

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU

Faculté de Génie Électrique et d'Informatique

Département d'Électrotechnique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Électrotechnique

Option : Machines Électriques

Thème :

**ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'ÉMULATEURS D'UNE
TURBINE ÉOLIENNE**

Proposé et dirigé par :

M. Tahar OTMANE-CHERIF

M. Ali BECHOUCHE

Réalisé par :

M. Abdallah HEDIR

M. Samir GHOUILEM

Promotion 2012

Avant-propos

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués en vue de l'obtention du diplôme de Master académique en électrotechnique, Option : Machines électriques.

Nous tenons à remercier notre encadreur monsieur **Tahar OTMANE-CHERIF**, Maitre de Conférences à l'UMMTO, d'avoir accepté de diriger notre travail, nous le remercions également pour ces qualités humaines et ses conseils, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons à remercier également notre co-encadreur monsieur **Ali BECHOUCHE**, Maitre Assistant à l'UMMTO, pour sa rigueur scientifique et les conseils pertinents et avisés qu'il nous a prodigués pour la réussite de ce travail. Nous sommes profondément reconnaissant envers lui pour sa disponibilité et de nous avoir supporté (dans tout les sens du terme) pendant la durée de ce mémoire.

Nous adressons nos remerciements aux messieurs **Hamid SEDIKI** et **Boussad BOUKAIS** Maitres de Conférences à l'UMMTO, pour leurs éclaircissements, leurs conseils judicieux et éclairés et d'avoir aussi accepté d'examiner ce travail.

Nous adressons nos remerciements à monsieur **Salah HADDAD**, Professeur à l'UMMTO, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, en acceptant de présider le jury.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de notre grand respect.

Nous aimerons remercier maintenant **Djaffar, Koceila** et **Hamid** jeunes doctorants avec qui nos discussions ont enrichi nos connaissances.

Enfin, nous adressons un grand MERCI pour l'ensemble des étudiants de notre promotion, qui ont su créer une ambiance agréable pendant toutes ces années d'études, nous leur exprimons notre profonde sympathie et leur souhaitons beaucoup de bonheur et de réussite dans leurs vies personnelle et professionnelle futurs.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père, paix sur lui.

A ma mère qui ma toujours soutenu, que dieu la protège.

A ma grand mère « yemazizou ».

A mes frères et sœurs.

A mes neveux et mes nièces.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui me sont chers.

Abdallah

Je dédie ce travail :

A mes chers parents, mon père qui ne cesse de m'encourager, ma mère symbole de sacrifices, sans eux je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

A mes chers frères « Mhend, Hamid, Menad, Amine ».

A toute la famille.

A tous mes amis « Mehami Omar, Goudjil Hamid, Omar, Naim ,Ryad, Smail, Amar, Ahmed, Lounas, Lyes, Hamid, Said, Karim».

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Samir

« Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien »

Platon

Tables des matières

Introduction générale	7
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens	9
I-1-Historique	11
I-2-L'énergie éolienne	12
<i>I-2-1-Premières utilisations et redécouverte</i>	12
<i>I-2-2-Situation actuelle de l'énergie éolienne</i>	13
I-3-Classification des éoliennes	14
<i>I-3-1-Eolienne à axe vertical</i>	14
<i>I-3-1-1-Rotor de Savonius</i>	14
<i>I-3-1-2-Rotor Darrieus</i>	15
<i>I-3-2-Eolienne à axe horizontal (HAWT)</i>	17
<i>I-3-2-1-Eolienne à hélice sous le vent (Down-Wind)</i>	17
<i>I-3-2-2-Eolienne à hélice face au vent (Up-Wind)</i>	18
I-4-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	18
<i>I-4-1-Avantages</i>	18
<i>I-4-2-Inconvénients</i>	19
I-5-Processus énergétique des éoliennes	20
<i>I-5-1-Constitutions des aérogénérateurs</i>	20
<i>I-5-2-Fonctionnement des aérogénérateurs</i>	21
I-6-Notions théoriques	21
<i>I-6-1-Le coefficient de puissance C_p</i>	21
<i>I-6-2-La limite de BETZ</i>	22

<i>I-6-3-Le ratio de vitesse λ</i>	22
<i>I-6-4- L'angle de calage β</i>	22
I-7-Conversions d'énergies	22
<i>I-7-1 Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique</i>	23
<i>I-7-2-1-Fonctionnement à vitesse fixe</i>	24
<i>a-Machine asynchrone à cage d'écureuil</i>	24
<i>b- Machine asynchrone à double stators</i>	26
<i>I-7-2-2-Fonctionnement à vitesse variable</i>	26
<i>a-Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une Interface d'électronique de puissance</i>	28
<i>b-Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"</i>	29
<i>b-1-Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée</i>	29
<i>b-2-Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer</i>	30
<i>b-3-Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI</i>	31
<i>b-4- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur</i>	32
<i>c-Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants</i>	32
<i>d-Machines à structures spéciales</i>	33
<i>d-1-Machine à réluctance variable (MRV) pure</i>	34
<i>d-2-Machine à réluctance variable (MRV) excitée</i>	34
<i>I-7-2-3-Comparatif entre les deux fonctionnements</i>	34
I-8-Conclusion	35
Chapitre II : Modélisation et commande en puissance de la turbine éolienne	36
II-1-Introduction	40

II-2-Modélisation mécanique et aérodynamique de la turbine éolienne	40
<i>II-2-1-Modélisation aérodynamique de la turbine</i>	40
<i>II-2-2-Modélisation mécanique de la turbine</i>	42
<i>II-2-2-1-Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine</i>	42
<i>II-2-2-2-Modèle de la turbine</i>	43
<i>II-2-2-3-Le modèle du multiplicateur</i>	44
<i>II-2-2-4-Mise en équations de la turbine éolienne</i>	44
<i>II-2-2-4-1-Equation mécanique de l'arbre de la génératrice</i>	45
<i>II-2-2-4-2-Calcul de l'inertie totale J_T et du coefficient de frottement total F_T</i>	45
<i>a-Calcul de J_T</i>	45
<i>b-Calcul de F_T</i>	47
II-3-Modélisation et Reproduction des variations du vent	48
<i>II-3-1-Origine du vent</i>	48
<i>II-3-2-Modèle d'ajustement (Distribution de WEIBULL)</i>	48
<i>II-3-3-Reproduction des variations du vent</i>	49
II-4-Etude d'une turbine éolienne	51
<i>II-4-1-Courbe caractéristique du coefficient de puissance utilisé</i>	52
<i>II-4-2-Interpolation polynomiale et expression analytique de la courbe caractéristique du coefficient de puissance utilisé</i>	53
II-5-Simulations	54
<i>II-5-1-Simulation avec vitesses instantanées de vent</i>	54
<i>II-5-1-1-Calcul de la puissance maximale de la turbine</i>	54
<i>II-5-1-2-Calcul du couple optimal de la turbine</i>	55
<i>II-5-2-Simulation en boucle ouverte</i>	55
<i>II-5-3-Extraction du maximum de la puissance du vent</i>	57
<i>II-5-3-1-Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation</i>	59
<i>II-5-3-2- Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation</i>	61

II-6-Résultats de simulations	62
<i>II-6-1-Résultats de simulation à vitesses constantes de vent</i>	62
<i>II-6-2-Résultats de simulation en boucle ouverte</i>	64
<i>II-6-3-Résultats de simulation du contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation</i>	66
<i>II-6-4 Résultats de simulation du contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation</i>	68
II-7-Conclusion	70
Chapitre III : Etude et mise au point d'un émulateur de turbine éolienne à base d'une MCC	71
III-1-Introduction	73
III-2-Construction de l'émulateur	73
III-3-Commande en couple et en vitesse de la machine à courant continu	75
<i>III-3-1-Modèle de la machine à courant continu</i>	75
<i>III-3-2-Stratégie de commande de la machine à courant continu</i>	76
III-4-Mise en œuvre de l'émulateur	78
III-5-Résultats de l'émulateur et leurs interprétations	79
<i>III-5-1-Résultats de simulation sans compensation du couple de la MCC</i>	79
<i>III-5-1-Résultats de simulation avec compensation du couple de la MCC</i>	81
III-6-Conclusion	83
Chapitre IV : Etude et mise au point d'un émulateur de turbine éolienne à base d'une MAS	84
IV-1-Introduction	88
IV-2-Modélisation de la machine asynchrone	88
<i>IV-2-1-Description</i>	88
<i>IV-2-2-Définition des angles</i>	89
<i>IV-2-3-Hypothèses simplificatrices</i>	90
<i>IV-2-4-Conventions de signe</i>	90
<i>IV-2-5-Mise en équations de la machine asynchrone</i>	91

<i>IV-2-5-1- Equations dans le système d'axes triphasé (a, b, c)</i>	91
<i>a-Equations électriques</i>	91
<i>b-Equations magnétiques</i>	92
<i>IV-2-5-2- Equations dans le système d'axes diphasé (d, q) –Transformation de Park</i>	92
<i>a-Les matrices de Park</i>	93
<i>b-Equations électriques</i>	94
<i>c-Equations magnétiques</i>	95
<i>IV-2-6- Choix du référentiel</i>	97
<i>IV-2-6-1- Référentiel lié au stator</i>	98
<i>IV-2-6-2- Référentiel lié au rotor</i>	98
<i>IV-2-6-3- Référentiel lié au champ tournant</i>	98
<i>IV-2-7- Puissance, couple et équation mécanique de la MAS</i>	99
<i>IV-2-7-1- Puissance absorbée par la machine</i>	99
<i>IV-2-7-2-Couple électromagnétique de la machine asynchrone</i>	99
<i>IV-2-7-3-Equation mécanique de la machine asynchrone</i>	99
<i>IV-2-8-Modèle d'état</i>	100
IV-3-Commande vectorielle de la machine asynchrone	100
<i>IV-3-1-Commande vectorielle à flux rotorique orienté</i>	101
<i>IV-3-2-Estimateurs de la commande vectorielle</i>	102
<i>IV-3-2-1-Estimation de la pulsation rotorique</i>	102
<i>IV-3-2-2-Estimation de la pulsation statorique</i>	102
<i>IV-3-2-3-Estimation du couple électromagnétique</i>	103
<i>IV-3-2-4-Estimation du flux rotorique</i>	103
<i>IV-3-3-Processus électrique et couplage non linéaire</i>	104
<i>IV-3-4-Découplage par compensation</i>	106
<i>IV-3-5-Schéma global de la commande vectorielle directe à flux rotorique orienté</i>	108
<i>IV-3-6-Calcul des différents régulateurs</i>	109

<i>IV-3-6-1-Régulateur pour le courant magnétisant rotorique</i>	109
<i>IV-3-6-2-Régulateur du couple électromagnétique</i>	111
<i>IV-3-6-3-Régulateur de vitesse</i>	112
<i>IV-3-7-Valeurs numériques des différents régulateurs</i>	113
<i>IV-3-7-1-Régulateur du courant magnétisant</i>	113
<i>IV-3-7-2-Régulateur du couple électromagnétique</i>	113
<i>IV-3-7-3-Régulateur de vitesse</i>	114
<i>IV-3-8-Simulation numérique de la machine asynchrone</i>	114
<i>a-Équations électriques</i>	114
<i>b-Équation mécanique</i>	114
<i>c-Couples électromagnétique et couple résistant</i>	115
<i>d-Les expressions des différentes constantes</i>	115
IV-4-Résultats de simulation numérique de la commande vectorielle et leurs interprétations	115
<i>IV-4-1-En poursuite de vitesse</i>	115
<i>IV-4-2-En régulation de vitesse</i>	117
IV-5-Mise en œuvre de l'émulateur	119
IV-6-Résultats de l'émulateur et leurs interprétations	120
<i>IV-6-1-Résultats sans compensation du couple de la MAS</i>	120
<i>IV-6-2-Résultats avec compensation du couple de la MAS</i>	120
IV-7-Comparaison entre les résultats des deux émulateurs	124
IV-8-Conclusion	125
Conclusion générale	127
Annexes	130
Bibliographie	131

Introduction générale

L'énergie est le moteur du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18^{ème} siècle, puis du pétrole au milieu du 20^{ème} siècle [2].

Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires [1]. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 Avril 1986 et récemment au Japon Avril 2011), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que des événements climatiques récents, comme la canicule de l'été 2003 en France, ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "Renouvelables"[2]. Parmi ces énergies, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

De nos jours, cette source d'énergie est devenue la plus attractive et la multiplication des éoliennes conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [1]. Dans ce contexte apparaît la technologie des simulateurs éoliens en vue de prédire la qualité de l'énergie dans les systèmes de conversions éoliens. Ces émulateurs servent de bancs d'essais expérimentaux destinés à étudier des génératrices électriques de façon à tester leur intégration et leur efficacité dans ces systèmes.

L'objectif principal de notre travail est le développement d'émulateurs pour une turbine éolienne, dans le but de se rapprocher au mieux du fonctionnement réel de cette dernière.

Pour atteindre cet objectif, nous avons réparti notre travail sur quatre chapitres.

- Le premier chapitre, dressera un état de l'art sur les systèmes éoliens. Par conséquent, une présentation du gisement éolien mondial sera donnée, ainsi qu'une illustration des différentes conversions d'énergie dans les systèmes éoliens.
- Dans le deuxième chapitre, on s'intéressera essentiellement à la modélisation et à la commande de la turbine éolienne. Les modélisations mécanique et aérodynamique seront faites et des commandes à MPPT vont être affectées à un modèle de turbine éolienne.
- Le troisième chapitre, montre les étapes de la mise en œuvre d'un émulateur physique de turbine éolienne de 3KW en utilisant une machine à courant continu. Ce simulateur nous permettra d'obtenir les mêmes caractéristiques statiques et dynamiques que celles de la turbine réelle.
- Dans le quatrième chapitre, tout comme dans le troisième, on se focalisera sur la réalisation d'un émulateur pour la turbine éolienne, mais plutôt basé sur une machine asynchrone. Dans un premier temps, nous allons proposer une modélisation de la machine asynchrone qui sera par ailleurs commandée vectoriellement par orientation du flux rotorique, dans le but d'élaborer le schéma de simulation avec le calcul des différents régulateurs. Par la suite nous allons mettre en œuvre l'émulateur. Enfin, une comparaison entre les deux émulateurs sera faite.
- Pour conclure, nous allons terminer notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

Résumé :

Ce chapitre présente un survol sur les systèmes éoliens. La première partie est dédiée à la présentation du gisement éolien mondial. La seconde partie est consacrée à la classification des éoliennes, à la description du principe de fonctionnement des aérogénérateurs, les avantages et les inconvénients de cette source d'énergie ont été aussi cités. La troisième partie touche aux différentes conversions d'énergies au niveau des aérogénérateurs à savoir la conversion mécanique et électromécanique.

Notations utilisées dans le chapitre

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse relative.

β : Angle de calage.

V_v : Vitesse du vent.

v_1, v_2 : Vitesses instantanées du vent.

Ω : Vitesse de rotation de l'éolienne.

Ω_1, Ω_2 : Vitesses de rotation instantanées de l'éolienne.

E_c : Energie cinétique du vent.

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien.

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent.

P_1, P_2 : Puissance instantanées du vent.

m : Masse de l'air.

ρ : Masse volumique de l'air.

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

\vec{F} : Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.

g : Glissement d'une machine asynchrone.

f : Fréquence du réseau électrique.

I-1-Historique

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives...), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut seulement disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs.

A part dans les régions plates, l'énergie hydraulique s'est ainsi souvent révélée plus intéressante, ce qui explique la situation actuelle où l'hydroélectricité est dominante parmi les sources renouvelables. En outre l'eau s'accumule facilement dans des réservoirs et permet de stocker de l'énergie. Vers le milieu du XIX^{ème} siècle, il y avait environ 200 000 moulins à vent en Europe, c'est principalement l'arrivée des machines à vapeur industrielles qui a initié leur déclin.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénération électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poul La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé une turbine éolienne à une dynamo en 1891. En France, contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20 m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30 m et génératrice synchrone de 800 KW à Nogent le Roi, bipale de 35 m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 KW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, aujourd'hui leaders dans le domaine, réalisèrent une machine tripale de 54 m pour une puissance de 2MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pilonnes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XX^{ème} siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celles à axe vertical connue sous le nom de Darrieus (leur inventeur), mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement plus que des machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle : l'expérience californienne a été la première à grande échelle

(le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 KW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, principalement à cause de leurs faibles ressources énergétiques classiques, aujourd'hui, ils conservent une très large avance au niveau mondial (Plus de la moitié des systèmes éoliens vendus).

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100W à quelques 10KW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé [11]).

I-2-L'énergie éolienne

I-2-1-Premières utilisations et redécouverte

Parmi toutes les énergies renouvelables, hormis celle de la biomasse, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires, la mouture du blé et le pompage de l'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 3000 ans avant J.C. environ [3].

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent [3]. Cette source d'énergie a été délaissée pendant des siècles, voir des millénaires. Et ce n'est qu'en 1891 que cette énergie reverra le jour avec le danois Poul Lacour, qui a construit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [5].

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'énergies traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique [5].

Cependant, si l'énergie éolienne était considérée il y a près de trois décennies comme la moins prometteuse des énergies renouvelables, la situation a considérablement évolué avec le

haut degré de maturité atteint ces dernières années par la technologie des aérogénérateurs à axe horizontal et le prix devenu compétitif de ceux ci [3].

I-2-2-Situation actuelle de l'énergie éolienne [6] :

En 2010, la capacité mondiale installée a atteint 196 630 MW, après 159 766 MW en 2009, 120 903 MW en 2008 et 93 920 MW en 2007.

Les investissements dans les nouveaux équipements ont diminué dans de nombreux pays du monde. Pour la première fois depuis plus de 20 ans, le marché est inférieur à celui de l'année précédente et a atteint un volume global de 38 642 MW, après 38 312 MW en 2009.

La Chine représente plus de la moitié du marché de 2010. En omettant la Chine, le marché mondial réduit d'un tiers et passe de 24 512 MW en 2010 à 18 714 MW en 2009.

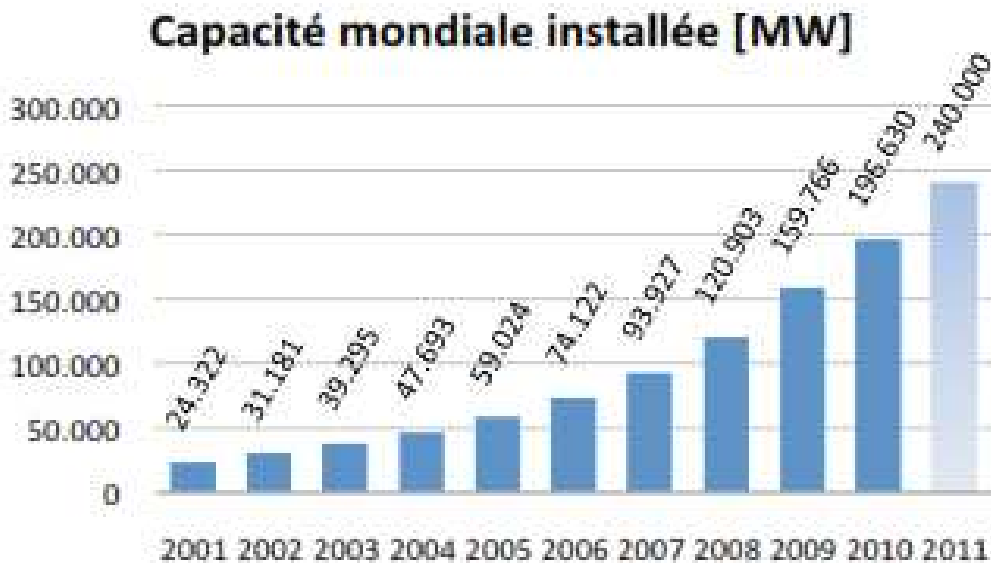


Figure I-1: Production mondiale de l'énergie éolienne entre 2001 et 2010 [6].

I-3-Classification des éoliennes

Selon la conception mécanique et suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes selon deux types :

I-3-1-Eolienne à axe vertical (VAWT)

Son principe de fonctionnement est le même que celui des roues hydraulique avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation, sa conception verticale offre l'avantage de mettre la génératrice et le multiplicateur au sol directement, facilitant ainsi les interventions de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol qui est moins fort qu'en hauteur (freiné par le relief) [7] .

De plus , certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [9].

Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques ou à pales droites (H-type) utilisant la variation cyclique d'incidence et la turbine type Savonius basée sur la « trainée différentielle » [8].

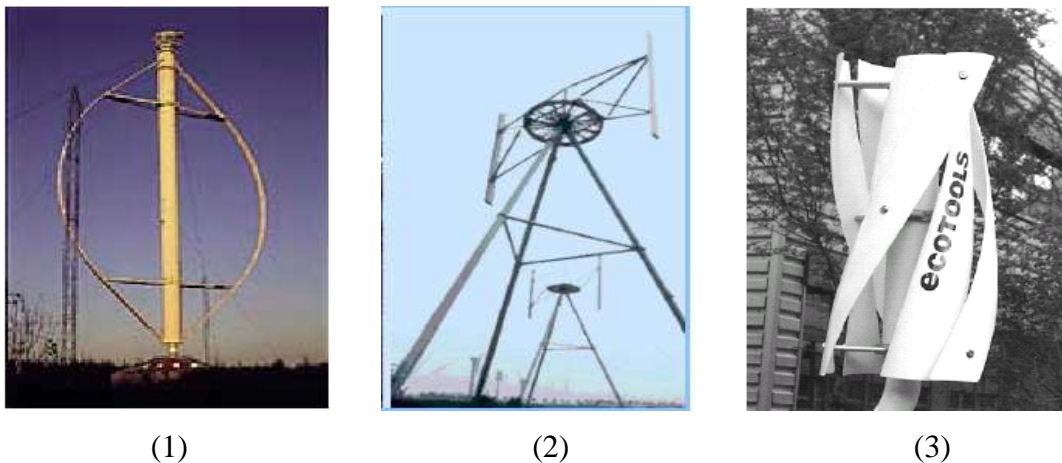


Figure I-2: Eoliennes à axe vertical (rotor Darrieus (images 1et2), rotor Savonius (image 3)).

I-3-1-1-Rotor de Savonius : Du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais breveté en 1925, utilise comme principe de fonctionnement la « trainée différentielle » utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble [1].

Le rotor de Savonius est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient C_p maximal atteint 0.3. Ce genre de rotor est caractérisé par un grand couple de démarrage. De plus, ils démarrent à de très faibles vitesses de vent, voisines de 2 à 3m/s.

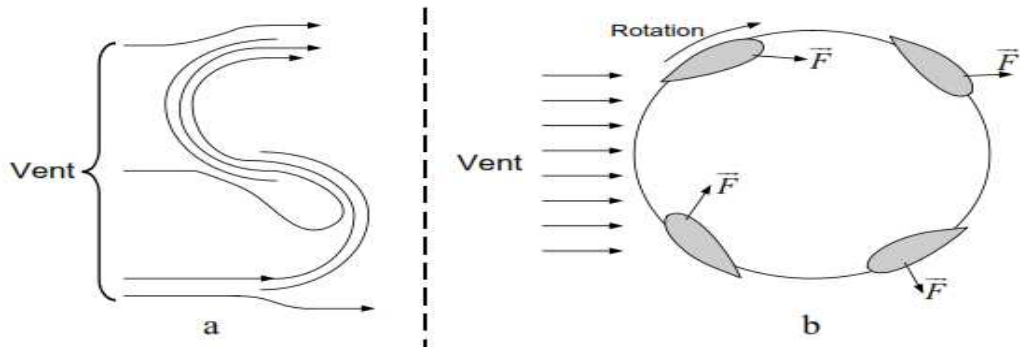


Figure I-3: Principe de fonctionnement du rotor Savonius (trainée différentielle) [13].

Le rotor de **Savonius**, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu industrialisés car il est facile à fabriquer. Il est très souvent utilisé dans les pays du sahel pour assurer le pompage d'eau [13].



Figure I-4: Rotor de Savonius

I-3-1-2-Rotor Darrieus : C'est le rotor le plus répandu, il fut inventé par l'ingénieur français Darrieus, qui déposa le brevet au début des années 30.

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse

propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent [13]. Le couple de démarrage est très faible et la mise en rotation de ce type d'éolienne nécessite un démarrage commandé à l'aide d'un moteur [10].

-Du point de vue topologie le rotor de Darrieus se distingue en quatre types :

- Le rotor tronconique.
- Le rotor cylindrique.
- Le rotor parabolique.
- Le rotor à variation cyclique.

-Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celle des haubans.

- ❖ Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine [13].
- ❖ En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontal.



Figure 1-5: Rotor de Darrieus.

I-3-2-Eolienne à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne [17].

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à une, deux, trois pales (les plus courantes) ou à multi-pales. Ce type d'éolienne présente un rendement aérodynamique plus élevé, démarre d'une façon autonome et possède un faible encombrement au niveau du sol [8].

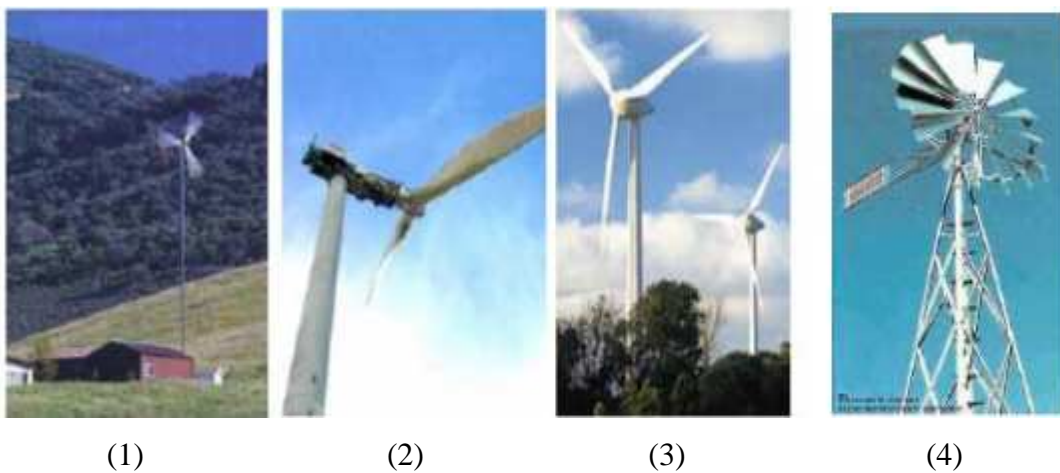


Figure I-6: Eoliennes à axe horizontal (tripales (image 1 et 3), bipales (image 2), multi-pales (image 4)).

-Selon la technologie HAWT, et suivant la direction du vent, on distingue deux types d'éoliennes à axe horizontal :

I-3-2-1-Eolienne à hélice sous le vent (Down-Wind) : Dans ce type d'éoliennes, le rotor se situe derrière le pylône (en aval), l'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône, cette éolienne a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit petit, il peut y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour (tower shadow), d'où une génération fluctuante d'électricité.

I-3-2-2-Eolienne à hélice face au vent (Up-Wind) : Le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de « l'ombre de la tour » (tower shadow) est bien moindre. À l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône. Il est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent [17].

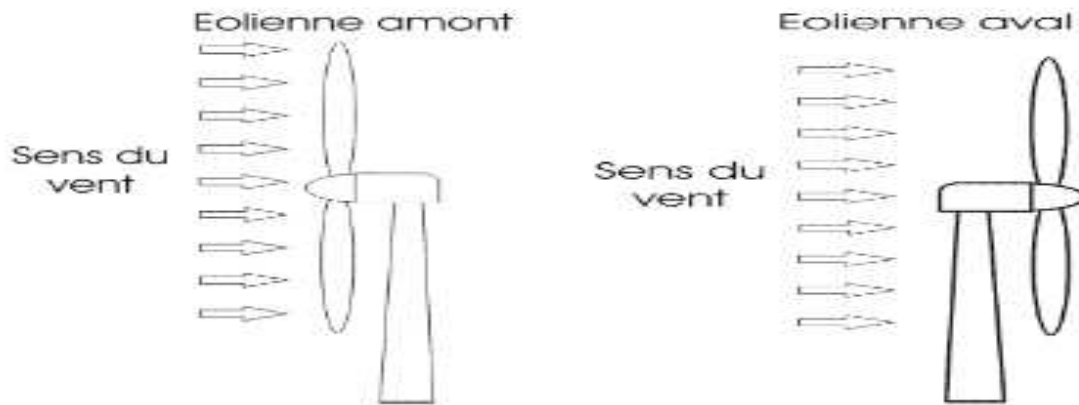


Figure I-7: Eolienne sous le vent (à droite), éolienne face au vent ou (à gauche) [25].

I-4-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Les avantages de l'énergie éolienne constituent une base très solide pour le développement rapide que connaît cette énergie. Cependant, cette source d'énergie présente beaucoup d'inconvénients qui représentent un frein pour son avancement.

I-4-1-Avantages

- Une source d'énergie inépuisable (énergie du vent).
- L'énergie éolienne est propre et non polluante, respectant l'environnement.
- Constitue une vraie solution pour remplacer les sources d'énergie traditionnelles à risques (par exemple : le nucléaire).
- L'énergie éolienne s'inscrit dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂, et des déchets fossiles et nucléaires.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, puisque les éoliennes peuvent être arrêtées facilement, contrairement aux procédés chimiques et nucléaires, qui fournissent de l'énergie même lorsque l'on ne veut pas, engendrant beaucoup de pertes et par conséquent de mauvais rendements énergétiques.
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventées (sites isolés).

- C'est la source de production d'électricité qui subit le plus haut taux de croissance.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables. Le coût de l'énergie éolienne continue à diminuer grâce aux percés technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Une énergie très intéressante pour les pays en développement, ayant un besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. Le coût d'investissement est très faible par rapport à d'autres énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie peut facilement être intégré dans un système électrique existant déjà.

I-4-2-Inconvénients :

- Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent), la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas toujours constante. La qualité de la puissance produite n'est donc toujours pas très bonne. Auparavant, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais le développement de l'éolien, notamment dans les régions ventées, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électriques sont de plus en plus strictes.
- Impact visuel : Une éolienne industrielle, c'est une machine de 150 mètres de haut, pesant 300 tonnes, auxquelles s'ajoute un socle de plus de 1000 tonnes de béton [15], tout ça a engendré selon la majorité des enquêtes un réel refus des populations pour l'installation des parcs éoliens.
- Aspect écologique : l'énergie éolienne peut nuire à quelques écosystèmes, les éoliennes peuvent être un vrai danger pour la migration des oiseaux, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit, les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci.
- bruit des pales : les bruits mécaniques et aérodynamiques, non appréciés chez les populations, constituent un vrai problème pour la poussée de l'énergie éolienne.
- interférences électromagnétiques : les ondes électromagnétiques générées par les générateurs sont plus au moins dangereuses pour la santé des populations.
- A court terme, les systèmes éoliens ne sont pas rentables par rapport aux systèmes utilisant des sources d'énergies classiques.

I-5-Processus énergétique des éoliennes

I-5-1-Constitutions des aérogénérateurs [14] : La plupart des éoliennes, actuellement installées, utilisent des turbines éoliennes à axe horizontal tripales et à hélice en face du vent, dont la constitution est illustrée dans la figure ci-dessous :

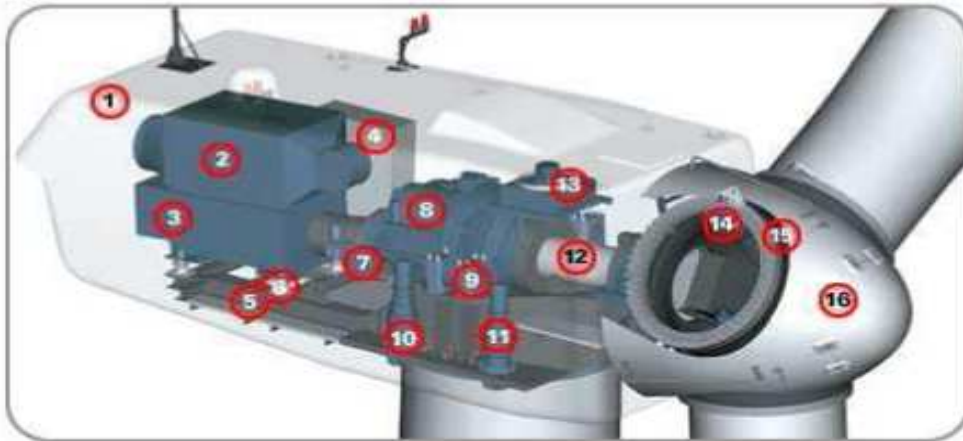


Figure I-8 : Constitution des aérogénérateurs (*NORDEX*)

Un mat, ou tour, supporte la nacelle (1), et la turbine (16), Il faut qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voir un ascenseur. La nacelle (1), partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tr/min).

Il est équipé d'un frein mécanique à disques (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile. La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leur extrémités. Un système utilisant des servomoteurs (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissant les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent (7).

I-5-2-Fonctionnement des aérogénérateurs

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tr/min) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 Tr/min, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel il est raccordé (50Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat, jusqu'à un niveau de 20 à 30KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut être alors de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement, peut atteindre 60 à 90KV, voir même 22KV, pour les grandes centrales.

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

I-6-Notions théoriques :

I-6-1-Le coefficient de puissance C_p

Il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il est fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine .il est souvent représenté en fonction du ratio de vitesse λ .

I-6-2-La limite de BETZ

S'identifie par la valeur maximale du coefficient de puissance C_p qui est égal à la valeur de $16/27 \approx 0.5926$. C'est cette limite théorique qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donné.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne à son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

I-6-3-Le ratio de vitesse λ

On le définit comme étant le rapport de la vitesse tangentielle de l'aubage sur la vitesse instantanée du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{I-1})$$

I-6-4- L'angle de calage β

C'est l'angle de inclinaison des pales de l'éolienne, l'action sur cet angle nous permet de récupérer le maximum de puissance et éviter tout aléa (destruction) de l'éolienne.

I-7-Conversions d'énergies :

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

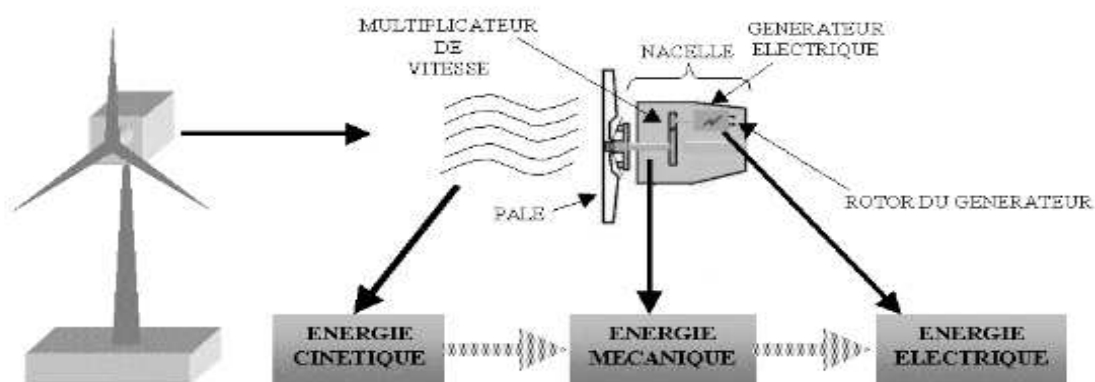


Figure I-9 : Conversions d'énergies dans une éolienne [1].

