

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

MESSAI ABDENEBI

pour l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique option Machine électrique

Thème

Etude d'une chaine éolienne associée aux convertisseurs multiniveaux

Proposé par : D.kouchih

Année Universitaire 2013-2014

ملخص :

يتركز هذا العمل المقدم على دراسة السلسلة المكونة من مقوم ذو ثلاث مستويات و موج ذو ثلاث مستويات وماكنة الاتزامني مزدوجة التغذية في توربين الطاقة الهوائية
قمنا بدارسة تقنية الحقل الموجه بتوجيه حقل الجزء المتحرك للحصول على استقلالية التحكم في كل حقل و العزم المولد بالنسبة للمحرك
و بتطبيق كل من تفنيتي تعديل طول النبضة وطريقة التحكم بواسطة التيار فيما يخص كل من موج و مقوم
كلمات مفتاحية : ماكنة اللاتزامني مزدوجة التغذية موج متعدد المستويات تقنية الحقل الموجه

Résumé :

Ce travail a pour but l'analyse et la commande de la cascade d'un redresseur à trois niveaux- l'onduleurs à trois niveaux machine asynchrone à double alimentation dans une chaine éolienne, nous avons élaboré des modèle de commande pour chacune des éléments de la cascade, la technique commande par MLI à traingulo-sinusiodale est appliquée pour l'onduleur Alors que le redresseur est commandé par la technique hystérésis en courant .La commande vectorielle en puissance avec orientation de flux est appliquée pour la machine.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation -onduleur à trois niveaux - redresseur à trois niveaux- commande vectorielle .

Abstract:

The pupose of this work is the analysis and control of the cascaded three level converter-three level inverter double fed induction machine. we modeled each element of the cascading, two techniques control by the PWM and control by current hysteresis are applied for the inverter and converter, the control by field oriented with the rotor field orientation is introduced for the machine, well attended a linear regulating by regulators PI.

Key Words :

Double fed induction machine- three level converter- three level inverter- control by field oriented.

Liste des figures

Figures du chapitre I

FigI. Principe de la théorie de Betz.....	11
Fi I.2 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	11
Fig. I. 1 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	13
Fig. I. 2 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).....	14
Fig. I. 3 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).....	15
Fig. I. 4 : Aérogénérateur à axe horizontal.....	16
Fig. I. 5 : Eléments constituant une éolienne.	17
Fig. I. 6: Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.....	18
Fig. I. 7 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	20
Fig. I. 8 : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.	20
Fig. I. 9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.	22.
Fig. I. 10 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.....	22
Fig. I. 11 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	23
Fig. I. 12 : Structure du rotor de la MADA.....	24
Fig. I. 13 : Modes de fonctionnement de la MADA.	25
Fig. I. 14 : Zones de contrôle de la MADA.....	26
Fig. I. 15 : Structure d'une éolienne à base de MADA en utilisant plusieurs modules de convertisseurs statiques à deux niveaux en parallèle.	28
Fig. I. 16 : Structure d'une éolienne à base de MADA en utilisant un convertisseur NPC multiniveaux.....	29
Fig. I. 18 : Structure d'une éolienne à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent en utilisant un convertisseur NPC multiniveaux.	30
Fig. I. 19 : Ondulation de courant en fonction du rapport cyclique pour différents convertisseurs multi-niveaux.....	31
Fig. I. 21 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives.	32
Fig. I. 22 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues.	33

Figures du chapitre II

Fig. II. 1: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	37
Fig II.2 : Schéma de la turbine éolienne.....	37
FigII.3 : Coefficient de puissance.....	38
Fig .II.4 : Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.....	40
Fig II.5 : Schéma bloc du modèle de turbine.....	40
Fig II.6 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.....	41
FigII.7 : Repère référentiel de PARK.....	44
FigII.8 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	48
Fig II.9 : Représentation d'un GTO	48
Fig II.10.1 profil du vent.....	51
Fig II.10.2 vitesse mécanique.....	51
Fig II.10.3 coefficient de puissance.....	52
Fig II.10.4 couple mécanique.....	52
Fig II.11 : Simulation de la MADA avec application d'un couple résistant de.....	53

Figures du chapitre III

Fig III.1: Principe de la commande vectorielle.....	58
Fig III.2 : position du référentiel par rapport au flux.....	59
Fig III .3: Schéma bloc de la MADA.....	61
Fig III.4: Schéma bloc de la commande directe.....	62
FigIII.5 : Schéma bloc de la commande indirecte.....	63
Fig III.6 : Schéma bloc de la régulation du courant.....	64
Fig III.7: Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte.....	65
Fig. III.8.a puissance active générée P_{ai} et la puissance aérodynamique.....	66

Fig. III.8.b puissance réactive.....	67
Fig III.8.c. couple électromagnétique.....	67
Fig. III.8.d. courant statorique.....	68.
Fig. III.8.d. tension rotorique.....	68
Fig. III.8 .d .1. Courant statorique zoomé	69

Figures du chapitre IV

Fig.IV.1 cascade redresseur – onduleur et moteur.....	70
Fig.(IV.2) Filtre intermédiaire de la cascade redresseur – onduleur et moteur et son graphe informationnel.....	71
Fig IV.3 : Structure générale de l’onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	73
Tableau IV.4. Grandeurs électriques correspondantes à chaque configuration d’un bras de l’onduleur à trois niveaux.....	74
Fig IV.5 : Les différentes configurations possibles d’un bras d’onduleur à trois niveaux.....	78
Fig IV.3 : La tension simple V_a et son spectre d’harmonique de l’onduleur à trois niveaux commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses.....	79
Fig IV.6 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.....	80
Fig IV.7 : Diagramme de Fresnel sur les grandeurs complexes d’entrée du redresseur.....	82
FigIV.8 Modélisation d’une phase du réseau électrique.....	82
Fig IV.10 : Le courant du réseau de la phase 1 et sa référence.....	83
Fig IV.11: Les tensions redressées U_{C1} , U_{C2} et la différence.....	84
FigIV.12: La tension redressée U_C	85
Fig IV.13 : Le courant redressé i dans la charge résistive.....	86
Fig IV.14: Les courants redressés i_{red1} , i_{red2}	86
Fig IV.15: Le courant redressé i_{red0}	86
Fig IV.16 : La tension du réseau V_{res} et le courant d’une phase i_{res}	86
Fig. IV.17.a puissance active gène re foi (-1) et la puissance aérodynamique.....	88
Fig. IV.17.b puissance réactive.....	88
Fig IV.17.c. couple électromagnétique.....	89
Fig. IV.17.d. courant statorique.....	89

Fig. IV.17 .d .1. Courant statorique zoomé ($t=5.785$ $t=5.825$).....	89
Fig. IV.17 .e.1 le courant statorique et la tension réseau.....	90.
Fig. IV.17 .e 2. Zoom sur le courant statorique et la tension réseau.....	90
Fig. IV.17.e tension rotorique.....	90
IV.17 .f. Zoome tension rotorique a ($t=3.95$ $t=4.25$).....	91
Fig. IV. 17 : Résultats de simulation de la commande du système éolien par la stratégie vectorielle.....	91

Chapitre II. Modélisation des organes de la chaîne éolienne	
II.1. Introduction	37
II.2. Modélisation d'une turbine éolienne.....	37
II.2.1. Modèle des turbine.....	37
II.2.2. Modèle du multiplicateur	39
II.2.3. Modèle de l'arbre mécanique.....	39
II.3 Fonctionnement d'une centrale éolienne.....	39
II.4 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	40
II.5 Modélisation de la machine asynchrone double alimentation (MADA).....	41
II.5.1 Hypothèses simplificatrices.....	41
II.5.2 Equations électriques de la machine.....	42
II.5.3 Les équations magnétiques	43
II.5.4 Equation mécanique	43
II.6 Modèle de la MADA dans le repère de PARK	43
II.6.1 Intérêt de la transformation de PARK	44
II.6.2 Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....	45
II.7 Choix du référentiel.....	46
II.7.1 Référentiel lié au stator	46
II.7.3 Référentiel lié au champ tournant.....	46
II. 8 Mise sous forme d'équations d'états	47
II. 9 Modélisation de l'onduleur de tension.....	47
II 9.1 Commande par modulation de large ur d'impulsion (MLI).....	50
II.10 Simulation et interprétation des résultats	51
II.10.1 Résultats de simulation et interprétation du modèle de la turbine.....	51
II.10.2 Résultats de simulation et interprétation <i>MADA</i>	52
II.11 Conclusion	54

Chapitre III. Stratégie De Commande Du système Éolien Étudié

III.1. Introduction.....	55
III.2. But et principe de la commande vectorielle.....	56
III.3. Variantes de la commande vectorielle.....	56
III.4. Les types de la commande vectorielle.....	57
III.5 Commande vectorielle de la MADA	58
III.5.1 Procédé d'orientation du flux	59
III.5.2 Commande indirecte de la MADA	62
III.5.3 Simulations et Interprétations des Résultats.....	64
III.6.Résultats de simulation de la stratégie de commande vectorielle.....	65
III.6 Conclusion.....	69

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire a été structuré de la façon suivante :

On a d'abord dressé un état de l'art sur la conversion éolienne étudiée. La bibliographie consultée à ce sujet fait ressortir que la machine asynchrone à double alimentation (MADA) reste la machine la plus utilisée dans le domaine des grandes puissances, notamment dans l'éolien.

Après cet aperçu sur l'état de l'art de conversion éolienne, on a présenté son modèle mathématique des éléments constitués la chaîne de conversion éolienne. Ce modèle, traduit sous forme d'équations d'état, a été simulé en utilisant MATLAB. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

L'alimentation des enroulements rotoriques est assurée par un onduleur triphasé à deux niveaux dont on a donné le modèle et les résultats de sa simulation.

Afin de découpler le flux et le couple et rendre ainsi le comportement de la machine asynchrone à double alimentation similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, on a étudié la commande vectorielle. On a alimenté le rotor par une cascade constituée par un redresseur triphasé à M.L.I à deux niveaux et un onduleur triphasé à deux niveaux, tandis que le stator est directement connecté au réseau, les résultats de simulation montrent que la puissance générée par la machine MADA n'est pas en bon accord avec la puissance générée par la turbine, donc on a changé la cascade précédente avec une autre à trois niveaux, alors, on a eu des résultats acceptables.

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire de Master peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à son amélioration, d'où les idées suivantes sont proposées :

- Application de nouvelles commandes pour l'énergie renouvelable ;
- Etude de l'angle de charge existant entre la f.m.m statorique et rotorique ;
- Etude d'autres alimentations de la MADA.
- Etude des tensions U_{C1} et U_{C2} d'entrée de l'onduleur qui posent le problème de flottement du point milieu.

près. Une partie de cette puissance a $\frac{s}{s+1}P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

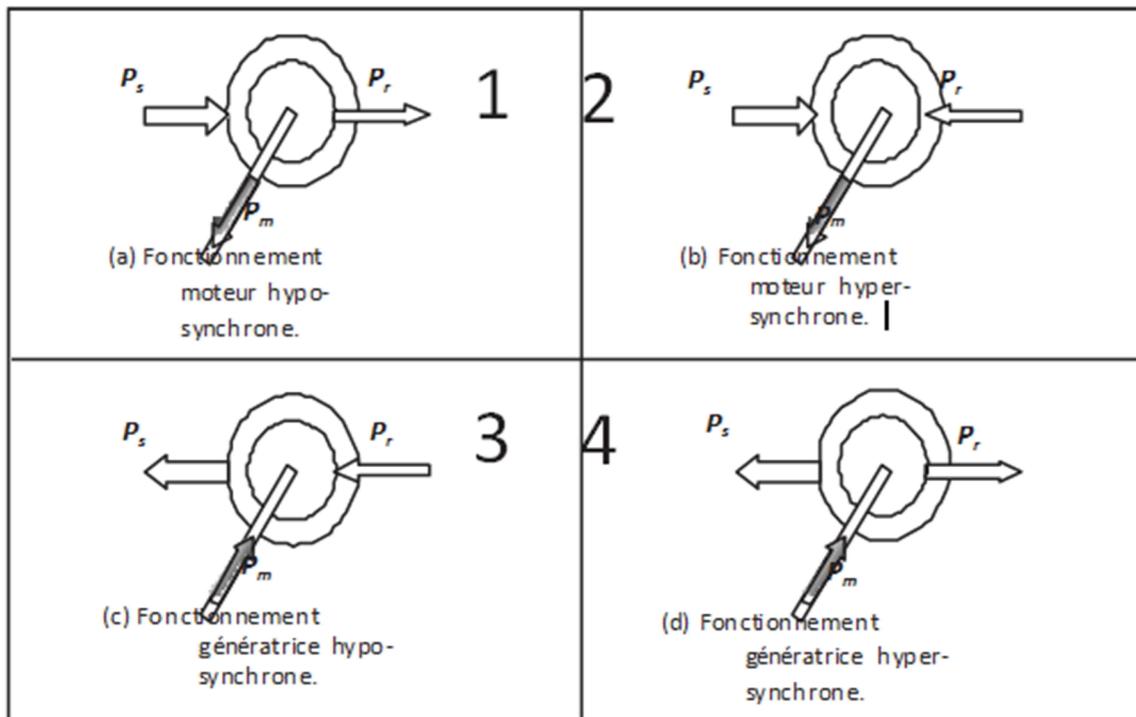


Fig. I. 15 : Modes de fonctionnement de la MADA.

I.6.5.3. Avantage des éoliennes à base de la MADA

La variation de la vitesse acceptable pour un fonctionnement stable de la **MADA** est de +/- 30 % (correspondant à la valeur du glissement s) autour de la vitesse de synchronisme; ceci va limiter la puissance circulant dans le circuit rotorique à $(s.P_s)$ [1]. De ce fait, les convertisseurs statiques utilisés sont dimensionnés pour faire transiter uniquement la puissance de glissement; c'est à dire au maximum 30% de la puissance nominale de machine. Par conséquent, les éoliennes à base de la **MADA** procurent ainsi plusieurs avantages :

- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [1],
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré,
- Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri,
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone [1]. En effet, les puissances active et

réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la MADA [1], [2].

La caractéristique (puissance, vitesse) mesurée d'une éolienne de 1,5 MW à base de MADA se distingue par trois zones de fonctionnement (**Fig. I.16**).

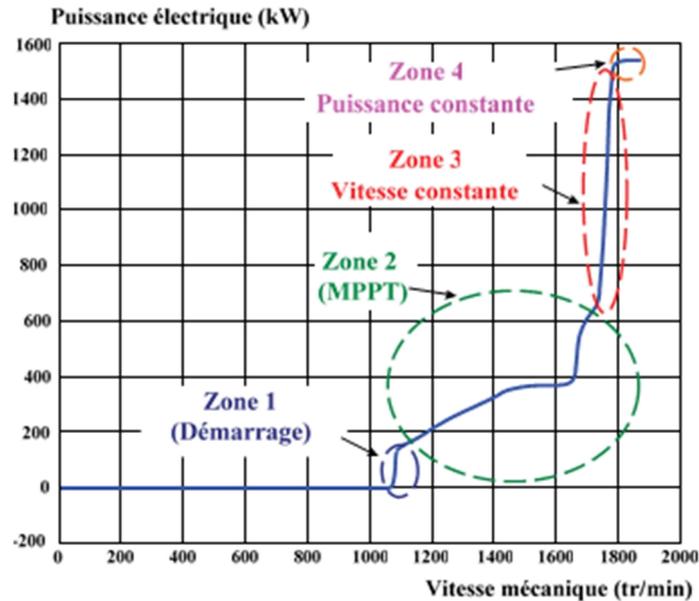


Fig. I. 16 : Zones de contrôle de la MADA.

- La zone 1 correspond au démarrage de l'éolienne : celle-ci commence à produire de la puissance à partir de la vitesse de 1050tr/min,
- La zone 2 est la zone pour laquelle la vitesse de la génératrice est adaptée afin d'extraire le maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking: MPPT). Ceci est réalisé grâce à un algorithme MPPT permettant d'imposer un couple de référence. Néanmoins, l'angle d'orientation des pales est maintenu constant,
- La zone 3 pour laquelle la vitesse de la génératrice est maintenue constante et égale à 1750tr/min. Cette vitesse est imposée par une action sur l'angle d'orientation des pales ou par une régulation en boucle fermée pour permettre un fonctionnement hyper synchrone [1]. Dans ce cas, la puissance fournie au réseau est proportionnelle au couple (d'origine éolien) appliqué,
- La zone 4 correspond à la limitation de la puissance générée à sa valeur maximale (1.5MW) grâce au contrôle de l'angle d'orientation des pales.

I.7. Topologie des convertisseurs utilisés pour les éoliennes de grande puissance

Ces dernières années, la conception des éoliennes s'est orientée vers la conception des prototypes d'éolienne qui dépasse le 1 MW. Cette tendance s'est concrétisée avec la conception et l'installation de plusieurs prototypes d'éoliennes à savoir l'E112 d'Enercon (4,5 MW en 2002) [1], la M5000 de REpower et Multibrid (5 MW en 2004) et l'E126 d'Enercon (6MW) en 2007 [Rap10]. Le tableau I.1 montre quelques prototypes disponibles ou en cours de développement des éoliennes de grande puissance, destinées principalement aux applications offshores [5], [1] (le prototype de 10-MW fabriqué par « Clipper Wind Power » va être utilisé dans les fermes offshores au Royaume Uni en 2011 [1]). Comme l'illustre le tableau, les prototypes de 6 MW sont déjà disponibles dans le marché, alors que des modèles de 10MW vont être commercialisés dans un futur proche.

Puissance nominale	Générateur	Fabricant	Etat
10MW	MADA	Wind tec	En-développement
10MW	MSAP	Clipper	En-développement
7.5MW	MS	Enercon	En-développement
6MW	MS	Enercon	Disponible
5MW	MSAP	Areva	Disponible
5MW	MSAP	Windtec	En-développement
5MW	MSAP	Xeme-cDarwind	En-développement

T

Tableau I.1: Eoliennes de grande puissance pour les applications offshore.

Compte tenu de l'augmentation de la puissance de ces éoliennes offshores, la connexion des modules de convertisseurs basse tension n'est plus convenable. A titre d'exemple, un convertisseur statique à deux niveaux de puissance 7,5MW connecté au réseau de tension 690V doit délivrer un courant de 6300A. En outre, en raison de la chute de tension importante dans les câbles, les modules des convertisseurs statiques doivent être installés dans la nacelle proche du générateur [1] [1], en utilisant une grande partie de l'espace disponible. Ceci augmente considérablement le poids total de la nacelle.

I.7.1. Convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de la MADA

Tel qu'il est mentionné auparavant, le fonctionnement à vitesse variable de la **MADA** est atteint avec un convertisseur statique (back-to-back) conçu pour transiter environ 30% de la puissance nominale. Par conséquent, le prototype de l'éolienne commercialisé de 6 MW est équipé d'un convertisseur statique (back-to-back) de 2MW conçu pour un fonctionnement à basse tension (690V). Un transformateur élévateur est généralement utilisé pour se connecter au réseau.

Plusieurs convertisseurs sont conçus spécialement pour le contrôle des éoliennes à base de MADA, par exemple, la topologie refroidie à l'eau « water-cooled Prowind » de la société Convertteam » [1]. Ces convertisseurs sont conçus pour fonctionner à la basse tension (690 V), avec une technologie modulaire. Celle-ci permet une connexion de plusieurs convertisseurs (back-to-back) en parallèle (**Fig. I.15**) pour augmenter la puissance totale. L'ACS800 est une autre topologie de convertisseurs fabriquée par ABB avec une gamme de puissance (13.8MW) et de tension (525–690 V). Cette topologie est utilisée spécialement pour le contrôle des éoliennes à base de la **MADA** qui arrive jusqu'à 6 MW [1].

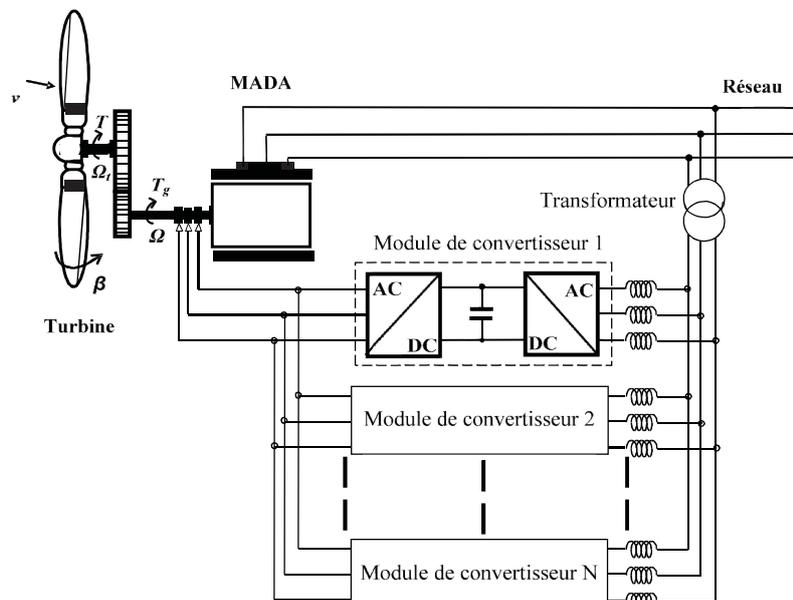


Fig. I. 17 : Structure d'une éolienne à base de MADA en utilisant plusieurs modules de convertisseurs statiques à deux niveaux en parallèle.

La densité de puissance de ces convertisseurs utilisés généralement pour le contrôle des éoliennes à base de la **MADA** n'est pas appropriée aux applications offshore, où le poids et l'espace sont d'une importance primordiale. A titre d'exemple, le Convertisseur AC800 a une densité de puissance d'environ $0,43 \text{ MW/m}^3$ [1].

La densité de puissance peut être augmentée en utilisant une topologie basée sur l'utilisation des convertisseurs matriciels [1], éliminant ainsi le bus continu. Néanmoins, l'absence

du bus continu permet un couplage direct entre l'éolienne et le réseau ce qui induit de sérieux problèmes lors d'une défaillance du réseau électrique (ex : creux de tensions) [1].

Une topologie basée sur l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux à structure NPC (**Fig.I.12**) pour le contrôle des éoliennes à base de **MADA** a été discutée dans [1], et . L'avantage principal de celle-ci réside dans le fait que le convertisseur est directement relié au réseau de moyenne tension (avec des tensions comprises entre 1et5 kV) : ce qui permet de réduire énormément les courants traversant le convertisseur tout en augmentant la puissance transitée [1].

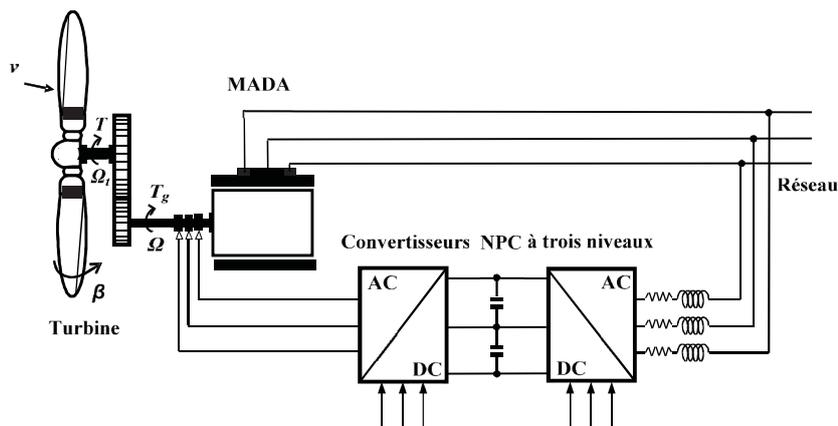


Fig. I. 16 : Structure d'une éolienne à base de MADA en utilisant un convertisseur NPC multiniveaux.

I.7.2. Intérêt des convertisseurs multi-niveaux pour la conversion éolienne

Les convertisseurs à deux niveaux de tension permettent de transiter la puissance produite par les aérogénérateurs au réseau électrique basse tension par le biais du courant car la tension de sortie de ces convertisseurs est limitée par la tension de blocage de ses composants à semi-conducteurs.

Une alternative, mentionnée précédemment, consiste à utiliser la structure modulaire des convertisseurs à deux niveaux de tension pour permettre le transit d'une puissance élevée en la partageant sur le nombre des convertisseurs (back-to-back) mis en parallèle. Cependant, plusieurs inconvénients sont présents :

- Impossibilité d'augmenter la puissance par le biais d'une tension plus élevée que la limite supportée par les composants à semi-conducteurs,

- Multiplication du nombre des convertisseurs (back-to-back) utilisés qui implique l'augmentation du nombre d'interrupteurs ce qui rend cette configuration coûteuse,

- Augmentation des pertes par commutation ce qui réduit ainsi le rendement de l'éolienne,

- Multiplication des filtres de connexion au réseau ce qui rend cette solution encombrante,

- Nécessité d'un transformateur élévateur pour se connecter aux réseaux de moyenne ou

haute tension,

Augmentation des pertes dans les lignes à cause du fort courant traversant celles-ci. La meilleure solution pour augmenter la puissance transitée par les convertisseurs est d'augmenter la tension en limitant les courants et réduire ainsi les pertes [1]. C'est pour cela que les convertisseurs multi-niveaux de moyenne et haute tension semble être une bonne alternative, où les convertisseurs NPC à trois niveaux occupent une place privilégiée grâce au bon compromis entre performance et prix. Les avantages que procure cette solution sont :

L'augmentation de la puissance par le biais de la tension car la tension de blocage de chaque interrupteur correspond à la moitié de la tension du bus continu [1],

La possibilité de connexion aux réseaux de moyenne tension grâce à l'augmentation de la tension de sortie des convertisseurs en éliminant ainsi le transformateur élévateur de couplage. La réduction du contenu harmonique des courants de sortie comparativement aux convertisseurs à deux niveaux (**Tableau I.2**)

Pourcentage de la puissance nominale	THD des courants de sortie du convertisseur à 2 niveaux	THD des courants de sortie du convertisseur NPC à 3 niveaux
100%	0.81%	0.7%
70%	1%	0.85%
50%	1.6%	1.35%
25%	2.9%	2.3%
15%	5.5%	4.1%

Tableau I.2 : THD pour les courants de sortie d'un convertisseur à deux et à trois niveaux NPC de caractéristiques semblables.

