

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département D'automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

**En vue de l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique**



THEME

**Modélisation et commande d'une machine
asynchrone à double alimentation**

Proposé et Dirigé par :

Réalisé par :

M^r: OTMANE-CHERIF TAHAR

M^r:MAACHA Rachid

2010/2011

Remerciement

Nous tenons à exprimer nos remerciements à Mr BELHAMEL directeur du centre de développement des énergies renouvelables (CDER), et Kaabache Hamid de nous avoir facilité la tâche et autoriser à travailler au sein du (CDER), ainsi à l'ensemble de personnels de ce centre et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de notre mémoire particulièrement.

Nous remercions Mr Ottmane Cherif Tahar, maître de conférences à l'université de Tizi_ouzou, pour son aide et d'avoir accepté de nous encadrer.

Nous le remercions aussi pour sa disponibilité et d'avoir consacré une partie de son temps pour l'accomplissement de ce mémoire.

Nous remercions Mr Bensidhoum M outahar d'avoir contribué à la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements à toutes les personnes que nous n'avons pas citées, qui ont participé à la réalisation de notre mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail

À toutes la famille, mes amis,

À tous ceux qui ont contribué de près ou

De loin à le réaliser, et

À tous ceux Qui ouvriront

De mémoire

Maacha Rachid

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : généralité sur les systèmes éoliens	
I.1.Introduction	3
I.2.Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	3
I.2.1.Définition de l'énergie éolienne	3
I.2.2.Principaux composants d'une éolienne	4
I.2.3.Protection contre la corrosion	6
I.3.Les différents types d'éolienne	6
I.3.1.Eoliennes à axe vertical	6
I.3.2.Eoliennes à axe horizontal	7
I.4.Energie cinétique du vent ; conversion en énergie mécanique	8
I.4.1.L'énergie disponible	8
I.4.2.L'énergie récupérable	9
I.4.3.La limite de BETZ	11
I.4.4.Production de l'énergie mécanique	14
I.5.Turbines éoliennes	14
I.5.1.Principaux paramètres	14
I.5.2.Principe de fonctionnement	15
I.5.3.Regulation mécanique de la vitesse de l'éolienne	17
I.5.4.Production optimal d'énergie	19

SOMMAIRE

I.6.Etat de l'art sur la conversion électromécanique	19
I.6.1.Systèmes utilisant la machine synchrone	21
I.6.1.1.Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimant	21
I.6.1.2.Machine synchrone à aimant permanent discoïde	23
I.6.1.3.Machine synchrone vernier à aimant	23
I.6.2.Systèmes utilisant la machine asynchrone	24
I.6.2.1.Machine asynchrone à cage d'écureuil	25
I.6.2.2.machine asynchrone à double alimentation	28
I.7.Conclusion	30

CHAPITRE II : aperçu sur la MADA

II-1 : introduction	31
II-2 : régime de fonctionnement de la MADA	32
II-3 : mode de fonctionnement de la MADA	33
II-3-1 : fonctionnement en moteur hypo synchrone	33
II-3-2 : fonctionnement en moteur hyper synchrone	34
II-3-3 : fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	34
II-3-4 : fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	35
II-4 : avantage et inconvénient de la MADA	37
II-5 : conclusion	37

CHAPITRE III : modélisation d'un système éolien (turbine, MADA)

III-1 : Introduction	38
III-2 : Modélisation de la turbine	39

SOMMAIRE

III-3 : stratégie de commande de la turbine éolienne	41
III-3-1 : Recherche du rendement maximum MPPT	41
III-3-1-1 : le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.....	41
III-3-1-2 : le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.....	44
III-4 : modélisation de la MADA en fonctionnement linéaire	46
III-4-1 : hypothèse simplifiée	46
III-4-2 : modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire.....	47
III-4-3 : équation électrique	48
III-4-4 : équation magnétique	50
III-5 : Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan (d q)	52
III-5-1 : la transformation de Park	52
III-5-2 : la transformation initiale de Park	53
III-5-3 : la transformation de Park modifiée	54
III-6 : équation de la MADA dans le repère (d-q)	55
III-6-1 : équation électrique	55
III-6-2 : équation magnétique	56
III-6-3 : équation mécanique et le couple électromagnétique	57
III-7 : choix de référentiel	57
III-7-1 : référence immobile par rapport au stator	58
III-7-2 : référence immobile par rapport au rotor	58
III-7-3 : référence immobile par rapport au champ tournant	59
III-8 : modèle de la machine en représentation d'état	60
III-9 : conclusion	63

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : commande vectorielle de la MADA

IV-1 : introduction	64
IV-2 : stratégie de la commande de la MADA	64
IV-3 : choix de référence pour le modèle de Park	64
IV-4 : relation entre les puissances statorique et courants rotorique	67
IV-5 : relation entre les tensions rotoriques et courants rotorique	68
IV-6 : commande vectorielle en puissance de la MADA génératrice	70
IV-6-1 : principe générale.....	70
IV-6-2 : objectif du contrôle.....	71
IV-6-3 : synthèse du régulateur proportionnel-integral pour le contrôle de la puissance	71
IV-6-4 : résultat de simulation	73
IV-7 : conclusion	73

CHAPITRE V : interprétation des résultats

V-1 : introduction	75
V-2 : schéma bloc de la turbine	75
V-2-1 : interprétation des résultats (turbine)	76
V-3 : schéma bloc de la MADA	78
V-4 : interprétation des résultats de la simulation (MADA)	80
Conclusion générale	84

Introduction générale :

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80%) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée donc ils sont épuisables.

Des solutions alternatives aux énergies fossiles sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement,

Par opposition, les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre sont renouvelables n'ont d'ailleurs en définitive que deux sources : le soleil (puisque celui-ci est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées, de la croissance des végétaux) et la terre (qui dégage de la chaleur) ou encore l'énergie d'origine végétale dénommé biomasse.

Alors face à l'épuisement de ces énergies d'origines fossiles les solutions à base d'énergies renouvelables (le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice,...) qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, sont des alternatives qu'il faudra développer avant ce jour.

Parmi ces énergies alternatives renouvelables on s'est intéressé dans notre étude à l'énergie d'origine éolienne qui est aujourd'hui en plein essor dans le monde, ainsi dans le cadre de ce mémoire nous allons nous intéresser à un type de machine qui est la machine asynchrone à double alimentation (MADA) largement utilisés dans les systèmes éoliens.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice fonctionne à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT. Ainsi nous allons développer la modélisation d'une éolienne en proposant une étude de la partie électrique (MADA) mais

aussi de la partie mécanique (turbine) à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement, simuler à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

I : Introduction :

Bien que connue et exploitée depuis des années déjà, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes mais, le plus souvent, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (éoliennes à axe horizontal ou axe vertical) et ces capteurs ne cessent d'évoluer en termes de caractéristiques mécanique et d'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique pour cela l'éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle)
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et des caractéristiques mécaniques et aussi les différents types de machines électrique associé aux éoliennes.

I-2 : Descriptif et qualité de l'énergie éolienne :**I-2-1 : Définition de l'énergie éolienne :**

Un aérogénérateur 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.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mat et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter le phénomène de turbulences.

Le processus de conversion de l'énergie cinétique du vent est illustré dans la figure (1.1)

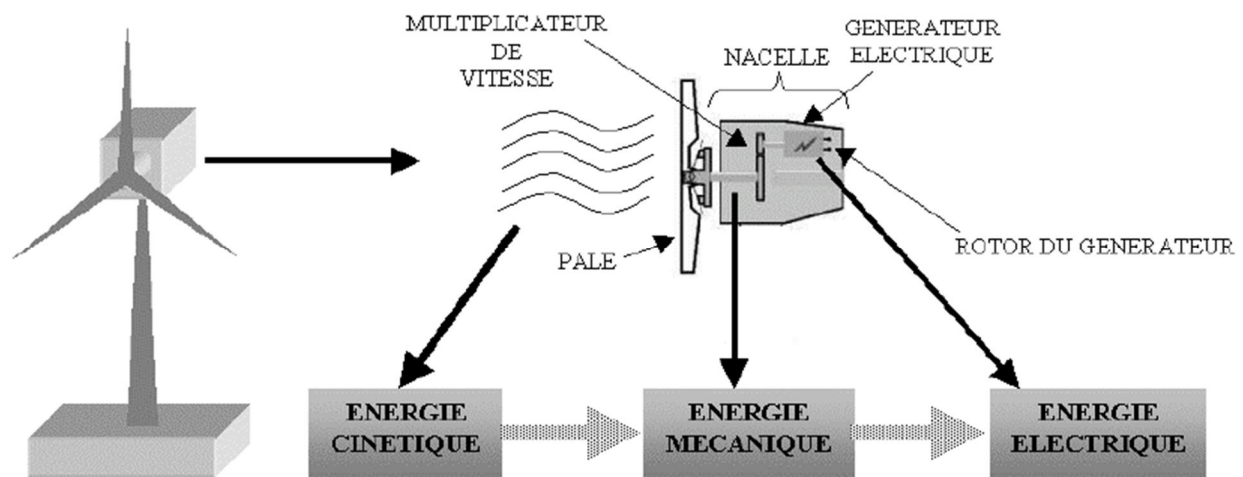


Figure 1.1 : schéma de conversion de l'énergie éolienne

I-2-2 : Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne dite classique est généralement constituée de trois éléments principaux figure (1.2) :

- le rotor
- le mât
- la nacelle

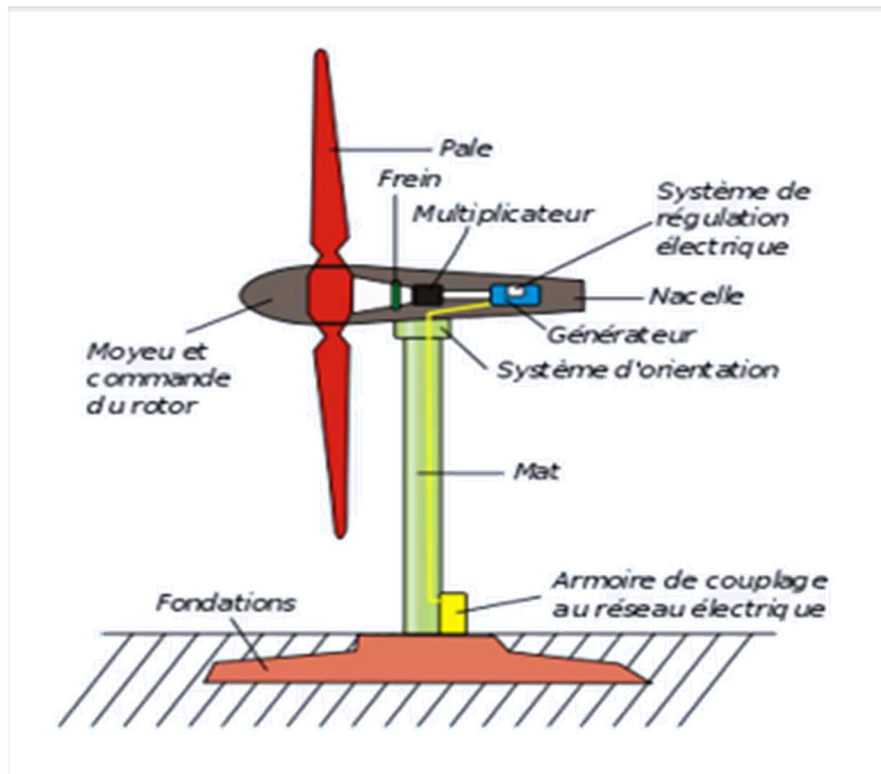


Figure 1.2 : *principaux composants d'une éolienne*

-**Le rotor** : est le composant qui tourne sous l'action du vent, il est constitué du moyeu sur lequel on a assemblé des pales. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit[1], on distingue deux types de rotor

- Les rotors à vitesse fixe qui sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance[1].

- Les rotors à vitesse variable qui sont moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (Actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [1].

-La nacelle : abrite tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor au générateur électrique (arbre lent et rapide, multiplicateur, roulement, frein à disque, différentiel du frein aérodynamique) [1], ce sont des équipements qui produisent l'électricité à partir de la rotation de l'axe du rotor, qu'on appelle aussi « arbre lent ». La rotation, uniquement provoquée par le vent est transmise par l'arbre lent à un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle du convertisseur électromécanique. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité par une génératrice asynchrone ou synchrone. Les éoliennes sont munies de freins à disques, car au-delà d'une certaine vitesse du vent, les forces que doit subir l'éolienne seraient trop grandes et pour mesure de sécurité il faut arrêter l'éolienne

-Le mât : Le mât supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est constitué de plusieurs tronçons métalliques fixés au sol sur une fondation en béton. Il doit être plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol, il peut ainsi atteindre des hauteurs 135 m pour les éoliennes les plus puissantes (modèle E-126d'enercon l'installation dispose un rotor de 127 m) [1]. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [1].

I-2-3 : Protection contre la corrosion :

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés [14].

I-3 : Les différents types d'éolienne :

Selon la direction de l'axe du rotor de la turbine, on peut diviser les éoliennes en deux grandes familles.

I-3-1 : Éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont probablement été les premières utilisées. Parmi celles-ci, une éolienne peu coûteuse et facile à fabriquer, c'est l'éolienne à rotor de SAVONIUS. Ce rotor a été inventé par le Finlandais Sigurd SAVONIUS en 1925. Il comporte

essentiellement deux demi-cylindres dont leurs axes sont décalés l'un par rapport à l'autre.

C'est une sorte d'éolienne fabriquée à partir de matériaux peu coûteux tel qu'un baril d'essence coupée verticalement en deux et quelques pièces de bois pour former la structure. Les deux moitiés du baril sont glissées dans une tige qui sert d'axe de rotation. Quel que soit sa direction, le vent s'engouffre dans la moitié creuse du baril et la fait tourner. Une génératrice actionnée par la rotation de l'axe produit de l'électricité. L'éolienne à axe vertical n'a pas besoin d'être face au vent, elle est efficace quel que soit la direction du vent. Un autre type d'éolienne à axe vertical est l'éolienne de DARRIEUS. Cette éolienne a été conçue par l'ingénieur français George DARRIEUS en 1925. Le rotor est constitué de plusieurs pales, de profils symétriques liés entre elle et qui tournent autour d'un axe vertical. Les formes adoptées pour les surfaces des pales sont cylindriques, coniques ou paraboliques. Comme l'éolienne de type Savonius, elle possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible.



Figure 1.3: *principe d'éolienne à axe vertical*

I-3-2 : Éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, mais présentent un rendement aérodynamique

plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [14].

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (Les plus courantes) et les multi- pales figure(I.4).

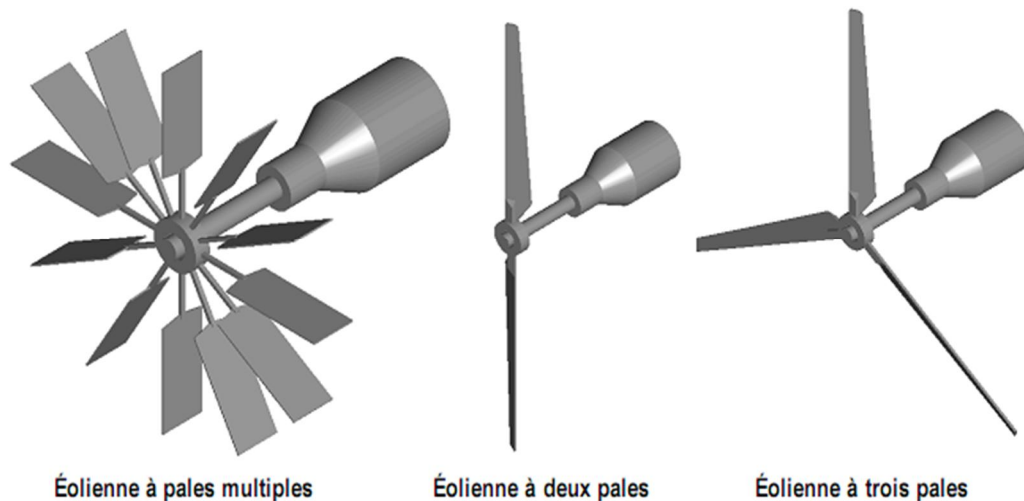


Figure 1.4 : principe d'éolienne à axe horizontal

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [1].

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 W.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

I-4 : Énergie cinétique du vent ; conversion en énergie mécanique :

I-4-1 : l'énergie disponible :

L'énergie cinétique d'une colonne d'air m qui se déplace avec la vitesse v , est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance disponible instantanée serait alors :

$$P_d = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique standard et à 15°).

La puissance disponible maximale s'obtient lorsque l'énergie cinétique de rotation de l'air après passage au niveau de l'éolienne est faible, c'est-à-dire pour une forte vitesse angulaire de rotation Ω et un faible couple sur l'arbre.

I-4-2 : L'énergie récupérable

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance P_r inférieure à la puissance disponible P_d , par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation :

$$C_p = \frac{P_r}{P_d}, (C_p < 1) \quad (1.3)$$

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (1.5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_1 en aval modèle d'écoulement axial de l'air à travers la surface balayée par une hélice.

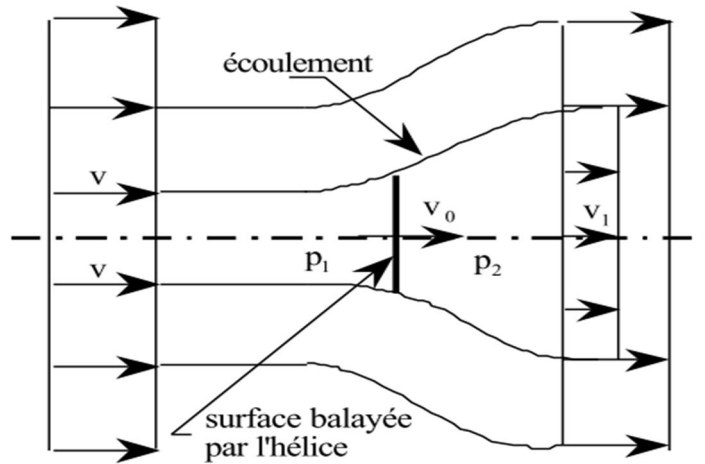


Figure 1.5 : *Modèle de l'écoulement axial de l'air*

On a noté :

V - la vitesse axiale d'écoulement en amont,

V_0 - la vitesse d'écoulement sur la surface S ,

V_1 - la vitesse axiale en aval,

P_1 et P_2 - les pressions avant et après l'hélice

La quantité du moment transmise $M = m(v - v_1)$ à l'hélice par la masse d'air m qui traverse la surface S produit une force F , qui peut être exprimée selon deux expressions :

$$F = \frac{\Delta M}{\Delta t} = \rho S v_0 (v - v_1) \quad (1.4)$$

$$\text{Et } F = S(p_1 - p_2) \quad (1.5)$$

On utilise la relation de Bernoulli :

$$(p_1 - p_2) = \frac{1}{2} \rho (v^2 - v_1^2) \quad (1.6)$$

La relation (1.5) devient :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (v^2 - v_1^2) \quad (1.7)$$

De (1.4) et (1.7) on obtient :

$$v_0 = \frac{1}{2}(v - v_1) \quad (1.8)$$

L'énergie cinétique transmise à l'hélice est :

$$E_0 = \frac{1}{2}m(v^2 - v_1^2) \quad (1.9)$$

m : représente la masse d'air qui traverse la surface S dans l'unité de temps, c'est à dire $m = \rho S v_0$, alors l'expression (1.9) exprime la puissance extraite par la turbine :

$$P_r = \frac{1}{2}\rho S v_0 (v^2 - v_1^2) \quad (1.10)$$

De (1.8) et (1.10) on obtient la puissance récupérable selon la théorie de **Betz** s'énonce :

$$P_r = \frac{1}{4}\rho S (v + v_1)(v^2 - v_1^2) \quad (1.11)$$

La relation entre la puissance récupérable et la puissance disponible est alors :

$$\frac{P_r}{P_d} = C_p = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_1}{v} \right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v} \right)^2 \right) \quad (1.12)$$

Nous obtenons finalement la formule pilier de l'éolien:

$$P_r = \frac{1}{2}\rho S v^3 C_p \quad (1.13)$$

I-4-3 : La limite de BETZ :

La relation devant exister entre V et V_1 pour que cette puissance P_r passe par un maximum soit:

$$\frac{d}{dv_1} P_r = 0 \quad \text{Soit} \quad v = 3v_1 \quad (1.14)$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_d \quad (1.15)$$

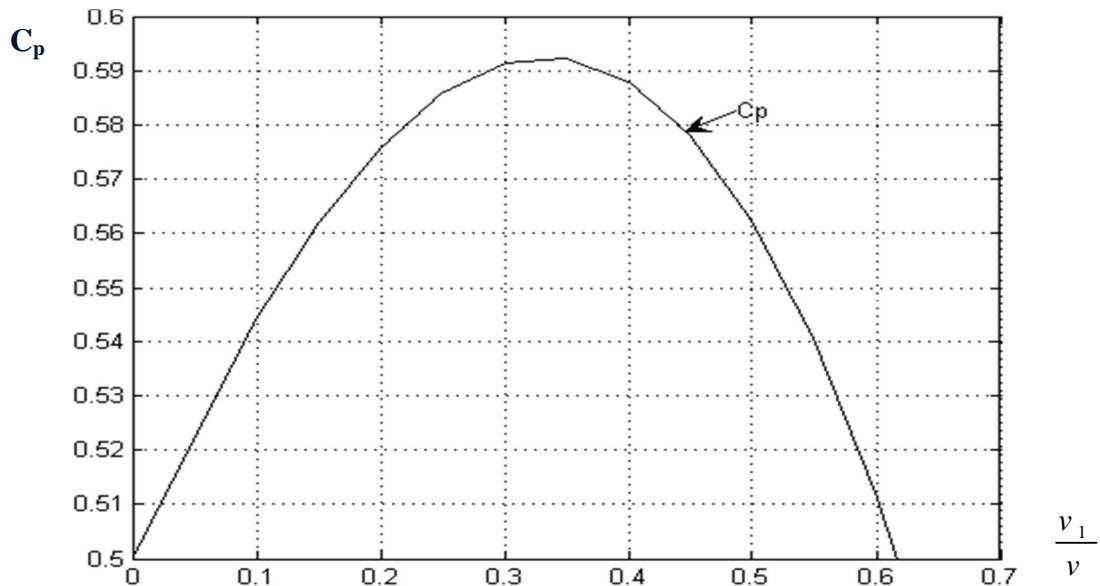


Figure 1.6 : coefficient de puissance

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines par leurs coefficients aérodynamiques de puissance et du couple en fonction de la vitesse normalisée λ , appelée aussi le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne (sans unité). λ représente le rapport entre la vitesse du bout de la pale et celle du vent au niveau de l'axe rotor. On a donc :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (1.16)$$

Ω_t : La vitesse de rotation avant la transmission.