I-7-1 Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. Si on considère une masse d'air $m(\text{Kg})$, qui se déplace avec la vitesse V_v (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (\text{I-2})$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ (Kg/m^3), traversant la surface S (m^2), en une seconde est :

$$m = \rho \cdot S \cdot V_v \quad (\text{I-3})$$

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{I-4})$$

Cependant on ne peut pas extraire la totalité de la puissance. On introduit donc le coefficient de puissance de l'aérogénérateur par la relation :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \quad (\text{I-5})$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude du générateur éolien à capter l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc :

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{I-6})$$

$$\text{Avec : } S = \pi \cdot R^2 \quad (\text{I-7})$$

La valeur du coefficient de puissance C_p va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ) et de l'angle d'inclinaison des pales β .

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I-8})$$

I-7-2-La conversion électromécanique

I-7-2-1-Fonctionnement à vitesse fixe

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes à cause de la dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de secondes). Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations [1]. Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type de fonctionnement :

a-Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique.

Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pâles (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme ($N_s = 1500 \text{ Tr/min}$, pour $p=2$) pour un fonctionnement en génératrice.

La rotation des pâles par des actionneurs hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage β . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeaux des pâles ($\beta=90^\circ$) [26].

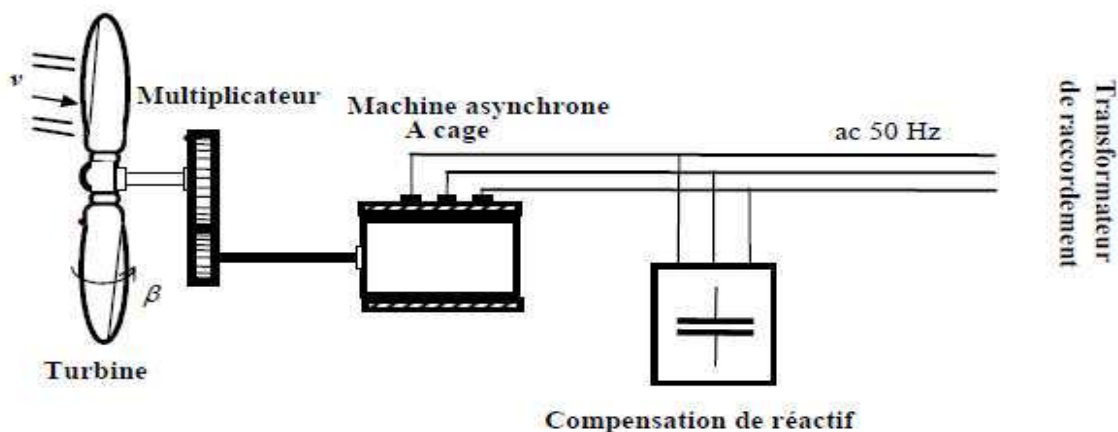


Figure I-10 : Eolienne à vitesse fixe utilisant une MAS à cage d'écureuil [31].

Les diverses qualités de cette machine comme la robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour son utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (I-11).

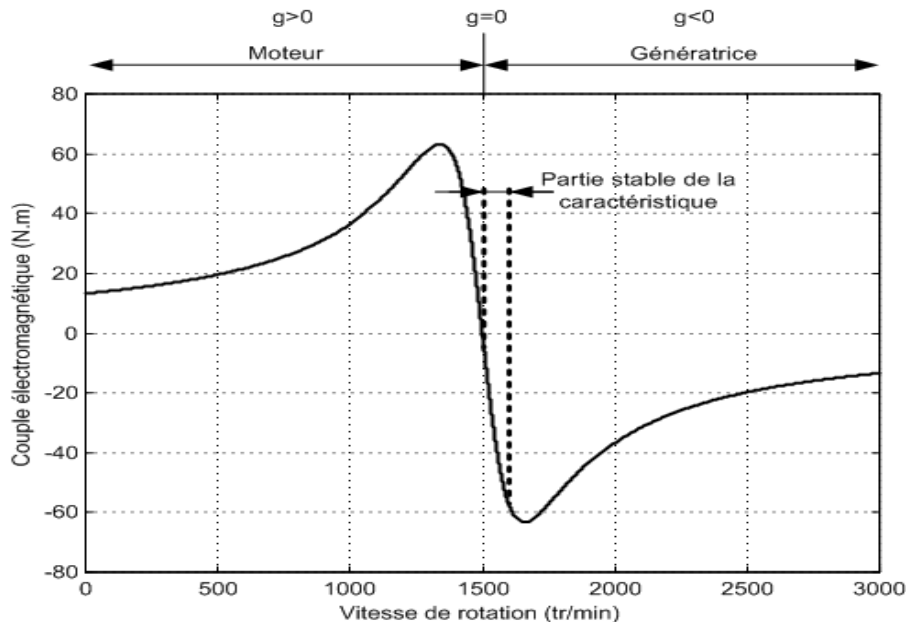


Figure I-11 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles [1].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min. La machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (I-10) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [1].

b-Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (figure (I-12)) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

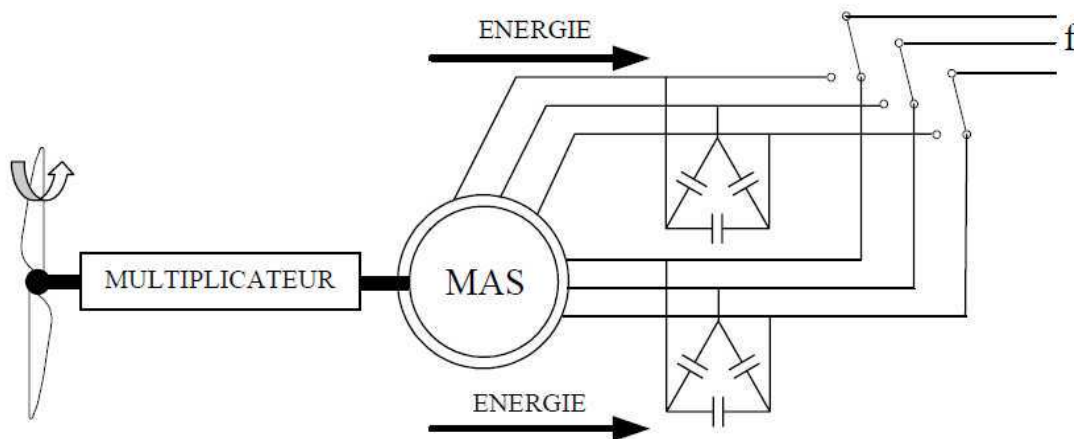


Figure I-12 : Eolienne à vitesse fixe utilisant une MAS à double stator [31].

I-7-2-2-Fonctionnement à vitesse variable

En vitesse variable, on régule le système éolien de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le « *Maximum Power Point Tracking* » (MPPT). La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne $P(\Omega)$. Alors on peut réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de

fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance [24].

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I-13)

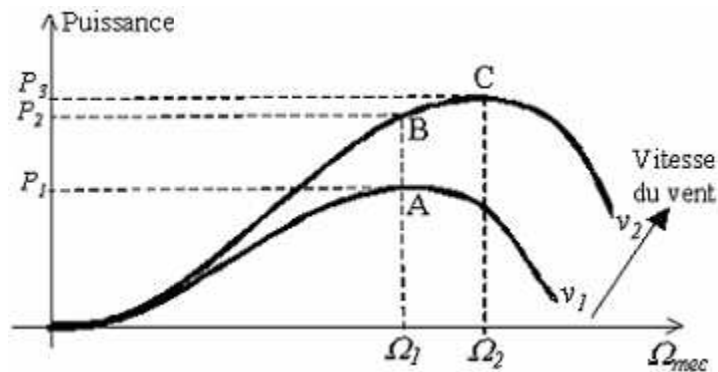


Figure I-13 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent [13].

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique de la génératrice variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée d'où l'intérêt de faire fonctionner les éoliennes de grande puissance à vitesse variable. Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite [21].

On peut citer d'autres avantages des éoliennes à vitesse variable comparées à celles fonctionnant à vitesse fixe comme suit :

- Pour des faibles vitesses de vent elles augmentent la plage de fonctionnement, la disponibilité et la puissance générée du système.

- Le système d'orientation des pales étant simplifié puisque le contrôle de la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le système d'orientation des pales.
- Elles réduisent les efforts mécaniques de par le fait que lors de variations du vent, la vitesse de la turbine est adaptée. L' "élasticité" ainsi créée permet d'amoindrir l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée pour ce domaine de fonctionnement [26].
- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est petite.

a-Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une Interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la (figure (I-14)) quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des variations brusques des tensions « dv/dt » importants qui peuvent réduire leur durée de vie [1].

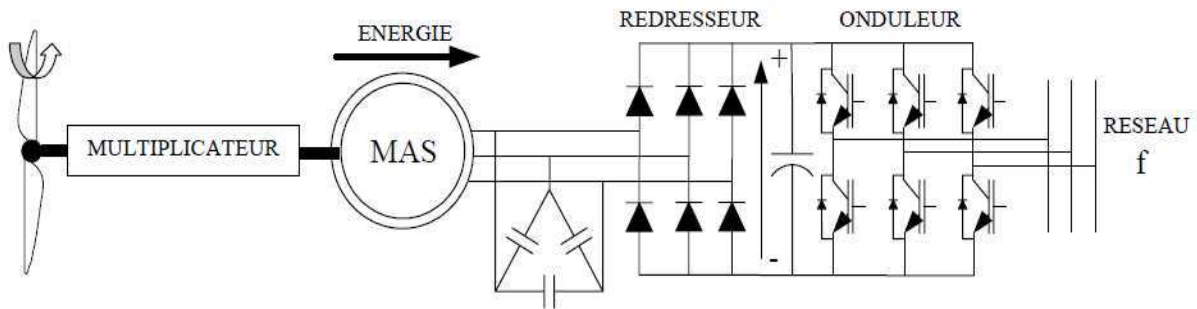


Figure I-14 : Eolienne utilisant une machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur [31].

b-Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur [1].

b-1-Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

La figure (I-14) montre la technologie (*Optislip de Vestas*) qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance du rotor dans les éléments résistifs, ce qui diminue le rendement du système de conversion [33].

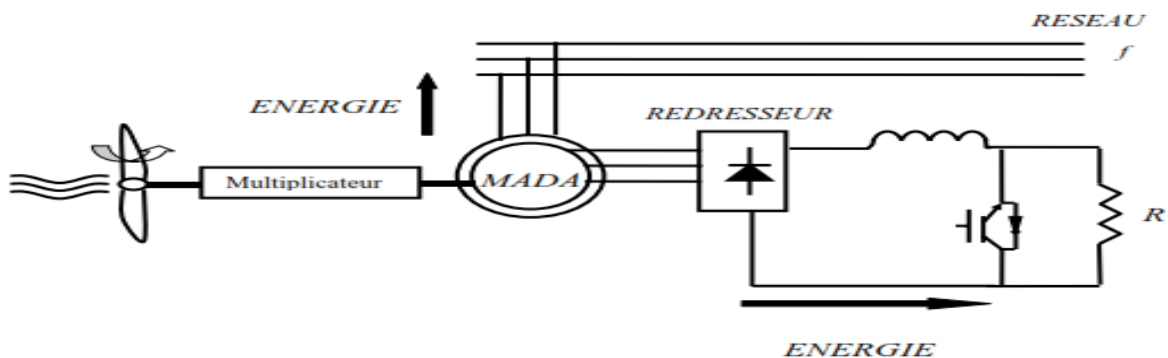


Figure I-15 : Eolienne utilisant une MADA avec contrôle de glissement de l'énergie dissipée [13].

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Le convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25% de la puissance nominal) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominale. C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté du réseau [13]. Puisque le convertisseur statique doit seulement traiter la puissance de glissement à faible communication. Dans ce cas, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau. Deux options de convertisseur au rotor sont alors utilisées. Dans la première un convertisseur ou la méthode *Scherbius* réalisant les régimes hypo/hyper synchrones. Ce cas favorise le fonctionnement à couple constant. Dans la seconde option, un convertisseur à deux étages unidirectionnel est utilisé ou qui est appelé méthode *Kramer* ou régime hypo synchrone [29].

b-2-Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (figure (I-16)). L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de *Scherbius* avec convertisseurs à IGBT [1].

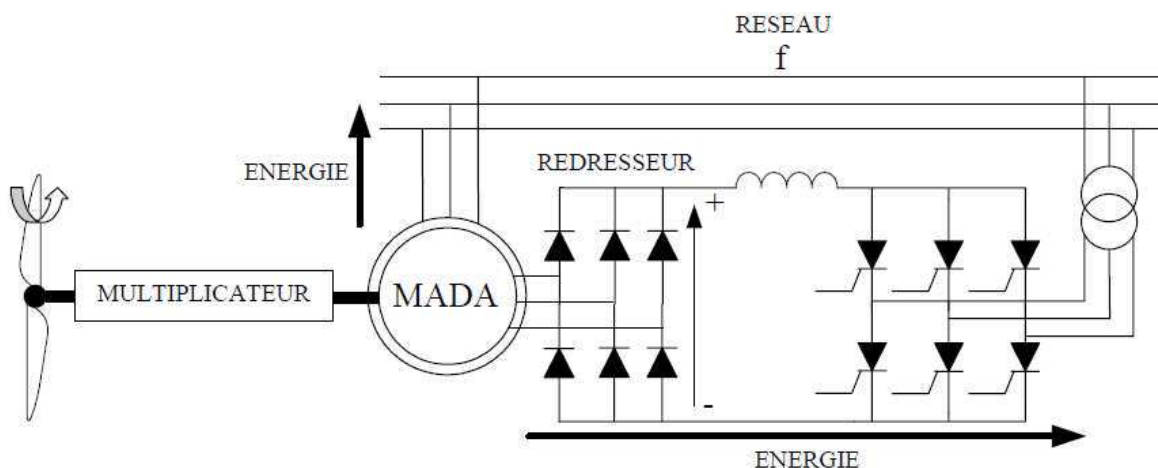


Figure I-16 : Eolienne utilisant une MADA-structure de Kramer [31].

b-3-Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [1].

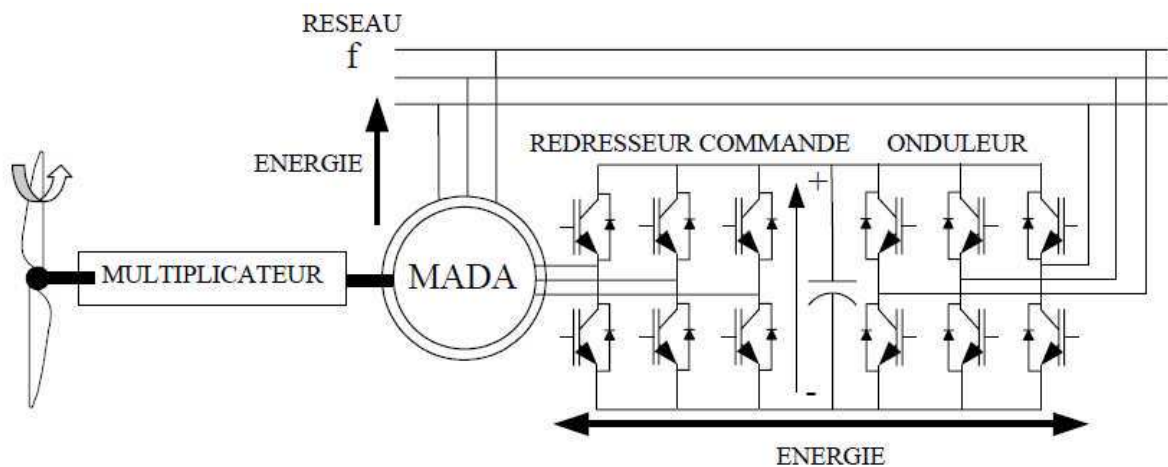


Figure I-17 : Eolienne utilisant une MADA-structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [31].

Ce dispositif est viable dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau, la puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevées dans ces mêmes enroulements [1].

b-4-Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (figure (I-18)), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [18]. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [13].

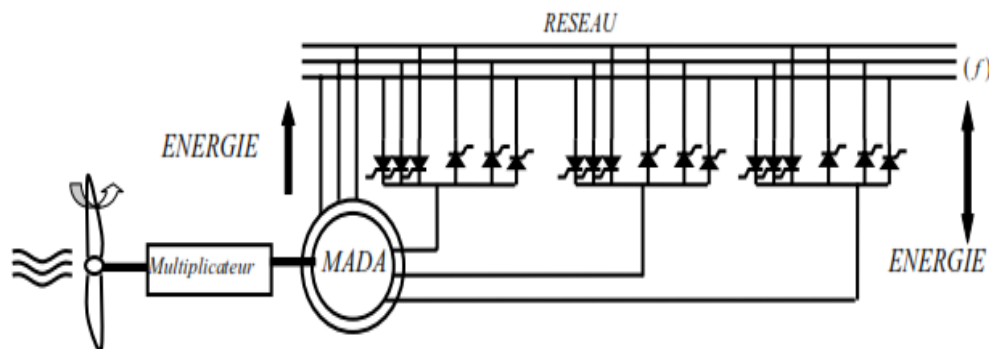


Figure I-18 : Eolienne utilisant une MADA-structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [13].

c-Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones couplées directement à la turbine évitant ainsi le multiplicateur, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (figure (I-19)) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents, dans ce cas le système de bagues et de balais est éliminé, et si les aimants permanents sont à grand nombre de paires de pôles (utilisation de la machine à faibles vitesses) le multiplicateur de vitesse peut être supprimé [1].

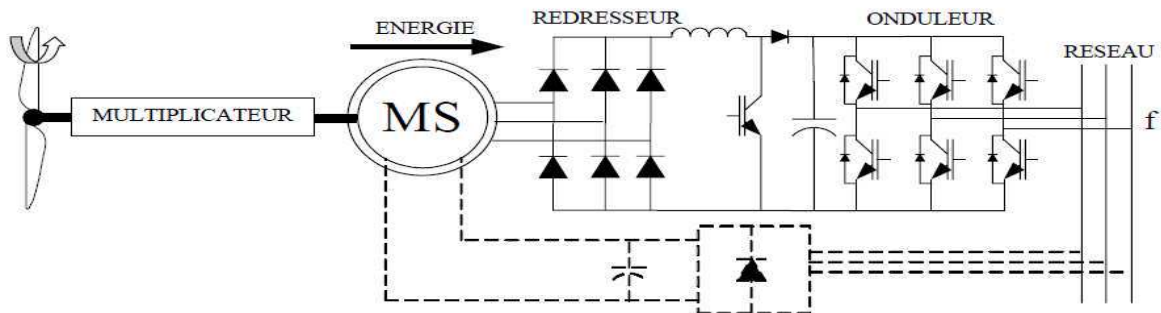


Figure I-19 : Eolienne utilisant une machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un dispositif redresseur-hacheur-onduleur à MLI [31].

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les dv/dt importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes [1].

d-Machines à structures spéciales

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable pure ou excitée. C'est leur potentiel de faible coût et de robustesse qui conduit à ces recherches [32]. C'est des machines dédiées aux applications éoliennes ou des machines offrant des caractéristiques intéressantes pour la basse vitesse de rotation. On notera que malgré son potentiel, la MRV n'a pas encore trouvé son application dans l'éolien [20].

d-1-Machine à réductance variable (MRV) pure

La structure de la MRV dite « pure » est très simple et composée d'un rotor passif et d'enroulements concentriques au stator. Pour un grand nombre de dents, les dents du stator sont regroupées en plots afin de faciliter le bobinage de la machine, on obtient alors une machine à plots dentés. C'est le principal avantage de cette structure : assurer un fonctionnement à basse vitesse (grand nombre de dents) tout en conservant un bobinage réalisable en utilisant une MRV à plots dentés.

d-2-Machine à réductance variable (MRV) excitée

Certaines MRV peuvent intégrer une excitation au rotor ou au stator. Cette excitation est effectuée par un circuit électrique d'excitation ou bien par des aimants permanents. Les machines à aimants peuvent conduire à un gain en puissance contrebalançant le coût des aimants ; à une structure intégrant toujours une excitation [20].

I-7-2-3-Comparatif entre les deux fonctionnements

<i>Fonctionnement à vitesse fixe</i>	<i>Fonctionnement à vitesse variable</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simplicité du système électrique. ✓ Plus grande fiabilité. ✓ Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. ✓ Moins cher. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Augmentation du rendement énergétique. ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance. ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Figure I-20 : Tableau comparatif entre le fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable.

I-8-Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne des généralités sur les systèmes éoliens.

Une brève description du gisement éolien a été présentée dans la première partie du chapitre, ainsi quelques statistiques sur la situation actuelle ont été données.

La deuxième partie est consacrée à la classification des éoliennes, et citer ainsi les différents types d'éoliennes utilisés dans l'industrie pour la production de l'énergie électrique, nous avons aussi cité leurs différents constituants (Exemple d'une turbine éolienne à axe horizontal, qui fera l'objet de notre étude dans les chapitres à venir). Pour enlever toute ambiguïté, nous avons aussi décrit le principe de fonctionnement des aérogénérateurs. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne ont été aussi abordés dans cette partie, des avantages qui représentent une base solide pour le développement de cette source d'énergie. Cependant, beaucoup d'inconvénients persistent, et sont l'objet d'études de beaucoup d'industriels, pour y remédier à tous leurs aspects négatifs, qui représenteront de vrais freins pour le lancement de cette énergie à l'avenir.

La troisième et dernière partie est consacrée aux conversions d'énergies. Ainsi tout le processus énergétique d'une éolienne a été abordé, un aperçu sur la conversion mécanique a eu lieu et le phénomène physique de cette dernière a été mis en équations. Quant à la conversion électromécanique, ces différents fonctionnements ont été abordés, à savoir le fonctionnement à vitesse fixe et à vitesse variable et les diverses machines électriques utilisées dans cette conversion ont été exposées.

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisque il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement coté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Chapitre II : Modélisation et commande en puissance de la turbine éolienne

Résumé :

Le chapitre s'intéresse essentiellement à la modélisation et à la commande de la turbine éolienne. La première partie aborde les modélisations mécanique et aérodynamique, ainsi que celle du vent en vue de reproduire ces variations. La deuxième partie représente une formulation du problème, par ailleurs la courbe caractéristique de la turbine a été tracée et l'expression analytique régissant cette dernière est tirée. La troisième partie est dédiée aux différentes méthodes de contrôle au niveau de l'éolienne ainsi qu'à leurs simulations. La dernière partie est consacrée aux résultats de simulations des différentes méthodes de contrôle, une conclusion est donc tirée quant à leur fiabilité.

Notations utilisées dans le chapitre

C_p : Coefficient de puissance.

β : Angle de calage.

λ : Vitesse relative.

$C_{p_{\max}}$: Coefficient de puissance maximal.

λ_{opt} : Vitesse relative optimale.

V_1 : Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.

V_2 : Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.

V_v : Vitesse du vent traversant le rotor de l'aérogénérateur.

Ω_t : Vitesse angulaire de rotation de la turbine éolienne.

Ω_g : Vitesse de rotation angulaire de la génératrice.

Ω_{tref} : Référence de la vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{gref} : Référence de la vitesse de rotation de la génératrice.

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice.

C_g : Couple mécanique de la génératrice.

C_{emref} : Référence du couple électromagnétique de la génératrice.

C_{gopt} : Couple optimal de la génératrice.

C_{emopt} : Couple électromagnétique optimal de la génératrice.

C_{top} : Couple optimal de la turbine.

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien.

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent.

P_{JT} : Puissance totale due à l'effet inertiel.

P_{Jt} : Puissance due à l'effet inertiel au niveau de la turbine.

P_{Jg} : Puissance due à l'effet inertiel au niveau de la génératrice.

P_{FT} : Puissance totale dissipée par frottements.

P_{ft} : Puissance dissipée par effet inertiel au niveau de la turbine.

P_{fg} : Puissance dissipée par effet inertiel au niveau de la génératrice.

P_g : Puissance de la génératrice.

P_t : Puissance de la turbine.

P_{tref} : Référence de la puissance de la turbine

P_{tmax} : Puissance maximale de la turbine.

P_{gmax} : Puissance maximale de la génératrice.

J_t, J_g : Inerties de la : turbine, MADA.

J_T : Inertie totale du système turbine+MADA.

f_t, f_g : Frottements de la : turbine, MADA.

F_T : Coefficient de frottement total du système turbine+MADA.

ρ : Densité de l'air (1.225 Kg/m³).

- S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
- m : Masse d'air en mouvement.
- R : Longueur de la pale de l'éolienne.
- G : Gain du multiplicateur.
- $f(V)$: Densité de probabilité, distribution en fréquences des vitesses du vent mesurées.
- V : Vitesse instantanée du vent.
- k : Facteur de forme de Weibull.
- C : Facteur d'échelle de Weibull.
- $V_v(t)$: Evolution temporelle de la vitesse du vent.
- V_m : Composante lente de $V_v(t)$.
- V_t : Composante de turbulence de $V_v(t)$.
- S_i : Puissance des composantes spectrales de la décomposition de Van der Hoven.
- ω : Pulsation discrète.
- φ_i : Phase discrète des amplitudes A_i .
- A_i : Amplitude des composantes spectrales de la décomposition de Van der Hoven.

II-1-Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

La modélisation et la commande de la turbine éolienne sont devenues une pratique commune de nos jours, dans le but de la maximisation de la puissance de la turbine et de la simplification structurelle. Par ailleurs, beaucoup de méthodes de commande de l'éolienne existent parmi elles celle de l'extraction du maximum de puissance disponible dans le vent (MPPT) qui est essentiellement le but de ce chapitre en plus de la modélisation de la turbine éolienne.

II-2-Modélisation mécanique et aérodynamique de la turbine éolienne

II-2-1-Modélisation aérodynamique

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

En supposant que la vitesse du vent V_v 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 est donnée par :

$$m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{II-1})$$

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

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II-2})$$

Soit en remplaçant m' par son expression dans (II-2):

$$P_m = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II-3})$$



Figure II-1 : Tube de courant d'air 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 :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{II-4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors : P_m/P_{mt}

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

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure (II-2)), on s'aperçoit que le ratio appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,5926$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

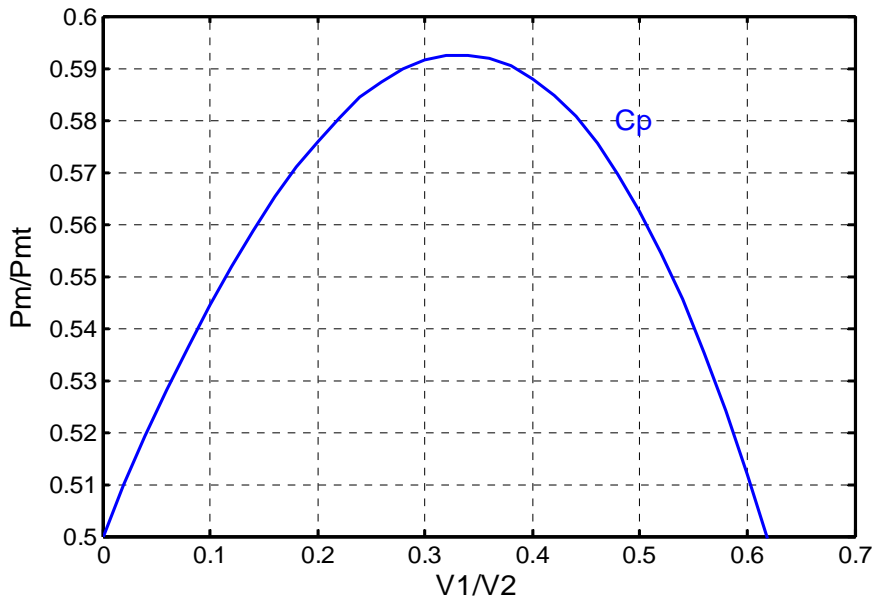


Figure II-2 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative.

Ce coefficient est fonction de la vitesse du vent, de l'angle de calage, et de la vitesse de rotation de la voilure. Le coefficient est en fait souvent donné en fonction de la vitesse relative définie par [1] : C_p

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II-6})$$

$R \cdot \Omega_t$: est la vitesse mécanique de la turbine.

II-2-2-Modélisation mécanique

II-2-2-1-Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine éolienne

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales considérées identiques et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Une inertie J_t .
- Un coefficient de frottement f_t .

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_g .
- Un coefficient de frottement f_g .

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse mécanique Ω_g . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée, alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, ce coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible. De même, la vitesse de la turbine étant faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses [18].

II-2-2-2-Modèle de la turbine

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

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

Les grandeurs de sortie de la turbine éolienne sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les grandeurs d'entrée précédentes [5].

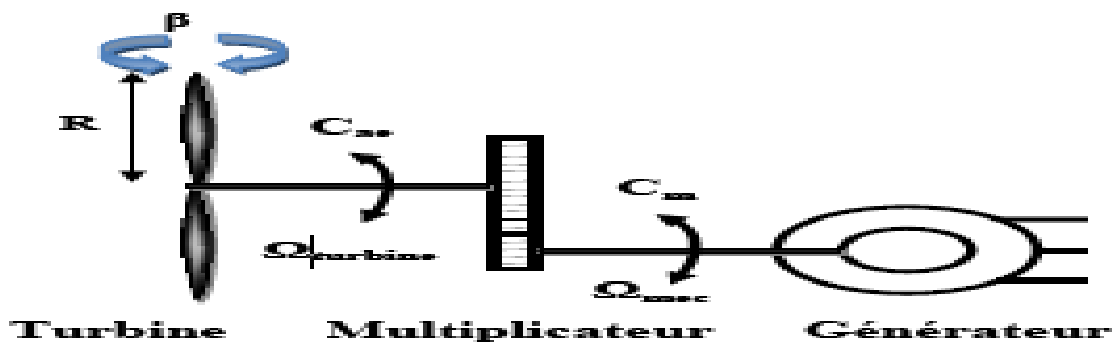


Figure II-3 : Schéma de la turbine éolienne.

II-2-2-3-Le modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice [5]. Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes [27] :

$$G = \frac{C_t}{C_g} \quad (\text{II-7})$$

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t} \quad (\text{II-8})$$

II-2-2-4-Mise en équation de la turbine éolienne

Comme nous l'avons vu précédemment le modèle mécanique de la turbine éolienne comporte deux masses, la turbine d'une part et la génératrice éolienne d'autre part comme l'illustre la figure (II-4) ci-dessous :

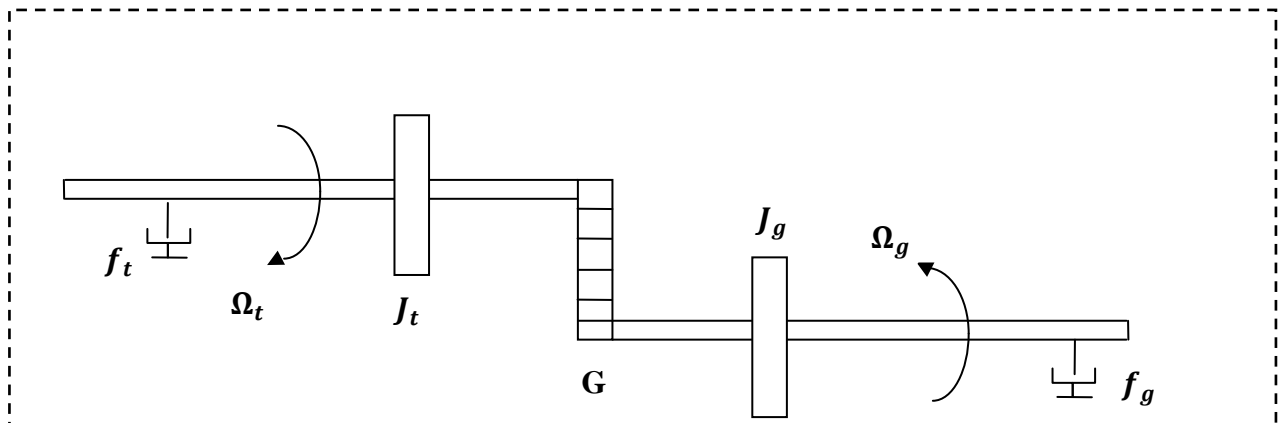


Figure II-4 : Modèle mécanique de la turbine (à deux arbres).

La configuration ci-dessus (à deux arbres) peut être ramenée à une autre constituée d'un seul arbre (arbre mécanique de la génératrice) en ramenant toutefois les frottements et l'inertie de la turbine au rotor de la génératrice éolienne.

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie J_t , et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle

mécanique proposé considère l'inertie totale J_T constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [18].

Ce même modèle mécanique sera caractérisé par le coefficient frottement total F_T , constitué à la fois des frottements de la turbine ramenés au rotor de la génératrice ainsi que ceux de la génératrice.

Le modèle mécanique équivalent (à un seul arbre) est illustré dans la figure ci-dessous :

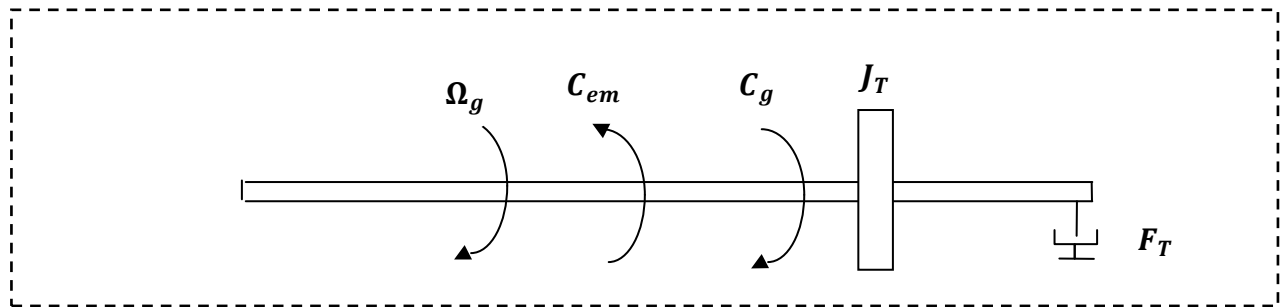


Figure II-5 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

II-2-2-4-1-Equation mécanique de l'arbre de la génératrice

D'après la figure (II-5), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre de la génératrice :

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + F_T \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (\text{II-9})$$

II-2-2-4-2-Calcul de l'inertie totale J_T et du coefficient de frottement total F_T

a-Calcul de J_T

En multipliant l'équation (II-9) par Ω_g on obtient l'équation ci-dessous qui englobe toutes les puissances du modèle de la turbine éolienne :

$$J_T \cdot \Omega_g \frac{d\Omega_g}{dt} + F_T \cdot \Omega_g^2 = (C_g - C_{em}) \cdot \Omega_g \quad (\text{II-10})$$

Par ailleurs, on définit la puissance due à l'effet inertiel qui s'écrit alors :

$$P_{JT} = J_T \cdot \Omega_g \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (\text{II-11})$$

La puissance due à l'effet inertiel est définie de la manière suivante:

$$P_{JT} = P_{J_t} + P_{J_g} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

P_{J_t} : La puissance due à l'effet inertiel au niveau de la turbine.

P_{J_g} : La puissance due à l'effet inertiel au niveau de la génératrice.

Ces deux puissances sont déterminées de la manière suivante :

$$P_{J_t} = J_t \cdot \Omega_t \cdot \frac{d\Omega_t}{dt} \quad (\text{II-13})$$

$$P_{J_g} = J_g \cdot \Omega_g \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (\text{II-14})$$

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide), ainsi on aura :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II-15})$$

En remplaçant l'équation (II-15) dans (II-13), on obtient :

$$P_{J_t} = \frac{J_t}{G^2} \cdot \Omega_g \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (\text{II-16})$$

En remplaçant (II-14) et (II-16) dans (II-12), on aura :

$$P_{JT} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \Omega_g \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (\text{II-17})$$

L'inertie totale du système sera donc :

$$J_T = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II-18})$$

b-Calcul de F_T

La puissance totale dissipée par frottement est donnée par :

$$P_{FT} = P_{ft} + P_{fg} \quad (\text{II-19})$$

P_{ft} : Puissance dissipée par frottement au niveau de la turbine.