La réduction de l'ondulation de courant en choisissant des convertisseurs avec un nombre élevé de niveaux de tension (**Fig. I.21**) [1].

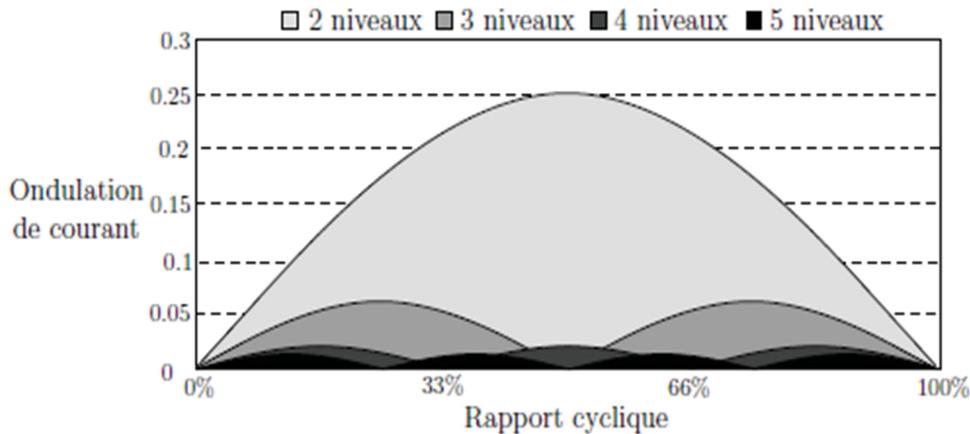


Fig. I. 21 : Ondulation de courant en fonction du rapport cyclique pour différents convertisseurs multi-niveaux.

I.7.3. Tendances des futurs convertisseurs statiques

La technologie des convertisseurs statiques du futur utilisés pour la génération éolienne de forte puissance doit adapter leur puissance à celle des aérogénérateurs futurs (5 à 10MW). En effet, des travaux de recherche récents ont déjà montré la possibilité d'augmenter la densité de puissance [2], [5]. L'industrie des futurs convertisseurs repose sur le compromis performances-prix. Deux créneaux de recherche et de développement sont envisageables. Le premier consiste à développer de nouveaux composants de puissance qui peuvent augmenter la densité de puissance, à titre d'exemple « l'IGBT à inversion de conduction (reverse-conducting bimode IGBT) » qui permet d'augmenter la densité de puissance jusqu'à 50% [1]. Le second repose sur le développement de nouvelles topologies de convertisseurs. Dans ce contexte, un convertisseur hybride à cinq niveaux a été développé dans [1] pour le but d'augmenter la densité de puissance, dont des résultats expérimentaux sont obtenus avec une puissance de 6MW.

I.8. Fermes éoliennes

Le regroupement d'un ensemble d'éoliennes à vitesse variable ou à vitesse fixe constitue une ferme éolienne on shore ou off-shore. Deux architectures de connexion des éoliennes au réseau électrique peuvent être distinguées. La première consiste à les connecter au réseau au moyen des liaisons en tensions alternatives à travers un transformateur (Fig. I.24).

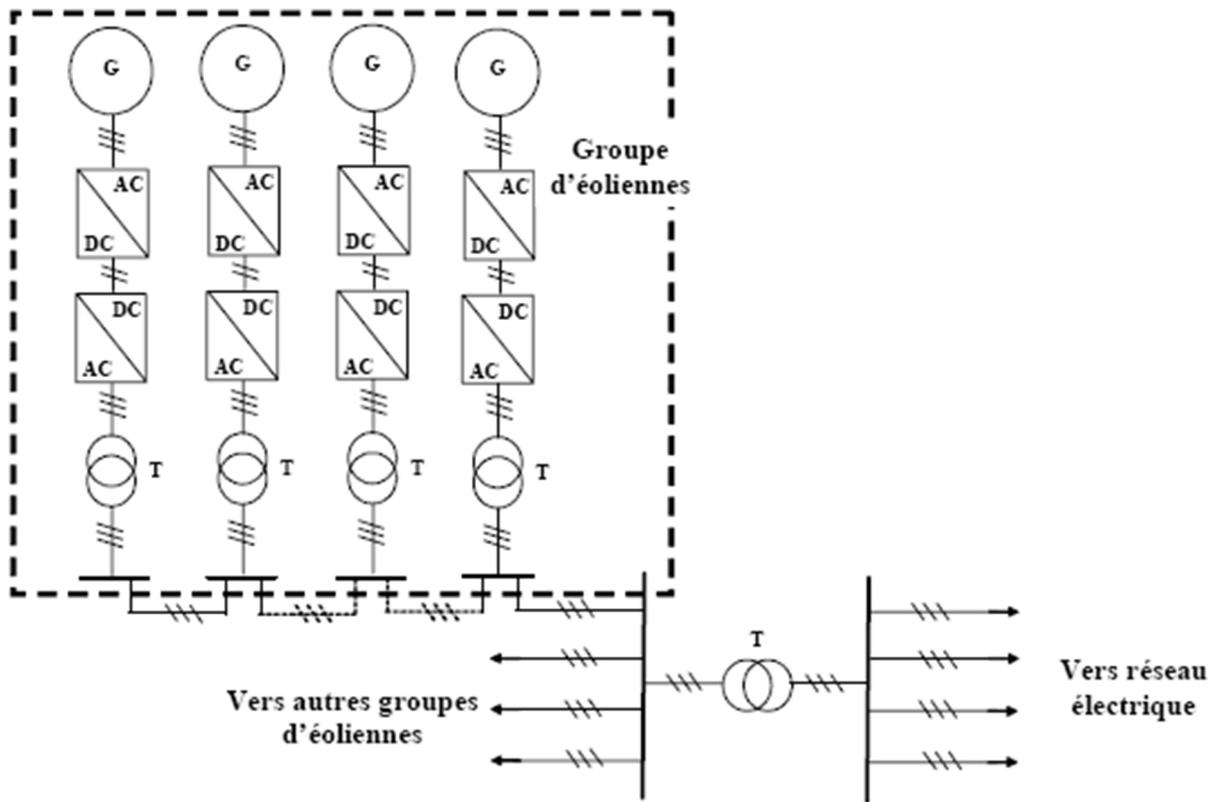


Fig. I. 25: Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives [5].

La seconde architecture repose sur la connexion des éoliennes entre elles via une liaison en tension continue dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la génératrice (**Fig. I.25**). Ensuite un seul convertisseur continu - alternatif, permet de relier l'ensemble des éoliennes au réseau électrique. Cette architecture, envisagée particulièrement pour les fermes éoliennes off-shore, permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement [5] [3].

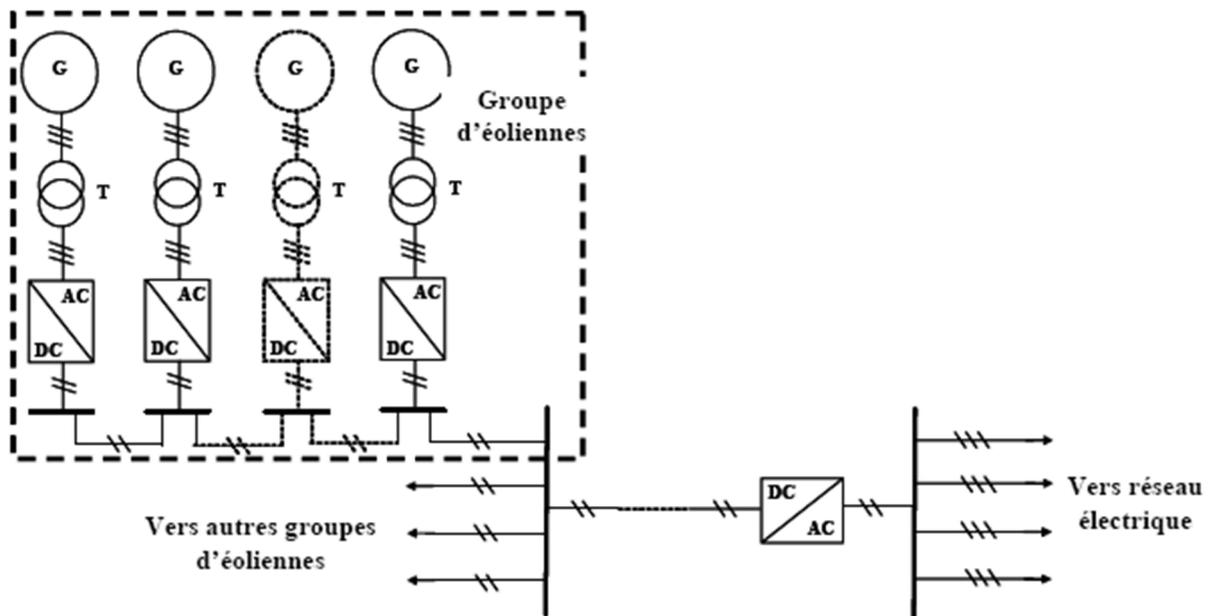


Fig. I. 25 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [5].

I.9 Contraintes de connexion des fermes éoliennes

Aujourd'hui le taux de pénétration des fermes éoliennes devient de plus en plus significatif dans les réseaux. La puissance produite par ces fermes définit le réseau auquel elles vont être connectées. En effet, le raccordement de la ferme au réseau public de transport s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la HTB), si la puissance produite de la ferme est supérieure à 12 MW. Dans le cas contraire, (la puissance produite de la ferme est inférieure ou égale à 12 MW) le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20 kV (domaine de la HTA et de la BT) [2],

Pour les deux types de raccordement, plusieurs problèmes liés à l'instabilité de réseau mènent les fermes éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique [5] à cause de:

- La difficulté de prévision de la production de puissance à cause de son profil aléatoire,

- L'absence de réglage des puissances active et réactive,

- L'absence de réglage (puissance active - fréquence),

- L'absence de réglage (puissance réactive - tension),

- La sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies,

- La sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent.

C'est pour cela que des réglementations techniques pour le raccordement des installations de

production au réseau électrique, entres autres les fermes éoliennes, sont bien prescrites, dans des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés.

Le décret [4] et l'arrêté [3] présentent quelques réglementations générales pour le raccordement des installations au réseau électrique français [6]:

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :

- Les réglages primaire et secondaire de la tension ;
- Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
- Le fonctionnement en réseau séparé ;
- Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.

Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport. L'arrêté [3] précise ces contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs,

Pour les installations de puissance supérieures à 10MW, chaque génératrice électrique doit pouvoir fournir à ses bornes une puissance réactive minimale égale à 0.6 de sa puissance nominale apparente et absorber une puissance réactive égale à 0.2 de la même puissance pour régler la tension au point de raccordement de ces systèmes éoliens.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu les types des aérogénérateurs ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur à vitesse variable. Ensuite, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Deux technologies d'éoliennes de grande puissance les plus couramment installées, ont été exposées en soulignant leurs capacités de réglage de la puissance générée. La première porte sur l'utilisation des machines commandée par le stator à savoir la machine asynchrone à cage et synchrone à aimant permanent. Une interface d'électronique de puissance, constituée de deux convertisseurs statiques, est utilisée. Ces derniers sont dimensionnés dans ce cas pour transiter la pleine puissance produite par l'éolienne. Un intérêt particulier a été consacré à la technologie d'éoliennes basée sur la machine asynchrone à double alimentation. Cette technologie permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs statiques à 30 % en véhiculant seulement la puissance de glissement. En outre, elle permet un réglage de la puissance réactive.

Les convertisseurs utilisés pour les éoliennes de grande puissance ont été aussi énumérés dans ce chapitre en soulignant l'intérêt particulier d'utiliser les convertisseurs multi-niveaux pour la conversion éolienne.

La dernière partie de ce chapitre a décrit les deux modes de connexion des éoliennes pour former une ferme en se focalisant sur les contraintes et les réglementations définissant les modalités de connexion de ces fermes au réseau électrique.

I.1. Introduction

L'énergie éolienne a été longtemps oubliée alors qu'elle était déjà exploitée depuis l'antiquité avec l'utilisation des moulins à vent. Cependant, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent notamment après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états producteurs d'énergie fossile. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien [1] pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique. Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnent à vitesse variable permettant l'augmentation de la puissance produite. Le développement des convertisseurs statiques et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées. Vu les avantages incontestés de la machine asynchrone à double alimentation pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre. L'utilisation des convertisseurs multiniveaux sera discutée en montrant leurs avantages en terme de réduction du contenu harmonique des courants et tensions de sortie et aussi en terme de réduction de l'ondulation de courant.

I.2 Energie cinétique du vent –conversion en énergie mécanique

I.2.1 Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (*Figure I.23*) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor

V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en

une seconde est[9]:

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

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

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

Soit en remplaçant m par son expression (I.1) dans (I.2):

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

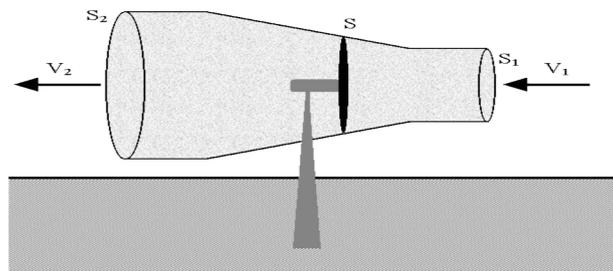


Figure I.. Principe de la théorie de Betz

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

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

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

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

I.2.2 Coefficient de puissance

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.5), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [2].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), Leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient

de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

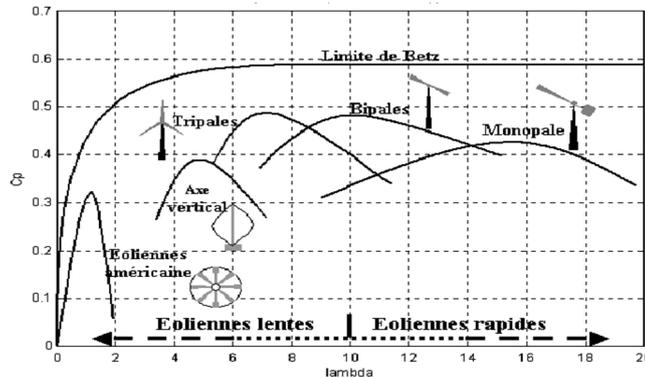


Figure 1.2 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [3].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur.

De plus, leur coefficient de puissance (**Figure 1.2**) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s.

I.2.3 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I-1), (I-4) et (I-5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_m = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.6)$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad \text{et} \quad S = \pi R^2 \quad (I.7)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur

l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_1 R}{V_1 K} \right)^3 \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.8)$$

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent .

I.3. L'aérogénérateur

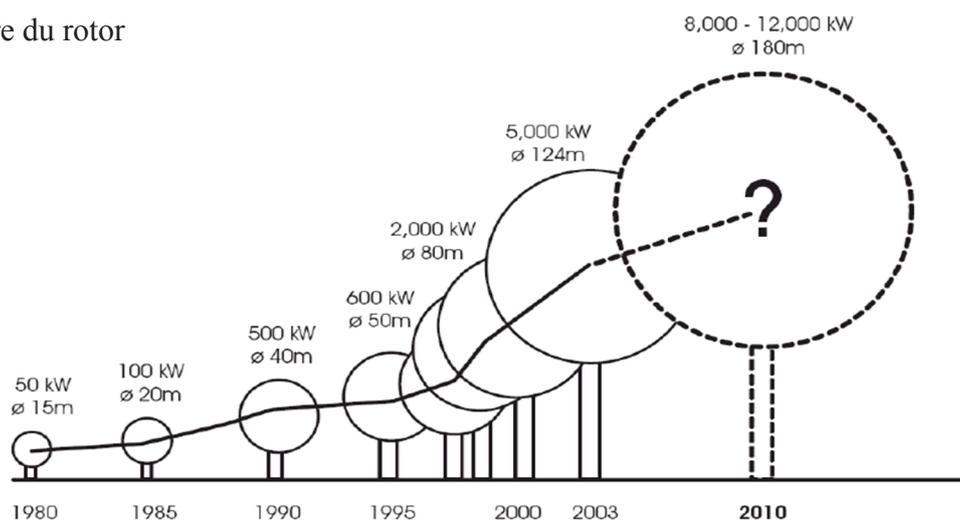
Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [1]:

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 Kw
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

La figure (I.3) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

Ø: Diamètre du rotor



Source : European Wind Energy Report Europe 2005

120 m : 4,5 à 5 MW

Fig. I. 3 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.

I.4 Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [1]

I.4.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924).

I.4.1.1. Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (**Fig. I.4**). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

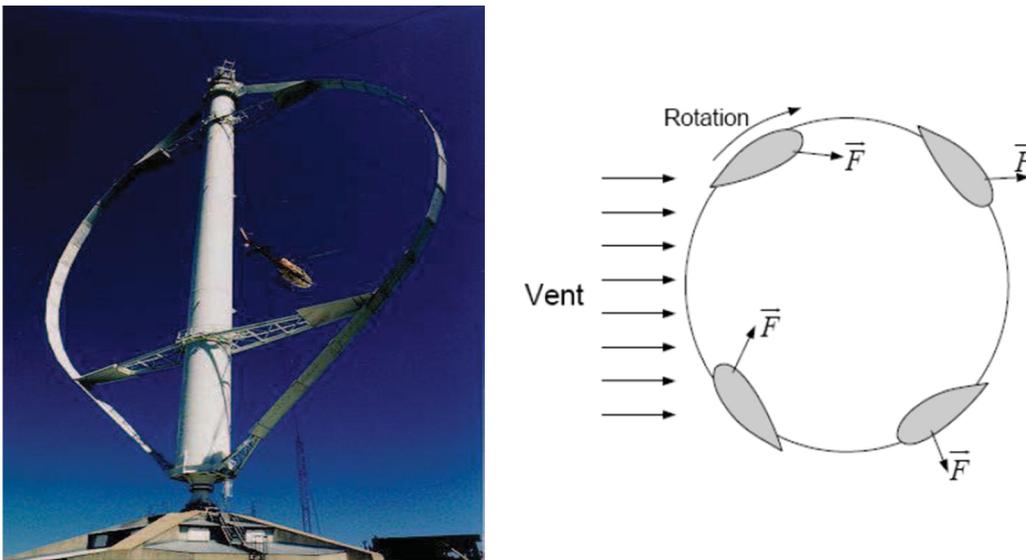


Fig. I. 4 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [1].

I.4.1.2. Aéro-générateurs à rotor de Savonius :

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (**Fig. I.5**).

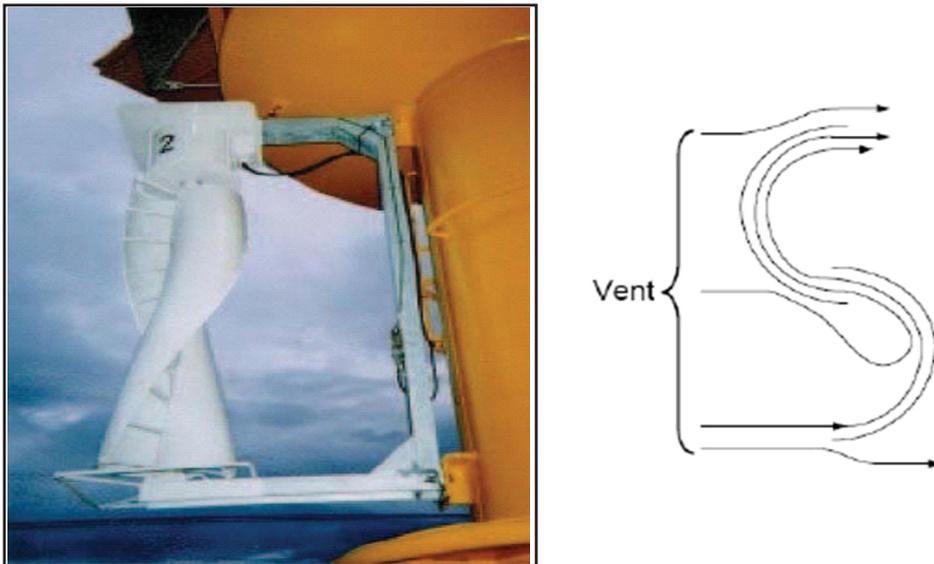


Fig. I. 5 : Aéro-générateur à axe vertical (structure de Savonius) [1]

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.

La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol

I.4.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (**Fig. I.6**) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [1]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé rotation du capteur éolien [1].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.

car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de



Fig. I. 6 : Aérogénérateur à axe horizontal

I.5. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la **figure I.7** [5]

Le mat ou la tour: c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au

sommet du mat se trouve la nacelle.

La nacelle: regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

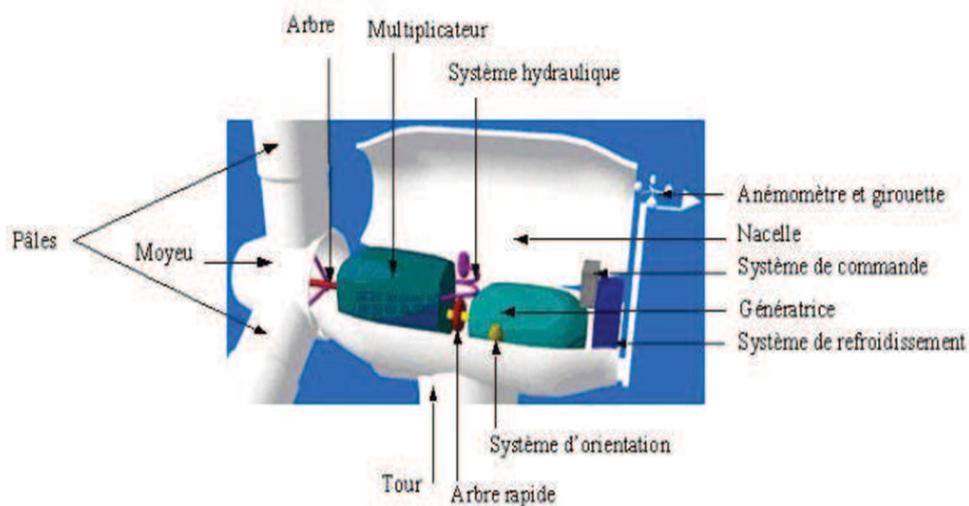


Fig. I. 7 : Eléments constituant une éolienne [5]

Le multiplicateur: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

Le système de refroidissement: se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

La génératrice électrique: c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [1].

Le système de commande: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

L'arbre: qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Le système d'orientation des pâles: qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

I.6. Technologie d'éoliennes de grande puissance

Dans cette section, la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sera brièvement présentée. Les trois technologies d'éoliennes de grande puissance les plus

couramment utilisées seront ensuite discutées en se focalisant sur celle utilisant la machine asynchrone à double alimentation

I.6.1. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique a été largement présenté ces dernières années dans plusieurs travaux [Mul 08], [Ack 05], [Lav 04], [Pal 05], [Fran 05], [Ela 03]. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales ensuite transformée en énergie électrique grâce à des générateurs électriques de type synchrone ou asynchrone.

I.6.2. Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Fig. I.8). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

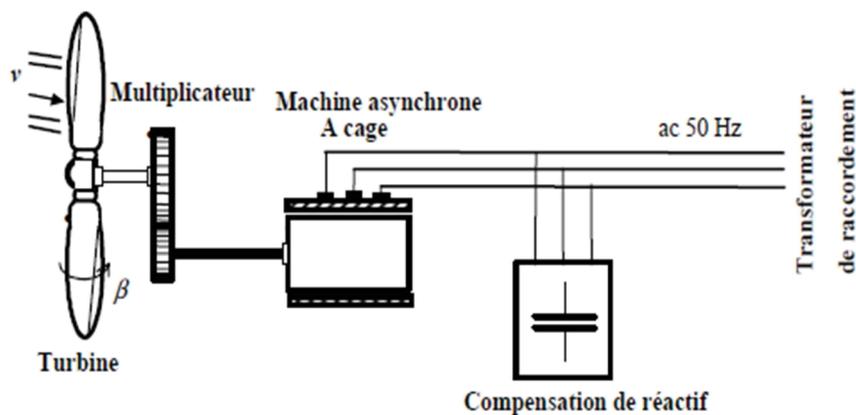


Fig. I. 8: Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes [1]. En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée.

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone, sollicité, Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales
fortement Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau, Impossibilité de réglage de la puissance générée.

I.6.3. Intérêt de la vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la **figure. I.9**. À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités.

Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants [1]:

Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti,
Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n ,
Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut-être affaiblie, Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

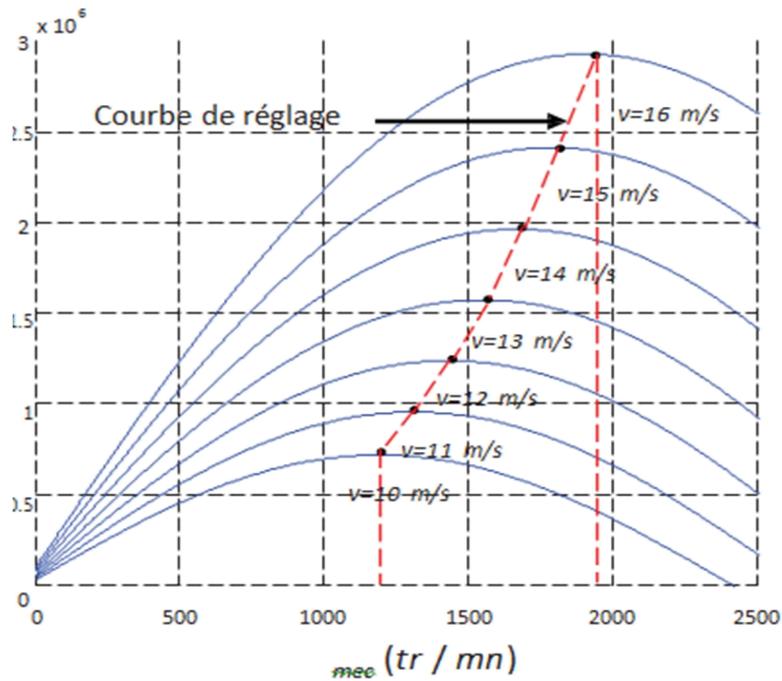


Fig. I. 9 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la **figure I.10**.

Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées. La zone *A* correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance. La zone *B* correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. La zone *C* correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

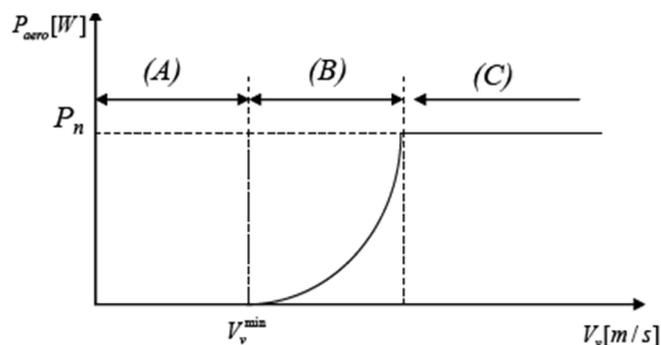


Fig. I. 10 : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

I.6.4. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator

Les machines électrique qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse (**Fig. I.11**), tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur (**Fig. I.12.a**) ou couplée directement à la turbine (**Fig. I.12.b**) si la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse [6] [1].

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

Le premier convertisseur assure le contrôle de la puissance générée en agissant sur la vitesse du générateur. Ceci permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent [1]. Le second permet avec une commande adéquate de délivrer des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau, avec la possibilité de régler le facteur de puissance (puissance réactive). La puissance nominale de la machine détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne.

Malgré le fonctionnement à vitesse variable, cette technologie d'éoliennes présente plusieurs inconvénients :

Le dimensionnement des convertisseurs utilisés est effectué pour transiter la totalité de la puissance échangée entre la machine et le réseau,

Le dimensionnement des filtres est également réalisé pour transiter la puissance totale.

Cela engendre des problèmes de conception, d'encombrement et également une répercussion sur le coût [1],

L'augmentation des pertes des convertisseurs de puissance avec l'augmentation de la puissance des éoliennes, ce qui influe sur le rendement du système éolien et cela, sur la plage entière de fonctionnement.

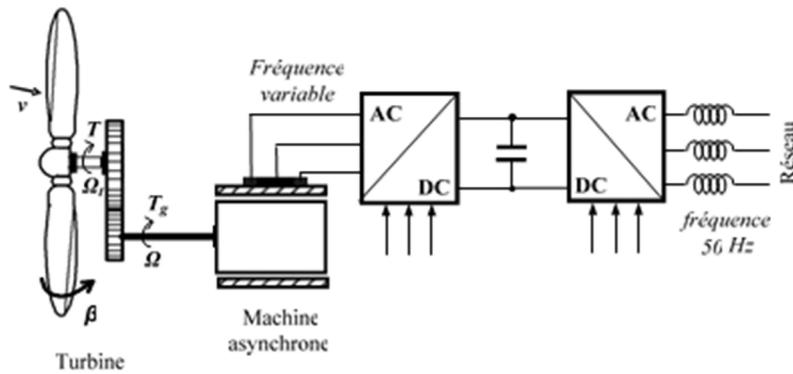
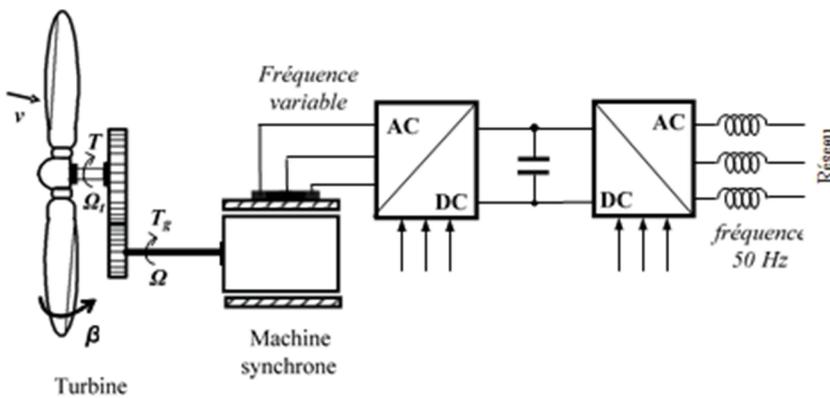
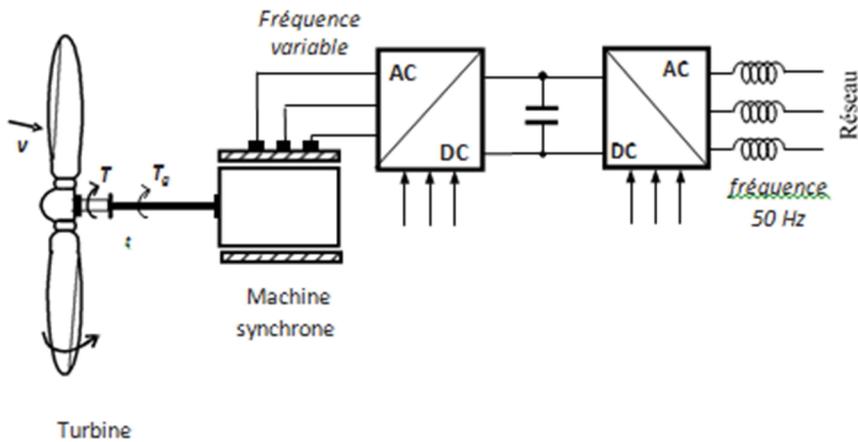


Fig. I. 9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.



(a) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.



(b) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.

Fig. I. 10 : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.

I.6.5. Eolienne vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. En effet, à travers cette section la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisés seront présentés. Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (Convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) (Figure I.11).

Cette machine sera adoptée pour le reste du travail de thèse.

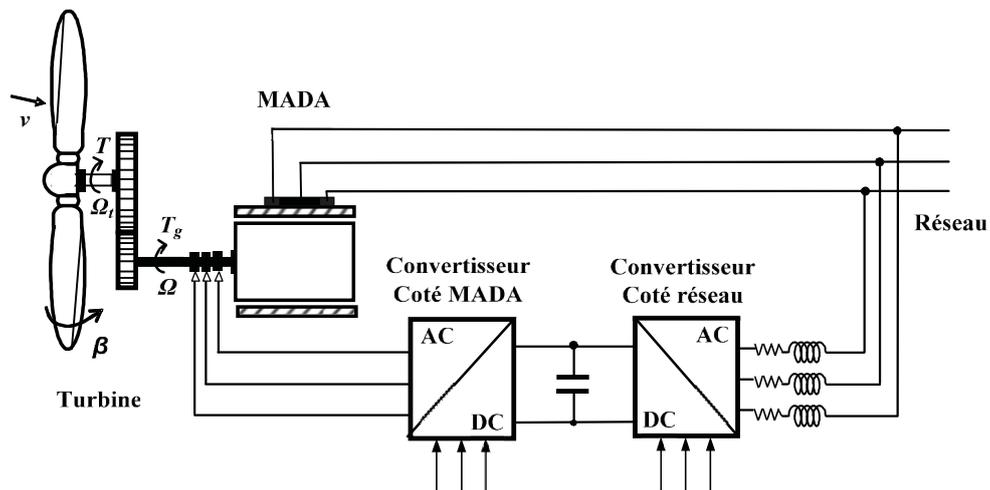


Fig. I. 13 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

I.6.5.1. Structure de la MADA

Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des ballais (Fig. I.14), ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques

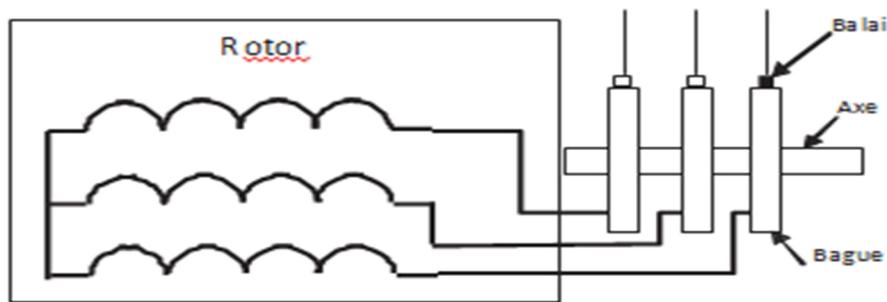


Fig. I. 14 : Structure du rotor de la MADA.

I.6.5.2. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la **MADA** offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (**Fig. I.15**). C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

Lors du fonctionnement de la **MADA** en moteur, la puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière. Durant le mode hypo-synchrone (**Fig. I .15.a**), où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau. Pendant le mode hyper-synchrone (**Fig. I .15.b**), le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la **MADA**.

La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la **MADA** entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme et le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator.

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien. Lorsque la **MADA** fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique P_m à la machine. En mode hypo-synchrone (**Fig. I .15.c**), une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. Par contre, en mode hyper-synchrone (**Fig. I .15.d**), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes

II.1 Introduction

Le système de conversion éolienne à base de la MADA de la **Figure (II.1)** est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu. La présentation des modales dynamiques des sous-ensembles du système éolien ainsi constitués fera l'objet du présent chapitre.

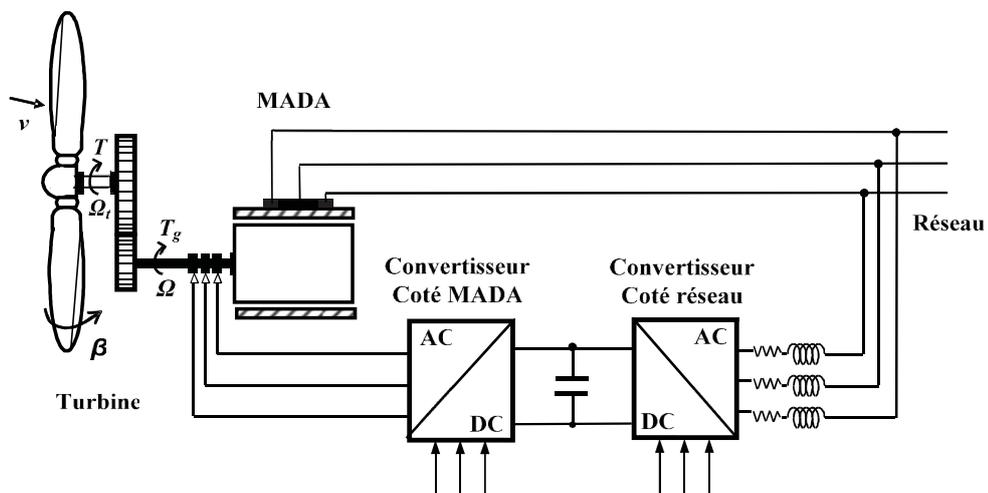


Fig. II. 1: Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

II.2 Modélisation d'une turbine éolienne

II.2.1 Modèle de la turbine

La turbine qui sera modélisée est à axe horizontal. Elle comporte, trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse-turbine, et elle entraîne une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La **(figure II.2)** montre le schéma d'une turbine éolienne [8].

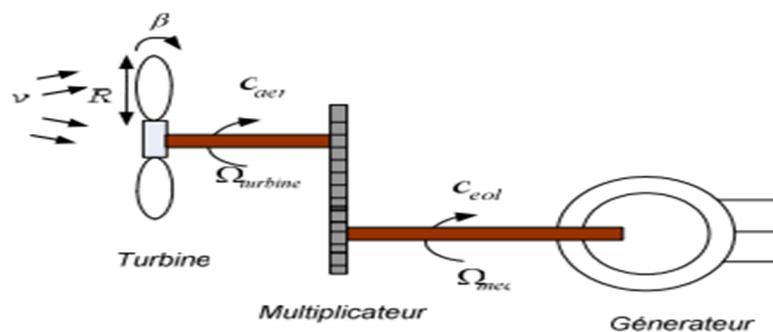


Fig II.2 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3$$

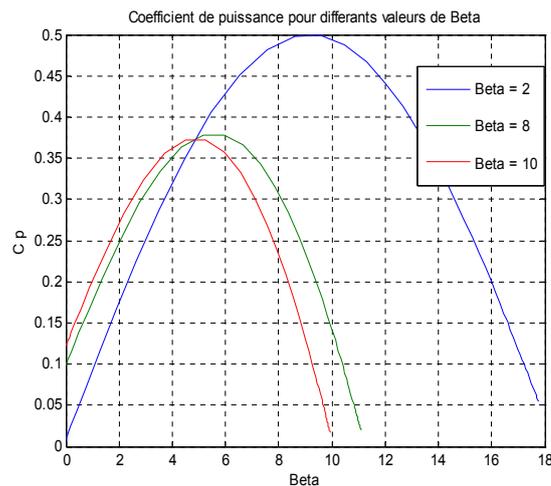
L'expression du C_p en fonction du λ et β est la suivante :

$$C_p = (0,5 - 0,00167(\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)}\right) - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_t R}{V}$$

Où, Ω_t est la vitesse de la turbine, et R est le rayon de la surface balayée.

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β , sont illustrées sur la (**figure II.3**). La valeur maximale de C_p ($C_{pmax}=0.5$) est atteinte pour $\beta=2$.



FigII.3 : Coefficient de puissance.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = C_p \frac{\rho S V^3}{2} \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.2})$$

II.2.2 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Il est modélisé mathématiquement par l'équation suivante:

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (II.3)$$

La vitesse de la turbine est donnée par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.4)$$

II.2.3 Modèle de l'arbre mécanique

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit:

$$J_t = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Sigma \text{ des couple} = C_{mec} \quad (II.5)$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.6)$$

Le couple résistant due aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (II.7)$$

II.3 Fonctionnement d'une centrale éolienne

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse vent V . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolien et commence à tourner.

Une puissance de vent P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice

Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine (**Figure II.4**). On distingue alors deux cas, soit l'éolienne reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée travers ou sans les convertisseurs statiques [7].

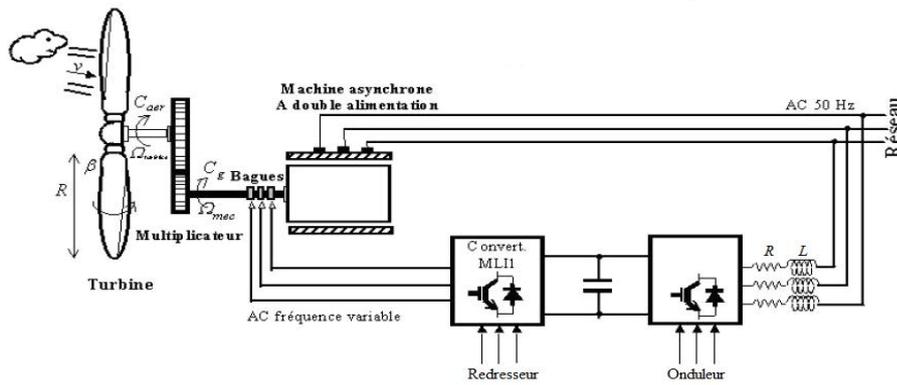


Figure II.4 : Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.

II.4 Schéma bloc du modèle de la turbine

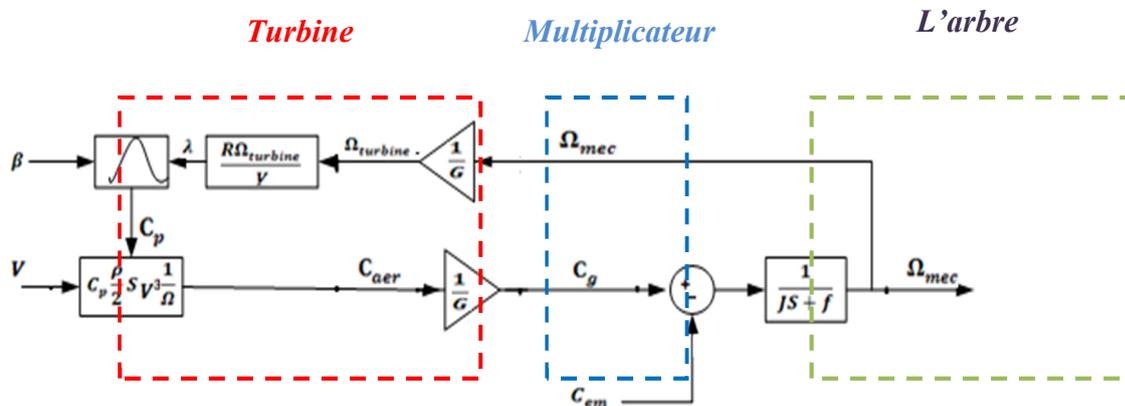


Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de turbine

La turbine génère le couple aérodynamique, qui est appliquée au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont : La vitesse du vent, L'angle d'orientation des pales, La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur.

Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique. Il a donc deux entrées :

- Le couple du multiplicateur.
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

II.5 Modélisation de la machine asynchrone double alimentation (MADA)

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles (*Figure II.6*).

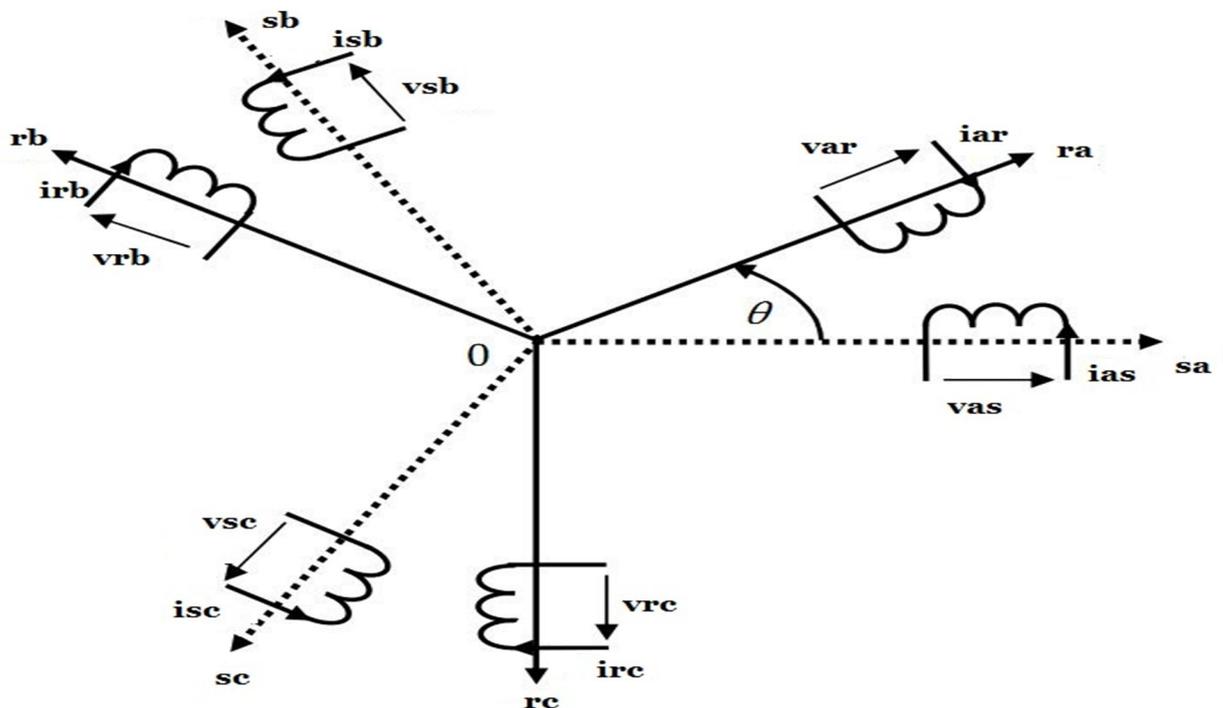


Figure II.6 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

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. Afin d'établir un modèle simple, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices [9], 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'encoche est négligé. Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

II.5.2 Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit [9][11] :

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = R I + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Donc:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

V_s, V_r : Tensions statoriques et rotoriques.

I_s, I_r : Courants statoriques et rotoriques.

φ_s, φ_r : Flux statoriques et rotoriques.

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

II.5.3 Les équations magnétiques

Les flux sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Avec : } [I_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [I_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant II. (2) dans II. (1), on obtient le système suivant:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} ([I_{ss}] [i_s] + [M_{sr}] [i_r]) \\ [V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt} ([I_{rr}] [i_r] + [M_{rs}] [i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.5.4 Equation mécanique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante:

$$C_{em} = P [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] [I_r]) \quad (\text{II.12})$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega) \quad (\text{II.07})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.6 Modèle de la MADA dans le repère de PARK

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq. Le

repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc ; par contre le repère dq est mobile. Il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park. La transformation de PARK est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q) continu (**Figure II.7**)[11] [9].

Les repères de la transformation de PARK des grandeurs statoriques et ceux des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation: $\theta_s = \theta + \theta_r$.

La matrice de transformation est définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

L'angle θ est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\theta)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$$

II.6.1 Intérêt de la transformation de PARK

La transformation de PARK permet de simplifier certaines équations qui dépendent du temps et de l'espace; les grandeurs variables deviennent des grandeurs constantes et indépendantes de la position rotorique.

L'application de la transformation de PARK sur les enroulements statoriques et rotoriques conduit à l'écriture des équations du système comme élaborées ci-dessous.

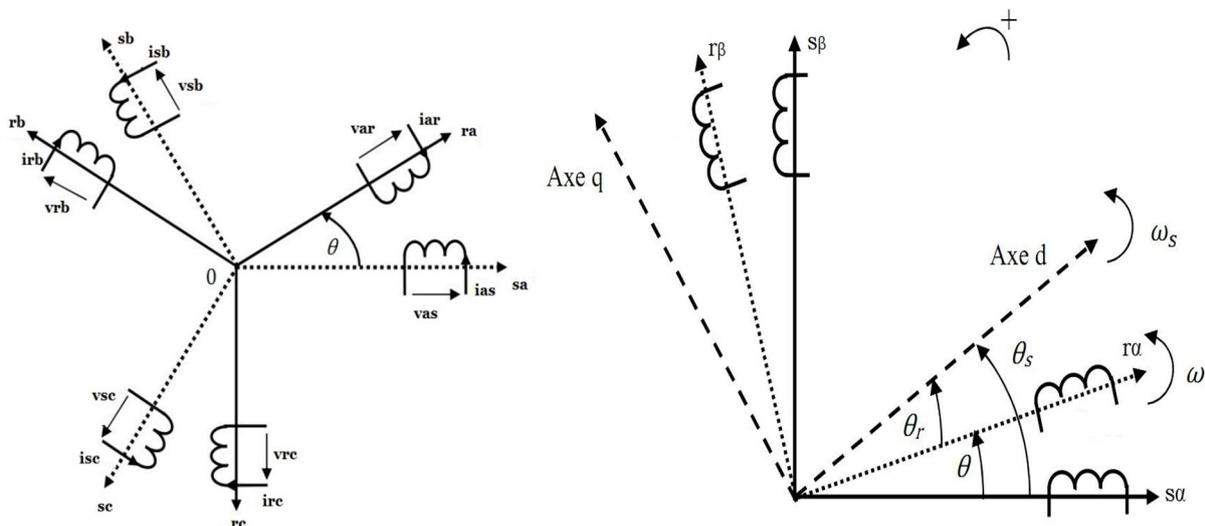


Figure II.7 : Repère référentiel de PARK.

II.6.2 Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante:

$$\begin{cases} [V_{s(dq)}] = [P(\theta_s)][V_{s(abc)}] \\ [V_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)][V_{r(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{cases} [I_{s(dq)}] = [P(\theta_s)][I_{s(abc)}] \\ [I_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)][I_{r(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{cases} [\phi_{s(dq)}] = [P(\theta_s)][\phi_{s(abc)}] \\ [\phi_{r(dq)}] = [P(\theta_s - \theta)][\phi_{r(abc)}] \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constantes L_s , L_r , M , et reliés aux courants par la relation:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

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

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

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

En remplaçant les équations des flux II. (12) dans les équations des tensions II. (9), on aura:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & M \frac{d}{dt} & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & \omega_s L_s & M \frac{d}{dt} \\ M \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)M & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & M \frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Avec: } \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad \text{Avec: } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad \omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \begin{cases} \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad \theta_e = \theta_s = \boxed{\theta + \theta_r}$$

Equation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{pM}{L} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (II.19)$$

II.7 Choix du référentiel

Les équations de la machine peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié. Donc il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit à l'une des armatures, soit au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

II.7.1 Référentiel lié au stator ($\theta_s = 0$)

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

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation[10].

