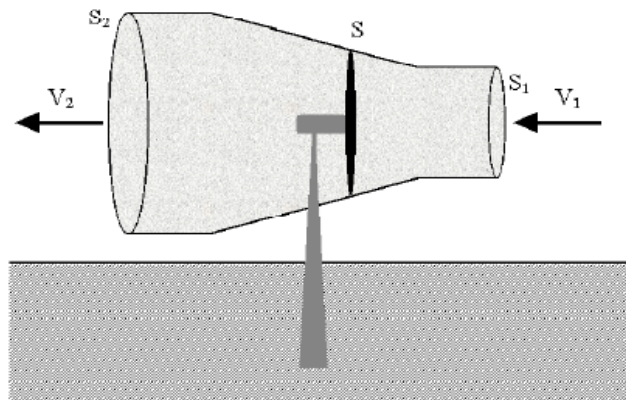


Figure (A1.1) : Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{A1.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{A1.5})$$

Si l'on trace ce ratio en fonction du rapport $\frac{V_2}{V_1}$, on obtient une courbe qui définit le coefficient de puissance C_p , représentée en figure (A1.2). Cette courbe a un maximum théorique à $\frac{16}{27} = 0.59$ qui est appelé limite de Betz et qui correspond à la puissance maximale que l'on peut extraire du vent [13]. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [2], [23].

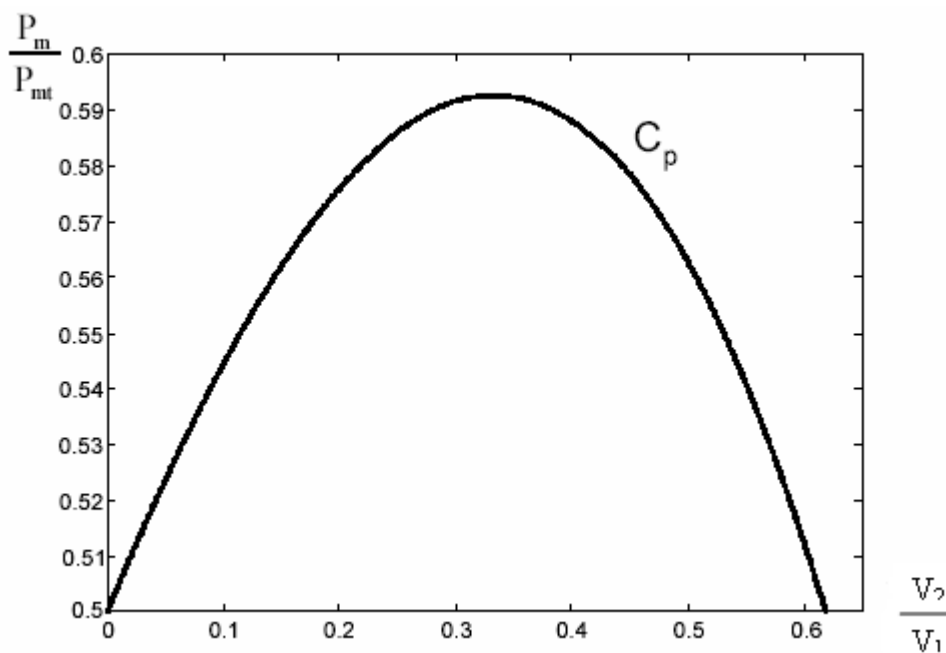


Figure (A1.2): Coefficient de puissance

On définit alors le rendement aérodynamique par :

$$\eta = \frac{27}{16} C_{PMAX} \quad (A1.6)$$

C_{PMAX} Étant la valeur maximum que peut prendre le coefficient de puissance C_p [23].