R : Le rayon de l'éolienne.

La figure (1.7) montre les coefficients de puissance obtenus selon le type d'éolienne en fonction de la vitesse spécifique λ . Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre une et trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

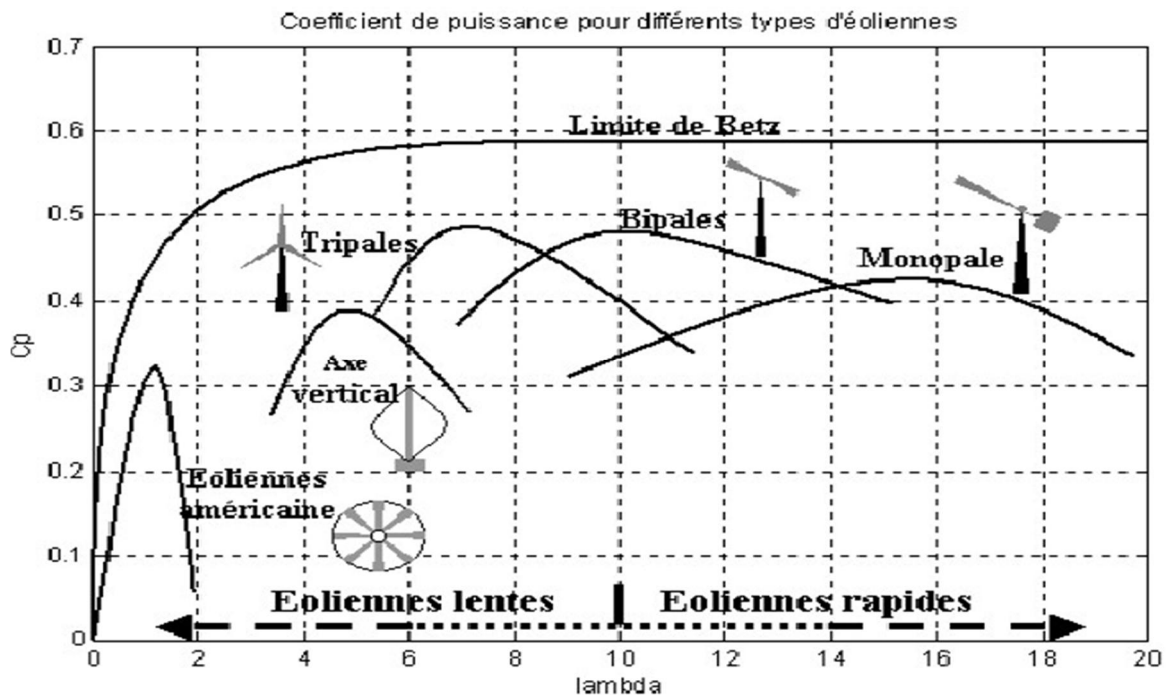


Figure 1.7 : coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Ce qui signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de $16/27 \times 100 = 59,26\%$ de la puissance disponible due au vent c'est la limite de Betz.

En réalité la puissance récupérée est inférieure à cette puissance maximale car il y'a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec son propre rendement (par exemple le rendement d'une hélice est d'environ 85%). De plus, en pratique tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global.

Ainsi une éolienne industrielle aura un rendement global compris entre 50 et 55%, une éolienne artisanale entre 25 et 40%, si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda = 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. c'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique, a diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale [1].

I-4-4 : Production de l'énergie mécanique :

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pales du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage β , provoquant la rotation. La puissance qui peut être récupérée est décrite par la relation (1.13).

Ainsi nous nous intéressant à la grandeur de sortie du rotor éolien est le couple. Ce dernier peut être calculé à partir de la puissance captée et de la vitesse de rotation du rotor éolien :

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

$$C_t = \frac{P_r}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \rho \Pi R^3 v^2 C_p(\lambda) \quad (1.17)$$

Contenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur P_m s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \Pi R^2 V^3 C_p \left(\frac{\Omega_1 R}{GV} \right) \quad (1.18)$$

Ω_1 : vitesse de rotation après multiplicateur

I-5 : Turbines éoliennes :**I-5-1 : Principaux paramètres :**

Les plus importantes caractéristiques géométriques d'une éolienne et les forces qui agissent sur une pale sont présentées dans la figure (1.8)

Une section d'une pale à une distance r de l'axe de la turbine est définie par:

- le profil, c'est-à-dire la forme de la section,
- l'axe de référence AB, qui peut être la corde du profil,
- l'angle de calage β , entre l'axe de référence et le plan de rotation (le plan perpendiculaire à l'axe de rotation).

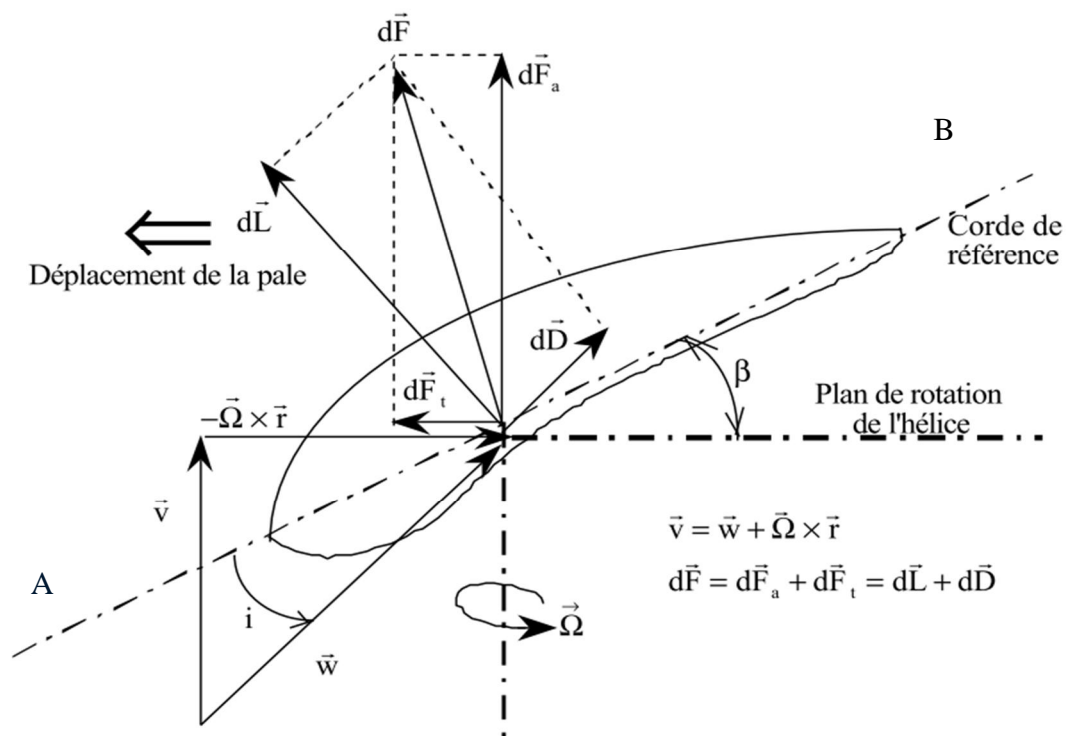


Figure 1.8 : Représentation des vitesses et des forces pour une section située à une distance r de l'axe de l'hélice.

I-5-2 : Principe de fonctionnement :

L'analyse qualitative du fonctionnement d'une éolienne prend en compte la vitesse de l'air \vec{v} par rapport à l'hélice, pour une section située à une distance r de l'axe de l'hélice.

Dans la figure (1.8), on a aussi représenté les vitesses et les forces sur la section considérée.

La vitesse \vec{w} résulte de la composition de la vitesse du vent \vec{v} et de la vitesse de la section due à la rotation ($-\vec{\Omega} \cdot r$). L'angle formé par \vec{w} et la corde de référence est dénommé angle d'incidence i .

La force \vec{F} exercée par le vent sur la section se décompose en deux forces :

- la portance \vec{dL} , normale à \vec{w}
- le traînage \vec{dD} , parallèle à \vec{w}

La force \vec{F} peut également se décomposer selon :

- la poussée en direction de rotation \vec{dF}_t .
- la poussée axiale \vec{dF}_a .

Par intégration sur la largeur de la pale, on obtient :

$$D = \frac{1}{2} C_x \rho v^2 A ; \quad L = \frac{1}{2} C_z \rho v^2 A \quad (1.19)$$

Avec C_x et C_z sont, respectivement, les coefficients sans dimension, de traînée et de portance, A est la surface de la pale (la corde multipliée par la longueur de pale) et ils dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence i . Cette dépendance est représentée dans la figure (1.9), pour un profil de type NACA.

Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport $\frac{C_x}{C_z}$ en fonction de l'angle d'incidence. Ce rapport reflète le rendement de la conversion de l'énergie éolienne.

Dans la figure (1.10), on constate qu'il existe un angle d'incidence optimal i_{opt} , pour lequel ce rendement est maximal.

L'analyse qualitative du fonctionnement de l'aéromoteur, en utilisant les diagrammes des vitesses et des forces de la figure (1.10), révèle divers aspects:

1. Au démarrage de la turbine, $\vec{w} = \vec{v}$ puisque $\Omega \times r = 0$. L'angle d'incidence est grand, et le couple très faible. Afin d'augmenter ce dernier, il est nécessaire d'adopter au démarrage un fort angle de calage $\beta = \beta_D$.
2. Après la mise en marche de l'éolienne, en considérant que la vitesse du vent v reste constante, comme la grandeur $\Omega \times r$ augmente, l'angle d'incidence diminue. Le point courant sur la caractéristique $C_z / C_x = f(i)$ se déplace vers la gauche, se situant autour du point optimal ($i = i_{opt}$) ou, pour des charges réduites, sur la zone ascendante de la courbe.
3. L'obtention d'un angle d'incidence optimal pour une vitesse périphérique $\Omega \times r$ qui dépend de la distance r , impose que l'angle de calage dépend aussi de r : $\beta(r)$.

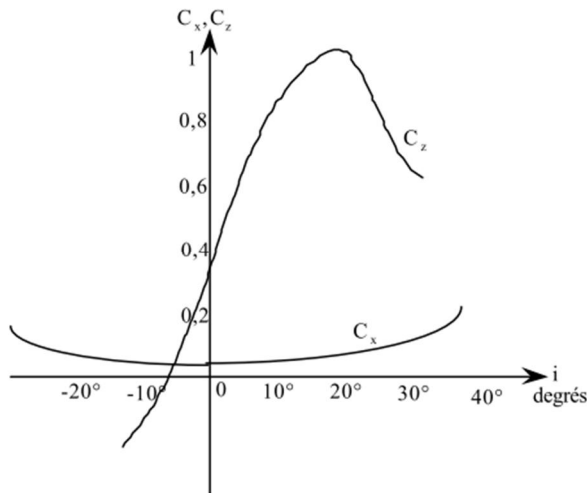


Figure 1.9 : dépendance de C_x et C_z de l'angle
D'incidence i

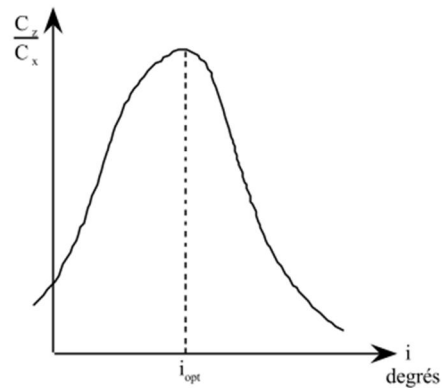


Figure 1.10 : angle d'incidence
optimal i_{opt}

I-5-3 : Régulation mécanique de la vitesse de l'éolienne :

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . La puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi:

- la vitesse de démarrage, V_d , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent, V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement,

Les vitesses V_d , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent comme c'est illustré sur la figure (1.11):

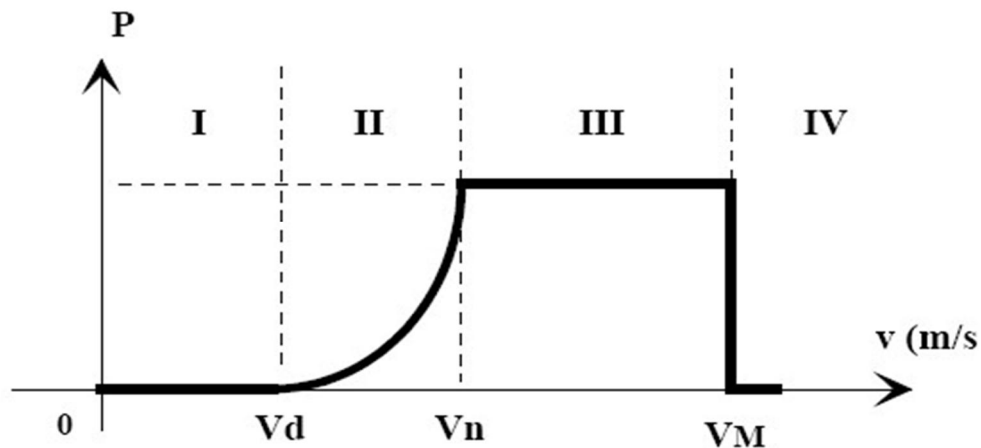


Figure 1.11 : Zones de fonctionnement de l'éolienne

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

Il existe trois méthodes de contrôle :

Contrôle à pas variable **"pitch"** il consiste à réduire l'angle d'incidence. Si la vitesse de rotation croît, on augmente l'angle de calage, l'angle d'incidence décroît et le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique $C_z/C_x = f(i)$ vers la gauche de i_{opt} de la figure (1.10). Ce système de régulation à l'avantage, de pouvoir effectuer un contrôle actif de la puissance sous toutes les conditions de vent et de freiner la turbine si nécessaire, mais cette technique elle est assez coûteuse.

Décrochage aérodynamique **"stall"**. Ce contrôle à décrochage de charge est un système de contrôle passif qui réagit au-delà d'une certaine vitesse du vent. Les pales du rotor sont fixes et elles ne peuvent pas tourner autour de leur axe longitudinal. L'angle de calage est choisi afin de permettre le décrochage du flux d'air de la surface de la pale pour des vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. Cela réduit la portance et augmente la force de traînage.

Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un

Contrôle ‘stall-actif’ [1].

L'optimisation du régime de conversion de l'énergie éolienne consiste à assurer, pour toutes les valeurs du vent incluses dans le domaine V_d et V_n , l'angle d'incidence optimal i_{opt} , en modifiant l'angle de calage β .

En général, la modification de l'angle de calage a quatre objectifs :

- démarrage à une vitesse du vent, V_d réduite,
- régulation de la vitesse Ω , pour $V > V_d$,
- optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_d, V_n]$,
- protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ($V \geq V_M$), par la mise en "drapeau" des pales de l'hélice.

I-5-4 : Production optimale d'énergie :

Si on considère les courbes des coefficients de puissance en fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}). Ce qui signifie que la puissance fournie soit maximale pour λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (1.20)$$

La figure suivante montre que la position du maximum de la courbe de puissance en fonction de sa vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Un réglage de vitesse donc est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques.

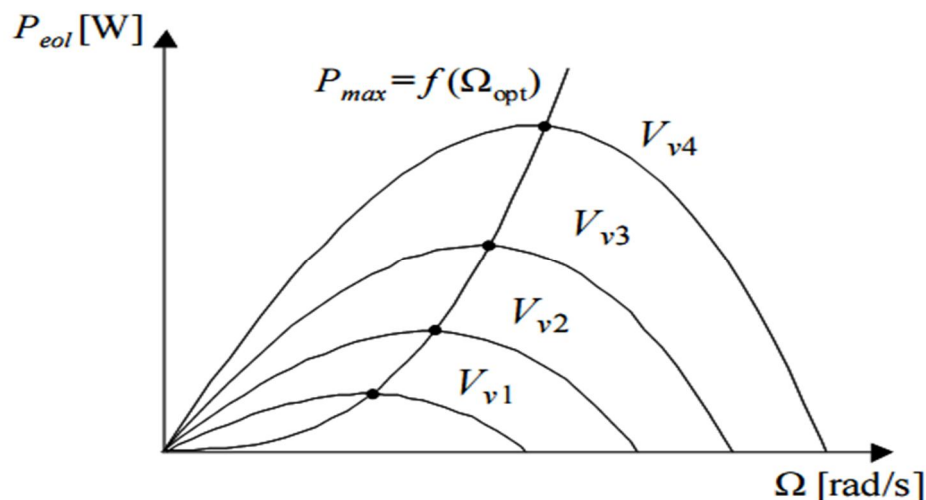


Figure 1.12 : Puissance de la turbine en fonction de sa vitesse de rotation

I-6 : État de l'art sur la conversion électromécanique :

Les générateurs ne sont pas des machines à mouvement perpétuel. Ils assurent le transfert de l'énergie, mais ne la produisent pas. L'énergie doit être transmise à un générateur pour qu'il puisse la convertir en électricité. (En ce qui nous concerne, la force motrice est le rotor).

Les générateurs ne convertissent pas 100% de l'énergie qui leur est transmis. Le rotor transmet plus d'énergie au générateur que le générateur ne produit d'électricité. Cela nous mène à un principe fondamental sur la taille des éoliennes. La taille d'un générateur indique uniquement la quantité d'électricité qu'il est capable de produire si le diamètre du rotor de l'éolienne est suffisant et s'il y a assez de vent pour entraîner le générateur à la bonne vitesse. Encore une fois, la taille d'une éolienne dépend donc principalement de la taille de son rotor.

Le générateur convertit l'énergie mécanique du rotor de l'éolienne en électricité. Sous sa forme la plus simple, un générateur n'est rien d'autre qu'une bobine de fils qui tourne à l'intérieur d'un champ magnétique. Par conséquent, qu'il produise du courant continu (CC) ou du courant alternatif (AC), Un générateur doit comporter :

- Des bobines de fil dans lesquelles l'électricité est produite et circule.
- Un champ magnétique.
- Un mouvement relatif entre les bobines de fil et le champ magnétique.

Le rotor d'une éolienne peut entraîner une génératrice, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur, il existe trois types de génératrices électriques :

- Une génératrice à courant continu (Dynamo).
- Une génératrice asynchrone à courant alternatif :
 - Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.
 - Génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).
 - Génératrice asynchrone à rotor bobiné.
- Une génératrice synchrone à courant alternatif (Alternateur).

I-6-1: Systèmes utilisant la machine synchrone :

I-6-1-1: Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimant :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance qui permettent la construction d'une onde sinusoïdale parfaite et aussi la gestion de la qualité d'énergie.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplée à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et du système bagues balais pour les génératrices à aimants figure (1.13). ainsi on minimise le travail de maintenance [14].

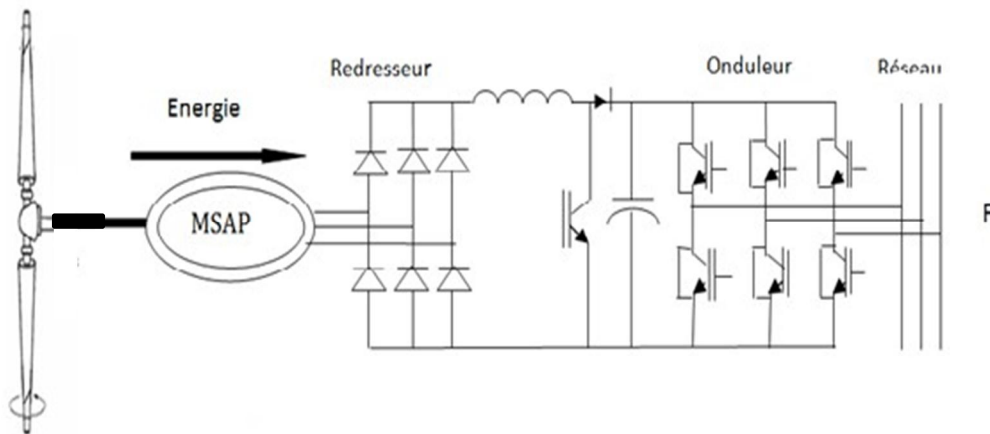


Figure 1.13 : *Machine synchrone à aimant à entraînement direct*

Il existe une autre configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau.

Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur 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 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 en perte. Figure (I.14).

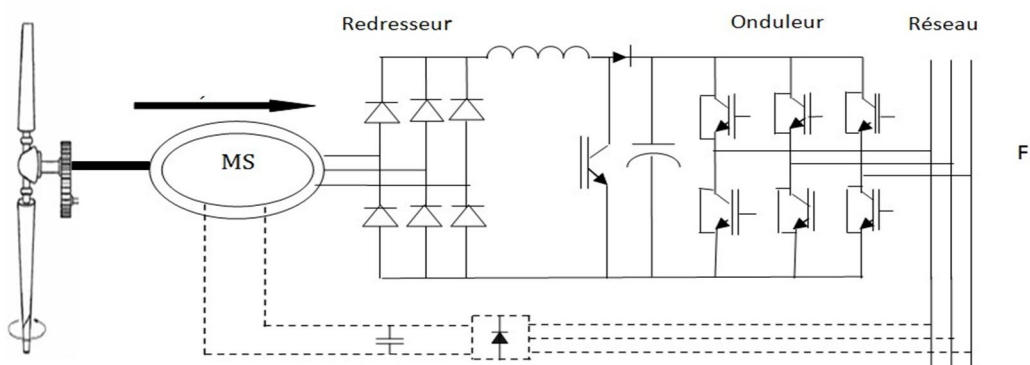


Figure 1.14: *Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif Redresseur-Hacheur-Onduleur MLI.*

I-6-1-2: machine synchrone à aimant permanent discoïde :

Le concept de cette machine se distingue par la direction axiale de son champ magnétique par opposition au champ radial des machines cylindriques traditionnelles.

