



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A.MIRA de Bejaïa

Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

En Vue de l'Obtention du Diplôme master 2 en
Electrotechnique
Option : Electromécanique

Thème

**Commande D'un Aérogénérateur, basé sur
une Génératrice à double Alimentation**

Présenté par :

M^R: ZADI Sifaqes

Encadré par :

M^R: S.TAMALOUZT

PROMOTION 2011/2012

Remerciements

Remerciements

Avant tout je remercie Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à monsieur S. TAMALOUZI, pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et de me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail. Nous sommes particulièrement sensibles au grand honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant cette tâche.

Je remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicaces

Dédicaces

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

A MES TRÈS CHERS PARENTS QUI M'ONT SOUTENU DURANT
TOUTE LA DURÉE DE MES ÉTUDES QUE DIEU LES PROTÈGES.

A MES TRÈS CHERS FRÈRES :YOUBA ET KOUSSIELLA

A MON COUSIN :AZIZ ET TOUTES SA FAMILLE

A MA GRANDE MÈRE ET GRAND PÈRE

A MON ONCLE BOUBEKEUR, GHILES, WÆEMER
,YOUCEF, ABDELAH ET LEURS FAMILLES.

ET A TOUS MES AMIS HANAFI, MOUSSA, HAMID, FARID,
MADJID, FERHAT, YUGOU, SALIM, BELAL, DAOUD, REDOUANE.

A TOUS CEUX QUI M'AIMENT ET QUE J'AIME.

A VOUS.

SIFAQES

Sommaire

SOMMAIRE

Chapitre I : Généralités sur les aérogénérateurs

I.1 Introduction.....	1
I.2 Quelques notions sur le vent.....	1
I.3 Définition de l'énergie éolienne	1
I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	2
I.5 Développement de l'énergie éolienne.....	2
I.6 Accouplement mécanique.....	3
I.6.1 Eolienne à attaque directe	3
I.6.2 Eolienne à attaque indirecte	4
I.7 Types d'aérogénérateurs	4
I.7.1 Aérogénérateur à axe vertical.....	4
I.7.1.1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus	4
I.7.1.2 Eolienne à axe vertical de type Savonius	5
I.7.2 Aérogénérateur à axe horizontal	6
I.8 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal	7
I.9 Conversion électromécanique.....	8
I.9.1 Systèmes de génération d'électricité	9
I.9.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)	9
I.9.3 Systèmes utilisant la machine synchrone	11
I.9.4 Machine asynchrone à double stator	11
I.9.5 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	12
I.9.6 Machine asynchrone à double alimentation	13
I.10 Fonctionnement et Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	15
I.10.1 Introduction	15
I.10.2 Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation.....	16
I.10.3 Mode de fonctionnement de la MADA.....	17
I.10.3.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.....	17
I.10.3.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.....	17

I.10.3.3	Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	17
I.10.3.4	Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone	17
I.10.3.4	Fonctionnement en mode synchrone	17
I.11	Avantage et inconvénient de la MADA	18
I.11.1	Avantage.....	18
I.11.2	Inconvénients de la MADA.....	19
I.12	Conclusion	19

Chapitre II : Modélisation du système de conversion

II.1	Introduction	20
II.2	Modélisation du système éolien	20
II.3	Modélisation de la turbine	20
II.4	Modèle de la partie mécanique.....	22
II.5	Fonctionnement et modélisation de la MADA.....	24
II.5.1	Hypothèses simplificatrices	25
II.5.2	Equations générales de la MADA.....	26
II.5.3	Transformation de Park.....	27
II.6	Application de la transformation de Park à la MADA	28
II.6.1	Equations des tensions	29
II.6.2	Equations des flux.....	30
II.6.3	Equation du couple électromagnétique.....	31
II.6.4	Equation mécanique.....	31
II.7	Choix du système d'axe de référence	31
II.7.1	Référentiel lié au rotor	31
II.7.2	Référentiel lié au stator	32
II.7.3	Référentiel lié au champ tournant	32
II.8	Modélisation des convertisseurs statiques.....	33
II.8.1	Modèle du convertisseur statique.....	33
II.8.2	Commande MLI des convertisseurs.....	34
II.8.3	Modélisation du bus continu	35
II.8.4	Le Redresseur.....	36
II.9	Conclusion	37

Chapitre III : Commande de la chaîne éolienne

III.1 Introduction	38
III.2 Application de l'orientation de flux	38
III.3 Orientation du flux statorique.....	38
III.3.1 Equations électriques	38
III.3.2 Equations magnétiques	39
III.3.3 Equation mécanique	39
III.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	40
III.5 Relations entre tension rotoriques et courants rotoriques	41
III.6 Commande de bus continue	42
III.7 Modélisation du filtre	44
III.8 Résultats de simulation.....	47
III.8.1 Mode hyposynchrone	47
III.8.2 Mode hypersynchrone	53
III.8.3 Mode synchrone	58
III.9 Conclusion.....	64

Références bibliographiques

Annexes

Introduction Générale

Introduction générale

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée. L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc..... [1].

La conversion d'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée par divers types de machines. A l'origine, c'était la génératrice asynchrone classique, sans convertisseur d'électronique de puissance associé, qui était la plus largement répandue. Cependant, l'évolution technologique des convertisseurs a progressivement permis de se tourner vers des dispositifs plus complexes [2].

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, débitant sur un réseau, ainsi que l'apport que pourrait apporter l'emploi de cette dernière associée à un convertisseur « onduleur MLI – redresseur MLI » et les éventuels désavantages qui pourraient surgir. Ce mémoire est alors divisé en trois grands chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Ce qui nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.

Nous présenterons dans le second chapitre la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne ainsi que ses constituants, de la MADA et celle des convertisseurs associés, notamment, l'ensemble « redresseur MLI – onduleur MLI ».

Au troisième chapitre, nous aborderons la commande de cette chaîne d'une manière à assurer le bon fonctionnement, et nous discuterons les résultats de simulation concernant la dynamique de la réponse et la qualité des signaux électriques.

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes[4].

I.2 Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers, le vent est défini par sa direction et sa vitesse [3].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé « éolienne », est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique, généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. Un schéma synoptique est présenté sur la figure (I.1) [5].

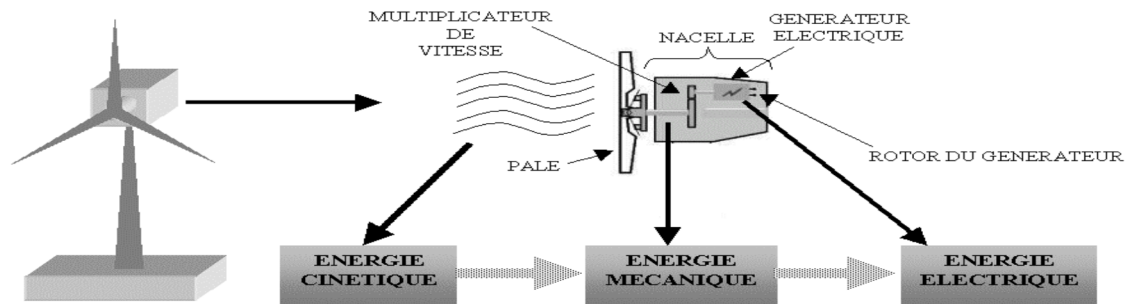


Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, 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 mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [4].

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [7].

I.5 Développement de l'énergie éolienne

Le développement à grande échelle de l'énergie éolienne a tout d'abord commencé en Europe à la fin des années 90. Son expansion se poursuit toujours à l'heure actuelle, à travers le monde, notamment en Amérique du Nord avec les États-Unis et en Asie avec la Chine et l'Inde. La figure(I.2) illustre l'évolution sur les dernières années des puissances totales installées dans le monde.

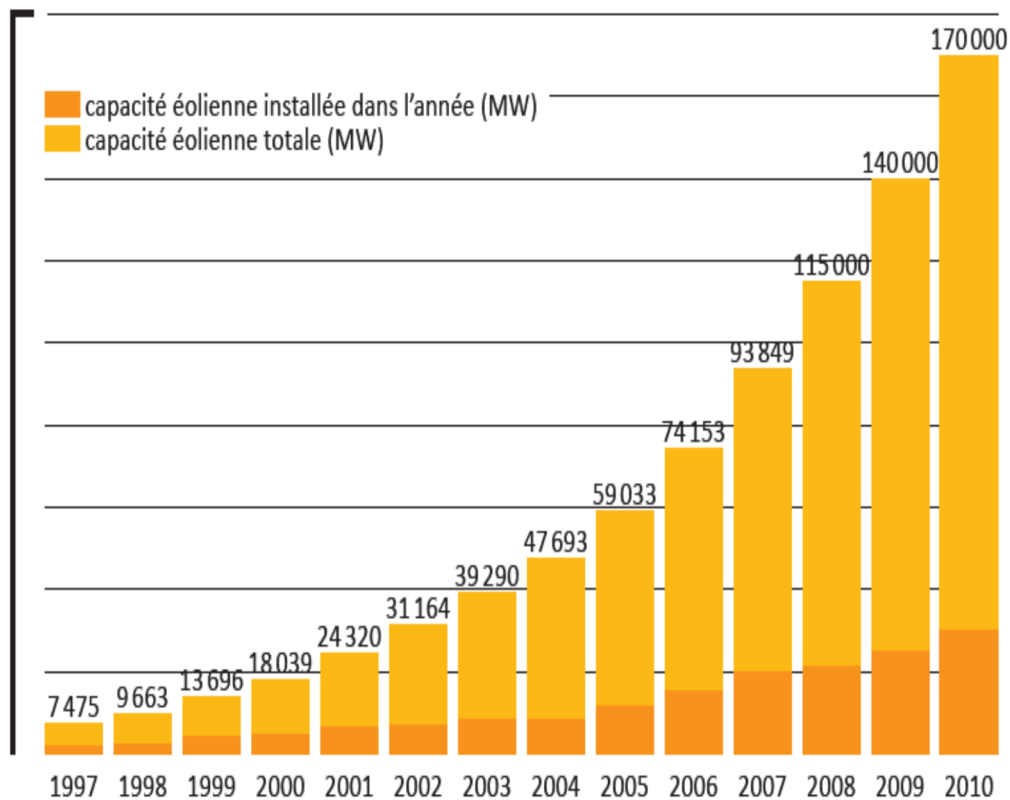


Figure. I.2 Capacité éolienne installée dans le monde entre 1997 et 2010

Environ 200 GW sont actuellement installées dans le monde. Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne prévoient le maintien d'une croissance soutenue, conduisant à une puissance installée dans le monde de l'ordre de 1.000 GW à l'horizon 2020. Plusieurs facteurs d'ordres scientifiques et techniques contribuent à cet essor [8].

I.6 Accouplement mécanique

I.6.1 Eolienne à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de perte de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min ; pour produire de l'électricité avec ce type de machine il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50Hz. Toutes les éoliennes à attaque directe sont équipées de machines synchrones multipolaires à aimants permanents.

I.6.2 Eolienne à attaque indirecte

Dans ce type d'éolienne, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes [9].

I.7 Types d'aérogénérateurs

Un aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, ils se caractérisent par la position de leur axe de rotation et des performances qui leurs sont propres [10].

I.7.1 Aérogénérateur à axe vertical

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible. Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissances, en milieu urbain.

Il existe des turbines Darrieus classiques, à pales droites et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales.

I.7.1.1 Eolienne à axe vertical de type Darrieus

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus sont plus adaptées à des secteurs nécessitant l'intégration aux bâtiments, les zones extrêmes (observatoires ...) ...etc. Ayant souvent un rendement moins important que les éoliennes "classiques".

Ce type d'aérogénérateurs permet en revanche de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation. L'encombrement total est plus faible, et dans la plupart des cas, le générateur est situé à la base de l'éolienne, ce qui est intéressant pour l'installation et la maintenance. Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Cette solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant

le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et ce, quelle que soit leur direction. Le principal défaut de ce type d'éoliennes est leur démarrage difficile dû aux frottements générés par le poids du rotor qui pèse sur son socle [5].

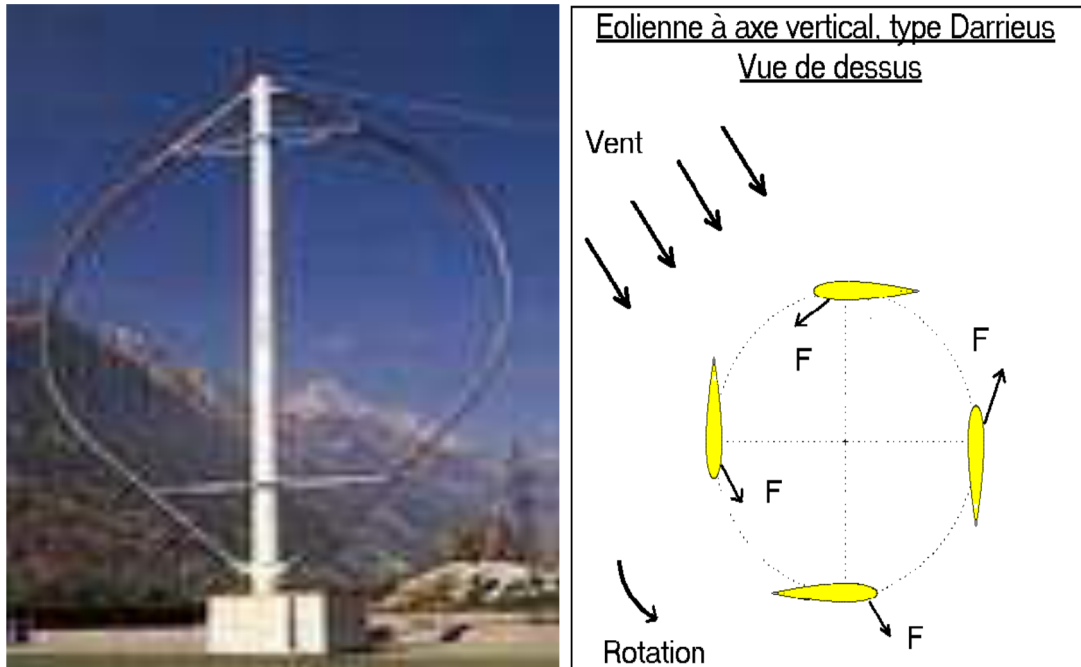


Figure I.3 Rotor de Darrieus

A. Avantages :

- Génératrice pouvant être placée au sol (selon les modèles)
- Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle"
- Intégrable aux bâtiments

B. Inconvénients :

- Démarrage difficile contrairement aux éoliennes de type Savonius
- Faible rendement [5]

I.7.1.2 Eolienne à axe vertical de type Savonius

Les éoliennes "**Savonius**" ne permettent pas de développer de grandes puissances et n'ont qu'un très faible rendement, ne dépassant pas 50% de la limite de Betz. De ce fait, elles ne connaissent pas un grand développement [10].

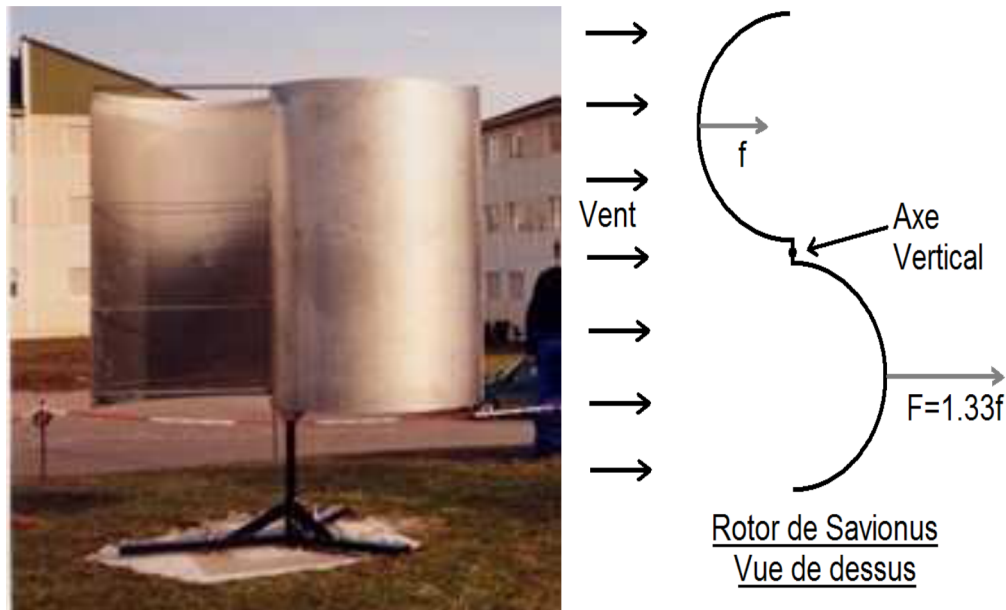


Figure I.4 Rotor de Savonius

A. Avantage

- Faible encombrement,
- Intégrable au bâtiment, esthétique,
- Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus,
- Système peu bruyant,
- Pas de contraintes sur la direction du vent.

B. Inconvénients

- Faible rendement,
- Masse non négligeable [5].

I.7.2 Aérogénérateur à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus utilisé dans le monde. son système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine.

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, ceci pour plusieurs raisons [3].

A. Avantages

- Coût limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité.

B. Inconvénients

- Bruit conséquent,
- Vibrations non négligeables,
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.



Figure I.5 Eolienne à axe horizontal

I.8 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale Figure (I.6), est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- ✓ **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- ✓ **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- ❖ Arbre.
- ❖ Multiplicateur.
- ❖ Roulements.
- ❖ Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- ❖ Le générateur qui est dans le cas de ce travail est une MADA.
- ❖ Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

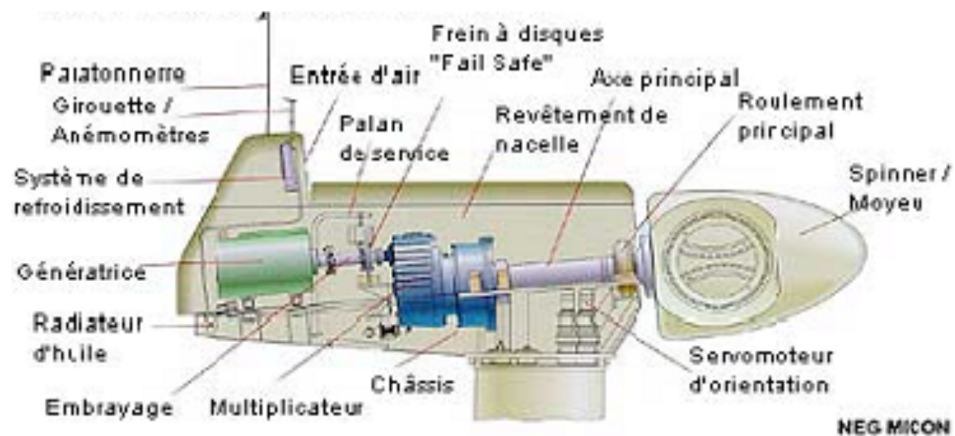


Figure I.6 La nacelle

- ✓ **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- ✓ **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [3].