2. Angle de calage des pales β :

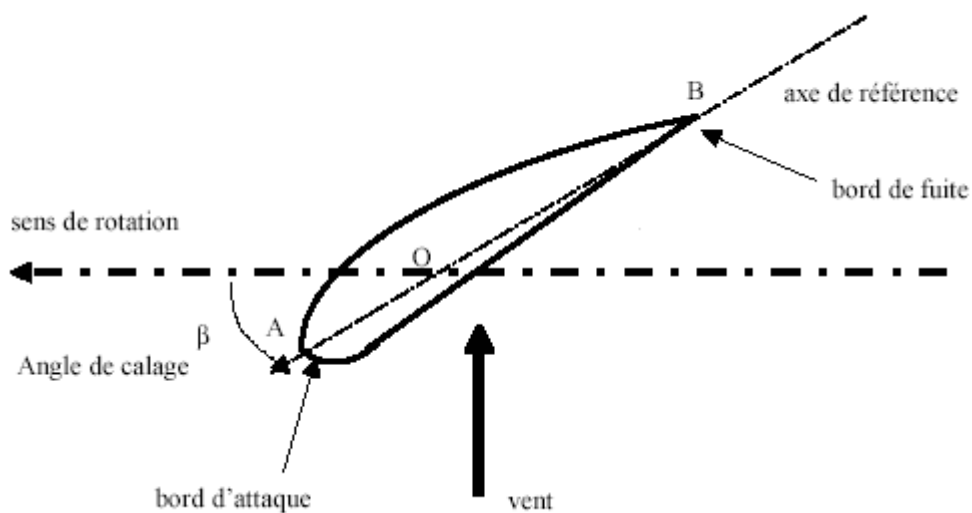


Figure A1.3 : Elements Caractéristiques d'une pale

II. *Annexe 2* :

Paramètre de la turbine éolienne:

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 15 KW basée sur machine asynchrone à double alimentation sont:

$R=3\text{m}$: Rayon de l'éolienne.

$G=6.8$: Gain du multiplicateur de vitesse.

$j=1000 \text{ kg.m}^2$: Inertie de la turbine.

$f=0.0024 \text{ N.m/s}$: Coefficient de frottement.

$\rho = 1.225 \text{ kg.m}^3$: Densité volumique de l'air

III. Annexe 3 :

Transformation de Park :

1. Transformation triphasée – diphasée :

Le but de l'utilisation de cette transformation c'est de passer d'un système triphasé (a - b - c) à un système diphasé équivalent (α - β) [5] comme le montre la figure (A1.1).

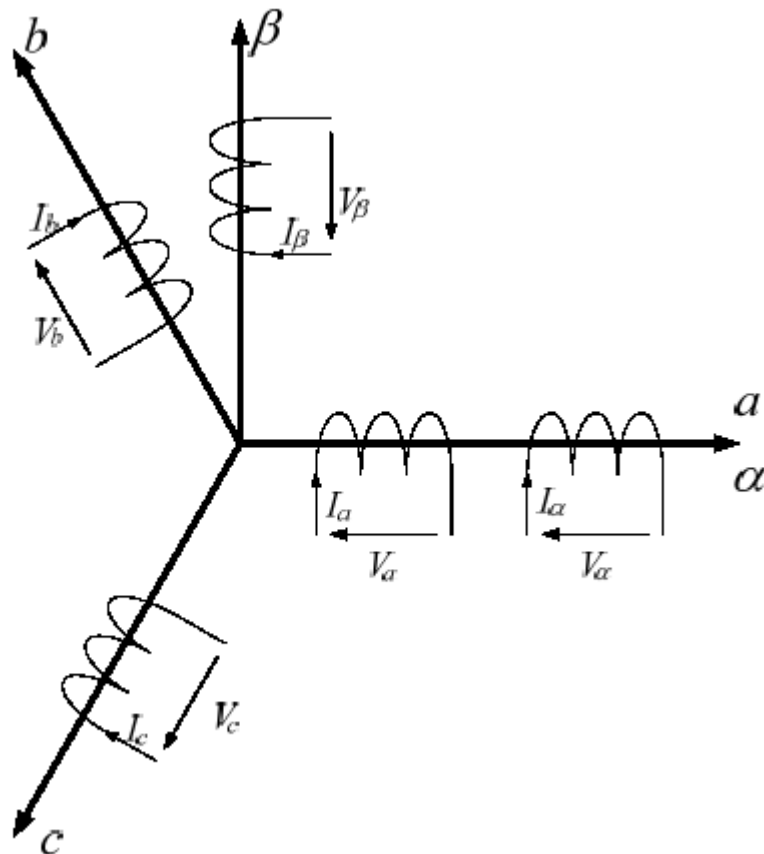


Figure (A3.1) : Représentation schématique d'une transformation triphasée – diphasée

L'axe α étant confondu avec l'axe a .