II.7.2 Référentiel lié au rotor ($\theta_r = 0$)

Ce référentiel est caractérisé par $\omega = \omega_e$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante. Il se traduit par la condition:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega$$

II.7.3 Référentiel lié au champ tournant

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

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

$$\begin{cases} \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \\ \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \end{cases} \quad (II.20)$$

$$\text{Avec: } \begin{cases} C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt} = (C_{em} - C_r - C_f) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

II. 8 Mise sous forme d'équations d'états

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état, nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega]^t$ comme vecteur d'état et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande.

Après le calcul, nous aboutissons au système suivant:

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \beta_{ds} - P \cdot \beta \beta_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \beta_{qs} + P \cdot \beta \beta_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma_r} \right) v_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = p \frac{\mu}{J} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) - \frac{f}{J} \omega - \frac{1}{j} C_r \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où les différents coefficients sont donnés par:

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s} ; \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) ; \gamma_r = \frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s \cdot M^2}{L_s^2 \cdot \sigma_r} ; \beta = \frac{M}{L_s \cdot \sigma_r} ; \mu = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot L_s}$$

II. 9 Modélisation de l'onduleur de tension

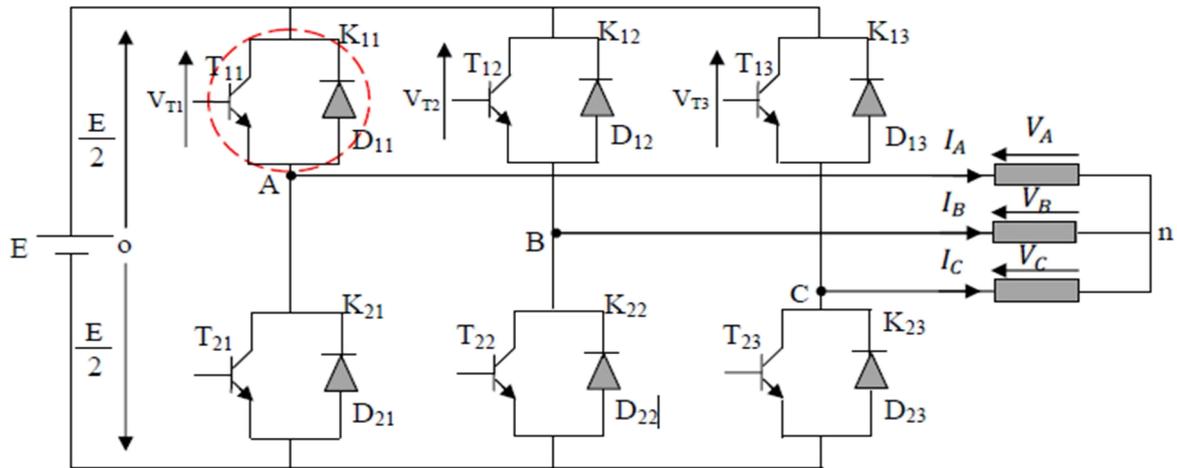
Un onduleur de tension est un convertisseur statique qui assure la transformation de la tension d'une source continue en une tension alternative.

Il est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard.

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche [13].

Les couples d'interrupteurs (K11, K21), (K12, K22), (K13, K23) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques et

rotorique de la machine, et pour éviter de court-circuiter la source. Les diodes D_{ij} ($ij=1, 2, 3$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors.



FigII.8 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux [1]

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [13]. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure II.8

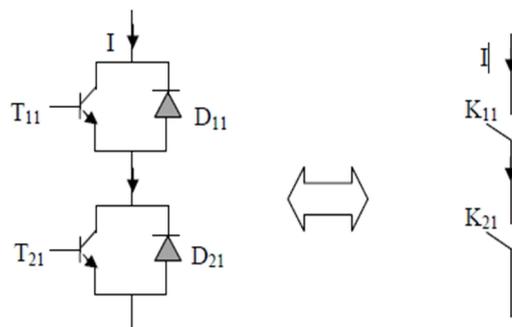


Fig II.9 : Représentation d'un GTO [1]

Afin d'éviter de court-circuiter la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaires. Pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage est du type étoile sans neutre (bien que le branchement d'une charge en triangle soit envisageable). Ainsi les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminées, et le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impaires différentes de trois [11].

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens.

L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs[14].

En se basant sur la figure (II. 5) représentant la structure de l'onduleur de tension, les tensions composées délivrées par ce dernier sont données comme suit :

$$U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (\text{II. 22})$$

$$U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (\text{II. 23})$$

$$U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (\text{II.24})$$

Étant donné que le récepteur de sortie est équilibré, on peut passer des tensions simples aux tensions composées.

Les tensions simples forment un système de tension triphasée équilibrée, alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.25})$$

De (II. 29), (II. 31) et (II. 32), on a :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \quad \text{II. 26}$$

De (II. 29), (II. 30) et (II. 32), on a :

$$V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \quad \text{II. 27}$$

De (II. 30), (II. 31) et (II. 32), on a :

$$V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \quad \text{II. 28}$$

Les tensions simples peuvent aussi être données en fonction des tensions prises par rapport à un point commun « O » :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(2U_{ao} - U_{bo} - U_{co}) \quad \text{II. 29}$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}(2U_{bo} - U_{ao} - U_{co}) \quad \text{II. 30}$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}(2U_{co} - U_{ao} - U_{bo}) \quad \text{II. 31}$$

Sous une forme matricielle, ces tensions sont données comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ao} \\ U_{bo} \\ U_{co} \end{bmatrix} \quad \text{II. 32}$$

En utilisant la notion de fonction de connexion, qui explicite la nature des connexions réalisées par des interrupteurs entre deux points d'un circuit, le système (II.32) deviendra :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad \text{II. 33}$$

Avec : K_1, K_2, K_3 ; fonctions de connexion déterminant l'état des interrupteurs.

II 9.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale[11].

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [11].

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence $m = f_p / f_r$

- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse:

$$r = \frac{V_r}{V_p}$$

• II.10 Simulation et interprétation des résultats

II.10.1 Résultats de simulation et interprétation du modèle de la turbine

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la **figure** (II.10.1) la puissance mécanique de l'arbre est illustrée sur la **figure** (II.10.2). Les **figures** (II.10.3) et (II.10.4) présentent respectivement la variation du rapport de vitesse λ et le coefficient de puissance C_p en fonction du temps. On vérifie, que les valeurs de coefficient de puissance n'atteignent pas la valeur théorique maximale donnée par Betz .

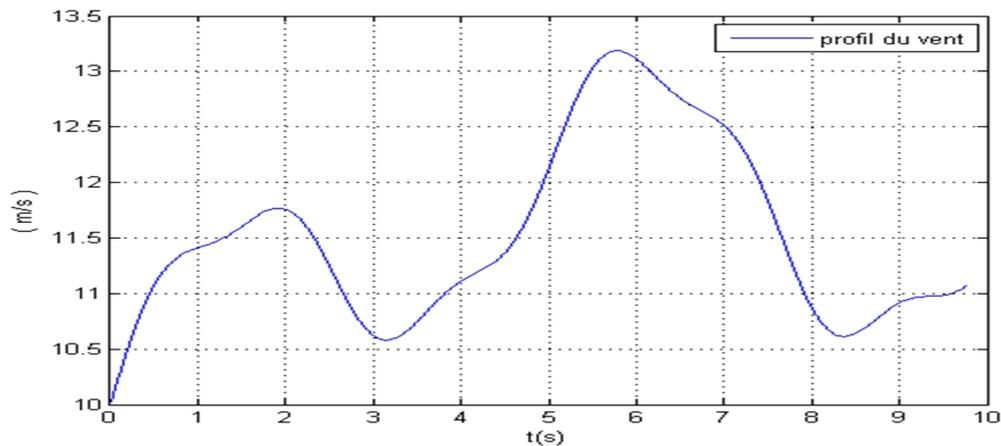


Fig II.10.1 profil du vent

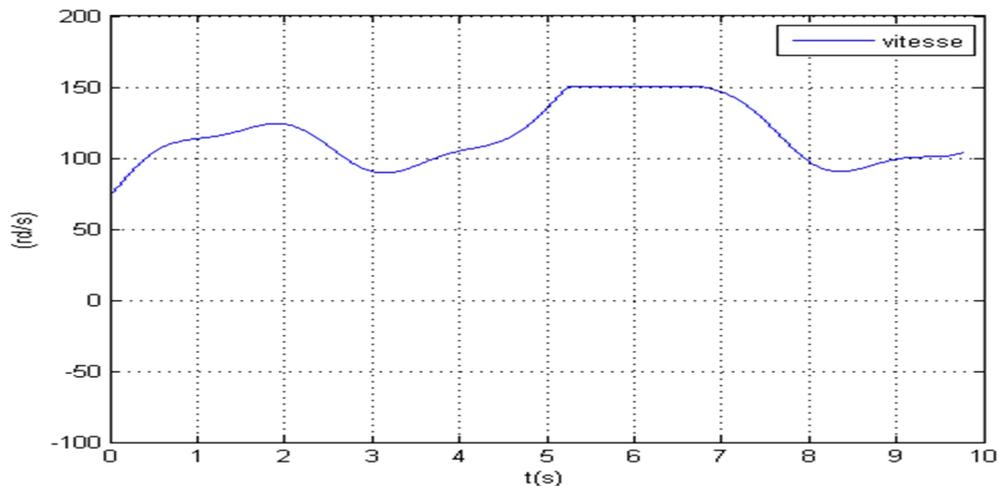
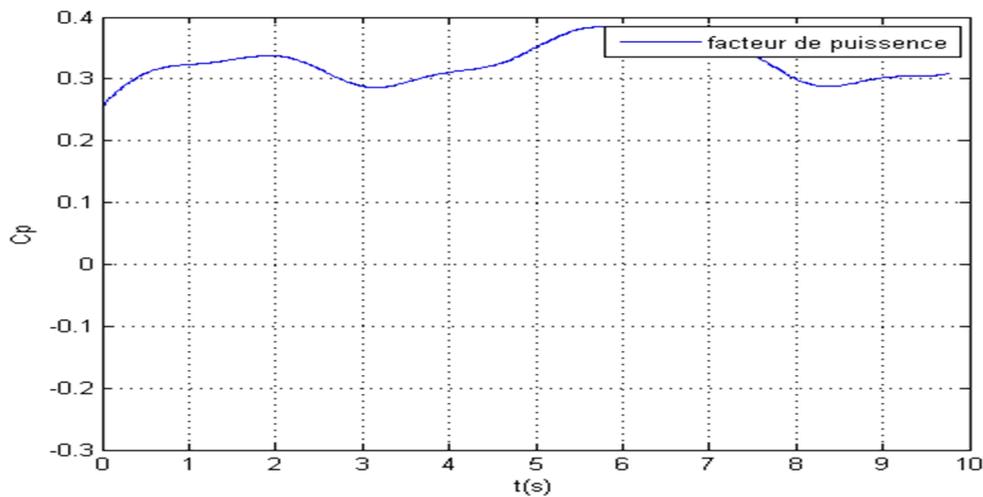
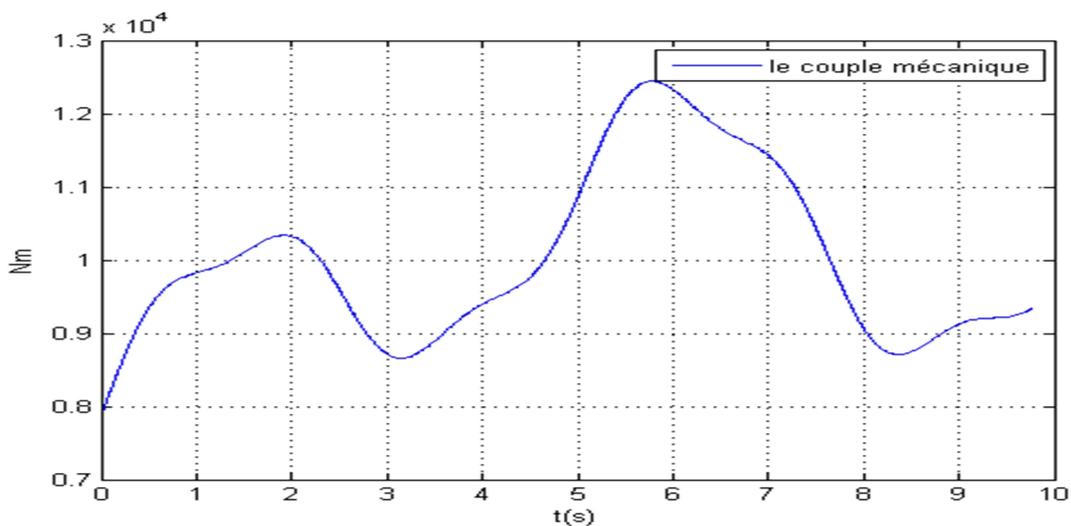


Fig II.10.2 vitesse mécanique*Fig II.10.3* coefficient de puissance*Fig II.10.4* couple mecanique

II.10.2 Résultats de simulation et interprétation MADA

A l'aide du logiciel **MATLAB** la simulation de la **MADA** a été faite. Son modèle est basé sur les équations d'états obtenues avec la transformation de PARK (plan d, q). Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, alimentée par un réseau sinusoïdal **690V, 50Hz**,

Nous avons simulé la MADA alimentée par le réseau pour deux types de fonctionnement :

Démarrage à vide, et avec application d'un couple résistant de 9550 (N.m) entre deux instants **0.5** et

1.5s. Les résultats sont représentés dans la (Figure II.11)

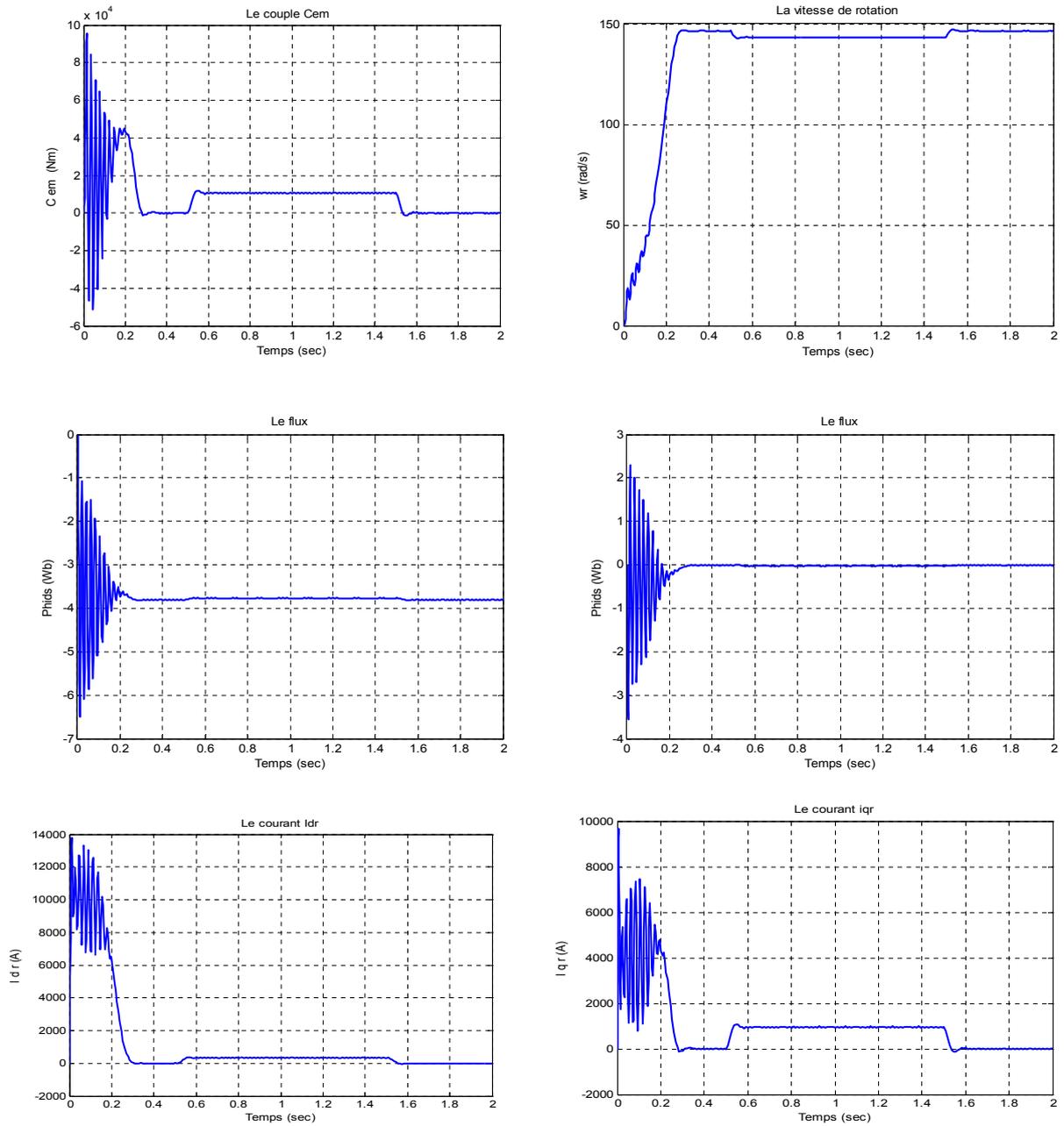


Figure II.11 : Simulation de la MADA avec application d'un couple résistant de 9550(N.m).

On remarque que toutes les grandeurs de la machine en régime transitoire sont oscillatoires pendant une durée courte de 0.2 s.

On remarque aussi que la vitesse de rotation à vide atteint une valeur proche de 150 rad/s, et l'hors d'application d'un couple résistant de 9550 N.m, la vitesse diminue et le couple électromagnétique augmente.

Les résultats montrent aussi que les flux statoriques φ_{ds} , φ_{qs} augmentent légèrement à l'instant de l'application de la charge.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord modélisé la turbine éolienne, puis présenté avec ses différents éléments utilisant un multiplicateur et modéliser MADA ainsi que l'onduleur.

Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité.

Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système. C'est le but du prochain chapitre.

Remerciement

Louange à Allah, Seigneur de l'univers, Le Tout Miséricordieux, le Très Miséricorde-dieux, pour nous avoir accordé le savoir, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au tra-vers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

En présentant ce travail Nous profitons l'occasion de remercier vraiment du fond du cœur nos deux promoteurs Mr KOCHIH et Mr BOUMALHA pour leur disponibilité, soutien, aide, ainsi que leurs bonne humeur durant toutes les étapes de ce projet .

Et enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail, et en particulier à l'ensemble de nos enseignants, qui sont à l'origine de tout notre savoir

Dédicace

A mes précieux parents.

A mes frères et ma chère sœur.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux qui me connaissent.

ABDENEBI

III.1. Introduction

Actuellement, la machine asynchrone de par sa simplicité de construction, sa robustesse et son faible coût, elle détrône progressivement la machine à courant continu et concurrence son homologue la machine synchrone. Seulement une association « convertisseur statique-machine asynchrone » exige un procédé de contrôle efficace et performant. La commande à haute performance d'une machine asynchrone est devenue très complexe, mais sa réalisation ne pose plus de problème vu que les possibilités des techniques numériques modernes ouvrent des perspectives de plus en plus compétitives tout en respectant l'aspect économique de cette réalisation [14].

Depuis plusieurs années, des recherches universitaires et industrielles ont été réalisées pour remédier le problème de commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées, de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse. Les techniques de commande classiques deviennent insuffisantes surtout dans les applications industrielles réclamant un couple important en basse vitesse (traction, positionnement). Pour maîtriser ces difficultés et pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, Blaschke et Hasse ont proposé une technique de commande dite la commande vectorielle (*field oriented control*) ou la commande par orientation du flux. Aujourd'hui, grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un réglage de vitesse plus performant de point de vue rapidité et précision. L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser des performances meilleures pour les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée et constitue actuellement un domaine de recherche [12].

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de découplage par retour d'état de la commande vectorielle appliquée à la MADA. Nous présenterons tout d'abord, le principe de la commande à flux orienté et on applique le découplage par retour d'état par la suite. En fin de chapitre, nous nous intéresserons à l'étude de la robustesse du système étudié vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

III.2. But et principe de la commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit est établie un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quelque soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge (différent de 90°), il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée [12].

III.3. Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [12]:

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension (Voltage Source Inverter)
- Commande en courant (Current Controlled Inverter)
Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - Commande vectorielle de flux rotorique
 - Commande vectorielle de flux statorique
 - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant)
Suivant la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase)
 - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement

La commande directe a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué. En effet, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine). L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés d'harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [12].

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [12].

III.4 Commande vectorielle de la MADA

Au cours de ces dernières années, des méthodes ont été mises en point, permettant d'assurer le découplage entre les commandes du flux et du couple de la machine asynchrone. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique.

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu (MCC)

(*Figure III.1*) ou le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit donc de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) (*Figure II.2*); ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante quadrature [11].

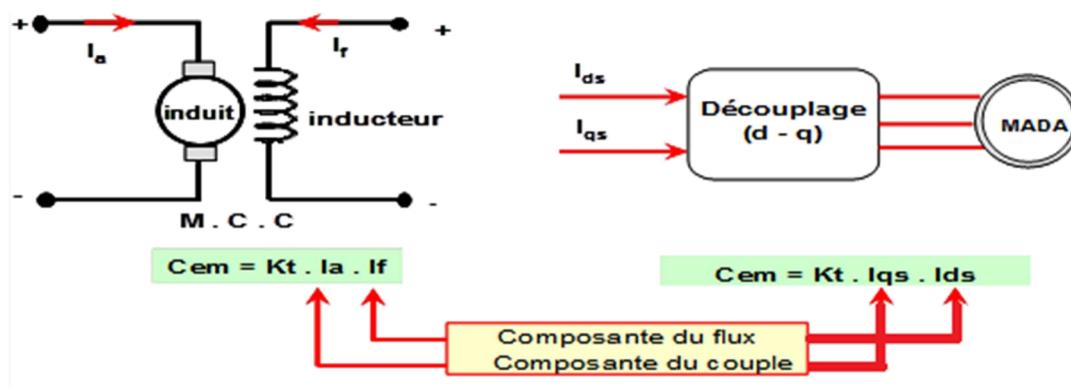


Fig III.1: Principe de la commande vectorielle

$$\text{Couple électromagnétique de la machine à courant continu: } \begin{cases} C_{em} = K \varphi_f \cdot I_a \\ \varphi_f = K \cdot I_f \end{cases}$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

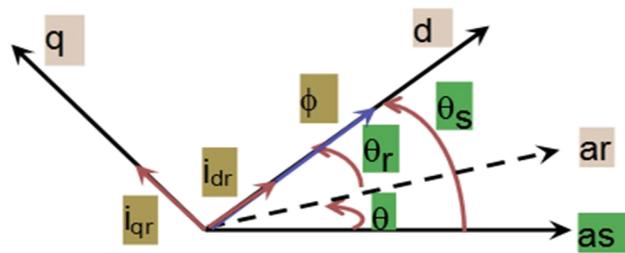


Fig III.2 : position du référentiel par rapport au flux

III.5.1 Procédé d'orientation du 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** ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [14] :

- Orientation du flux rotorique :
$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \phi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases}$$
- Orientation du flux statorique :
$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases}$$
- Orientation du flux magnétisant :
$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \phi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases}$$

On utilise dans notre étude la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique.

L'équation du flux statorique

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. (18)}$$

L'équation du couple électromagnétique

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} \cdot I_{qr}) \quad \text{(III.19)}$$

L'équation de la tension

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases}$$

Dans l'hypothèse où le flux Φ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) et si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

A l'aide de l'équation **III. (18)** on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une MADA s'écrivent:

$$\begin{cases} P = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation **III. (22)** on obtient:

$$\begin{cases} P = V_s \cdot I_{qs} \\ Q = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions **III. (21)** dans l'équation **III. (23)** on obtient:

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

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

$$Q = \frac{1}{\omega_s \cdot L_s} V_s^2 - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.25})$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il est nécessaire d'établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux de model de la MADA les courants statoriques par l'expression **III. (21)** on obtient:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M.V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente **III. (26)** par leurs expressions dans l'équation **III. (15)** on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M.V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M.V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

La représentation sous forme de schéma-blocs de la MADA est donnée par la figure ci-dessous (**Figure III.3**)

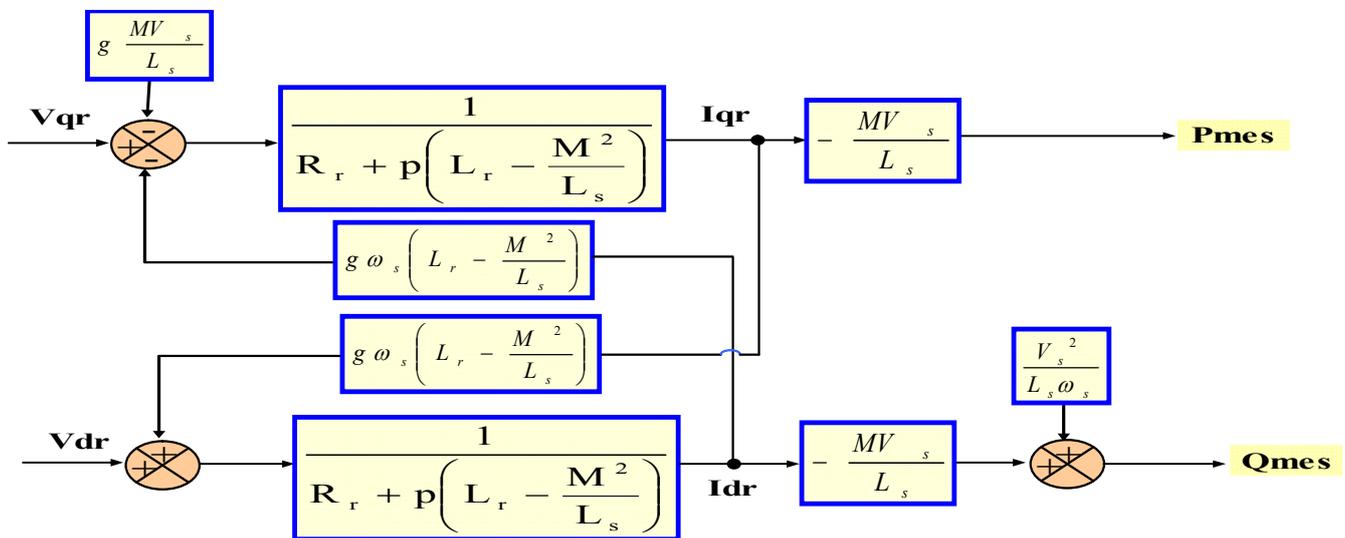


Fig III.3: Schéma bloc de la MADA.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir

sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [14].