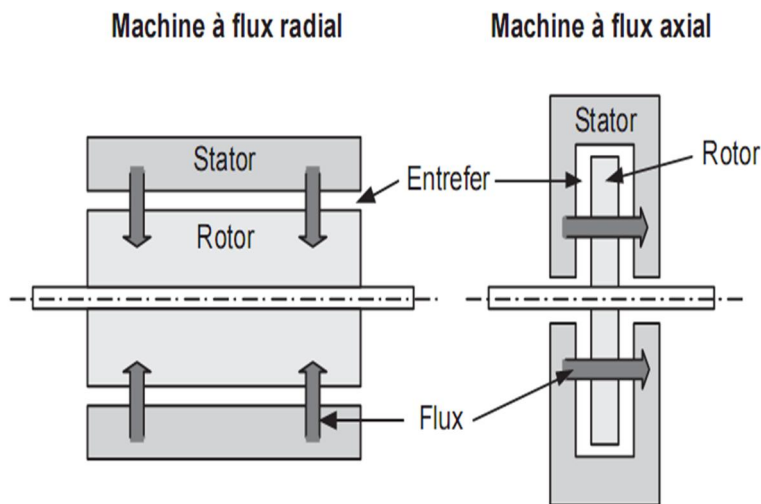


Figure 1.15: Machines à flux radial (a), à flux axial (b).

Pour les applications à petites vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse, ceci conduit à un meilleur couple volumique. Cette topologie à la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct avec un grand nombre de pôles.

I-6-1-3: machine synchrone vernier à aimant :

Ce type de machines est alimenté par des courants sinusoïdaux. Son fonctionnement est similaire à celui des machines à rotor lisse et des machines à reluctance variable. Il présente l'avantage d'une grande simplicité de construction mécanique et une bonne robustesse. L'inducteur est constitué de petits aimants alternés à la périphérie du rotor, qui interagissent sous l'effet du champ d'induit avec des petites dents statorique, les pôles et les aimants sont totalement découpés dans la structure vernier.

La figure (1.16) suivante nous montre la mise en œuvre des aimants surfaciques qui exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale,

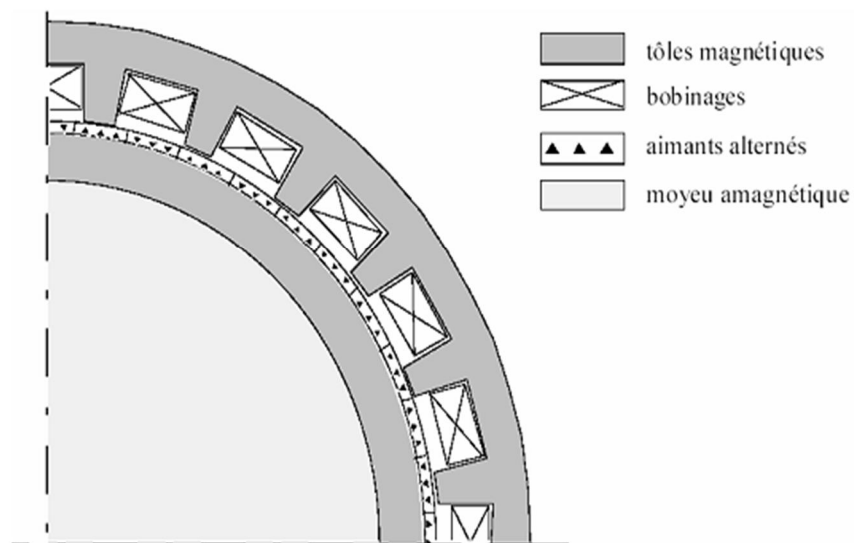


Figure (1.16) : Machine synchrone vernier à aimant.

L'effet vernier provient de ce que le nombre de paires d'aimants alternés, N_r est différent de nombre de dents ; N_s . il s'ensuit que l'onde d'induction due aux aimants a une périodicité égale à $2\pi/|N_s-N_r|$. Une condition de bon fonctionnement est alors d'avoir une périodicité des pôles de bobinages identique, ce qui implique $N_s-N_r = p$. Il est possible alors établir la relation entre la vitesse de rotation Ω , et la pulsation d'alimentation ω : $\Omega = \omega / N_r$.

Nous voyons que seule N_r impose la fréquence d'alimentation. Ceci est un avantage considérable pour le dimensionnement des machines très lentes, le niveau de performance étant intrinsèquement plus élevé que pour la machine classique à grand nombre de pôles, sachant qu'il est plus facile, pour des raisons de faisabilité mécanique, de diminuer la taille des dents que des pôles.

I-6-2: Systèmes utilisant la machine asynchrone :

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I-6-2-1: Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct, il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (1.17).

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 suivant Figure (1.17), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau figure (1.17).

La machine à un nombre de pair 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 (1.18), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [14].

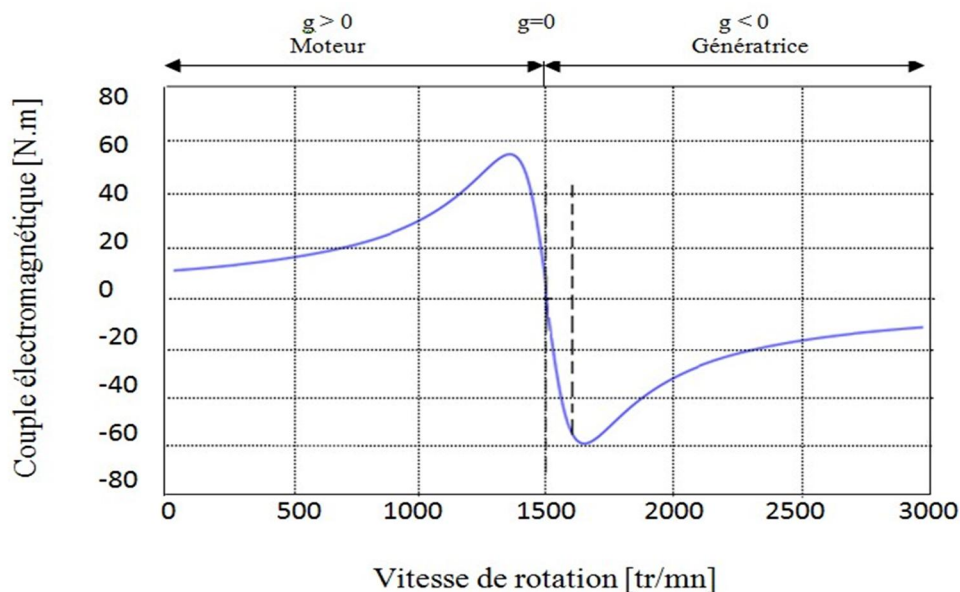


Figure 1.17: Caractéristique (couple /vitesse) d'une machine asynchrone à deux paire de pôles.

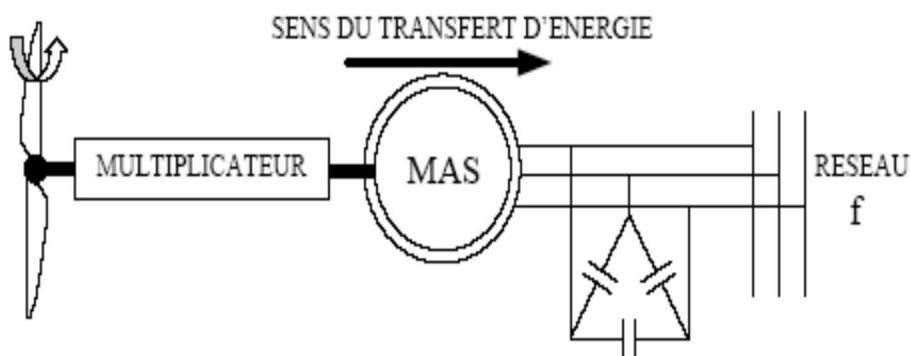


Figure (1.18): Connexion direct d'une MAS à cage connectée au réseau

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance figure (1.19).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les basculements rapides de la puissance générée peuvent être filtrés par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée. Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

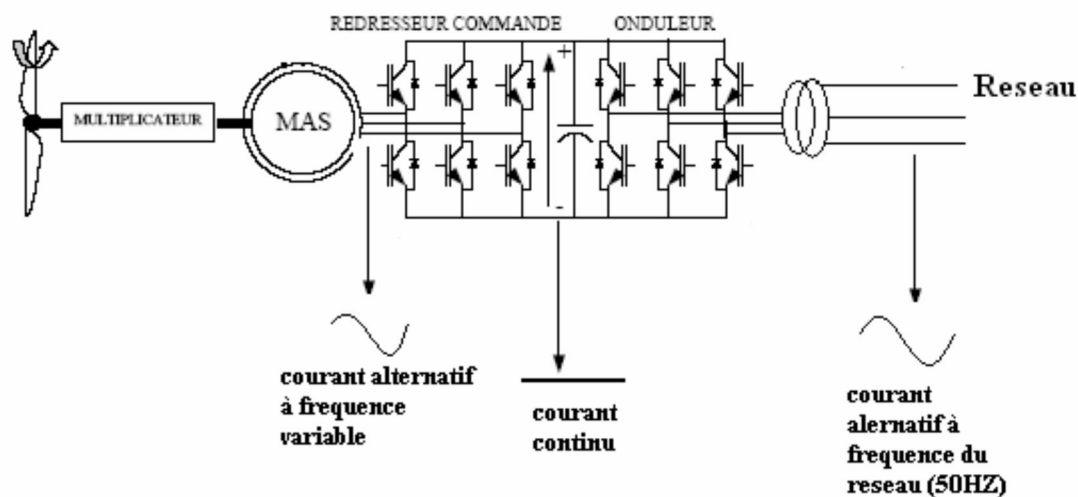


Figure (1.19) : *éolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.*

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée

au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme.

Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I-6-2-2: Machine asynchrone à double alimentation :

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [14].

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [15].

1- Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple,
- plus grande fiabilité,
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolien.
- pas besoin de système électrique de commande.
- moins cher.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant:

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

2- Intérêt de la MADA :

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible.

L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [14]

I-7: Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons dressé une brève description de l'énergie éolienne dont nous avons étaler quelques notions élémentaires indispensable à la simulation aux phénomène de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ,et aussi les deux système éolien existant, à savoir les systèmes à axe horizontal et les systèmes à axe vertical, notre travail se focalise sur le premier aspect, en prenant compte des principaux paramètres (angle de calage, profil...).

Ensuite nous avons présenté les deux types de machines électriques (asynchrone, synchrone) et leur application ainsi que leurs adaptation à un système éolien,

A la fin de ce chapitre nous avons présenté la structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ainsi que son intérêt, par la suite notre travail se focalise sur cette dernière.

II-1:Introduction

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et fréquence constante (fonctionnement générateur).

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à une étude générale de la MADA, ses applications et ses variantes fonctionnement et ses avantages et connaissance du comportement de type de la machine dans les différents régimes de fonctionnement.

La MADA se compose principalement de deux parties, le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques, et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. Les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en triangle ou en étoile. La seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent les balais.

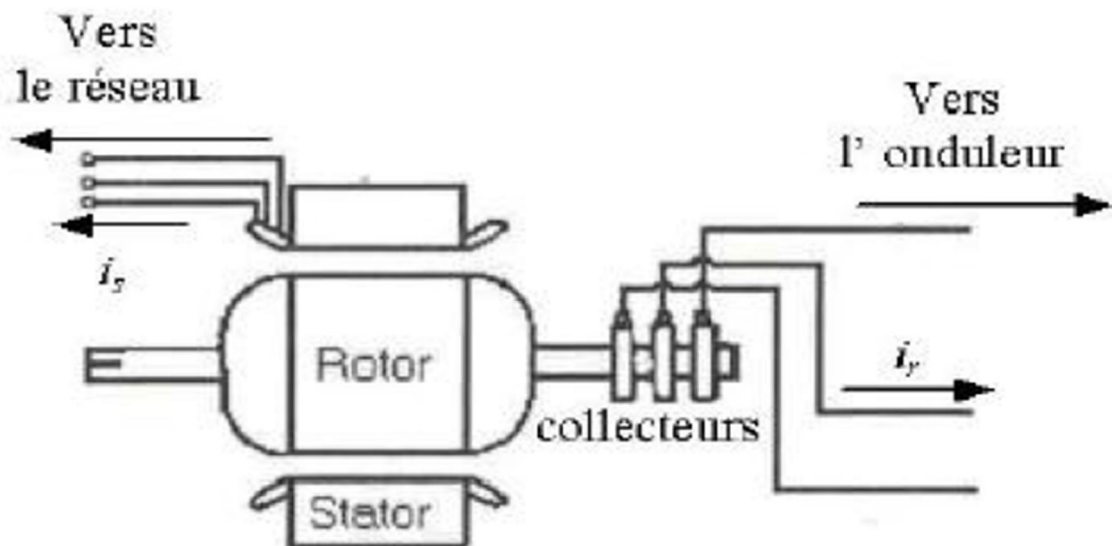


Figure (2.1): structure de la MADA à rotor bobiné

II-2 : Régimes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA fonctionne avec le stator directement connecter au réseau et rotor est alimente par un onduleur.

Comme la machine classique, la MADA peut fonctionner comme moteur ou générateur, mais la différence réside dans la MADA ce n'est pas la vitesse de rotation qui impose, le mode de fonctionnement.

En effet dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique a l'intérieur de la machine offre la possibilité de fonctionner en (hypo ou hyper) synchrone ou bien le mode (moteur ou générateur).

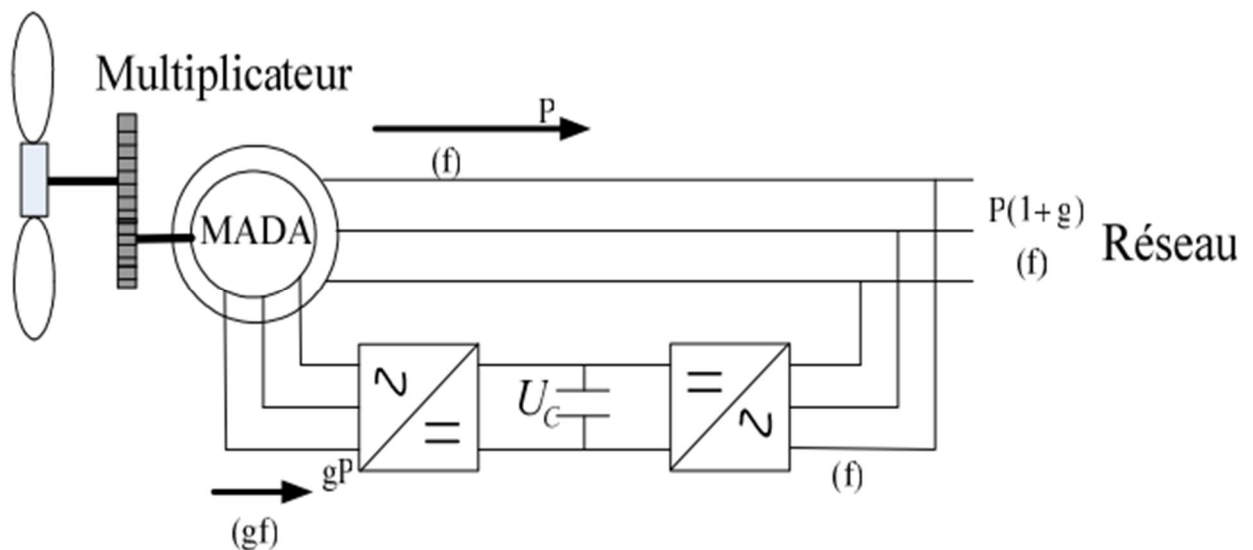


Figure (2.2): la MADA connecte au réseau

Les différents régimes de la MADA peuvent être devise en fonction de glissement

➤ Stationnaire ($g=1$) :

Le stator est alimenté par réseau avec fréquence statorique f_s , le rotor est le siège de la f-e-m induite avec une fréquence f_r identique avec f_s dans ce cas la MADA comporte comme un transformateur.

➤ **Hypo synchrone ($0 < g < 1$) :**

Le rotor tourne dans la direction du flux statorique, la fréquence rotorique f_r commence à décroître ; plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, et f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond a la vitesse de synchronisme.

➤ **Synchrone ($g=0$) :**

La vitesse du rotor atteint la vitesse de synchronisme ; la fréquence du rotor f_r s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport a ce dernier par conséquent il y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor donc la puissance du stator égale a la puissance du réseau. Alors la puissance du rotor s'annule c'est-à-dire l'écoulement de la puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

➤ **Hyper synchrone ($g < 0$):**

Le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor f_r devient négative, par avantage d'accélération .l'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

II-3 : Mode de fonctionnement de la MADA :

II-3-1 : Fonctionnement en moteur hypo synchrone :

La puissance du réseau fournie au stator et la puissance du glissement transité par le rotor est réinjecter au réseau .on a un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse du synchronisme .la machine asynchrone a cage classique peut comme montre la figure. [1][10]

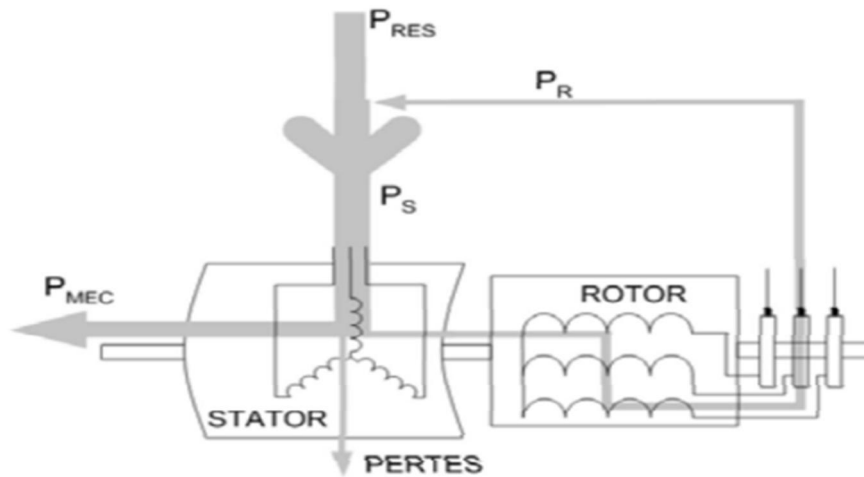


Figure (2.3) : *Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone*

II-3-2 : *Fonctionnement en moteur hyper synchrone :*

La puissance du réseau fournie au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, c'est-à-dire le moteur fonctionne au-dessus de la vitesse de synchronisme ; la machine à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

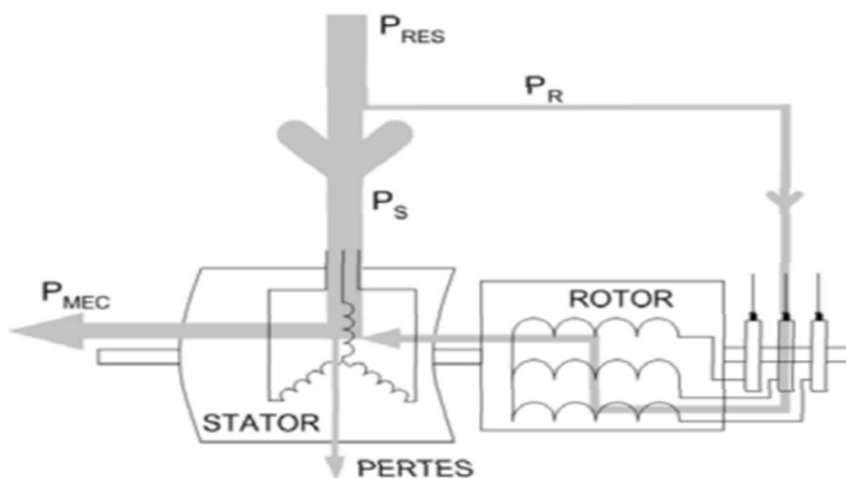


Figure (2.4) : *Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone*

II-3-3 : *Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :*

La puissance fournie au réseau par le stator, la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le fonctionnement générateur au-dessous de la vitesse de synchronisme la machine asynchrone ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

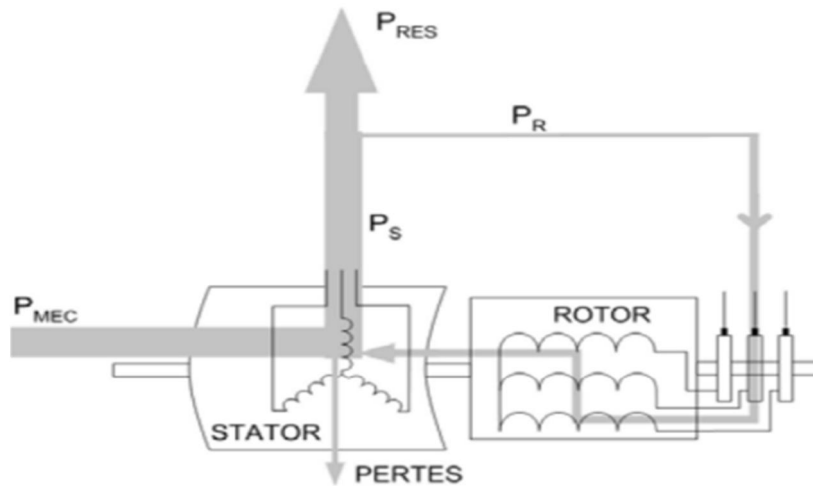


Figure (2.5) : *Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone*

II-3-4 : Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :

La puissance fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour réinjectée au réseau fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme .la machine asynchrone a cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans le cas la puissance de glissement est dissipée en perte joule dans le rotor.