I.9 Conversion électromécanique

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi de nos jours il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Il y'a quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électrotechnique de puissance et la réduction des prix correspondants qui

ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique, ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La variation de vitesse permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent [10].

I.9.1 Systèmes de génération d'électricité

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**
 - ❖ Système électrique plus simple.
 - ❖ Plus grande fiabilité.
 - ❖ Pas besoin de système électrique de commande.
- **Fonctionnement à vitesse variable :**
 - ❖ Augmentation du rendement énergétique.
 - ❖ Réduction des oscillations du couple dans train de puissance.
 - ❖ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines asynchrones et les machines synchrones sous leurs diverses variantes.

I.9.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée Figure (I.8), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur

toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée Figure (I.10). La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la (Figure I.8). Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients [12].

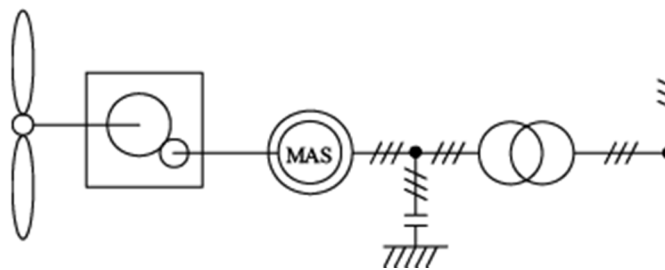


Figure I.7 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

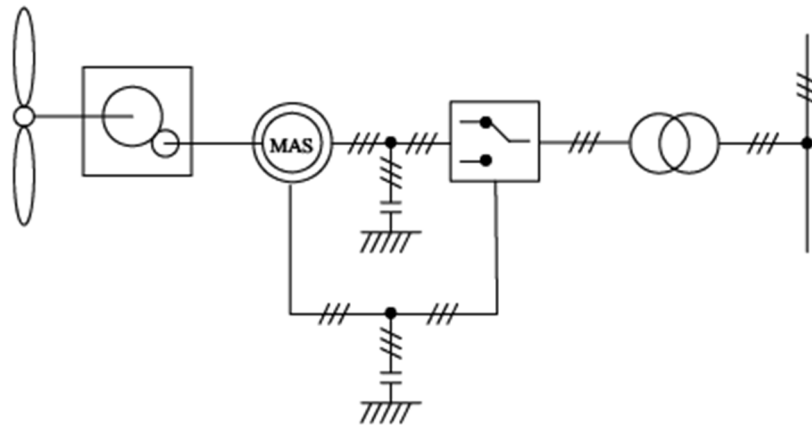


Figure I.8 Système éolien basé sur la machine asynchrone de type Dahlander à deux vitesses de rotation

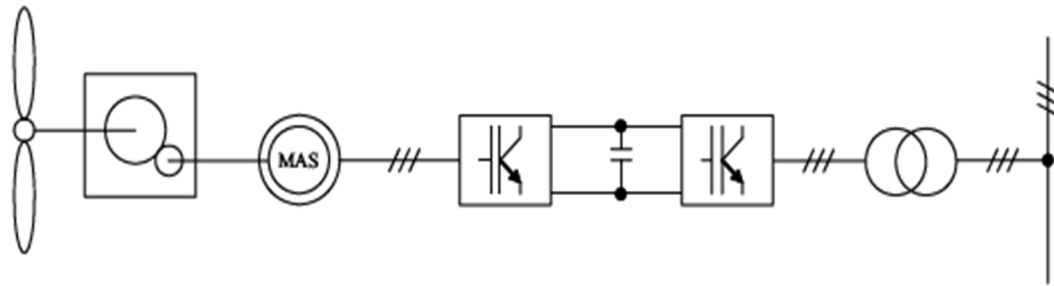


Figure I.9 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.9.3 Systèmes utilisant la machine synchrone

Le stator de cette machine est relié à une interface électronique composée d'un onduleur et d'un redresseur permettant d'assurer la circulation du flux de puissance tout en ayant deux fréquences différentes au stator et au réseau. Dans ce système le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance nominale, impliquant des composants plus puissants et donc plus chers.

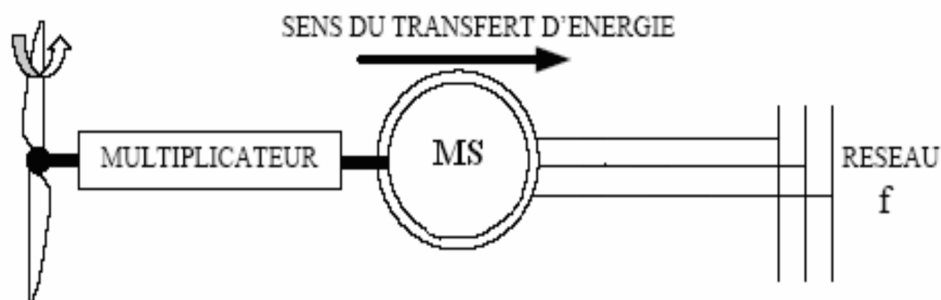


Figure I.10 Machine synchrone connectée directement au réseau

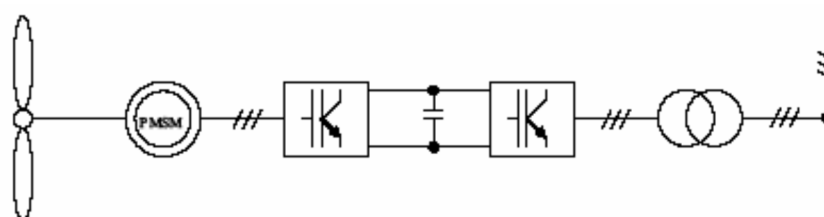


Figure I.11 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

I.9.4 Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.13) :

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

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble [13].

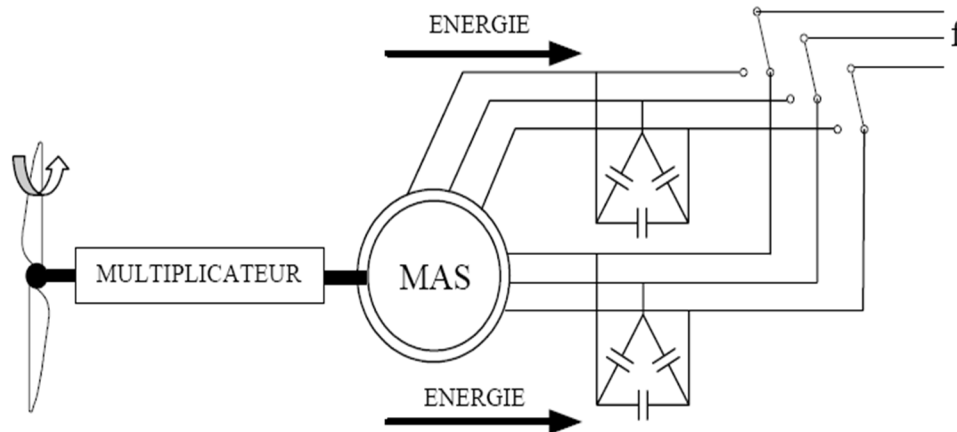


Figure I.12 Machine asynchrone à double stator

I.9.5 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure I.13. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau.

Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de

l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif [11].

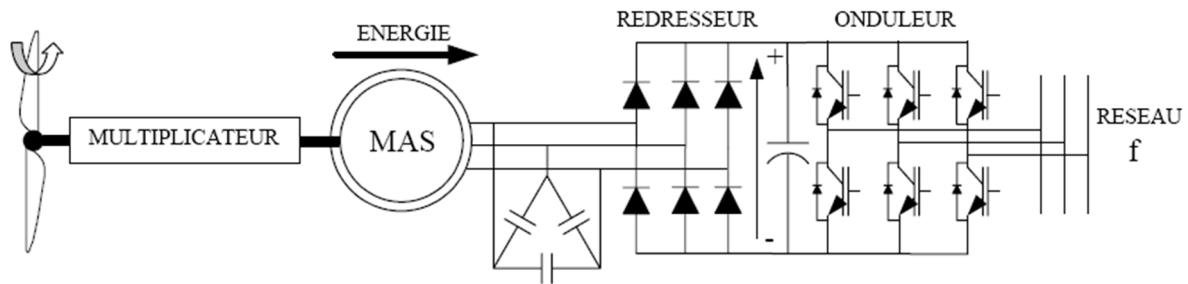


Figure I.13 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur

I.9.6 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.

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 [7].

a. Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure. I.14).

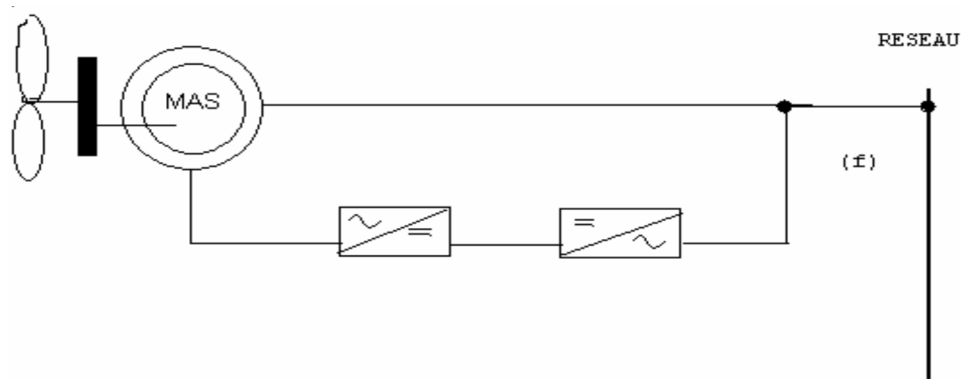


Figure I.14 Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit. Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice.

En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu.

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers [15].

b. Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure I.15). Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse,

la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournit, $(1-g)p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gp sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$.

Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure 1.16). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [7].

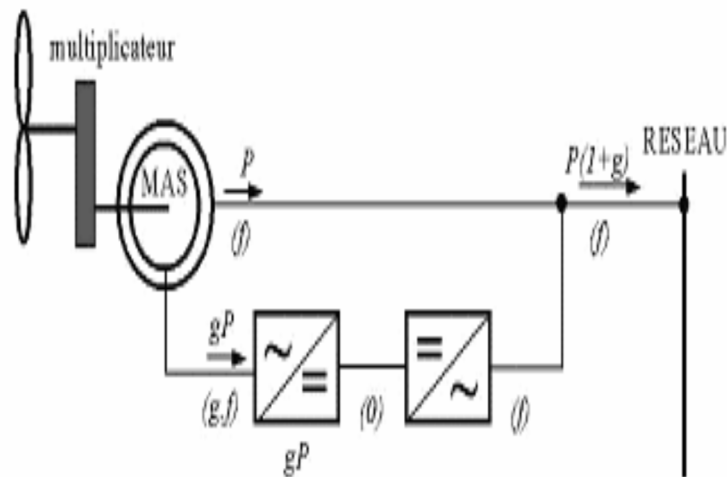


Figure I.15 Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

I.10 Fonctionnement et Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

I.10.1 Introduction

Les machines asynchrones, à la différence des machines synchrones, sont utilisées surtout comme moteur, elles peuvent fonctionner en génératrice quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme.

Le moteur asynchrone est le type le plus répandu des moteurs électriques, sa prépondérance par rapport aux autres moteurs est due aux inconvénients présentés par ses dernières, on peut citer :

- pour le moteur synchrone classique, la nécessité de l'accrochage sur le réseau.
- pour le moteur à collecteurs, le prix et la fragilité relative des collecteurs.

- Le moteur asynchrone dans sa solution à cage est le moins cher et le plus robuste.

La double alimentation (DFAM : *double feed asynchronous motor*) concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotorique biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné, lorsqu'on alimente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément le courant statorique i_s va créer un champ magnétique qui tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$, le signe (+/-) indique le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique, dans ce cas, le moteur à double alimentation tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$; donc la machine peut fonctionner à une vitesse double synchronisme à vide .

En charge le moteur envoie dans le réseau des courants à la fréquence de glissement qui influent sur la qualité d'énergie du réseau.

Une technologie qui permet de faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, ici alimentée au stator par un réseau fixe à 50Hz et au rotor par des sources de tension, consiste à utiliser le système de scherbius dans lequel un convertisseur de fréquence bidirectionnel (AC/AC) commande l'écoulement d'énergie dans le circuit rotorique [14].

I.10.2 Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation

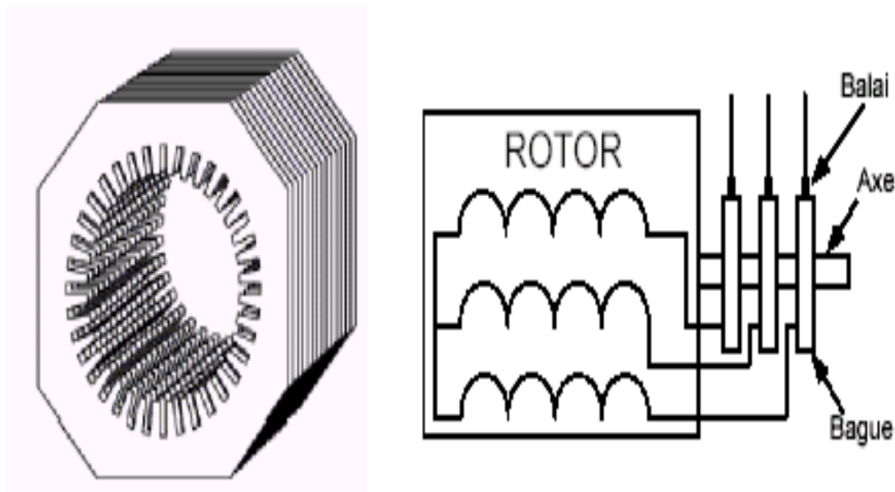


Figure .I.16 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone). L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches

d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure. I.16).

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hyposynchrone (Figure I.15) [4].

I.10.3 Mode de fonctionnement de la MADA

I.10.3.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecté dans le réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique peut fonctionner en ce mode mais la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor.

I.10.3.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

I.10.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

I.10.3.4 Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être injectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique peut

assurer ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor [10].

I.10.3.4 Fonctionnement en mode synchrone

Dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

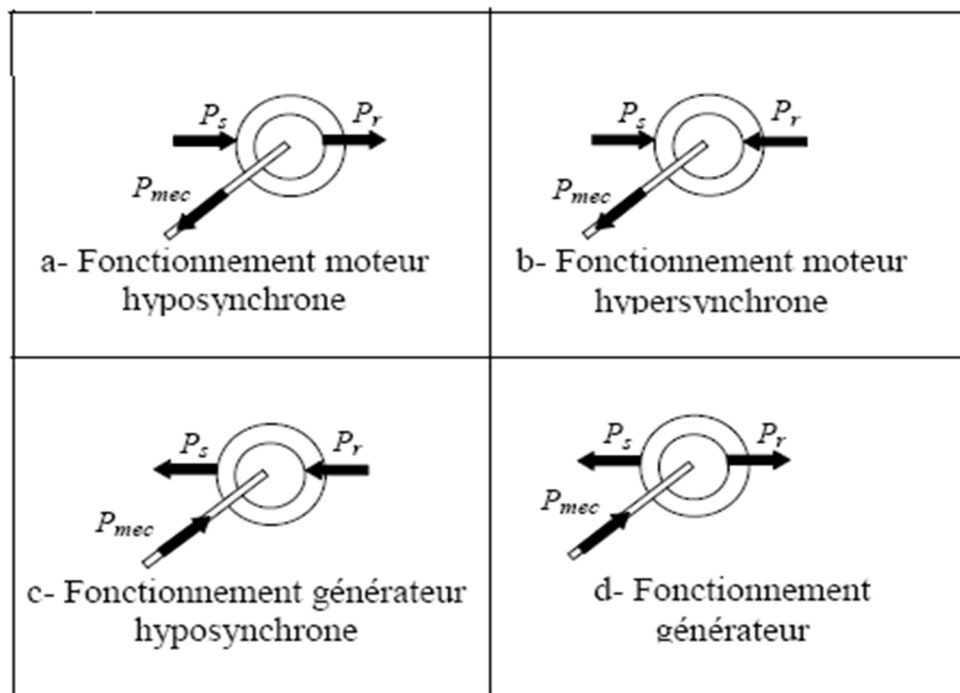


Figure I.17 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

I.11 Avantage et inconvénient de la MADA [10]

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

I.11.1 Avantage

Parmi ces nombreux avantages, nous citons :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la puissance nominale.

I.11.2 Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

I.12 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits. La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

II.1 Introduction

Le modèle mathématique d'une machine électrique est un mode de représentation de la machine réelle permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut en observer expérimentalement et d'autre part prévoir le comportement de la machine placée dans des situations plus variées que celles de l'observation expérimentale.

Dans cette partie nous allons présenter le modèle de la MADA .Elle s'agit d'abord de sa représentation dans le plan d'axes a, b, c et de ses équations électriques et mécaniques. Nous accéderons ensuite à la simplification de ces équations par le moyen de la transformation de PARK, et procédons, enfin, à la représentation du modèle de la machine dans le plans d'axes d, q.

II.2 Modélisation du système éolien

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation, il est donc évident que ce passage est indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants [9].