Soit une grandeur triphasée équilibrée $X_{a,b,c}$. La grandeur diphasée équivalente $X_{\alpha,\beta,o}$ donnée par la transformation de triphasée-diphasée sera :

$$X_{\alpha,\beta,o} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = T_{32} X_{a,b,c} \quad (\text{A3.1})$$

x_0 est la composante homopolaire.

Il existe principalement deux types de transformations vers le repère $(\alpha-\beta)$:

- La transformation de **Clarke** qui conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient $2/3$) [5]. Sa matrice de passage est donnée par :

$$T_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A3.2})$$

- La transformation de **Concordia** qui conserve la puissance mais pas l'amplitude des grandeurs de phase (rapport $\sqrt{2/3}$) [5]. Sa matrice de passage est donnée par :

$$\text{Avec : } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A3.3})$$

. Pour passer des grandeurs diphasées aux grandeurs triphasées, il suffit de Multiplier $X_{\alpha,\beta,o}$ par la matrice $T_{23} = T_{32}^{-1}$

2. Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasée et d'une rotation. Elle permet de passer du repère $(a-b-c)$ vers le repère $(\alpha-\beta)$ puis vers le repère $(d-q)$.

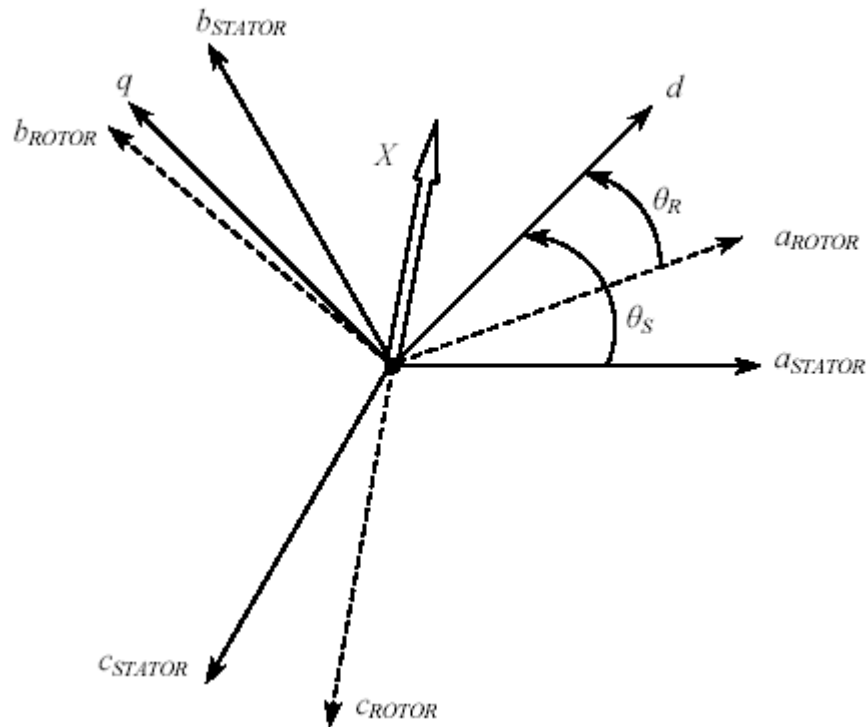


Figure (A3.2): Représentation schématique d'une transformation de Park

Le repère $(\alpha-\beta)$ est un repère fixe par rapport au repère $(a-b-c)$ alors que le repère $(d-q)$ est un repère tournant. L'angle que forme le repère $(d-q)$ avec le repère $(\alpha-\beta)$ est appelé angle de transformation ou angle de Park [26].

La matrice de rotation est donnée par :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3.4})$$

. Pour obtenir les grandeurs $(\alpha-\beta)$ à partir des grandeurs $(d-q)$, nous utilisons la transformation inverse $R(\theta)^{-1}$.