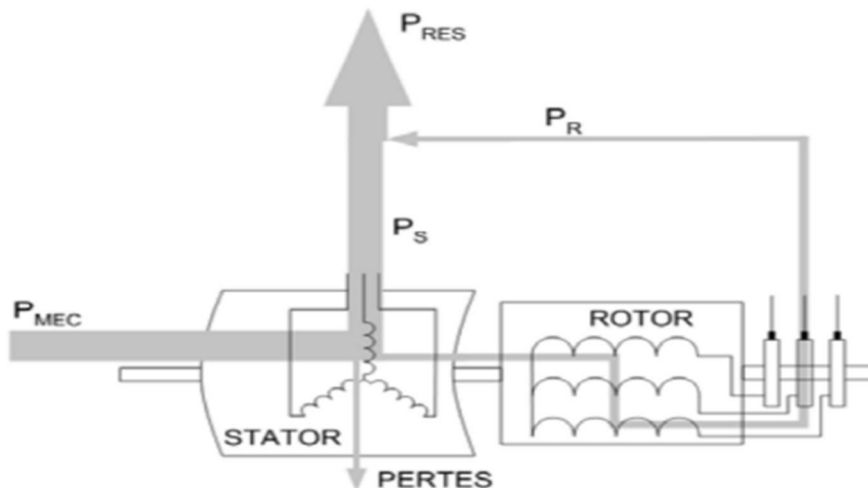


Figure (2.6) : *Fonctionnement en mode hyper synchrone*

La caractéristique de comparaison de la production optimale dans un système éolien (a cage avec convertisseur et MADA), nous montre que la machine à cage permet de produire de l'énergie pour des faibles valeurs de vent.

Par contre la MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/min qui correspond à vitesse de synchronisme moins 30 %.

La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique ; avant le synchronisme la puissance rotorique est négative donc la MADA produit légèrement moins que la machine à cage, mais au-delà de synchronisme la figure (3.5) montre que la MADA capable de produire de l'énergie par intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min qui correspond à +30% de la vitesse du synchronisme.

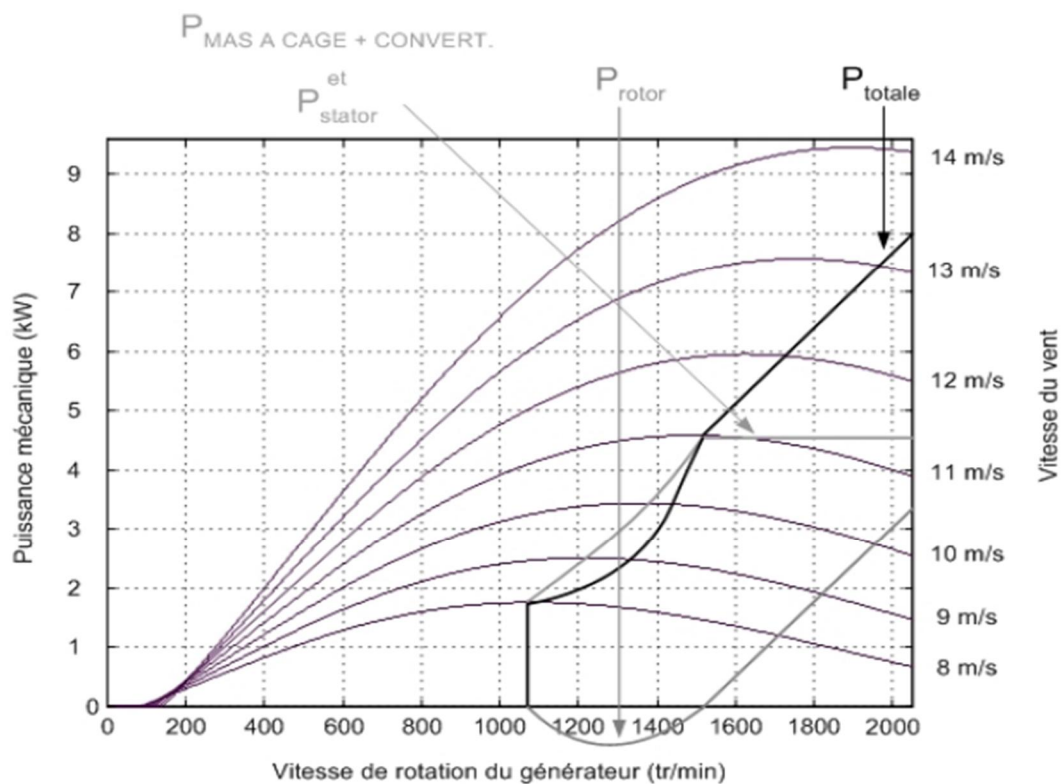


Figure (2.7) : caractéristique de la production d'énergie de la MADA et machine asynchrone à cage.

II-4 : Avantages et inconvénients de la MADA :

Les avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation sont présentés dans le tableau ci-dessous. [5]

Avantages	Inconvénients
Fonctionnement a vitesse variable $\pm 30\% \omega_{syn}$.	Prix de l'électronique de puissance relatif.
La possibilité de fonctionner a couple constant au-delà de la vitesse nominal.	Contrôle-commande complexe.
Mesure des courants au stator et au rotor contrairement à machine a cage.	Machine plus volumineuse, elle est plus long à cause du balai
Connexion de la machine plus facile à gérer.	maintenance de boite à vitesse et (balai-bague)
La puissance massique est plus Légère que les autres machines à grand puissance.	

II-5 : Conclusion

La machine asynchrone a double alimentation à deux principaux avantages sur la machine à cage classique.

- ✚ La production de la puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone).
- ✚ La récupération de la puissance de glissement.

III-1 : Introduction :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone a cage ou synchrone), constitue le plan souvent de tôles magnétiques muni d'encoches dans laquelle viennent s'insérer les enroulements.

La plus part des génératrices utiliser par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Cette dernière avait plus d'avantages : la robustesse ; leur coût est faible plus ont une simplicité mécanique.

Il existe deux types de la machine asynchrone : la machine asynchrone a cage d'écureuil et la machine asynchrone a rotor bobiné.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone a rotor bobiné, la plus utilise dans les éoliennes tournons a vitesse variable. [4][5]

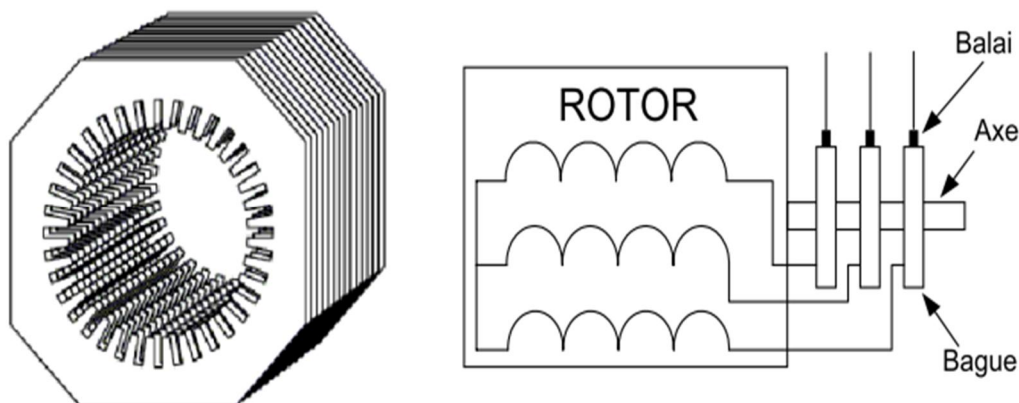


Figure (3.1) : *structure de stator et des contacts rotorique de la MADA*

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plus part des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnements.

III-2 : Modélisation de la turbine :

L'expression approcher du coefficient de puissance C_p (une donnée typique pour chaque éolienne) en fonction de la vitesse relative λ et l'angle de calage β est défini par [13][9] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,35 - 0,00167)(\beta - 2) \sin \left[\frac{\Pi(\lambda + 0,1)}{14,34 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (3.1)$$

La rotation de la turbine due au vent crée une puissance mécanique sur son arbre noté P_t :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \Pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.2)$$

Ou λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (3.3)$$

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

$$C_t = \frac{P_r}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \rho \Pi R^3 v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.4)$$

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables 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. Les pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous négligeons leur coefficient de frottement par rapport à l'air, De même la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle de transmission mécanique ramené sur l'arbre rapide constitué de deux masses comme l'illustre la Figure (3.2). [13]

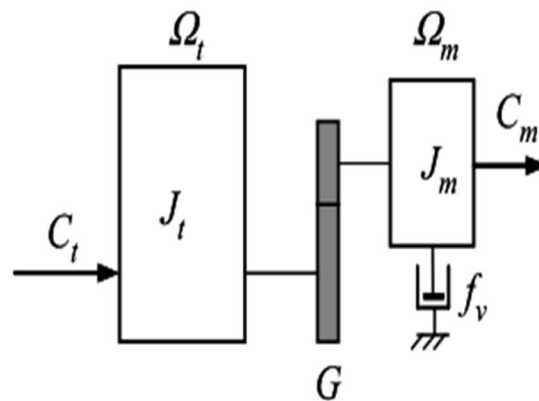


Figure (3.2) : *Modèle mécanique de la turbine éolienne.*

- J_t : le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne,
- J_m : le moment d'inertie de la génératrice,
- f_v : le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,
- C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice,
- Ω_m : la vitesse de rotation de la génératrice

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de la génératrice (arbre rapide), ceci permet d'utiliser des générateurs de taille compacte.

En négligeant les pertes mécaniques (multiplicateur idéal), alors on obtient les deux équations suivantes [13]:

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (3.5)$$

$$\Omega_m = G\Omega_t \quad (3.6)$$

Avec :

- C_m : le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice (arbre rapide)
- C_t : le couple mécanique sur l'arbre de la turbine (arbre lent)
- G : le gain du multiplicateur
- Ω_t : la vitesse de rotation de la turbine
- Ω_m : la vitesse de rotation de la génératrice

En appliquant la relation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice sur la figure (3.2) en obtient :

$$\left[\left(\frac{J_t}{G^2} \right) + J_m \right] \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (3.7)$$

III-3 : stratégie de commande de la turbine éolienne :

Du fait de la variabilité de la vitesse du vent a pour conséquence une variation de la puissance extraite, ainsi pour optimiser le captage de l'énergie éolienne en a eu recours à l'ajustement de la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent en modifiant l'angle de calage en permanence pour avoir un angle d'incidence optimal(expliquée dans le chapitre I)

III-3-1 : recherche du rendement maximum MPPT :

Le MPPT (point de fonctionnement à puissance maximum) est une stratégie de commande pour régler la vitesse de rotation afin de maximiser la puissance électrique produite, en agissant sur la partie mécanique (modifier l'angle de calage des pales) ou bien sur la partie électrique (contrôler le couple électromagnétique), cette stratégie s'effectue dans la zone II de la figure(1.11) ou l'angle de calage β des pales est considéré constant [3][13].

On peut distinguer deux modes de contrôles :

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

III-3-1-1 : Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation :

Il 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, comme le montre la Figure (3.3)

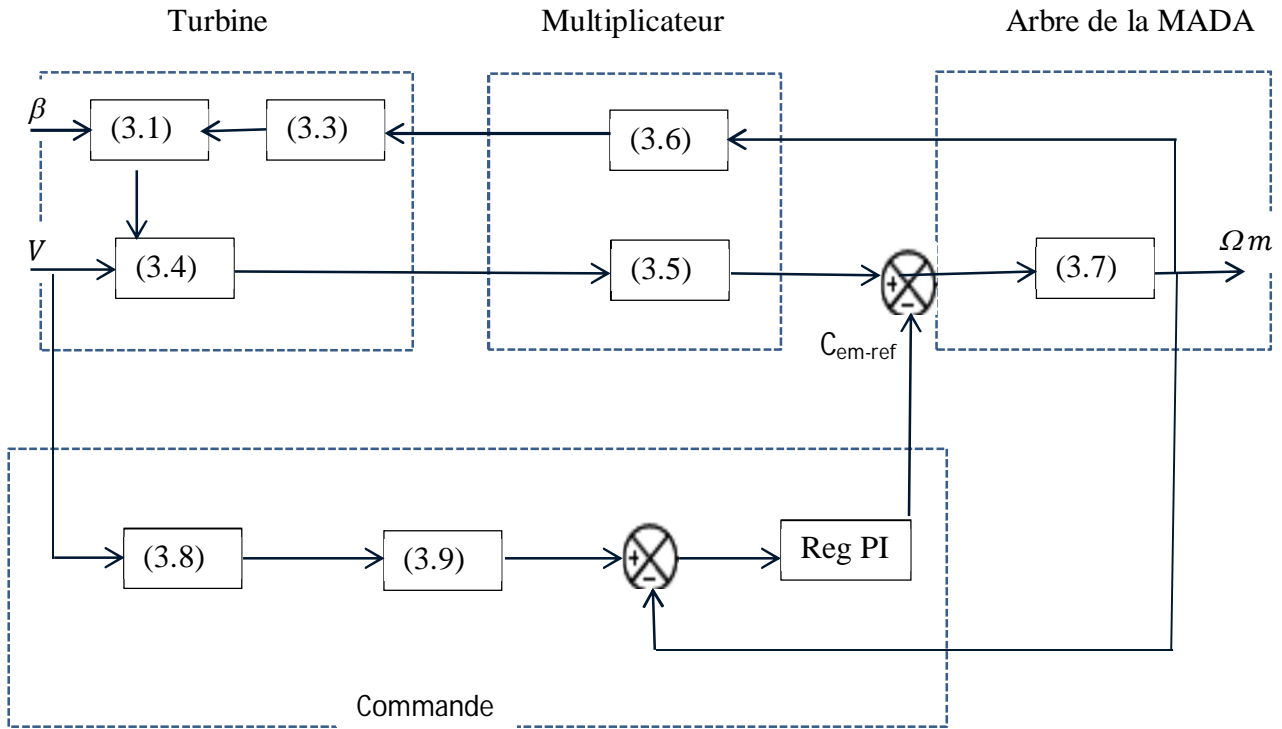


Figure (3.3) : *Contrôle MPPT avec asservissement de vitesse de rotation*

Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse de rotation Ω_m égale à sa valeur de référence Ω_{m-ref} est obtenue en sortie du régulateur de vitesse ("Reg" sur la Figure (3.3)). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (PI), permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_m 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 C_p . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour β constant et égal à 2°), comme la montre la Figure (3.4)

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad \text{et } C_1=0,5176, C_2=116, C_3=0,04, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068$$

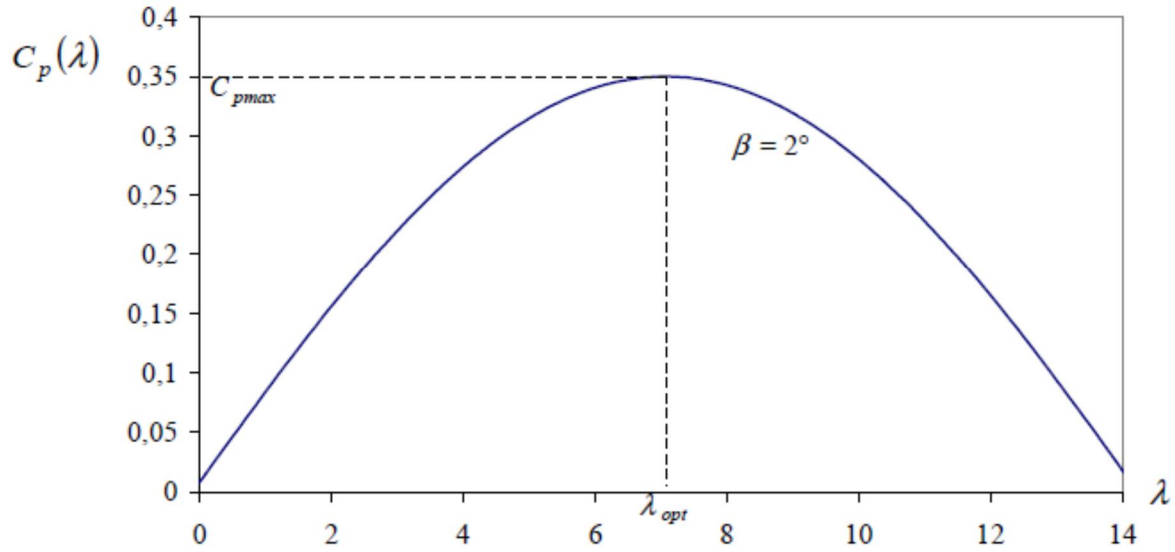


Figure (3.4) : coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta=2^\circ$.

A partir de la vitesse du vent mesurée, on détermine la vitesse mécanique optimale de la turbine (corresponde à λ_{opt})

$$\Omega_{t-ref} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (3.8)$$

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la MADA en prenant en compte le gain du multiplicateur par :

$$\Omega_{m-ref} = G \Omega_{t-ref} \quad (3.9)$$

➤ **Synthèse du régulateur proportionnel-intégral :**

$$C_{em-ref} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\Omega_{m-ref} - \Omega_m) \quad (3.10)$$

K_p : gain proportionnel

K_i : gain intégral

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\Omega_m = F(p) \Omega_{m-ref} - G(p) C_m \quad (3.11)$$

$$F(p) = \frac{PK_p + K_i}{JP^2 + (f + K_p)P + K_i} \quad (3.12)$$

$$G(p) = \frac{P}{JP^2 + (f + K_p)P + K_i} \quad (3.13)$$

Alors il est nécessaire d'augmenter le paramètre k_i pour diminuer l'action du couple éolien C_m .

Ainsi en déduit la pulsation naturelle et le coefficient de l'amortissement

$$W_n = \sqrt{\frac{ki}{j}} \text{ et } h = \frac{f + J + K_p}{K_i} \frac{W_n}{2} \quad (3.14)$$

Dans cet stratégie de contrôle l'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation [13].

III-3-1-2 : Le contrôle 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 (3.7), nous pouvons écrire :

$$\left[\left(\frac{J_t}{G^2} \right) + J_m \right] \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} = 0 \quad (3.15)$$

On négligeant l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($f_v \Omega_m = 0$) par rapport au couple mécanique C_m , on peut alors écrire :

$$C_m = C_{em} \quad (3.16)$$

Le contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation est représenté par la figure (3.5).

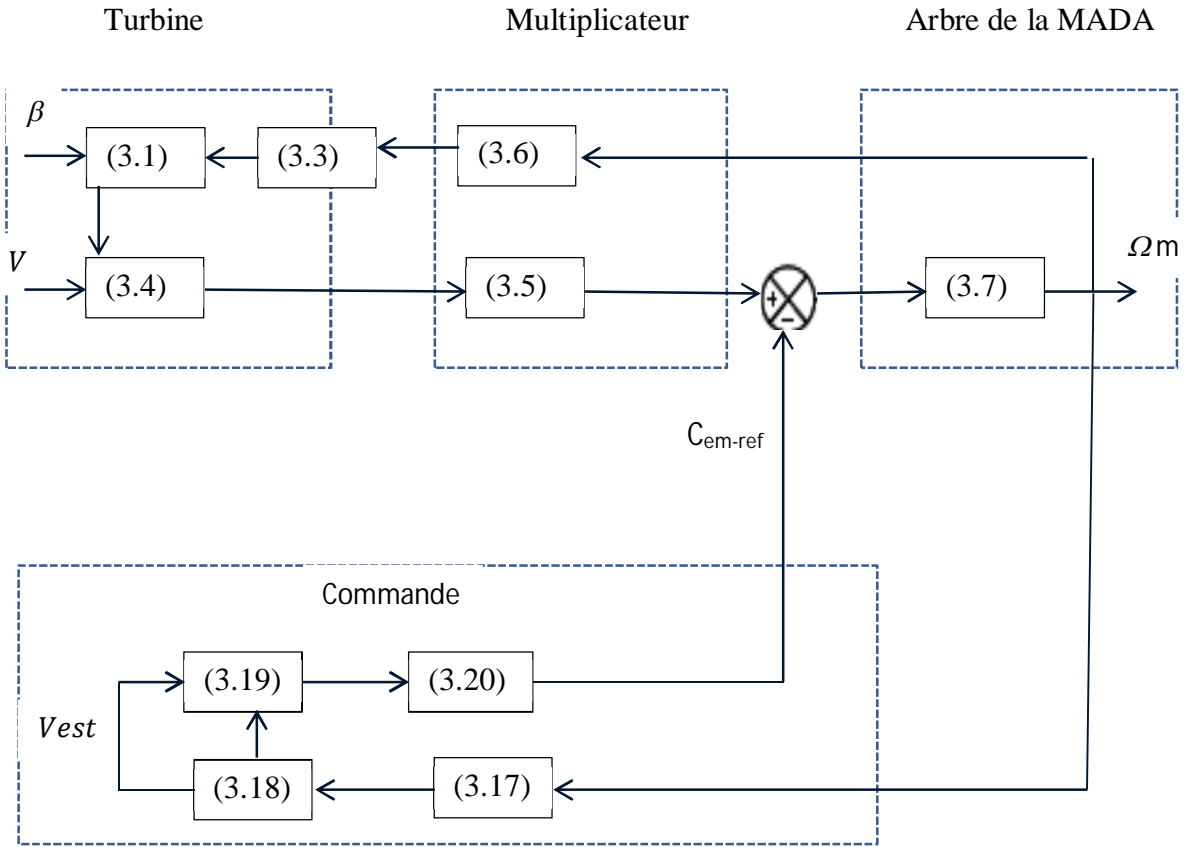


Figure (3.5) : Control MPPT sans asservissement de vitesse de rotation

L'estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_{t-est} , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \tag{3.17}$$

L'estimation de la vitesse, notée v_{est} est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$v_{est} = \frac{\Omega_{t-est} R}{\lambda} \tag{3.18}$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t-est} = \frac{1}{\Omega_{t-est}} \rho \Pi R^2 v_{est}^3 \frac{C_p}{2} \tag{3.19}$$

Connaissant l'estimation du couple de la turbine éolienne alors on peut obtenir le couple électromagnétique de référence:

$$C_{em-ref} = k\Omega_m^2 \quad (3.20)$$

Où K est une constante définit par :

$$K = \frac{C_{p\max} \rho \pi R^5}{2G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (3.21)$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone II) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la MADA.