II.3 Modélisation de la turbine

Un système éolien classique figure(II.1) est constitué d'un aérogénérateur qui transforme de l'énergie de vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain G qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation, et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

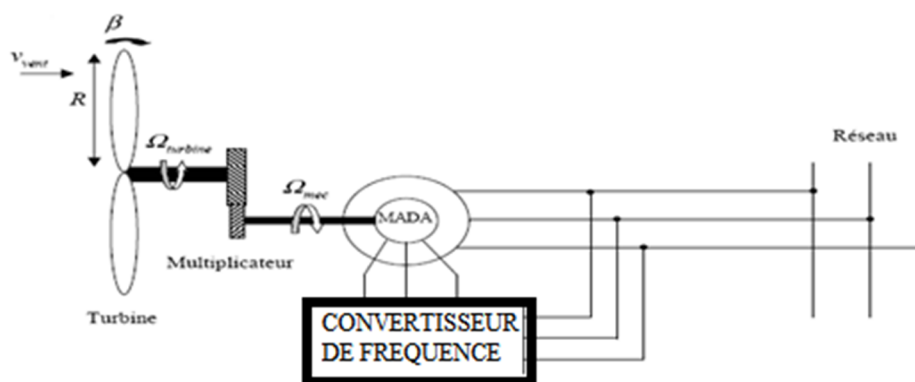


Figure. II.1 Schémas de conversion éolienne basée sur la MADA

On a la puissance de vent captée par les pales :

$$P_{vent} = \frac{\rho}{2} S V_{vent}^3 \quad \text{II.1}$$

Avec :

ρ : La densité volumique de l'air

S : La surface balayée par la turbine

V_{vent} : La vitesse moyenne de vent

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} \quad \text{II.2}$$

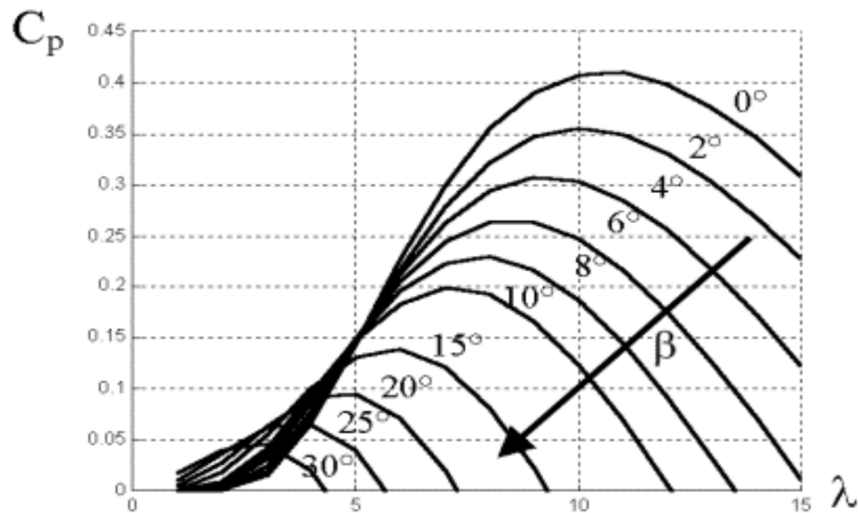
La puissance aérodynamique inférieure à la puissance de vent car le vent n'est pas totalement captée par les pales.

En remplace l'équation (II.1) dans (II.2) on aura :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho}{2} S V_{vent}^3 \quad \text{II.3}$$

C_p : le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0,593). Le C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage β et de leur vitesse de rotation. Pour les éoliennes actuelles, on atteint des valeurs de 0,45 à 0,5. Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [9].

La figure. II.2 donne la variation de coefficient de puissance de l'éolienne (C_p) en fonction de Rapport de vitesse (λ) pour l'angle de calage β .

Figure. II.2 Courbe de C_p en fonction de λ

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_t}{V_{vent}} \quad \text{II.4}$$

β : L'angle de calage

λ : Rapport de vitesse

$R \cdot \omega_t$: La vitesse linéaire des pales

ω_t : La vitesse angulaire de la turbine

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\omega_{tur}} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\omega_t} \quad \text{II.5}$$

II.4 Modèle de la partie mécanique

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 qui entraîne la génératrice électrique. Les trois 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 des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. 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 mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure (II.3) dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée [15].

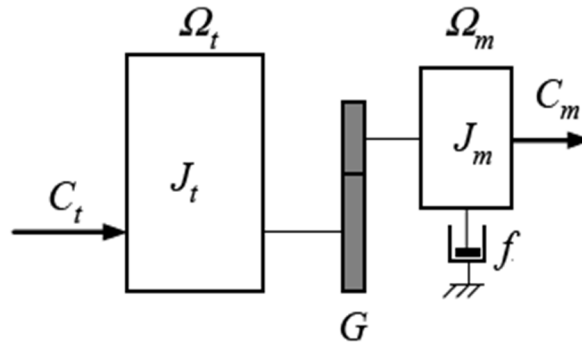


Figure II.3 Modèle mécanique de la turbine éolienne

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie J_t . Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante :

$$J = \frac{J_m}{G^2} + J_t \quad \text{II.6}$$

Avec :

G : gain de la vitesse tel que :

$$G = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\omega_m}{\omega_t} \quad \text{II.7}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_m appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = \sum C = C_m \quad \text{II.8}$$

Le couple mécanique est fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple issu du multiplicateur C_{arbre} .

$$C_m = C_{arbre} - C_{visq} - C_{em} \quad \text{II.9}$$

C_{em} : le couple électromagnétique de la MADA

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{vis} = \bar{q} \cdot f \cdot \omega_m \tag{II.10}$$

Avec :

f : Coefficient de frottement visqueux

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine figure (II.4)

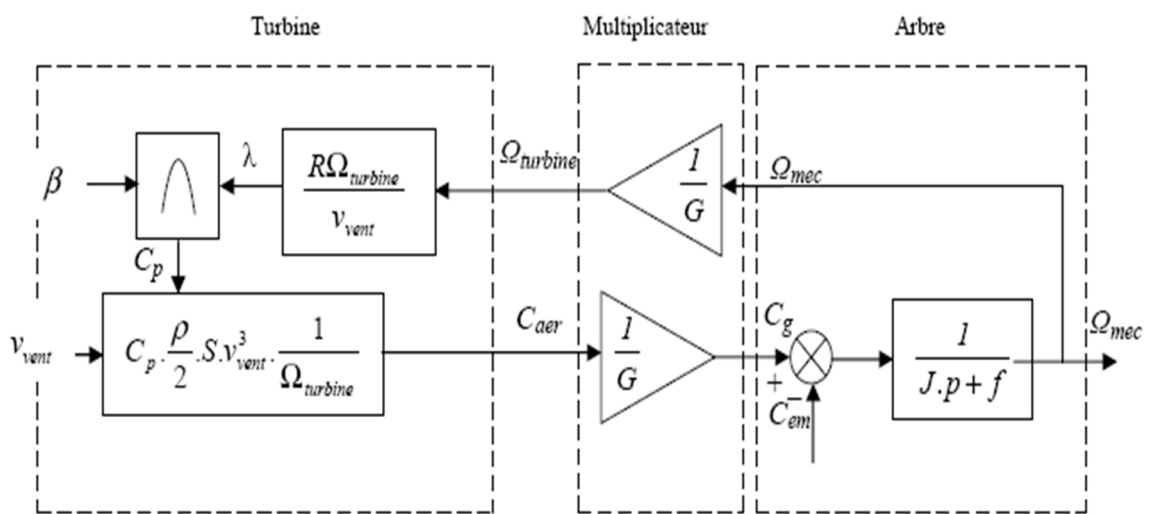


Figure. II.4 Bloc fonctionnel du modèle de l'éolienne

Le schéma bloc du modèle de l'éolienne, nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

I.5 Fonctionnement et modélisation de la MADA

La machine à double alimentation est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile, le stator à 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine. La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$, où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique et p est le nombre de paires de pôles du champ magnétique apparaissant au stator. Le rotor de la machine supporte un

bobinage triphasé avec un même nombre de pôles que celui du stator couplé en étoile. Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ figure (II.5), θ étant l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

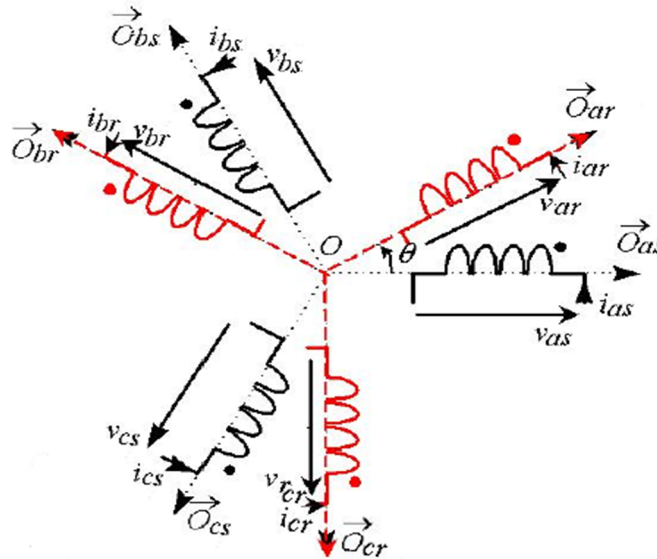


Figure II.5 Représentation schématique de la MADA

II.5.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont :

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques [16].

II.5.2 Equations générales de la MADA

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages.

Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad \text{II.11}$$

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad \text{II.12}$$

Et pour les flux :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad \text{II-13}$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s] \quad \text{II.14}$$

En remplaçant (II-13) dans (II.11) et (II-14) dans (II.12), on obtient le système d'équations électrique de la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine de Laplace.

$$[v_s] = [R_s][i_s] + p([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \quad \text{II-15}$$

$$[v_r] = [R_r][i_r] + p([L_{rr}][i_r] + [M_{sr}][i_s]) \quad \text{II-16}$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_S & M_S & M_S \\ M_S & l_S & M_S \\ M_S & M_S & l_S \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Avec :

l_S : représente l'inductance propre d'une phase statorique.

l_r : représente l'inductance propre d'une phase rotorique.

M_S : représente l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_r : représente l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques

$$[M_{sr}] = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II-17}$$

Où M_{\max} représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque leurs axes magnétiques sont confondus.

II.5.3 Transformation de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[p(\theta)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère biphasé tournant (d, q, o), les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q).

En faisant coïncider les axes directs et quadratures du stator et du rotor, les calculs seront simplifiés.

La matrice de Park est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)][x_{abc}]$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-18}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-19}$$

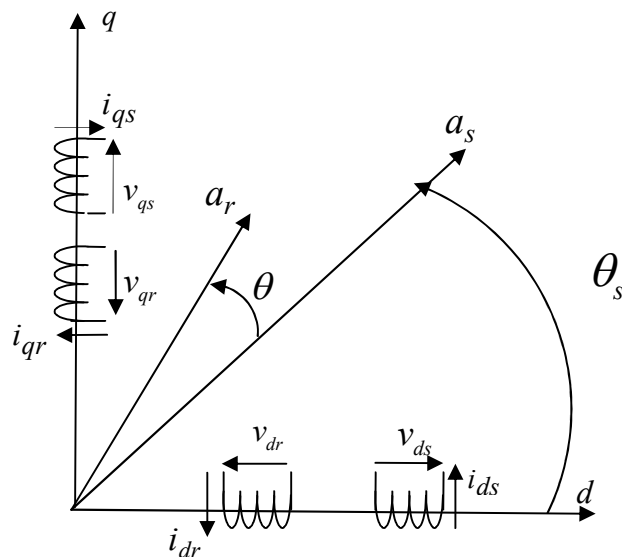


Figure II.6 Représentation de la MADA après la transformation de Park

II.6 Application de la transformation de Park à la MADA

Pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), on va faire un changement de repère de Park aussi bien au stator qu'au rotor, en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celle du rotor, on obtient :

❖ Pour le stator :

$$[i_{dqo}]_S = [P(\theta_S)] \cdot [i_S] \quad ; \quad [i_S] = [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [i_{dqo}]_S \quad \text{II-20}$$

$$[v_{dqo}]_S = [P(\theta_S)] \cdot [v_S] \quad ; \quad [v_S] = [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [v_{dqo}]_S \quad \text{II-21}$$

$$[\Phi_{dqo}]_S = [P(\theta_S)] \cdot [\Phi_S] \quad ; \quad [\Phi_S] = [P(\theta_S)]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}]_S \quad \text{II-22}$$

❖ Pour le rotor

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [i_r] \quad ; \quad [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [i_{dqo}]_r \quad \text{II-23}$$

$$[v_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [v_r] \quad ; \quad [v_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [v_{dqo}]_r \quad \text{II-24}$$

$$[\Phi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [\Phi_r] \quad ; \quad [\Phi_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\Phi_{dqo}]_r \quad \text{II-25}$$

II.6.1 Equations des tensions

$$[v_S] = [R_S][i_S] + \frac{d[\Phi_S]}{dt}$$

En introduisant les équations (II-14), (II-15) et (II-16), après calcul nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad \text{II-26}$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II-27}$$

II.6.2 Equations des flux

Les expressions des flux totalisées sont :

Pour le stator :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad \text{II-28}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad \text{II-29}$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique propre du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique propre du rotor.

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

Le système d'équation des tensions transformées (II-26) et (II-27) s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s \omega_s & pM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s M & pM \\ pM & -\omega_r M & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & pM & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

II.6.3 Equation du couple électromagnétique

Pour le couple électromagnétique, son expression générale est donnée par :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_q \int d r - \varphi_d \int d v) \quad \text{II-30}$$

Avec :

$[i]$: Matrice du courant total

$[L]$: Matrice inductance totale

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} ; \quad [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$C_e = p_1 [i_s]^T (d/d\theta [M_{sr}]) [i_r]$$

En effectuant les changements de variables, l'expression du couple devient :

$$C_e = p_1 M (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr})$$

II.6.4 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine s'écrit d'une manière générale comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad \text{II-31}$$

II.7 Choix du système d'axe de référence

Trois types de référentiels sont intéressants en pratique, le choix se fait selon le problème étudié :

II.7.1 Référentiel lié au rotor

Il se traduit par les relations :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{avec} \quad (\theta_s = \theta + \theta_r)$$

$$\Rightarrow \omega_s = \omega$$

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s\omega & pM & -\omega M \\ \omega L_s & R_s + pL_s & \omega M & pM \\ pM & 0 & R_r + pL_r & 0 \\ 0 & pM & 0 & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

Ce type de référentiel est intéressant dans les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

II.7.2 Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = 0$$

On obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega M & R_r + pL_r & \omega L_r \\ -\omega L_r & pM & -\omega L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

Ce référentiel est utilisé en vue d'étudier des variations importantes de la vitesse de rotation.

II.7.3 Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par les relations :

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

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_s & pM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s M & pM \\ pM & -\omega_r M & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & pM & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplifications dans les équations de la machine.

Ce modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régimes sinusoïdal permanent d'où la facilité de régulation. Aussi ce référentiel est souvent utilisé même dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable.

II.8 Modélisation des convertisseurs statiques

II.8.1 Modèle du convertisseur statique

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes en antiparallèles commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour générer moins ou pas de perturbations sur le réseau électriques par propagation de courants harmoniques [18].

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diodes) parfaits. La figure (II.7) représente un onduleur de tension alimenté par une tension contenu u .

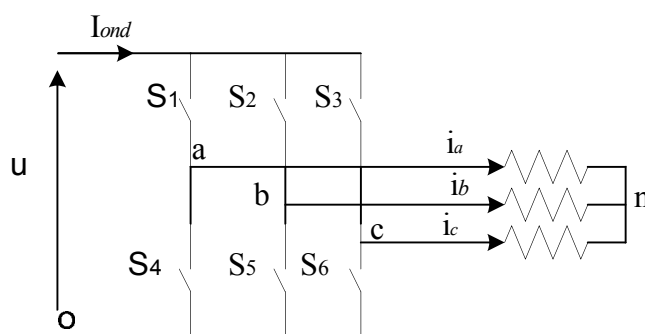


Figure II.7 Schéma d'un onduleur de tension triphasé

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{cases} U_{a o} = U_{a n} + U_{n o} \\ U_{b o} = U_{b n} + U_{n o} \\ U_{c o} = U_{c n} + U_{n o} \end{cases}$$

II. 32

D'autre part le fait que la charge soit équilibrée donne :

$$U_{a n} + U_{b n} + U_{c n} = 0 \quad \text{II.33}$$

D'où

$$U_{n o} = 1/3(U_{a o} + U_{b o} + U_{c o}) \quad \text{II.34}$$

Les expressions des tensions de phases sont alors exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_{a n} = U_a = \frac{1}{3}(2U_{a o} - U_{b o} - U_{c o}) \\ U_{b n} = U_b = \frac{1}{3}(-U_{a o} + 2U_{b o} - U_{c o}) \\ U_{c n} = U_c = \frac{1}{3}(-U_{a o} - U_{b o} + 2U_{c o}) \end{cases} \quad \text{II.35}$$

L'expression de la tension U_{jo} , est fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur où il est connecté. Soit à noter l'état passant de l' $i^{\text{ème}}$ interrupteur par $S_i=1$ et son état bloqué par $S_i=0$, U_{jo} s'exprime alors par la relation suivante : $U_{jo}=u.S_i$ pour i prenant les valeurs 1,2 et 3, et $j=a,b$ et c .

Nous déduisons le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{u}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

De plus la relation entre le courant modulé par le convertisseur (I_{ond}) est les courants alternatifs (i_a , i_b et i_c) est définie par l'équation suivante :

$$I_{o n d} = [S_1 \ S_2 \ S_3] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{II.37}$$

II.8.2 Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet de d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur.

Plusieurs types de MLI intersective sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI intersective sinus avec porteuse triangulaire, la MLI précalculée, la MLI vectorielle, etc.

Toute fois nous adoptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration, dont son principe est représenté dans la figure suivante :

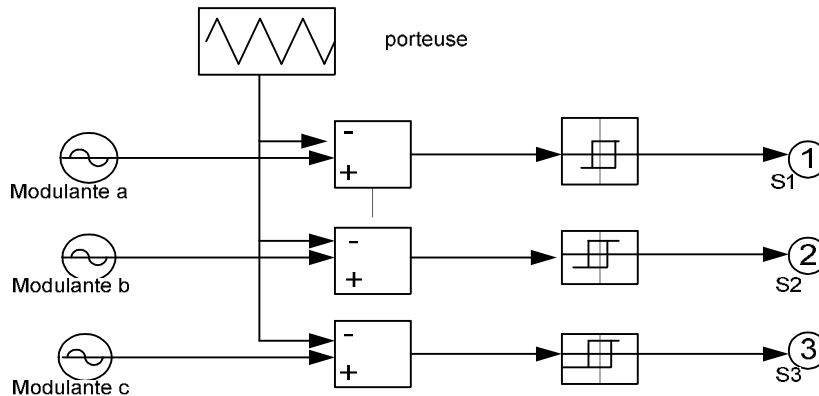


Figure II.8 Schéma de principe de la MLI naturelle

II.8.3 Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure (II.9), il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la figure (II.10) est représenté en détail le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur où sont connectés les bus continus des convertisseurs. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur.