. Pour obtenir les grandeurs $(d-q)$ directement à partir des grandeurs $(a-b-c)$, nous utilisons la transformation $T_{32} \times R(\theta)$ [24],[36].

Donc il existe deux types de transformation de Park :

2.1 Transformation initiale de Park :

Dans laquelle on utilise la transformation de **Clarck** dont la matrice de passage est ainsi définie :

$$P(\theta) = \left(\frac{2}{3} \right) \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{A3.5})$$

2.2 Transformation de Park modifiée:

Dans laquelle on utilise la transformation de **Concordia** dont la matrice de passage est ainsi définie [36], [37]:

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{A3.6})$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{A3.7})$$

IV. Annexe 4 :

Paramètre de la MADA de puissance nominale 7.5 kw à deux paires de pôles :

$U_{mn}=220V$: amplitude de tension phase-neutre du stator

$E=400V$: tension du bus continue

$f=50$ Hz : fréquence nominale du réseau

$R_s=0.455 \Omega$;

$R_r=0.62 \Omega$;

$P=2$: nombre de paire de pôles

$L_s=0.084H$

$L_r=0.081H$

$M=0.078H$

$J=0.3125 \text{ kg.m}^2$:

$f=0.00673 \text{ Nm/s}$:

V. Annexe 5:

1. Simulation de commande directe de la vitesse mécanique d'une turbine éolienne :

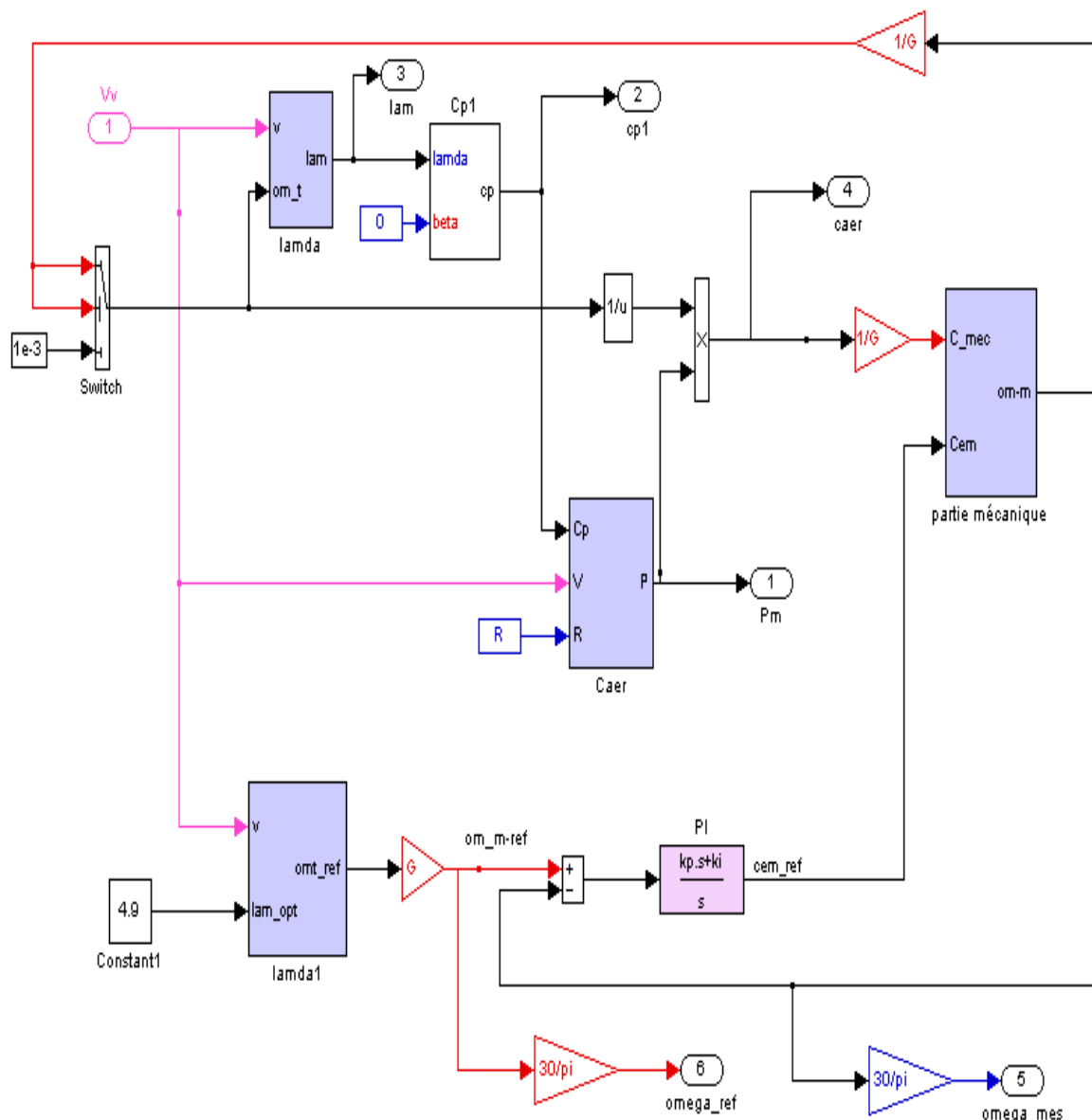


Figure (A5.1) : Schéma simulink de commande directe de la vitesse mécanique d'une turbine éolienne