Dans la deuxième partie de Ce chapitre on représente le concept d'électrotechnique relatif à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation .il développe également le modèle mathématique et électrique dans le repère (a b c) et (d q) et la mise en évidence du modèle de la MADA écrit dans le repère de Park et traduit en suite en un système d'équation d'état.

III-4 : Modélisation de la MADA en fonctionnement linéaire :

III-4-1 : Hypothèses simplifiées :

La mise en équations de la machine asynchrone triphasée aboutit à des équations Différentielles à coefficient variables. Pour cela un nombre d'hypothèses simplificatrices peut être adopte afin de permettre une mise en équations particulièrement simples. [4][5]

On suppose :

- les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la F.M.M est distribuée sinusoidalement la long de deux armatures.
- on suppose que le circuit magnétique non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linaires.
- on considère une densité du courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

- on tient en compte que le premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase de stator et du rotor.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant).

III-4-2 : Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire

L'enroulement des trois phases rotoriques et statoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indique dans la figure ci-dessous.

θ : est l'angle électrique entre l'axe de la phase (a) statorique et la phase (a) rotorique.

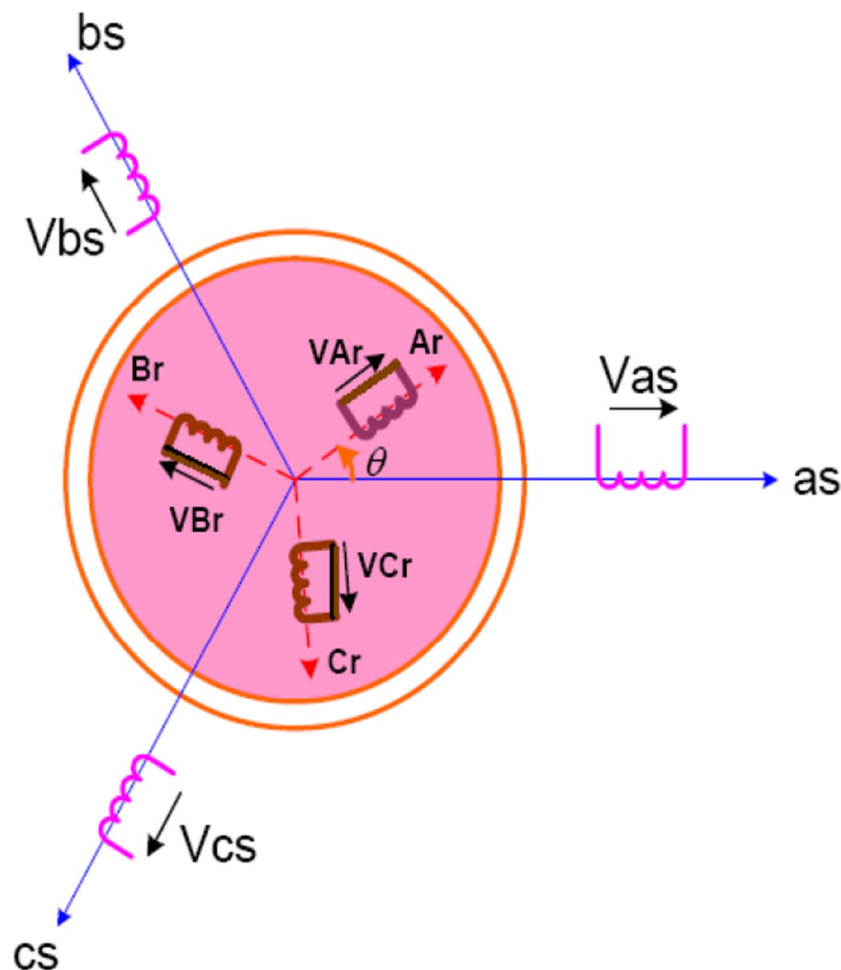


Figure (3.6) : Représentation schématique de la machine asynchrone

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère triphasé s'écrivent comme suit.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = RI + \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.22)$$

III-4-3 : Equation électrique :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{bs} + \frac{d}{dt} \varphi_{as} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d}{dt} \varphi_{bs} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d}{dt} \varphi_{cs} \end{cases} \quad (3.23)$$

Au rotor:

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{cases} \quad (3.24)$$

Écriture sous une forme matricielle

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (3.25)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (3.26)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[Vr] = \begin{bmatrix} Var \\ Vbr \\ Vcr \end{bmatrix} \quad [Ir] = \begin{bmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{bmatrix} \quad [\varphi r] = \begin{bmatrix} \varphi ar \\ \varphi br \\ \varphi cr \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \quad [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Les équations électriques en notation matricielle deviennent :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} Vas \\ Vbs \\ Vcs \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ias \\ Ibs \\ Ics \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi ar \\ \varphi br \\ \varphi cr \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} Var \\ Vbr \\ Vcr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi as \\ \varphi bs \\ \varphi cs \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Ou :

$[Vs], [Vr]$: Sont les vecteurs de tensions statoriques et rotoriques.

$[Is], [Ir]$: Sont les vecteurs de courants statoriques et rotoriques.

$[\varphi s], [\varphi r]$: Sont les vecteurs de flux statoriques et rotoriques.

$[Rs], [Rr]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

III-4-4 : Equation magnétique :

On sait que : $[\varphi]=[L][I]$ (3.32)

Dans la machine asynchrone, il y a six bobines couplées magnétiquement .chacune d'entre-elle va influencer ses voisines. Les tensions que l'on retrouve aux bornes de ces bobines vont donc être marquées par les mutuelles inductances des autres.

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (3.33)$$

Les équations sont représentées comme suit :

Cote stator:

$$\begin{cases} \varphi_{as} = L_s I_{as} + M_{sr} I_{ar} \\ \varphi_{bs} = L_s I_{bs} + M_{sr} I_{br} \\ \varphi_{cs} = L_s I_{cs} + M_{sr} I_{cr} \end{cases} \quad (3.34)$$

Cote rotor:

$$\begin{cases} \varphi_{ar} = L_r I_{ar} + M_{rs} I_{as} \\ \varphi_{br} = L_r I_{br} + M_{rs} I_{bs} \\ \varphi_{cr} = L_r I_{cr} + M_{rs} I_{cs} \end{cases} \quad (3.35)$$

Les équations en notation matricielles :

Cote stator:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Cote rotor:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

L_s : inductance propre de la phase statorique.

L_r : inductance propre de la phase rotorique.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$[M_{sr}]$: Matrice inductance mutuelle (stator-rotor) dépend de deux paramètres

-inductance mutuelle maximum entre phase statorique et rotorique M_{sr} .

-l'angle électrique α variable en fonction du temps.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Avec:

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

En injectant les équations (2.36) et (2.37) dans (2.23) et (2.24) on obtient le système suivant :

Cote stator:

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + L_s \frac{d}{dt} I_{as} + M_{sr} \frac{d}{dt} I_{ar} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + L_s \frac{d}{dt} I_{bs} + M_{sr} \frac{d}{dt} I_{br} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + L_s \frac{d}{dt} I_{cs} + M_{sr} \frac{d}{dt} I_{cr} \end{cases} \quad (3.40)$$

Cote rotor:

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + L_s \frac{d}{dt} I_{ar} + M_{rs} \frac{d}{dt} I_{as} \\ V_{br} = R_r I_{br} + L_s \frac{d}{dt} I_{br} + M_{rs} \frac{d}{dt} I_{bs} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + L_s \frac{d}{dt} I_{cr} + M_{rs} \frac{d}{dt} I_{cs} \end{cases} \quad (3.41)$$

III-5 : Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan (d q) :

III-5-1 : La Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphase-biphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer de repère (abc) vers le repère ($\alpha \beta$) puis vers le repère (d q).

Le repère ($\alpha \beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc) par contre le repère (d q) est mobile .il forme avec le repère fixe ($\alpha \beta$) un angle qui est appelé l'angle de transformation de Park ou l'angle de Park.

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en enroulements statoriques et rotoriques biphasés Orthogonaux, afin d'obtenir un modèle Mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

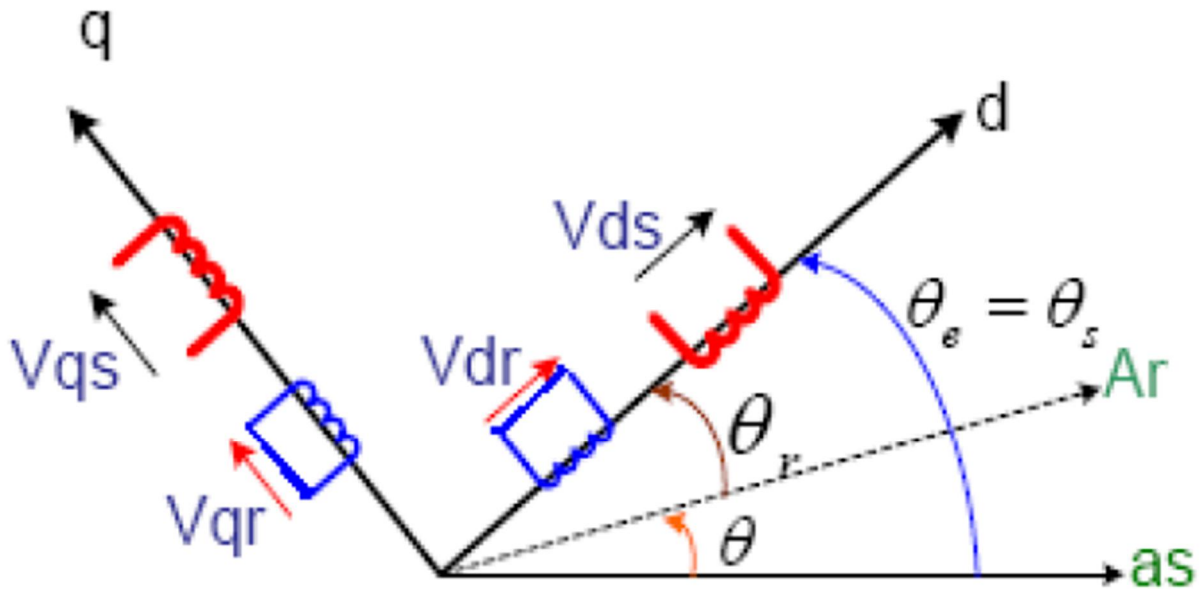


Figure (3.7) : Représentation de la machine dans le repère déphasé

La transformation de Park ou transformation de deux axe, fait correspondre aux variable réelle leurs composantes (indice 0), d'axe direct (indice d) et d'axe quadrature (indice q) cette transformation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ X0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

Or ; la variable X Peut correspondre aux : tension, courant ou un flux

III-5-2 : Transformation initiale de Park :

Le système matriciel (2.42) les courants dans le repère (d q) sont obtenus :

$$\begin{bmatrix} Id \\ Iq \\ I0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} n1 \\ n2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ k0 & k0 & k0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

$\left(\frac{n1}{n2}\right) = \frac{2}{3}$, et $ko = \frac{1}{2}$ dans ce cas des courants sinusoïdaux

La transformation de Park est donnée :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

La transformation inverse de Park est donnée :

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

III-5-3 : Transformation de Park modifiée :

Elle conduit à l'égalité des amplitudes (courants et tensions), mais ne conduit pas à l'égalité des puissances.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

La transformation inverse de Park modifiée est :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Le modèle de la machine est établi dans le repère des axes (d, q) solidaire au champ tournant après l'annulation des composantes homopolaires.

Après la transformation on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} Xd \\ Xq \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

III-6 : Equation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d q) :

III-6-1 : Equation électrique :

Les équations aux tensions statorique et rotorique, écrite dans le repère de Park.

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.49)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.50)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.51)$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (3.52)$$

III-6-2: Equation magnétique:

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3.53)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (3.54)$$

Sou forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: mutuelle cyclique entre stator et rotor.

III-6-3 : Equation mécanique et le couple électromagnétique :

L'équation mécanique reste inchangée dans le repère de Park

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (3.56)$$

Ou : C_r : couple résistant

J : moment d'inertie

f : coefficient de frottement visqueux

Ω : vitesse de rotation de la machine

Par contre le couple électromagnétique est concerné par la transformation, son expression est donné par :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} \{ \varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr} \} \quad (3.57)$$

Cette dernière expression est donnée par le bilan de puissance

III-7 : Choix de référentiel (d q) :

On a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d q) faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre. [4][5][11]

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (d q) :

- Au stator.
- Au rotor.
- Au champ tournant.

III-7-1 : Référence immobile par apport au stator :

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

Les équations deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_S I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_S I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (3.58)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.59)$$

III-7-2 : Référentiel immobile par apport au rotor :

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires ou la vitesse est supposée constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$$

Les équations deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_S I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_S I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.60)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_r I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (3.61)$$

III-7-3 : Référentiel immobile par apport au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par $\omega = \omega_s$. Dans ce repère les grandeurs rotoriques et statoriques sont connues en régime permanent. Il est préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine.

Le modèle mathématique de la MADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

Les équations électriques deviennent :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.62)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.63)$$

Equation magnétique :

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3.64)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (3.65)$$

Le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (3.66)$$

On tire de l'équation (2.64) et (2.65) les courants rotoriques et statorique.

Au stator :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{ds} - M I_{dr}) \\ I_{qs} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{qs} - M I_{qr}) \end{cases} \quad (3.67)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{dr} - M I_{ds}) \\ I_{ds} = \frac{1}{L_r} (\varphi_{ds} - M I_{dr}) \end{cases} \quad (3.68)$$

III-8 :Modèle de la machine en représentation d'état :

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x, u, t) \\ Y = g(x, u, t) \end{cases} \quad (3.69)$$

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (3.70)$$

Ou:

X: vecteur d'état.

U: vecteur d'entrée.

Y: vecteur de sortie.

Plusieurs possibilités sont offertes pour le choix de vecteur d'état qui traduit ensuite l'établissement de l'expression du couple électromagnétique. [4]

$$X = (\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, I_{dr}, I_{qr})^t : \text{variable d'état}$$

$U = (V_{dr}, V_{qr})$: variable de commande

C_r : Perturbation

Pour notre étude du modèle d'état on va définir :

$$\begin{cases} X = (\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, I_{dr}, I_{qr})^t \\ U = (V_{dr}, V_{qr})^t \\ Y = (I_{dr}, I_{qr})^t \end{cases} \quad (3.71)$$

a)-Equations électriques :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_r M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) & (\omega_s - \omega) & \left(\frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot \frac{R_s}{L_s}\right) & -\left(\frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot \frac{R_s}{L_s}\right) p\omega \\ -(\omega_s - \omega) & \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) & \left(\frac{M}{\sigma_r L_s}\right) p\omega & \left(\frac{R_r}{L_s} \cdot \frac{M}{\sigma_r L_s}\right) \\ \left(\frac{R_s}{L_s} M\right) & 0 & -\left(\frac{R_s}{L_s}\right) & \omega_s \\ \left(\frac{R_s}{L_s} M\right) & 0 & -(\omega_s) & -\left(\frac{R_s}{L_s}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

Ou :

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_r M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) & (\omega_s - \omega) & \left(\frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot \frac{R_s}{L_s}\right) & -\left(\frac{M}{\sigma_r L_s} \cdot \frac{R_s}{L_s}\right) p\omega \\ -(\omega_s - \omega) & \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) & \left(\frac{M}{\sigma_r L_s}\right) p\omega & \left(\frac{R_r}{L_s} \cdot \frac{M}{\sigma_r L_s}\right) \\ \left(\frac{R_s}{L_s} M\right) & 0 & -\left(\frac{R_s}{L_s}\right) & \omega_s \\ \left(\frac{R_s}{L_s} M\right) & 0 & -(\omega_s) & -\left(\frac{R_s}{L_s}\right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_r} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$T_r = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante de temps statorique}$$

$$T_s = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique}$$

$$\sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) : \text{coefficient de dispersion}$$

L'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (3.73)$$

Equation mécanique est:

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (3.74)$$

J : moment d'inertie

f : coefficient de frottement visqueux

Ω : vitesse de rotation de la machine



Figure (3.8) : schéma du modèle de la MADA en représentation d'état

III-9 : Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation nous a permis de présenter le comportement de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation (électrique, mécanique), qu'elle dépend du choix du référentiel (le choix ici est lié au champ tournant), afin d'exprimer sous forme schéma blocs dans le chapitre qui suit.

IV -1:INTRODUCTION :

Nous avons vu dans le deuxième chapitre l'intérêt d'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur était de pouvoir contrôler facilement la production de l'électricité de l'éolienne on réalise le contrôle indépendant des puissances active et réactive en établie les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques. En suivant la caractéristique puissance optimale de l'éolienne.

Nous allons donc suivre et contrôler les différentes grandeurs rotoriques sur laquelle nous agissons pour commander la machine asynchrone a double alimentation en mode génératrice.

IV-2 : Stratégie de la commande de la machine asynchrone à double alimentation :

Pour tourner la machine à une vitesse optimale, pour une vitesse donnée du vent, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné .en utilisant la référence de la puissance active et réactive de la machine qui sont alors commandée. [9],[1]

Les différentes stratégies de commande de la MADA reposent sur deux approches pour effectuer une commande en puissance de cette machine :

- La première approche consiste a négliger les termes de couplage et mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment la puissance active et reactive.car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine. c'est la commande vectorielle de type direct.

- La deuxième approche consiste à tenir en compte les termes de couplage et a les compenser en effectuant un système comportant deux boucle permettant de contrôler les puissances et les courants rotorique. c'est la commande vectorielle de type indirect.

La méthode qui va être étudié et simuler dans ce chapitre, c'est la commande direct car sa mise en œuvre est simple.

IV-3 : Choix de référence pour le modèle de Park :

Les équations électriques:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (4.1)$$

Les équations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (4.2)$$

L'équation mécanique :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d}{dt} \Omega \quad (4.3)$$

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant

Ω : Vitesse de rotation de la MADA

J : Moment d'inertie

f : Coefficient de frottement visqueux

L'expression du couple électromagnétique en fonction du flux statoriques et courants rotoriques est :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (4.4)$$

En choisissant le référentiel diphasé (d-q) lié au champ tournant, et on alignant le vecteur flux statorique φ_s avec l'axe d ; nous pouvons écrire : [1][3]

$$\varphi_{ds} = \varphi_s ; \varphi_{qs} = 0. \quad (4.5)$$

Le couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_{ds}) = -p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \varphi_s) \quad (4.6)$$

Dans l'hypothèse où le flux φ_{ds} est maintenant constant (assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) ; le choix de repère

Dans le repère triphasé (a,b,c) la tension aux bornes d'une phase « n » du stator s'exprime par la relation

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d}{dt} \varphi_{sn} \quad (4.7)$$

Si on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , l'hypothèse réaliste pour les machines moyen et forte puissance utilisé dans le système éolien ; donc la relation devient :

$$V_{sn} \simeq \frac{d}{dt} \varphi_{sn} \quad (4.8)$$

La relation (4.7) montre que le repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur le même vecteur. Comme montre la figure (4.1) ci-dessus : [1][3]

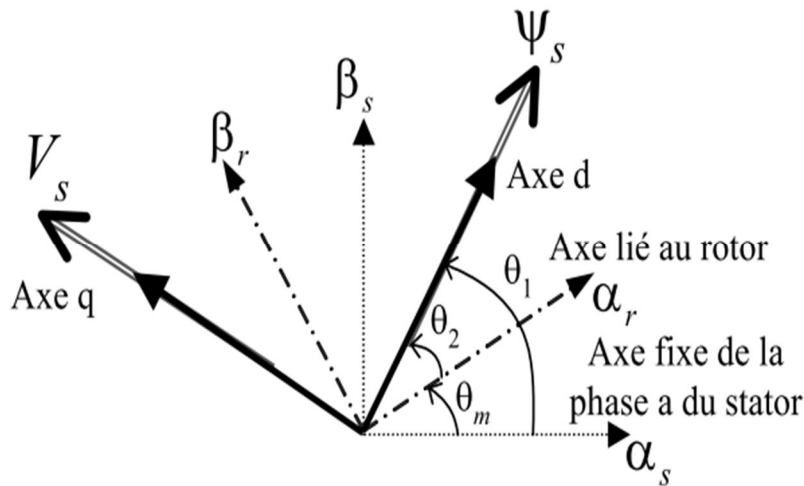


Figure (4.1) : vecteur tension et flux dans le système d'axe choisi

On peut alors écrire :

$$V_{ds} = 0 ; V_{qs} = V_s \quad (4.9)$$

En s'alignant sur le repère choisi, on utilisant les simplifications ci-dessus, les équations tensions et du flux statorique deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (4.11)$$

A partir de l'équation (4.11) on peut écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (4.12)$$

IV-4 : Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans le repère diphasé quelconque ; les puissances active et réactive statorique d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (4.13)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplifiées effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$), l'équation (4.31) deviennent.

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (4.14)$$

En remplaçant $I_{qs}; I_{ds}$ par leurs expressions donner par l'équation (4.12) nous obtenus la puissance active et réactive comme suit :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_r = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (4.15)$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q deviennent alors :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (4.16)$$

Compte tenu du repère choisi, des approximations faites et si on considère que l'inductance magnétique M comme constante, le système ainsi obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant statorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d a une constante prée $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ près imposée par le réseau.