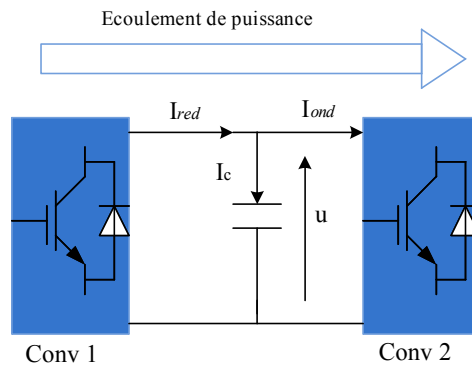


Figure II.9 Schéma du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{d u}{d t} = \frac{1}{c} \cdot i_c \tag{II.38}$$

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

$$i_c = i_{r e d} - i_{o n d} \tag{II.39}$$

Ainsi on a :

$$u = \int \frac{d u}{d t} + u_0 \tag{II.40}$$

Avec u_0 est la tension initiale du condensateur.

II.8.4 Le Redresseur

Les redresseurs MLI sont des onduleurs utilisés "à l'envers" qui permettent de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif.

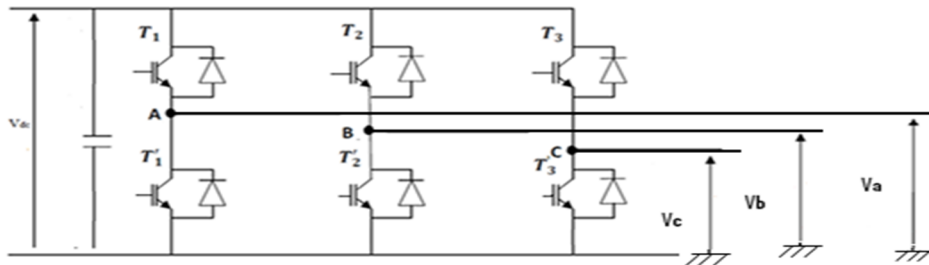


Figure. II.10 Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{d c}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} \tag{II.41}$$

$$I_{d c} = F'_1 \cdot I_a + F'_2 \cdot I_b + F'_3 \cdot I_c \tag{II.42}$$

Avec :

- $v_{d c}$: Tension redressée.
- $I_{d c}$: Courant redressé.
- F'_1, F'_2, F'_3 : fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé les différentes parties d'un aérogénérateur basée sur une machine asynchrone à double alimentation. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équation différentielle à coefficients constants pour faciliter sa résolution, Ainsi que l'intérêt de l'orientation du flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA. Cette modélisation nous a permis aussi d'aboutir à des schémas bloc qui seront exploités dans le prochain chapitre pour la simulation du système.

III.1 INTRODUCTION

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par BLASCHKE au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

III.2 Application de l'orientation de flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe « **d** » ou « **q** ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes

- ✓ Orientation du flux rotorique

$$\varphi_{qr} = 0 : \varphi_{dr} = \varphi_r \quad \text{III.1}$$

- ✓ Orientation du flux statorique

$$\varphi_{qs} = 0 : \varphi_{ds} = \varphi_s \quad \text{III.2}$$

III.3 Orientation du flux statorique

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

III.3.1 Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{III.3}$$

III.3.2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{d s} = L_s I_{d s} + M I_{d r} \\ \varphi_{q s} = L_s I_{q s} + M I_{q r} \\ \varphi_{d r} = L_r I_{d r} + M I_{d s} \\ \varphi_{q r} = L_r I_{q r} + M I_{q s} \end{cases} \quad \text{III.4}$$

III.3.3 Equation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous aurons :

$$C_{e m} = C_r + f \Omega_m \text{éc} + J \frac{d \Omega_m \text{éc}}{d t} \quad \text{III.5}$$

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

$$C_{e m} = p \frac{M}{L_s} (\varphi_{q s} I_{d r} - \varphi_{d s} I_{q r}) \quad \text{III.6}$$

P : nombre de paire de pôles.

En choisissant un référentiel diphasé 'd-q' lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statoriques φ_s avec l'axe 'd', nous pouvons écrire :

$$\varphi_{q s} = 0 : \varphi_{d s} = \varphi_s$$

Dans l'hypothèse où le flux $\varphi_{d s}$ est maintenu constant le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine, par conséquent la puissance active, uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q.

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

$$v_{s n} = R_s I_{s n} + \frac{d \varphi_{s n}}{d t} \quad \text{III.7}$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statoriques R_s . Ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les systèmes éoliens, cette relation devient :

$$v_{s n} = \frac{d \varphi_n}{d t} \quad \text{III. 8}$$

La relation III.8 montre qu'un repère lié au flux statoriques tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statoriques et qu'il est en avance de $\pi / 2$ sur ce même vecteur.

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statoriques constant) :

$$v_{q s} = v_s \quad e \quad t \quad \varphi_s = 0 \quad \text{III. 9}$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{q s} = V_s = -\omega_s \varphi_s \\ V_{d s} = 0 \end{cases} \quad \text{III. 10}$$

$$\begin{cases} \varphi_{d s} = L_s I_{d s} + M I_{d r} \\ 0 = L_r I_{q s} + M I_{q r} \end{cases} \quad \text{III. 11}$$

A partir de l'équation III.12, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{q s} = -\frac{M}{L_s} I_{q r} \\ I_{d s} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{d r} \end{cases} \quad \text{III. 12}$$

III.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = V_d I_{d s} + V_q I_{q s} \\ Q_s = V_q I_{d s} - V_d I_{q s} \\ P_r = V_d I_{d r} + V_q I_{q r} \\ Q_r = V_q I_{d r} - V_d I_{q r} \end{cases} \quad \text{III. 13}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{d\ s} = 0$), nous conduit à :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{q\ s} \\ Q_s = -V_q I_{d\ s} \end{cases} \quad \text{III.14}$$

En remplaçant $i_{d\ s}$ et $i_{q\ s}$ par leurs expressions données par l'équation III.12, nous obtenons celles des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{q\ r} \\ Q_s = -V_s \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{V_s M}{L_s} I_{d\ r} \end{cases} \quad \text{III.15}$$

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

$$Q_s = -\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} + \frac{V_s}{L_s} I_{d\ r} \quad \text{III.16}$$

Compte tenu du repère choisi, des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétique M comme constante, le système ainsi obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe "d" à une constante $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$

III.5 Relations entre tension rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations III.4 en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation III.12 :

$$\begin{cases} \varphi_{q\ r} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{q\ r} \\ \varphi_{d\ r} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{d\ r} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

Ces expressions des flux rotorique d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation III.3, nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{d r} = R_r I_{d r} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{d r}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{q r} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ V_{q r} = R_r I_{q r} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{q r}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{d r} \end{cases} \quad \text{III. 18}$$

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

$$\begin{cases} V_{q r} = R_r I_{q r} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{d r} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ V_{d r} = R_r I_{d r} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{q r} \end{cases} \quad \text{III. 19}$$

$V_{d r}$ et $V_{q r}$ sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage.

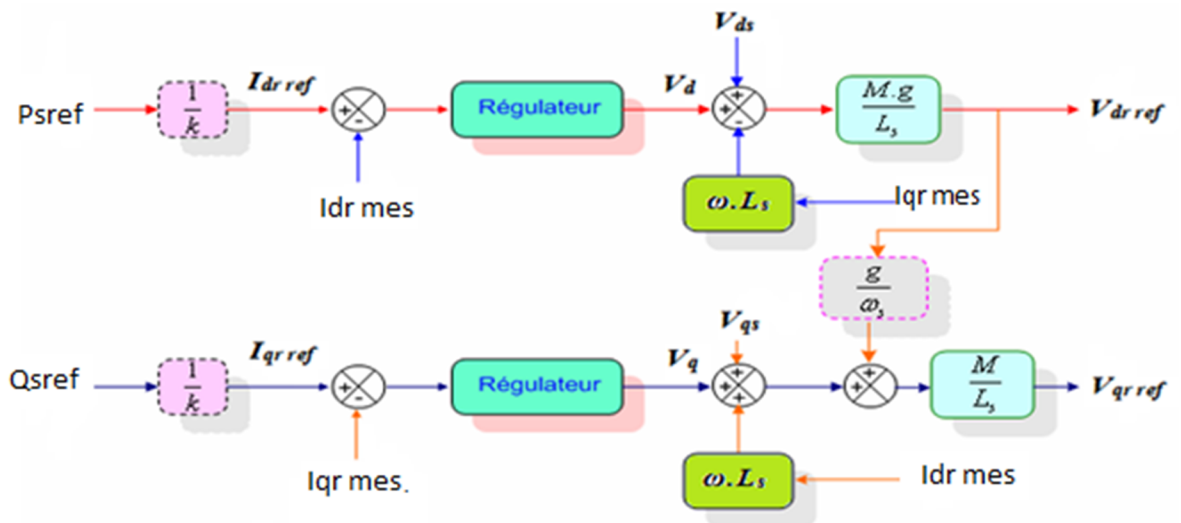


Figure.III.1 Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique la MADA alimentée en tension

III.6 Commande de bus continu

Le réglage du bus continu est réalisé au moyen d'une boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur proportionnel intégral générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (i_{c-ref}). La synthèse du régulateur est la même que celle des régulateurs utilisée dans la commande de la machine, dont on a $K_i \ll K_p$, donc le régulateur se réduit à un gain pur, il vaut :

$$K_p = \frac{c}{\tau_u} \tag{III.20}$$

Avec τ_u : est le temps de réponse désiré de la tension redressée.

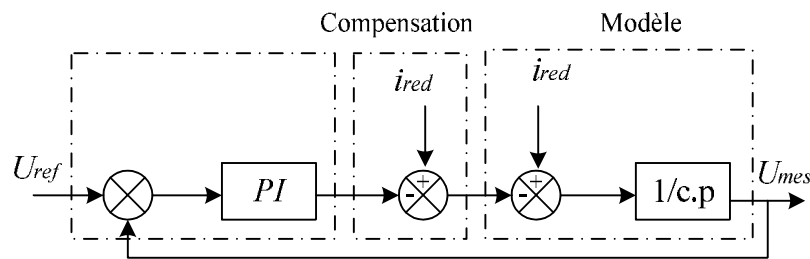


Figure III.2 Régulation de la tension du bus continu

Le contrôle de la tension du bus continu fixe la référence de la puissance active à transiter au réseau.

La puissance active transitée au bus continu est :

$$P_{red} = u_{red} i_{red} \tag{III.21}$$

La référence de la puissance emmagasinée dans le condensateur s'exprime par :

$$P_{c-ref} = u_{c-ref} i_{c-ref} \tag{III.22}$$

Si on néglige les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre devant la puissance transitée, la référence de la puissance active à transiter au réseau s'écrit :

$$P_{f-ref} = P_{red} - P_{c-ref} \tag{III.23}$$

III.7 Modélisation du filtre

Le schéma de la figure (III.3) montre que la liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée R-L.

L'ensemble des équations liant les tensions modulées et les courants qui transitent le filtre sont regroupées dans l'équation différentielle suivante :

$$\begin{cases} V_{on d \bar{1}} = L_f \frac{d i_{f 1}}{d t} + R_f i_{f 1} + V_{r 1} \\ V_{on d \bar{2}} = L_f \frac{d i_{f 2}}{d t} + R_f i_{f 2} + V_{r 2} \\ V_{on d \bar{3}} = L_f \frac{d i_{f 3}}{d t} + R_f i_{f 3} + V_{r 3} \end{cases} \quad \text{III.24}$$

En appliquant la transformation de Park, l'équation précédente devient :

$$\begin{cases} V_{d - on \bar{d}} = R_f i_{f d} + L_f \frac{d i_{f d}}{d t} + V_{r d} - \omega_s L_f i_{f q} \\ V_{q - on \bar{d}} = R_f i_{f q} + L_f \frac{d i_{f q}}{d t} + V_{r q} - \omega_s L_f i_{f d} \end{cases} \quad \text{III.25}$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{cases} e_d = -\omega_s L_f i_{f q} \\ e_q = +\omega_s L_f i_{f d} \end{cases} \quad \text{III.26}$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées en :

$$\begin{cases} V_{d - on \bar{d}} = R_f i_{f d} + L_f \frac{d i_{f d}}{d t} \\ V_{q - on \bar{d}} = R_f i_{f q} + L_f \frac{d i_{f q}}{d t} \end{cases} \quad \text{III.27}$$

Où les tensions aux bornes des bobines sont définies :

$$\begin{cases} V_{d - on \bar{d}} = V_{d - on \bar{d}} e_d - V_{r d} \\ V_{q - on \bar{d}} = V_{q - on \bar{d}} e_q - V_{r q} \end{cases} \quad \text{III.28}$$

En appliquant la transformée de Laplace pour les équations précédentes, on fait apparaître deux fonctions de transfert identiques :

$$F(s) = \frac{1}{R_f + s L_f} \quad \text{III.29}$$

La figure (III.3) représente le modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).

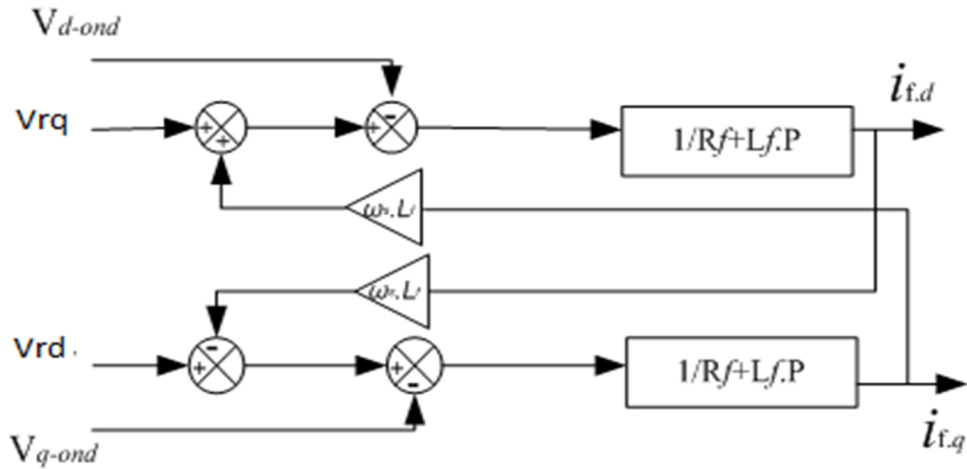


Figure III.3 Modèle du filtre dans le repère dq

Le contrôle des courants (i_{fd} et i_{fq}) est réalisé à l'aide de la boucle de régulation représentée dans la figure (III.4), il comporte trois actions.

1. Compensation des tensions de couplage.
2. Découplage des courants.
3. Contrôle en boucle fermée des courants qui est assuré par des régulateurs PI.

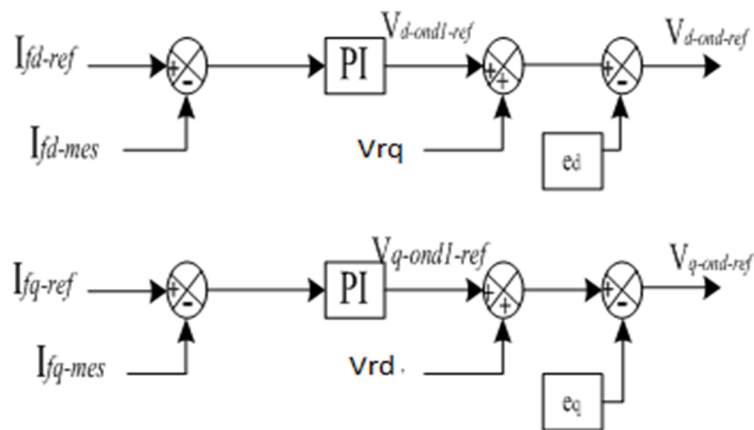


Figure.III.4 Régulation des courants du filtre

La boucle de régulation présentée précédemment figure(III.4) permet d'imposer égaux les courants transités à leurs références .Cela entraine les puissances actives transitées suivantes.

$$\begin{cases} P_f = V_r \dot{d}_f a + V_r \dot{d}_f q \\ Q_f = i_f dV_r q - i_f dV_r a \end{cases} \quad \text{III.30}$$

Alors il est possible d'imposer des références de puissance active P_{f-ref} et réactive Q_{f-ref} en imposant les courants de références suivants:

$$\begin{pmatrix} I_{r a-ref} \\ I_{r q-ref} \end{pmatrix} = \frac{1}{V_r \dot{d} + V_r \dot{q}} \begin{pmatrix} P_{f-ref} & Q_{f-ref} \\ Q_{f-ref} & P_{f-ref} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_r a \\ V_r q \end{pmatrix} \quad \text{III.31}$$

Donc le contrôle indépendant des puissances active et réactive circulant entre le convertisseur et le réseau est réalisé.

La représentation sous forme d'un schéma structurel du dispositif de commande est donnée sur la figure (III.5).

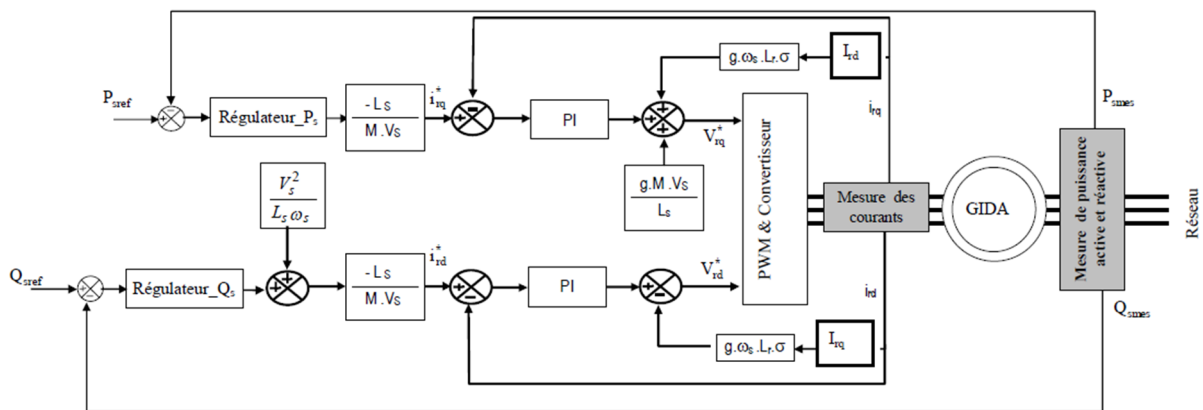


Figure III.5 Schéma structurel du contrôle de liaison au réseau

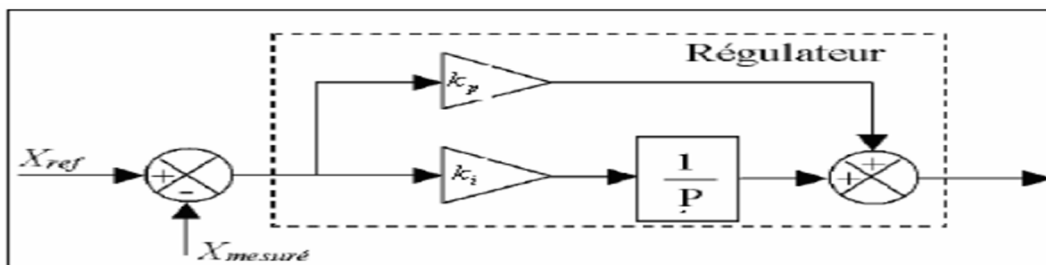


Figure III.6 Schéma de bloc du correcteur PI

III.8 Résultats de simulation

Notre système est constitué d'une machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau ; le stator est relié directement (sans interface), alors que le rotor est alimenté par l'intermédiaire d'un convertisseur statique (redresseur MLI, filtre, onduleur MLI), et ce dispositif d'électronique de puissance qui permet la réversibilité du transfert de l'énergie entre le réseau et le rotor.