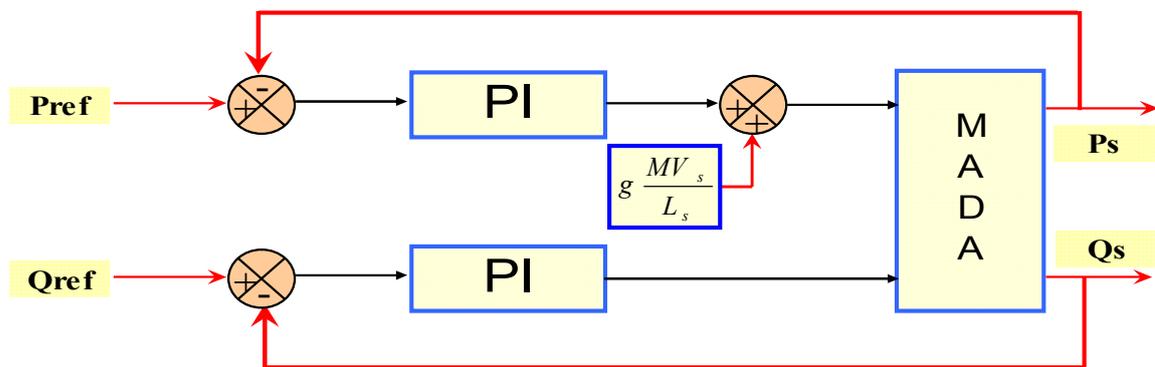


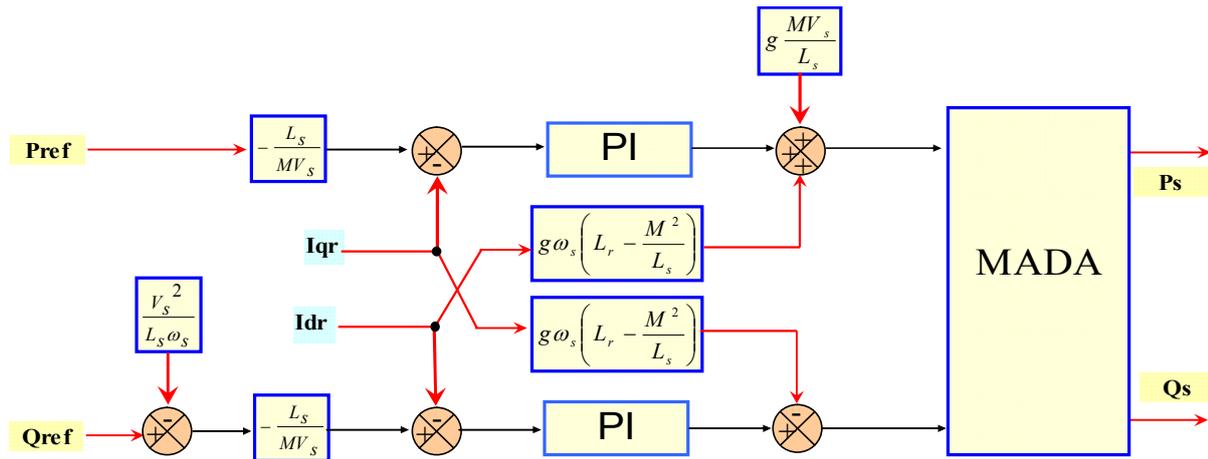
Fig III.4: Schéma bloc de la commande directe

- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

III.5.2 Commande indirecte de la MADA

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler est présenté dans la (*Figure III.5*). En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens [14].

Pour obtenir une bonne stabilité du système on introduit une boucle de régulation des courants rotoriques (*Figure III.6*) dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.



FigIII.5 : Schéma bloc de la commande indirecte.

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance sotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela, pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant.

Ainsi, nous allons mettre en place une boucle de régulation en puissance indépendante, tout

en compensant les termes de perturbations $\left(g \frac{M V_s}{L_s} \text{ et } \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} \right)$ afin d'obtenir un bon fonctionnement avec amélioration des performances du système.

Le régulateur utilisé pour commander la **MADA** en génératrice est un régulateur de type proportionnel-Intégral (**PI**) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système. La fonction de transfert du régulateur est donnée par: $R(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \cdot La$

détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. Cette stratégie permet l'application de l'ensemble des outils de l'automatique linéaire au problème de régulation.

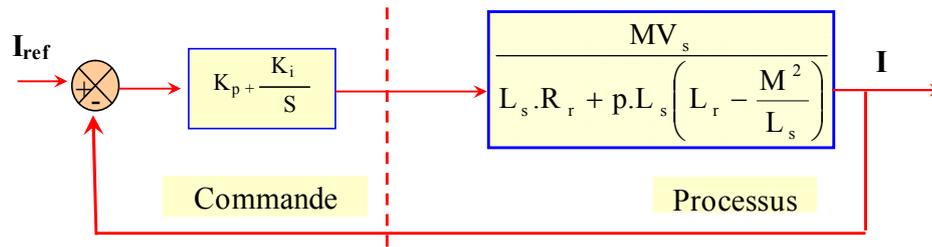
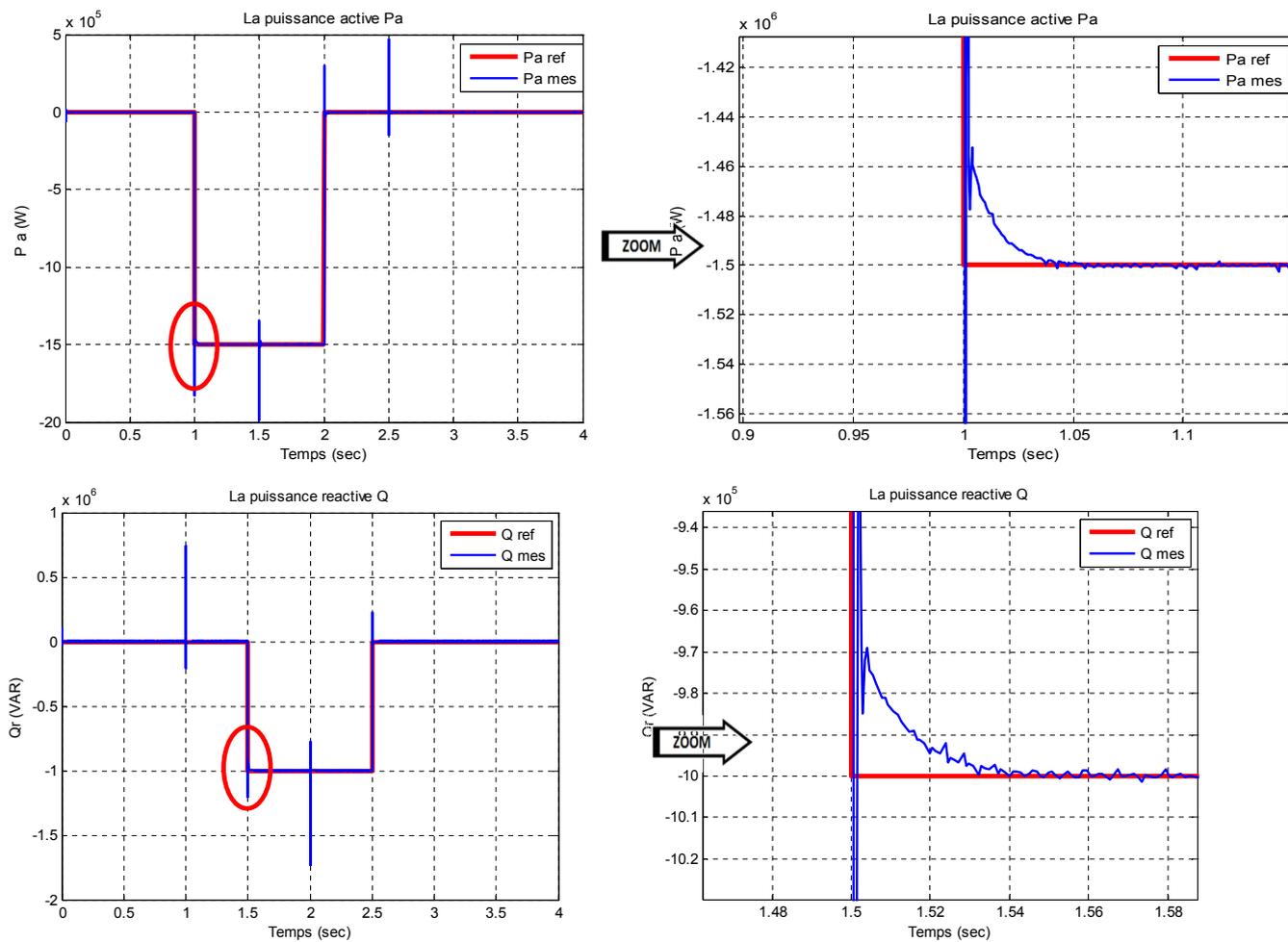


Fig III.6 : Schéma bloc de la régulation du courant

III.5.3 Simulations et Interprétations des Résultats

La simulation a été faite à l'aide du logiciel **MATLAB**, en imposant les puissances active et réactive de référence P_{ref}, Q_{ref} alors que la machine est entraînée à vitesse fixe. P_{ref} passe de **0** à **1.5 MW** entre [1s, 2s] et Q_{ref} prend la valeur de **0** à **1 MVAR** entre [1.5s, 2.5s], les résultats obtenus sont représentés dans la (**Figure III.7**).



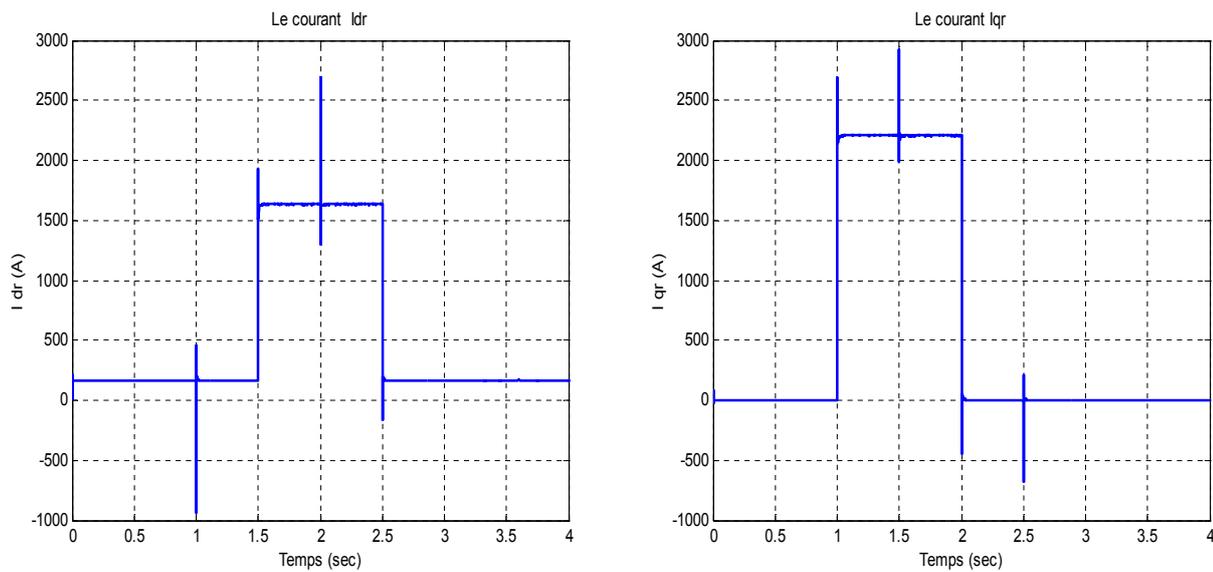


Fig III.7: Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte.

Les résultats de simulation donnent les puissances active et réactive de la MADA par la commande vectorielle avec orientation du flux statoriques.

On remarque que les puissances active et réactive suivent rapidement leur référence.

On remarque aussi que la puissance active est proportionnelle au courant statoriques en quadrature I_{qr} et que la puissance réactive est proportionnelle au courant direct I_{dr} , comme on a supposé théoriquement.

On observe aussi que le couplage entre la puissance active et réactive est important à cause d'une forte puissance de la MADA.

III.6. Résultats de simulation de la stratégie de commande vectorielle

L'ensemble du système éolien et sa commande ont été simulés à cascade deux niveaux en utilisant Matlab.

en considérant une MADA de 1.5MW dont les paramètres sont donnés dans en annexe. Nous présenterons dans cette section les résultats de commande du système éolien avec la commande vectorielle.

Les figures II.8.a et b. montrent que la puissance active et réactive fournis par la MADA suivent leurs références avec un erreur variable.

Les figures III.8.c et III.8.d illustrent respectivement le couple électromagnétique et courant statorique.

Les figures III.8.f et 1 et 2 illustrent respectivement la tension rotorique

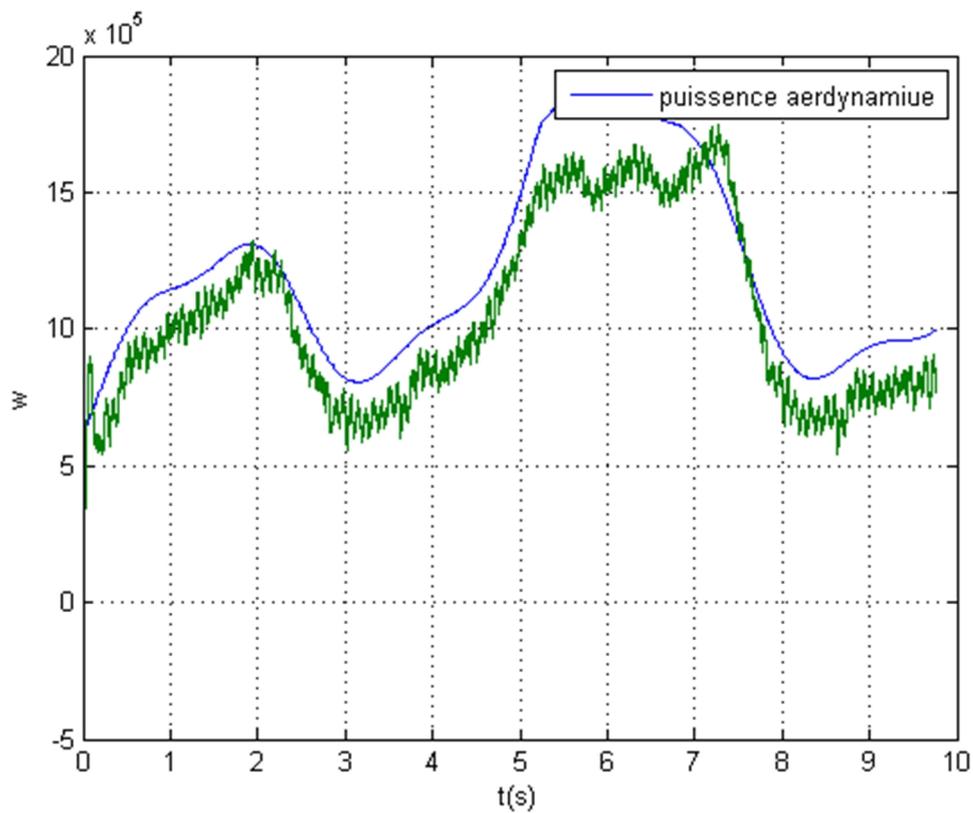
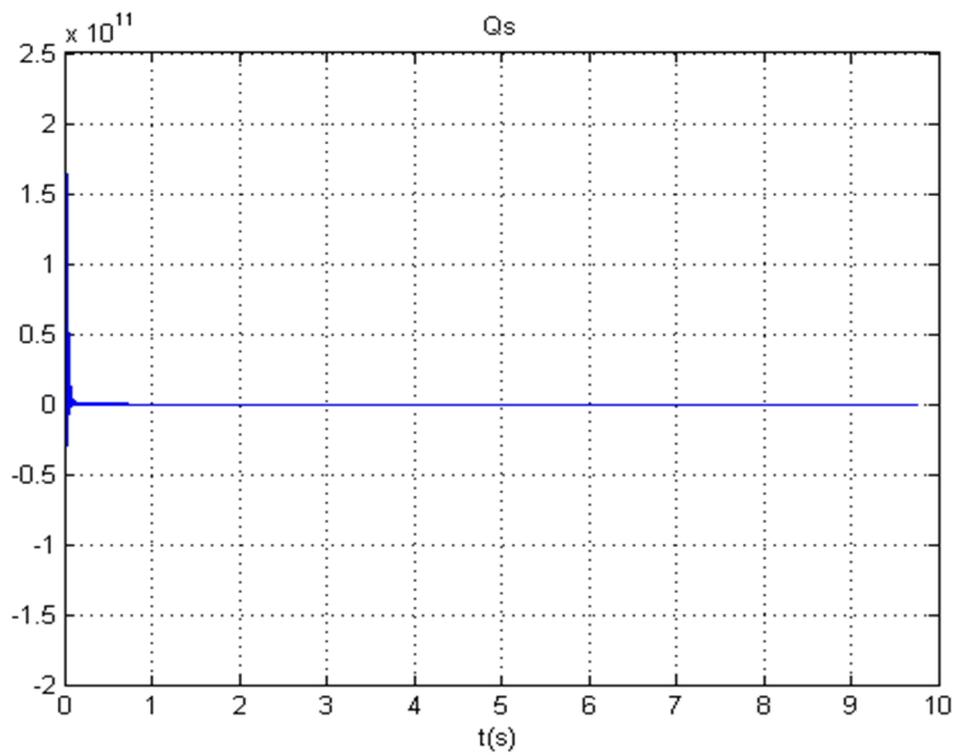
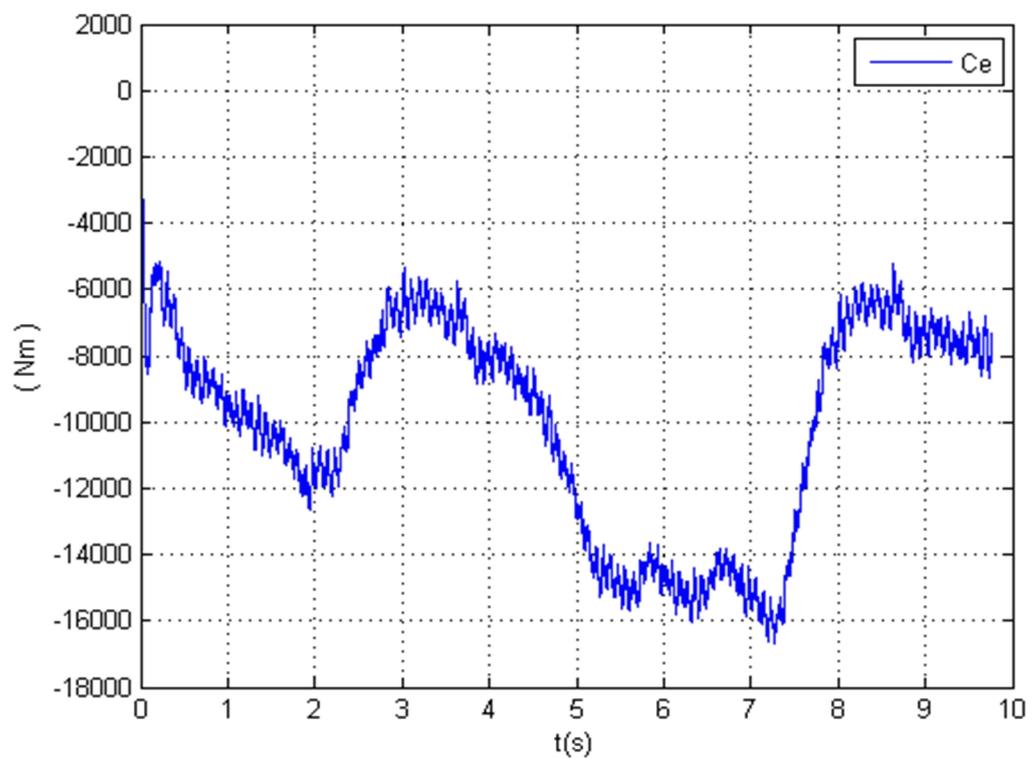


Fig. III.8.a puissance active générée (-1) et la puissance aérodynamique

**Fig. III.8.b** puissance réactive**Fig III.8.c.** couple électromagnétique

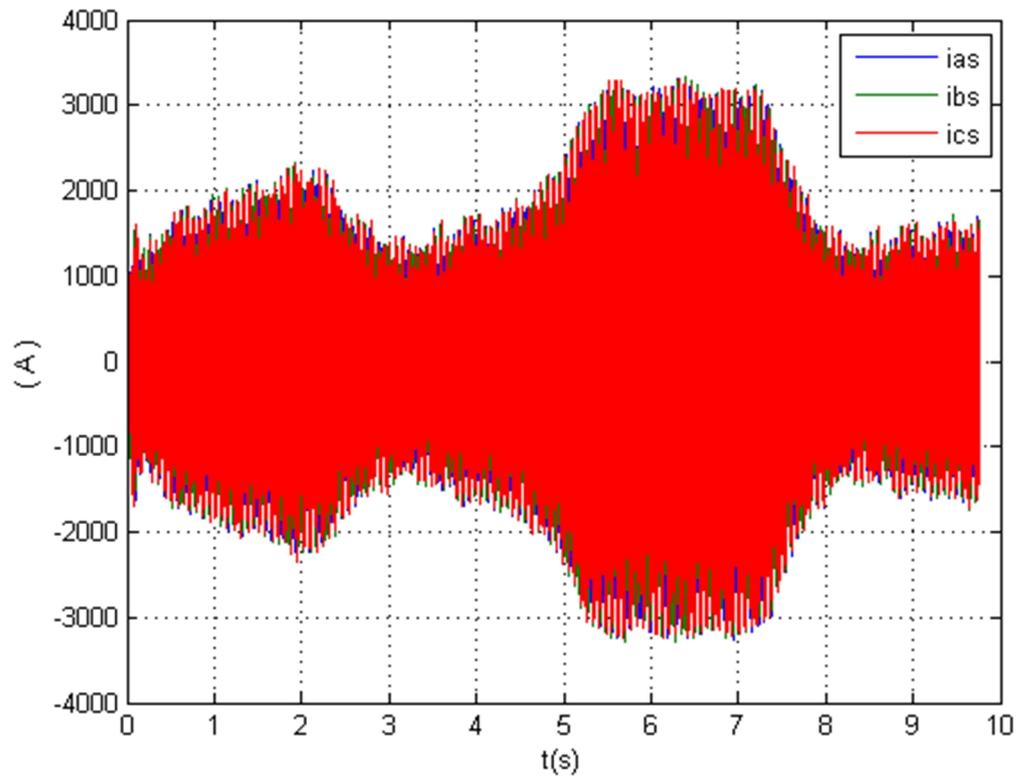


Fig. III.8.d. courant statorique

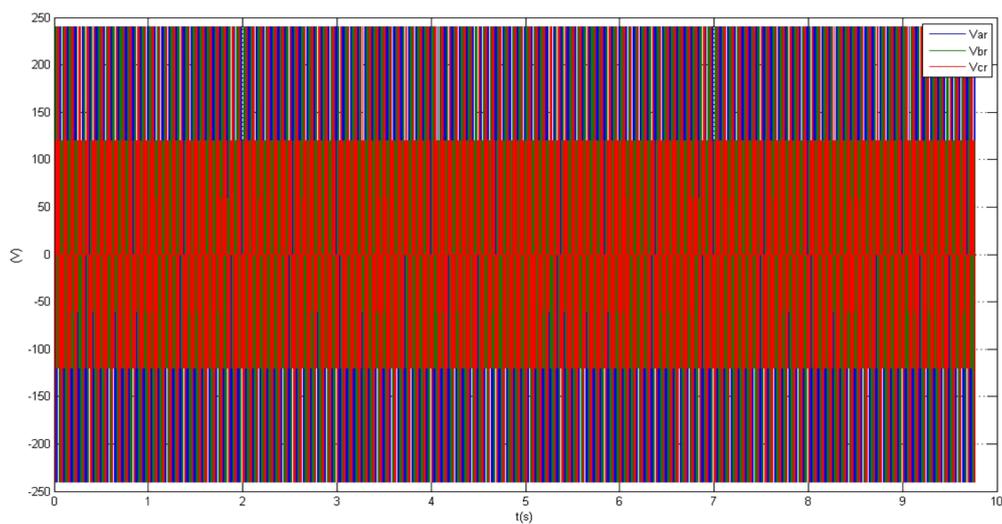


Fig. III.8.d. tension rotorique

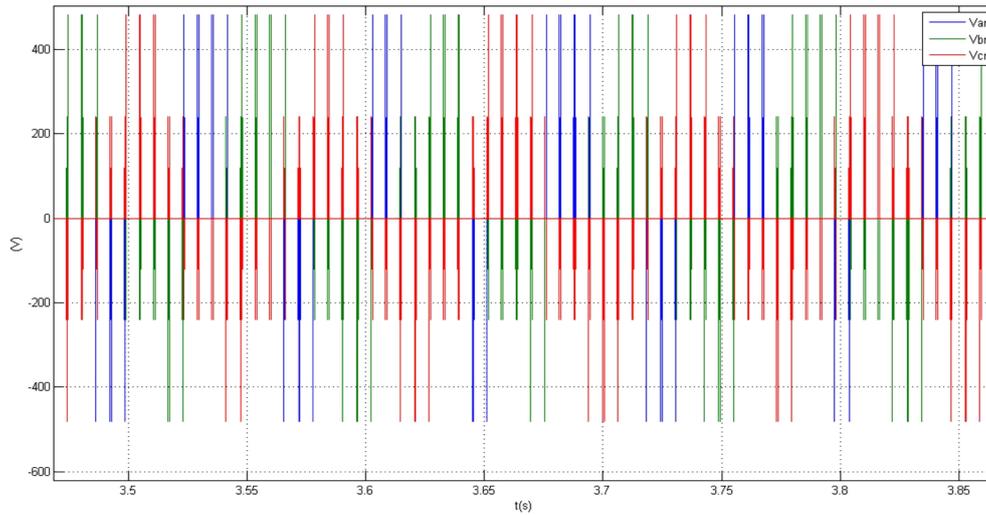


Fig. III.8 .d .1.tonsion rotorique zoome

III.6 Conclusion

Nous avons commencé la première partie de ce chapitre, nous avons étudié la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en fonctionnement génératrice.