P_{fg} : Puissance dissipée par frottement au niveau de la génératrice.

Ces deux puissances s'écrivent de la manière suivante :

$$P_{ft} = f_t \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II-20})$$

$$P_{fg} = f_g \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-21})$$

On aura alors :

$$P_{FT} = f_t \cdot \Omega_t^2 + f_g \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-22})$$

En remplaçant l'équation (II-15) dans (II-22), la puissance totale dissipée par frottement peut s'écrire alors :

$$P_{FT} = f_t \cdot \frac{\Omega_g^2}{G^2} + f_g \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-23})$$

Donc le coefficient de frottement total sera donné par l'expression qui suit :

$$F_T = \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \quad (\text{II-24})$$

L'équation mécanique du système sera alors :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (\text{II-25})$$

Les frottements de la turbine étant nuls, on aura alors l'équation mécanique suivante :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f_g \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (\text{II-26})$$

II-3-Modélisation et reproduction des variations du vent

II-3-1-Origine du vent

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre [30]. Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques [23].

II-3-2-Modèle d'ajustement (Distribution de WEIBULL)

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull. Sa densité de probabilité se présente sous la forme:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C} \right) \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} \cdot \exp \left(- \left(\frac{V}{C} \right)^k \right) \quad (\text{II-27})$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes [23].

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad (\text{II-28})$$

$$f(V_x \leq V) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad (\text{II-29})$$

La plupart des sites éoliens ont une vitesse de vent qui respecte la distribution de Weibull avec un paramètre de forme $k=2$. ainsi, on définit la distribution de Rayleigh (Weibull avec $k=2$), cette distribution est illustrée dans la figure ci-dessous [11] :

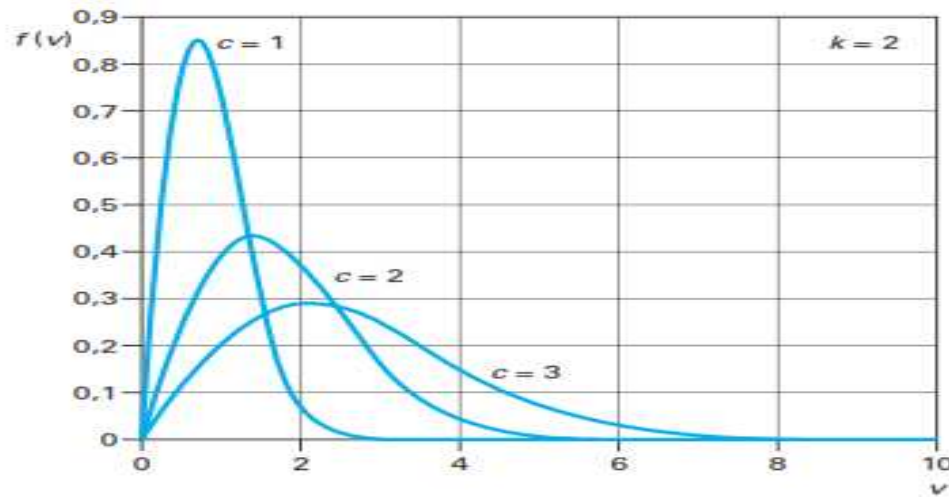


Figure II-6 : Distribution de Weibull pour $k=2$, avec c en paramètre [32].

II-3-3-Reproduction des variations du vent

Le vent est un champ de vitesses de déplacement de masse d'air dont la distribution spatiale est complexe. Afin de pouvoir éprouver les algorithmes de commande, il a fallu utiliser des modèles de vents. En effet, il était impossible de réaliser une capture pour tous les profils de vent qu'on souhaitait tester.

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois. Le spectre de Van der Hoven présente trois événements remarquables (figure (II-7)) : plusieurs pics d'énergie pour des basses fréquences autour de 1 an (variation saisonnière), 4 jours (variation climatique) et 1

jour (variation journalière) qui sont clairement identifiés aux mouvements atmosphériques de large amplitude [25].

Les travaux de C. Nichita ont montré que les variations du vent pouvaient être reproduites à partir de la densité spectrale établie par le météorologue Van der Hoven. Ce modèle considère la composante de turbulence du vent (dissociée de la composante lente) comme un processus aléatoire stationnaire. Il présente la variation du carré de la vitesse du vent en fonction de la période d'observation de celle-ci. La vitesse moyenne du vent est mesurée sur une échelle de temps variant de 5 jours à 2 secondes.

La discrétisation de la courbe de la figure (II-7) en pulsation ω_i avec la puissance correspondante S_i permet d'extraire l'amplitude A_i de chaque composante spectrale associée à ces pulsations :

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{S_i} \quad (\text{II-30})$$

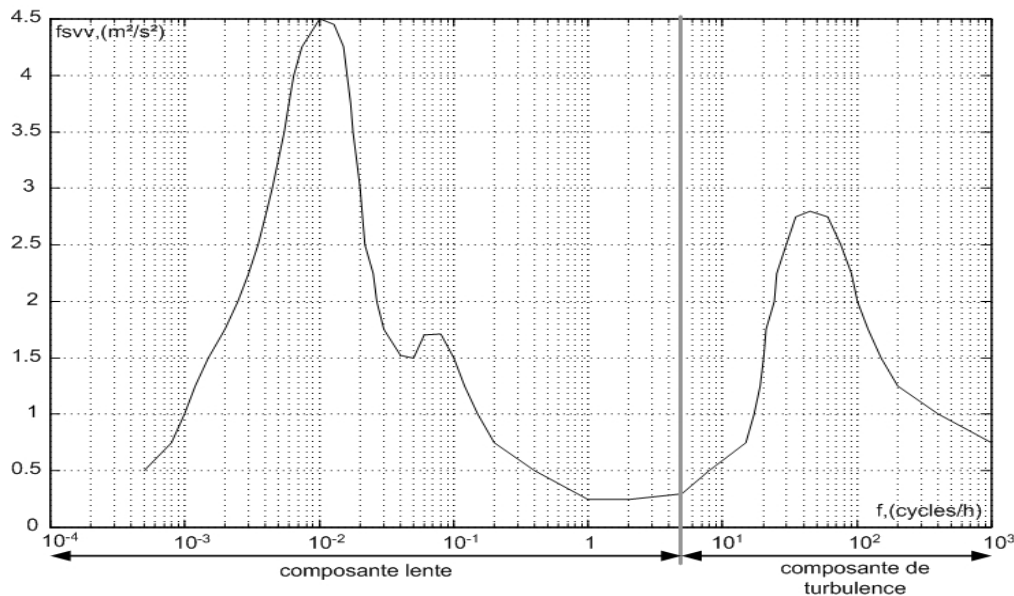


Figure II-7 : Spectre d'énergie des mouvements atmosphériques d'après Van der Hoven [1].

La variation $V_v(t)$ de la vitesse du vent est alors écrite en utilisant la somme des harmoniques correspondant à chaque pulsation ω_i avec une phase φ_i déterminée de façon aléatoire

$$V_v(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{II-31})$$

Avec N : nombre de valeurs discrètes utilisées pour l'échantillonnage.

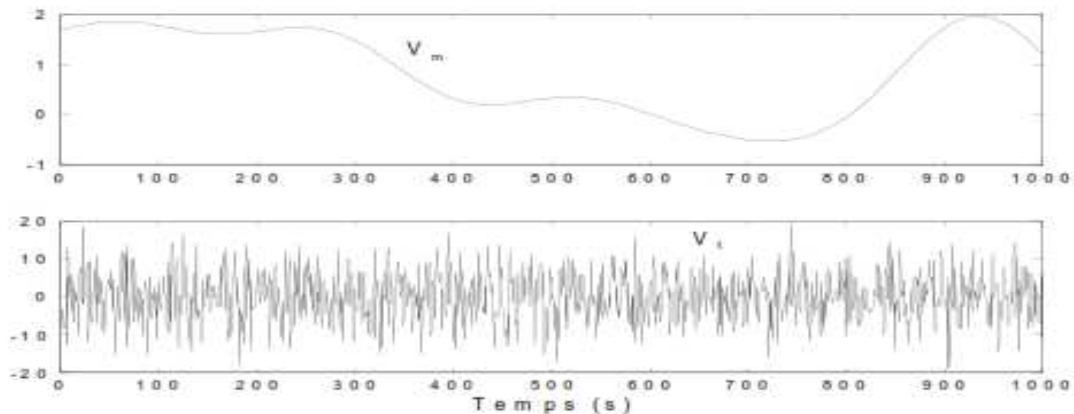


Figure II-8 : Composante lente et composante de turbulence de la vitesse du vent [1].

La vitesse de vent fait apparaître deux composantes : une composante lente correspondant à la vitesse moyenne du vent V_m et une composante rapide dite de turbulence V_t venant se superposer à cette vitesse moyenne. L'évolution des deux composantes sur 1000 secondes, une fois séparées, sont représentées sur la figure (II-8).

On constate aisément que quelle que soit la valeur de la vitesse moyenne du vent (caractérisée par la composante lente), la composante de turbulence possède les mêmes propriétés statistiques. En réalité, des campagnes de mesure ont démontré que l'importance de turbulences était liée à l'amplitude de la valeur moyenne [1].

II-4-Etude d'une turbine éolienne

Le travail est consacré à l'étude d'une turbine éolienne à axe horizontal, dont les paramètres sont donnés par le **tableau(1)** de l'annexe, l'étude de cet aérogénérateur a déjà fait l'objet de travail d'un groupe de chercheurs de l'université *Amirkabir* de Téhéran [4], dans le cadre de développement d'un émulateur d'une turbine éolienne.

Ces travaux nous représentent un support pour le développement d'une plateforme pour simuler les caractéristiques statiques et dynamiques d'un système réel de conversion d'énergie éolienne.

Les relevés expérimentaux du modèle de la turbine, nous ont permis d'obtenir la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ ci-après [4]:

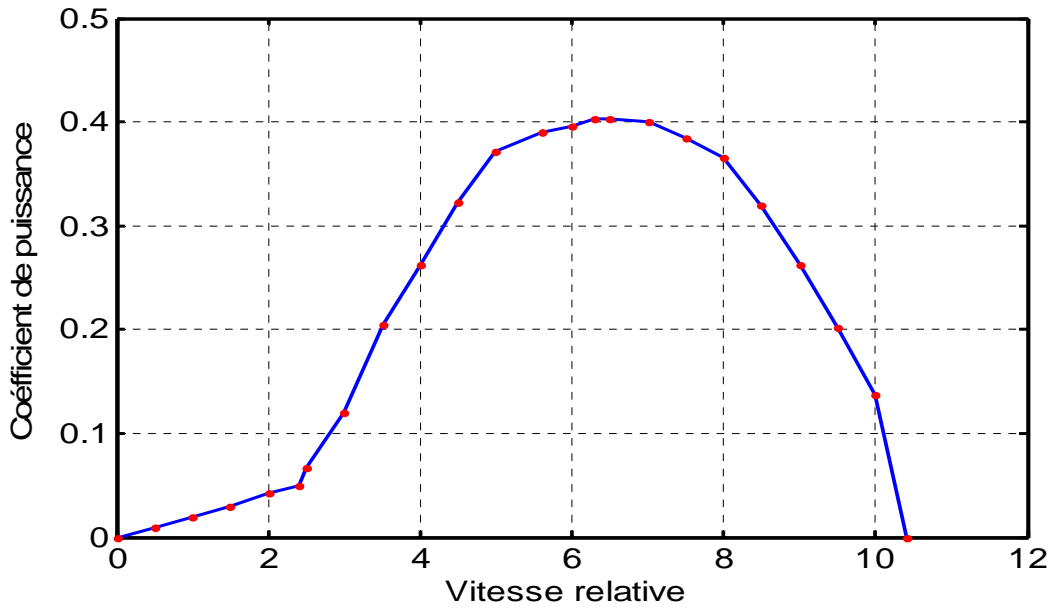


Figure II-9 : Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative.

II-4-1-Courbe caractéristique du coefficient de puissance utilisé

Le modèle de C_p est obtenu de la caractéristique de la figure (II-9), mais en supprimant le segment de droite englobant des valeurs de C_p variant entre 0 et 0.05.

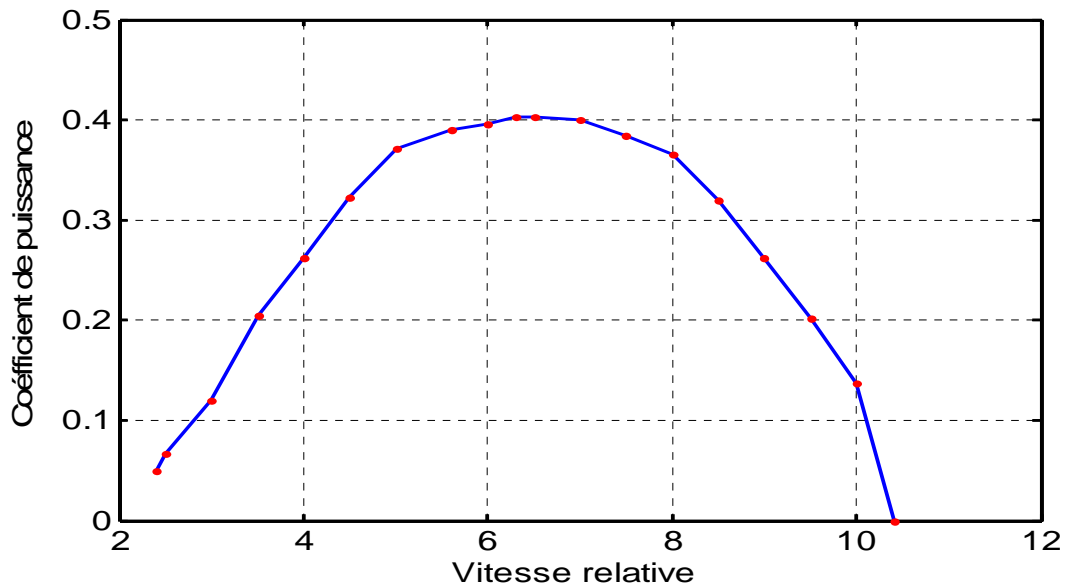


Figure II-10 : Courbe caractéristique du coefficient de puissance utilisé.

II-4-2-Interpolation polynomiale et expression analytique de la courbe caractéristique du coefficient de puissance utilisé

Afin d'obtenir l'expression analytique de C_p en fonction de λ , nous avons effectué une interpolation polynomiale de quatrième degré des points expérimentaux sous Matlab /Simulink (figure (II-11)).

L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultante de l'interpolation, est donnée par :

$$C_p(\lambda) = -0.00015158.\lambda^4 + 0.0031283.\lambda^3 - 0.043818.\lambda^2 + 0.34489.\lambda - 0.5717 \quad (\text{II-32})$$

La courbe d'interpolation est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 6.3, C_{P_{max}} = 0.4055$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. On peut déterminer la caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, pour une vitesse du vent donnée.

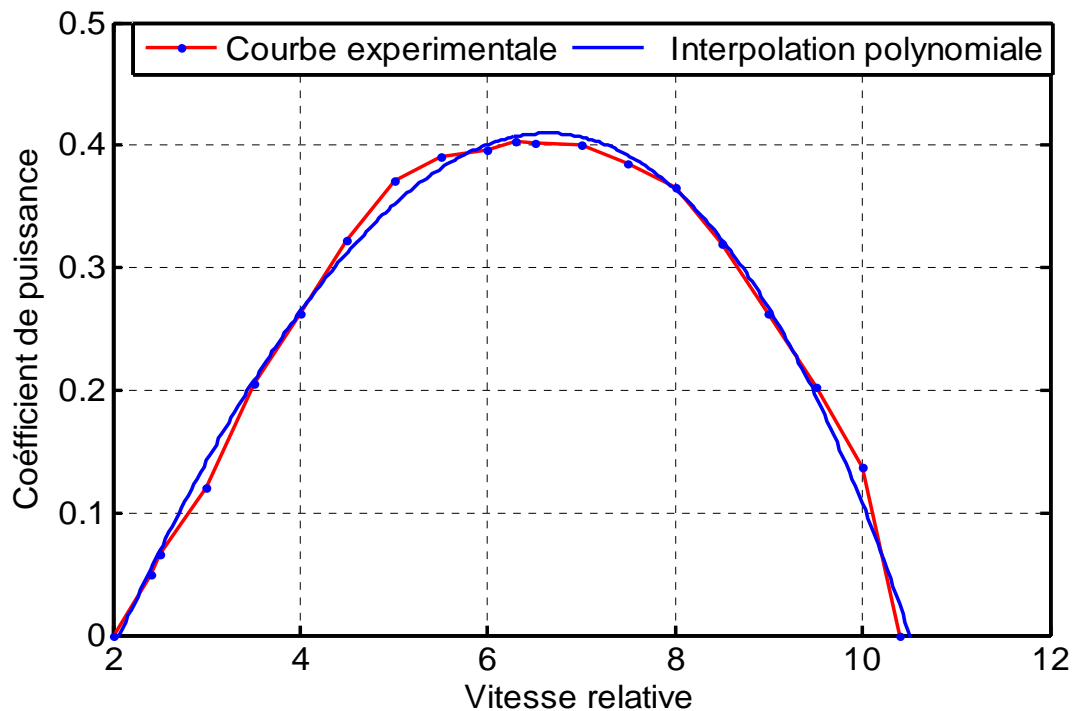


Figure II-11 : Interpolation polynomiale de la caractéristique du coefficient de puissance utilisé.

II-5-Simulations

II-5-1-Simulation avec vitesses instantanées de vent

Nous allons représenter un réseau de caractéristiques respectivement de la puissance et du couple éolien en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, le paramètre étant la vitesse du vent qui varie entre 3 et 6m/s.

II-5-1-1-Calcul de la puissance maximale de la turbine

La puissance maximale de la turbine correspond à un coefficient de puissance maximal, et à une vitesse relative optimale et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{t\max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_{P\max} \cdot V_v^3 \quad (\text{II-33})$$

La vitesse relative λ est donnée par l'équation suivante :

$$\lambda_{opt} = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II-34})$$

De l'équation (II-34), on aura la vitesse du vent comme suit :

$$V_v = \frac{R \cdot \Omega_t}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II-35})$$

En remplaçant l'équation (II-35) dans l'équation (II-33) on obtient l'équation de la puissance maximale de la turbine :

$$P_{t\max} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P\max} \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{II-36})$$

On pose :

$$K_1 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P\max} \quad (\text{II-37})$$

Ainsi on peut déduire que la puissance maximale de la turbine est directement proportionnelle au cube de la vitesse de rotation de la turbine :

$$P_{t\max} = K_1 \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{II-38})$$

On introduisant le coefficient G du multiplicateur on aura :

$$P_{t\max} = K_1 \cdot \frac{\Omega_g^3}{G^3} \quad (\text{II-39})$$

On pose :

$$K_2 = \frac{K_1}{G^3} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{C_{P_{max}}}{G^3} \quad (\text{II-40})$$

Enfin la puissance maximale récupérée par la turbine sera donnée par la formule ci-dessous :

$$P_{t_{max}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P_{max}} \cdot \frac{\Omega_g^3}{G^3} = K_2 \cdot \Omega_g^3 \quad (\text{II-41})$$

II-5-1-2-Calcul du couple optimal de la turbine

Le couple optimal est une grandeur qui reflète la puissance maximale de la turbine, ainsi pour chaque vitesse du vent on a une puissance maximale et un couple optimal qui lui est correspondant.

La puissance maximale de la turbine a comme équation :

$$P_{t_{max}} = C_{t_{opt}} \cdot \Omega_t \quad (\text{II-42})$$

Donc, le couple optimal sera donné par :

$$C_{t_{opt}} = \frac{P_{t_{max}}}{\Omega_t} \quad (\text{II-43})$$

En remplaçant l'équation (II-38) dans (II-43), on aura l'équation du couple optimal donnée par :

$$C_{t_{opt}} = \frac{K_1 \cdot \Omega_t^3}{\Omega_t} = K_1 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II-44})$$

Cette équation peut s'écrire en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice :

$$C_{t_{opt}} = \frac{K_1 \cdot \Omega_g^2}{G^2} \quad (\text{II-45})$$

On pose : $K_3 = \frac{K_1}{G^2}$ (II-46)

A la fin on peut écrire le couple optimal de la turbine comme suit :

$$C_{t_{opt}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{P_{max}} \cdot \frac{\Omega_g^2}{G^2} = K_3 \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-47})$$

II-5-2-Simulation en boucle ouverte

Dans cette simulation, nous allons appliquer un profil de vent variable à la turbine autour de 5m/s, aucune commande ne sera affectée dans ce cas de figure.

La figure (II-12), présente le schéma équivalent du système éolien en boucle ouverte.

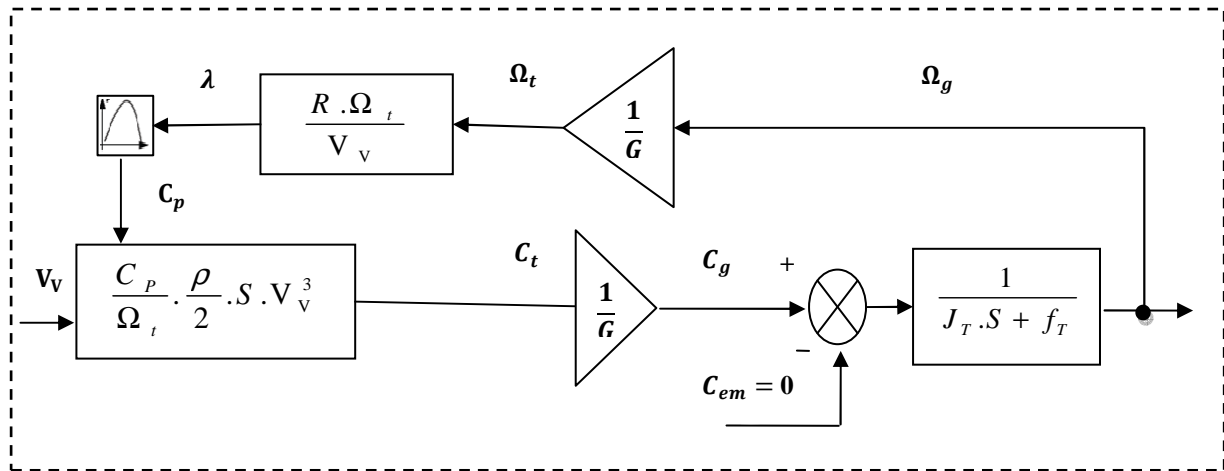


Figure II-12 : Schéma bloc du système en boucle ouverte.

Mathématiquement, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent pour la petite éolienne tripale n'est pas prise en compte dans le modèle de la voilure éolienne car elle est réglée par la dérive sur la queue de la turbine.

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent correspondant à ce que l'on peut trouver sur un site éolien.

Dans un contexte de la modélisation théorique, le profil de vent doit satisfaire 2 critères :

- La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation
- Le profil de vent doit être représentatif des caractéristiques du gisement (intensité, variabilité, distribution statistique...).

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, qui peut être décrite par l'équation suivante :

$$V_v(t) = 5 + 0.05 \sin(0.1047t) + 0.5 \sin(0.2665t) + 0.25 \sin(1.2930t) + 0.05 \sin(3.6645t) \quad (\text{II-48})$$

L'évolution temporelle du vent est tracée dans la figure (II-13) ci-après :

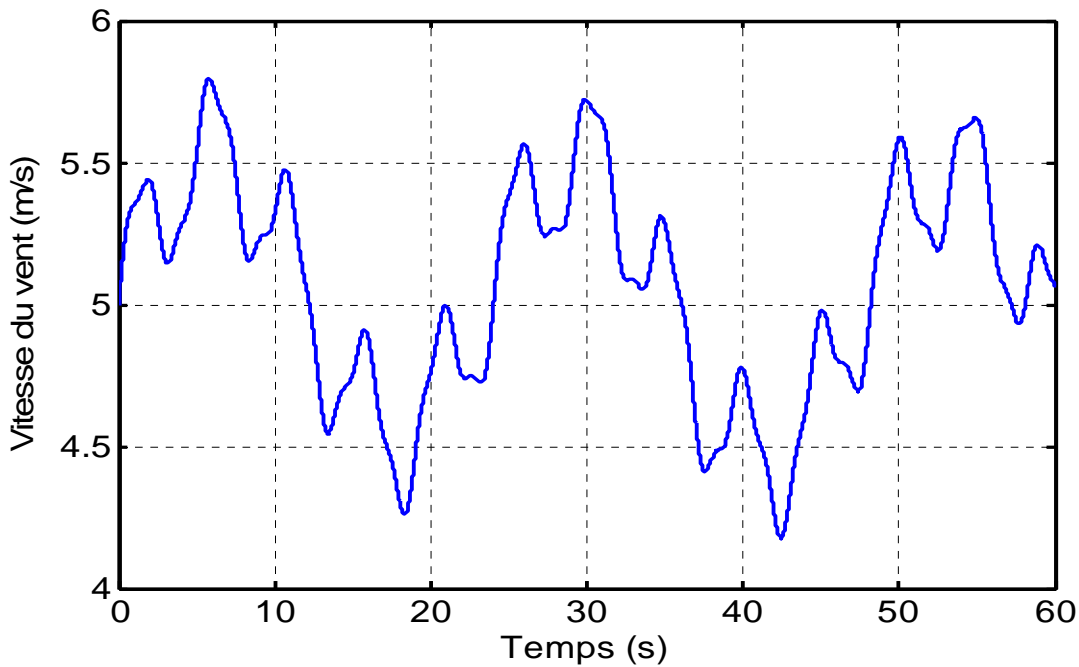


Figure II-13 : Profil du vent appliqué à la turbine éolienne.

II-5-3-Extraction du maximum de la puissance du vent

On rappelle que le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones distinctes comme l'illustre la figure (II-14).

- **Zone 1** : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- **Zone 2** : le vent atteint une vitesse v_{min} minimale pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .
- **Zone 3** : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci [27].

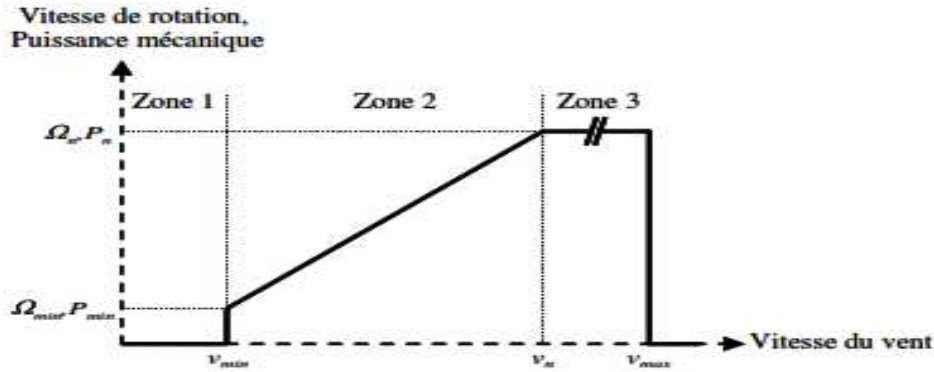


Figure II-14 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Notre travail, s'intéresse plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. Ainsi, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil (vitesse minimale), un algorithme de commande permettant d'extraire la puissance maximale du vent est appliqué.

Un fonctionnement en zone 3 aurait pour conséquence une modification de l'angle de calage des pales pour limiter la puissance de la turbine et éviter toute destruction de l'éolienne.

Dans la zone 2, il existe plusieurs stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de rotation, de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On peut distinguer deux modes de contrôle, comme l'illustre la figure (II-15) [18] :

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.

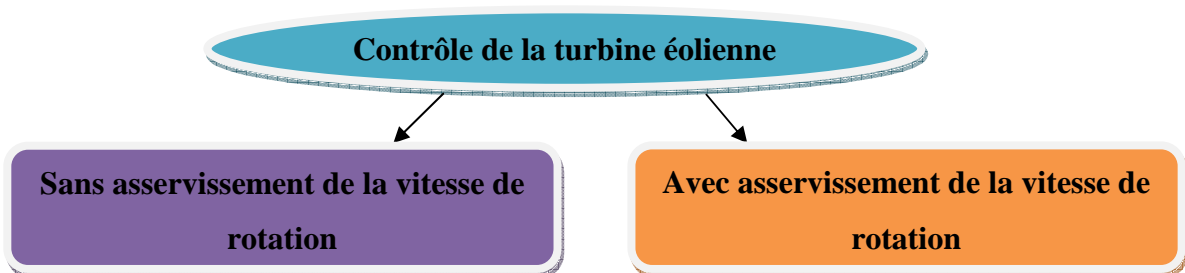


Figure II-15 : Stratégies de commande de la turbine éolienne étudiée.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la génératrice (MADA) est idéale : quelque soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande [27].

II-5-3-1-Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation :

Cette loi de contrôle standard vise à maintenir l'éolienne opérationnelle au sommet de sa courbe C_p .

Dans la technique de contrôle avec asservissement de vitesse, une mesure erronée de cette dernière conduit forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse. Cette technique est illustrée dans le schéma synoptique de la figure (II-16) ci-dessous :

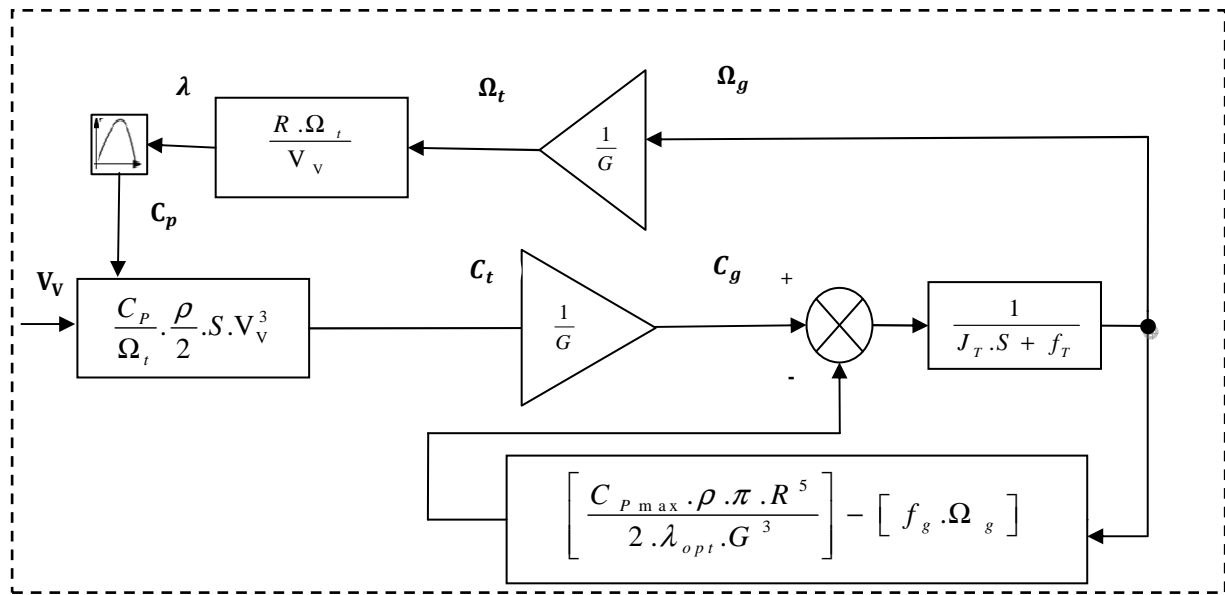


Figure II-16 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (II-26), nous pouvons écrire :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = C_g - C_{em} - f_g \cdot \Omega_g = 0 \quad (\text{II-49})$$

La petite variation de la vitesse du vent en régime permanent, introduira une annulation du couple d'accélération de la turbine c'est-à-dire :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = 0 \quad (\text{II-50})$$

Ainsi, le couple électromagnétique de la génératrice (résistant pour la turbine) sera déterminé de la manière suivante :

$$C_{em} = C_g - f_g \cdot \Omega_g \quad (\text{II-51})$$

Le couple électromagnétique de référence, est obtenu en fixant la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} et par conséquent à un coefficient de puissance maximal C_{Pmax} .

$$C_{emref} = C_{gopt} - f_g \cdot \Omega_g \quad (\text{II-52})$$

Le couple optimal de la génératrice est obtenu à partir du couple optimal de la turbine comme suit :

$$C_{gopt} = \frac{C_{top}}{G} \quad (\text{II-53})$$

Le couple optimal de la génératrice peut alors s'écrire :

$$C_{gopt} = \frac{C_{Pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-54})$$

On pose :

$$K = \frac{C_{Pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad (\text{II-55})$$

Dans cette étude, on supposera que la génératrice est idéale et donc, que quelque soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence, ce qui nous permet d'écrire :

$$C_{emref} = C_{emopt} = C_{em} = C_{gopt} - f_g \cdot \Omega_g = \frac{C_{Pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \cdot \Omega_g^2 - f_g \cdot \Omega_g \quad (\text{II-56})$$

Enfin le couple électromagnétique de référence peut s'écrire de la manière suivante :

$$C_{emref} = K \cdot \Omega_g^2 - f_g \cdot \Omega_g \quad (\text{II-57})$$

La puissance maximale de la génératrice sera obtenue à partir du produit du couple électromagnétique de référence et de la vitesse mécanique de rotation de la génératrice :

$$P_{g \max} = C_{emref} \cdot \Omega_g = \frac{C_{P\max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot \lambda_{opt} \cdot G} \cdot \Omega_g^3 - f_g \cdot \Omega_g^2 \quad (\text{II-58})$$

II-5-3-2- Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Ce mode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la MADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué.

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de la puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée.

Le couple électromagnétique de référence C_{emref} permettant d'obtenir une vitesse de rotation Ω_g égale à sa valeur de référence Ω_{gref} est obtenu en sortie du régulateur de vitesse (figure (II-17)). Ce régulateur, de type proportionnel-intégral (PI), permet ainsi d'asservir la vitesse et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_g considéré comme une perturbation.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative est égale à sa valeur optimale, pour un angle de calage fixé à sa valeur minimale.

La vitesse de rotation de référence de la turbine est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\Omega_{tref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (\text{II-59})$$

Le rapport des deux vitesses de rotation représente le gain du multiplicateur :

$$G = \frac{\Omega_{gref}}{\Omega_{tref}} \tag{II-60}$$

Enfin, on peut écrire la référence de vitesse de rotation de la MADA comme suit :

$$\Omega_{gref} = G \cdot \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{II-61}$$

Le régulateur proportionnel intégral doit accomplir deux tâches, asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence, d'une part et atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

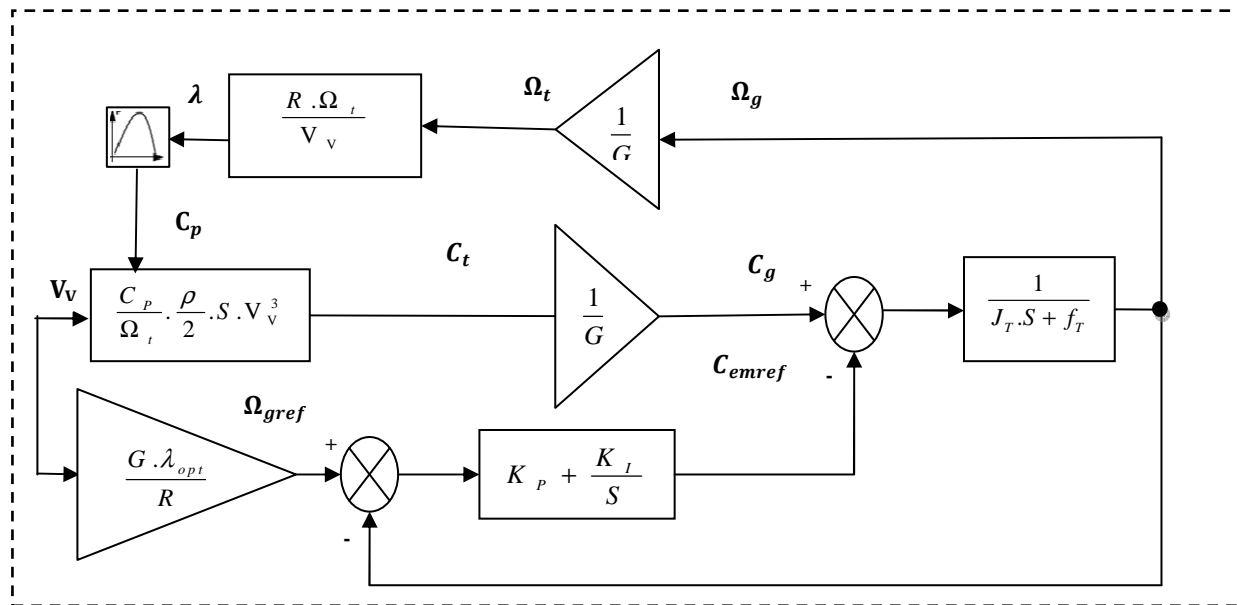


Figure II-17 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

II-6-Résultats de simulations

II-6-1-Résultats de simulation à vitesses constantes de vent

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de la courbe de puissance pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) sera mise au point. La stratégie de la M.P.P.T consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de rotation de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Nous présentons sur la figure (II-18), l'évolution de la puissance mécanique et du couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes valeurs de la vitesse du vent. On constate que la puissance de la turbine varie en fonction de la vitesse du vent, ainsi pour le couple mécanique de la turbine.