Les résultats de simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle de système proposé sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1,5 MW, commandée en puissance. Pour l'extraction du maximum de puissance l'algorithme MPPT est appliqué à l'éolienne fonctionnant à vitesse variable.

Pour récapituler le fonctionnement du système, la simulation est répartie en trois phases, selon les régimes de fonctionnement de la génératrice :

III.8.1 Mode hyposynchrone

Pour choisir le mode de fonctionnement hyposynchrone on a opté au profil du vent montré par la figure (III.6). Ce mode est bien claire sur la valeur la vitesse de rotation et le signe de glissement ($g > 0$), figure (III.7) et figure(III.8).

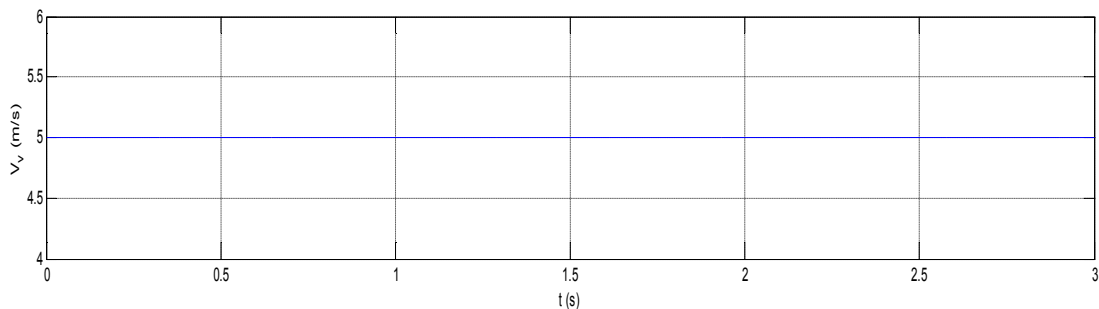


Figure.III.6 Vitesse de vent (V_v)

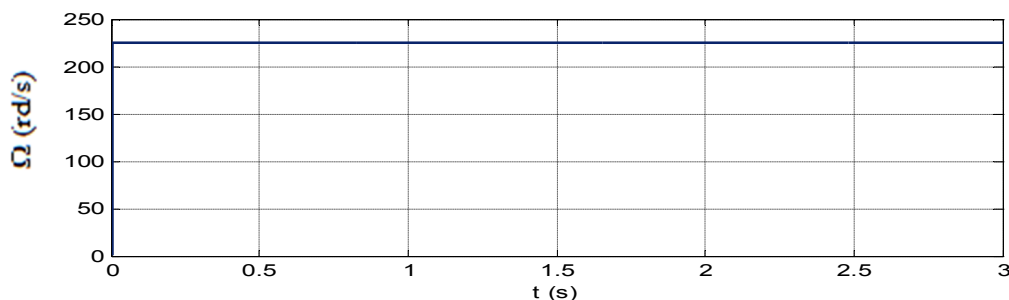


Figure.III.7 La vitesse mécanique (Ω_m)

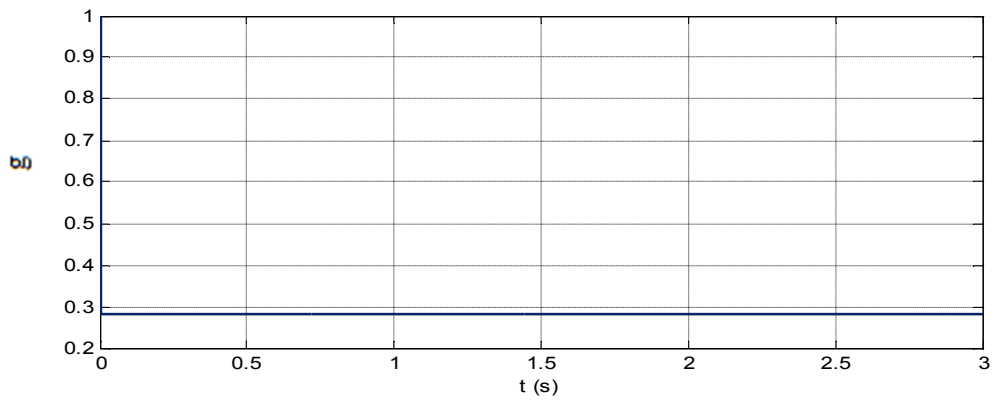


Figure.III.8 Allure de glissement

Les puissances active et réactive statoriques sont données sur les figures (III.9) et (III.10), respectivement. Illustrant ainsi une bonne poursuite de consigne malgré un signe transitoire qui est dû aux régulateurs (PI) choisis, le signe négatif de La puissance active statorique (P_s) justifie qu'elle débitée vers le réseau.

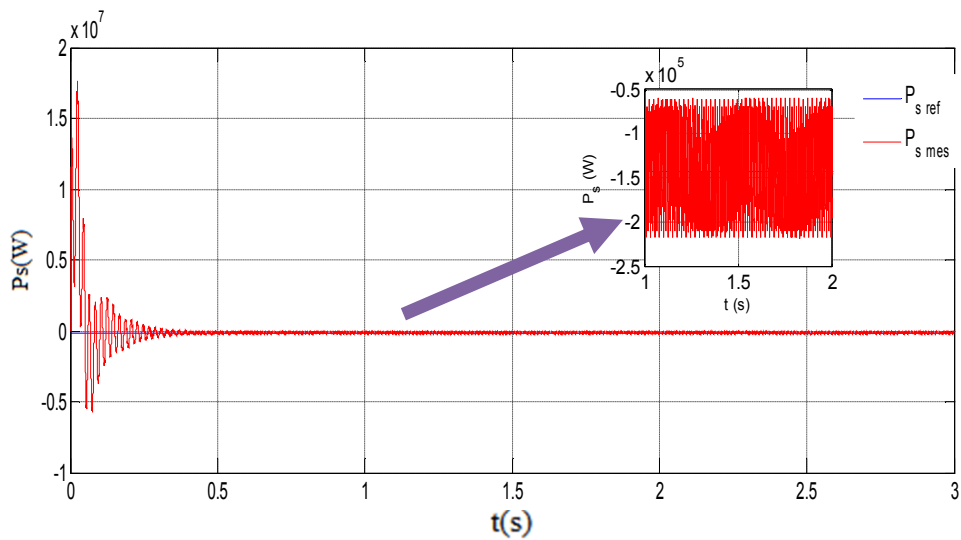


Figure.III.9 Allure de la puissance active statorique (P_s)

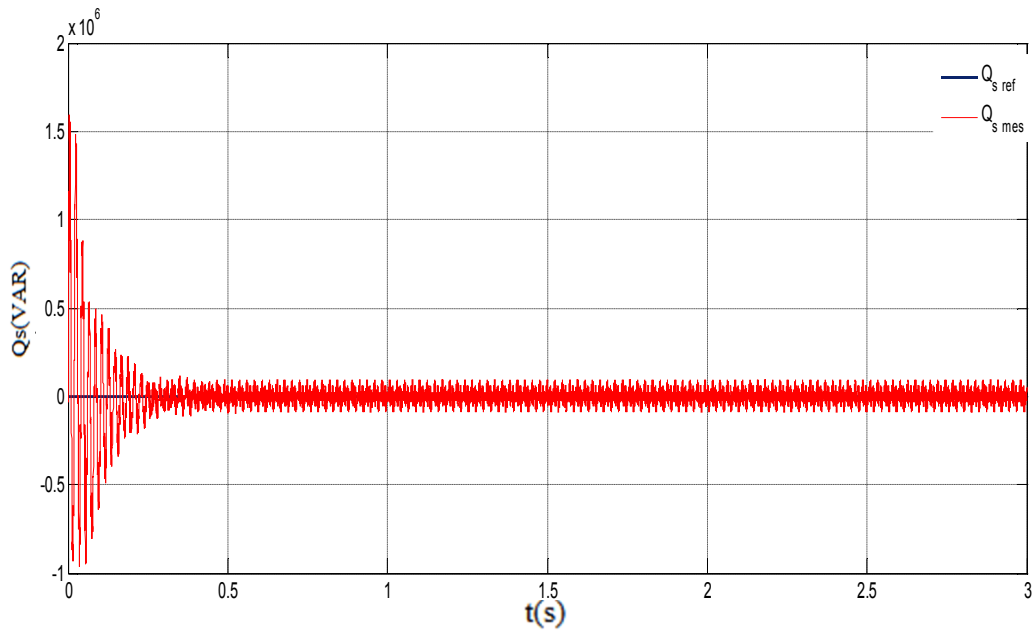


Figure.III.10 Allure de la puissance réactive statorique (Q_s)

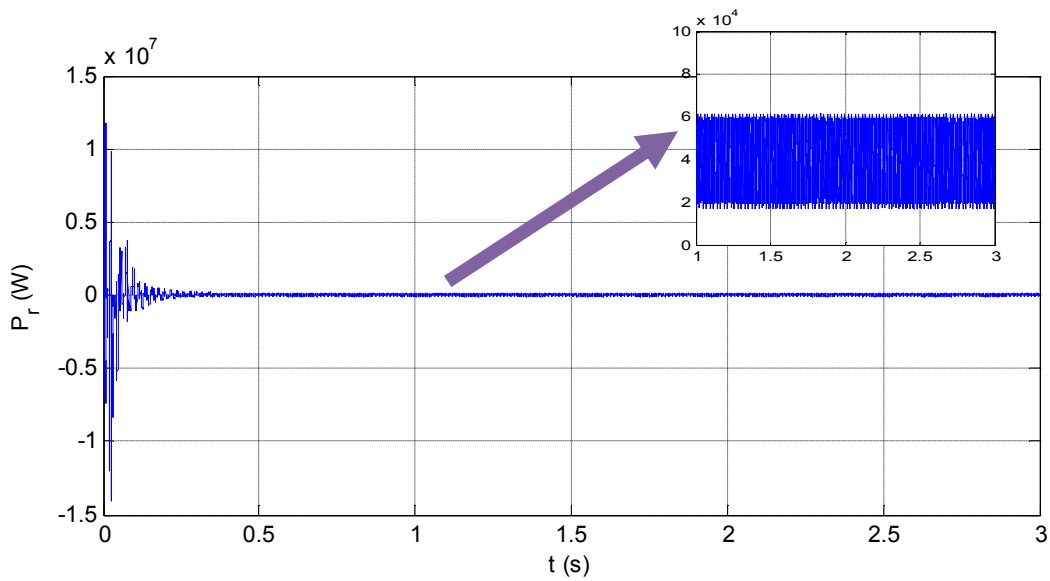
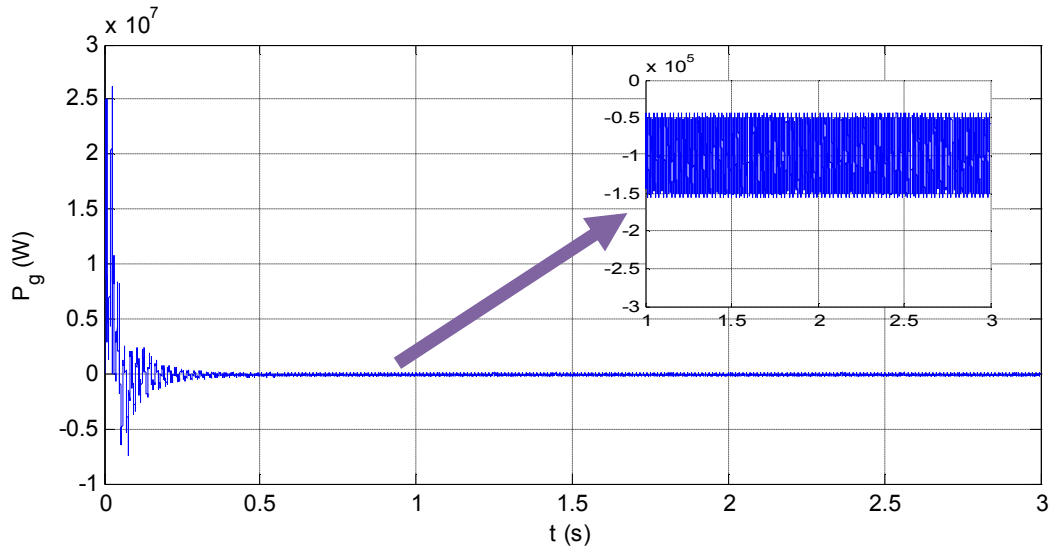
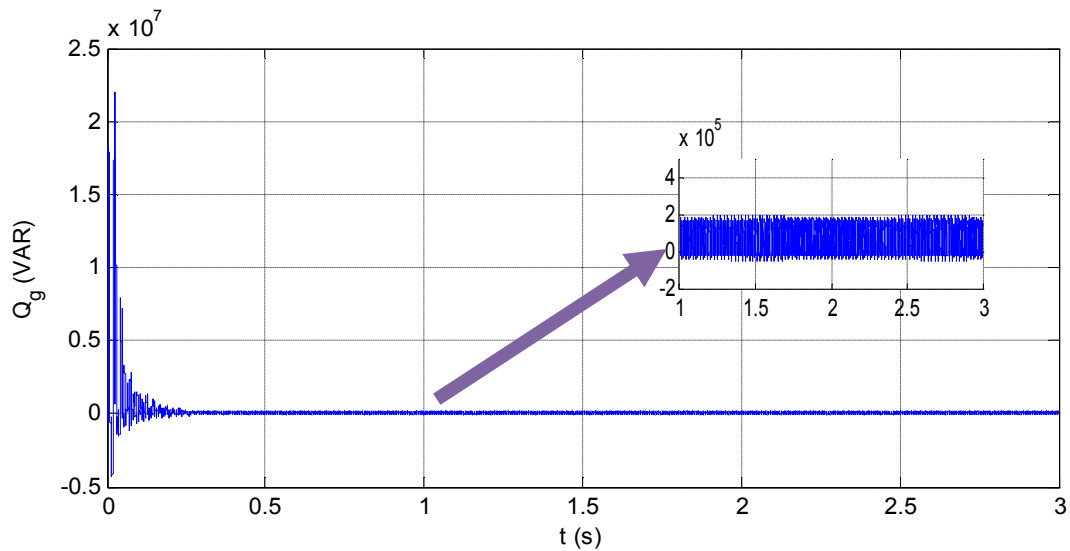


Figure.III.11 Allure de la puissance active rotorique

La figure (III.11), illustre l'allure de la puissance active rotorique, qui à un signe positif ($P_r > 0$) confirmant ainsi le mode hyposynchrone.

Figure.III.12 Puissance active générée (P_g)Figure.III.13 Puissance réactive générée (Q_g)

Les puissances active et réactive échangées entre l'aérogénérateur et le réseau électrique sont montrées sur la figure (III.12) et (III.13). La puissance réactive est maintenue nulle, confirmant ainsi un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au point de connexion de l'aérogénérateur. La puissance active générée est de signe négatif, ce que montre qu'elle est fournie par le système.

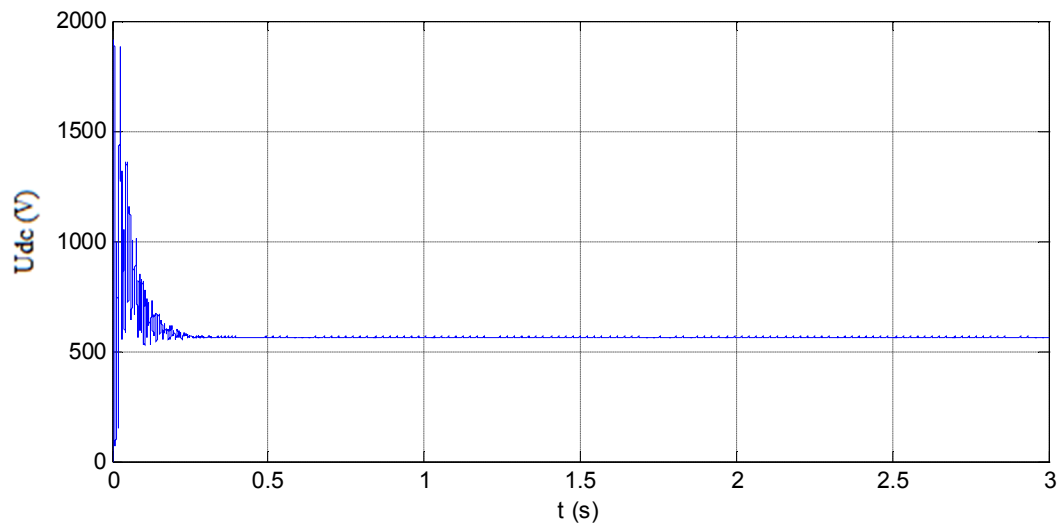


Figure.III.14 Tension de bus continu

Pour mettre en évidence la présence du bus continu, nous avons représenté sur la figure (III.14) l'allure de la tension continue. Celle-ci apparaît convenablement régulée même lorsque la puissance fournie varie (pour les trois régimes $g < 0, g > 0$ et $= 0$). À l'exception, on peut noter une variation pendant le démarrage du système qui engendre une variation brusque de la puissance.