On a commencé par une présentation du principe de la commande vectorielle, ainsi que les deux méthodes de contrôle à savoir la méthode directe et indirecte.

En dernier lieu nous avons simulé la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance en utilisant des régulateurs (PI) ainsi qu'une interprétation des résultats obtenus, ces derniers s'avèrent satisfaisants vu la stabilité des différentes grandeurs et la performance de la MADA intégré à la chaîne éolienne.

Introduction générale.....	7
Chapitre I. Etat de l'art sur la conversion éolienne.....	
I.1. Introduction.....	10
I.2. Energie cinétique du vent –conversion en énergie mécanique.....	10
I.2.1 Loi de Betz.....	10
I.2.2 Coefficient de puissance.....	11
I.2.3 Production d'énergie mécanique.....	12
I.3. L'aérogénérateur.....	13
I.4. Types d'aérogénérateurs.....	14
I.4.1. Aérogénérateurs à axe vertical.....	14
I.4.1.1. Aérogénérateurs à rotor de Darrius.....	14
I.4.1.2. Aérogénérateurs à rotor de Savonius :.....	15
I.4.2. Aérogénérateurs à axe horizontal.....	16
I.5. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal.....	16
I.6. Technologie d'éoliennes de grande puissance.....	18
I.6.1. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	18
I.6.2. Les éoliennes à vitesse fixe.....	18
I.6.3. Intérêt de la vitesse variable.....	19
I.6.4. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator.....	21
I.6.5. Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	23
I.6.5.1. Structure de la MADA.....	23
I.6.5.2. Modes de fonctionnement de la MADA.....	24
I.6.5.3. Avantage des éoliennes à base de la MADA.....	24
I.7. Topologie des convertisseurs utilisés pour les éoliennes de grande puissance.....	27
I.7.1. Convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de la MADA.....	28
I.7.2. Intérêt des convertisseurs multi-niveaux pour la conversion éolienne.....	29
I.6.3. Tendances des futurs convertisseurs statiques.....	31
I.8. Fermes éoliennes.....	31
I.9. Contraintes de connexion des fermes éoliennes.....	33
I.10. Conclusion.....	35

IV.1 Introduction

L'électronique de puissance connaît depuis longtemps un essor très important. A l'heure actuelle, cette discipline du génie électrique touche des domaines d'applications vastes et très divers pour des puissances couvrant une large gamme (de quelques watts à plusieurs centaines de mégawatts). Les structures de conversion d'énergie, principales actrices de cette spécialité, commutent des puissances de plus en plus importantes.

Parmi les convertisseurs directs, en retenant uniquement ceux qui associent une source continue et une source alternative, nous définissons le domaine de la conversion continu-alternatif.

Dans leur principe, les structures de ces convertisseurs continu-alternatif sont naturellement réversibles en puissance instantanée, donc en puissance moyenne, autorisant ainsi des marches en onduleur lorsque la source continue fournit une puissance moyenne non nulle à la source alternative, mais aussi en redresseur dans le cas contraire.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par l'étude de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC avec sa stratégie de commande. Ensuite, nous étudions le redresseur à trois niveaux à structure NPC, avec sa stratégie de commande puis on termine par des simulations et interprétation.

Dans ce chapitre, on étudiera le comportement de la machine synchrone alimenté par la cascade réseau redresseur MLI en courant – onduleur MLI de tension a trois niveaux de structure NPC en obtient les résultats de simulation.

IV.2. Cascade redresseur NPC à trois niveaux – Onduleur NPC à trois niveaux

IV.2.1 structure de la cascade

Dans cette partie de notre chapitre, on étudie l'association de redresseur triphasé – onduleur triphasé, ce changeur de fréquence indirect de la figure (IV.1), permet à partir d'un réseau à fréquence et amplitude fixes d'avoir un système de tension de sortie à fréquence et amplitude variables.[4]

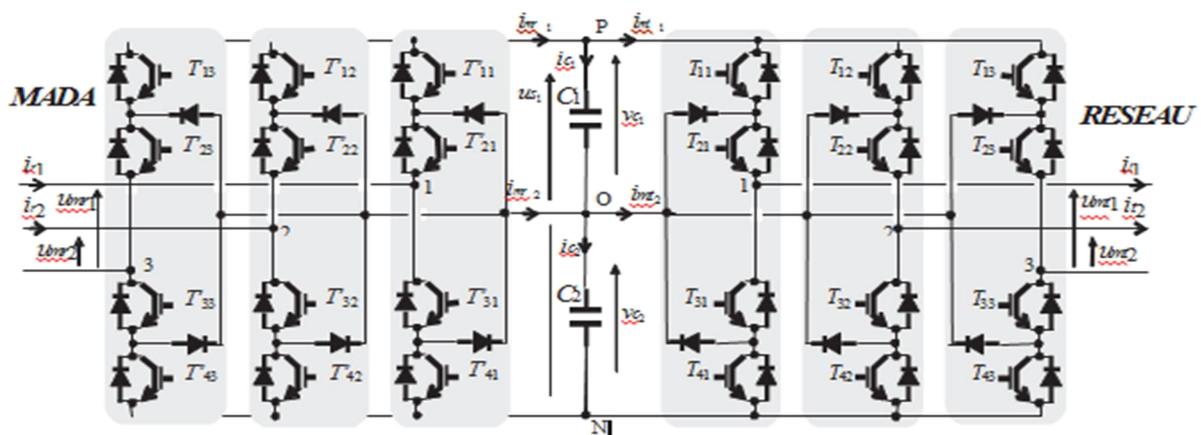


Fig.IV.1 cascade redresseur – onduleur et moteur

IV.3. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade

La figure (IV.2) représente la structure générale du filtre intermédiaire de la cascade son modèle est défini par le système d'équations suivant :[1]

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{du_{C1}}{dt} &= i_{dred1} - i_{ond1} \\
 C_2 \frac{du_{C2}}{dt} &= i_{dred2} - i_{ond2}
 \end{aligned}
 \tag{IV.1}$$

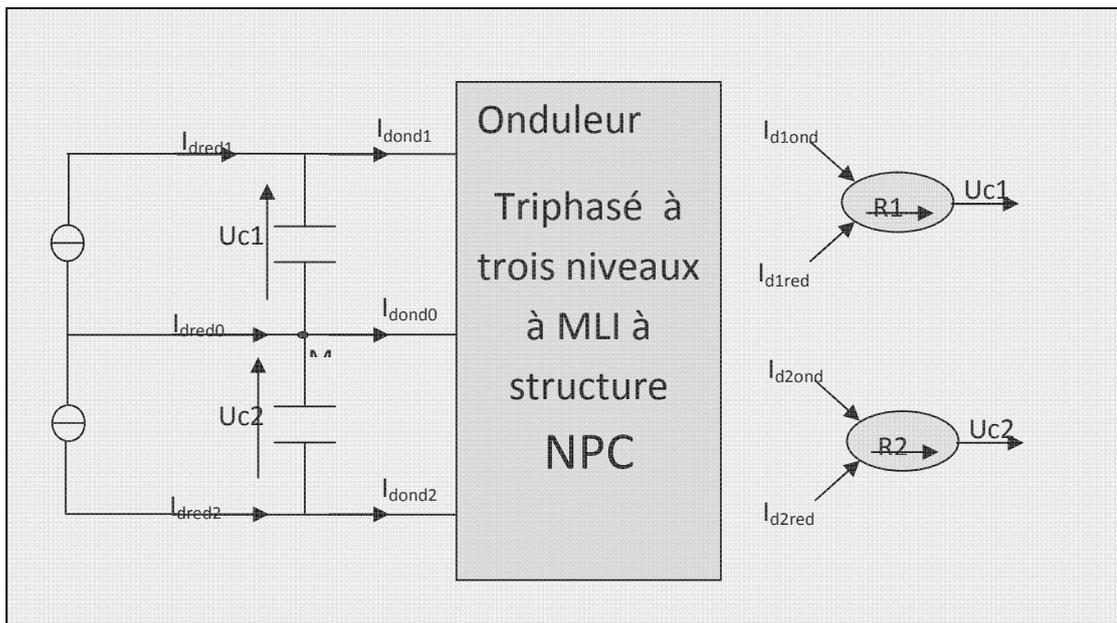


Fig.(IV.2) Filtre intermédiaire de la cascade redresseur – onduleur et moteur et son graphe informationnel

Le système qui est présenté par l'équation (IV.1) peut être interprété par le graphe informationnel de la figure (IV.2) les relations R1, R2 [13] de ce graphe sont respectivement la première la deuxième équations du système (IV.1) ; la figure (IV.2) nous montre deux blocs qui peut être commandé par i_{dred1} et i_{dred2} cependant, on doit noter que les deux courants i_{dred1} et i_{dred2} sont contrôlés par le même courant de réseau.

La relation qui est d'écrit par l'équation (IV.2), montre également qu'on peut réduire la différence entre les deux tensions $Uc1$ et $Uc2$ en utilisant des capacités importantes.[13]

$$\begin{aligned}
 i_{ond} - i_{dred} &= C \frac{d(Uc_1 - Uc_2)}{dt} = i_{d01} \\
 \text{avec } C_1 &= C_2 = C
 \end{aligned}
 \tag{IV.2}$$

Cette dernière relation montre également afin d'avoir un potentiel du point milieu M plus stable (valeur moyenne nulle de la différence ($U_{C1}-U_{C2}$), il faut avoir une valeur moyenne du courant i_{d01} ,

IV.4 L'onduleur triphasé à trois niveaux structure NPC

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets.

Les avantages de cette nouvelle génération d'onduleurs sont [13]:

- La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complications au niveau des tensions statique et dynamique (les interrupteurs sont connectés en série).
- Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveaux sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.
- Les formes d'ondes des grandeurs de sorties d'un onduleur multi-niveaux limitent naturellement les problèmes des surtensions.

Dans notre cas, on s'intéressera à l'étude de la modélisation et de la commande de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC (Neutral-Point-Clamped) c'est-à-dire une structure à point milieu, proposé pour la première fois en 1981, par N. Akira & Nabaa [13].

IV.5 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

IV.5.1 Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC présenté par la (*FigIV.3*), est constitué de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs montés en série, et de deux diodes qui permettent d'annuler la tension V_{km} , chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bicommandable (transistor, GTO, IGBT,...) et d'une diode montée en tête bêche. Ce type d'onduleur est dit à trois niveaux de tension par bras ($+U_c, 0, -U_c$)[13].

Durant ce chapitre, nous adoptant les hypothèses suivantes :

- L'onduleur est alimenté par une source de tension à point milieu supposé idéal ($U_{c1}=U_{c2}=U_c$)
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est supposée négligeable.
- La charge est triphasée, couplée en étoile avec le neutre isolé.

D'où :

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 0 \\ V_A + V_B + V_C &= 0 \end{aligned} \quad (IV.01)$$

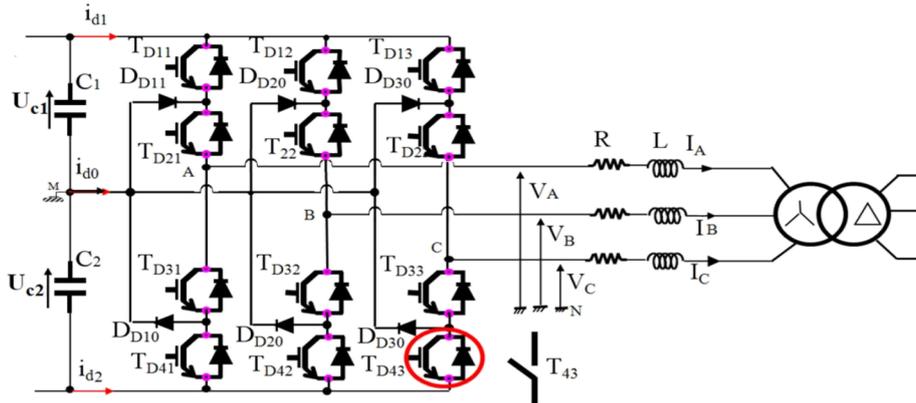


Fig IV.3 : Structure générale de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

IV.5.2 Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, on considère un seul bras (*FigIV.4*).

La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point milieu sur l'étage de tension continue tel que $U_{C1}+U_{C2}=E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes: $-E/2, 0, E/2$ dont la combinaison de ces niveaux permet d'obtenir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux [13]. Le sens positif ou négatif des courants I_{d0}, I_{d1} et I_{d2} fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant. L'ensemble de l'interrupteur (T) et la diode (D) peut être remplacé par un interrupteur bidirectionnel en courant.

III.5.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC montre qu'il existe cinq configurations possibles, et qui sont représentées par la (*Fig VI.4*).

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans un tableau (*Tableau IV.1*). Avec V_k le potentiel du nœud K par rapport à l'origine des potentiels M, Pour la configuration E_0 , le potentiel V_k dépend de la charge de l'onduleur [1].

configurations	Grandeurs électriques
E ₀	$I_K=0$ (V_K dépend de la charge de l'onduleur)
E ₁	$V_K=U_c$
E ₂	$V_K=0$
E ₃	$V_K=-U_c$
E ₄	$V_K=0$

Tableau IV.1. Grandeurs électriques correspondantes à chaque configuration d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

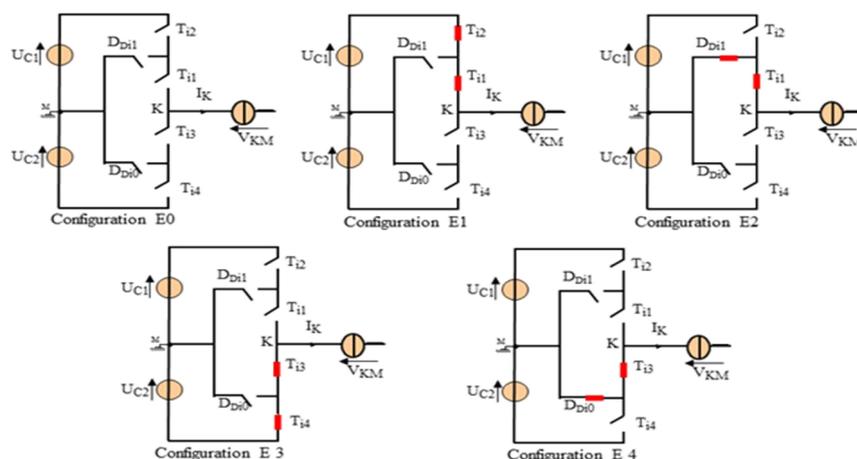


Fig. IV.4 : Les différentes configurations possibles d'un bras d'onduleur à trois niveaux.

IV.6 Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur à trois niveaux

IV.6.1 Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur est dit en mode commandable, si les conditions de transition entre les différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe des composants (commande des bases des semi-conducteurs) [13].

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre les configurations dépendent uniquement des commandes des transistors (commande externe). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée.

IV.6.2 Commande complémentaire des interrupteurs

Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court-circuit et le risque de destruction des condensateurs et des composants semi-conducteurs,

On doit réaliser une commande complémentaire de l'onduleur qui assure un fonctionnement totalement commandable de ce dernier.

La commande la plus optimale est la suivante [13] :

$$\begin{cases} B_{i1} = \overline{B}_{i4} \\ B_{i2} = \overline{B}_{i3} \end{cases} \quad (\text{IV.02})$$

IV.6.3 Fonction de connexion des interrupteurs

On associe une fonction de connexion F telle que; cette fonction vaut « 1 » si l'interrupteur est fermé, « 0 » dans le cas contraire.

$$F_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{ik} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{ik} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{IV.03})$$

i : numéro du bras $i \in \{1,2,3\}$, k : numéro de l'interrupteur $k \in \{1,2,3,4\}$.

IV.6.4 Fonction de connexion du demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{im}^b [11] [13].

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut} \end{cases} \quad (\text{IV.04})$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$\begin{cases} F_{i1}^b = F_{i1} F_{i2} \\ F_{i0}^b = F_{i3} F_{i4} \end{cases} \quad (\text{IV.05})$$

Ce système d'équation montre que la fonction de connexion des demi-bras F_{im}^b vaut 1 si les deux interrupteurs sont fermés, 0 dans les autres cas.

IV.6.5 Modélisation aux valeurs instantanée

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$V_{KM} = F_{i1} \cdot F_{i2} \cdot U_{C1} - F_{i3} \cdot F_{i4} \cdot U_{C2} \quad (\text{IV.06})$$

Avec : $k \in \{A, B, C\}$, $i \in \{1,2,3\}$

On introduisant les fonctions de connexion des demi-bras de (IV.5) dans (IV.6), ce système d'équations s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (\text{IV.07})$$

D'après ce système (III.7), on peut déduire que l'onduleur à trois niveaux est une mise en série de deux onduleurs à deux niveaux.

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de charge i_1 , i_2 et i_3 par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{IV.08})$$

Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = (F_{11} \cdot F_{13})i_1 + (F_{21} \cdot F_{23})i_2 + (F_{31} \cdot F_{33})i_3 \quad (\text{IV.09})$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, cette relation devient:

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b)i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b)i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b)i_3 \quad (\text{IV.10})$$

IV.7 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

Il existe plusieurs stratégies de commande des convertisseurs d'électronique de puissance et elles reposent toutes sur la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), cette technique consiste à comparer une onde de référence qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir, généralement sinusoïdale, avec une onde triangulaire dite porteuse. Les séquences de commutations des interrupteurs sont déterminées par l'intersection de l'onde de référence avec la porteuse. Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres suffisent pour caractériser la commande :

- L'indice de modulation "**m**" qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_m à la fréquence de la tension de référence f ($m=f_m/f$).
- Taux de modulation "**r**" qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} et celle de la porteuse U_m : ($r=V/U_m$).

Des différentes stratégies de commande ont été développées par différents auteurs pour les onduleurs multi-niveaux :

- Commande triangulo-sinusoïdale à deux porteuses bipolaires
- Modulation vectorielle utilisant deux porteuses en dent de série

Vue l'avantage que présente la stratégie de commande MLI vectorielle (amélioré) par rapport aux autres stratégies (la zone linéaire est plus large) on choisit cette dernière pour faire l'étude de ce type d'onduleur [11] [13].

IV.7.1 Commande par modulation vectorielle

La modulation vectorielle permet de suivre le vecteur de tension de référence et non pas chaque tension de référence de phase séparément et permet également de repousser les harmoniques de tension vers les fréquences élevées, ce qui facilite le filtrage.

L'analyse de cette stratégie sera basée sur le spectre de fréquence, et la longueur de la bande linéaire de réglage et le taux d'harmoniques des tensions de sortie.

IV.7.2 Choix des porteuses

Pour améliorer le taux d'harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur à trois niveaux, on utilise deux porteuses bipolaires identiques déphasées d'une demi période $1/2f_p$ l'une de l'autre (f_p : fréquence des porteuses).

Différentes porteuses sont possibles:

- Porteuse triangulaire unipolaire ou bipolaire.
- Porteuse en dents de scie unipolaire ou bipolaire.

La porteuse en dents de scie bipolaire permet un taux d'harmonique le plus faible mais avec des harmoniques paires et impaires.

Dans cette partie, on présente le cas de deux porteuses en dents de scie bipolaire.

IV.7.3 Principe de commande

Cette stratégie utilise la propriété que l'onduleur à trois niveaux est la mise en série de deux onduleurs à deux niveaux.

On définit à partir du vecteur de référence $\mathbf{V}_{sref} = (V_{sref1} \ V_{sref2} \ V_{sref3})^T$ deux nouveaux vecteurs de référence \mathbf{V}_{Sref1} et \mathbf{V}_{Sref0}

Ces deux nouveaux vecteurs de référence sont définis par le système d'équations suivant:

$$V_{sref1}[i] = V_{sref}[i] + V_0$$

$$V_{sref0}[i] = V_{sref}[i] - V_0$$

Avec $i \in \{1, 2, 3\}$ et $s \in \{1, 2, 3, 4\}$

La tension V_0 est donnée par l'équation suivante :

$$V_0 = -\frac{[\max(V_{sref}) + \min(V_{sref})]}{2}$$

IV.7.4 Algorithme de commande

L'algorithme de la commande de la stratégie à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras i , peut être résumé en deux étapes [13]:

Etape 1 : la détermination des signaux intermédiaires V_{1iM} et V_{0iM}

$$\begin{cases} V_{S_{ref1}}[i] \geq U_{p1} \Rightarrow V_{1M}[i] = U_{C1} \\ V_{S_{ref1}}[i] < U_{p1} \Rightarrow V_{1M}[i] = 0 \end{cases} \quad (IV.11)$$

$$\begin{cases} V_{S_{ref0}}[i] \geq U_{p2} \Rightarrow V_{0M}[i] = 0 \\ V_{S_{ref0}}[i] < U_{p2} \Rightarrow V_{0M}[i] = -U_{C2} \end{cases} \quad (IV.12)$$

Avec : $U_{c1}=U_{c2}=E/2$

U_{p1} et U_{p2} sont les valeurs crête des deux porteuses.