La puissance mécanique de la turbine à l'égard du couple mécanique représente des maxima, le maximum de la puissance de la turbine pour une vitesse du vent donnée correspond au coefficient de puissance optimal qui a 0.4055 comme valeur.

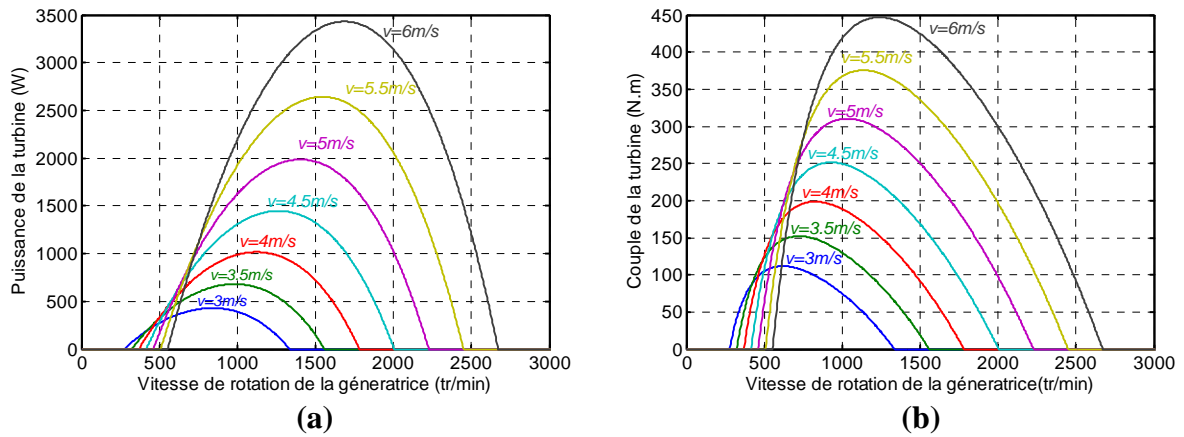


Figure II-18 : -a- Puissance mécanique de la turbine. -b- Couple mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent comme paramètre.

Le couple et la puissance sont deux notions différentes, par ailleurs, On constate de la figure (II-19) que le maximum du couple pour une vitesse donnée ne correspond pas au maximum de la vitesse pour cette même vitesse. Donc une courbe du couple optimal peut être obtenue à partir de l'équation (II-47), pour extraire au mieux la puissance maximale du vent.

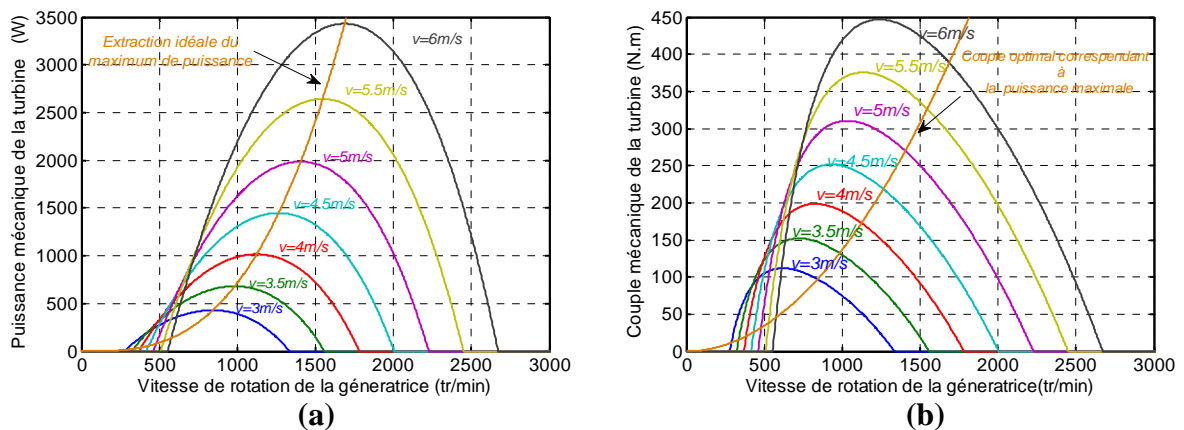


Figure II-19 : -a- Extraction du maximum de puissance de la turbine éolienne. -b- Couple optimal de la turbine.

II-6-2-Résultats de simulation en boucle ouverte

La simulation avec un profil de vent moyen autour de 5m/s et avec un couple électromagnétique nul (MADA fonctionnant à vide), nous a permis d'obtenir les résultats illustrés dans la figures (II-20 ,21,22).

A partir de la figure (II-20), on remarque que C_p et λ sont insignifiants, du fait qu'ils ne sont pas ajustés à leurs valeurs optimales, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique oscillent respectivement autour des valeurs 0.06 et 10.25.

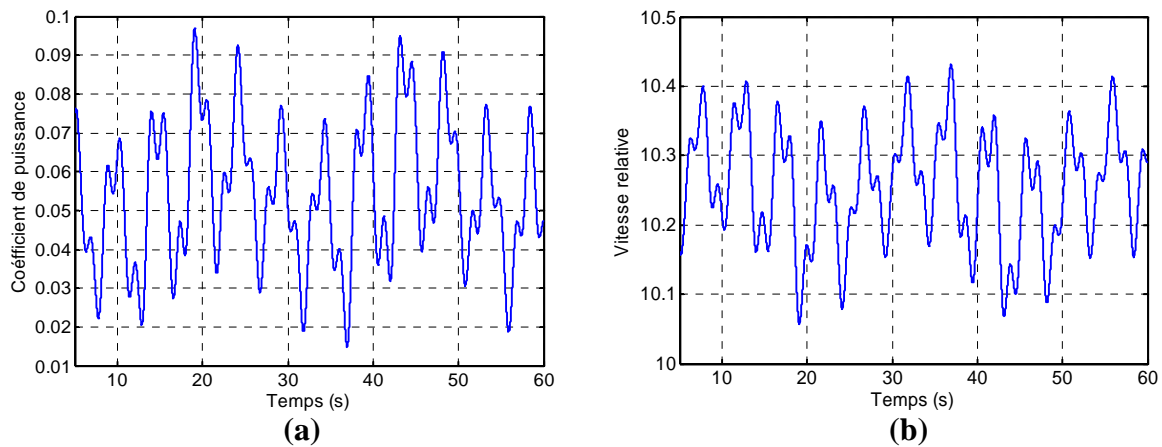


Figure II-20 : -a-Coefficient de puissance.-b-Vitesse relative.

De la figure (II-21) on voit que la puissance du vent est fluctuante suivant les fluctuations de la vitesse du vent, cependant les rafales du vent qui atteignent 5.8m/s , nous permettent d'atteindre une puissance voisine de 7.6KW , cette puissance aura 5.25KW comme valeur moyenne.

La puissance de la turbine P_t est l'image de la puissance du vent, donc du profil du vent appliqué ainsi on constate que la puissance de la turbine suit exactement celle du vent et possède une valeur moyenne égale à 0.3KW .

Les fluctuations de la puissance de la turbine P_t suivent exactement celles de la puissance du vent (figure (II-21)), et le rapport entre les deux puissances égale en chaque point à la valeur moyenne du coefficient de puissance. Quant à la puissance électromagnétique de la génératrice P_g , qui est donnée par le produit du couple électromagnétique et de la vitesse de

rotation, sera nulle, comme conséquence à l'application d'un couple électromagnétique C_{em} égal à zéro.

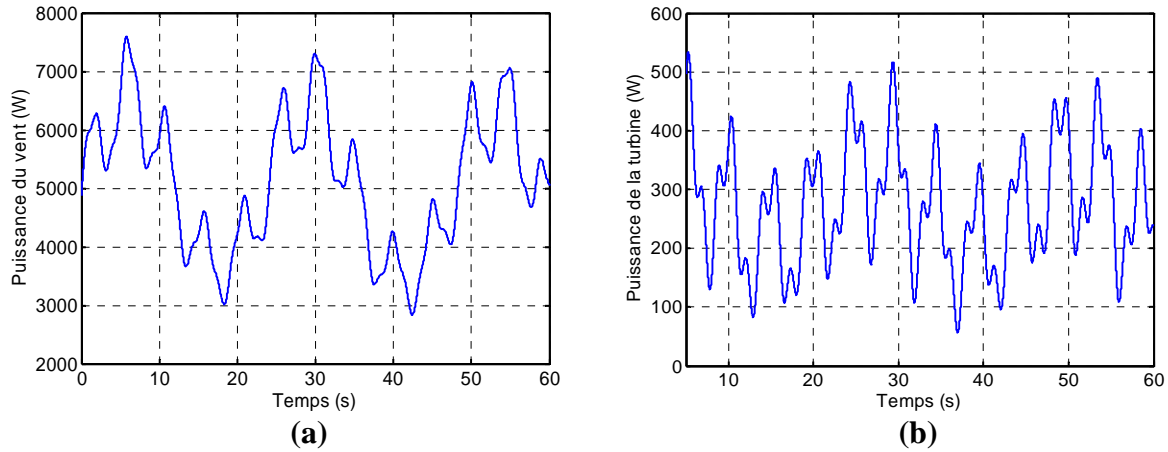


Figure II-21 : -a- Puissance du vent.-b- Puissance de la turbine.

Sur la figure (II-22), on remarque que le couple mécanique sur l'arbre la génératrice C_g n'est d'autre que la conséquence de son couple résistant C_{em} (couple électromagnétique de la MADA), ainsi on voit, que le couple mécanique n'est pas vraiment considérable et à 2.1N.m comme valeur moyenne à cause du couple électromagnétique appliqué qui est égal à zéro. Le couple électromagnétique C_{em} non contrôlé en boucle ouverte, introduira une impossibilité de réglage de la vitesse mécanique de rotation de la génératrice Ω_g , la figure (II-22) nous illustre bien ça où la MADA tourne en survitesse.

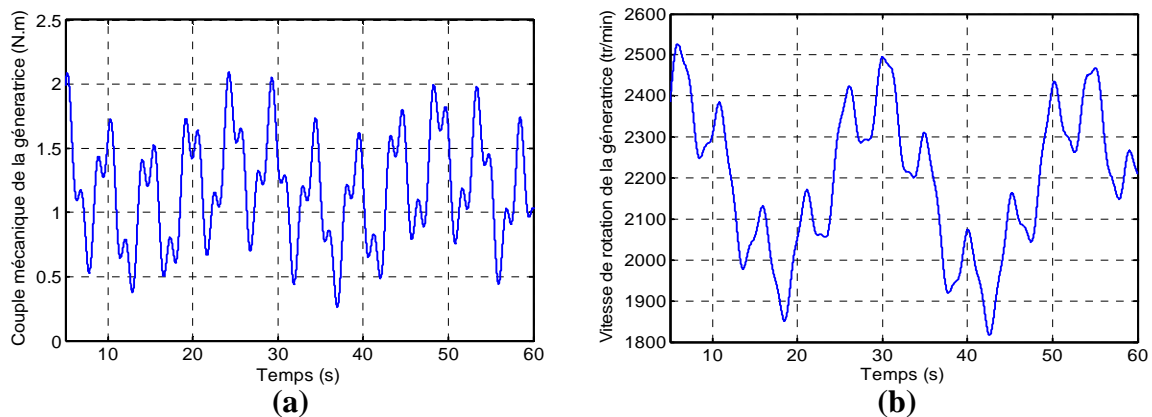


Figure II-22 : -a-Couple mécanique de la génératrice.-b-Vitesse de rotation de la génératrice.

II-6-3-Résultats de simulation du contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

Dans cette partie on garde le même profil de vent que celui utilisé dans la simulation en boucle ouverte, les résultats de simulation sont illustrés dans la figure (II-23, 24,25).

D'après ces figures, on constate que la turbine montre une bonne adaptation quant aux variations de la vitesse du vent. La simulation avec contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation, montre une nette amélioration par rapport à la simulation en boucle ouverte.

La vitesse relative λ et le coefficient de puissance C_p sont proches de leurs valeurs optimales (figure (II-23)), avec une minime erreur relativement à ces valeurs.

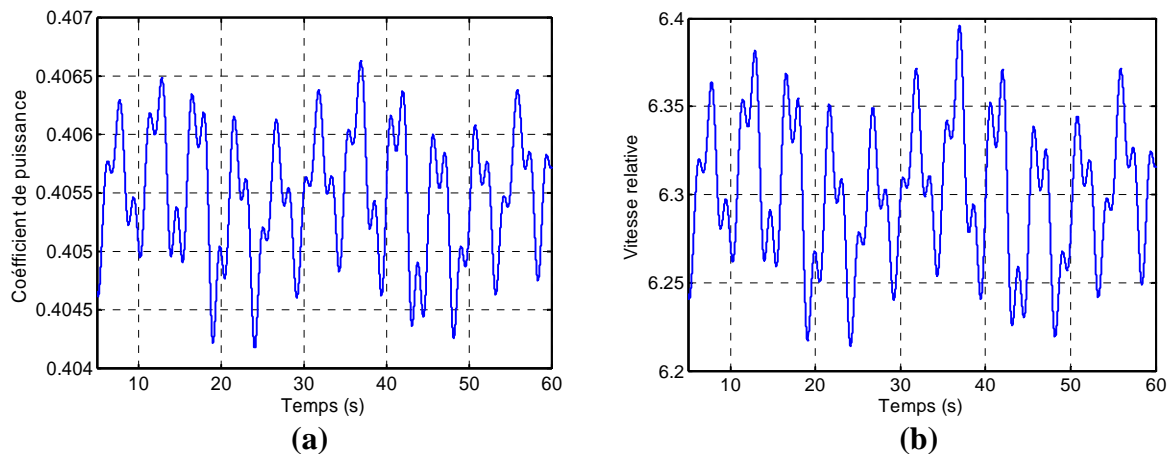


Figure II-23 : -a-Coefficient de puissance.-b-Vitesse spécifique.

Sur la figure (II-24), on remarque que la puissance de la turbine P_t aura aux forts rafales du vent une valeur proche de celle de la puissance nominale de la turbine éolienne utilisée (3KW). La puissance de la génératrice P_g atteindra à son maximum une valeur de 2.95KW.

On voit qu'une augmentation de la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g , aura pour effet une dérivée positive de cette vitesse par rapport au temps, ce qui conduit systématiquement à une puissance de la turbine P_t supérieure à sa référence P_{tref} . Par contre une diminution de la vitesse de rotation de la génératrice introduira une accélération négative et la puissance de la turbine sera donc inférieure à sa référence.

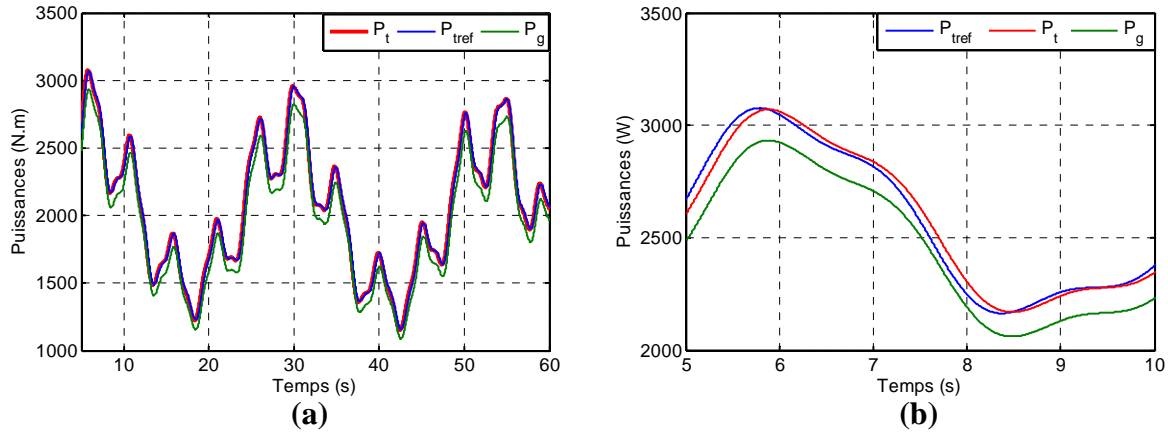


Figure II-24 : -a- Comparatif entre les différentes puissances.-b-Zoom du comparatif des différentes puissances.

Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g est obtenu à partir du couple de la turbine C_t , avec un rapport G du multiplicateur. Sur la figure (II-25), on voit que le couple électromagnétique C_{em} est légèrement inférieur au couple mécanique de la génératrice C_g , ce qui est dû aux pertes causées par les couples d'inertie et de frottement (équation (II-25)).

La vitesse de rotation de la génératrice Ω_g est proche de sa valeur optimale et a 1550tr/min comme valeur. Dans notre cas, on peut dire que l'exigence d'une référence du couple électromagnétique de la génératrice, ramènera la vitesse de rotation de cette dernière à sa valeur nominale.

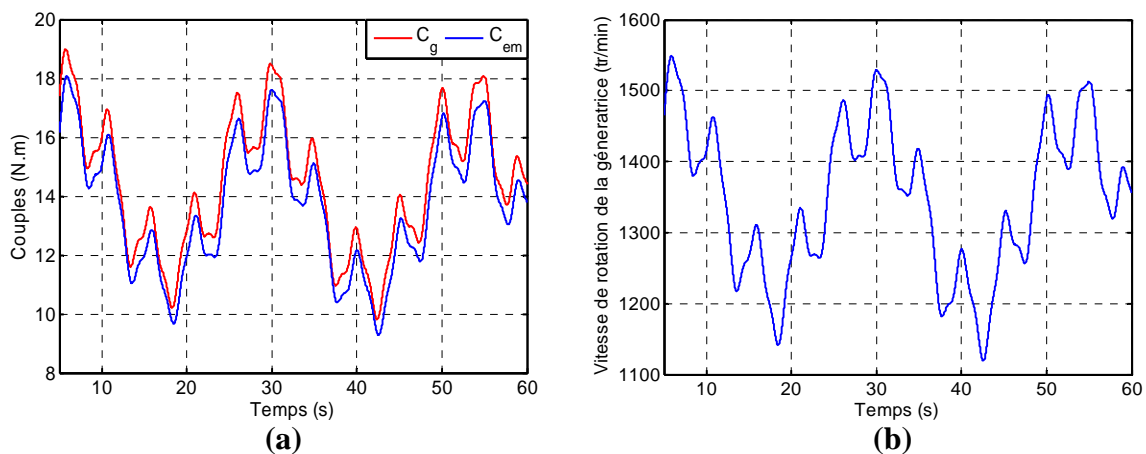


Figure II-25 : -a-Comparatif entre les couple.-b-Vitesse de rotation de la génératrice.

II-6-4 Résultats de simulation du contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Ce mode de contrôle nous a permis de se rapprocher au mieux des valeurs optimales du coefficient de puissance C_p et de la vitesse relative λ qui ont des valeurs moyennes respectivement égales à 0.4055 et 6.3 (figure II-26). Le contrôle de ces deux paramètres se répercute sur toutes les autres grandeurs (couples, vitesses, puissances), qui vont se rabattre elles aussi à leurs valeurs idéales.

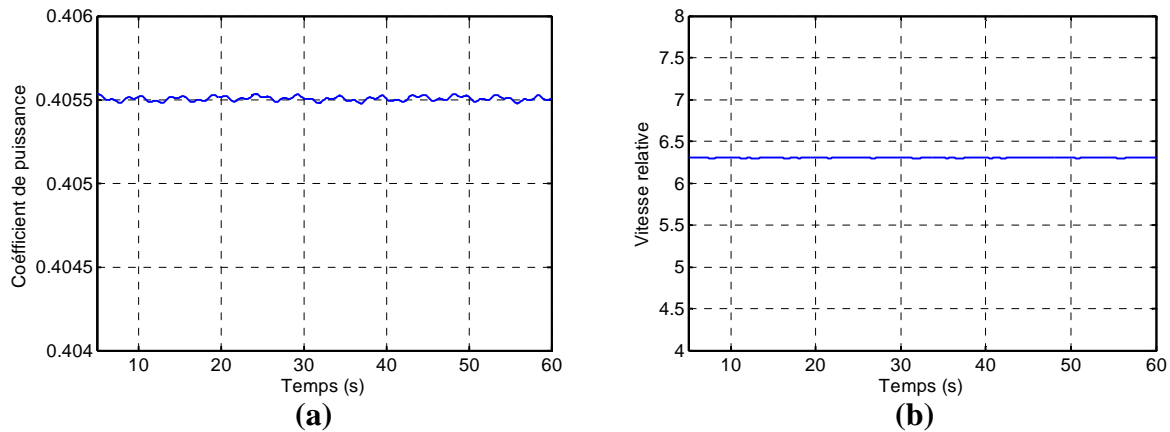


Figure II-26 : -a-Coefficient de puissance.-b-Vitesse relative.

De la figure (II-27), on constate que le couple électromagnétique C_{em} est légèrement inférieur au couple mécanique de la génératrice C_g , ce qui est dû aux pertes causées par les couples d'inertie et de frottement.

Le contrôle du couple électromagnétique de la MADA, nous a permis de fixer la vitesse de rotation de cette dernière à une vitesse de référence Ω_{ref} , la génératrice sera donc ramenée à tourner à cette référence de vitesse. Du fait que le coefficient de puissance est bien ajusté à sa valeur optimale, c'est cependant très significatif. En régime permanent, aucune différence entre ces deux vitesses n'apparaît.

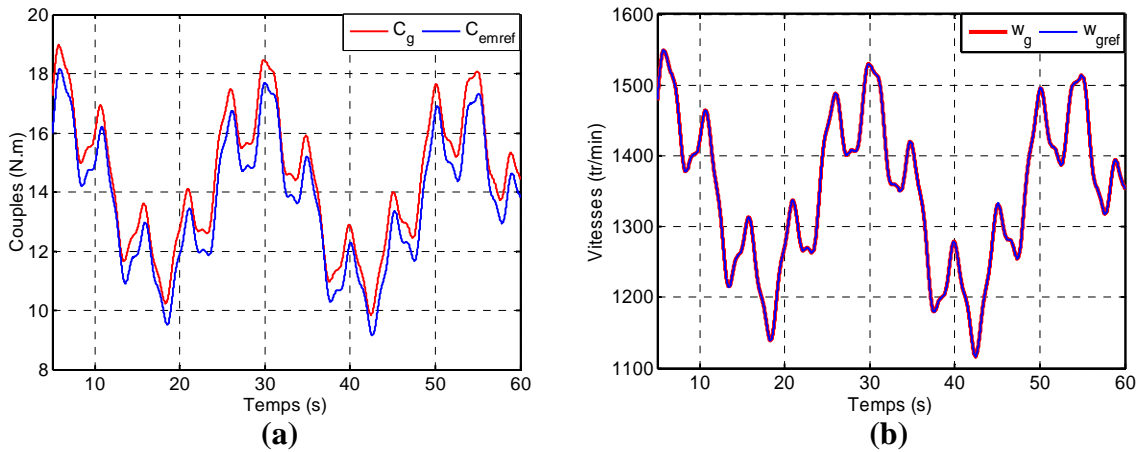


Figure II-27 : -a-Comparatif entre les couple.-b-Comparatif entre les vitesses.

Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation, nous a permis de mieux rapprocher la puissance de la turbine P_t à sa référence P_{tref} , comme le montre la figure (II-28), où on voit que ces deux puissances sont presque superposées.

Comme le cas du contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation Ω_g , une augmentation de la vitesse de rotation de la génératrice conduira à une puissance de la turbine P_t supérieure à sa référence P_{tref} . Par contre une diminution de la vitesse de rotation de la génératrice nous montre que la puissance de la turbine sera inférieure à sa référence.

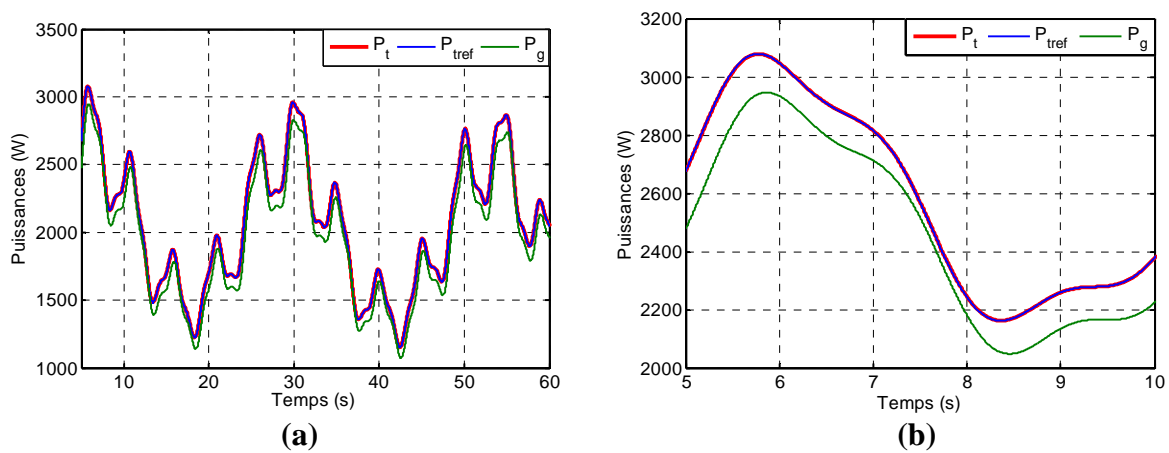


Figure II-28 : -a- Comparatif entre les différentes puissances.-b-Zoom du comparatif des différentes puissances.

II-7-Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes essentiellement intéressés à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne.

Dans la première partie, une modélisation mécanique et aérodynamique de la turbine a été faite, nous avons aussi mis le vent sous un système d'équations en vue de reproduire ses variations.

La deuxième partie est dédiée à la formulation du problème, aussi à la présentation du modèle de la turbine utilisé, par ailleurs une courbe caractéristique de ce modèle est définie et une expression analytique lui a été assignée en vue de sa simulation.

Dans la troisième partie, nous avons illustré les différentes méthodes de contrôle de la turbine éolienne, par conséquent deux modes de commande ont été décrits à savoir les contrôles avec et sans asservissement de la vitesse de rotation. Des simulations diverses sont faites pour commander au mieux l'éolienne et permettre ainsi un fonctionnement optimal de cette dernière.

La quatrième partie est consacrée à la présentation des résultats de simulations effectuées sous MATLAB/Simulink, les deux méthodes permettant de maximiser l'extraction de la puissance de la turbine éolienne sont ainsi comparées.

La MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation est la méthode la plus fiable car elle nous permet de rapprocher au mieux la puissance de la turbine de sa référence et en extraire ainsi le maximum de puissance du vent. Cette méthode sera adoptée dans les chapitres à venir dans la construction et la mise en œuvre des émulateurs de la turbine éolienne.

Chapitre III : Etude et mise au point d'un émulateur de turbine éolienne à base d'une MCC

Résumé :

Ce chapitre montre les étapes de la réalisation d'un émulateur physique de turbine éolienne. Le modèle du vent est appliqué à un modèle de turbine éolienne de 3KW dont le couple obtenu est appliqué en référence à une machine à courant continu à excitation séparée. (Cette M.C.C. est contrôlée en couple en utilisant des régulateurs PI). Le simulateur est testé avec un modèle de machine à courant continu couplée comme la turbine à une MADA. L'intérêt de cette étude est de pouvoir disposer d'un simulateur physique qui nous permettra de reproduire les mêmes caractéristiques statiques et dynamiques que celles de la turbine réelle.

Notations utilisées dans le chapitre

U_e, U_a : Tensions d'alimentation de l'inducteur et de l'induit de la MCC.

I_e, I_a : Courants d'inducteur et d'induit de la MCC.

R_e, R_a : Résistances d'inducteur et d'induit de la MCC.

L_e, L_a : Inductances propres d'inducteur et d'induit de la MCC.

L_m : Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur

ϕ_e : Flux d'excitation de la MCC.

Ω_t : Vitesse angulaire de rotation de la turbine.

Ω_{mcc} : Vitesse angulaire de rotation de la MCC.

Ω_{mccref} : Référence de la vitesse angulaire de rotation de la MCC.

Ω_g : Vitesse angulaire de rotation de la MADA.

G : Gain du multiplicateur.

C_t : Couple mécanique de la turbine.

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA.

C_{emcc} : Couple moteur de la MCC.

C_g : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA.

C_{mcc} : Couple résistant de la MCC.

C_c : Couple de compensation.

J_t, J_{mcc}, J_g : Inerties de la : turbine, MCC, MADA.

f_t, f_{mcc}, f_g : Frottements de la : turbine, MCC, MADA.

P_t, P_{tref}, P_g : Puissances de la : turbine, de sa référence et de la MADA.

III-1-Introduction

L'énergie éolienne est devenue la source d'énergie la plus attractive, comme étant la source la moins polluante (si l'on ne considère pas les bruits comme pollution) quand elle est utilisée pour la production de l'électricité. Par conséquent beaucoup de travaux de recherches se sont focalisés sur le développement de nouvelles turbines éoliennes, dans le but de réduire le coût de l'énergie éolienne, ainsi que pour rendre les turbines plus économiques et plus efficaces.

L'investigation des systèmes d'énergie éolienne implique de très hautes performances des simulateurs éoliens, spécialement pour le développement de solutions optimales de contrôle.

A présent, l'émulateur est devenu nécessairement un moyen de recherche dans les laboratoires pour prédire la qualité de l'énergie dans les systèmes de conversions éoliens et tester les différents algorithmes de contrôle.

Le principe de l'émulateur est de reproduire les mêmes caractéristiques statiques et dynamiques que ceux de la turbine éolienne. Au cours des dernières décennies, la structure la plus commune des émulateurs éoliens est celle basée sur le moteur à courant continu avec contrôle en courant (contrôle du couple électromagnétique).

Le but de notre travail est le développement d'un simulateur pour la turbine éolienne étudiée précédemment à base d'une MCC à excitation séparée de 3KW .

III-2 Construction de l'émulateur

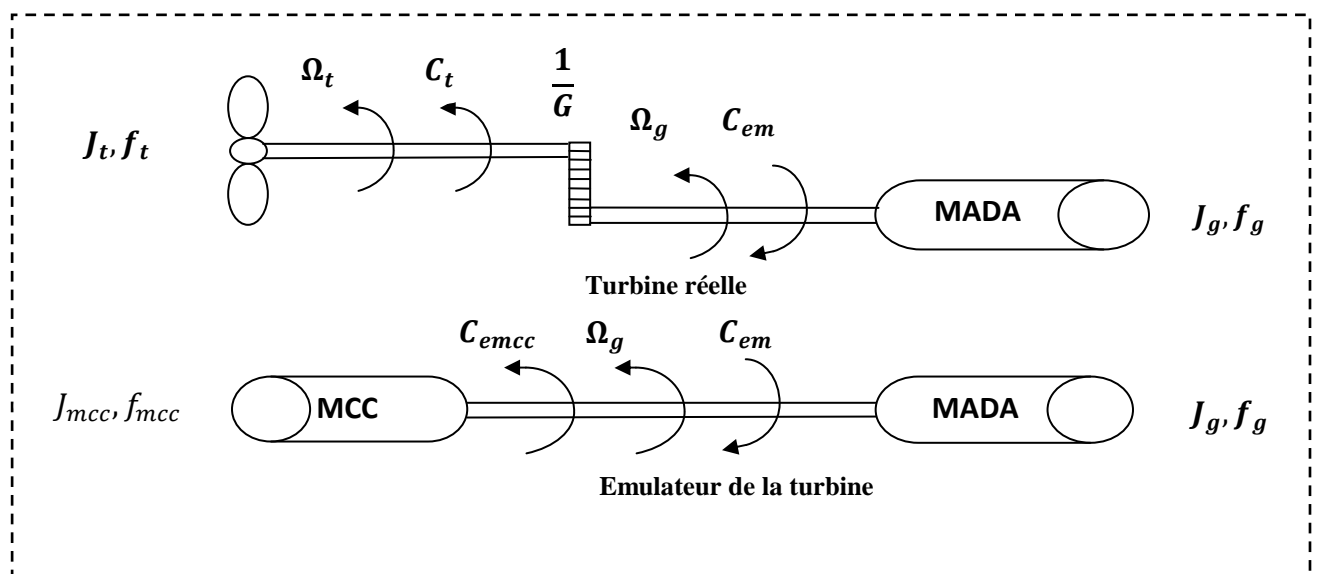


Figure III-1 : Emulateur de la turbine éolienne.

Les systèmes TURBINE/MADA et MCC/MADA sont représentés dans la figure (III-1), où C_{emcc} est le couple de la machine à courant continu, C_t est le couple de la turbine, C_{em} est le couple électromagnétique de la génératrice (MADA). Les inerties de la turbine, de la MCC et de la génératrice sont respectivement J_t , J_{mcc} et J_g . Quant aux frottements, ils sont donnés par f_t , f_{mcc} et f_g .

De la figure (III-1), on peut obtenir les équations de mouvement des deux systèmes, turbine réelle et simulateur, et la résolution de ces deux équations nous permettra d'avoir la référence du couple électromagnétique de la MCC :

L'équation de mouvement du système TURBINE/MADA est donnée par :

$$\frac{C_t}{G} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g + C_{em} \quad (\text{III-1})$$

Le système MCC/MADA a l'équation de mouvement suivante :

$$C_{emcc} = \left(J_{mcc} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(f_{mcc} + f_g \right) \cdot \Omega_g + C_{em} \quad (\text{III-2})$$

De l'expression (III-1), on tire le couple électromagnétique de la MADA, donné comme suit :

$$C_{em} = \frac{C_t}{G} - \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} - \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (\text{III-3})$$

En remplaçant le couple électromagnétique de la MADA par son expression dans l'équation (III-2), on obtient la référence du couple électromagnétique de la MCC :

$$C_{emcc} = \frac{C_t}{G} + \left(J_{mcc} - \frac{J_t}{G^2} \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(f_{mcc} - \frac{f_t}{G^2} \right) \cdot \Omega_g \quad (\text{III-4})$$

III-3-Commande en couple et en vitesse de la machine à courant continu

III-3-1-Modèle de la machine à courant continu

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné sur la figure (III-2). Ces paramètres sont donnés par le **tableau(2)** de l'annexe.