IV-5 : Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Exprimons d'abord les flux rotorique d'après l'équation (4.1) en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (4.12).

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (4.17)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (4.1). nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (4.18)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons alors écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (4.19)$$

V_{dr} et V_{qr} Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer a la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus .l'influence des termes de couplages entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime .la synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (4.15);(4.16) et (4.19) permet d'établir le schéma bloc du système électrique à réguler.

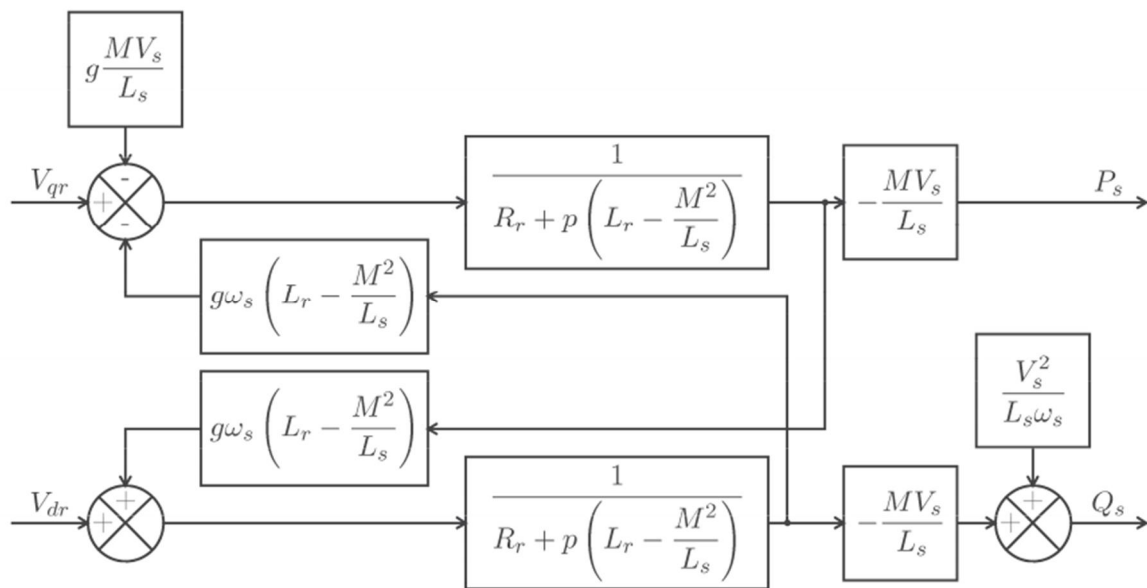


Figure (4.2) : schéma bloc du système à réguler

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statorique.

La commande de chaque axe peut être commandé indépendamment, avec chacun son propre régulateur. les grandeurs de références pour ces références sont :

La puissance active sur l'axe q rotorique et la puissance active sur l'axe d rotorique. La consigne de puissance active est maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire cote stator de façon a optimisé la qualité de l'énergie renvoyer sur le réseau [1].

IV-6 : Commande vectorielle en puissance de la MADA en génératrice :

IV-6-1 : Principe générale :

L'objectif de la commande de la MADA consiste à lui faire suivre une consigne en puissance avec une dynamique électrique, la mieux possible que le permet la fréquence de modulation du convertisseur utilisé. Le schéma bloc de la commande vectorielle est montré sur la figure ci-dessus avec le régulateurs (PI) pour l'axe d et l'axe q.

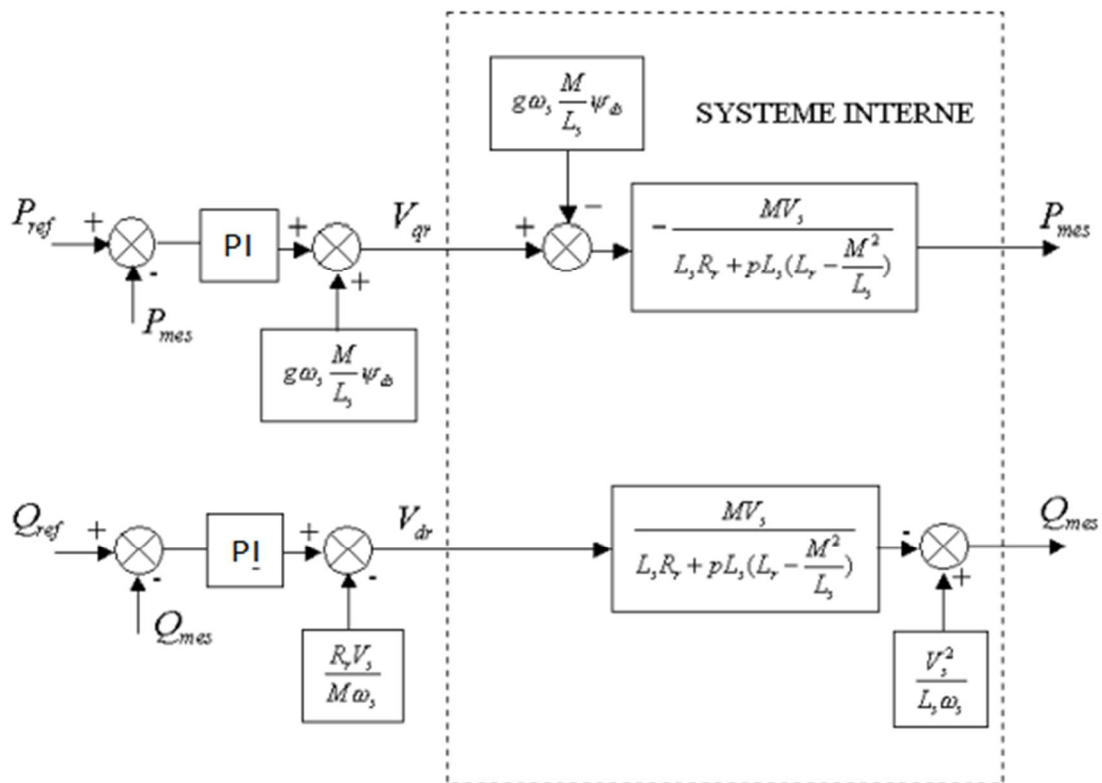


Figure (4.3) : *principe générale de la commande vectorielle de la MADA*

Lorsque la machine fonctionne en mode autonome ou lorsque le réseau auquel le stator de la machine est connecté présente des variations importantes, le terme V_s est variable et la présence du régulateur PI se justifie.

Dans notre cas la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s par conséquent est constante. Chaque axe comporte un régulateur comme indique la figure (4.4).

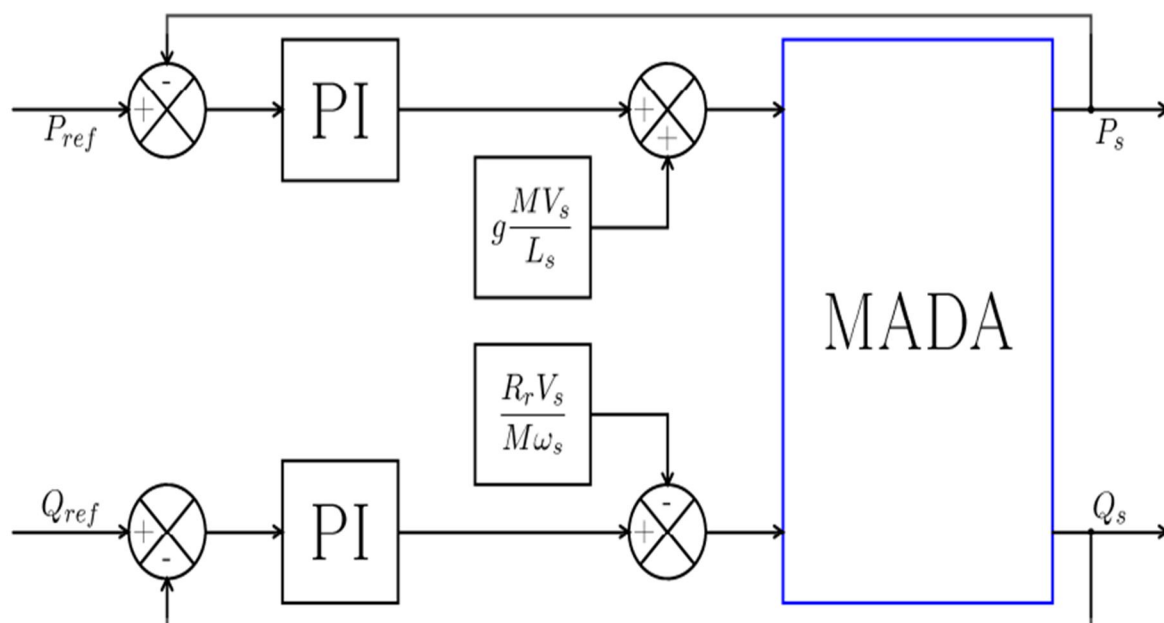


Figure (4.4) : *commande vectoriel avec un seul régulateur*

IV-6-2 : Objectif du contrôle :

Les régulateurs de la commande vectorielle seront calculés de façon à obtenir les performances les plus élevées possibles tant au niveau de la dynamique qu'à celui de robustesse et de rejet de perturbations. Ainsi au cours de synthèse de ses régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'éolien à vitesse variable ou dans un système utilisant la MADA en génératrice.

Les lois de la commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire la durée de vie de la machine et des convertisseurs.

IV-6-3 : Synthèse du régulateur proportionnel-intégral pour le contrôle de

La puissance :

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre, la figure montre un système en boucle

fermé corrigé par un PI. Dans notre cas, la fonction de transfert sous la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$

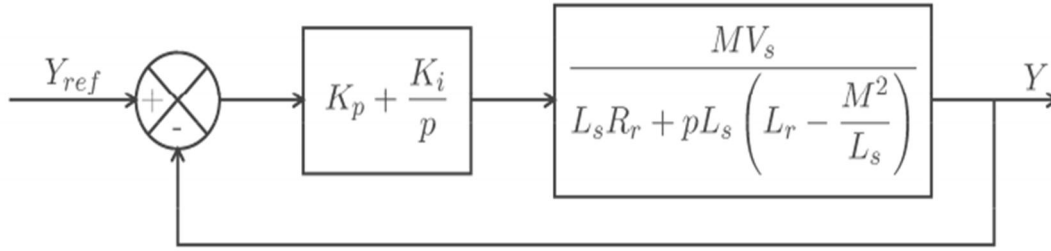


FIGURE (4.5) : Schéma bloc d'un système à réguler par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec un régulateur s'écrit :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (4.20)$$

Nous choisissons la compensation des pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert qui nous amène à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \quad (4.21)$$

La compensation des pôles n'a intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres.

Si on effectue la compensation la FTBO devient :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (4.22)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (4.23)$$

τ_r : Le temps de réponse du système.

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de repense :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (4.24)$$

Nous avons utilisé la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident que n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse des régulateur PI. [1][3]

IV-6-4 : Résultats de simulation :

Le modèle mathématique de la commande vectorielle est implémenté sous Matlab /Simulink. Les résultats sont données par les figures (4,6) et (4,7) sont obtenus pour une consigne de puissance réactive maintenue nulle $Q_{ref}=0$, et une consigne de puissance active P_{ref} qui n'est pas nulle.

Les figures ci-dessous illustre les performances de la machine asynchrone a double alimentation réguler par une commande vectorielle. Les puissances mesurées (P_{mes}, Q_{mes}) suivent parfaitement leurs consignes.

IV-6-5 : conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure de la commande et la stratégie de la régulation finalement choisi de la MADA dans un système éolien et la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique, la mise en équation le choix de repère diphasé et la simplification nécessaire a la synthèse de régulateurs est présentée.

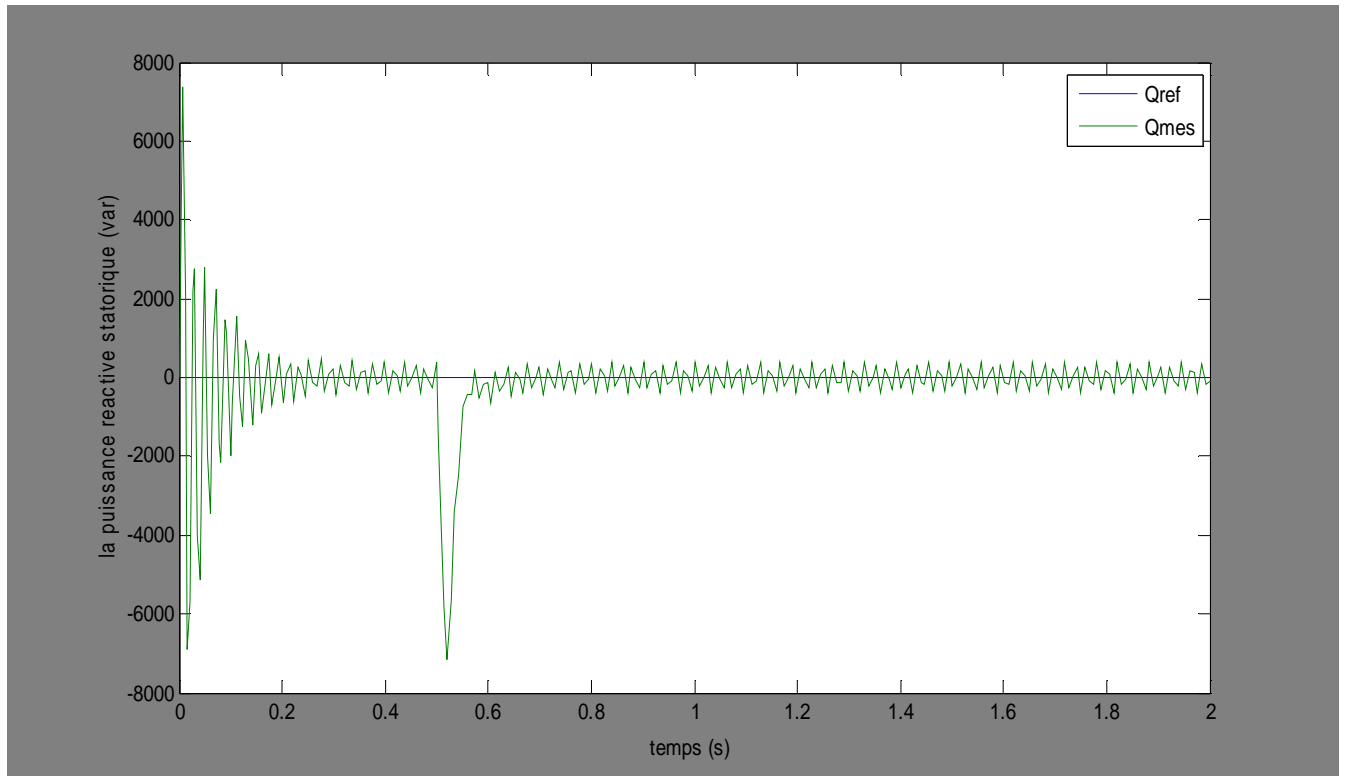


FIGURE (4.6) : variation de la puissance réactive mesurée Q_{mes} et la puissance de référence Q_{ref} .

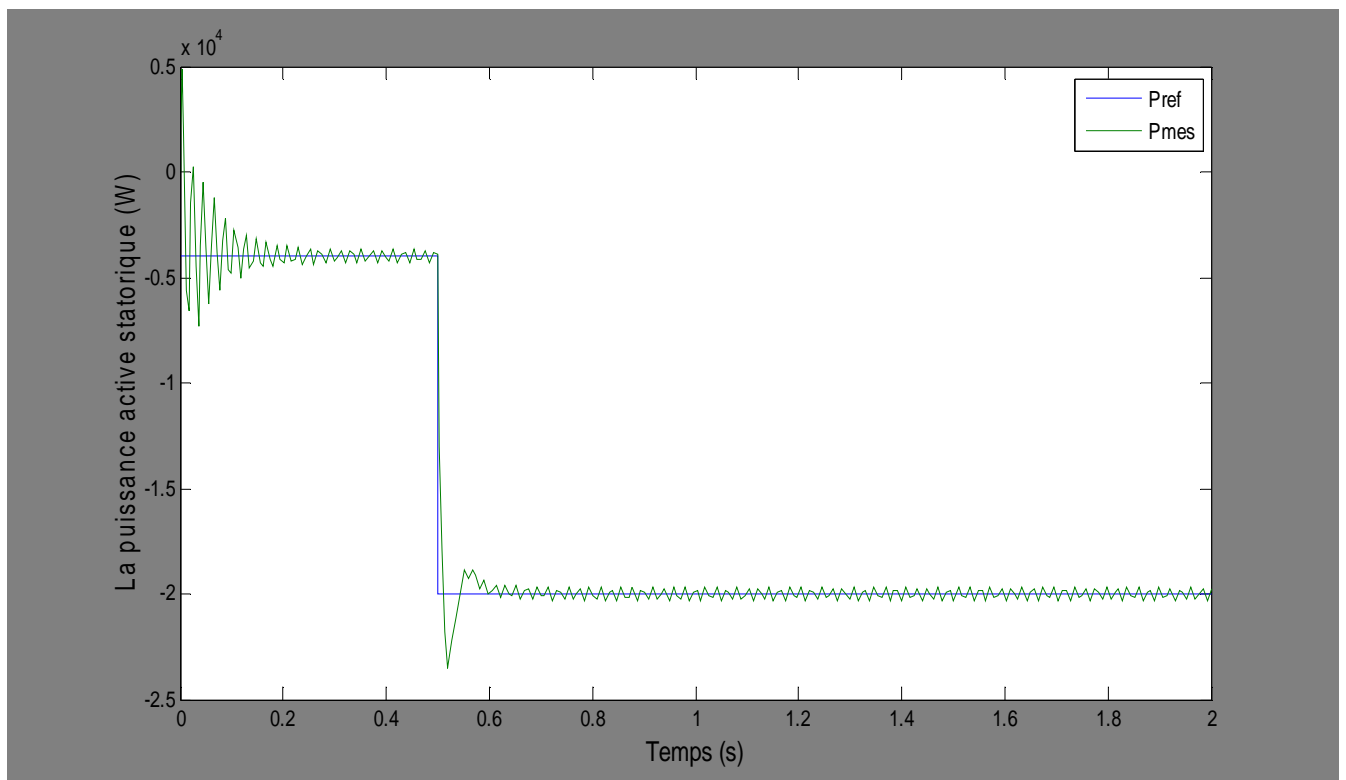


FIGURE (4.7) : variation de la puissance active mesurée P_{mes} et la puissance de référence P_{ref}

V-1 : Introduction :

La simulation est un moyen efficace et économique, utilisé pour faire des études préliminaires et comparatives ; tant au stade du développement (conception), qu’au cours du fonctionnement normal des systèmes. Plusieurs outils (spécialisés ou non) de simulation sont utilisés dans le domaine de l’électronique de puissance ou de l’électrotechnique dont Matlab-Simulink. La difficulté de simulation de la génératrice asynchrone provient de sa structure fortement non linéaire. Le modèle contient plusieurs blocs non linéaires.

MATLAB/SIMULINK est un logiciel de modélisation et de simulation, qu’on utilise pour la représentation des schémas blocs du système étudié à savoir la turbine et la MADA.

V-2 : Schéma blocs de la turbine :

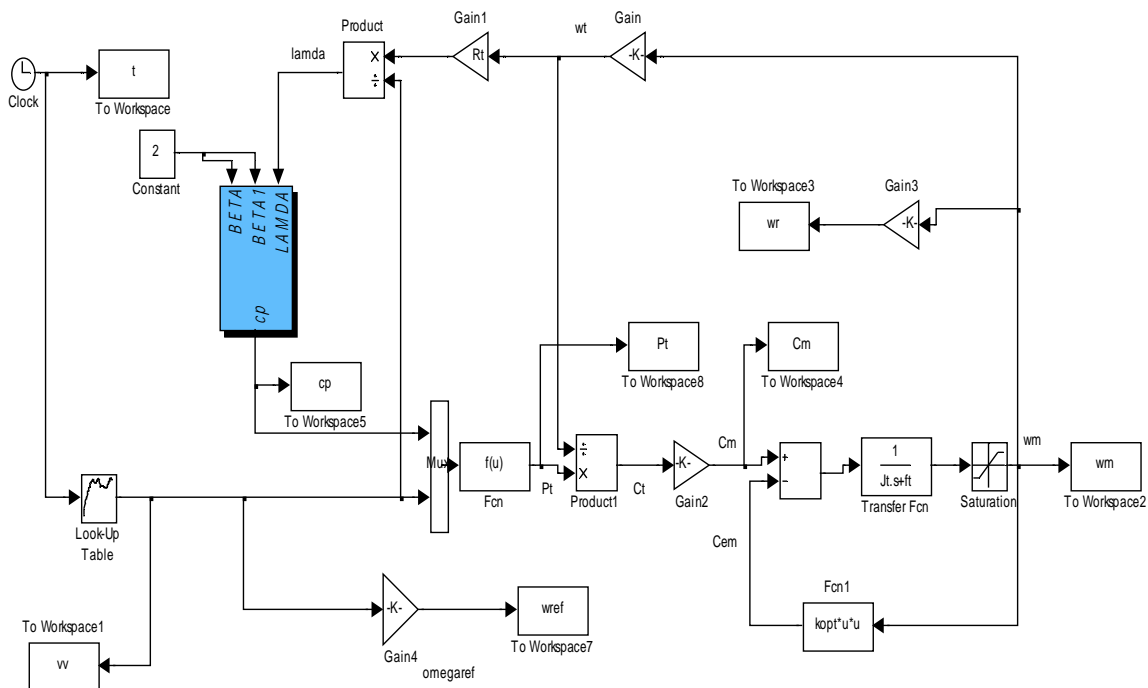


Figure (5.1) : schéma de simulation de la turbine

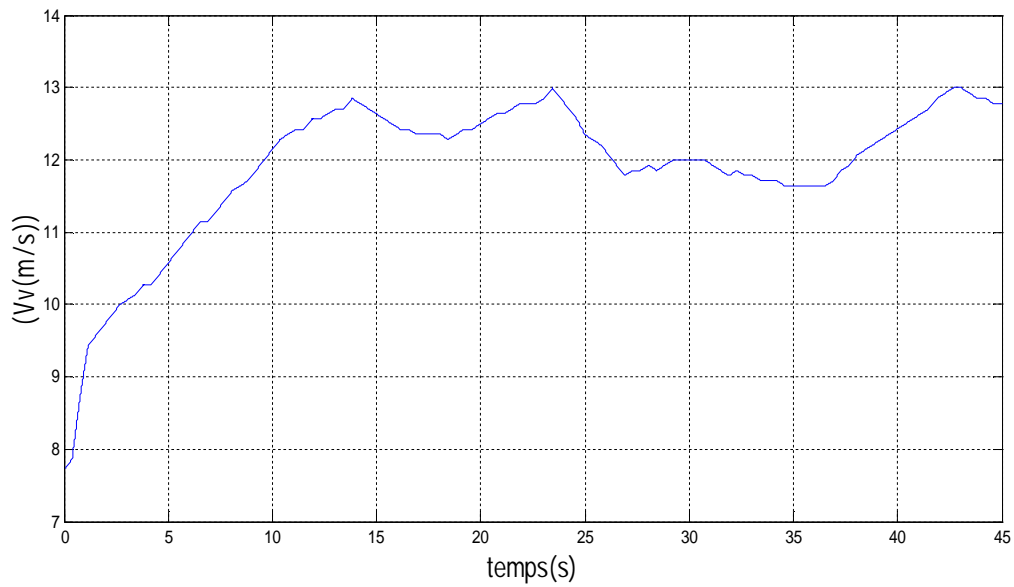
V-2-1 : Interprétation des résultats (turbine) :

Figure (5.1) : la variation de la vitesse du vent en fonction du temps.