2. Simulation de commande indirecte de la vitesse mécanique d'une turbine éolienne :

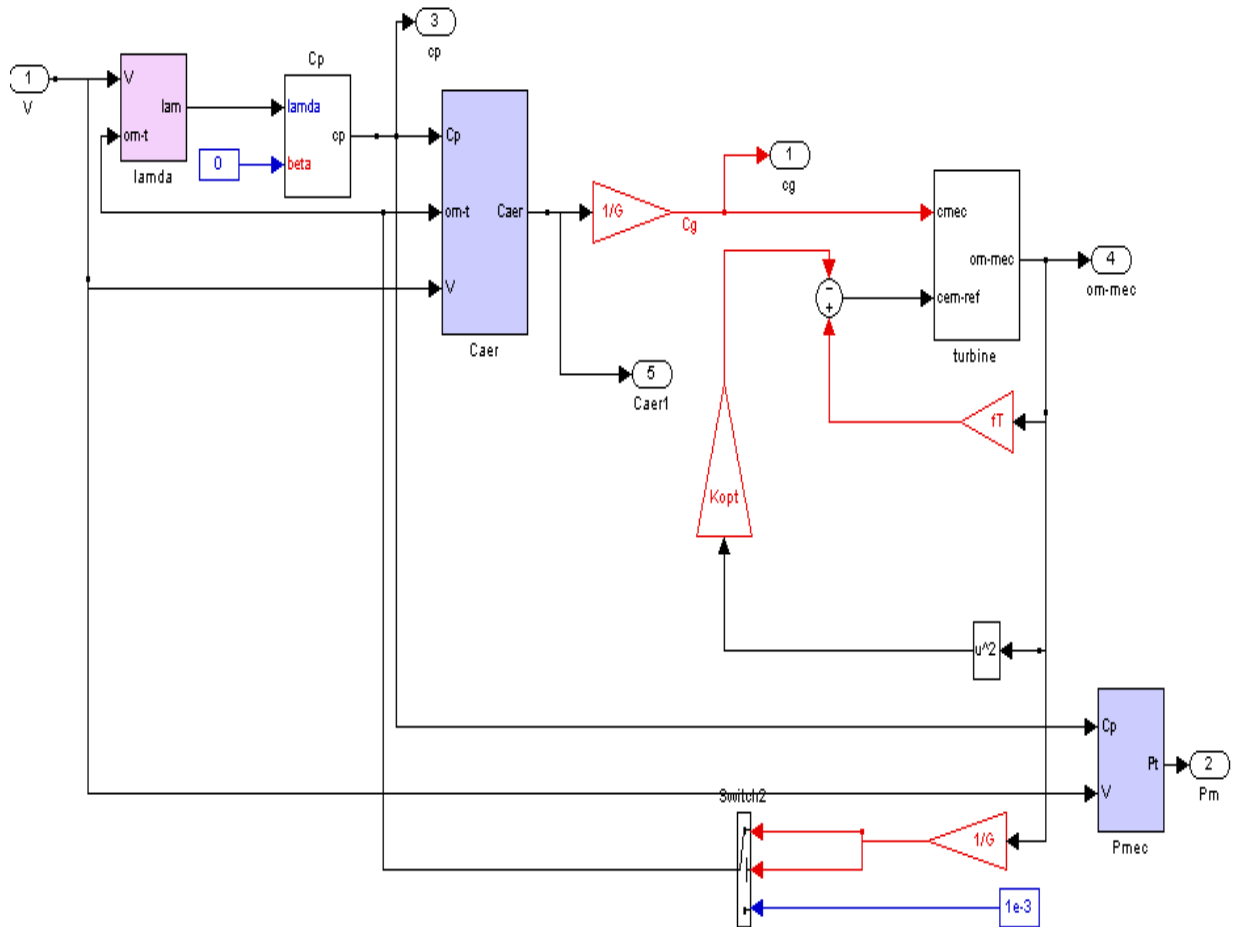


Figure (A5.2) : Schéma simulink de la commande indirecte de la vitesse mécanique de la turbine éolienne

VI. Annexe 6:

Paramètres onduleur :

umn=220; %amplitude de tension phase-neutre nominale

f_{sn}=50; %fréquence nominale

u_p=10;r=.8

f_m=f_{sn};

m=10;

u_m=r*u_p;

f_p=m*f_m;

h=.1e-3;

tf=10/(f_m) ;

E =400V

Bibliographie

- [1] : K. Idjdarene, « Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone » JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [2] : F. Poitier, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [3] : J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [4] : B. Multon, X. Roboam, B. DAKYO, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [5] : L. Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques ». Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique, 1999.
- [6] : L. Khettache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » thèse de magister, université de Batna, 2007.
- [7] : M. Siddo, Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. Thèse d'ingénieur en électrotechnique .Université El-Harrach, Algérie, 2007.
- [8] : N. Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune. « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux statorique». Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.147-150.
- [9]: M. Stiebler. « Wind Energy Systems for Electric Power Generation ». Technical University of Berlin. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science. Germany.
- [10]: G. Buche. « Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/simulink ». Thèse d'ingénieur en Automatismes industriels. Centre régional associé de Grenoble. 2001.

- [11] : P. Vidal. « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Spécialité : Génie Electrique. 2004.
- [12] : A. Mehdary, «Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une aéroturbine ».Domaine Universitaire de Saint-Jérôme Avenue Escadrille Normandie-Niemen 13397 MARSEILLE.
- [13] : A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ».