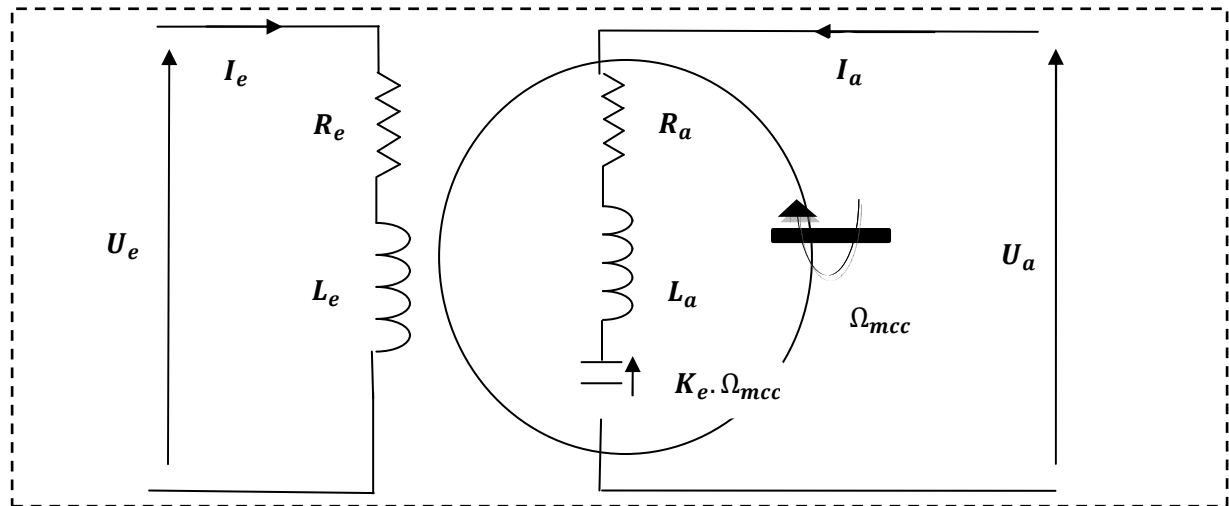


Figure III-2 : Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée.

Les équations de la machine à courant continu sont :

-Pour l'inducteur :

$$U_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt} \quad (\text{IV-5})$$

-Pour l'induit :

$$U_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + L_m \cdot I_e \cdot \Omega_{mcc} \quad (\text{IV-6})$$

-L'équation mécanique :

$$J_{mcc} \cdot \frac{d\Omega_{mcc}}{dt} = L_m \cdot I_e \cdot I_a - f_{mcc} \cdot \Omega_{mcc} - C_{mcc} \quad (\text{IV-7})$$

Pour la machine à courant continu à excitation séparée, si le flux créé par le bobinage inducteur est constant, on a alors :

$$\phi_e = L_m \cdot I_e = K_e \quad (\text{IV-8})$$

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu est donné par :

$$C_{emcc} = K_e \cdot I_a \quad (\text{IV-9})$$

L'équation mécanique peut s'écrire alors comme suit :

$$J_{mcc} \cdot \frac{d\Omega_{mcc}}{dt} = C_{emcc} - f_{mcc} \cdot \Omega_{mcc} - C_{rmcc} \quad (\text{IV-10})$$

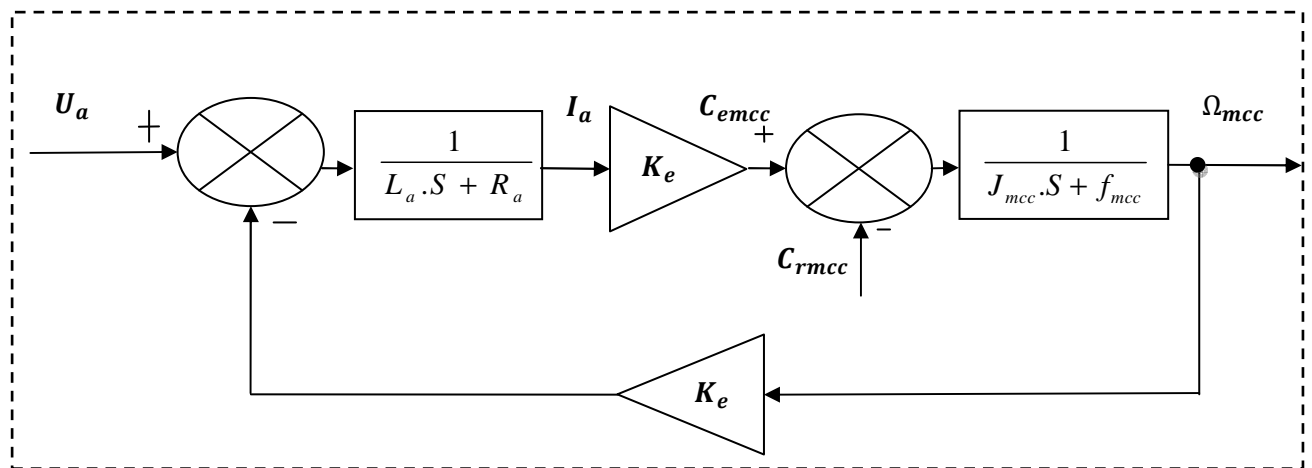


Figure III-3: Modèle équivalent de la machine à courant continu à excitation séparée.

III-3-2-Stratégie de commande de la machine à courant continu

Comme tous les moteurs électriques, la machine à courant continu doit être considérée comme un générateur de couple [21]. Ce couple est alors transmis à la génératrice qui peut entrer en rotation. La vitesse de l'ensemble moteur-génératrice n'est pas imposée par le moteur lui-même, mais plutôt par la caractéristique couple/vitesse de l'ensemble moteur-génératrice.

Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni par le moteur à la génératrice. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-génératrice, il faut augmenter le couple fourni par le moteur qui devient alors supérieur au couple de la génératrice. Il apparaît un couple d'accélération, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de la génératrice [19].

La commande de la MCC, quelque soit le type de motorisation utilisée, peut donc se décomposer en deux boucles d'asservissement, une boucle de couple (ou de courant) et une boucle de vitesse, comme l'illustre la figure (III-4).

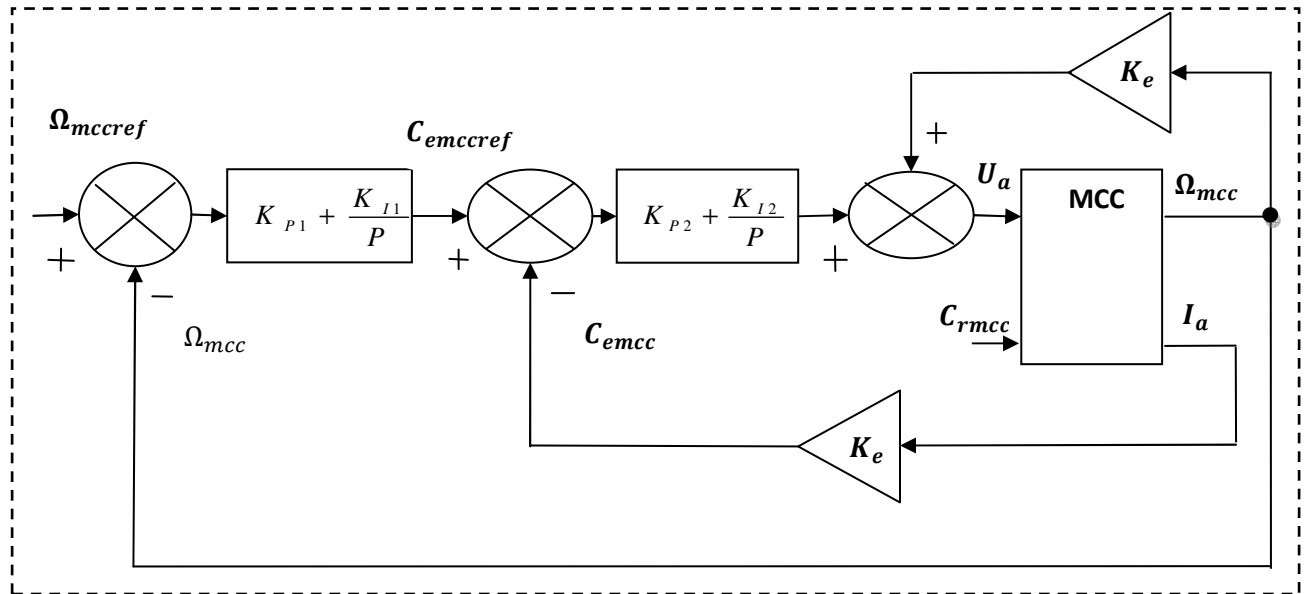


Figure III-4 : Commande en couple et en vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée.

Dans la mise en œuvre de l'émulateur de la turbine éolienne, seule la commande en couple de la machine à courant continu sera mise en évidence, le schéma d'asservissement de cette commande est illustré dans la figure (III-5) ci-dessous :

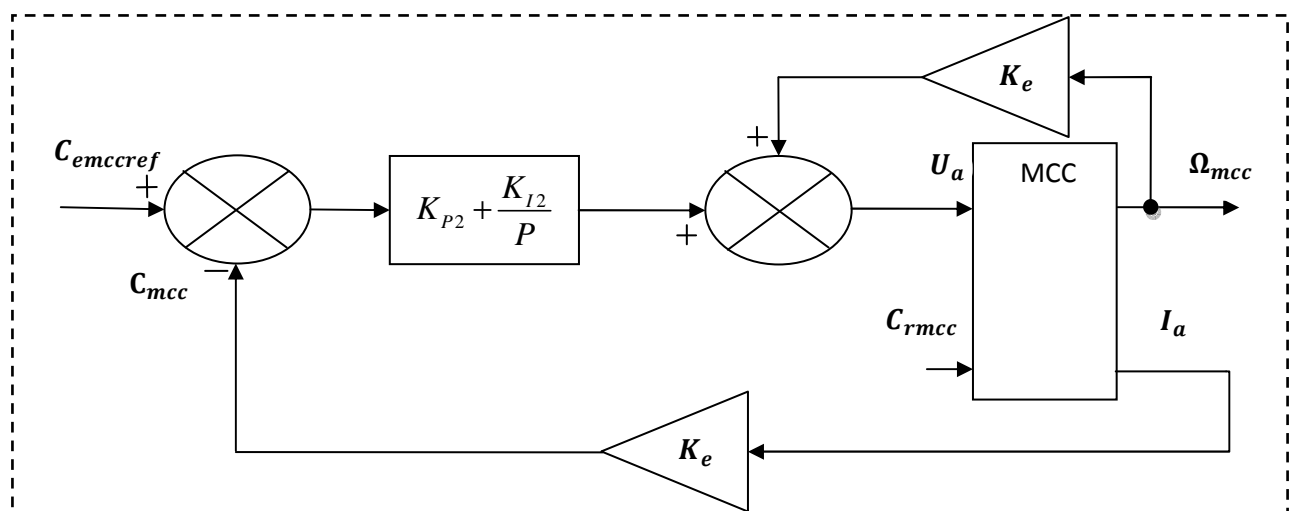


Figure III-5 : Commande en couple de la machine à courant continu à excitation séparée.

III-4-Mise en œuvre de l'émulateur

Dans la construction de l'émulateur, nous avons utilisé la commande MPPT avec asservissement de vitesse utilisée dans la turbine réelle.

Une commande en couple est affectée à la MCC afin de ramener le couple de cette dernière à sa référence obtenu à partir des équations de mouvement qui régissent les deux systèmes TURBINE/MADA et MCC/MADA.

Ce couple sera la somme de deux couples l'un sur l'arbre de la génératrice et l'autre de compensation.

Deux cas sont à considérer dans la mise en œuvre de l'émulateur, cas où l'on considère le couple de compensation comme figurant dans le couple électromagnétique de référence de la MCC, et cas où l'on néglige le couple de compensation.

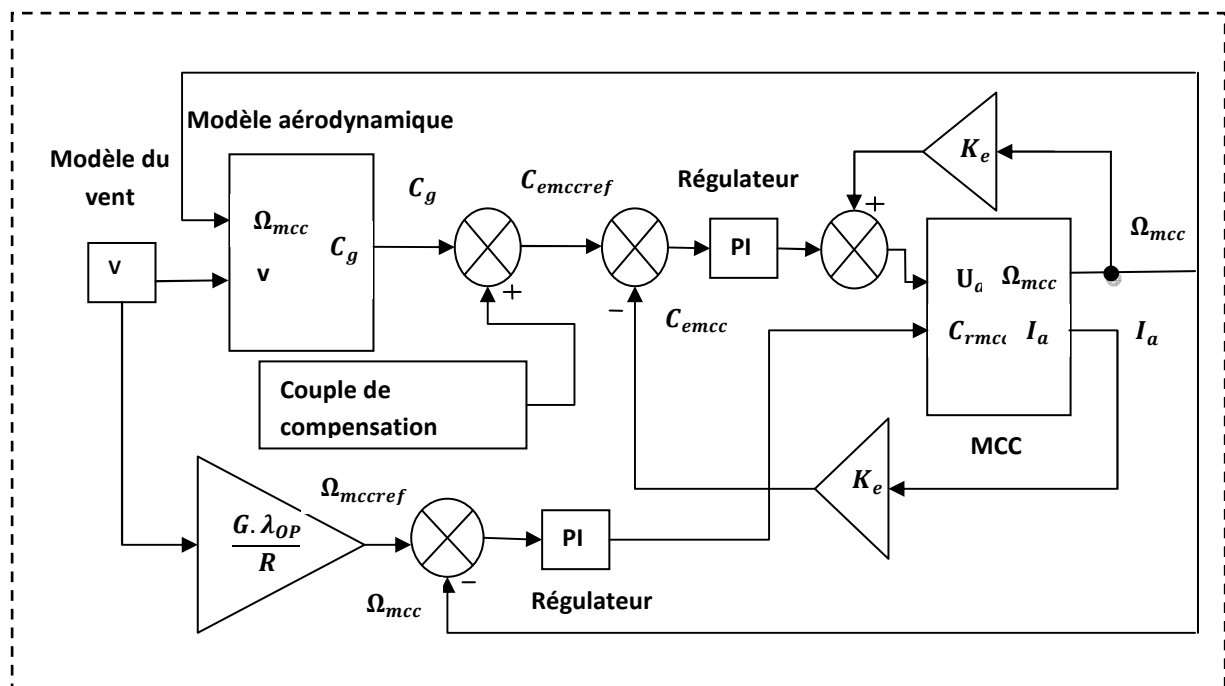


Figure III-6 : Schéma synoptique de l'émulateur.

III-5-Résultats de l'émulateur et leurs interprétations

Pour mettre en œuvre l'émulateur, nous avons mis en évidence le contrôle de la turbine avec asservissement de la vitesse de rotation.

Pour la bonne construction de l'émulateur, on doit s'assurer que le coefficient de puissance C_p et la vitesse relative λ sont à leurs valeurs optimales.

De la figure (III-7), on voit que les deux paramètres sont fixés à leurs valeurs maximales, d'où une bonne récupération de la puissance du vent.

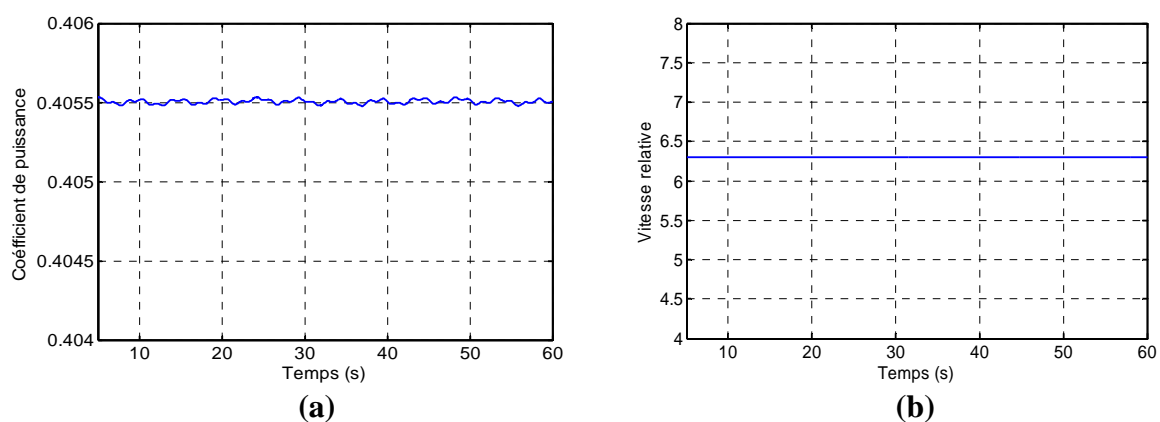


Figure III-7: -a- Coefficient de puissance. -b- Vitesse relative.

III-5-1-Résultats de simulation sans compensation du couple de la MCC

De la figure (III-8), on tire que le courant I_a dans l'induit de la MCC, ainsi que la tension U_a à ses bornes sont en corrélation avec les variations de la vitesse de vent. La tension oscille autour de sa valeur nominale et atteint à ses forts pics 230V . Le courant de l'induit fluctue aussi en fonction des fluctuations du profil du vent, ce courant est inférieur à sa valeur nominale et atteint à son grand max 14.5A .

Le couple électromagnétique C_{emcc} de la MCC est l'image du courant de l'induit, ce couple est égal à sa référence $C_{emccref}$ obtenue à partir des équations mécaniques des deux systèmes (TURBINE/MADA et MCC/MADA) et a la valeur de 19N.m à son maximum.

Quant à la vitesse de rotation Ω_{mcc} de la MCC, qui correspond aussi à celle de la MADA Ω_g (même arbre), on remarque qu'elle est aussi en corrélation avec la vitesse du vent, sa valeur maximale s'approche de la vitesse nominale de la machine à courant continu (1500tr/min) .

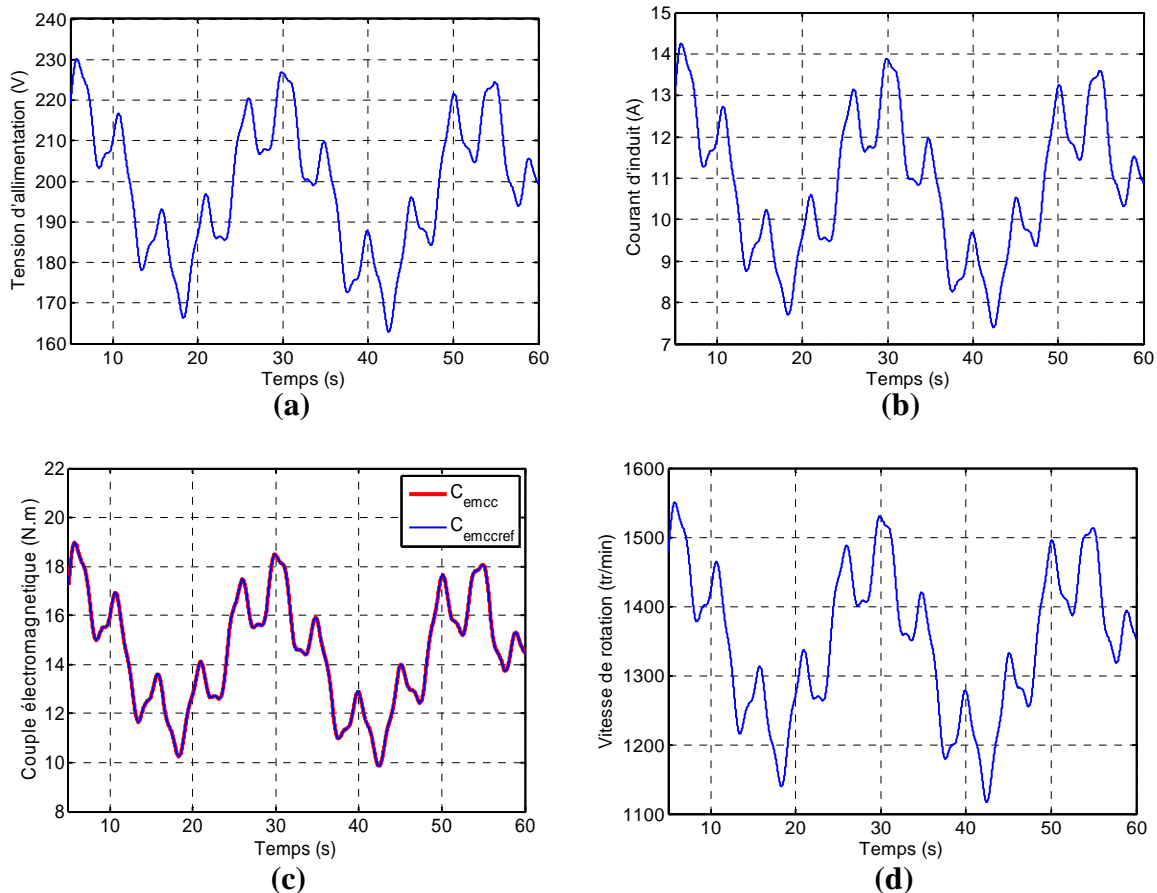


Figure III-8 : -a- Tension d'alimentation. -b- Courant de l'induit. -c- Couple de la MCC et sa référence. -d- Vitesse de rotation de la MCC.

Le but de la mise en œuvre de l'émulateur est la reproduction des mêmes caractéristiques statiques et dynamiques que celles de la turbine réelle. Par ailleurs le couple qu'on doit appliquer à la MCC en fonction de celui de la turbine doit être estimé pour qu'on puisse avoir les mêmes caractéristiques de la génératrice que dans le cas de la turbine réelle.

De la figure (III-9), on constate que le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g et le couple électromagnétique C_{emcc} de la MCC (couple de référence) sont quasiment identiques, ceci est dû à l'absence du couple de compensation de cette dernière et leurs valeurs maximales atteignent 19 N.m .

Quant à la puissance de la turbine P_t et sa référence P_{tref} , on voit qu'elles sont les mêmes et leurs valeurs maximales sont proches de 3KW, et cela est le résultat de l'asservissement de la vitesse de rotation de la génératrice (MPPT avec asservissement de vitesse de rotation).

La non compensation du couple est conséquente sur la puissance de la génératrice P_g , cependant et d'après la figure (III-9), on voit que cette puissance est différente de la puissance de la turbine et inférieure à celle obtenue dans le cas de la turbine réelle et a une valeur qui avoisine 2.75KW.

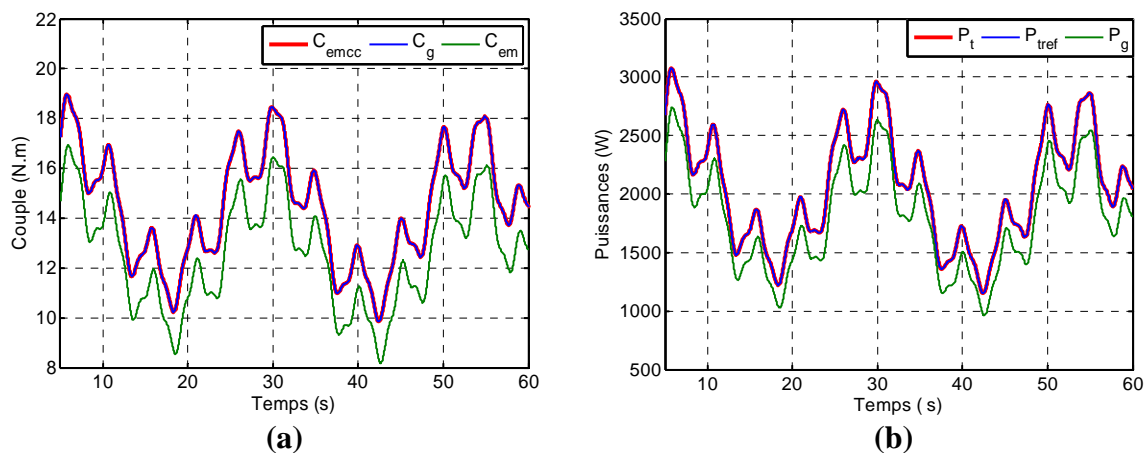


Figure III-9: -a- Comparatif entre les différents couples.-b- Comparatif entre les différentes puissances.

III-5-1-Résultats de simulation avec compensation du couple de la MCC

Sur la figure (III-10), on voit que la tension d'alimentation U_a et le courant I_a dépassent légèrement leurs maximums obtenus dans la simulation précédente de la MCC, à cause de la présence du couple de compensation C_c . Ces valeurs atteignent respectivement à leurs grands pics 232V et 14.5A.

Le couple de la MCC C_{emcc} et sa référence $C_{emccref}$ sont les mêmes et augmentent à cause de la compensation du couple de cette dernière, et atteignent aux fortes rafales de vent 22N.m.

Pour la vitesse de rotation Ω_{mcc} , on ne constate aucun changement et ça est dû au fait de maintenir la vitesse à sa référence (MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation).

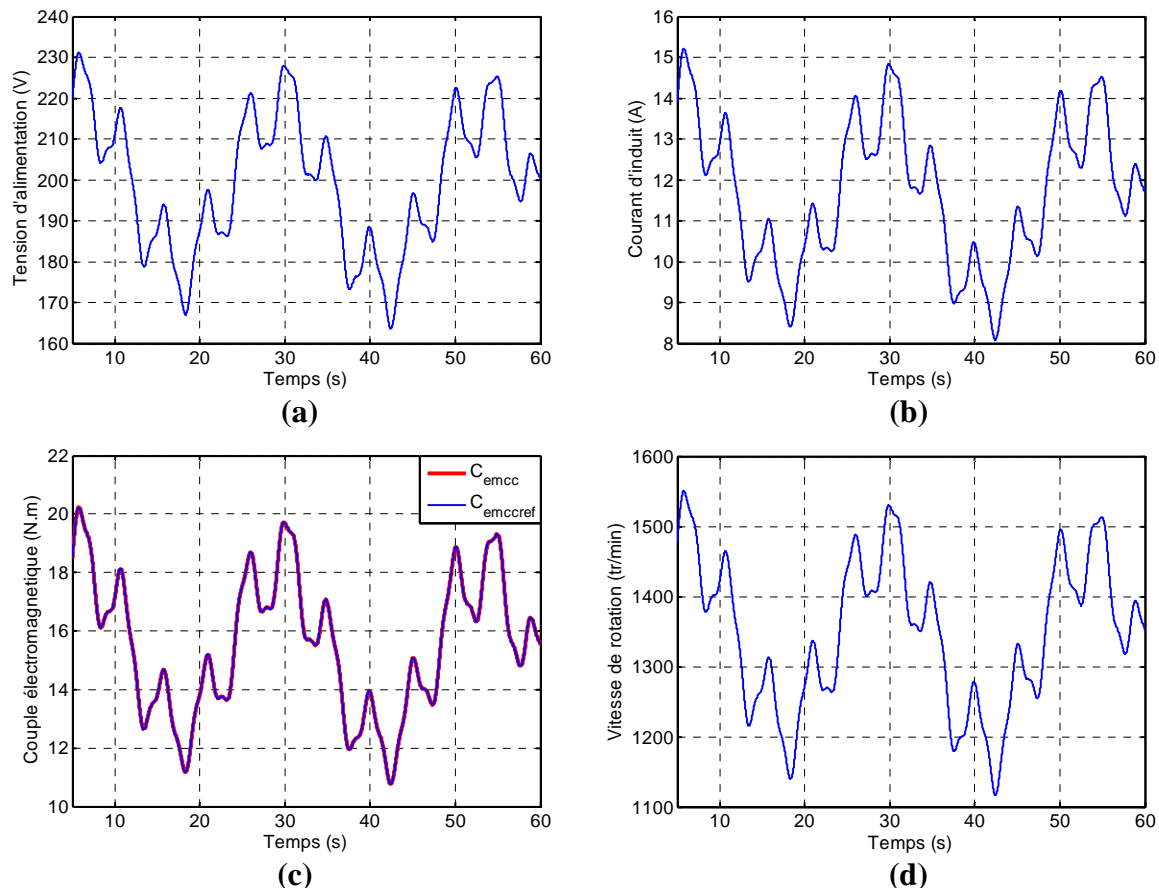


Figure III-10: a-Tension d'alimentation.-**b-** Courant de l'induit. -**c-** Couple de la MCC et sa référence. -**d-** Vitesse de rotation de la MCC.

De la figure (III-11), on constate, que le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g et le couple C_{emcc} de la MCC (couple de référence) sont différents et ce dernier atteint une valeur un peu supérieure à celle du cas sans compensation de couple.

La somme des couples de compensation C_c et mécanique sur l'arbre de génératrice C_g est égale au couple électromagnétique C_{emcc} de la MCC ainsi qu'à sa référence $C_{emccref}$.

La puissance de la turbine P_t et sa référence P_{tref} ont les mêmes courbes que dans le cas précédent (MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation). La compensation du couple électromagnétique de la MCC introduira une augmentation dans la puissance P_g de la MADA. La figure (III-11), montre que la puissance de la génératrice de l'émulateur est identique à celle de la génératrice dans le cas de la turbine réelle et atteint 2.95KW.

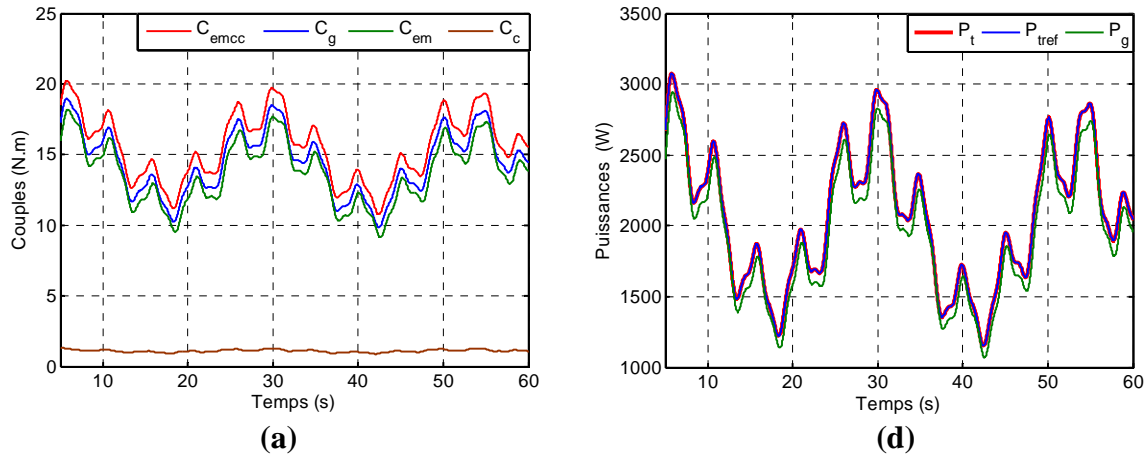


Figure IV-11: -a- Comparatif entre les différents couples.-b- Comparatif entre les différentes puissances

III-6-Conclusion

Ce chapitre montre les étapes de mise en œuvre d'un simulateur physique de turbine éolienne à base d'une machine à courant continu.

Dans la première partie une présentation générale de l'émulateur est donnée. Les systèmes turbine/génératrice et MCC/génératrice sont donc présentés et l'équation du couple de référence de la MCC est obtenue à partir des équations de mouvement des deux systèmes.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la machine à courant continu à excitation séparée. Par ailleurs, une mise en équation de la machine a été donnée, ainsi qu'une présentation des différentes stratégies de commande.

Dans la troisième partie, l'émulateur est mis en œuvre, les résultats sont donc obtenus avec la simulation sous l'outil MATLAB/Simulink.

Les résultats d'émulation obtenus sont très satisfaisants, et expriment de façon significative le fonctionnement réel de la turbine éolienne, ce qui explique le règne des émulateurs à base des MCC dans la plupart des travaux de recherche pendant plusieurs années.

De nos jours, et à cause des inconvénients que représente la machine à courant continu telles que le coût et les difficultés de maintenance, une tendance à utiliser d'autres machines émerge, à leur tête la machine asynchrone connue pour son coût abordable et l'aisance de sa maintenance. Pour ce fait, une étude et une mise en œuvre d'un émulateur à base de cette dernière nous est attractive et fera l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre IV : Etude et mise au point d'un émulateur de turbine éolienne à base d'une MAS

Résumé :

Ce chapitre a principalement comme objectif la mise en œuvre d'un émulateur physique de turbine éolienne à base d'une M.A.S. Le profil de vent est appliqué à une turbine éolienne de 3KW dont le couple obtenu est appliqué en référence à une machine asynchrone à cage d'écureuil commandée vectoriellement par orientation du flux rotorique. (Cette M.A.S. est contrôlée en couple en utilisant des régulateurs PI). Le simulateur est testé avec un modèle de machine asynchrone à cage couplée comme la turbine à une MADA. Les résultats de cet émulateur sont comparés à ceux trouvés avec celui réalisé à base d'une M..C.C, ainsi un choix judicieux est fait quant à l'émulateur le plus intéressant.

Notations utilisées dans le chapitre

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions statoriques suivant le repère (a, b, c) .

$V_{asref}, V_{bsref}, V_{csref}$: Références des tensions statoriques suivant le repère (a, b, c) .

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : Tensions rotoriques suivant le repère (a, b, c) .

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: Tensions statoriques et rotoriques suivant le repère (d, q) .

V_{dsref}, V_{qsref} : Références des tensions statoriques suivant le repère (d, q) .

$V_{\alpha s}, V_{\beta s}, V_{\alpha r}, V_{\beta r}$: Tensions statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator.

$V_{xs}, V_{ys}, V_{xr}, V_{yr}$: Tensions statoriques et rotoriques dans le repère lié au rotor.

V_{ds1}, V_{qs1} : Tensions de la commande vectorielle.

E_d, E_q : Forces électromotrices de compensation.

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : Courants statoriques suivant le repère (a, b, c) .

I_{ar}, I_{br}, I_{cr} : Courants rotoriques suivant le repère (a, b, c) .

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: Courants statoriques et rotoriques suivant le repère (d, q) .

$I_{\alpha s}, I_{\beta s}, I_{\alpha r}, I_{\beta r}$: Courants statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator.

$I_{xs}, I_{ys}, I_{xr}, I_{yr}$: Courants statoriques et rotoriques dans le repère lié au rotor.

I_{dr}', I_{qr}' : Courants rotoriques suivant le repère (d, q) , obtenus après changement de variables.

I_m : Courant magnétisant.

I_{mref} : Référence du courant magnétisant.

I_{md}, I_{mq} : Composantes du courant magnétisant dans le repère (d, q) .

I_a : Courant d'induit de la machine à courant continu.

$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$: Flux statoriques suivant le repère (a, b, c) .

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$: Flux rotoriques suivant le repère (a, b, c) .

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$: Flux statoriques et rotoriques suivant le repère (d, q) .

$\varphi_{\alpha s}, \varphi_{\beta s}, \varphi_{\alpha r}, \varphi_{\beta r}$: Flux statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator.

$\varphi_{xs}, \varphi_{ys}, \varphi_{xr}, \varphi_{yr}$: Flux statoriques et rotoriques dans le repère lié au rotor.

φ_r : Flux rotorique (obtenu avec l'orientation du flux rotorique suivant l'axe d).

φ_e : Flux d'excitation de la machine à courant continu.

R_s, R_r : Résistances du stator et du rotor.

L_s, L_r : Inductances propres cycliques du stator et du rotor.

L_{0s}, L_{0r} : Inductances homopolaires statorique et rotorique.

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

l_s, l_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

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

M_{sr}, M_{rs} : Inductances mutuelles maximales entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.

$\theta, \theta_r, \theta_s$: Angles : du rotor, des grandeurs rotoriques et des grandeurs statoriques.

$\omega, \omega_r, \omega_s$: Pulsations : du rotor, des grandeurs rotoriques et des grandeurs statoriques.

ω_{rest} : Pulsation rotorique estimée.

ω_{sest} : Pulsation statorique estimée.

Ω_g : Vitesse angulaire de rotation de la MADA.

Ω_{gref} : Référence de la vitesse angulaire de rotation de la MADA.