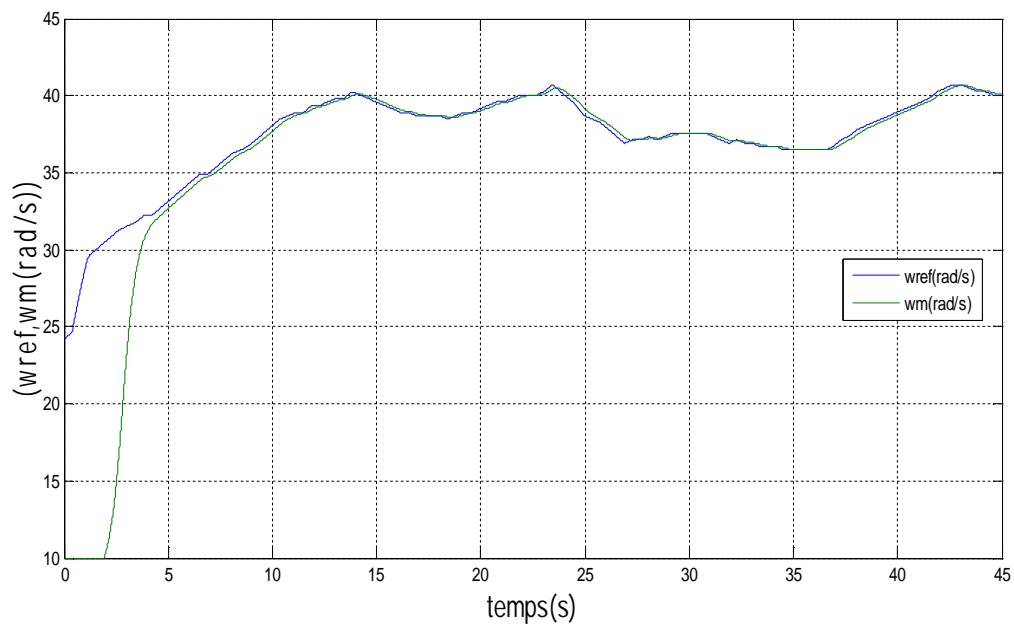


Figure (5.2) : vitesse de rotation de référence ω_{ref} et la vitesse de rotation de la MADA ω_m

Sur la figure (5.2) on constate que la vitesse mécanique de MADA suit parfaitement celle de la vitesse avec un temps de réponse de 4 secondes d'où la nécessité de la régulation.

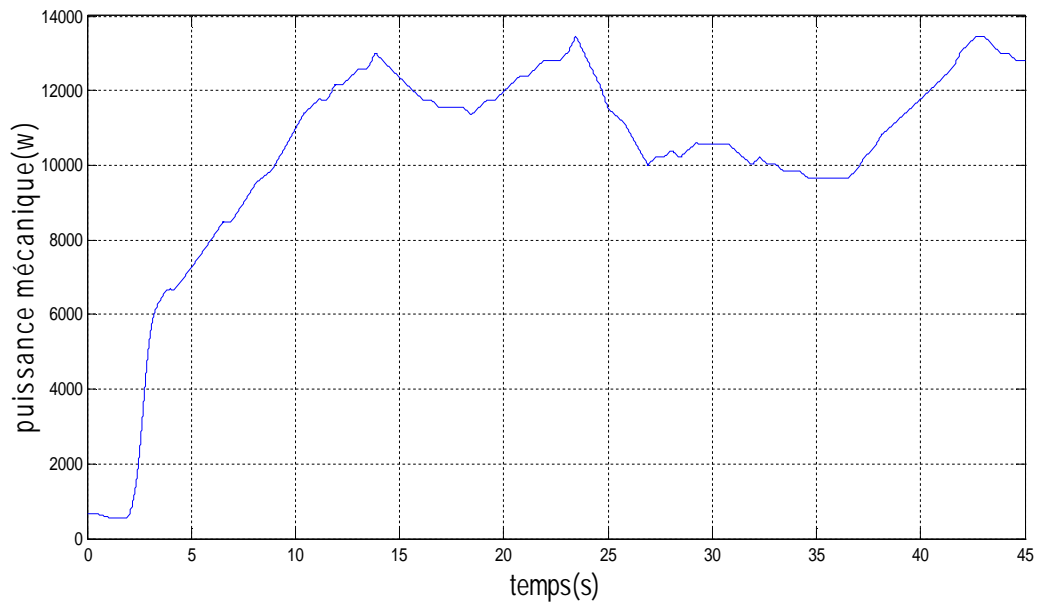


Figure (5.3) : la variation la puissance mécanique en fonction du temps.

La puissance mécanique disponible sur l'arbre de la MADA augmente si la vitesse du vent augmente et il diminue si la vitesse du vent diminue comme c'est illustre sur la figure (5.3).

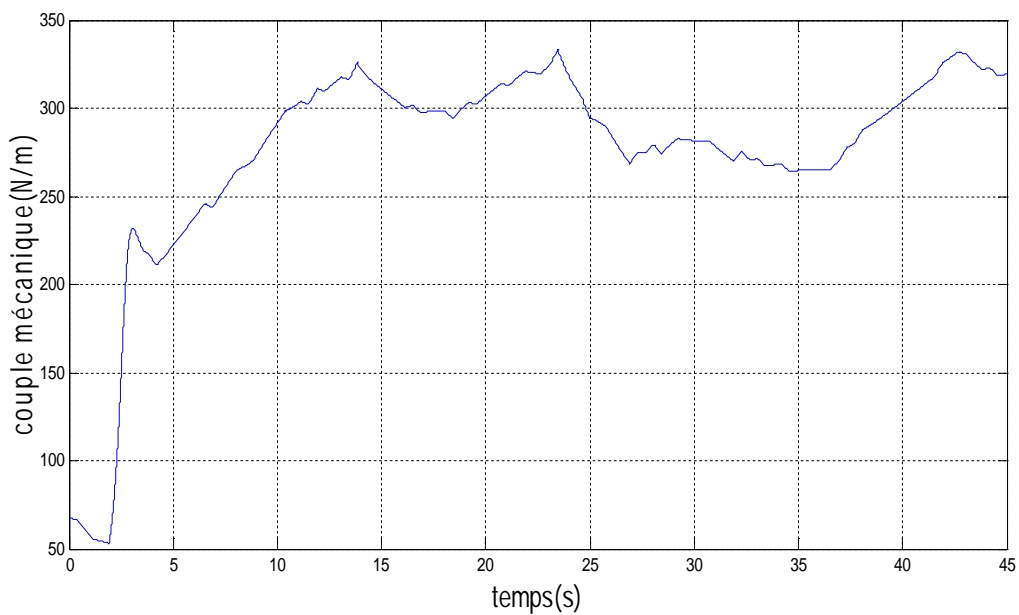


Figure (5.4) : la variation du couple mécanique en fonction du temps.

La figure (5.4) illustre la variation du couple mécanique disponible sur l'arbre de transmission selon la variation de la vitesse du vent, même allure que la vitesse du vent.

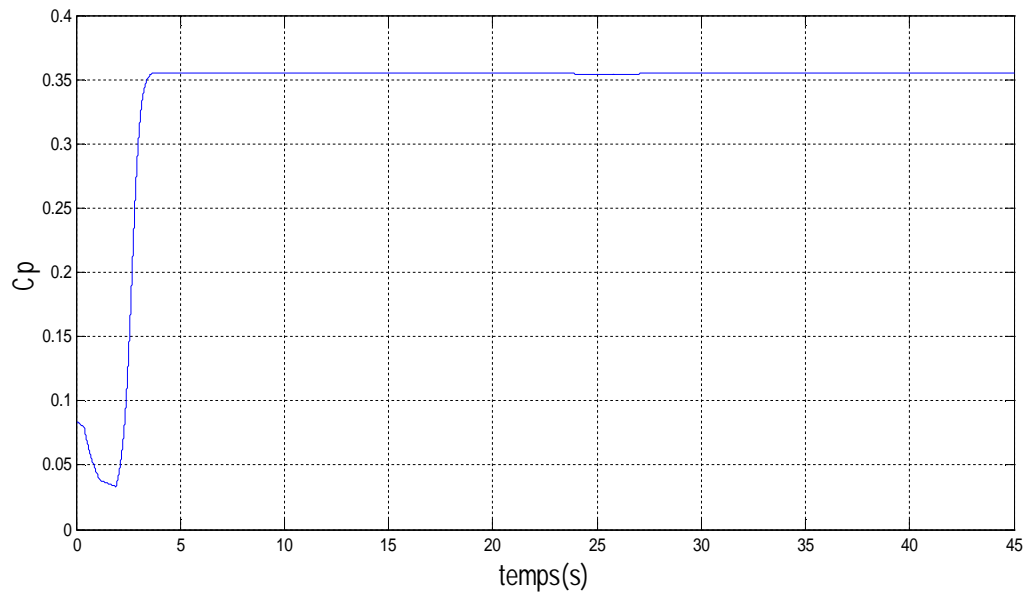


Figure (5.5) : *coefficient de puissance.*

La valeur maximum du coefficient de puissance atteint 0,35, il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

V-3 : Schéma bloc de la MADA :

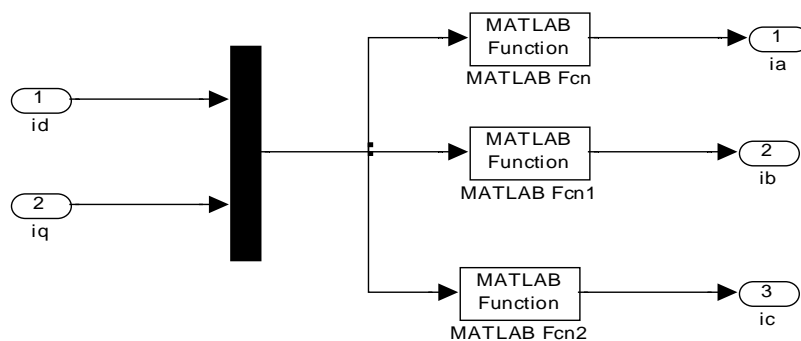


Figure (5.6) : *Transformée inverse de Park*

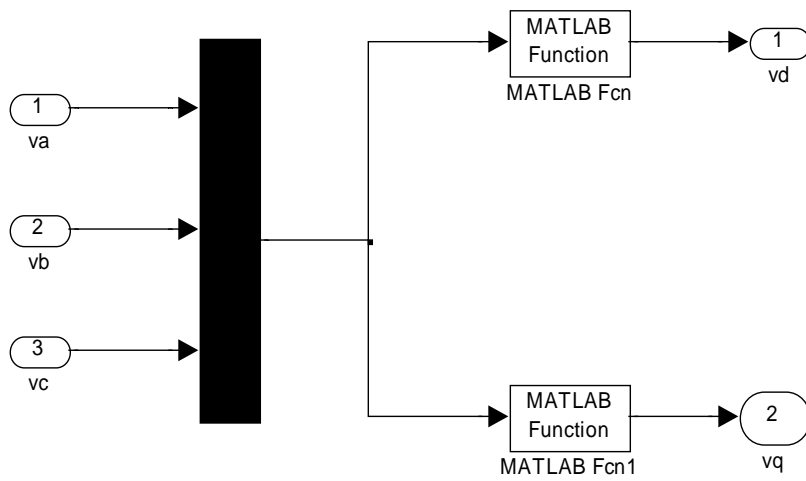


Figure (5.7) : Transformée de Park

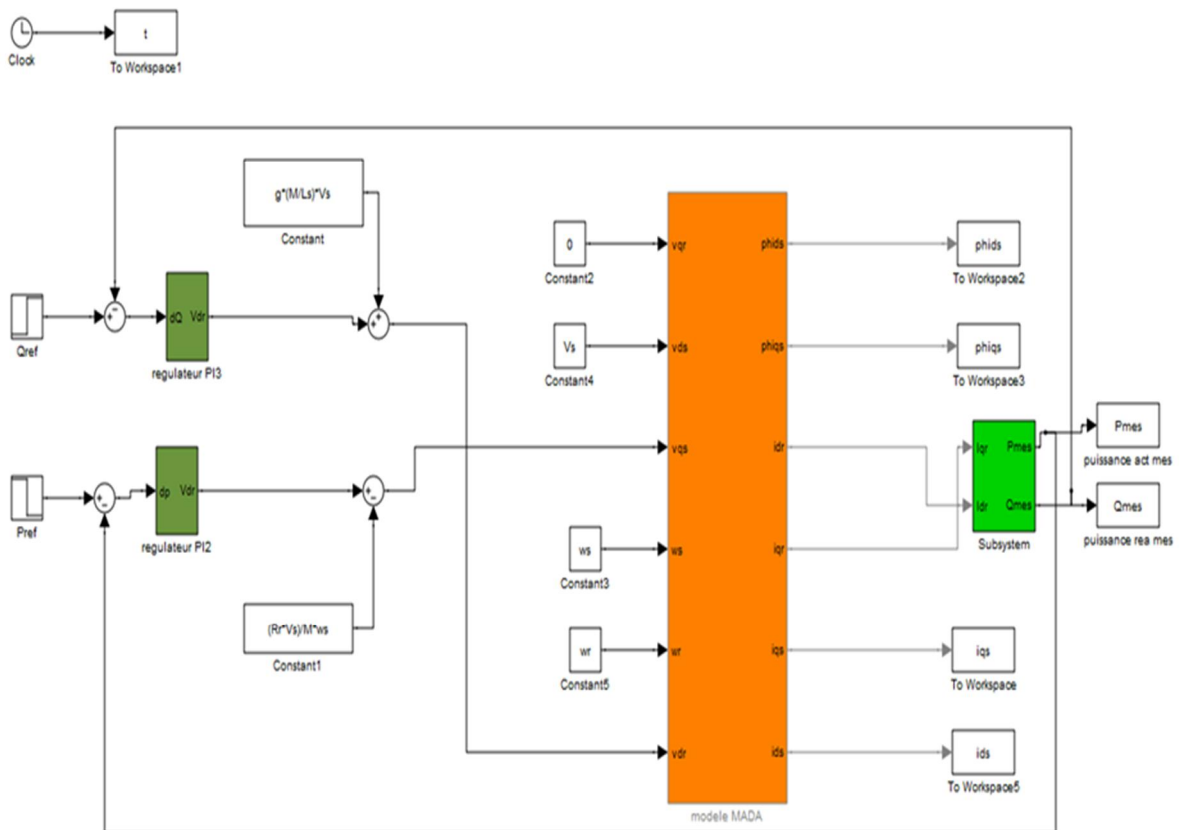
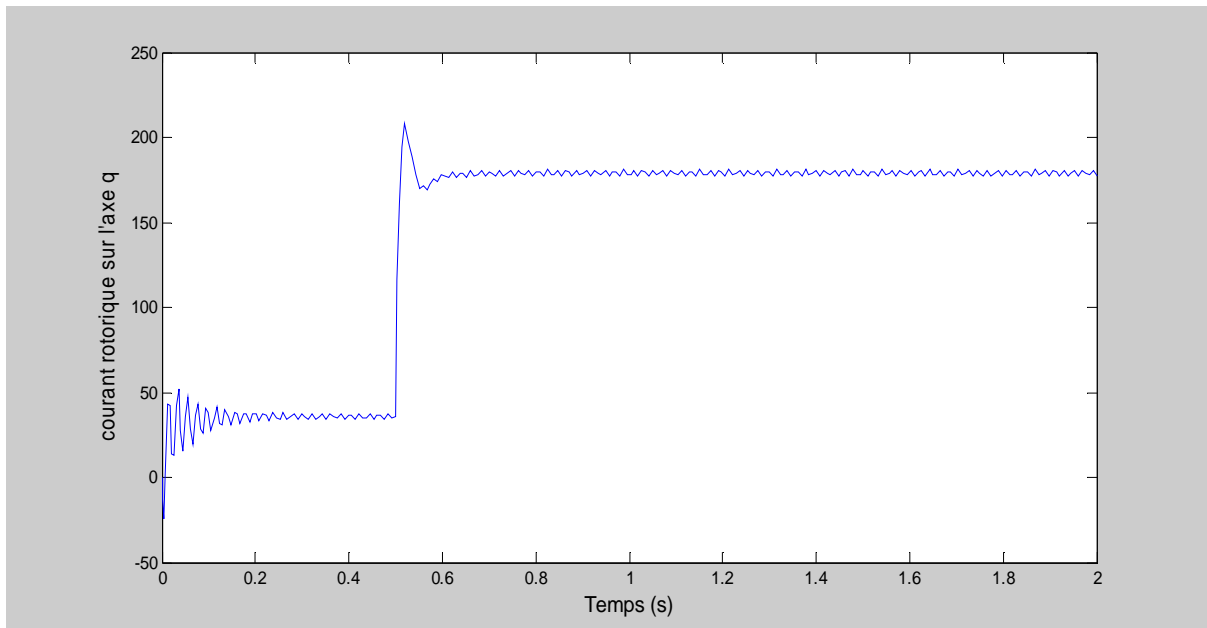
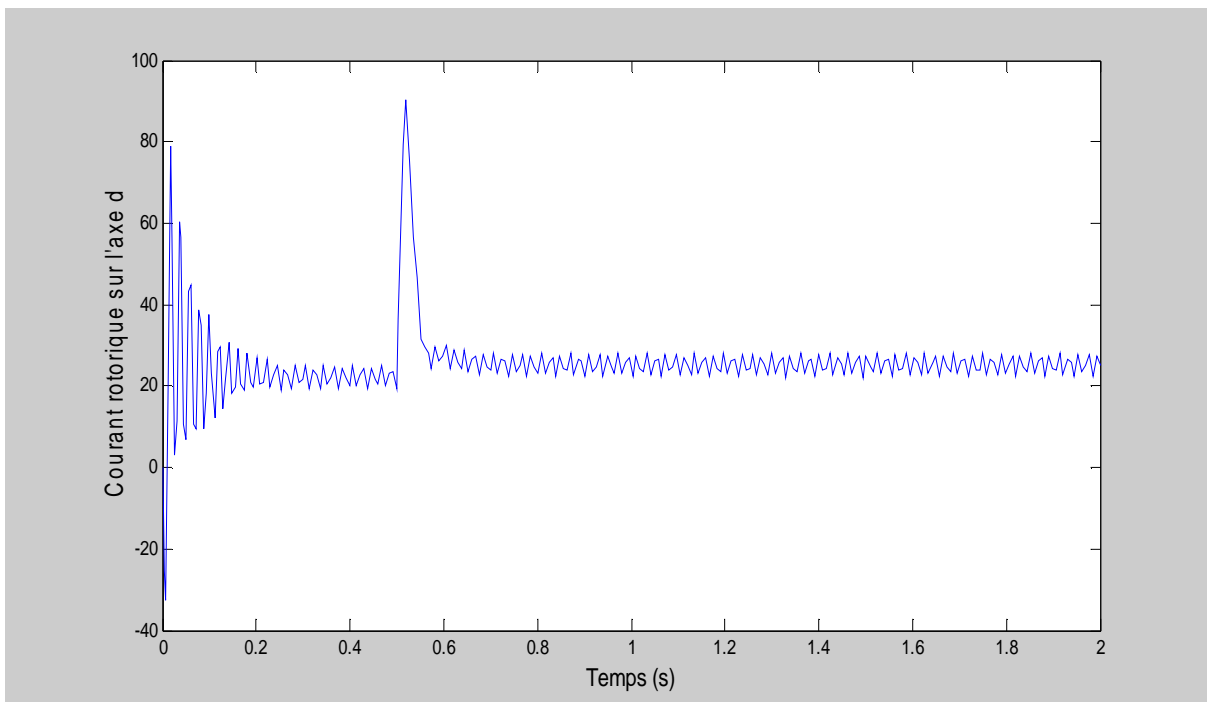


Figure (5.8) : Le modèle de la MADA

V-4 : Interprétation des résultats de la simulation (MADA):**Figure 1 :** *courant rotorique sur l'axe q***Figure 2 :** *courant rotorique sur l'axe d*

La figure 1 et 2 montre les courants rotoriques I_{qr} et I_{dr} de la MADA en fonctionnement génératrice.