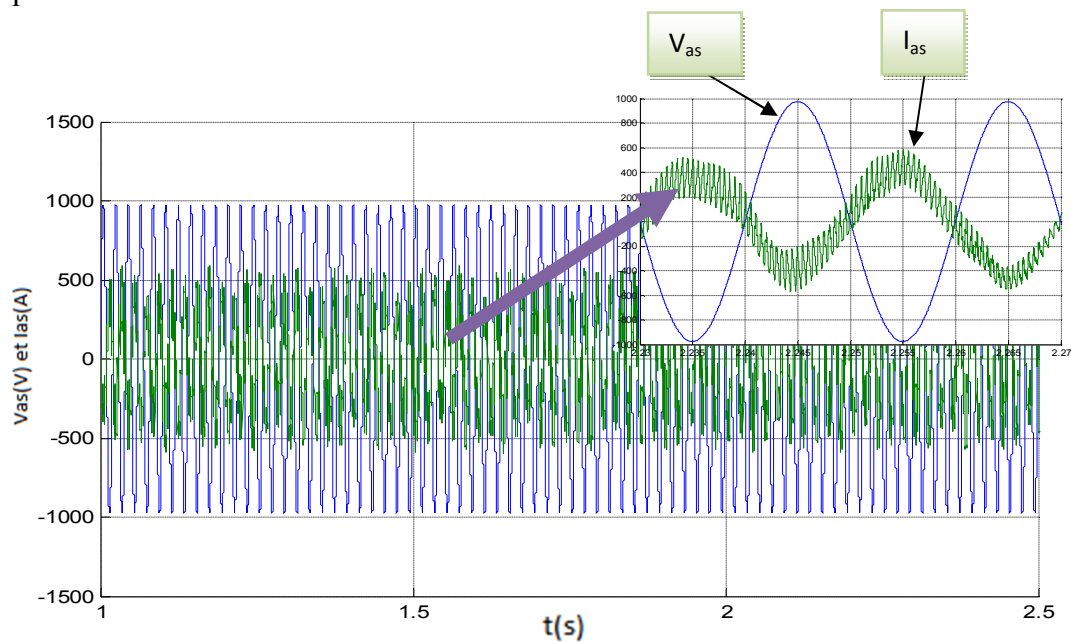


Figure.III.15 Allure de courant et de tension d'une phase statorique (Vias)

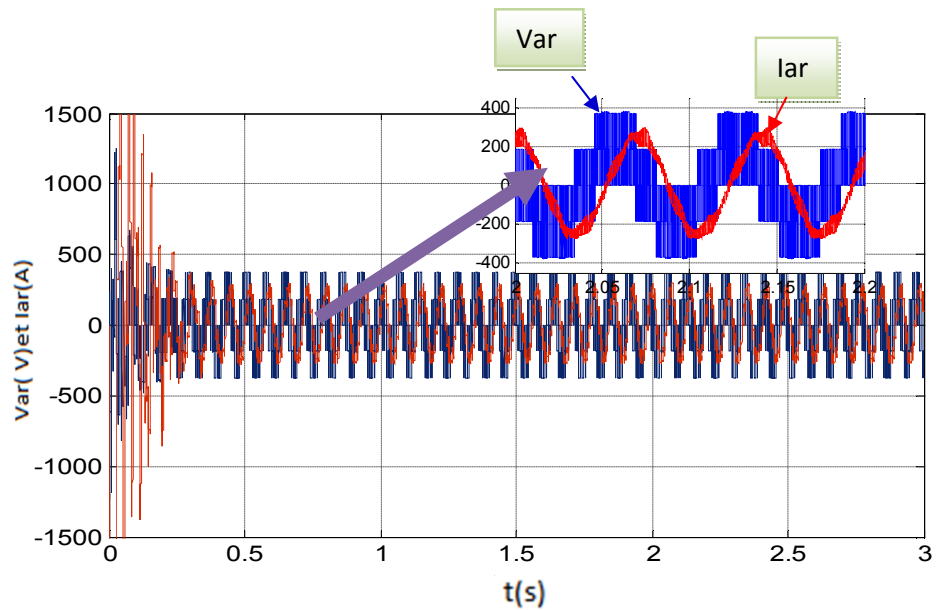


Figure.III.16 Allure de tension et de courant d'une phase rototique (Vlar)

L'évolution des tensions et des courants d'une phase statorique et rotorique sont montres sur les figures (III.15) et (III.16), respectivement. La première montre que I_{as} est en opposition de phase par rapport à la tension V_{as} justifiant ainsi les allures de P_s et Q_s , par contre la deuxième figure nous renseigne sur un déphasage rotorique positif montré par une puissance rotorique $P_r > 0$.

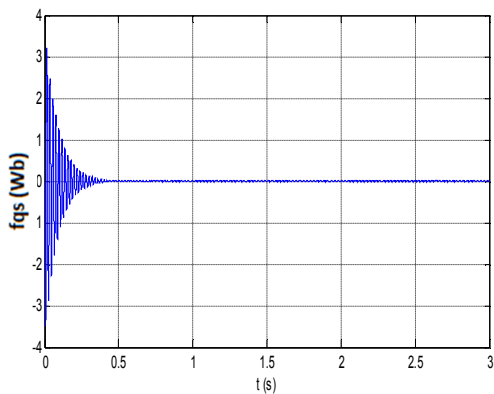
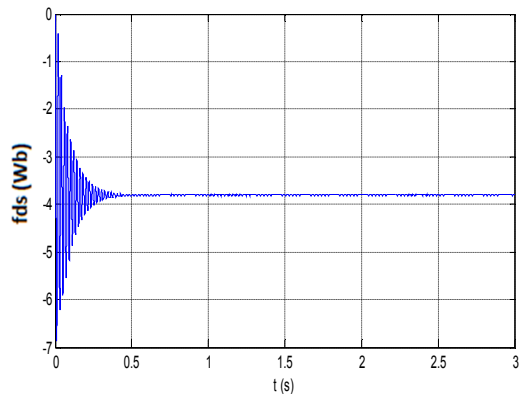


Figure.III.17 Allure de flux statorique (q)



III.18 Allure de flux rotorique(d)

On constate sur la figure (III.17) que le flux statorique selon l'axe(q) est nul, confirmant ainsi notre orientation par contre le flux selon l'axe (d) figure (III.18) est différent de zéro.

III.8.2 Mode hypersynchrone

En mode hypersynchrone la MADA fonctionne à glissement inférieur à zéro, ce qui est illustré sur la figure (III.21) ce qui a exigé le choix du profil du vent donné sur la figure(III.119).reflétant ainsi l'allure de la vitesse de rotation, figure(III.20).

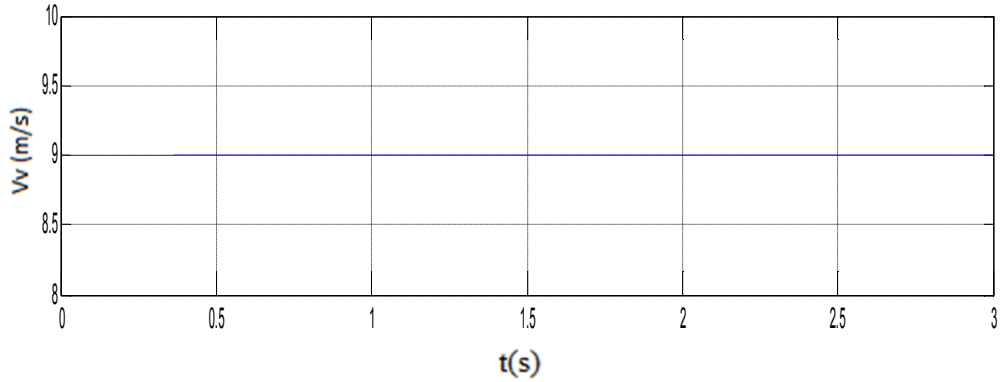


Figure.III.19 Vitesse de vent (Vv)

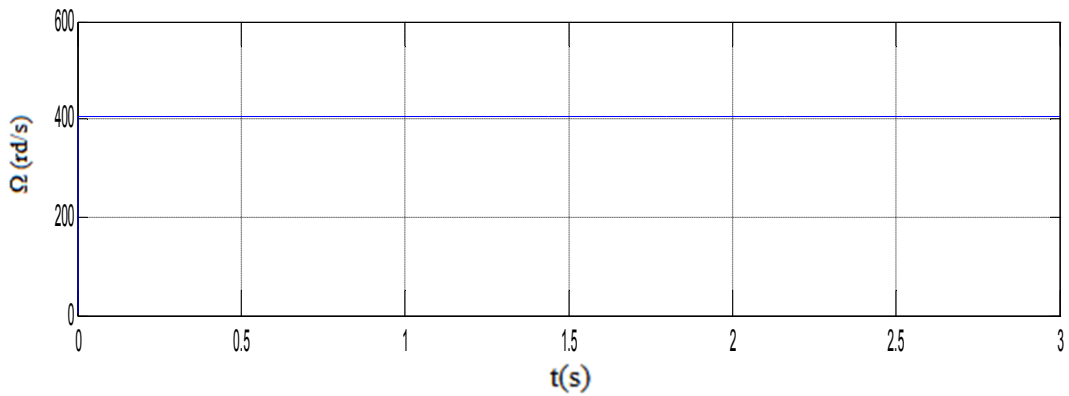


Figure.III.20 La vitesse mécanique (Ω_m)

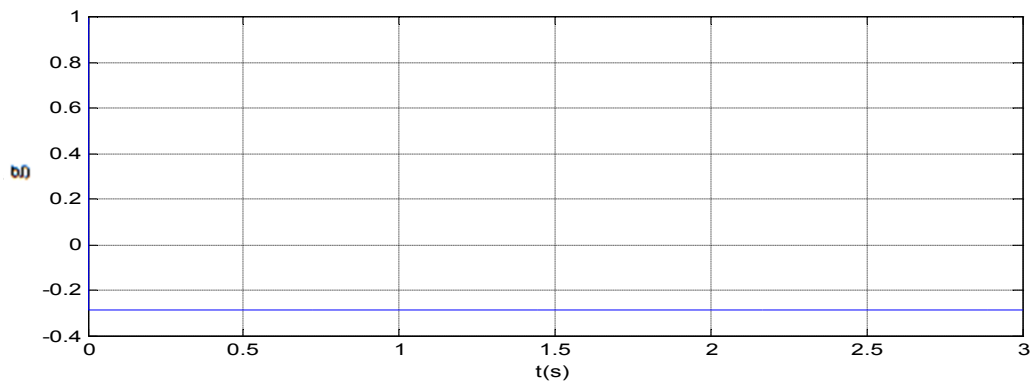


Figure.III.21 Allure de glissement

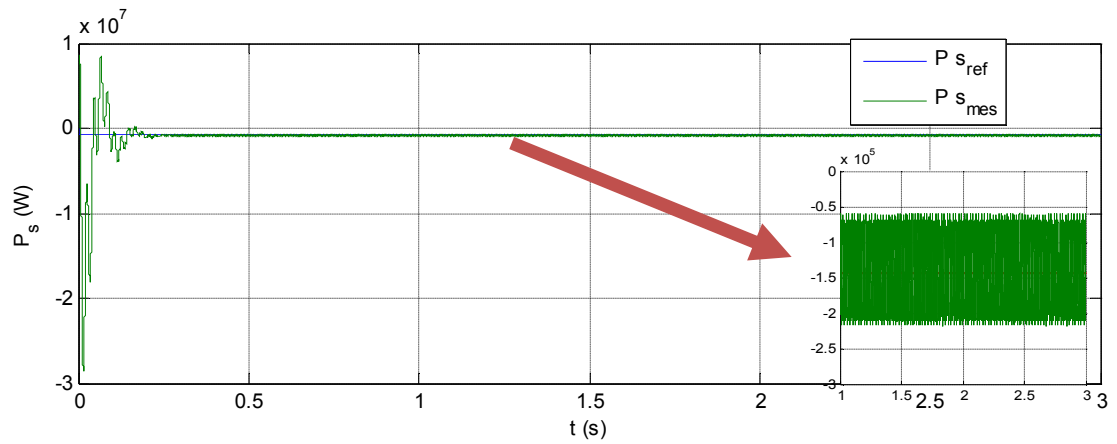
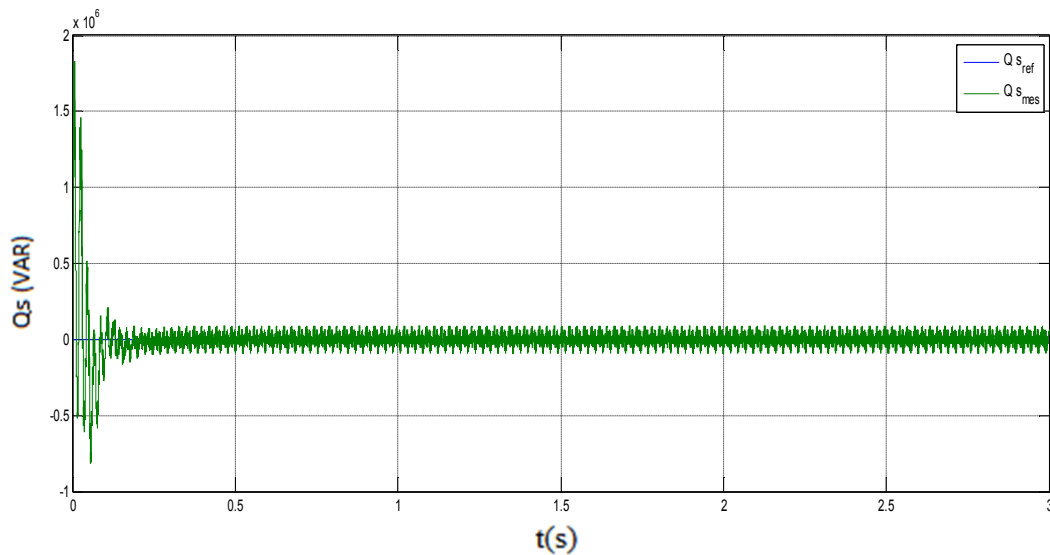


Figure III.22 Allure de la puissance active statorique

Figure.III.23Allure de la puissance réactive statorique (Q_s)

Les puissances active et réactive statoriques sont montrées sur la figure (III.22) et (III.23).la poursuite de référence est confirmée par les deux figures.

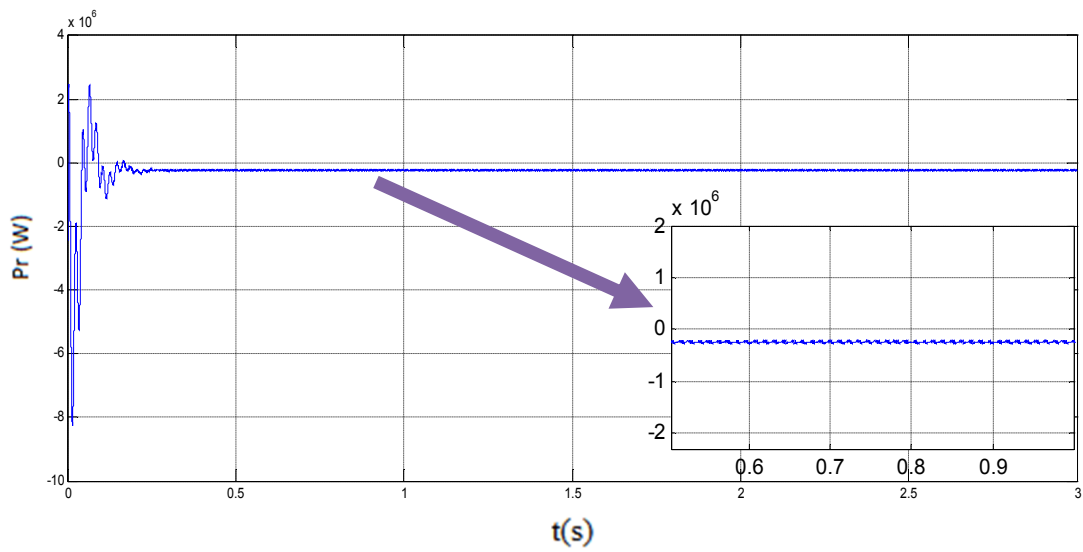


Figure.III.24 Allure de la puissance active rotorique

le signe négatif de la puissance active rotorique, Figure(III.24) est l’image du fonctionnement hypersynchrone, justifiant que Pr est fournie du rotor de la génératrice vers le réseau.