Ω_{mas} : Vitesse angulaire de rotation de la MAS.

Ω_{masref} : Référence de la vitesse angulaire de rotation de la MAS.

C_{emas} : Couple électromagnétique de la MAS.

$C_{emasref}$: Référence du couple électromagnétique de la MAS.

C_{mas} : Couple résistant de la MAS.

C_{Ch} : Couple de charge de la MAS.

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA.

C_g : Couple mécanique de la MADA.

C_C : Couple de compensation.

P_t : Puissance de la turbine.

P_{tref} : Référence de la puissance de la turbine.

P_{emas} : Puissance électromagnétique de la MAS.

P_g : Puissance électromagnétique de la MADA.

P_{gmcc} : Puissance électromagnétique de la MADA de l'émulateur à base de la MCC.

P_{gmas} : Puissance électromagnétique de la MADA de l'émulateur à base de la MAS.

J_{mas} : Inertie de la MAS.

f_{mas} : Coefficient de frottement de la MAS.

V_V : Vitesse du vent.

λ_{opt} : Vitesse relative optimale.

P : Nombre de paires de pôles.

G : Gain du multiplicateur.

g : Glissement.

IV-1-Introduction

La dernière décennie du siècle passé a connu un grand saut dans la technologie des émulateurs de turbines éoliennes, cependant et plus communément les travaux de recherches se sont focalisés sur les émulateurs à base de la MCC, précisément celle à excitation séparée avec contrôle de courant. De nos jours et à cause des contraintes que représentent ces machines, à savoir le cout excessif et les difficultés de maintenance (système ballais-collecteur), ces émulateurs sont devenus non attractifs.

Dans notre travail, nous avons proposé un simulateur basé sur une machine asynchrone à cage d'écureuil comme génératrice de couple qui peut avoir les mêmes caractéristiques que celles de la machine à courant continu à excitation séparée, pour ce fait une commande vectorielle à flux rotorique orienté lui a été affectée dans le but de découpler la commande du couple de celle du flux.

Pour la mise en œuvre de cet émulateur, nous lui avons affecté la commande MPPT avec asservissement de vitesse utilisée dans la turbine réelle. Ainsi qu'une commande en couple de la MAS.

IV-2-Modélisation de la machine asynchrone

IV-2-1-Description

Les armatures du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques (entrefer constant) ; munies chacune d'un enroulement triphasé.

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés aux droites de leurs axes magnétiques.

Dans un plan perpendiculaire à son axe de rotation. Les trois enroulements statoriques sont décalés de 120° électrique [12]. La structure électrique du rotor est réalisée par une cage d'écureuil. Il sera admet que cette structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné, donc il sera schématisé par trois enroulements en court-circuit décalés de 120° électriques, comme dans la figure (IV-1) ci-après.

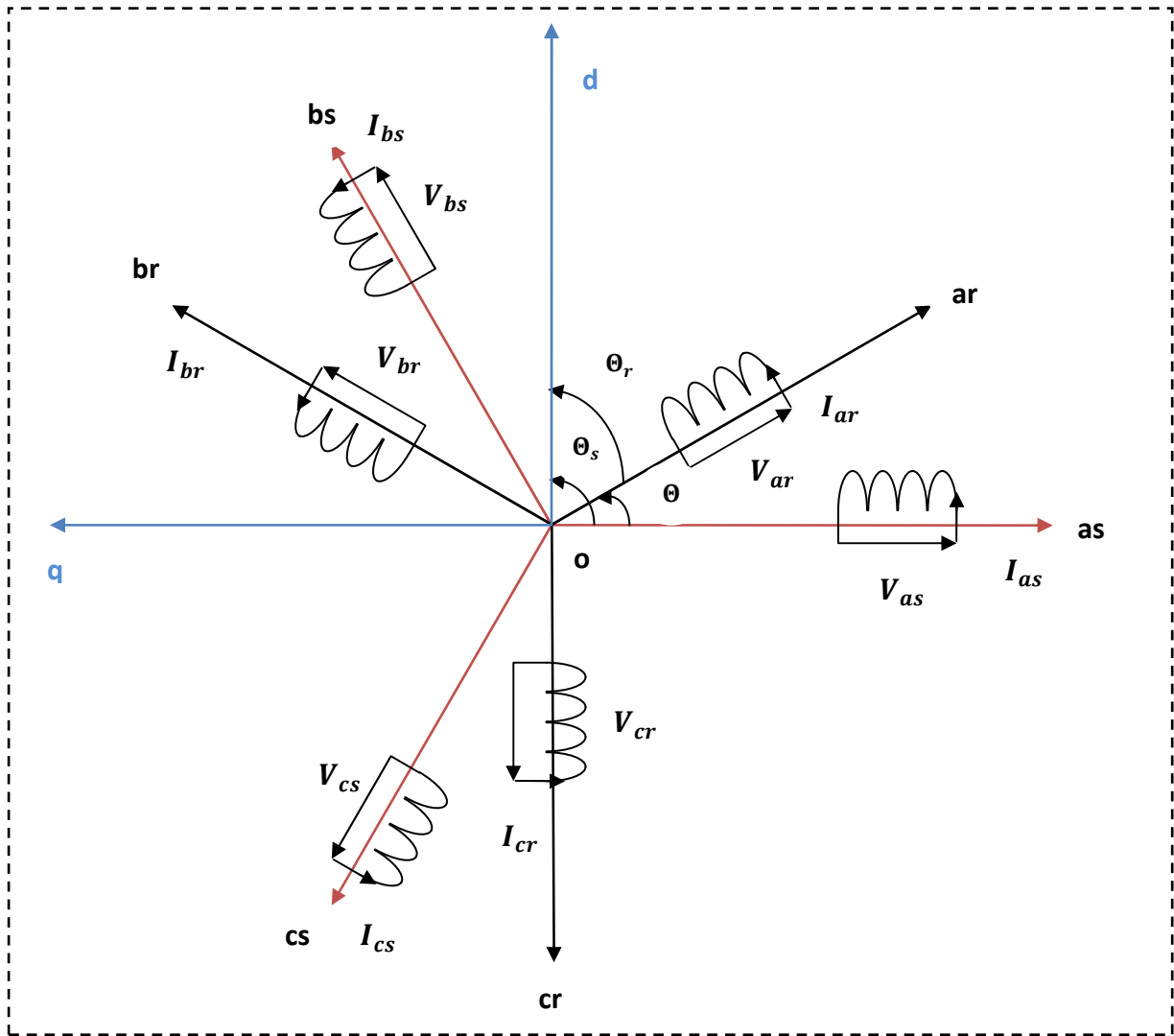


Figure IV-1 : Représentation schématique de la machine asynchrone dans le repère (a, b, c)

IV-2-2-Définition des angles

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (\overrightarrow{oas}, \overrightarrow{od}) = \theta_s \\
 (\overrightarrow{obs}, \overrightarrow{od}) = \theta_s - \frac{2\pi}{3} \\
 (\overrightarrow{ocs}, \overrightarrow{od}) = \theta_s - \frac{4\pi}{3} \\
 (\overrightarrow{oar}, \overrightarrow{od}) = \theta_r \\
 (\overrightarrow{obr}, \overrightarrow{od}) = \theta_r - \frac{2\pi}{3} \\
 (\overrightarrow{ocr}, \overrightarrow{od}) = \theta_r - \frac{4\pi}{3} \\
 (\overrightarrow{oas}, \overrightarrow{oar}) = 0
 \end{array} \right. \quad (IV-1)$$

L'axe oq est en arrière de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à l'axe od .

La relation entre les différents angles est : $\theta = \theta_s - \theta_r$.

La vitesse angulaire du rotor est donné par :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \omega = \omega_s - \omega_r \quad (\text{IV-2})$$

IV-2-3-Hypothèses simplificatrices

L'étude de la machine asynchrone traduit les lois de l'électromagnétisme, qui s'appuie sur certaines hypothèses :

- le circuit magnétique est non saturé, il est parfaitement feuilleté au stator et au rotor, seuls les conducteurs sont parcourus par des courants (Les courants de Foucault sont négligés).
- la densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs (L'effet de peau est négligé).
- la F.m.m créée par chaque phase du stator et du rotor est à distribution spatiale (Le long de l'entrefer) sinusoïdale (On ne considère que le premier harmonique). Les inductances propres sont par conséquent constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques.

IV-2-4-Conventions de signe

La machine asynchrone est majoritairement utilisée comme moteur, pour des raisons de modélisation nous adapterons les conventions de signe suivantes :

- Un courant positif créé à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une F.e.m positive fait circuler un courant positif.
- Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.
- La machine est alimentée par une source triphasée (La machine est réceptrice).

IV-2-5-Mise en équation de la machine asynchrone

Trois types d'équations peuvent traduire le fonctionnement de la machine asynchrone :

-Equations électriques.

-Equations magnétiques.

-Equation mécanique.

IV-2-5-1-Equations dans le système d'axes triphasé (a, b, c)

a-Equations électriques

Avec les hypothèses citées ci-dessus les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_{abcs}] = [R_s] \cdot [I_{abcs}] + \frac{d[\varphi_{abcs}]}{dt} \\ [V_{abcr}] = [R_r] \cdot [I_{abcr}] + \frac{d[\varphi_{abcr}]}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-3})$$

Les matrices de résistances au stator $[R_s]$ et au rotor $[R_r]$ sont données par :

$$\begin{cases} [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{IV-4})$$

L'écriture développée de l'équation (IV-3) est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{IV-5})$$

b-Equations magnétiques

Les équations des flux en fonctions des courants sont données comme suit :

$$\begin{bmatrix} [\varphi_{is}] \\ [\varphi_{ir}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{is}] \\ [I_{ir}] \end{bmatrix} \quad (\text{IV-6})$$

Avec φ_{is} et φ_{ir} sont les flux totalisés respectivement au stator et au rotor.

$$\begin{cases} [\varphi_{is}] = [\varphi_{as} & \varphi_{bs} & \varphi_{cs}]^t \\ [\varphi_{ir}] = [\varphi_{ar} & \varphi_{br} & \varphi_{cr}]^t \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

Les matrices d'inductances au stator et au rotor sont données par :

$$\begin{cases} [L_{ss}] = \begin{bmatrix} 1_s & M_s & M_s \\ M_s & 1_s & M_s \\ M_s & M_s & 1_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} 1_r & M_r & M_r \\ M_r & 1_r & M_r \\ M_r & M_r & 1_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{IV-8})$$

La matrice d'inductance mutuelle entre une phase statorique et une autre rotorique est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{IV-9})$$

La matrice inductance mutuelle entre une phase rotorique et statorique sera obtenue en transposant la matrice (IV-9). Elle sera ainsi donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t \quad (\text{IV-10})$$

IV-2-5-2-Equations dans le système d'axes diphasé (d, q) –Transformation de Park

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes direct **d** et en quadrature **q**.

Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

Le schéma global de la machine dans le repère (d, q) est donné par la figure (IV-2) ci-après.

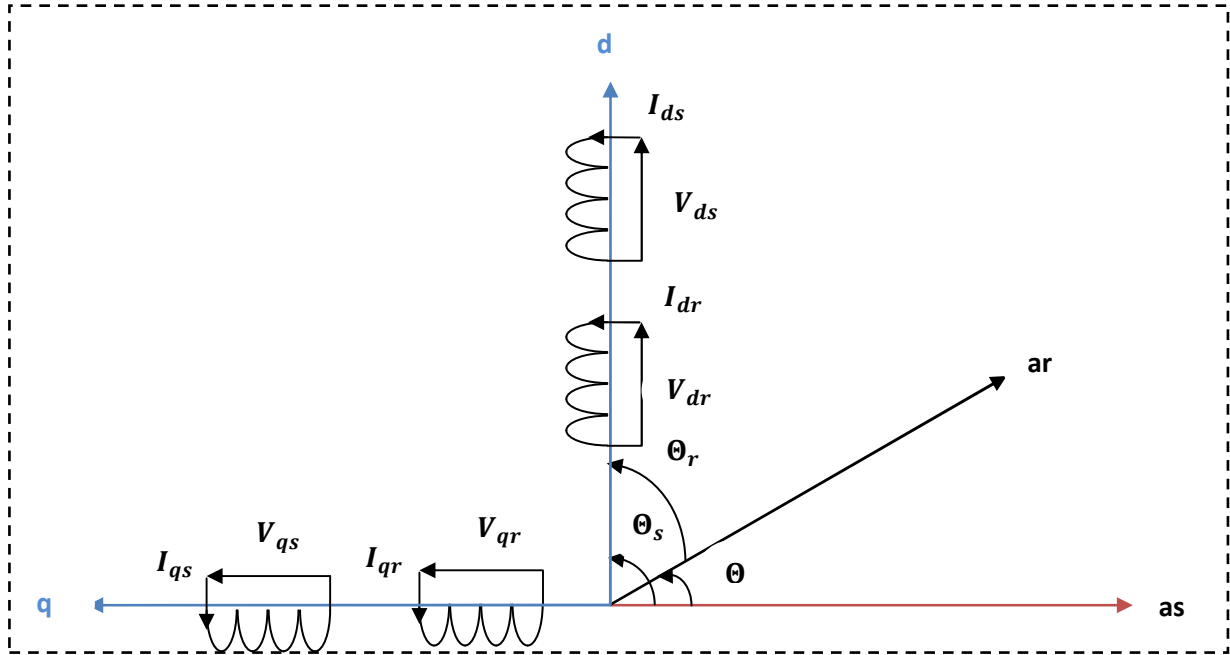


Figure IV-2 : Représentation schématique de la machine asynchrone dans le repère (d, q)

a-Les matrices de Park

On définit les matrices de Park et matrices inverses suivantes :

La matrice de Park est donnée par :

$$[P(\psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \psi & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-11})$$

D'où on aura la matrice inverse de Park :

$$[P(\psi)]^{-1} = [P(\psi)]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-12})$$

b-Equations électriques

L'équation (IV-5) peut s'écrire généralement sous la forme suivante :

$$[V_{abc}] = [R] \cdot [I_{abc}] + \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (\text{IV-13})$$

En appliquant la transformée inverse de Park $[P(\psi)]^{-1}$ à l'équation (IV-13) :

$$[P(\psi)]^{-1} \cdot [V_{dq0}] = [R] \cdot [P(\psi)]^{-1} \cdot [I_{dq0}] + \frac{d}{dt} \left\{ [P(\psi)]^{-1} \cdot [\varphi_{dq0}] \right\} \quad (\text{IV-14})$$

En multipliant l'équation (IV-14) par la transformée de Park, on obtient :

$$[V_{dq0}] = [R] \cdot [I_{dq0}] + \frac{d[\varphi_{dq0}]}{dt} + [P(\psi)] \cdot \left\{ \frac{d[P(\psi)]^{-1}}{dt} \right\} \cdot [\varphi_{dq0}] \quad (\text{IV-15})$$

On peut écrire :

$$P(\psi) \cdot \frac{d[P(\psi)]^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{IV-16})$$

L'équation (IV-15) pourra donc s'écrire comme suit :

$$[V_{dq0}] = [R] \cdot [I_{dq0}] + \frac{d[\varphi_{dq0}]}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d\psi}{dt} \cdot [I_{dq0}] \quad (\text{IV-17})$$

On peut donc avoir les expressions des tensions respectivement au stator et au rotor comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{IV-18})$$

Les pulsations des grandeurs statoriques et rotoriques sont données respectivement par :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \end{cases} \quad (\text{IV-19})$$

On obtient donc le système d'équations exprimant les tensions statoriques et rotoriques en fonction des flux, des courants et des pulsations statoriques et rotoriques respectivement :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-20})$$

c-Equations magnétiques

L'expression du flux dans le système d'axes diphasés (d, q) s'écrit généralement comme suit :

$$[\varphi_{dq0}] = [P(\psi)] \cdot [\varphi_{abc}] \quad (\text{IV-21})$$

En développant l'équation (IV-21) on aboutit aux systèmes matriciels des flux au stator et au rotor :

$$\begin{cases} [\varphi_{s(dq0)}] = [P(\theta_s)] \cdot \{ [L_{ss}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s(dq0)}] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r(dq0)}] \} \\ [\varphi_{r(dq0)}] = [P(\theta_r)] \cdot \{ [L_{rr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r(dq0)}] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s(dq0)}] \} \end{cases} \quad (\text{IV-22})$$

Le système matriciel obtenu après développement de l'équation (IV-22) est le suivant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{0s} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1_s - M_s) & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_0 & 0 & 0 \\ 0 & (1_s - M_s) & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_0 & 0 \\ 0 & 0 & (1_s + 2M_0) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_0 & 0 & 0 & (1_s - M_r) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_0 & 0 & 0 & (1_r - M_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1_r + 2M_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-23})$$

On pose :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \\ L_{0s} = l_s + 2M_s \\ L_{0r} = l_r + 2M_r \end{cases} \quad (\text{IV-24})$$

Le mode habituel d'alimentation du stator et la structure des enroulements rotoriques conférant la nullité aux sommes des courants statorique et rotoriques, donc les composantes homopolaires d'indice (0) sont nulles.

Dans ces conditions on définit les flux dans le systèmes d'axes diphasé(d, q) en fonction des trois paramètres L_s, L_r, L_m . Ainsi, on peut écrire les expressions des flux de la manière suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr} \\ \varphi_{dr} = L_m \cdot I_{ds} + L_r \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr} \\ \varphi_{qr} = L_m \cdot I_{qs} + L_r \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV-25})$$

Les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axes (d, q) s'obtiennent en remplaçant les expressions des flux dans l'équation (IV-20) :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot L_s \cdot I_{qs} - \omega_s \cdot L_m \cdot I_{qr} + L_m \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} + L_s \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot L_s \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot L_m \cdot I_{dr} + L_m \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \omega_r \cdot L_r \cdot I_{qr} - \omega_r \cdot L_m \cdot I_{qs} + L_m \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} + L_s \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot L_r \cdot I_{dr} + \omega_r \cdot L_m \cdot I_{ds} + L_m \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + L_s \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-26})$$

La machine étant à cage d'écureuil, les paramètres rotoriques figurant dans le système d'équations ne sont donc pas mesurables, pour palier à cette contrainte, nous sommes amenés à effectuer un changement de variables qui nous permettra de nous débarrasser des différentes inductances mutuelles.

On pose donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{dr} = \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \cdot I'_{dr} \\ I_{qr} = \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \cdot I'_{qr} \\ \sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) \\ T_r = \left(\frac{L_r}{R_r} \right) \end{array} \right. \quad \text{Et } \sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) \Rightarrow L_m^2 = (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot L_r \quad \text{(IV-27)}$$

Le rotor de la machine asynchrone est en court-circuit ($V_{dr} = V_{qr} = 0$), et en appliquant le changement de variable proposé précédemment, on aura une machine qui sera caractérisée par quatre paramètres électriques R_s , L_s , σ et T_r , les tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axes (d, q) s'écrivent comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_s \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot L_s \cdot I_{qs} + (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot \frac{dI'_{dr}}{dt} - (1 - \sigma) \cdot \omega_s \cdot L_s \cdot I'_{qr} \\ V_{qs} = \omega_s \cdot L_s \cdot I_{ds} + R_s \cdot I_{qs} + L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + (1 - \sigma) \cdot \omega_s \cdot L_s \cdot I'_{dr} + (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot \frac{dI'_{qr}}{dt} \\ 0 = \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot I_{qs} + \frac{1}{T_r} \cdot I'_{dr} + \left(\frac{dI'_{dr}}{dt} \right) - \omega_r \cdot I'_{qr} \\ 0 = \omega_r \cdot I_{ds} + \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot I'_{dr} + \frac{1}{T_r} \cdot I'_{qr} + \left(\frac{dI'_{qr}}{dt} \right) \end{array} \right. \quad \text{(IV-28)}$$

IV-2-6-Choix du référentiel

Le problème à étudier nous exige un choix judicieux du référentiel à utiliser. Cependant, nous pouvons simplifier encore les équations des tensions statoriques et rotoriques en choisissant un référentiel particulier pour (d, q) . En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir :

IV-2-6-1-Référentiel lié au stator

Noté (α, β) ; il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (\text{IV-29})$$

Le système (IV-20) devient :

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s \cdot I_{\alpha s} + \frac{d\varphi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s \cdot I_{\beta s} + \frac{d\varphi_{\beta s}}{dt} \\ V_{\alpha r} = R_r \cdot I_{\alpha r} - \omega_r \cdot \varphi_{\beta r} + \frac{d\varphi_{\alpha r}}{dt} \\ V_{\beta r} = R_r \cdot I_{\beta r} + \omega_r \cdot \varphi_{\alpha r} + \frac{d\varphi_{\beta r}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-30})$$

IV-2-6-2-Référentiel lié au rotor

Noté (x, y) ; il est utilisé dans le cas où l'on considère la vitesse de rotation constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{IV-31})$$

Le système (IV-20) devient :

$$\begin{cases} V_{xs} = R_s \cdot I_{xs} - \omega_s \cdot \varphi_{ys} + \frac{d\varphi_{xs}}{dt} \\ V_{ys} = R_s \cdot I_{ys} + \omega_s \cdot \varphi_{xs} + \frac{d\varphi_{ys}}{dt} \\ V_{xr} = R_r \cdot I_{xr} + \frac{d\varphi_{xr}}{dt} \\ V_{yr} = R_r \cdot I_{yr} + \frac{d\varphi_{yr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-32})$$

IV-2-6-3-Référentiel lié au champ tournant

Noté (d, q) ; il tourne à la vitesse de synchronisme, ce référentiel est utilisé dans le cas de petite variation de la fréquence d'alimentation de la machine.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \omega = \omega_s - \omega_r \Rightarrow g\omega_s = \omega_s - \omega \Rightarrow \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = g\omega_s \quad (\text{IV-33})$$

Le système (IV-20) devient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{IV-34})$$

IV-2-7-Puissance, couple et équation mécanique de la MAS

IV-2-7-1-Puissance absorbée par la machine

La machine asynchrone est généralement utilisée comme moteur, alimenté par une source triphasée équilibrée. Son rotor est en court-circuit :

$$P_{emas} = \left[P \cdot (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot (I_{qs} \cdot I'_{dr} + I_{ds} \cdot I'_{qr}) \right] \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{IV-35})$$

IV-2-7-2-Couple électromagnétique de la machine asynchrone

$$C_{emas} = P \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{IV-36})$$

En faisant le changement de variable, on aura :

$$C_{emas} = P \cdot (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot (I_{qs} \cdot I'_{dr} + I_{ds} \cdot I'_{qr}) \quad (\text{IV-37})$$

IV-2-7-3-Equation mécanique de la machine asynchrone

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_{mas} \cdot \frac{d\Omega_{mas}}{dt} = C_{emas} - C_{rmas} = C_{emas} - C_{Ch} - f_{mas} \cdot \Omega_{mas} \quad (\text{IV-38})$$

IV-2-8-Modèle d'état

Le modèle d'état consiste à écrire les équations de la machine sous forme d'un système matriciel, de forme

$$\frac{d[X]}{dt} = [A].[X] + [B].[U] \quad (\text{IV-39})$$

$$\text{Avec : } [X] = [I_{ds} \ I_{qs} \ I'_{dr} \ I'_{qr}]^t ; [U] = [V_{ds} \ V_{qs} \ 0 \ 0]^t \quad (\text{IV-40})$$

Le développement du système d'équations (IV-28), on aura l'écriture en variables d'états :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I'_{dr} \\ I'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{\omega_s(1-\sigma)\omega}{\sigma} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r} & \frac{(1-\sigma)(\omega_s-\omega)}{\sigma} \\ \frac{\omega_s(1-\sigma)\omega}{\sigma} & \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(1-\sigma)(\omega_s-\omega)}{\sigma} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r} \\ \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{(\omega_s-\omega)}{\sigma} & \frac{1}{\sigma L_r} & \frac{\omega_s(1-\sigma)\omega}{\sigma} \\ \frac{(\omega_s-\omega)}{\sigma} & \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{\omega_s(1-\sigma)\omega}{\sigma} & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I'_{dr} \\ I'_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV-41})$$

IV-3-Commande vectorielle de la machine asynchrone

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par une orientation convenable de ces dernières dans un repère $(d-q)$ tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si ceci est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique nécessaire pour faire tourner la machine.

Dans la machine à courant continu, l'axe de l'induit traversé par le courant I_a est maintenu fixe et orthogonal au flux d'excitation φ_e grâce au dispositif ballais-collecteur. Il en découle un découplage naturel entre ces deux grandeurs de sorte que l'expression vectorielle du couple prend une forme scalaire [28] :

$$C_{emcc} = k \cdot \varphi_e \cdot I_a \quad (\text{IV-42})$$

L'expression du couple électromagnétique de la machine asynchrone est donnée par la formule suivante :

$$C_{emas} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{IV-43})$$

La commande de la machine asynchrone à travers l'orientation du flux consiste à faire un découplage des grandeurs génératrices du couple de celles du flux, exactement comme dans le cas de la machine à courant continu à excitation séparée [22].

Dans notre travail, nous allons mettre en œuvre une commande qui consiste à orienter le repère du champ tournant d'axes (d, q) , de sorte à ce que l'axe d soit confondu avec la direction du flux φ_{dr} , noté φ_r .

Les flux rotoriques seront donnés par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV-44})$$

L'expression du couple électromagnétique sera par conséquent donnée par :

$$C_{emas} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \varphi_{dr} \cdot I_{qs} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \varphi_r \cdot I_{qs} \quad (\text{IV-45})$$

Le couple est réglable par action sur I_{qs} tandis que le flux φ_{dr} est maintenu constant par l'intermédiaire de I_{ds} .

IV-3-1-Commande vectorielle à flux rotorique orienté

L'orientation du flux rotorique φ_r suivant l'axe direct d impose une nouvelle forme des équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{IV-46})$$

Le courant rotorique suivant l'axe q est donné par :

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs} = 0 \Rightarrow I_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} \cdot I_{qs} \quad (\text{IV-47})$$

IV-3-2-Estimateurs de la commande vectorielle

IV-3-2-1-Estimation de la pulsation rotorique

On a du système d'équations (IV-46) :

$$0 = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \Rightarrow \omega_r = -\frac{R_r}{\varphi_{dr}} \cdot I_{qr} \quad (\text{IV-48})$$

Dans un moteur asynchrone à cage l'inductance L_m n'est pas accessible, donc non mesurable alors on définit le courant magnétisant donné par :

$$I_{rm} = \frac{\varphi_{dr}}{L_m} \quad (\text{IV-49})$$

L'estimation de ω_r est obtenue en remplaçant le courant I_{qr} dans l'expression de la pulsation rotorique et sera donnée par :

$$\omega_{rest} = -\frac{R_r}{\varphi_{dr}} \cdot I_{qr} \Rightarrow \frac{R_r}{\varphi_{dr}} \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_{qs} = \frac{L_m}{T_r \cdot \varphi_{dr}} \cdot I_{qs} = \frac{1}{T_r \cdot I_{rm}} \cdot I_{qs} \quad (\text{IV-50})$$

IV-3-2-2-Estimation de la pulsation statorique

La pulsation statorique est donnée en fonction de l'estimation de la pulsation rotorique comme suit :

$$\omega_s = P \cdot \Omega_{mas} + \omega_{rest} \quad (\text{IV-51})$$

En remplaçant l'estimation de la pulsation rotorique par son équation dans (IV-51), on obtient :

$$\omega_s = P.\Omega_{mas} + \frac{L_m}{T_r.\varphi_{dr}}.I_{qs} = P.\Omega_{mas} + \frac{1}{T_r.I_{rm}}.I_{qs} \quad (\text{IV-52})$$

IV-3-2-3-Estimation du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique s'écrit comme suit :

$$C_{emas} = P.\frac{L_m}{L_r}.\varphi_{dr}.I_{qs} = P.\frac{L_m^2}{L_r}.I_{rm}.I_{qs} = P.(1-\sigma).L_s.I_{rm}.I_{qs} \quad (\text{IV-53})$$

La relation (IV-53), nous montre que le couple électromagnétique de la machine asynchrone peut être réglé par l'action sur le courant statorique I_{qs} , pour un flux constant ($I_{rm}=\text{constant}$).

Ainsi, on se rabat sur la caractéristique de la machine à courant continu à excitation séparée où le couple est proportionnel au courant d'induit I_a , pour un flux d'excitation maintenu constant.

IV-3-2-4-Estimation du flux rotorique

De la deuxième équation de (IV-25), on tire :

$$I_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - L_m.I_{ds}}{L_r} \quad (\text{IV-54})$$

En substituant (IV-54) dans la troisième équation de (IV-46) on aura :

$$L_m.I_{ds} = \left(1 + \frac{d}{dt}\right).\varphi_{dr} \quad (\text{IV-55})$$

En remplaçant le courant magnétisant donné par l'expression (IV-49) dans (IV-55), on aboutit à l'expression suivante :

$$I_{mest} = \frac{1}{\left(1 + T_r.\frac{d}{dt}\right)}.I_{ds} \quad (\text{IV-56})$$

En procédant de même, on aboutit au système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{rest} = \frac{1}{T_r \cdot I_{rmest}} \cdot I_{qs} \\ C_{emas} = P \cdot (1 - \sigma) \cdot L_s \cdot I_{rmest} \cdot I_{qs} \\ I_{qr} = -\frac{L_m}{T_r} \cdot I_{qs} \\ I_{dr} = \frac{L_m}{L_r} \cdot (I_{rmest} - I_{ds}) \\ \omega_{sest} = P \cdot \Omega_{mas} + \frac{1}{T_r \cdot I_{rmest}} \cdot I_{qs} \end{array} \right. \quad (IV-57)$$

La dernière équation du système (IV-57) est insignifiante telle qu'elle est puisque le courant magnétisant est nul au démarrage, ainsi on utilise l'équation ci-dessous [22] :

$$\omega_{sest} = P \cdot \Omega_{mas} + \frac{1}{T_r \cdot (I_{rmest} + \varepsilon)} \cdot I_{qs} \quad \text{Avec : } \varepsilon \ll 1, \text{ positif} \quad (IV-58)$$

IV-3-3-Processus électrique et couplage non linéaire

En se basant sur les équations aux tensions statoriques, et en remplaçant le flux statorique selon l'axe d par son équation ($\varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr}$), où le courant rotorique suivant l'axe d

est donné par $I_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - L_m \cdot I_{ds}}{L_r} = \frac{L_m}{L_r} \cdot (I_{rmest} - I_{ds})$, on fait de même pour le flux φ_{qs} donné

par son équation ($\varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr}$) dans laquelle on pose $I_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} \cdot I_{qs}$ [16].

Après quelques manipulations et simplifications, on aboutit à un système d'équations, où un couplage non linéaire apparaît entre les deux processus de réglage (réglage du flux et du couple).

Le système d'équations qui découle est :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} + E_d = R_s \cdot I_{rmest} + R_s \cdot (T_s + T_r) \cdot \frac{dI_{rmest}}{dt} + \sigma \cdot T_s \cdot T_r \cdot \frac{d^2 I_{rmest}}{dt^2} \\ V_{qs} + E_q = R_s \cdot I_{qs} + \sigma \cdot R_s \cdot T_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} \end{array} \right. \quad (IV-59)$$

Les termes E_d et E_q sont exprimés par :

$$\begin{cases} E_d = \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{qs} \\ E_q = -L_s \cdot \omega_s \cdot \left[1 + \sigma \cdot T_r \cdot \frac{d}{dt} \right] I_{r_{mest}} = -L_s \cdot \omega_s \cdot \left[\frac{1 + \sigma \cdot T_r \cdot \frac{d}{dt}}{1 + T_r \cdot \frac{d}{dt}} \right] I_{ds} \end{cases} \quad (\text{IV-60})$$

Le réglage du flux et du couple, peut se faire en agissant respectivement sur les tensions V_{ds} et V_{qs} . Les termes E_d et E_q nous renseignent sur un couplage non linéaire existant entre les deux réglages, donc un découplage doit être réalisé, et cela en atténuant l'effet de ces deux derniers termes sur les tensions V_{ds} et V_{qs} [16].

En passant par la transformée de Laplace l'expression (IV-60) devient comme suit :

$$\begin{cases} \frac{I_{r_{mest}}(S)}{V_{ds}(S) + E_d(S)} = \frac{1/R_s}{\sigma \cdot T_s \cdot T_r \cdot S^2 + (T_s + T_r) \cdot S + 1} \\ \frac{I_{qs}(S)}{V_{qs}(S) + E_q(S)} = \frac{1/R_s}{\sigma \cdot T_s \cdot S + 1} \end{cases} \quad (\text{IV-61})$$

Les termes $E_d(S)$ et $E_q(S)$ sont donnés par :

$$\begin{cases} E_d(S) = \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{qs}(S) \\ E_q(S) = -L_s \cdot \omega_s \cdot [1 + \sigma \cdot T_r \cdot S] \cdot I_{r_{mest}}(S) \end{cases} \quad (\text{IV-62})$$

Le couplage non linéaire entre les deux processus est illustré dans la figure ci-dessous :

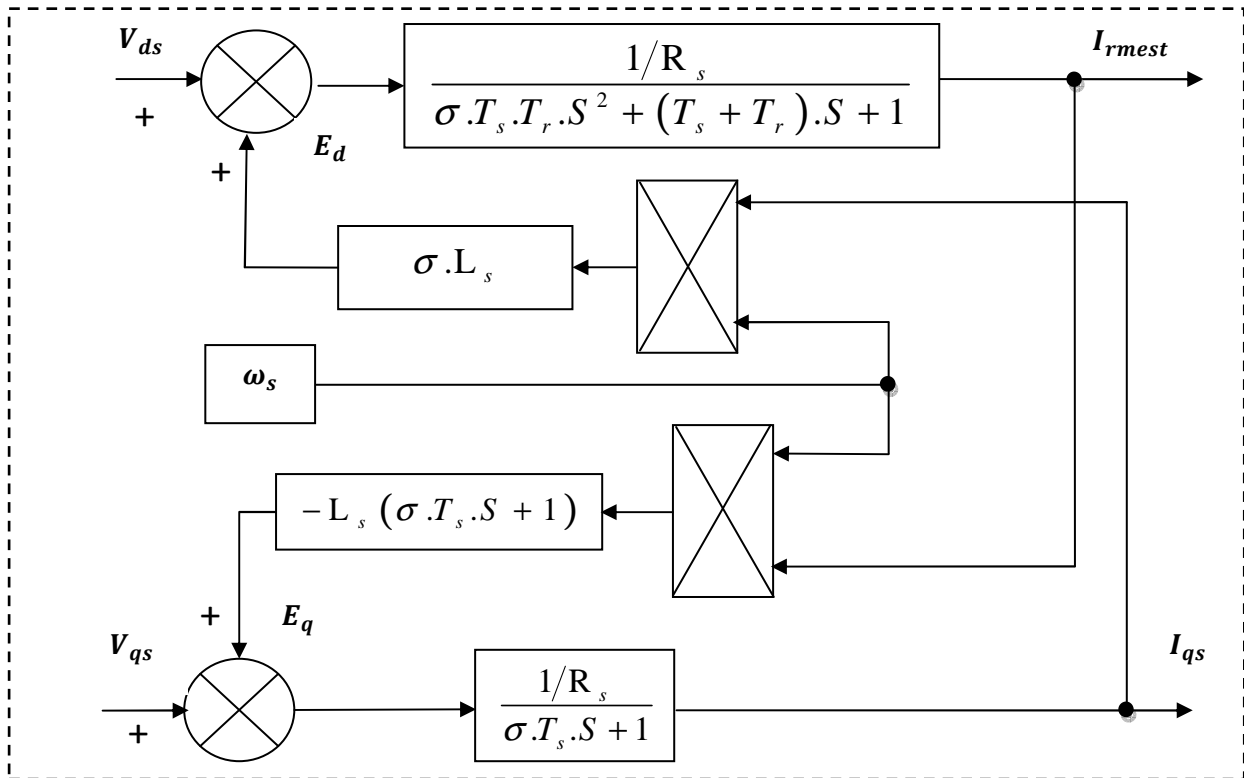


Figure IV-3 : Schéma du couplage non linéaire.