- [14] : S.E. Ben Elghali, «Modélisation et Commande d'une Hydrolienne Equipée d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation », JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [15] : S. Khojet El Kheil. “Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA). Thèse de Doctorat de l'institut national Polytechnique de TOULOUSE, 2006.
- [16] : M. Mokhtari. M. Mesbah. « Apprendre et maîtrise MATLAB ». Springer. 1997.
- [17]: F. Iov, A. D. Hansen, P. Sørensen, Frede Blaabjerg. « Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink General Overview and Description of the Models ». Aalborg University, March 2004.
- [18]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Régulateur_RST.
- [19] : Guide d'intégration du régulateur RST sur cibles programmables ; Régulations et Asservissements performants et robustes.
- [20] : G. Salloum. « Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation». Thèse de doctorat Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[21] : E. Gholipour Shahraki. « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ». Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I. Spécialité : Génie Electrique.2003.

[22] : N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.

[23] : L. Leclercq, « apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ».

[24] : D. Lahouel. « Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents ».thèse de magister en électrotechnique. Université de Batna, 2009.

[25] : A. Merabet. « Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone ». Thèse de Doctorat. Université du QUÉBEC; 2007.

[26] : B. Vulturescu. « Contribution à la commande robuste des systèmes électromécaniques par la méthode du modèle de comportement. Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2002

[27] : H. Semmache, A. Bounoua, R. Bausière and N. Benramdane. « Développement des Performances des Systèmes Energétiques dans la Production d'Energie Eolienne ». Revue Energie Renouvelable: Valorisation () 261-266 .Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France. 1999

[28] : E. Boukas. « Systèmes asservis » Edition de polytechnique de Montréal ,1995.