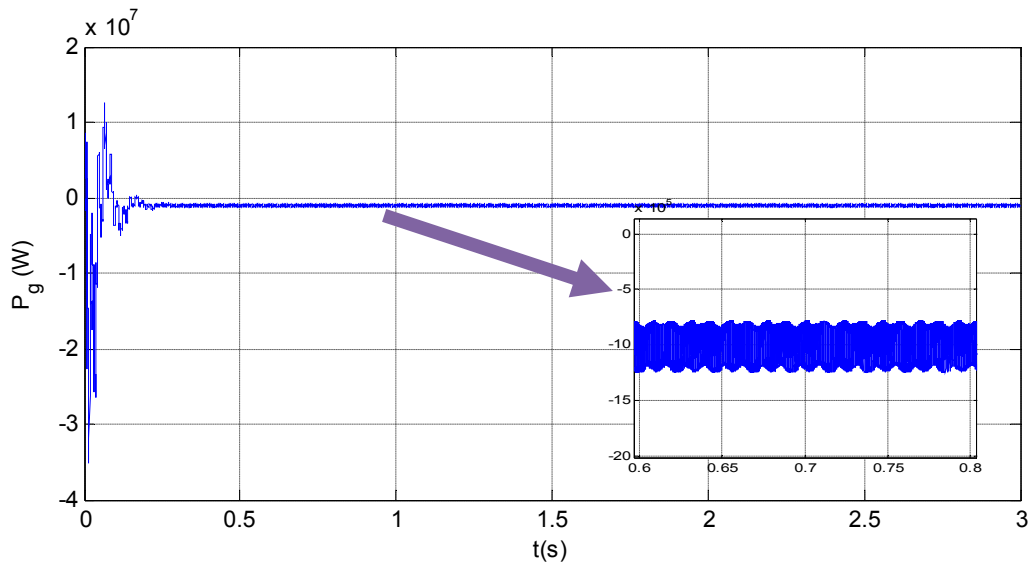
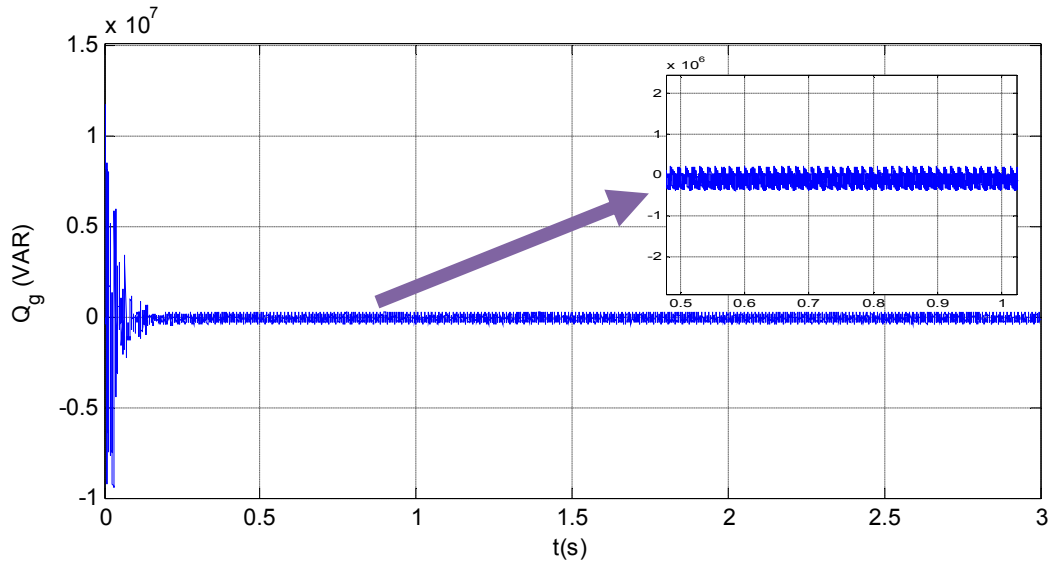
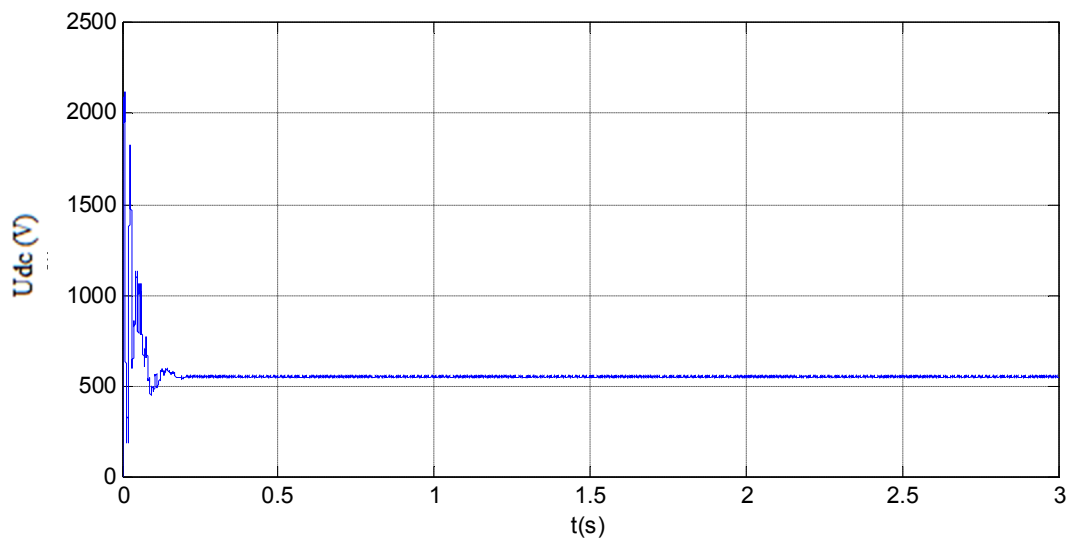


Figure.III.25 Allure de la puissance active générée (Pg)

Figure.III.26 Allure de la puissance réactive générée (Q_g)

Les puissances active et réactive échangées entre l'aérogénérateur et le réseau électrique sont montrées sur la figure (III.25) et (III.26). La puissance réactive est maintenue nulle, confirmant ainsi un fonctionnement à facteur de puissance unitaire au point de connexion de l'aérogénérateur. La puissance active générée au réseau est négative.

Figure.III.27 Allure de tension de bus continue (U_{dc})

L'allure de la tension du bus continu est montrée sur la figure (III.22), montrant une valeur fixe de U_{dc} .

Sur des périodes où le glissement est négatif, la figure (III .23) et (III.24) montrent que le courant est en avance de phase par rapport à la tension, dans ce cas le rotor et le stator fournissent de la puissance active au réseau.

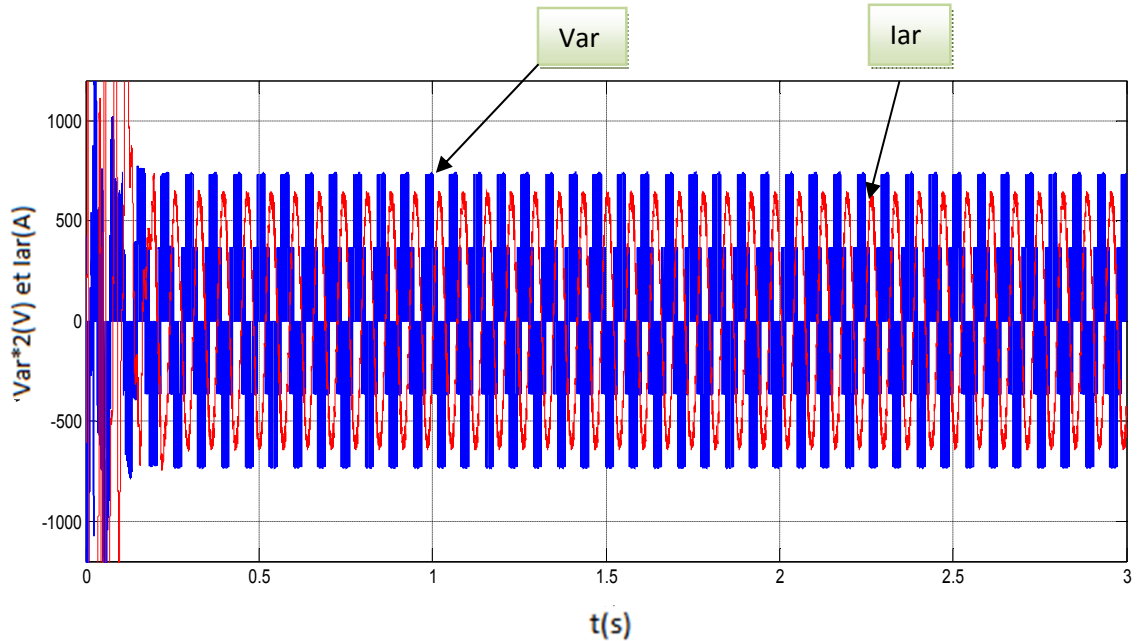


Figure.III.28 Allure de tension et de courant(VIar)

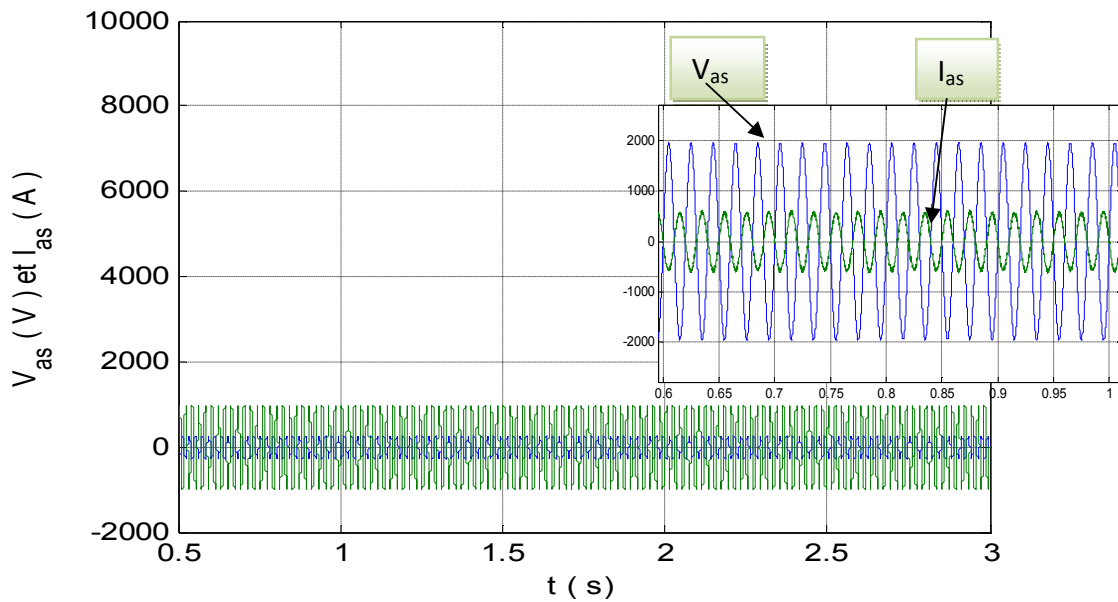


Figure.III.29 Allure de tension et de courant (VIas)

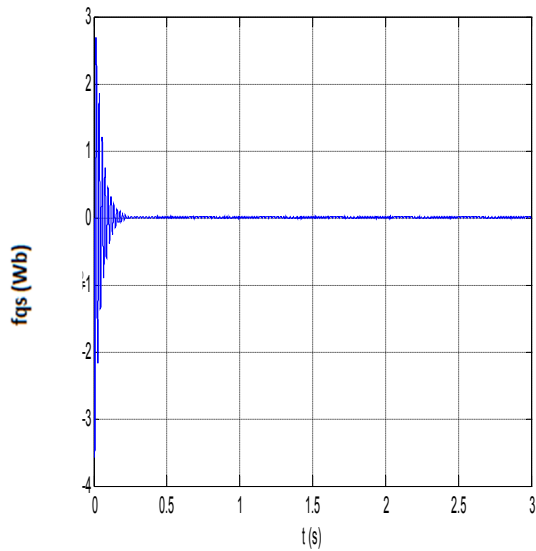


Figure.III.30 Allure de flux (fqs)

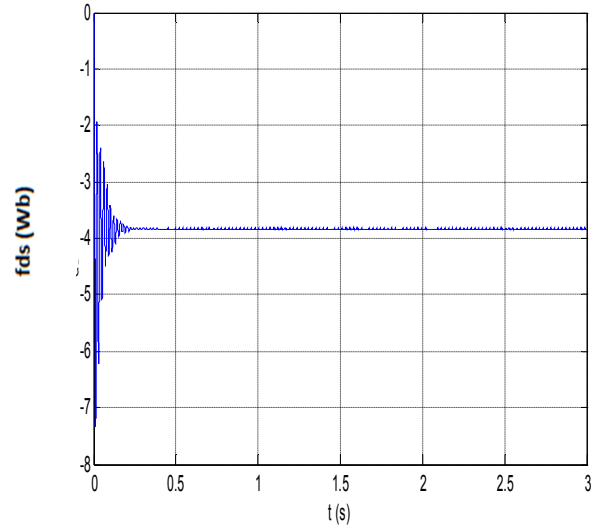


Figure.III.31 Allure de flux (fds)

Le flux statorique selon l'axe (q) est nul, figure(III.30), par contre le flux selon (d) est différent de zéro, figure(III.31).

III.8.3 Mode synchrone

Pour imposer à la génératrice le mode de fonctionnement synchrone, nous avons opté pour le profil du vent donné par la figure(III.32), ce qui est montré par le glissement et la vitesse de rotation, figure(III.33) et(III.34).

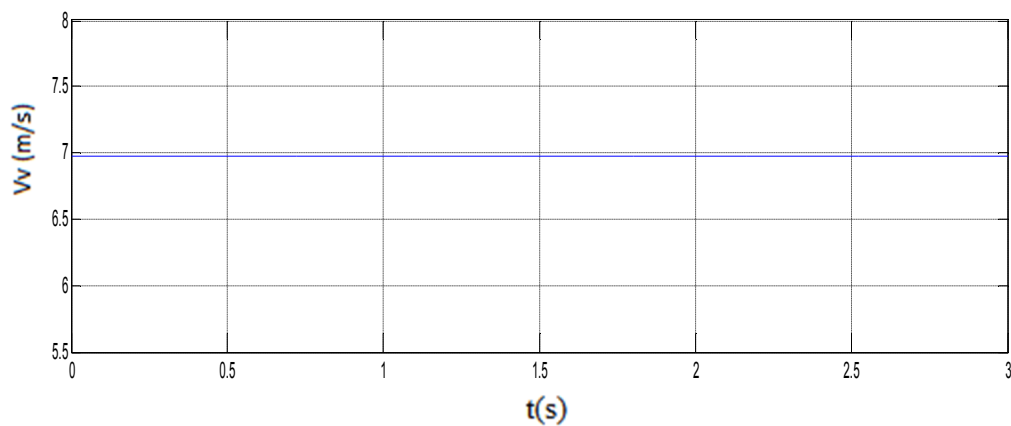


Figure III.32 Allure de la vitesse de vent

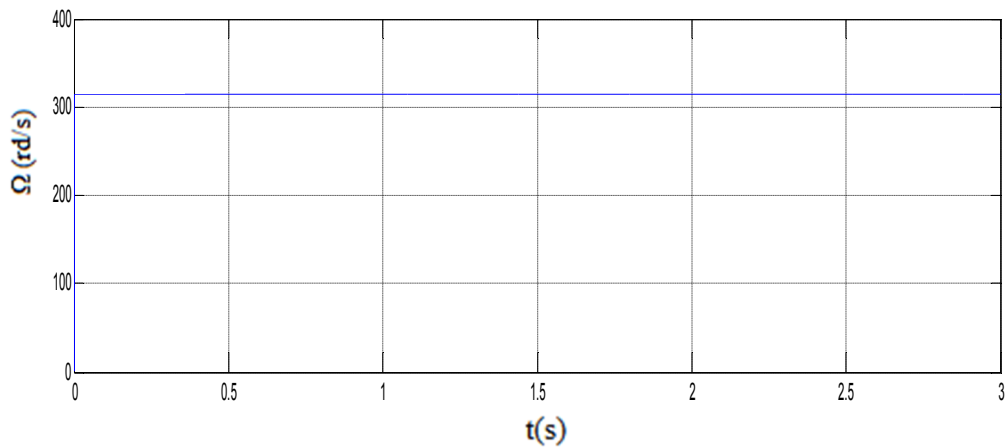


Figure III.33 Allure de la vitesse mécanique

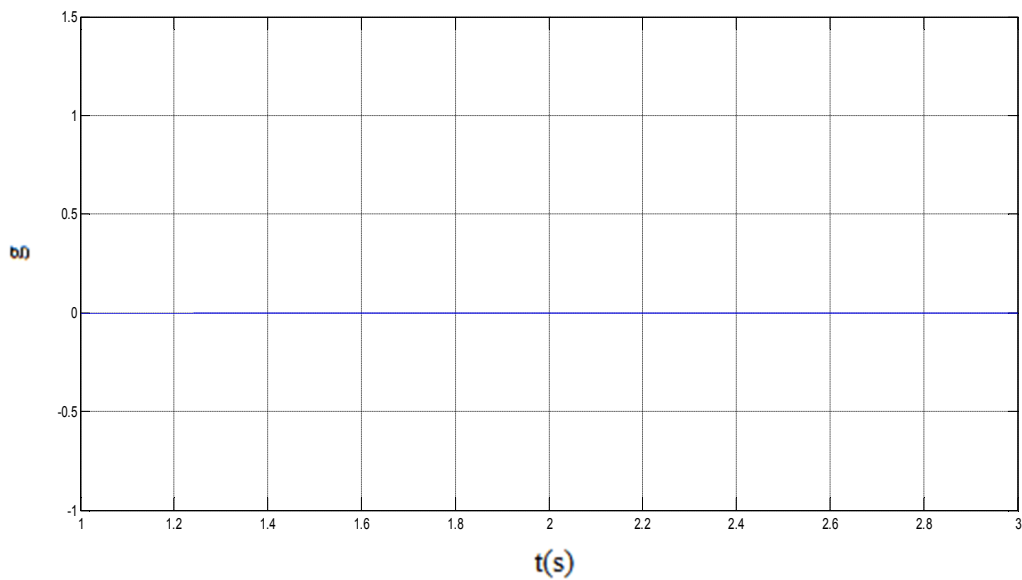


Figure.III.34 Allure de glissement

La poursuite des puissance active et reactive statorique est montrée par les figures (III.35) et(III.36) comme on remarque toujours le fonctionnement à $P_s < 0$ un facteur de puissance statorique unitaire.