IV-3-4-Découplage par compensation

Le but de la réalisation d'un découplage est de limiter l'effet de l'entrée à une seule sortie, en décomposant le système en deux sous-systèmes évoluant en même temps. On rencontre très souvent maintes techniques de découplage : par retour d'état, par utilisation d'un régulateur et par compensation, ce dernier est le plus utilisé vu sa simplicité et aussi sa précision [22].

Dans le cadre de notre travail, et dans le but de commander la machine asynchrone, nous utiliserons la technique de découplage par compensation.

Nous définissons deux nouvelles variables V_{ds1} et V_{qs1} définies comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds1} = V_{ds} + E_d \\ V_{qs1} = V_{qs} + E_q \end{cases} \quad \text{(IV-63)}$$

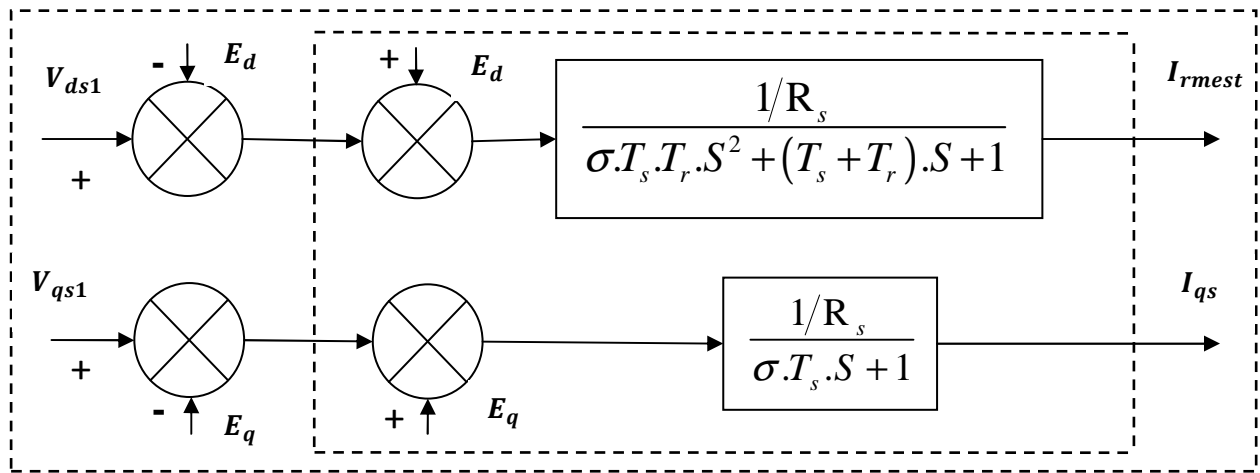


Figure IV-4 : Découplage par compensation, reconstitution des tensions V_{ds1} et V_{qs1} .

Les tensions V_{ds} et V_{qs} sont reconstituées à partir des tensions V_{ds1} et V_{qs1} , ainsi un nouveau système sera mis en évidence, en se basant sur les équations ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{I_{rmest}(S)}{V_{ds1}(S)} = \frac{1/R_s}{\sigma.T_s.T_r + (T_s + T_r).S + 1} \\ \frac{I_{qs}(S)}{V_{qs1}(S)} = \frac{1/R_s}{\sigma.T_s.S + 1} \end{array} \right. \quad (\text{IV-64})$$

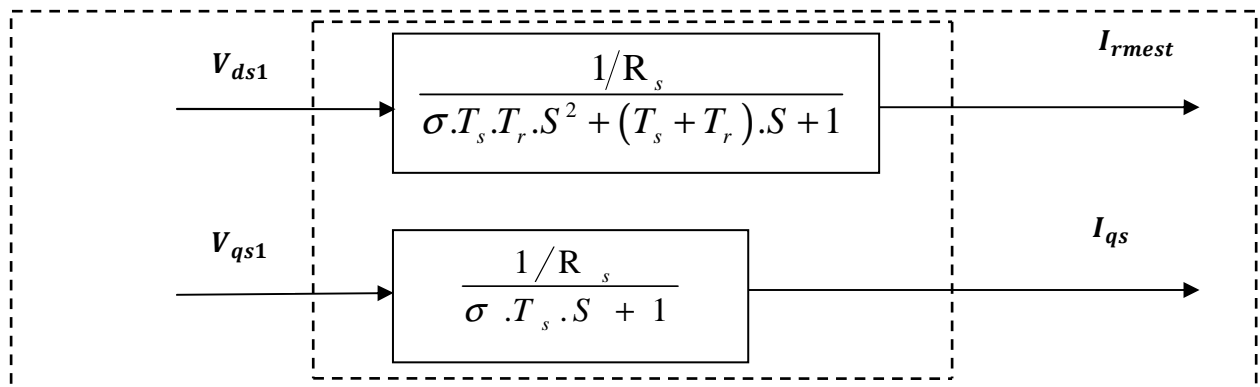


Figure IV-5 : Commande découplée de la machine asynchrone.

Dans le découplage par compensation, des problèmes d'instabilité sont souvent rencontrés dans le cas de l'évolution des paramètres du modèle, par conséquent des problèmes de robustesse de la commande seront posés.

Si le découplage est d'une bonne correction, toute action sur l'une des entrées ne provoque guère une variation de l'autre sortie. En revanche, une divergence du système pourrait être

provoquée par une mauvaise compensation où on sera confronté à une évolution de cette dernière dans un sens de sorte à ce qu'il y ait renforcement de l'action, pour y remédier plusieurs techniques peuvent être envisagées, parmi elles, fixer a priori un gain plus faible dans les fonctions de transfert compensatrices [16].

IV-3-5-Schéma global de la commande vectorielle directe à flux rotorique orienté

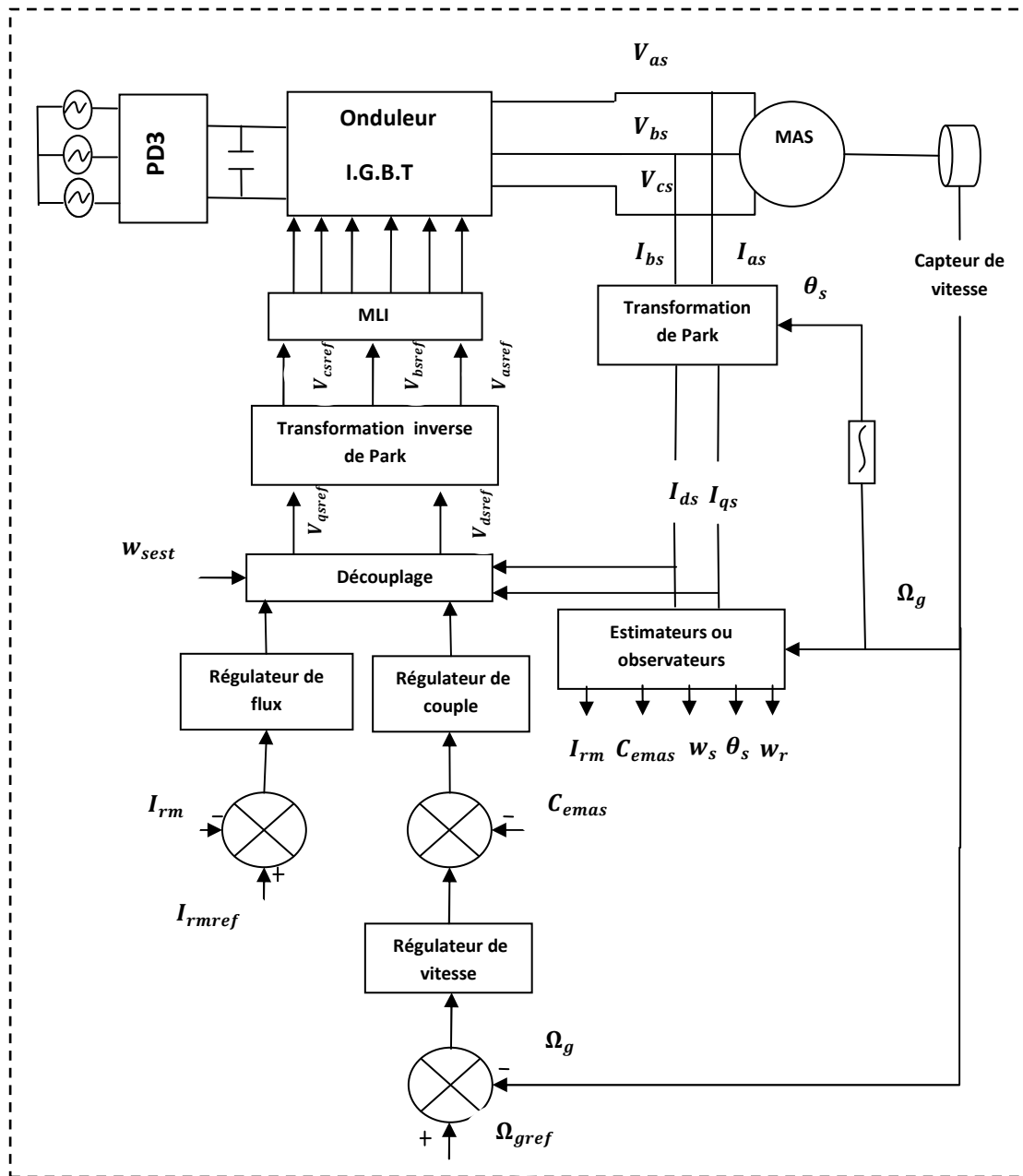


Figure IV-6 : Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté de la machine asynchrone.

IV-3-6-Calcul des différents régulateurs

IV-3-6-1-Régulateur de courant magnétisant rotorique

Le découplage par compensation illustré dans la figure (IV-5), nous permet d'écrire la fonction de transfert suivante :

$$\frac{I_{rm}(S)}{V_{ds1}(S)} = \frac{1/R_s}{\sigma.T_s.T_r.S^2 + (T_s + T_r).S + 1} = \frac{1/R_s}{(1 + \tau_1.S).(1 + \tau_2.S)} \quad (\text{IV-65})$$

Les constantes de temps τ_1 et τ_2 sont données par leurs expressions :

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{2.\sigma.T_r.T_s}{(T_s + T_r) + \sqrt{(T_s + T_r)^2 - 4.\sigma.T_r.T_s}} \\ \tau_2 = \frac{2.\sigma.T_r.T_s}{(T_s + T_r) - \sqrt{(T_s + T_r)^2 - 4.\sigma.T_r.T_s}} \end{cases} \quad (\text{IV-66})$$

Si on considère que les constantes de temps rotoriques et statoriques sont égales, on aboutit au système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{\sigma.T_s}{1 + \sqrt{1 - \sigma}} \\ \tau_2 = \frac{\sigma.T_s}{1 - \sqrt{1 - \sigma}} \end{cases} \quad (\text{IV-67})$$

Les deux constantes de temps sont très écartées l'une de l'autre, si on fixe le coefficient de dispersion à une valeur moyenne égale à 0.1, on aura : $\tau_1 = 0.05T_s$ et $\tau_2 = 1.95T_s$, soit, ainsi on peut tirer que l'utilisation d'un régulateur PI est le choix le plus judicieux pour la compensation, et cela pour le pole le plus long, c'est-à-dire pour la constante de temps τ_2 .

On définit le régulateur PI caractérisé par la fonction de transfert $F_{rm}(S) = \frac{K_{lrm} + K_{prm}.S}{S} = \frac{K_{lrm} + K_{lrm}.\tau_{rm}.S}{S} = K_{lrm} \cdot \frac{1 + \tau_{rm}.S}{S}$, avec $\tau_{rm} = \frac{K_{prm}}{K_{lrm}} = \tau_2$, le courant magnétisant est relié à sa référence avec la fonction de transfert suivante :

$$\frac{I_{rm}(S)}{I_{rmref}(S)} = \frac{1}{\frac{R_s.\tau_1}{K_{lrm}}.S^2 + \frac{R_s}{K_{lrm}}.S + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2}.S^2 + \frac{2.z}{\omega_n}.S + 1} \quad (\text{IV-68})$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_{I_{rm}}}{R_s \cdot \tau_1} \Rightarrow K_{I_{rm}} = \omega_n^2 \cdot R_s \cdot \tau_1 \\ \frac{2 \cdot z}{\omega_n} = \frac{R_s}{K_{I_{rm}}} \end{cases} \quad (\text{IV-69})$$

La boucle de régulation de flux (courant magnétisant) est représentée dans la figure (IV-7) :

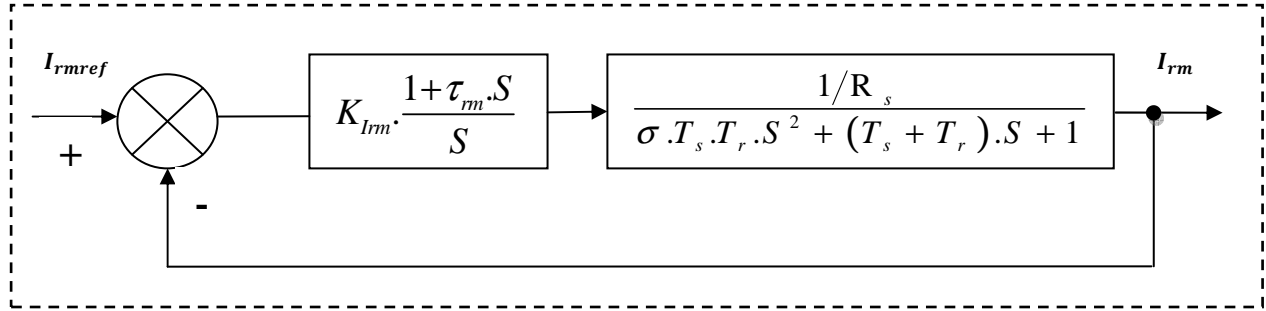


Figure IV-7 : Régulation du courant magnétisant rotorique.

Le temps nécessaire pour atteindre 95% de la valeur du régime permanent d'un système de second ordre [Annexe-tableau(5)], représente la relation entre la fréquence propre ω_n et le coefficient d'amortissement z en fonction du temps de réponse t_{rm} .

La résolution du système précédent donne :

$$\begin{cases} K_{I_{rm}} = \frac{R_s}{4 \cdot \tau_1 \cdot z^2} \\ \omega_n = \frac{1}{2 \cdot \tau_1 \cdot z} \end{cases} \quad (\text{IV-70})$$

A partir du tableau caractérisant un système de second ordre [Annexe-tableau(5)] et en choisissant $z=0.7$, on obtient $K_{rm} = R_s / (1.96\tau_1)$ et $\omega_n = 1 / (1.4\tau_1)$, par conséquent le temps de réponse sera $t_{rm} = 3 / \omega_n = 4.2\tau_1$.

Enfin on obtient les paramètres du régulateur : $\tau_{rm} = \tau_2$ et $K_{I_{rm}} = R_s / (1.96\tau_1)$

IV-3-6-2-Régulateur du couple électromagnétique

Si on considère que le flux d'excitation est constant (Courant magnétisant constant est égal à sa référence), le couple électromagnétique C_{emas} est relié à la tension V_{qs1} avec la fonction de transfert qui suit :

$$\frac{C_{emas}(S)}{V_{qs1}(S)} = \frac{K}{1 + \sigma T_s \cdot S} \quad (\text{IV-71})$$

$$\text{Avec : } K = \frac{P \cdot L_s (1 - \sigma) \cdot I_{rmref}}{R_s} \quad (\text{IV-72})$$

On définit le régulateur PI caractérisé par la fonction de transfert

$$F_{Cemas}(S) = \frac{K_{ICemas} + K_{PCemas} \cdot S}{S} = \frac{K_{ICemas} + K_{ICemas} \cdot \tau_{Cemas} \cdot S}{S} = K_{ICemas} \cdot \frac{1 + \tau_{Cemas} \cdot S}{S}, \quad \text{avec}$$

$$\tau_{Cemas} = \frac{K_{PCemas}}{K_{ICemas}}, \quad \text{en boucle ouverte, on obtient la fonction de transfert du système comme}$$

suit :

$$\frac{C_{emas}(S)}{V_{qs1}(S)} = \frac{K \cdot K_{ICemas} \cdot (1 + \tau_{Cemas} \cdot S)}{(1 + \sigma T_s \cdot S) \cdot S} \quad (\text{IV-73})$$

On peut déterminer le régulateur du couple de la même façon que celui du courant magnétisant, c'est-à-dire en utilisant la méthode de compensation de pôles de la fonction de transfert. En posant $\tau_{Cemas} = \sigma T_s$ et $\omega_n = K \cdot K_{ICemas}$, on obtient l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée ramenée au premier ordre suivante :

$$\frac{C_{emas}(S)}{C_{emasref}(S)} = \frac{1}{\frac{S}{\omega_n} + 1} \quad (\text{IV-74})$$

Du tableau caractérisant un système de premier ordre **[Annexe-tableau(4)]**, on constate que le temps de réponse nécessaire pour atteindre 95% de la valeur du régime permanent est

$t_{rCemas} = 3/\omega_n$, le gain K_{ICemas} sera donc donné par :

$$K_{ICemas} = \frac{3}{t_{rCemas} \cdot K} = \frac{3 \cdot R_s}{t_{rCemas} \cdot P \cdot L_s (1 - \sigma) \cdot I_{rmref}} = \frac{3 \cdot R_s}{t_{rCemas} \cdot K'} \quad (\text{IV-75})$$

$$\text{Avec : } K' = \frac{1}{K} = \frac{R_s}{P.L_s(1-\sigma).I_{rref}} \quad (\text{IV-76})$$

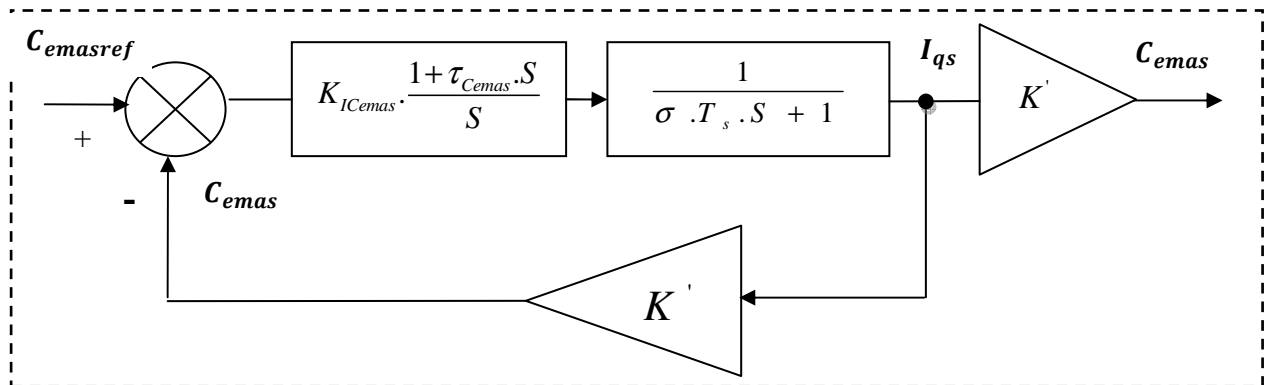


Figure IV-8 : Régulation du couple électromagnétique.

IV-3-6-3-Régulateur de vitesse

Si une bonne régulation du couple et du flux est faite, on obtient la chaîne de régulation de vitesse suivante :

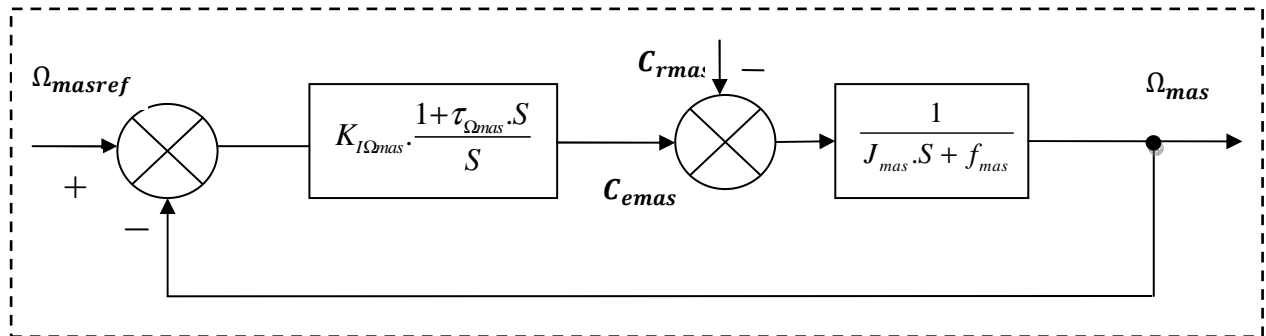


Figure IV-9 : Régulation de la vitesse de rotation.

Si on utilise le régulateur PI caractérisé par la fonction de transfert

$$F_{\Omega_{mas}}(S) = \frac{K_{I\Omega_{mas}} + K_{P\Omega_{mas}} \cdot S}{S} = \frac{K_{I\Omega_{mas}} + K_{I\Omega_{mas}} \cdot \tau_{\Omega_{mas}} \cdot S}{S} = K_{I\Omega_{mas}} \cdot \frac{1 + \tau_{\Omega_{mas}} \cdot S}{S}, \quad \text{avec}$$

$$\tau_{\Omega_{mas}} = \frac{K_{P\Omega_{mas}}}{K_{I\Omega_{mas}}}, \quad \text{la vitesse } \Omega_{mas} \text{ sera donnée par :}$$

$$\Omega_{mas}(S) = \frac{(1 + \tau_{\Omega_{mas}} \cdot S)}{\frac{J}{K_{I\Omega_{mas}}} \cdot S^2 + \left(\frac{f}{K_{I\Omega_{mas}}} + \tau_{\Omega_{mas}} \right) \cdot S + 1} \cdot \Omega_{masref} - \frac{S \cdot C_{rmas}(S)}{\frac{J}{K_{I\Omega_{mas}}} \cdot S^2 + \left(\frac{f}{K_{I\Omega_{mas}}} + \tau_{\Omega_{mas}} \right) \cdot S + 1} \quad (\text{IV-77})$$

La fonction de transfert est de second ordre, le dénominateur peut donc s'écrire sous la forme

$$1 / \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2 \cdot z}{\omega_n} \cdot s + 1 \right) \quad (\text{IV-78})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_{\Omega mas}}{J} \\ \frac{2 \cdot z}{\omega_n} = \frac{f}{K_{\Omega}} + \tau_{\Omega mas} \end{cases} \quad (\text{IV-79})$$

Si on prend un coefficient d'amortissement $z=1$, on aura $t_{r\Omega mas} \cdot \omega_n = 4.8$, $t_{r\Omega mas}$ est le temps nécessaire pour que la vitesse atteigne son régime permanent. Ainsi on obtient les paramètres du régulateur suivants :

$$\begin{cases} K_{I\Omega mas} = \left(\frac{4.8}{t_{r\Omega mas}} \right)^2 \cdot J \\ \tau_{\Omega mas} = \frac{2 \cdot t_{r\Omega mas}}{4.8} - \frac{f}{K_{I\Omega mas}} \end{cases} \quad (\text{IV-80})$$

IV-3-7-Valeurs numériques des différents régulateurs

IV-3-7-1-Régulateur du courant magnétisant

Le calcul des deux constantes de temps τ_1 et τ_2 , exprimées par l'équation (IV-67), nous donne $\tau_1 = 0.0056s$ et $\tau_2 = 0.2667s$.

En choisissant un coefficient d'amortissement $z=0.7$, on aura $K_{I_{rm}} = R_s / 4 \cdot \tau_1 \cdot z^2 = 136.41s^{-1}$ et $\omega_n = 1/2 \cdot \tau_1 \cdot z = 127.32 \text{ rad/s}$. Par conséquent on aura $\tau_{rm} = 3/127.32 = 23.56ms$.

Les paramètres du régulateur seront donc :

$$\tau_2 = \tau_{rm} = 0.2667s \text{ et } K_{I_{rm}} = 136.41s^{-1}.$$

IV-3-7-2-Régulateur du couple électromagnétique

On prend un temps de réponse $\tau_{rCemas} = 0.01s$, ainsi on aura le gain

$$K_{ICemas} = \frac{3}{t_{rCe} \cdot K} = 3 \cdot R_s / t_{rCemas} \cdot P.L_s (1 - \sigma) \cdot I_{rmref} = 325.15s^{-1}.$$

La référence du courant magnétisant peut être prise proche de la valeur du courant absorbé par la machine à vide I_0 , dans les conditions nominales le courant magnétisant de référence peut être calculé de la manière suivante : $I_{r\text{mref}} = I_0 = 220 \cdot \sqrt{3} / L_s \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 4.66 \text{ A}$

Les paramètres du régulateur seront donc :

$$\tau_{C_{emas}} = \sigma T_s = 0.0151 \text{ s} \text{ et } K_{IC_{emas}} = 325.15 \text{ s}^{-1}$$

IV-3-7-3-Régulateur de vitesse

Le temps de réponse du régulateur de vitesse sera égal à dix fois celui du couple c'est-à-dire $t_{r\Omega_{mas}} = 10 \cdot t_{rC_{emas}} = 0.1 \text{ s}$. Le coefficient d'amortissement sera pris comme étant unitaire.

D'après l'expression (IV-80), le régulateur de vitesse aura les paramètres suivants :

$$K_{I\Omega_{mas}} = J \cdot (4.8)^2 / t_{r\Omega_{mas}}^2 = 85.25 \text{ s}^{-1} \text{ et } \tau_{\Omega_{mas}} = (2 \cdot t_{r\Omega_{mas}} / 4.8) - (f / K_{I\Omega_{mas}}) = 0.0415 \text{ s}.$$

IV-3-8-Simulation numérique de la machine asynchrone

Les équations de la machine exprimées dans le repère (d, q) tournant à la pulsation de synchronisme sont :

a-Equations électriques

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{ds}}{dt} = -a_1 \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot I_{qs} + a_2 \cdot I_{rmd} + a_3 \cdot \omega \cdot I_{rmq} + b_1 \cdot V_{ds} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\omega_s \cdot I_{ds} - a_1 \cdot I_{qs} - a_3 \cdot \omega \cdot I_{rmd} + a_2 \cdot I_{rmq} + b_1 \cdot V_{qs} \\ \frac{dI_{rmd}}{dt} = a_4 \cdot I_{ds} - a_4 \cdot I_{rmd} + (\omega_s - \omega) \cdot I_{rmq} \\ \frac{dI_{rmq}}{dt} = a_4 \cdot I_{qs} - a_4 \cdot I_{rmq} + (\omega_s - \omega) \cdot I_{rmd} \end{array} \right. \quad \text{(IV-81)}$$

b-Equation mécanique

$$\frac{d\omega}{dt} = a_5 \cdot (I_{rmd} \cdot I_{qs} - I_{rmq} \cdot I_{ds}) - b_2 \cdot C_{rmas} \quad \text{(IV-82)}$$

c-Couples électromagnétique et résistant

$$\begin{cases} C_{emas} = (a_5/b_2) \cdot (I_{rmd} \cdot I_{qs} - I_{rmq} \cdot I_{ds}) \\ C_{mas} = b_3 \cdot \omega - C_{Ch} \end{cases} \quad (\text{IV-83})$$

d-Les expressions des différentes constantes

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{\sigma \cdot T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot T_r}; a_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot T_r}; a_3 = \frac{1-\sigma}{\sigma}; a_4 = \frac{1}{T_r}; a_5 = \frac{P^2}{J} \cdot (1-\sigma) \cdot L_s \\ b_1 = \frac{1}{\sigma \cdot L_s}; b_2 = \frac{P}{J}; b_3 = \frac{f}{P} \end{cases} \quad (\text{IV-84})$$

IV-4-Résultats de simulation numérique de la commande vectorielle et leurs interprétations**IV-4-1-En poursuite de vitesse**

Dans cette simulation nous allons appliquer :

- Une consigne trapézoïdale de la vitesse de rotation.
- Une référence du courant magnétisant maintenue à 4.66A .
- Un couple résistant de charge nul.

Les résultats en poursuite de vitesse obtenus par simulation sont illustrés dans la figure (IV-10). La poursuite de vitesse nous a permis d'estimer la fiabilité de la commande vectorielle. Les comparaisons entre les grandeurs de sortie et leurs références, à l'instar du courant magnétisant I_{rm} à sa référence I_{rmref} et la vitesse de rotation Ω_{mas} à la consigne Ω_{masref} illustrent bien la compatibilité des paramètres des régulateurs à la commande.

On constate que suite à l'établissement du courant magnétisant, une augmentation du couple serait engendrée par la variation de la vitesse de rotation et atteint une valeur de 8N.m , donc un fort appel du courant statorique I_{qs} . Suite à l'établissement de la vitesse, ce couple diminue à 2N.m pour compenser le couple de pertes.

L'allure du courant I_{ds} nous renseigne sur l'existence d'une relation qui le lie au courant magnétisant I_{rm} .

Un résultat très séduisant est obtenu dans cette simulation, c'est celui du découplage parfait entre le flux et le couple puisque aucune variation du courant magnétisant I_{rm} n'apparaît durant le régime transitoire du couple C_{emas} .

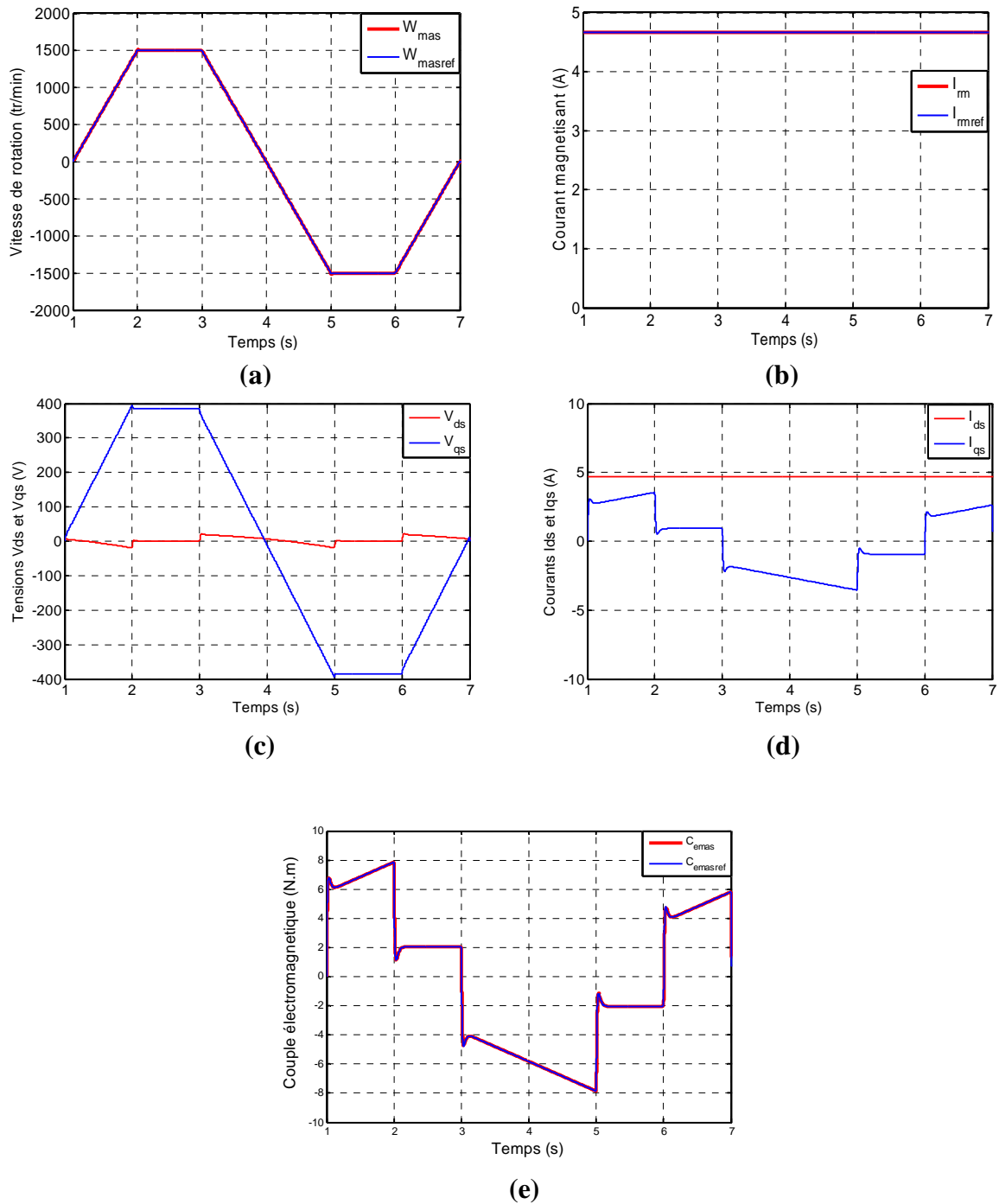


Figure IV-10 : Résultats de la commande vectorielle en poursuite de vitesse.

IV-4-2-En régulation de vitesse

Dans cette simulation nous allons appliquer :

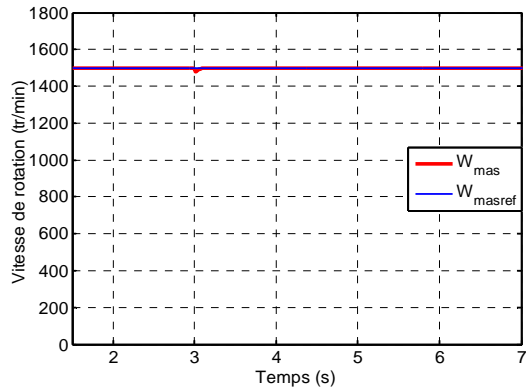
- Une consigne de vitesse sous forme d'un échelon d'une valeur égale à 157rad/s .
- Une référence du courant I_{rm} maintenue comme le cas de la poursuite de vitesse à 4.66A .
- Un couple de charge sous forme d'un échelon d'amplitude $C_{ch} = 10\text{N.m}$, appliqué à l'instant $t = 3\text{s}$.

Les résultats de régulation de vitesse sont représentés sur la figure (IV-11). Lors de l'application d'un couple de charge à $t = 3\text{s}$, on constate un creux de vitesse, ainsi une chute de l'ordre de 20Tr/min , ce creux sera vite compensé (100ms) et ramené à sa valeur de référence.

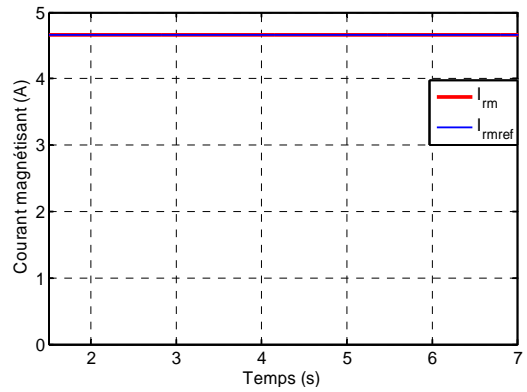
Le couple électromagnétique de la machine augmente de façon brusque, suivi d'un appel du courant I_{qs} qui atteint la valeur de 6.2A sous une tension de 400V pour compenser le couple extérieur tandis que le courant I_{ds} demeure toujours égal à sa valeur de référence, ces valeurs restent tout de même raisonnables et admissibles.

La régulation de vitesse est d'appui sur l'existence d'une relation entre les courants I_{ds} et I_{rm} , car l'application d'un couple de charge n'a pas influencé sur ces deux courants. Ainsi aucune imperfection n'apparaît dans le découplage entre le couple et le flux.