[29] : L. HEMOUZAL, Mohamed MEDIOUNI, Mustapha KOURCHI. « Stratégies de commande d'une turbine éolienne en vue de l'extraction de sa puissance maximale ». Laboratoire de l'Energie et de l'Environnement, ENSA, Agadir.

[30] :B. Francois « La turbine éolienne (Modélisation et commande) ». Master (Recherche) Sciences et Technologies. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance : L2EP, Lille.

[31] : A. Davigny. « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.

[32] : [http://www.windpower.org /fr/tour/design/horver.htm](http://www.windpower.org/fr/tour/design/horver.htm)

[33] : Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ». Thèse de magister en électrotechnique, option commande électrique. Université Hadj lakhdar, BATNA, 2009.

[34] : N. Abu-Tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat de l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon , 2008.

[35] : D. Aouzellag , K. Ghedamsi, E.M. Berkouk. «Power Control of a Variable Speed Wind Turbine Driving an DFIG». Electrical engineering Department, A.Mira University, Bejaïa, Algeria.

[36]: Y. Zhou, Pavol BAUER, Jan PIERIK, Jan A. FERREIRA. « Integration of large offshore wind farm - doubly fed induction generators with classical HVDC», 2009.

[37] : J.P.Caron, J.P.Hautier. « Modélisation et commande de la machine asynchrone ». Electrotechnique. 1995, Edition Tehnip-Paris.

[38]: K. Jemli. « Power Flow Control and VAR Compensation in a DFIG ». international journal of sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering. 2008, pp.548-565.

[39]: S. Le Ballois. P. Cordon. « Automatique: système linéaire et continues». 2^e édition, DUNOD, Paris, 2006.

[40]: O. Langlois. « Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de TOULOUSE, 2006.

- [41]: J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey. «A survey on variable-speed wind turbine system ». Federal University of Santa Maria – Brazil. Group of Power Electronics and Control – GEPOC.
- [42]: M. G. Simões, B. K. Bose and R. J. Spiegel, «Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a variable Speed Cage Machine Wind Generation System ». IEEE Transactions on power electronics, Vol. 12, N°1, pp. 87-95, January 1997.
- [43]: Nakamura, T.; Morimoto, S.; Sanada, M.; Takeda, Y, «Optimum control of IPMSG for wind generation system presented at Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the, Volume: 3, 2002, Page(s): 1435 -1440 vol.3.
- [44]: F.Braun. « Recherche et Développement pour la Conception d'ASIC pour Commande de Machines Electriques ». Lettre des Sciences Physiques N° 42 Mars/Avril, 1998.
- [45]: A. Kheldoun, « Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté ». Thèse de Magister, université de Boumerdès. Option : Electrification et Automatisation des Procédés Industriels, 2007.
- [46]: M. Ghanes. « Observation et commande de la machine asynchrone sans capteur mécanique ». Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Appliquée. Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes.
- [47]: A. Talha *, F. Bouchafaa *, E.M. Berkouk **, M.S. Boucherit **, C. Kouroughli*. « Nouvelle stratégie de la modulation calculée pour l'onduleur à sept niveaux à structure NPC ». 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and telecommunications. March 27-31, 2005 – TUNISIA
- [48]: H. Camblong. « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.

[49] : M. Alali, « contribution à l'étude des compensateurs Actifs des réseaux électriques basse tension (automatisation des systèmes électrique) ». thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur –strasbourg I (spécialité Electrotechnique, Electronique, Automatique).2002.

[50] : I.D. Landau, « commande des systèmes : conception, identification et mise en œuvre ». Paris, 2002.

[51] : A. Kheldoun, « Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté ». Thèse de Magister, université de Boumerdès. Option : Electrification et Automatisation des Procédés Industriels, 2007

[52] : N.ROMANI « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué». Thèse De Doctorat Spécialité Physique. École Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes ». université de Paris, 2007

Résumé :

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques (météorologie pour l'étude du comportement du vent, mécanique et chimie pour les contraintes et la composition des divers matériaux utilisés dans l'aérogénérateur, mécanique des fluides pour l'effet des masses d'air en mouvement sur les pales, électrotechnique pour la conversion électromécanique et l'adaptation de l'énergie électrique et automatique pour la commande de la turbine et de génératrice liée à cette dernière). C'est à la partie Automatique de cette chaîne de conversion qu'est consacré ce mémoire.