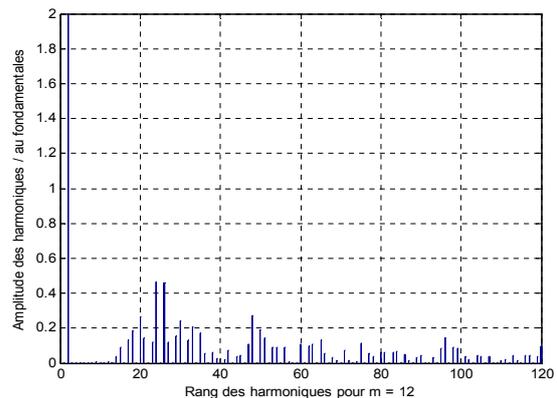
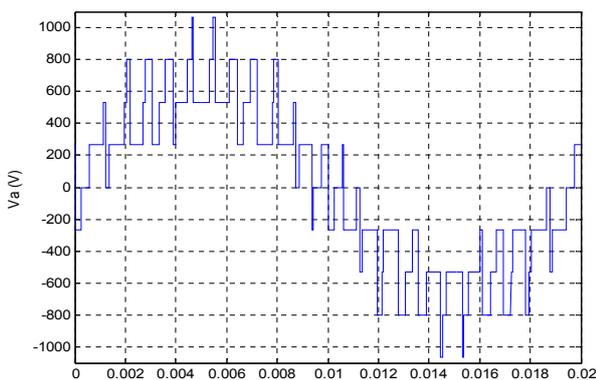
Etape 2 : détermination du signal V_{iM} et des ordres de commande Bis des interrupteurs :

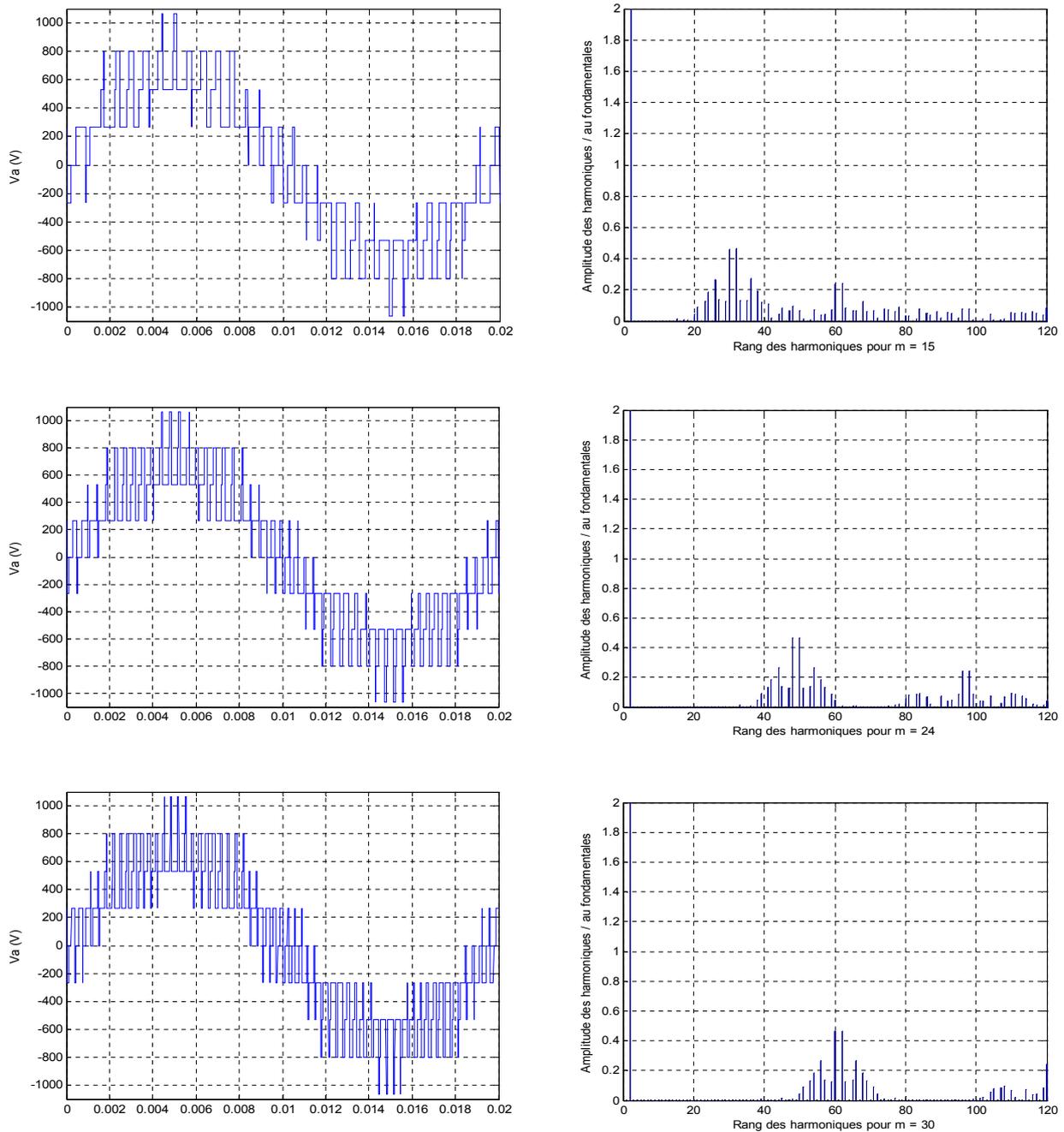
$$\begin{cases} V_{2M}[i] = 0 \Rightarrow B_{i1} = 1, B_{i2} = 0 \\ V_{2M}[i] = U_{C1} \Rightarrow B_{i1} = 1, B_{i2} = 1 \\ V_{2M}[i] = -U_{c2} \Rightarrow B_{i1} = 0, B_{i2} = 0 \end{cases} \quad (IV.13)$$

IV.7.5 Résultats de simulation

La (**Figure IV.5**) montre la tension simple V_a et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux a structure NPC commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses, la tension d'entrer de l'onduleur est de 1600V.

Nous avons représenté sur la (**Figure IV.5**), la tension d'une phase de l'onduleur triphasé avec son spectre d'harmonique pour différentes valeurs de m ($m=12, m=15$ et $m=24, m=30$), $r=0.8$





Fi IV.5 : La tension simple V_a et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux
Commandé par la modulation vectorielle avec deux porteuses ($r=0.8$).

IV.8 Modélisation et commande du Redresseur de courant triphasé à trois niveaux à structure NPC

Les redresseurs multi-niveaux assurent le transfert d'énergie de la source alternative à la source continue, à l'inverse du rôle des onduleurs multi-niveaux qui eux transfèrent l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif, en adoptant la convention générateur pour la source de courant alternatif et la convention récepteur pour la source de tension continue. Le

modèle établi pour un onduleur trois niveaux à structure NPC est aussi valable pour les redresseurs à trois niveaux [13].

Afin de présenter les performances de cette stratégie, on appliquera cette dernière sur le redresseur associé à une charge résistive de valeur $R_c = 25\Omega$.

La structure du redresseur de courant triphasé à trois niveaux est donnée par la (**Figure IV.6**) suivante :

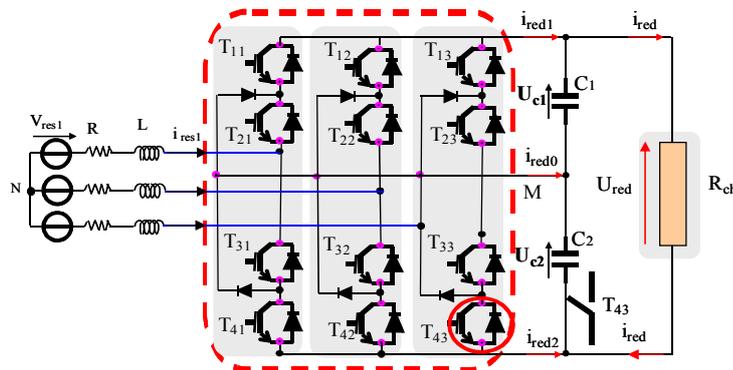


Fig IV.6 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC

Les tensions simples sont données par les fonctions de connexion de demi- bras selon le système suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} V_a \\ V_b \\ V_c \end{array} \right] = \frac{1}{3} \left[\begin{array}{ccc} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{array} \right] \cdot U_{c1} - \left[\begin{array}{l} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{array} \right] \cdot U_{c2} \end{array} \right\} \quad (\text{IV.14})$$

Les courants de sortie du redresseur s'expriment en fonction des courants d'entrée et au moyen des fonctions de connexion des demi-bras par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} i_{red1} &= F_{11}^b \cdot i_{res1} + F_{21}^b \cdot i_{res2} + F_{31}^b \cdot i_{res3} \\ i_{red2} &= F_{10}^b \cdot i_{res1} + F_{20}^b \cdot i_{res2} + F_{30}^b \cdot i_{res3} \end{aligned} \quad (\text{IV.15})$$

Avec :

$$i_{red0} = -(i_{res1} + i_{res2})$$

IV.8.1 Commandabilité du redresseur

Pour assurer la commandabilité, il faut que les deux tensions initiales U_{c1} , U_{c2} , soient supérieures à la tension maximale V_{\max} du réseau. Cette condition doit être vérifiée à chaque instant. Ce type de condition est également nécessaire pour garantir un facteur de puissance unitaire. On peut voir ça clairement en faisant la représentation de Fresnel pour le circuit du réseau (**Fig. IV.7**).

On déduit la contrainte sur la valeur efficace de la tension d'entrée du redresseur V_a :

$$V_{a\text{ eff}} \leq \frac{U_c}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.16})$$

Il existe entre les grandeurs électriques d'entrée du redresseur la relation suivante :

$$V_{KN} = V_{\text{resi}} - R i_{\text{resi}} - L \frac{di_{\text{resi}}}{dt} \quad (\text{IV.17})$$

Avec :

$$k \in \{A, B, C\}, i \in \{1, 2, 3\}$$

Pour la phase 1 en régime harmonique, on obtient les relations entre grandeurs complexes :

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{\text{res1}} - R \bar{I}_{\text{res1}} - j L \omega \bar{I}_{\text{res1}} \quad (\text{IV.18})$$

En négligeant la résistance R , la valeur efficace de la tension d'entrée du redresseur V_a :

$$V_a \approx \sqrt{V_{\text{res1}}^2 + (L \omega I_{\text{res1}})^2} \quad (\text{IV.19})$$

Pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire on trouve :

$$\begin{cases} V_a^2 - V_{\text{res1}}^2 = (L \omega i_{\text{resk}})^2 \Rightarrow V_a > V_{\text{res1}} \text{ or } V_a < U_{\text{red}} \\ V_{\text{res1}}(\text{eff}) < V_a(\text{eff}) < \frac{U_c}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{\text{res1}}(\text{eff}) < \frac{U_c}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

D'où les deux contraintes à respecter :

$$\begin{cases} I_{\text{res1}(\text{eff})} \leq \frac{1}{L \omega} \sqrt{\frac{U_c^2}{2} - V_{\text{res1}}^2} \\ V_{\text{res1}(\text{eff})} \leq \frac{U_c}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (\text{IV.21})$$

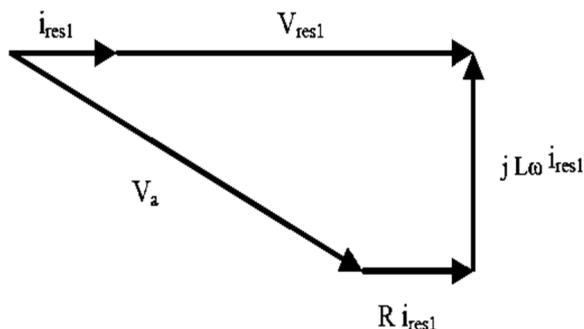


Fig IV.7 : Diagramme de Fresnel sur les grandeurs complexes d'entrée du redresseur

IV.10 Modélisation du réseau électrique dans le repère ABC

Le réseau est modélisé par une source de tension en série avec une inductance, se comportant ainsi comme une source de courant. Vu que l'inductance du réseau est faible et mal connue; elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant, il est donc nécessaire d'ajouter une résistance $R=0.25\Omega$ en série avec une inductance $L=0.01H$ plus importantes que celles du réseau, [13].

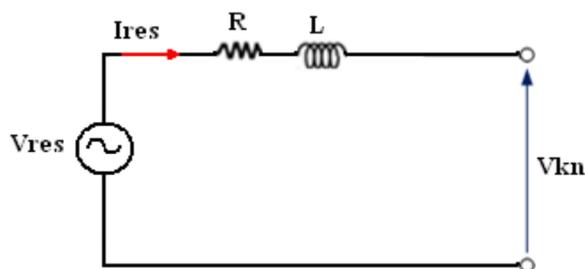


Fig IV.8 : Modélisation d'une phase du réseau électrique

En appliquant la loi des mailles au modèle de la (Figure IV.8) on trouve:

$$V_{\text{resi}} = R i_{\text{vesi}} + L \frac{di_{\text{resi}}}{dt} + V_{\text{kn}} \quad (\text{IV.22})$$

Après la transformation de Laplace, le système prédéfini s'écrit sous la forme matricielle suivante [12]:

$$\begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + LS & 0 & 0 \\ 0 & R + LS & 0 \\ 0 & 0 & R + LS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{res1} \\ I_{res2} \\ I_{res3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (IV.23)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{res1} = \sqrt{2} V_{eff} \sin(\omega t) \\ V_{res2} = \sqrt{2} V_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{res3} = \sqrt{2} V_{eff} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

IV.11 Régulation du courant dans le repère ABC

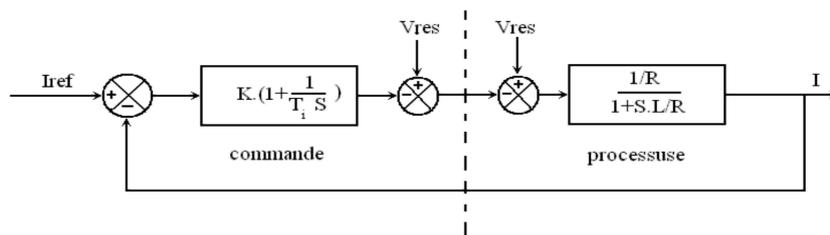
Le modèle de la boucle de courant est celui d'une phase du réseau (**Fig IV.8**). Alors, la fonction de transfert en boucle ouverte peut être modélisée par un premier ordre, ayant comme variable d'entrée la tension aux bornes de l'impédance ($V_{resi} - V_{KN}$), et pour variable de sortie le courant de phase i_{resi} .

La fonction de transfert en boucle ouverte du courant peut s'écrire comme suit [13]:

$$G_i(s) = \frac{\frac{1}{R}}{1 + \frac{L}{R}S} \quad (IV.24)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte des boucles internes étant un premier ordre, un régulateur proportionnel Intégral permet d'obtenir une erreur statique nulle en régime permanent.

L'algorithme de régulation de la boucle de courant avec un régulateur PI est présenté par la (**Figure IV.9**).



FigIV.9 : Boucle de régulation du courant de réseau

IV.12 Commande par la stratégie de modulation vectorielle

Dans notre étude nous allons utiliser une modulation vectorielle à deux porteuses triangulaires bipolaires.

On applique l'algorithme d'asservissement des courants pour chaque phase du réseau élaboré précédemment, (**Fig IV.9**).

Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à trois niveaux sont définis par le système suivant :

$$\begin{cases} I_{res1} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t - \varphi) \\ V_{res2} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ V_{res3} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (IV.25)$$

La valeur efficace du courant de référence du réseau doit être calculée de manière à avoir la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie :

$$P_{réseau} = P_{charge} \implies 3V_{eff} I_{eff} \cos\varphi - 3RI_{eff}^2 = I_{red} \cdot U_{red} \quad (IV.26)$$

$$U_{red} = U_{c1} + U_{c2}$$

Avec :

I_{eff} : Le courant efficace du réseau.

V_{eff} : La tension efficace du réseau.

U_{red} : La tension redressée aux bornes de la charge résistif R_c .

On suppose un facteur de puissance unitaire coté réseau, et on néglige la résistance du réseau, on obtient :

$$\begin{aligned} 3I_{eff} V_{eff} &= I_{red} U_{red} \\ U_{red} &= R_c I_{red} \end{aligned} \implies I_{eff} = \frac{U_{red}^2}{3V_{eff} R_c} \quad (IV.27)$$

IV.13 Simulation et interprétation des résultats

Nous allons simuler un redresseur à trois niveaux associé à une charge résistive $R_c=25\Omega$. La valeur efficace de la tension du réseau est $V_{eff} = 690V$, de fréquence 50Hz. La valeur capacitive du filtre intermédiaire est $C = 20mf$

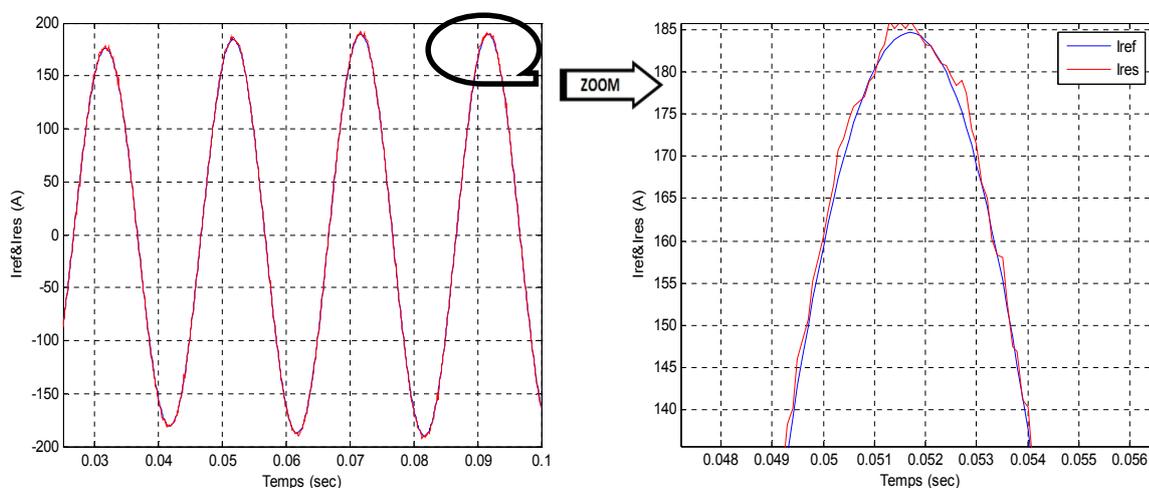


Fig IV.10 : Le courant du réseau de la phase 1 et sa référence

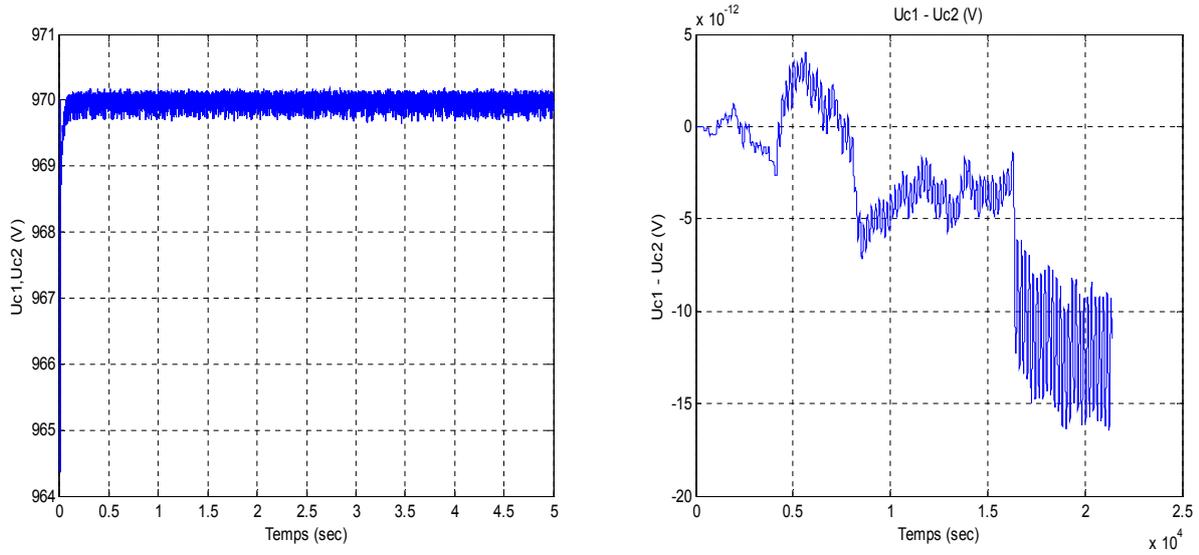


Fig IV.11: Les tensions redressées U_{C1} , U_{C2} et la différence

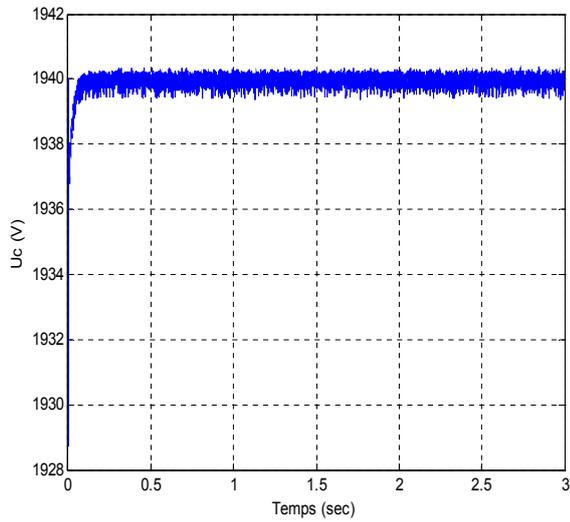


Figure IV.12: La tension redressée U_C

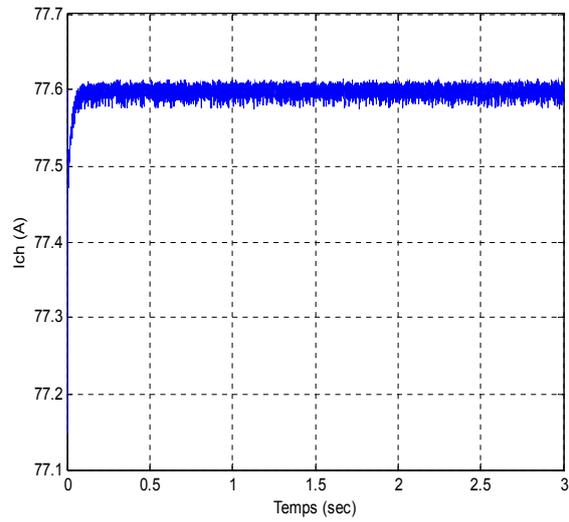


Fig IV.13 : Le courant redressé i dans la charge résistive

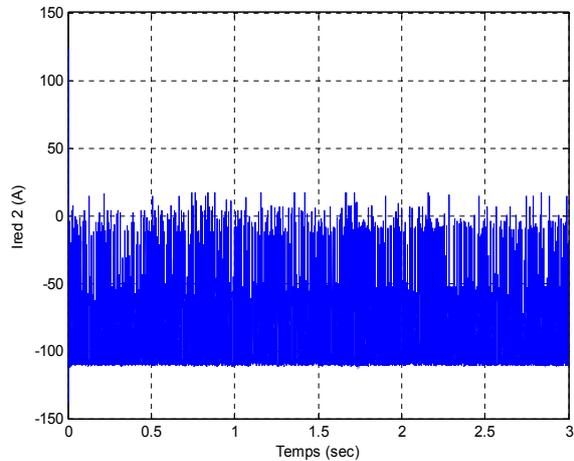
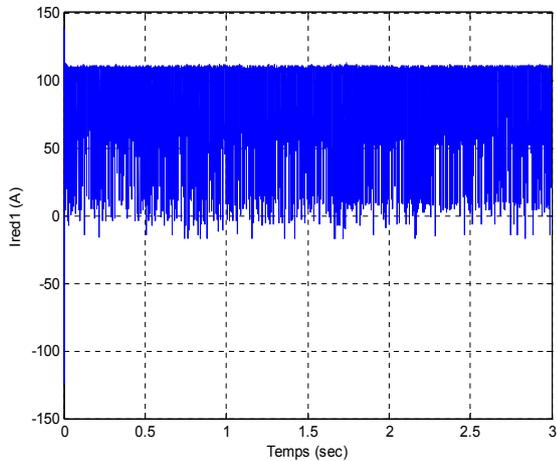


Fig IV.14: Les courants redressés i_{red1} , i_{red2}

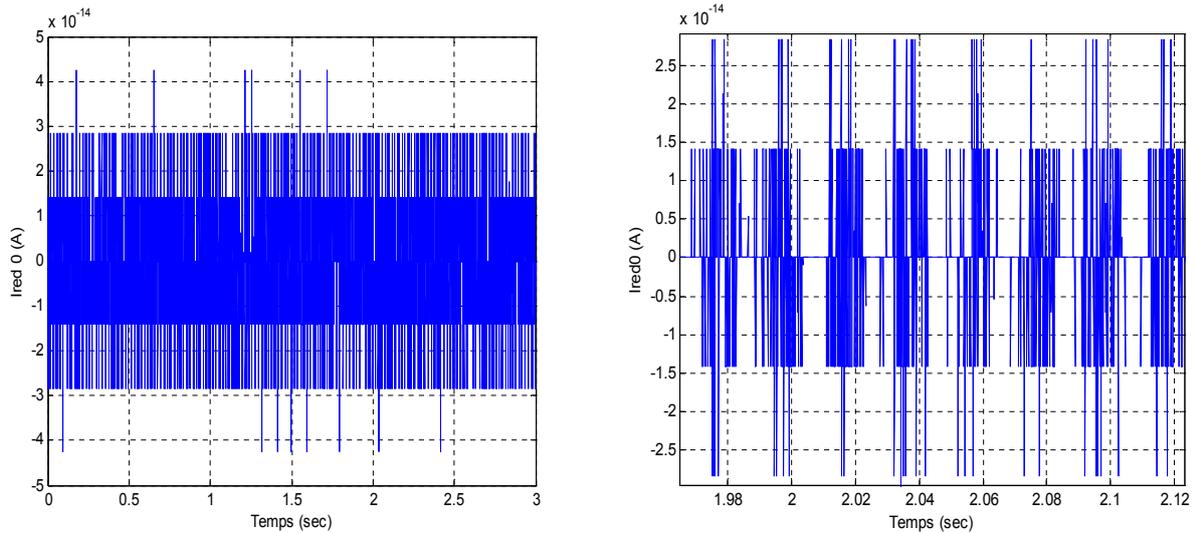


Fig IV.15: Le courant redressé i_{red0}

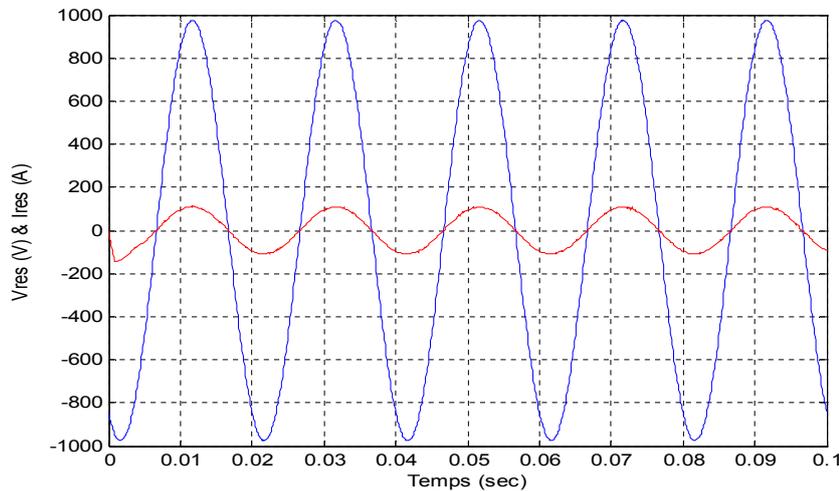


Fig. IV.16 : La tension du réseau V_{res} et le courant d'une phase i_{res}

D'après la (**Fig. IV.10**), on remarque que le courant du réseau triphasé alimentant le redresseur suit sa référence.