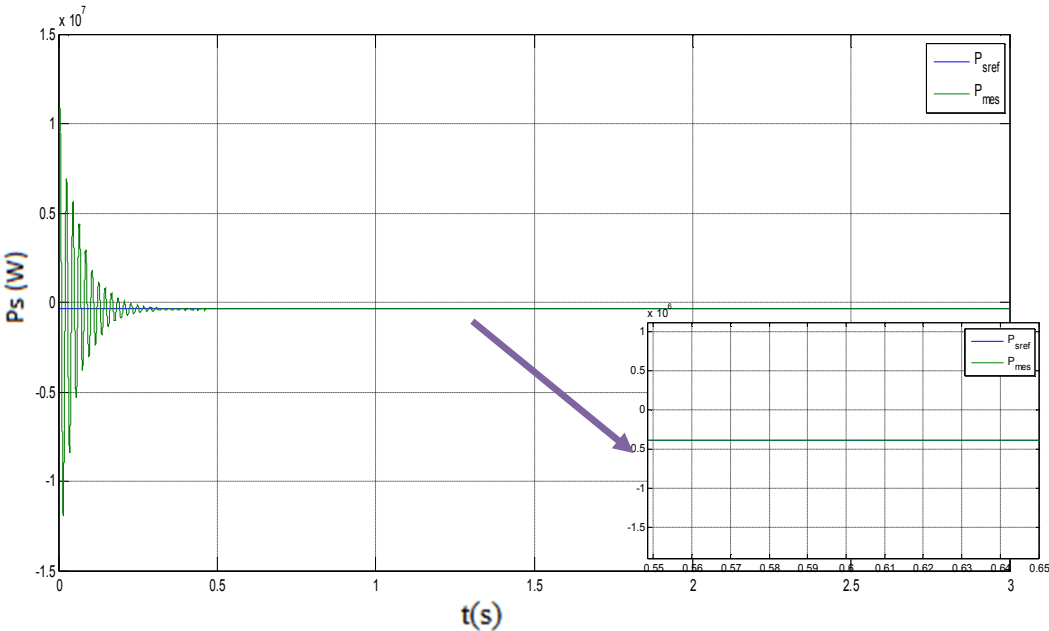


Figure.III.35 Allure de la puissance active statorique

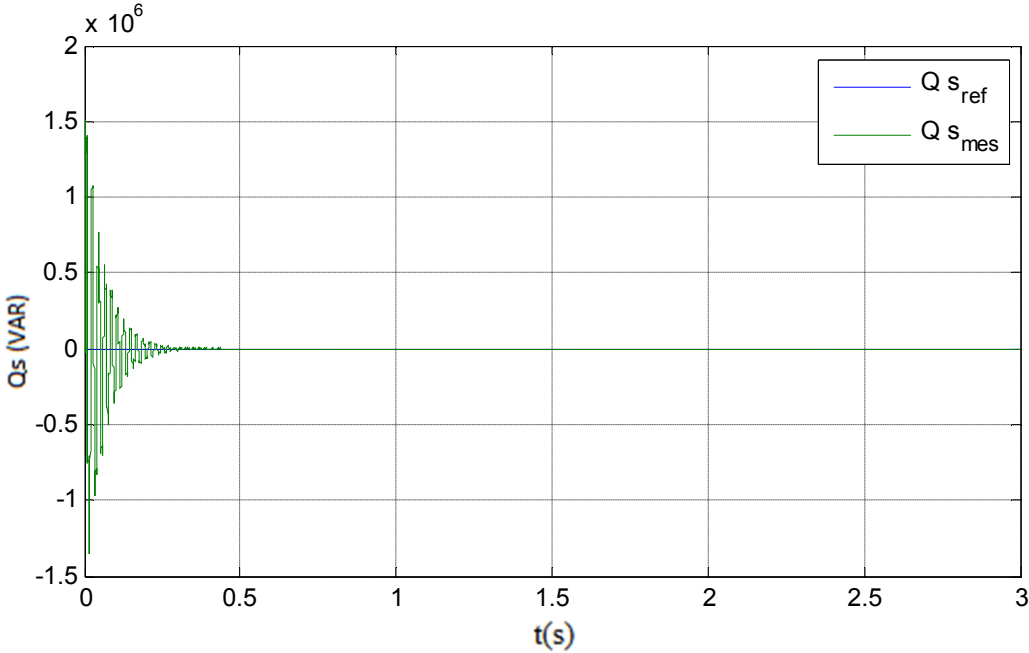


Figure.III.36 Allure de la puissance réactive statorique

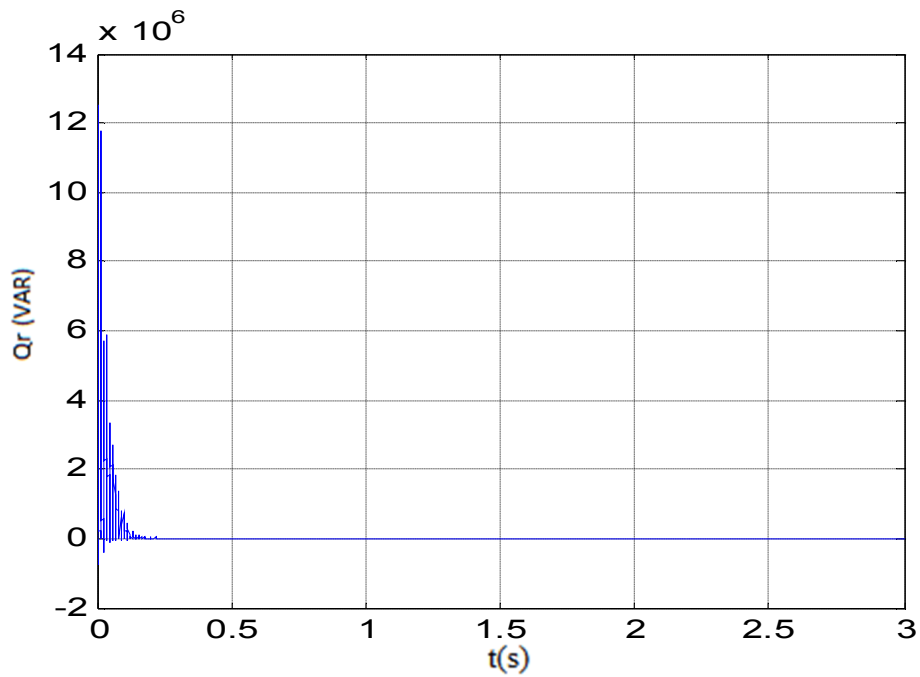


Figure.III.37 allure de la puissance réactive rotorique

Sur la figure (III.37) l'allure de la puissance réactive rotorique est illustrée, où on remarque bien que sa valeur est nulle, justifiant ainsi le régime continu (synchrone, $f=0$).

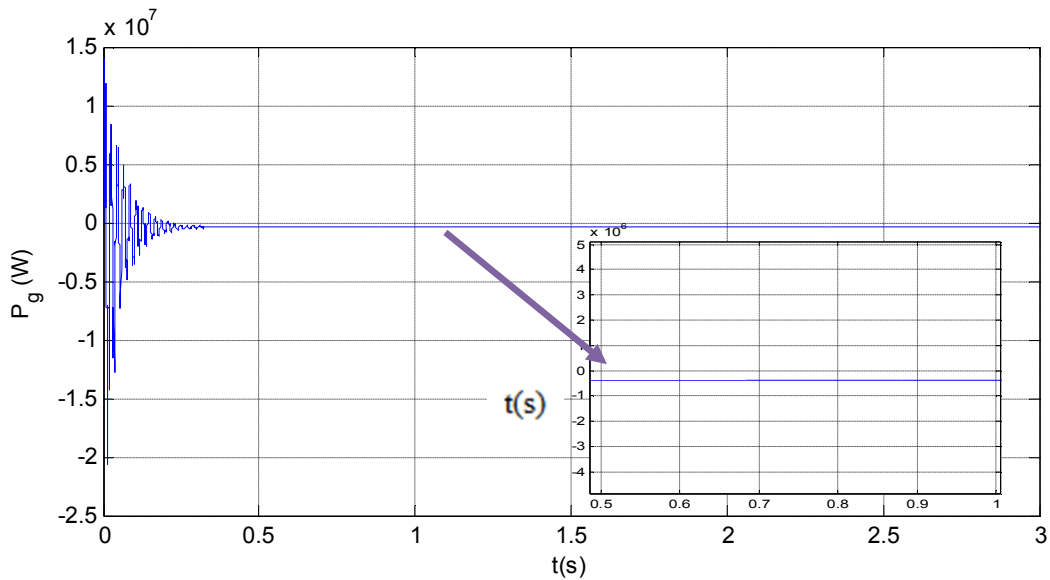


Figure.III.38 Allure de la puissance active de réseau

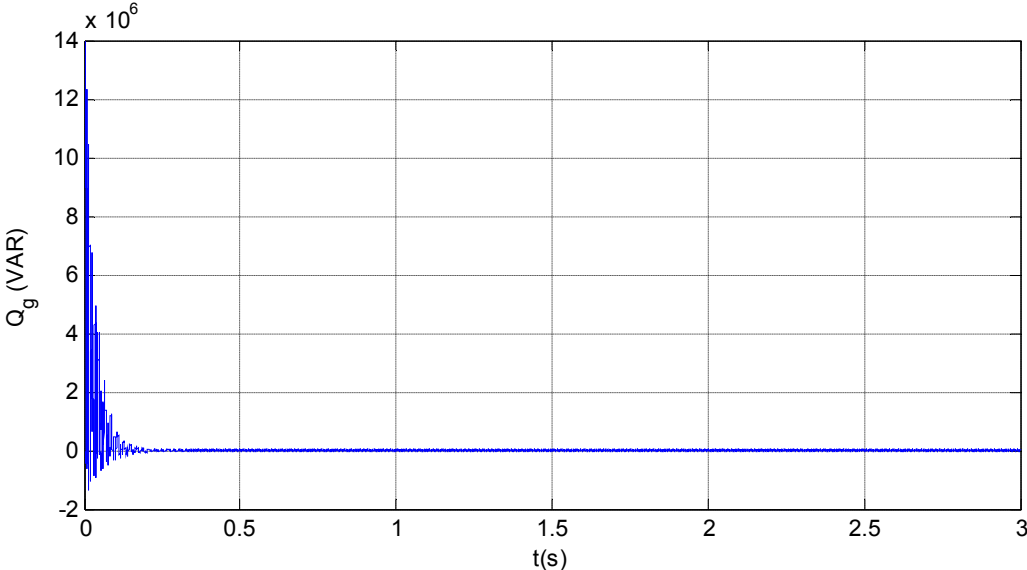


Figure.III.39 Allure de puissance réactive de réseau

Les figures (III.38) et (III.39) illustrent la forme des puissances actives et réactives de réseau.

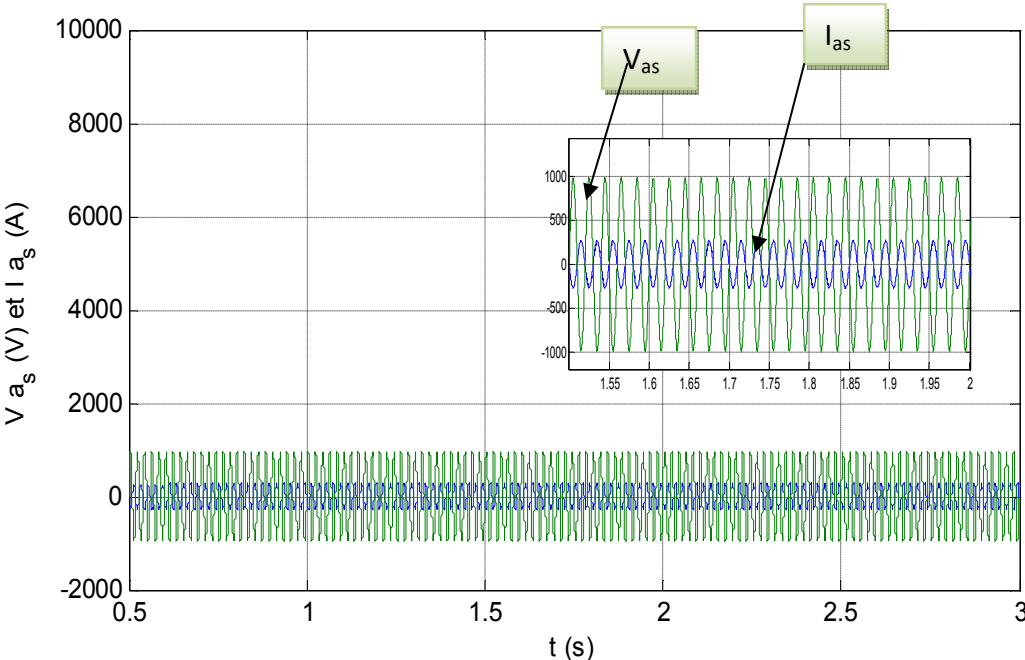


Figure.III.40 Allure de tension et de courant statorique (V_{ias})

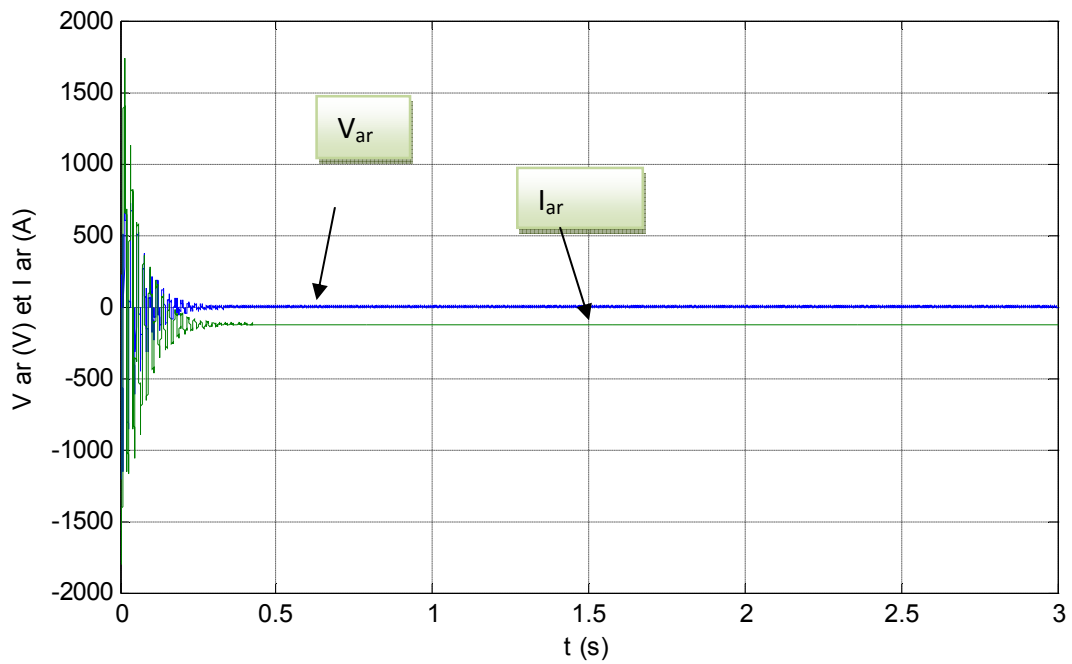


Figure.III.41 Allure de tension et de courant (V_{ar})

On représente sur la figure (III.41) les allures du courant et de la tension rotorique, avec une fréquence nulle, justifiant ainsi le fonctionnement de la génératrice en mode synchrone. Tandis que la figure (III.40) représente les allures du courant et de la tension d’une phase statorique reflétant ce qui est annoncé pour P_s et Q_s

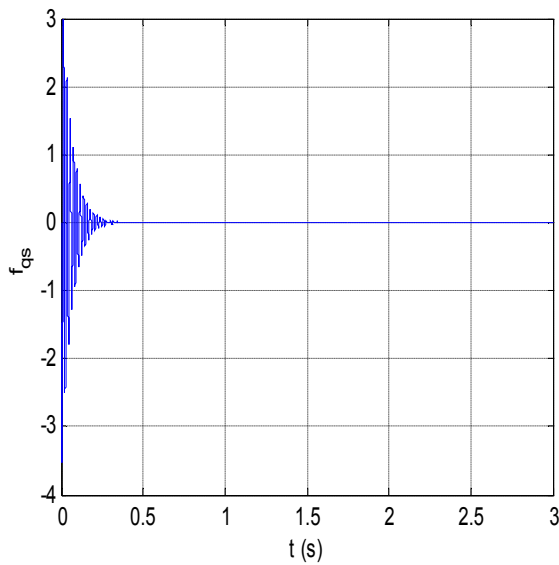


Figure.III.42 Allure de flux statorique(f_{qs})

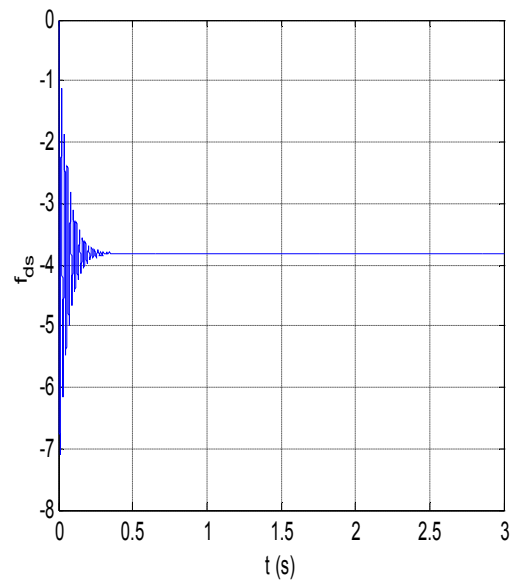


Figure.III.43 Allure de flux statorique (f_{qs})

Le découplage de la commande proposée est montré par la figure(III.42), où le flux statorique selon l'axe (q) est de valeur nulle. Par contre la figure(III.43) illustre que le flux statorique selon l'axe (d) est de valeur différente de zéro.

III.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les modèles des différents composants électriques des deux générateurs éoliens ainsi que les commandes associées ont été développés, en vue d'une exploitation par le logiciel MATLAB/Simulink. Les simulations réalisées ont montré le fonctionnement complet et les performances de chaque structure d'aérogénérateur au réglage des puissances active et réactive générées.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est l'étude de la chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentations à vitesse variable connecté directement au réseau à travers le stator et via une interface d'électronique de puissances à travers le rotor.

Pour se placer dans le contexte générale du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, le premier chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des différents modes de production éolienne, type de générateurs ainsi que l'intérêt que peut apporter la machine asynchrone à double alimentations par rapport aux autres machines utilisées.

Bien évidemment toute implantation d'algorithme de commande nécessite la connaissance des modèles mathématique des différentes parties du système à commander. La modélisation complète du système a été abordée dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a été consacré à la commande de la chaîne de conversion éolienne proposée par une technique linéaire basée sur des régulateurs (PI). La génératrice asynchrone (GADA) connectée via un convertisseur de fréquence indirect (onduleur et redresseur) afin d'imposer par le premier convertisseur la puissance active statorique à la valeur désirée ainsi que de fixer le facteur de puissance, en évitant la dégradation de l'énergie.

Les résultats ont montré, d'une manière générale, une poursuite parfaite de la consigne pour les différentes grandeurs imposée tout en gardant une meilleur précision du contrôle des bonnes performances, ce qui est reflété par une très bonne régulation des puissances, statoriques (active et réactive).

Enfin en analysant les différents résultats obtenus, la commande linéaire par les (PI) aboutit, globalement, à des meilleures performances.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuées à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.

Annexe

Paramètres de la MADA:

$$\mathbf{P} = 1.5 \text{ (MW)}$$

$$\mathbf{R}_s = 0.012(\Omega) ;$$

$$\mathbf{R}_r = 0.021(\Omega) ;$$

$$\mathbf{L}_s = \mathbf{L}_r = 0.0137 \text{ (H)} ;$$

$$\mathbf{M} = 0.0135 \text{ (H)} ;$$

$$\mathbf{P} = 2 ;$$

$$\mathbf{f} = 0.071 \text{ (N.m.s/rd)} ;$$

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de la chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentations à vitesse variable connecté directement au réseau à travers le stator et via une interface d'électronique de puissances à travers le rotor.

Pour se placer dans le contexte générale du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne.

Les résultats ont montrés, d'une manière générale, une poursuite parfaite de la consigne pour les différentes grandeurs imposée tout en gardant une meilleur précision du contrôle des bonnes performances, ce qui est reflété par une très bonne régulation des puissances, statoriques (active et réactive).