Après un bref rappel des concepts et équations régissant le fonctionnement d'un système éolien, ce document dresse une étude sur deux stratégies de commande de la vitesse mécanique des turbines éoliennes en zone 2 afin de maximiser la puissance produite.

La troisième partie présente une étude sur la génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation de cette dernière et sa stratégie linéaire de commande (commande vectorielle) sont détaillées.

La quatrième partie de ce mémoire est consacrée à la commande de l'échange de puissance entre le stator et le réseau en agissant sur les signaux rotoriques. Dans cette optique une commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques est mise en œuvre. Cette commande est élaborée et testée en synthétisant deux types de régulateurs linéaires : Proportionnel- Intégral et RST basé sur la théorie du placement de pôles. Les performances du dispositif sont analysées et comparées en termes de suivi de consigne, robustesse, et rejet de perturbations.

Mots Clefs :

Eolienne, modélisation, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, commande RST.

Abstract :

Many scientific competences are necessary to study wind energy conversion systems (meteorology for wind's behaviour study, mechanics and chemistry for constraints and composition of the materials used in the turbine, electrical engineering for electromechanical conversion and transformation of the electrical power and automatic for the control of the turbine and generator connected to it). The study presented in this document concerns the automatic part of this energy conversion system.

After a short recall of the concepts and equations governing wind energy conversion systems, this document makes a state of two strategies for the control of mechanic speed of the wind turbine in zone 2 in order to maximize the power product.

The third part presents a study of a doubly fed induction generator .A modelling of this last and its linear strategy of control (vector control) are detailed.

The fourth part of this document is devoted to a vector control of the generator with active and reactive stator powers as control variables. This control is elaborated and tested by synthesizing two different linear controllers: Proportional Integral and RST based on the poles placement theory. The performances of the system are analyzed and compared in terms of reference tracking, robustness, and disturbances rejection.

Keywords:

Wind turbine, modelling, doubly-fed induction machine, vector control, RST control.

المخلص :

يشمل تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية عدة تخصصات علمية (الأرصاد الجوية لدراسة سلوك الرياح، الميكانيك والكيمياء للقواعد الإجابارية و تكوين مختلف المواد المستعملة في التوربينات، ميكانيك الموانع لتأثير الكتل الهوائية على تحريك الشفرات، الالكترونقني للتحويل الإلكتروميكانيكي و تكييف الطاقة الكهربائية و التخصص الألي للتحكم في سرعة التوربينة و المولدة المتصلة بها. و قد خصصنا هذه الأطروحة للتخصص الألي.

بعد عرض وجز لمفاهيم و معادلات تيسير اشتغال نظام طاقة الرياح، قمنا بدراسة إستراتيجيتين للتحكم في السرعة الميكانيكية للتوربينة في المنطقة (2) من أجل تحقيق أقصى قدر ممكن من الطاقة المنتجة.

الجزء الثالث من هذه الأطروحة يقدم دراسة للمولد اللازامني مزدوج التغذية. مع تفصيل لنمذجة هذه الأخيرة و إستراتيجية التحكم

الخطي لها (، التحكم الشعاعي).

و قد خصص الجزء الرابع من هذه الرسالة للتحكم في تبادل الاستطاعة بين الجزء الثابت والشبكة وذلك بالتأثير على إشارات الجزء الدوار. في هذا السياق تم تطبيق التحكم الشعاعي على الاستطاعة الفعالة و الردية. هذا التحكم وضع و اختبر بتركيب نوعين من المنظمات الخطية : تناسبية-تكاملية و RST الذي يستند على نظرية تنسيب الأقطاب. يتم تحليل ومقارنة نتائج الجهاز من حيث اتباع المرجعية ، الصلابة و رد الاضطراب (التشويش).

الكلمات المفاتيح :

طاقة الرياح، النمذجة ، للمولد اللازامني مزدوج التغذية ، التحكم الشعاعي ، التحكم RST.