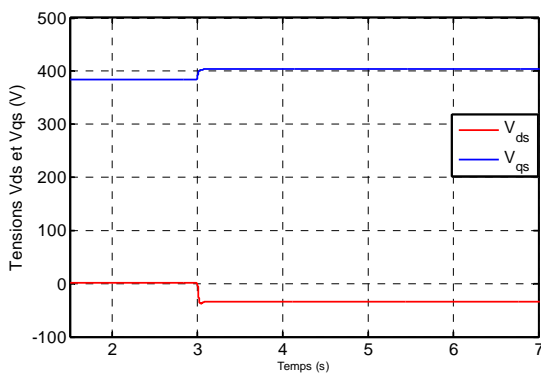
Nous pouvons aussi dire que les bons résultats de la régulation de vitesse nous permettent d'utiliser la machine asynchrone pour la réalisation de l'émulateur de la turbine éolienne en vue de la reproduction du couple mécanique de la turbine éolienne.



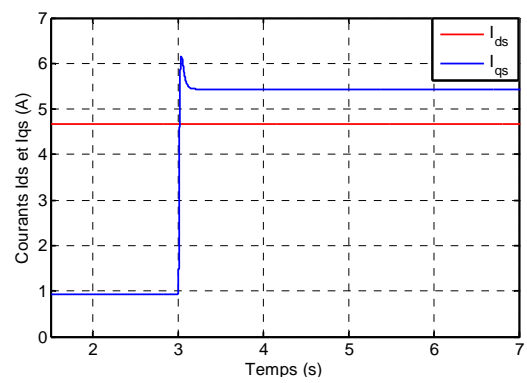
(a)



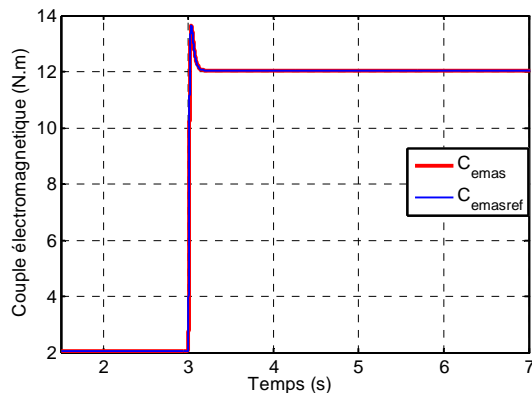
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure IV-11 : Résultats de la commande vectorielle en régulation de vitesse.

IV-5-Mise en œuvre de l'émulateur

Comme dans le cas de l'émulateur à base d'une MCC, nous allons essayer de se rapprocher du fonctionnement réel de la turbine éolienne. Le système global de l'émulateur utilisant la MAS est identique à celui construit à base de la MCC illustré dans la figure (III-1), la seule différence est dans les paramètres des deux machines utilisées. La machine asynchrone possède une inertie J_{mas} et un coefficient de frottements f_{mas} . Les équations de mouvement des deux systèmes, turbine réelle et simulateur s'obtiennent de la même manière que dans le cas de l'émulateur à base de la MCC, en remplaçant toutefois l'inertie et le coefficient de frottement de cette dernière par ceux de la MAS, et la résolution de ces deux équations nous permettra d'avoir la référence du couple de la machine asynchrone.

La commande MPPT avec asservissement de vitesse utilisée dans la turbine réelle est mise en œuvre. D'autre part une commande vectorielle est affectée à la MAS dans le but de ramener son couple à sa référence, ce couple sera la somme de deux couples, mécanique sur l'arbre de la génératrice et un couple de compensation.

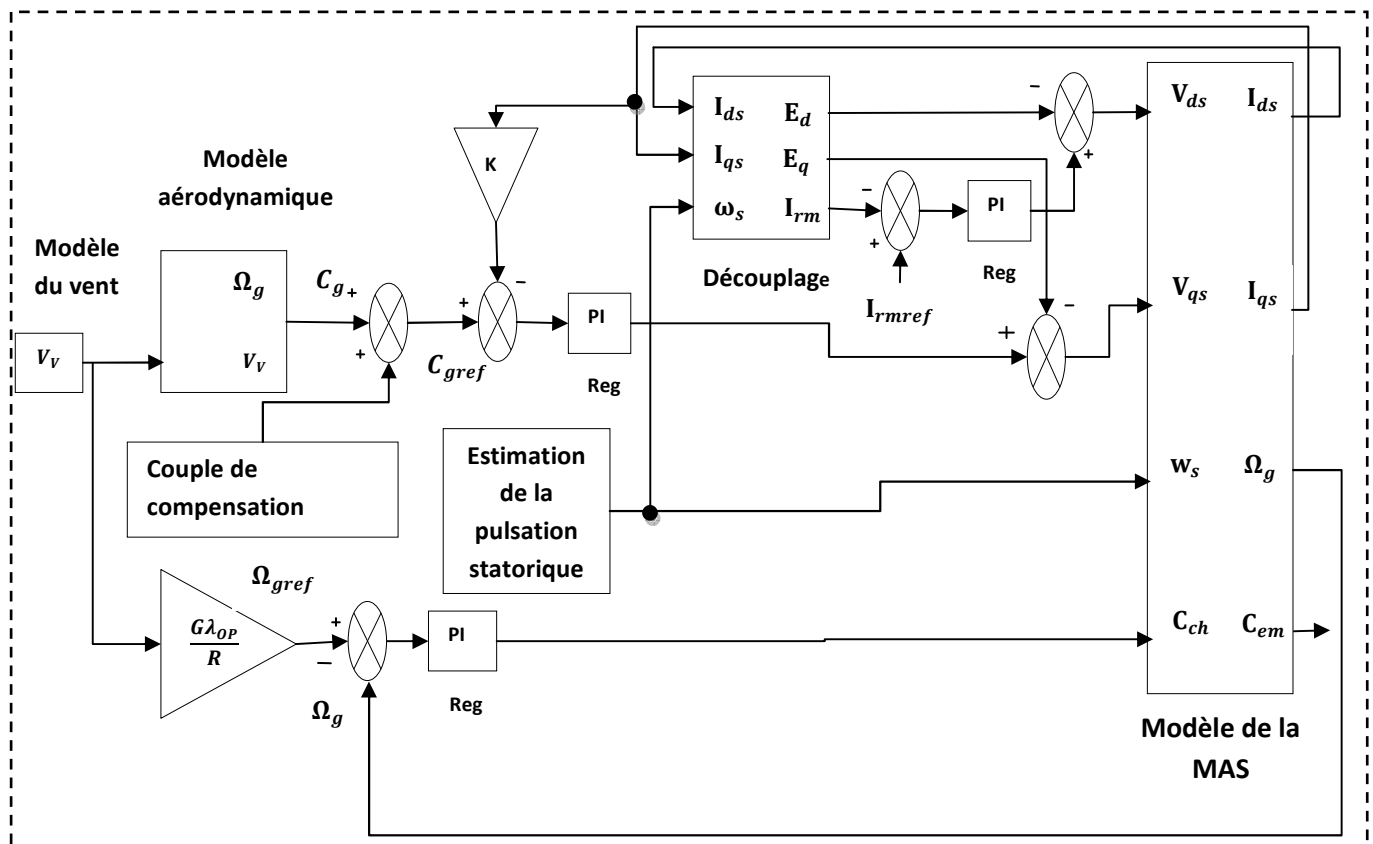


Figure IV-12 : Schéma synoptique de l'émulateur à base d'une MAS.

IV-6-Résultats de l'émulateur et leurs interprétations

Comme dans le cas de l'émulateur utilisant la MCC, et dans le but de la mise en œuvre d'un émulateur avec la MAS à cage, nous allons adopter le contrôle de la turbine avec asservissement de la vitesse de rotation.

Cependant, et pour construire l'émulateur, une vérification des valeurs du coefficient de puissance et de la vitesse relative doit être faite d'avantage, ces deux derniers doivent donc être fixés à leurs valeurs optimales.

De la figure (IV-13), on voit que les deux paramètres sont fixés à leurs valeurs maximales, d'où une bonne récupération de la puissance disponible dans le vent.

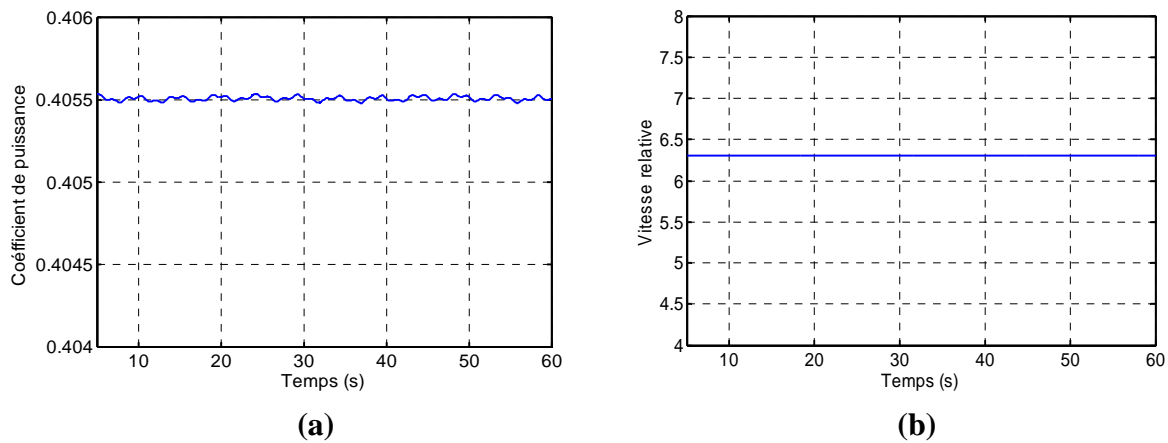


Figure IV-13: -a- Coefficient de puissance. -b- Vitesse relative.

IV-6-1-Résultats sans compensation du couple de la MAS

Sur la figure (IV-14), on voit que le courant I_{qs} est corrélant avec la variation de la vitesse du vent, oscillant ainsi autour d'une valeur moyenne égale à $6.5A$, atteignant à ses forts pics $8.6A$, ce courant reste admissible pour le modèle de la machine asynchrone utilisé.

Le courant I_{ds} quant à lui, nous renseigne encore une fois sur la fiabilité de la commande vectorielle utilisée, ce courant reste inchangé est égal au courant magnétisant I_{rm} .

La tension V_{ds} est fluctuante suivant les fluctuations de la vitesse du vent, ainsi elle oscille autour d'une tension égale à $380V$. La tension V_{qs} est oscillatoire autour d'une valeur moyenne égale à $70V$.

Pour le couple électromagnétique C_{emas} , on constate qu'il suit l'allure du courant I_{qs} , ce couple est égal à sa référence $C_{emasref}$ et atteint un pic de 19N.m.

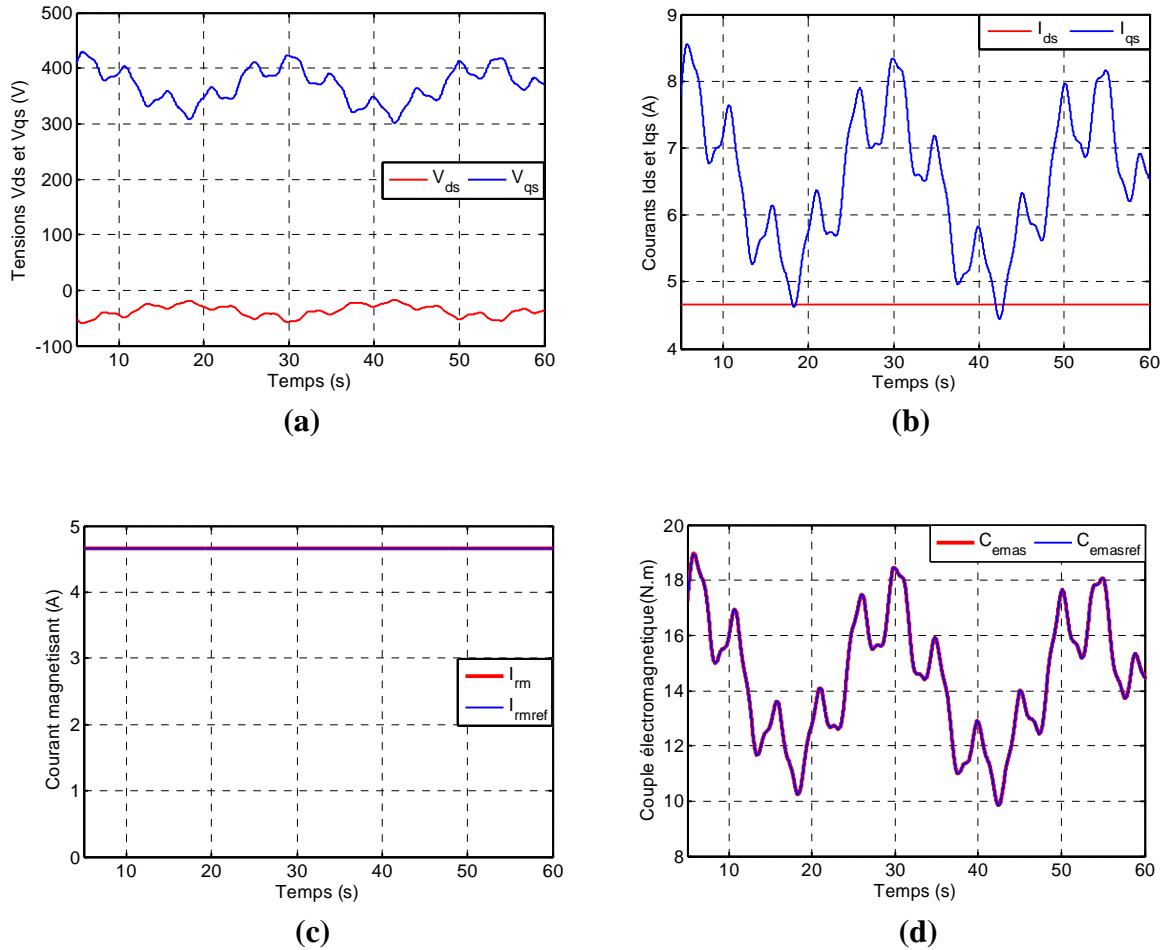


Figure IV-14: -a- Tensions V_{ds} et V_{qs} . -b- Courants I_{ds} et I_{qs} -c- Courant magnétisant -d- Couple de la MAS et sa référence.

Comme dans le cas de la mise au point d'un émulateur de turbine éolienne à base d'une MCC, le nouvel émulateur à base de la MAS, vise à reproduire le couple de l'éolienne. La référence du couple appliquée à la machine asynchrone est obtenue en fonction du couple de la turbine, dans le but de se rabattre aux mêmes caractéristiques de la génératrice que dans le cas de la turbine réelle.

Sur la figure (IV-15), on constate que le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g est le couple électromagnétique de la machine asynchrone C_{emas} sont identiques à cause de la

non prise en considération du couple de compensation de cette dernière, ces deux couples atteignent des pics de $19N.m$.

La MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation nous conduit à une puissance de la turbine P_t égale à sa référence P_{tref} et ayant une valeur maximale proche de $3KW$.

L'absence de compensation du couple est conséquente sur la puissance de la génératrice, par ailleurs et d'après la figure (IV-15), on constate que cette puissance est différente de la puissance de la turbine, inférieure à celle de la génératrice obtenue dans le cas de la turbine réelle et possède un pic atteignant $2.8KW$.

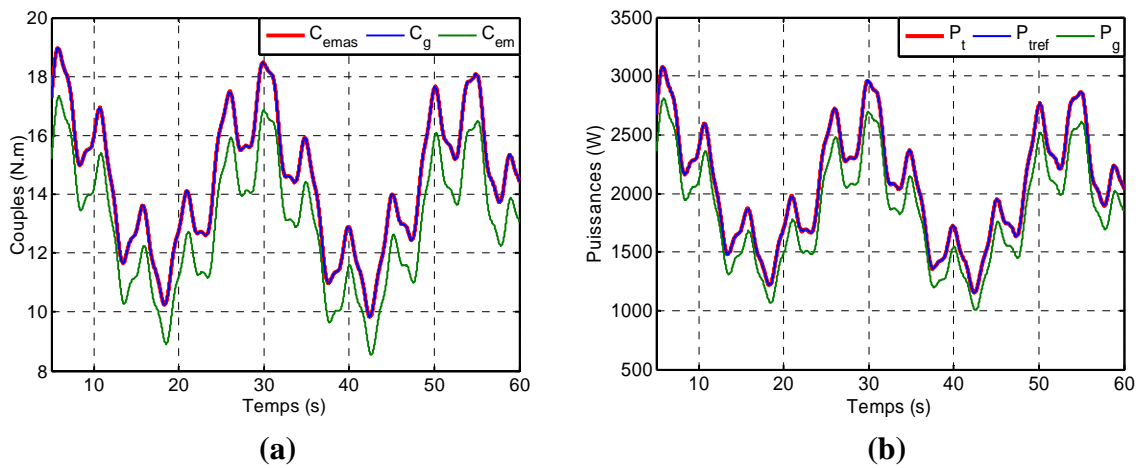


Figure IV-15: -a- Comparatif entre les différents couples.-b- Comparatif entre les différentes puissances.

IV-6-2-Résultats avec compensation du couple de la MAS

D'après la figure (IV-16), et à cause de l'introduction du couple de compensation, on constate une petite augmentation de la valeur moyenne de la tension V_{qs} . Le courant I_{qs} quant à lui augmente aussi et atteint à son fort pic $8.9A$.

Le courant I_{m} reste constant et égal à sa consigne I_{mref} , de même pour le courant I_{ds} qui demeure inchangé et égal au courant magnétisant.

Quant au couple électromagnétique de la machine asynchrone C_{emas} , on constate qu'il a subi une légère augmentation à cause de la compensation du couple de cette dernière, ce couple est

de même allure que le courant I_{qs} et atteint une valeur proche de $20N.m$ au plus grand pic de ce dernier. D'autre part on voit bien que le couple C_{emas} est égal à sa consigne C_{emas} , d'où le bon choix du régulateur de couple.

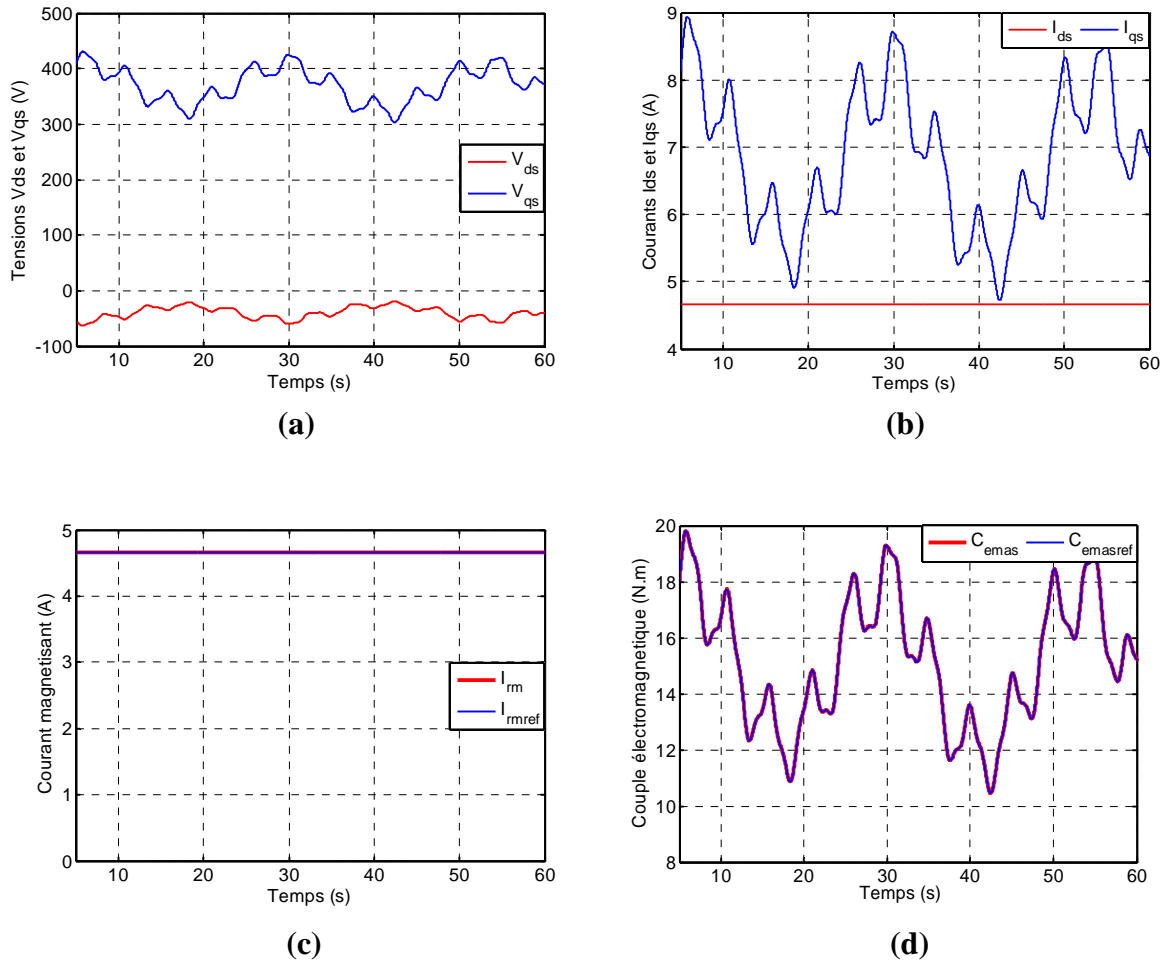


Figure IV-16: -a-Tensions V_{ds} et V_{qs} . -b- Courants I_{ds} et I_{qs} -c-Courant magnétisant-d- Couple de la MAS et sa référence.

De la figure (IV-17), on constate, que le couple électromagnétique de la MAS (couple de référence) C_{emas} et le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g sont différents.

Le couple électromagnétique de la MAS subit une légère augmentation et atteint une valeur de $20N.m$, ainsi un peu plus supérieure que celle du cas sans compensation de couple.

La somme des couples de compensation C_c et mécanique sur l'arbre de génératrice C_g est égale au couple électromagnétique de la MAS ainsi qu'à sa référence.

La puissance de la turbine P_t ainsi que sa référence P_{tref} ont les mêmes courbes comme le cas précédent (MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation)

L'introduction du couple de compensation engendre une augmentation dans le couple électromagnétique de la génératrice C_{em} , par conséquent la puissance de la génératrice P_g de l'émulateur se ramène à celle obtenue dans le cas de la turbine réelle et atteint 2.95KW.

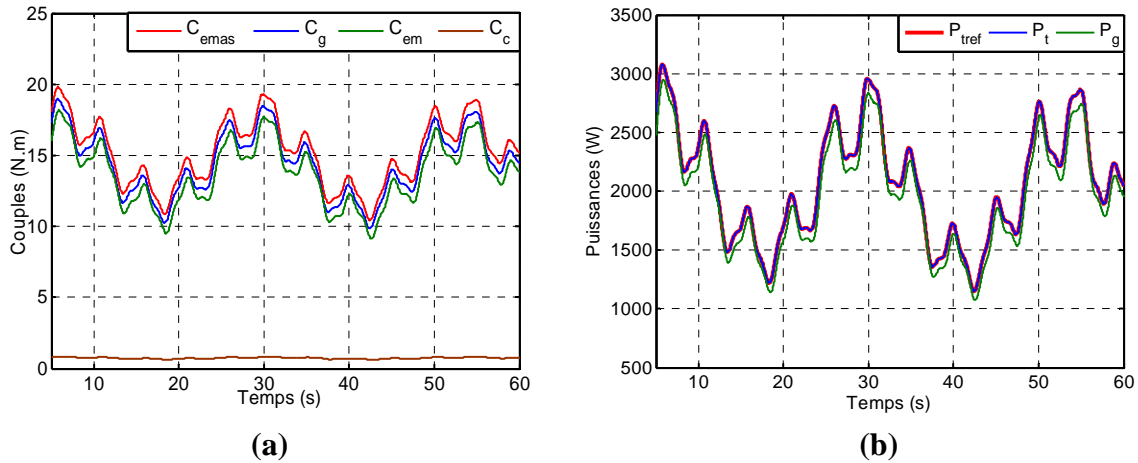


Figure IV-17: -a- Comparatif entre les différents couples.-b- Comparatif entre les différentes puissances.

IV-7-Comparaison entre les résultats des deux émulateurs :

La figure (IV-18) est une comparaison entre les résultats obtenus avec les deux émulateurs utilisant la MCC et MAS, sans et avec compensation du couple de ces dernières.

La courbe (a) illustre le cas de l'absence de compensation de couple, ainsi on voit que la puissance de la génératrice P_{gmcc} de l'émulateur construit à la base de la MCC est différente de la puissance P_{gmas} de l'émulateur utilisant une MAS, ce qui est dû à la différence entre les paramètres de ces deux machines à savoir les inerties et les frottements. Ces deux puissances sont éloignées de la puissance de la génératrice dans le cas de la turbine réelle ainsi que de la référence de la puissance de la turbine P_{tref} .

Pour le cas de la compensation du couple, montré sur la courbe (b), on voit bien que la puissance de la génératrice P_{gmas} de l'émulateur construit utilisant la MCC est identique à la puissance P_{gmcc} de l'émulateur utilisant la MAS, les deux puissances sont très significatives,

car elles se rapprochent au mieux de la puissance de référence de la turbine P_{tref} que dans le cas de l'absence de compensation des couples des deux machines utilisées.

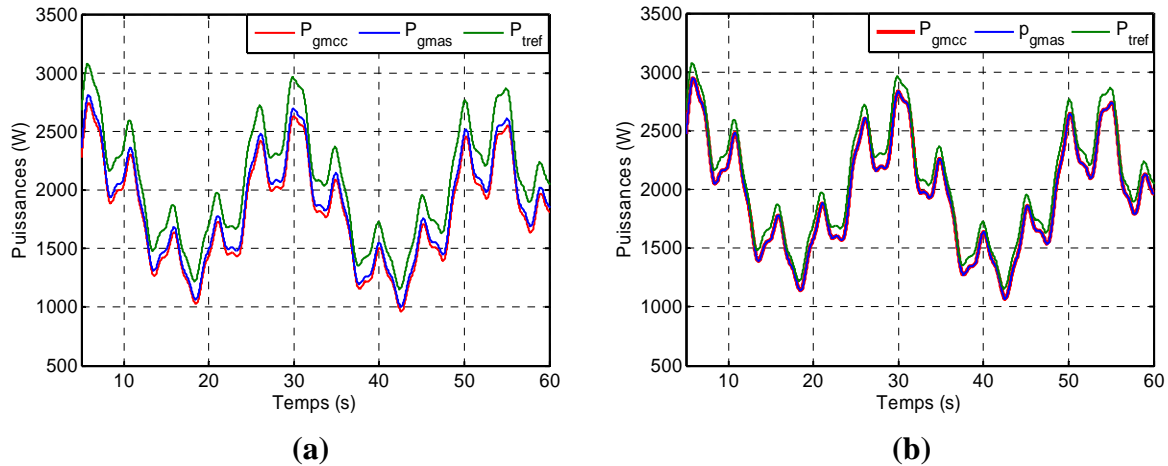


Figure IV-18: Comparatif entre les deux émulateurs pour les contrôles avec et sans compensation du couple.

IV-8-Conclusion

Le but principal de ce chapitre, est la construction d'un émulateur pour la turbine éolienne à base d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

L'étude faite dans la première partie du chapitre, nous a permis d'établir le modèle complet de la machine asynchrone et de mieux comprendre son fonctionnement. La modélisation nous a permis de construire le schéma de simulation numérique et de palier à la contrainte liée à la connaissance des paramètres rotoriques.

La deuxième partie est consacrée à la commande vectorielle de la machine à flux rotorique orienté, dans le but de découpler les grandeurs génératrices du couple de celles du flux, exactement comme dans le cas de la machine à courant continu à excitation séparée.

La troisième partie est dédiée à la mise en œuvre de l'émulateur. Le système global de ce dernier est identique à celui construit à base de la MCC, la seule différence est dans les paramètres des deux machines utilisées. Les résultats sont donc obtenus avec la simulation sous l'outil MATLAB/Simulink, par ailleurs, une bonne rapproche du fonctionnement réel de la turbine éolienne a été obtenue avec cet émulateur.

La quatrième et dernière partie du chapitre est une comparaison entre les résultats obtenus avec les deux émulateurs utilisant la MCC et MAS. Les résultats obtenus dans le cas de compensation du couple sont identiques, contrairement au cas d'absence de cette dernière, où on a constaté une légère différence.

Les deux émulateurs montrent une bonne adéquation à reproduire le fonctionnement de la turbine. Cependant, et en négligeant les problèmes rencontrés dans la machine à courant continu, à savoir ceux de maintenance, présence d'étincelles Le choix de l'émulateur sera fait sur des critères purement économiques, la machine asynchrone est ainsi défavorisée, à cause de la complexité et la cherté du système de commande, qui parfois est beaucoup plus couteux que la machine elle-même, contrairement à la machine à courant continu connu par sa commande facile et moins couteuse.

Conclusion générale

Dans un contexte écologique de plus en plus prégnant, ce mémoire apporte un apport au domaine des énergies renouvelables, particulièrement dans le secteur dit « petit éolien ». L'objectif préalablement défini dans ce travail consistait à l'étude des émulateurs d'une turbine éolienne à base d'une machine à courant continu et d'une machine asynchrone.

Nous avons rappelé dans le premier chapitre les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et nous avons dressé un état de l'art sur les différentes associations machines électriques-convertisseurs pouvant être utilisées dans une éolienne.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation mécanique et aérodynamique d'une turbine éolienne, Nous avons alors été amenés à concevoir une commande robuste (MPPT) de la turbine à vitesse variable maximisant le rendement aérodynamique, améliorant la qualité de la puissance générée, et minimisant les contraintes dynamiques dans le train de puissance face à des perturbations externes.

Le troisième chapitre a introduit une étude d'un simulateur physique de turbine éolienne à base d'une machine à courant continu. Cette machine est commandée en vue de reproduire le comportement d'une turbine éolienne à vitesse variable. Le couple ainsi généré par la turbine est appliqué en référence à la machine à courant continu accouplée à la génératrice asynchrone.

Le dernier chapitre s'est focalisé sur l'étude d'un simulateur physique de turbine éolienne à base d'une machine asynchrone. Dans la première partie de ce chapitre, une modélisation de la machine asynchrone a été introduite, suivie d'une commande vectorielle à flux rotorique orienté afin de rapprocher le comportement de cette machine à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Une présentation des résultats de cette commande a été incorporé. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à la mise en œuvre de l'émulateur où on a eu une bonne rapproche du fonctionnement réel de la turbine éolienne. Dans la dernière partie de ce chapitre une comparaison des résultats des deux simulateurs a été dressée.

Enfin, on peut dire que les émulateurs éoliens connaissent un essor considérable ces derniers temps, malgré les quelques inconvénient qu'ils représentent, comme l'utilisation de technologies avancées (techniques de contrôle de l'énergie réactive et suppression d'harmoniques, convertisseurs robustes...).

Les émulateurs sont devenus de solides plateformes pour tester le comportement des turbines éoliennes. La technologie des émulateurs nous permet d'incorporer plusieurs turbines et profil du vent, nous permettant ainsi de vérifier la robustesse des algorithmes de commande.

Comme perspective à ce travail, nous proposons une validation expérimentale sur un banc d'essai.

Bibliographie

- [1] **F. Poitier**, *Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [2] **O. Bouhalli**, *Contribution des convertisseurs multi-niveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique*, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 2007.
- [3] Revue des énergies renouvelables, Bou Ismail, 2010.
- [5] **A. Bouhedda**, *Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne*, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [6] Rapport mondial sur l'énergie éolienne, *World Wind énergie association* ,2011.
- [7] **A. Boyette**, *Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne*, Thèse de Doctorat, Université Henry Poincaré ,2006.
- [8] **A. Boudinar, K. Mesbah**, *Caractérisation d'une machine asynchrone à double alimentation appliquée à une éolienne connectée au réseau*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [9] **J. Martin**, *Energie éolienne*, Technique de l'Ingénieur, Traité de Génie Electrique, 2004.
- [10] Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies, *Eolienne en milieu urbain-état de l'art*, ile de France, 2004.
- [11] **B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nichita**, *L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables, Extrait du rapport de synthèse ECRIN*, 2002
- [12] **S. Haddad**, *Régime transitoire des machines*, Notes de Cours, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ,2010.

- [13] **N. Mekaoui**, *Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini centrale à base de machines à induction simples et double alimentées*, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2000.
- [14] Site de GE Wind, Mars2010, <http://www.gpower.com>.
- [15] Rapport du groupe de travail de l'académie de beaux arts, *Les éoliennes*, Institut de France, 2007.
- [16] **H. Sediki**, *Commande des actionneurs électriques*, Notes de Cours, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [17] **M. Lopez**, *Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée*, Thèse de Doctorat, Université Paris sud 11, 2006.
- [18] **S. El Aïmani**, *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2005.
- [19] **A. Fouillé**, *Machines continues, électronique de puissance*, Edition DUNOD, 4ème édition Paris, 1980.
- [20] **L. Moceau**, *Modélisation, conception et commande de la génératrice à reluctance variable à basse vitesse*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2005.
- [21] **T. Wildi, C. Sybille**, *Electrotechnique*, Edition de Boeck, 4ème édition, 2005.
- [22] **M. Ouchaoua, A. Harikenchikh**, *Implantation de la commande vectorielle d'une machine asynchrone en utilisant une carte Dspace <<DS1102>>*, Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2006.
- [23] **N. Kasbadji Merzouk**, *Evaluation du gisement énergétique éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie*, Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [24] **K. Ferkous**, *Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*, Mémoire magister, Ecole Doctorale, Energie renouvelable, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [25] **B. Beltran**, *Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de la GADA : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur*, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale, Juillet 2010.

- [26] **A. Davigny**, *Participation aux services, système de fermes éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie*, Thèse de Doctorat de l'Université de Lille, 2007.
- [27] **A. Gaillard**, *Système éolien basé sur une MADA, contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et sa continuité de service*, Thèse de Doctorat, Université Henry Poincaré, Nancy, 2010.
- [28] **H. Sediki**, *Simulation analogique de la machine asynchrone triphasée*, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2000.
- [29] **S. Diid**, *Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'aimantation*, Thèse de Doctorat, Université de Batna, Décembre 2005.
- [30] **J.H. Ladik**, *Energétique éolienne*, Presse université de Québec, 1984.
- [31] **H. Ghezzali, Y. Nait Mohand**, *Etude de la conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ,2011.
- [32] **B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, C. Nichita**, *Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques*, Techniques de l'Ingénieur, pp4, 2005.
- [33] **V. Courtecuisse**, *Supervision d'une centrale multi-source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique*, Thèse de Doctorat, Université d'Arts et Métiers, Paris, 2008.

Titre :

Etude et dimensionnement d'émulateurs d'une turbine éolienne

Résumé : Actuellement, l'émulateur est devenu un outil de recherche dans les laboratoires dans le but de tester les différentes commandes de génératrices utilisés dans les éoliennes. Ce mémoire de Master a pour objectif l'étude et le dimensionnement d'émulateurs d'une turbine éolienne. Initialement, nous avons rappelé un état de l'art sur les systèmes éoliens ainsi que les différents types des chaînes de conversion d'énergie éolienne usuellement utilisées. Ensuite, nous avons évoqué la modélisation et la commande à MPPT de l'éolienne dans le but de maximiser la puissance extraite. Enfin, nous avons procédé à étudier et à dimensionner deux émulateurs basés sur une machine à courant continu et une machine asynchrone afin de reproduire le comportement de la turbine éolienne sur l'arbre du générateur.

Mots-clés : Commande vectorielle, émulateur, machine à courant continu, machine asynchrone, maximum power point tracking (MPPT), turbine éolienne.