Nous vous appliqué des échelons des puissances active et réactive ($P_{ref} = -20000W, Q_{ref} = 0 KVA$), à l'instant $t=5ms$, nous remarquons une variation important de I_{qr} , et

une légère variation de I_{dr} , cela indique que P_{mes} est directement proportionnelle à I_{qr} et une légère variation de I_{dr} .

Cela indique que P_{mes} est directement proportionnelle à I_{qr} et Q_{mes} est proportionnelle à I_{dr} .

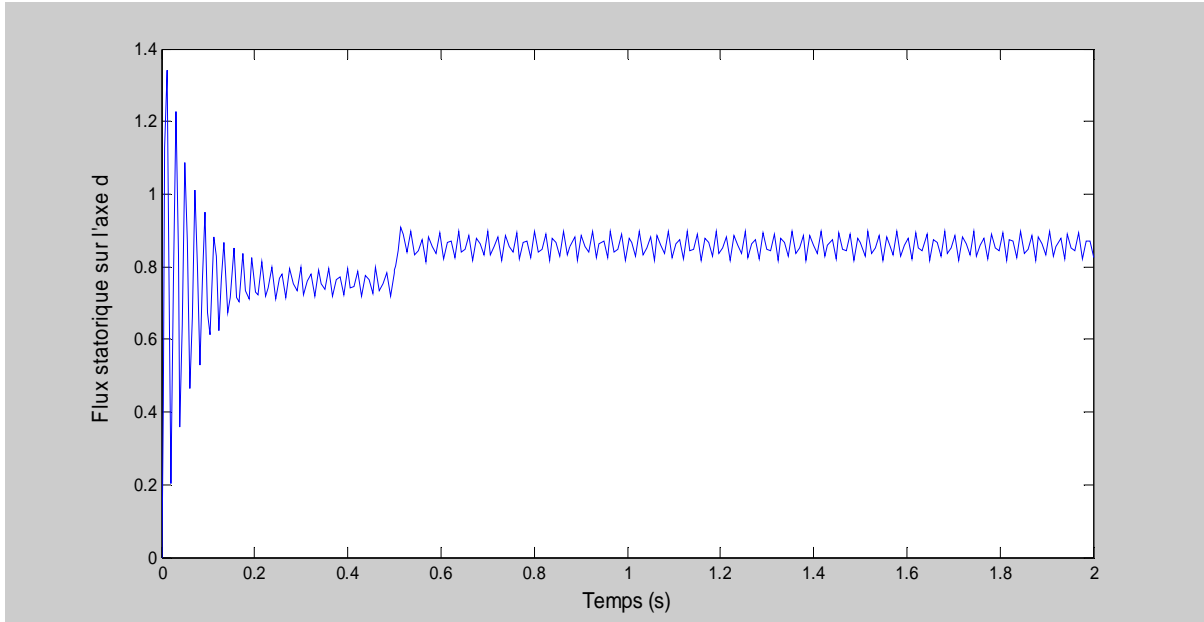


Figure 3 : *flux statorique sur l'axe d*

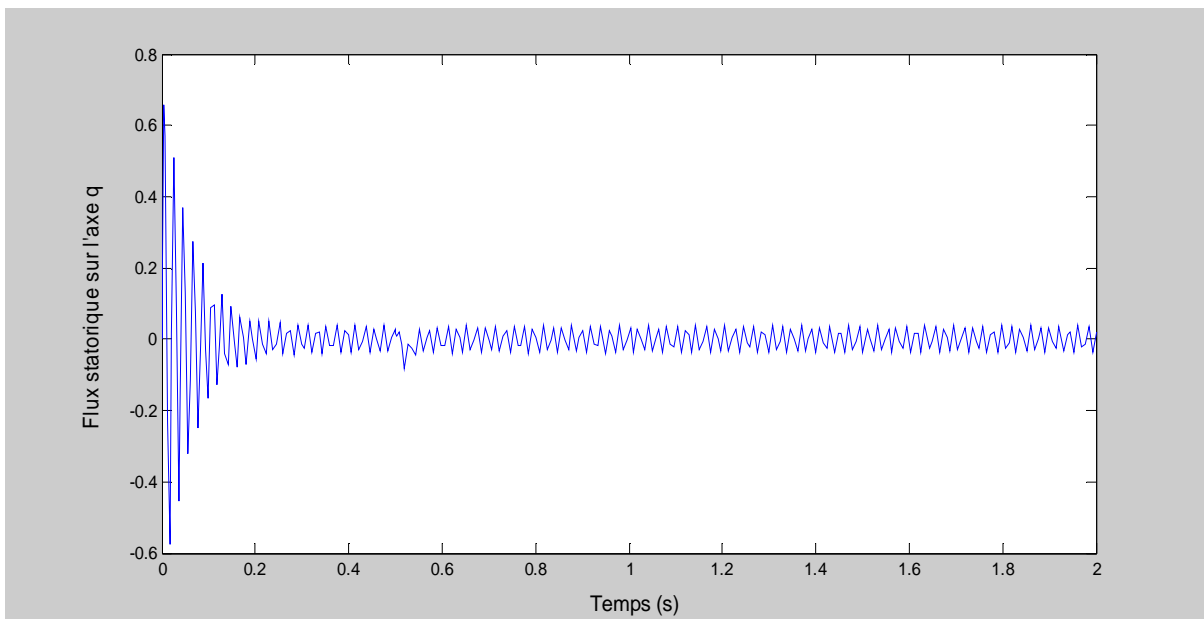


Figure 4 : *flux statorique sur l'axe q*

Les figures 3 et 4 montrent bien que pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous nous utilisons la modélisation diphasée de la machine nous orientons le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique φ_s .

($\varphi_{ds} = \varphi_s$; $\varphi_{qs} = 0$).

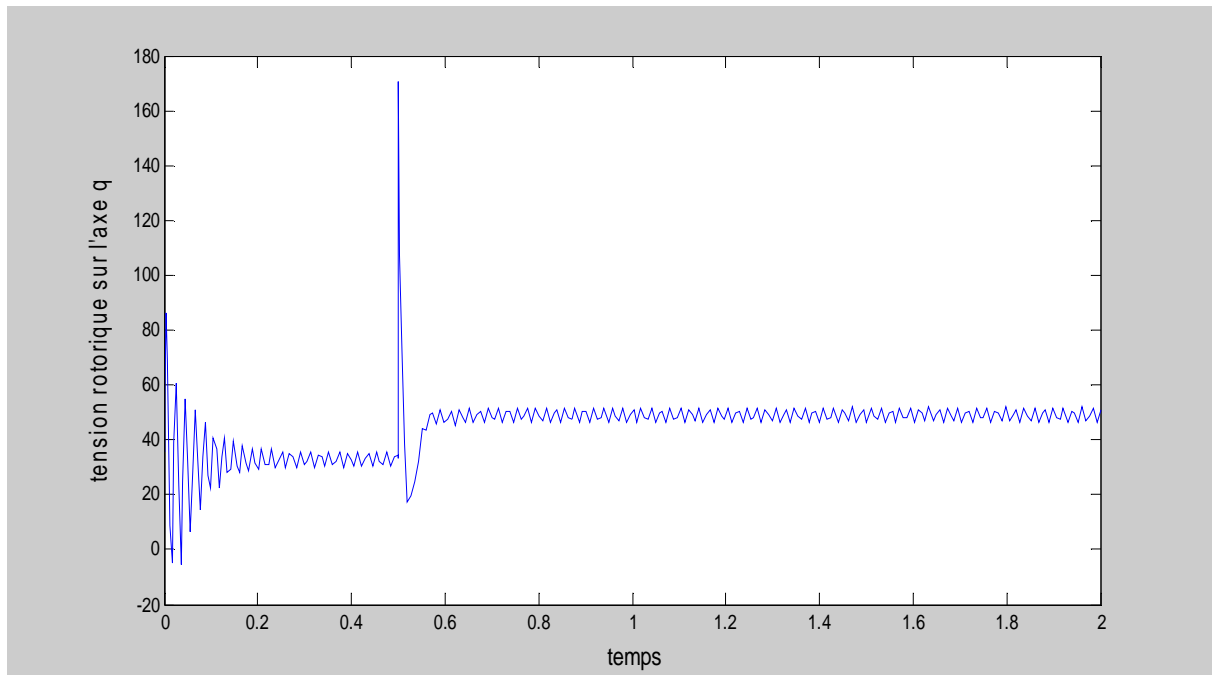


Figure 5 : *tension rotorique sur l'axe q*

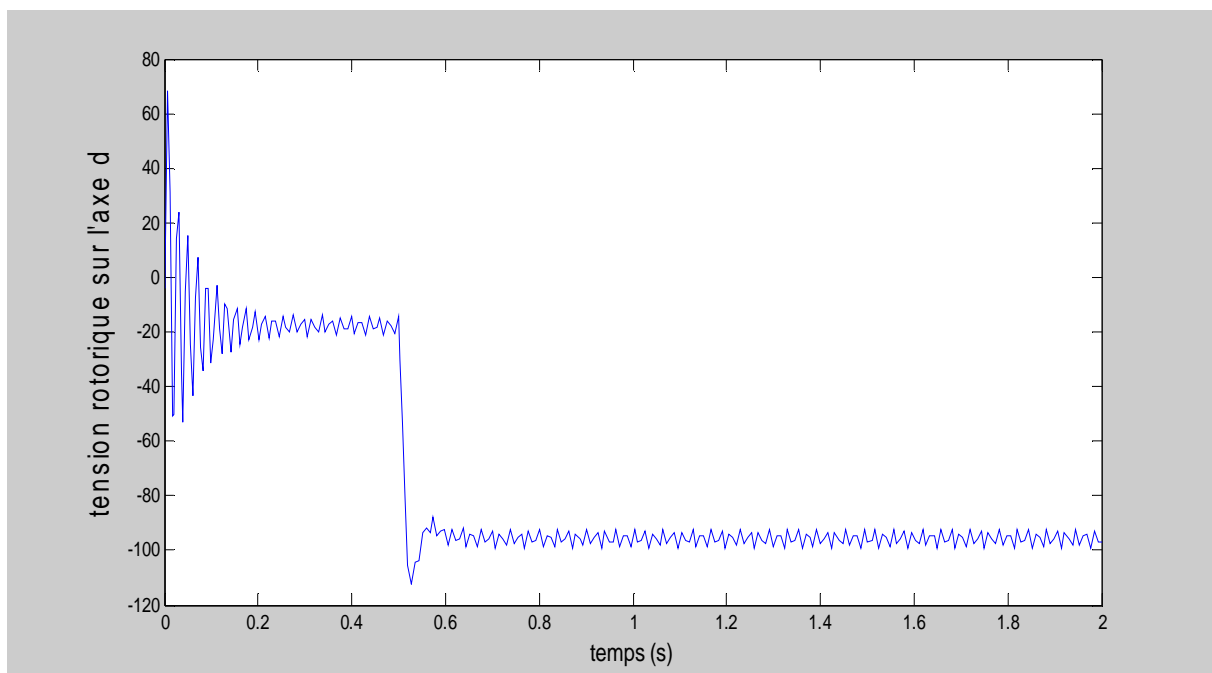


Figure 6 : *tension rotorique sur l'axe d*

Les figures 5 et 6 montrent bien que les tensions rotoriques V_{dr} et V_{qr} suivent parfaitement l'évolution des courants I_{dr} et I_{qr} .

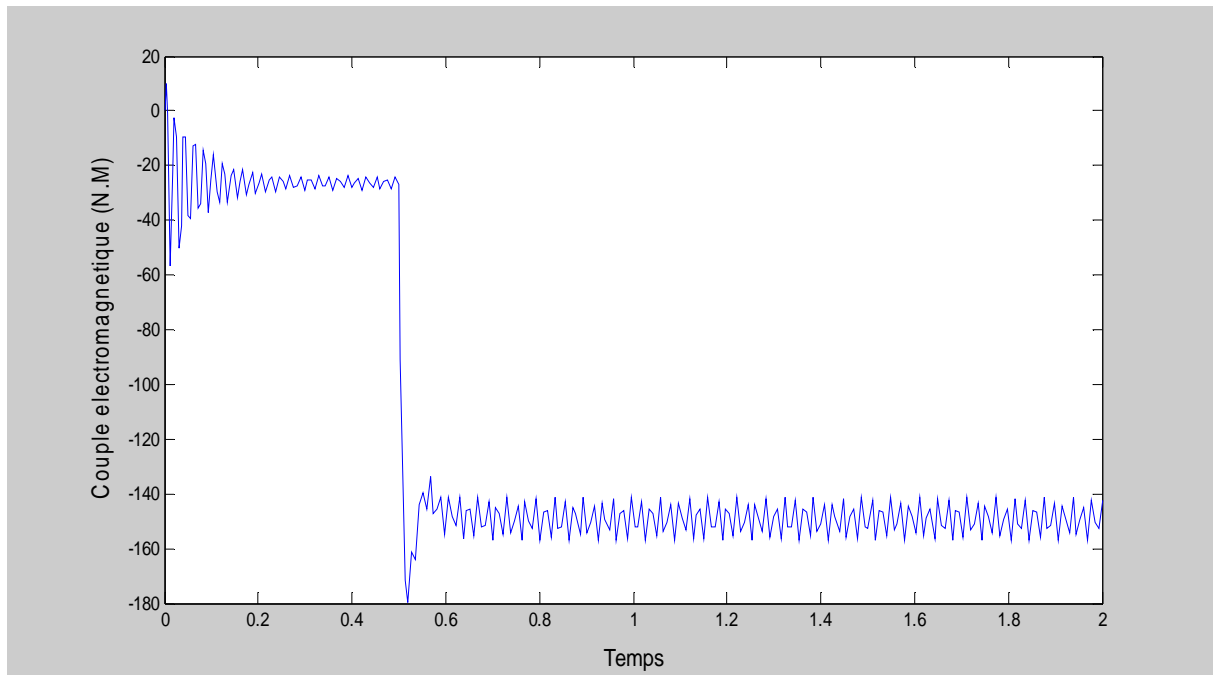


Figure 7 : *Le couple électromagnétique*

La figure 7 montre bien que l'équation (4.6) qu'on a utilisée dans le chapitre précédant est vérifiée.

La courbe représente les variations du couple électromagnétique montre pendant la phase de démarrage le couple est fortement oscillatoire a $t=0.5$ s le couple devient constant de l'ordre de (-150 N.m).

Conclusion générale

L'objectif principale de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation appelée MADA, de sa modélisation et commande ainsi l'apport que pourrait apporter son application dans une chaîne éolienne.

La première partie de ce mémoire rappelle les concepts fondamentaux et généralités sur les systèmes éoliens et différents types de ces dernières. ainsi le principe et le processus de fonctionnement de la partie mécanique.

Le deuxième chapitre nous avons observé le comportement du système de la MADA avec ses différents type de fonctionnement (moteur / générateur) ;(hyper / hypo) synchrone sur les quatre quadrants ainsi la comparaison avec la machine asynchrone classique.

Le troisième chapitre de ce travail ; nous avons modélisé et simulé la turbine et la machine asynchrone à double alimentation, car elle constitue un élément fondamentale dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, avec la mise en équation des différents grandeurs qui caractérise la machine étudiée, ces derniers nous a permis d'établir le modèle mathématique et schéma de la MADA en représentation d'état.

La génératrice asynchrone est destinée à la production d'énergie éolien, la notion de puissance sous tous ses formes est primordiale, pour cela la commande vectorielle élaborée dans le quatrième chapitre est en puissance active et réactive au niveau du stator. On a exprimé les grandeurs statorique de la MADA en fonction des grandeurs rotorique dans le but de pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances (active, réactive) statorique par les puissances réelles débitées par le stator a montré l'efficacité de la commande appliquée, ainsi les résultats de la simulation obtenus avec ses interprétations.

Nomenclature

Nomenclature

E_c : énergie cinétique du vent

m : masse d'air traversant l'hélice de l'éolienne instantanément

v : vitesse du vent

v_0 : vitesse de l'air devant l'hélice

v_1 : vitesse de l'air derrière l'hélice

P_d : puissance de la masse d'air devant l'hélice

ρ : densité de l'air

C_p : coefficient de puissance de l'hélice

S : surface balayé par l'hélice

P_r : puissance récupéré du vent par l'éolienne

M : quantité de moment transmis par la masse d'air à l'éolienne

F : force exercé sur l'hélice

ΔM : la variation de la quantité du moment instantané

Δt : variation du temps

P_1 : pression devant l'hélice

P_2 : pression derrière l'hélice

P_{max} : puissance maximal extraite par l'éolienne

λ : Le rapport entre la vitesse du bout de l'hélice et l'axe du rotor

λ_{opt} : vitesse de bout de pale optimale

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine

Ω_m : vitesse de rotation de la génératrice

R : rayon de la turbine

C_t : couple résistant de la turbine

C_m : couple résistant de la génératrice

G : le gain du multiplicateur

J_t : le moment d'inertie de la turbine

Nomenclature

J_m : le moment d'inertie la génératrice

f_v : coefficient de frottement visqueux de la génératrice

P_m : puissance mécanique de la turbine

r : la distance entre une section d'une pale et l'axe du rotor

β : L'angle de calage, entre l'axe de référence et le plan perpendiculaire à l'axe de rotation

β_D : l'angle de démarrage de la turbine

i : angle d'incidence

i_{opt} : l'angle d'incidence optimale qui dépend du profil

AB : axe de référence

W : vent relatif

D : effort de trainé

L : effort de portance

C_x : coefficient de trainé

C_z : coefficient de portance

V_d : vitesse du vent au démarrage

V_n : vitesse du vent nominal

V_M : vitesse du vent maximal

P_n : puissance nominale de la turbine

P_s : Puissance active statorique

Q_s : Puissance réactive rotorique

P_{ref} : Puissance active de référence

Q_{ref} : Puissance réactive de référence

P_{mes} : Puissance active mesuré

Q_{mes} : Puissance réactive mesuré

Nomenclature

P_r : Puissance active rotorique

Q_r : Puissance réactive rotorique

$R_r; R_s$: Les résistances par phase du stator et rotor

$L_r ; L_s$: Les inductances par phase du stator et rotor

L_{sr} : Inductance mutuelle stator-rotor

g : glissement

φ_{ds} : Flux statorique sur l'axe direct

φ_{qs} : Flux statorique sur l'axe en quadrature

φ_{dr} : Flux rotorique sur l'axe direct

φ_{qr} : Flux rotorique sur l'axe en quadrature

V_{ds} : Tension statorique sur l'axe direct

V_{qs} : Tension statorique sur l'axe en quadrature

V_{dr} : Tension rotorique sur l'axe direct

V_{qr} : Tension rotorique sur l'axe en quadrature

I_{ds} : Courant statorique sur l'axe direct

I_{qs} : Courant statorique sur l'axe en quadrature

I_{dr} : Courant rotorique sur l'axe direct

I_{qr} : Courant rotorique sur l'axe en quadrature

ω_s : Pulsation statorique

ω_r : vitesse électrique du rotor

P : nombre de paires de pôle

P : operateur de Laplace

m : mutuelle cyclique entre le stator et le rotor

Nomenclature

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre la phase statorique et rotorique

θ : Angle électrique entre la phase statorique et rotorique

θ_s : Angle électrique entre la phase statorique et l'axe d

θ_r : Angle électrique entre la phase rotorique et l'axe d

$[P(\theta)]$: Matrice de Park

t_r : Constante du temps rotorique

t_s : Constante du temps statorique

σ_r : Coefficient de dispersion

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

FTBO: Fonction de transfert en boucle ouverte

FTBF: Fonction de transfert en boucle ferme

Bibliographie

[1]**Frédéric Poitiers** : « *étude et commande de génératrices asynchrone pour utilisation de l'énergie éolienne ; machine asynchrone a double alimentation relie au réseau.* »Thèse doctorale, école polytechnique de l'université de Nantes (19 décembre 2003)

[2] **Adam Mircki** : « *étude comparative de chaine de conversion de l'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance* ». Thèse doctorale, école polytechnique de l'université de Toulouse (5 avril 2005)

[3]**Armand Boyette** : « *contrôle –commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* » Thèse doctorale, école polytechnique de l'université Henri Poincaré, Nancy I (11 décembre 2006)

[4]**Rachid Aziazia** : « *étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux* »Thèse magister en génie électrique de l'université de Boumerdés faculté hydrocarbure (2008)

[5]**Georges Sallom** : « *contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* ». Thèse doctorale, école polytechnique de l'université de Toulouse (13 mars 2007)

[6]**Hamzaoui Ihssen** : « *modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* ». Thèse magister en génie électrique de l'école national polytechnique d'Alger (janvier 2008)

[7]**Sejir KHOJET -el- Khil** : « *commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation* ». Thèse doctorale, école polytechnique de l'université de Toulouse (4 décembre 2006)

[8]**S.E.Ben Elghali** : « *modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone double alimentation* ». Thèse doctorale. Université de Brest (17 décembre 2008)

[9]**Aggoun Ghania** : « *étude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne* » Thèse magister en Electrotechnique de l'université de Tizi-Ouzou (14 sept 2011)

Bibliographie

- [10] **Theodore Wildi; Gilbert Sybille:** *Electrotechnique*; 4^{ème} EDITION
- [11] **Khettache Laid :** « *étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée* » Thèse magister en Electrotechnique de l'université de Batna (mars 2007)
- [12] **Francesco Javier POZA LOBO** « *modélisation conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération vitesse variable* » Thèse magister en génie électrique de l'institut de Grenoble (30 octobre 2003)
- [13] **Arnaud Gaillard** « *Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service* » Thèse doctorale en génie électrique université Henri Poincaré, Nancy I (30 avril 2010)
- [14] **Naouel Hamdi** « *modélisation et commande des génératrices éoliennes* » Thèse magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine (24 janvier 2001)
- [15] **Salama El AIMANI,** « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille (6 décembre 2004)