La (**Fig. IV.11**) nous montre que les tensions U_{C1} et U_{C2} sont colinéaires, d'où leur différence est pratiquement nulle.

D'après la (**Fig. IV.12**), on remarque aussi que la tension U_c est constante.

D'après la (**Fig. IV.13**), on remarque que le courant redressé i_{red} dans la charge résistive est constante.

Selon la (**Fig. IV.14**), on observe que les courants i_{red1} et i_{red2} ont la même forme mais inversés l'un par rapport à l'autre.

La (**Fig. IV.15**) montre que le courant i_{red0} a une valeur moyenne nulle.

En observant la (**Fig. IV.16**), on constate que la tension du réseau V_{res} est en phase avec le courant I_{res} .

IV.14. Résultats de simulation de la stratégie de commande vectorielle

L'ensemble du système éolien et sa commande ont été simulés à cascade trois niveaux en utilisant Matlab, en considérant une MADA de même caractéristiques de chapitre III 1.5MW dont les paramètres sont donnés dans en annexe. Nous présenterons dans cette section les résultats de commande du système éolien avec la stratégie vectorielle.

Les figures IV.17.a et b. montrent que la puissance active et réactive fournis par la MADA bien suivent leurs références par rapport à cascade deux niveaux.

Les figures IV.17.c et IV.17.d illustrent respectivement le couple électromagnétique et courant statorique.

Nous constatons de la figure .IV.17.e (1 et2), que le courant délivré par le système éolien est en opposition de phase par rapport à la tension réseau. Ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active dans le réseau.

Les figures IV.17.f et 1 et 2 illustrent respectivement la tension rotorique.

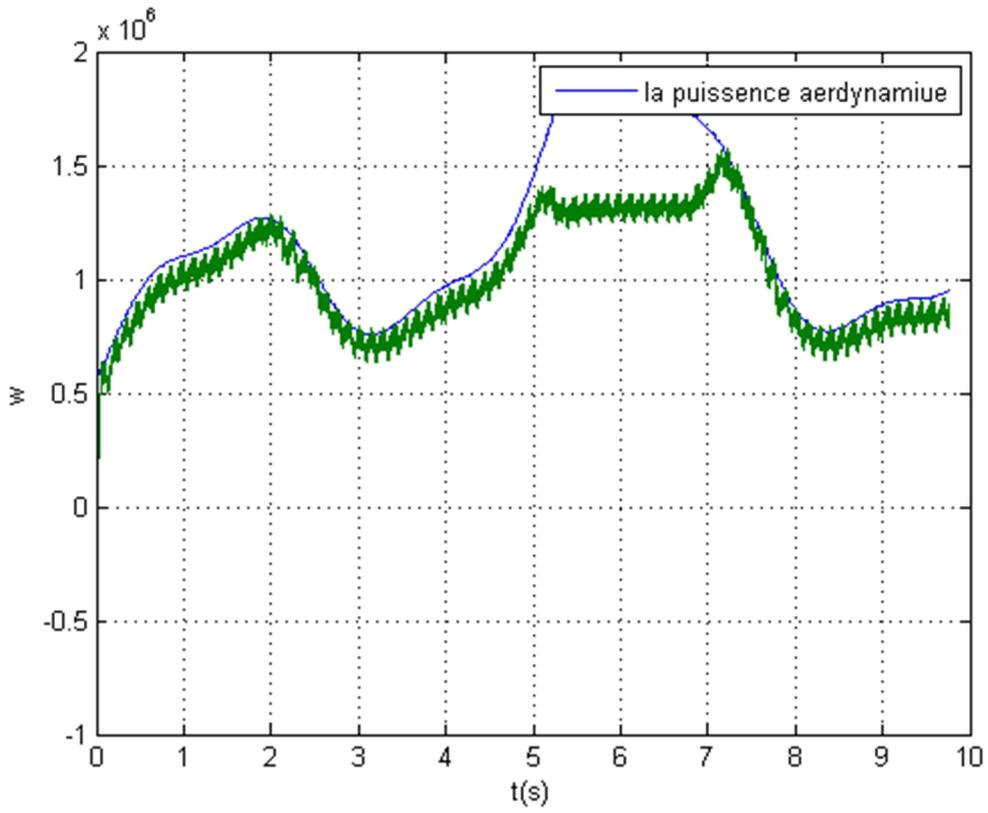


Fig. IV.17.a puissance active gèneère foi (-1) et la puissance aérodynamique

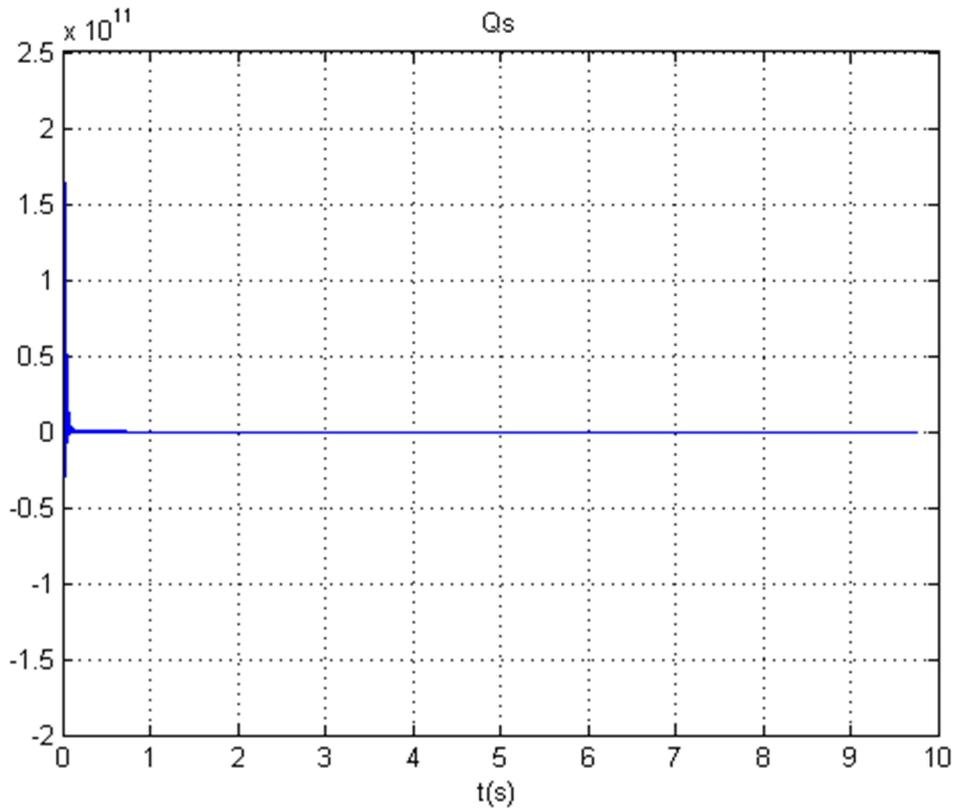


Fig. IV.17.b puissance réactive

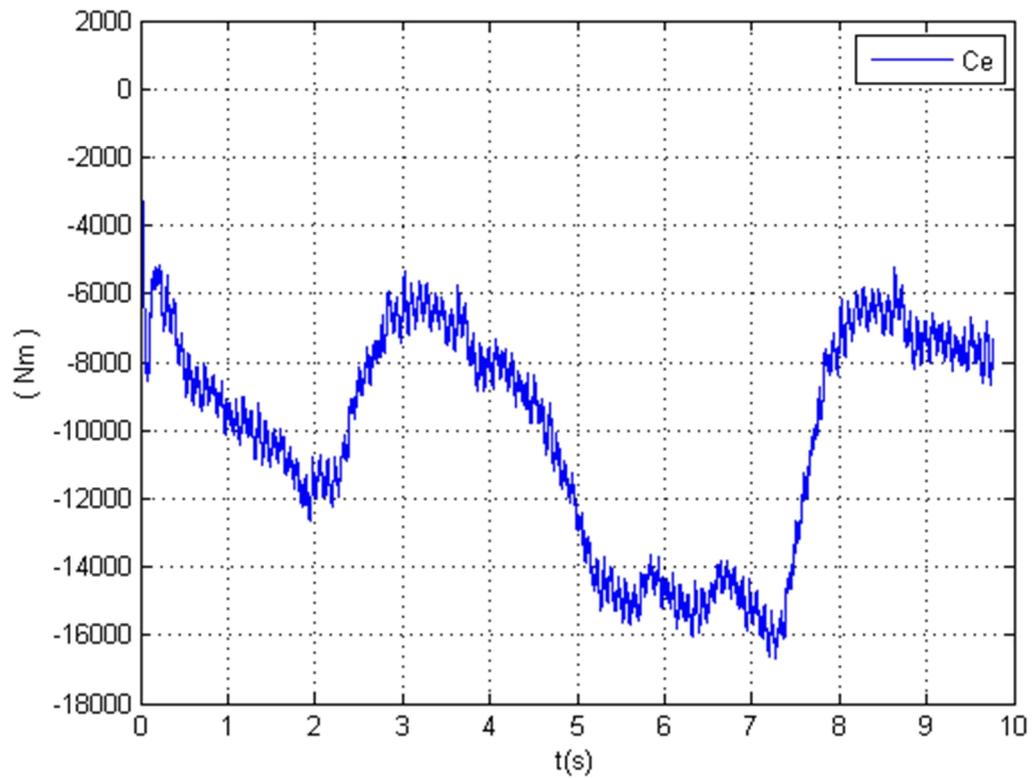


Fig IV.17.c. couple électromagnétique

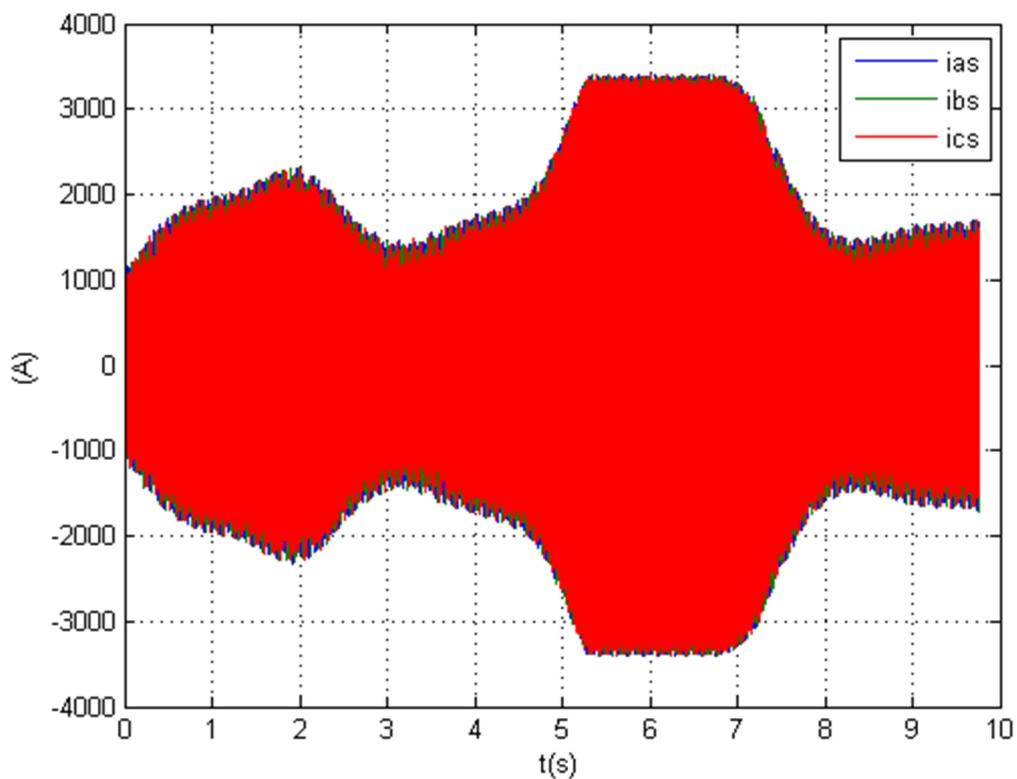


Fig. IV.17.d. courant statorique

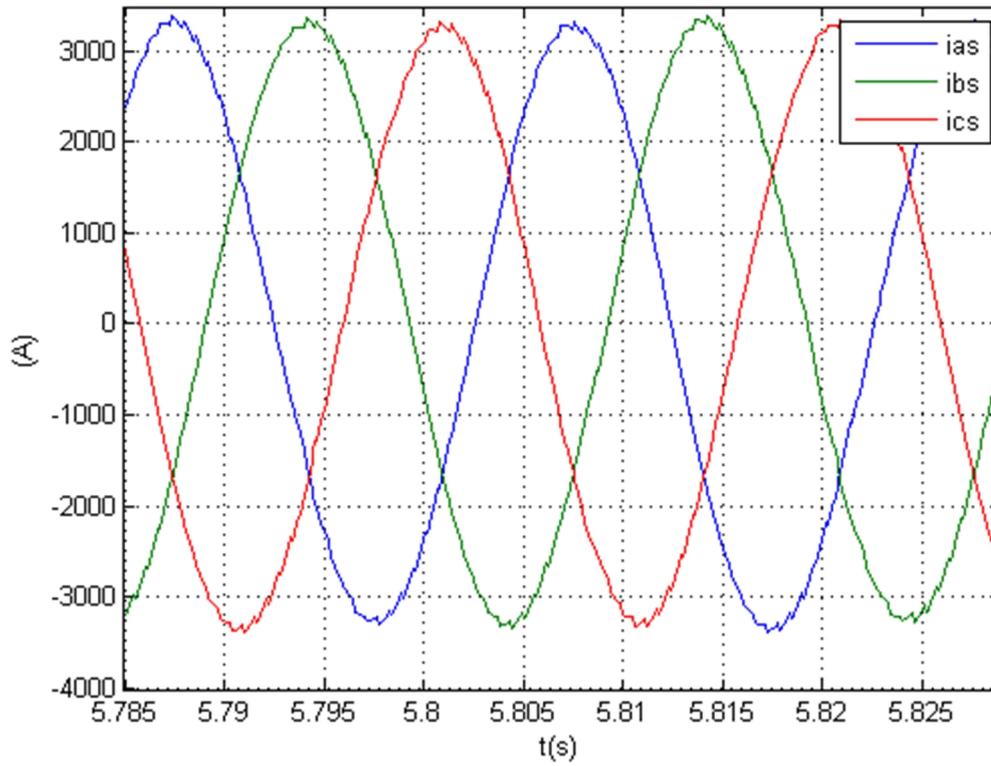


Fig. IV.17 .d .1. Courant statorique zoomé ($t=5.785$ $t=5.825$)

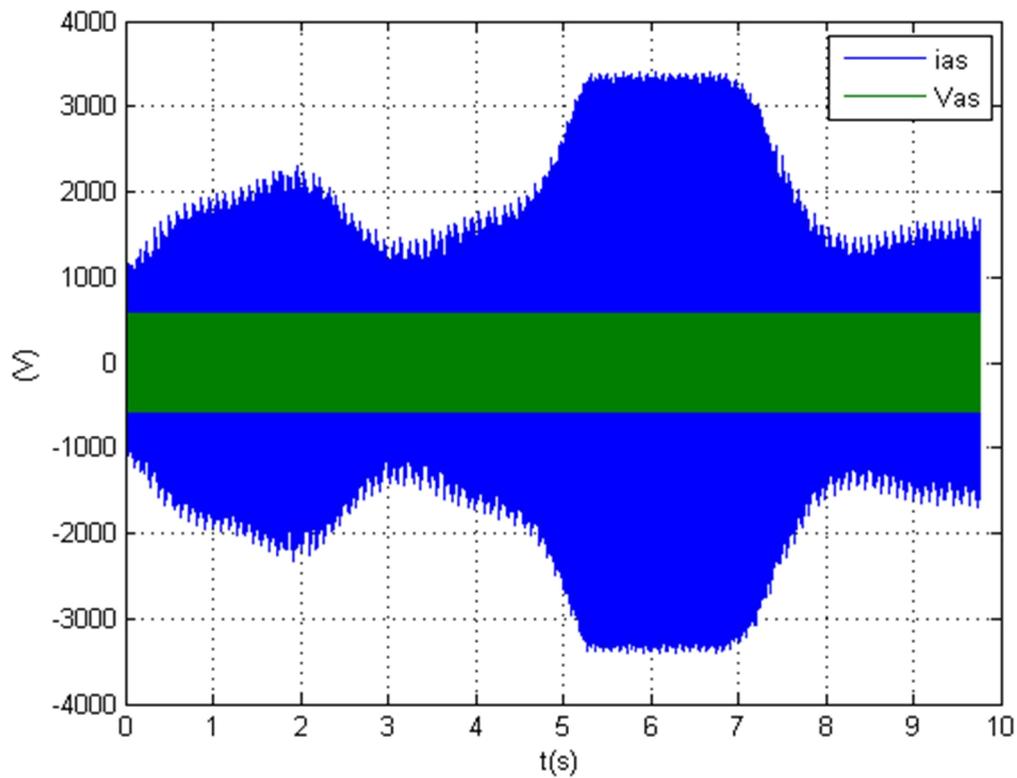


Fig. IV.17 .e.1 le courant statorique et la tension réseau.

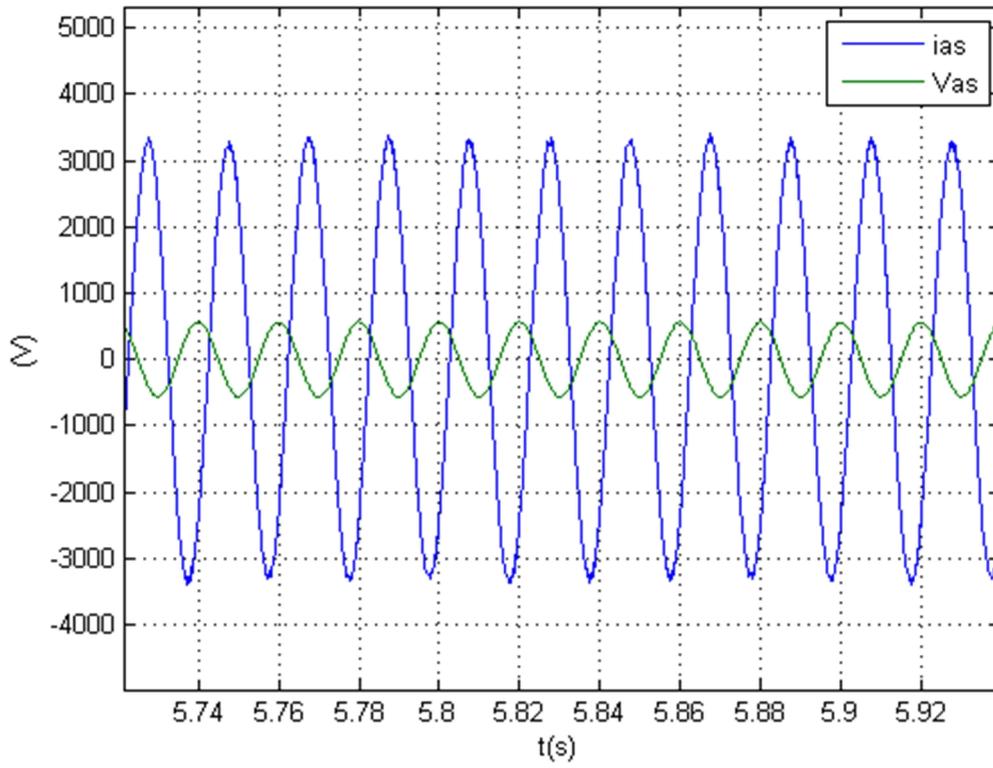


Fig. IV.17 .e 2. Zoom sur le courant statorique et la tension réseau.

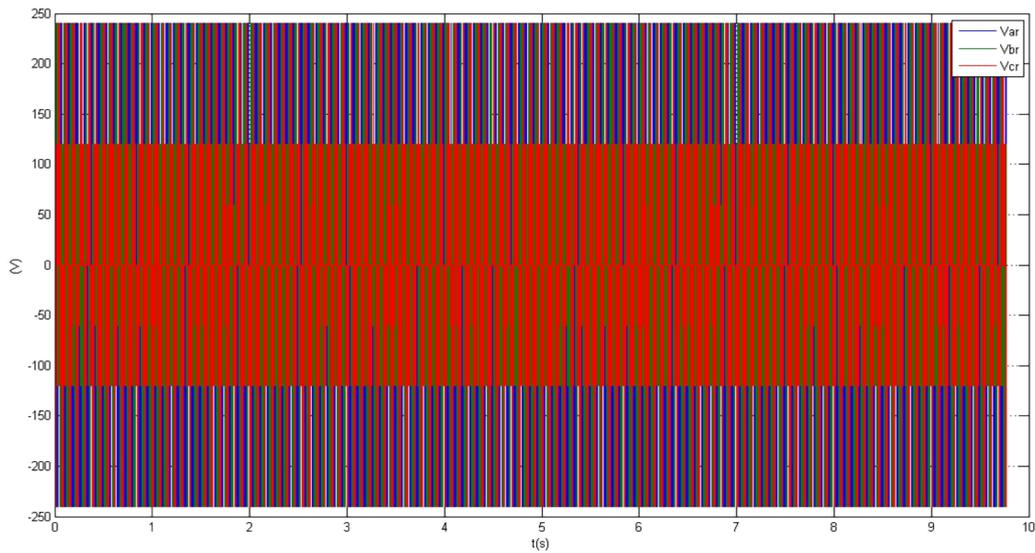


Fig. IV.17.e tension rotorique

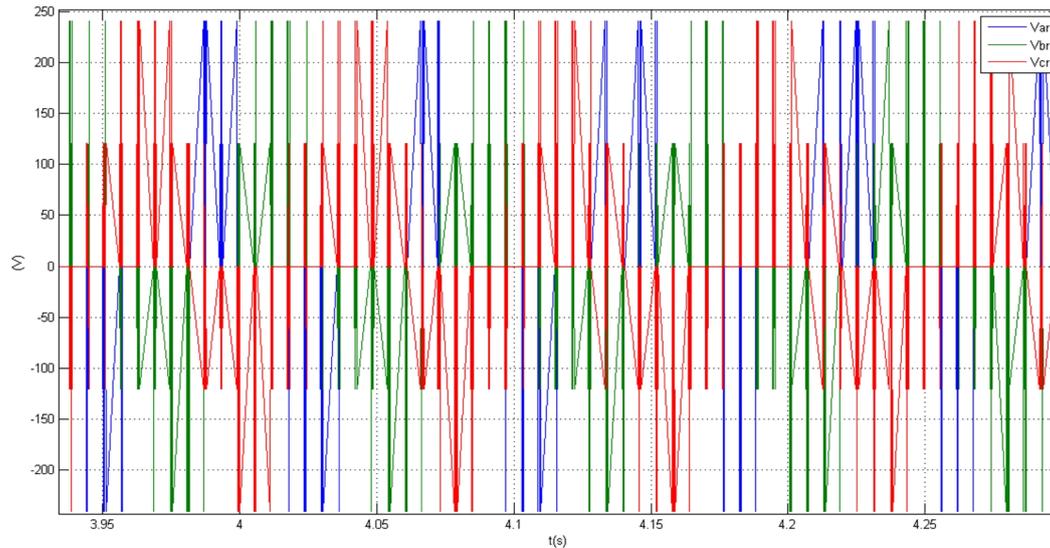


Fig. IV.17 .f. Zoome tension rotorique a ($t=3.95$ $t=4.25$)

Fig. IV. 17 : Résultats de simulation de la commande du système éolien par la stratégie vectorielle

IV.15 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons défini les différentes configurations possibles d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC, pour pouvoir modéliser son fonctionnement. Cette modélisation nous montre que l'onduleur est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux mis en série.

La stratégie de commande par modulation vectorielle avec deux porteuses bipolaires en dents de scie utilisée à cet onduleur permet d'élargir la zone de réglage, ainsi que l'amélioration du taux d'harmoniques.

Dans la seconde partie, nous avons modélisé le redresseur ainsi que le réseau électrique dans le repère ABC.

Enfin pour analyser les performances de la chaîne éolienne, nous avons simulé cette chaîne associée à une cascade à trois niveaux qui a donné des résultats satisfaisants.

Dans ce chapitre, nous avons vu la différence entre les performances générées extraites de la chaîne éolienne par une cascade à trois niveaux et celle à deux niveaux.

Tableau mtreua

Chapitre IV. Application des convertisseurs multiniveaux pour la commande d'un système éolien	
IV.1 Introduction	70
IV.2. Cascade redresseur NPC à trois niveaux – Onduleur NPC à trois niveaux	70
IV.2.1 structure de la cascade.....	71
IV.3. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade	72
IV.4 L'onduleur triphasé à trois niveaux structure NPC	72
IV.5 L'onduleur triphasé à trois niveaux structure NPC	72
IV.6. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	72
IV.6.1 Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux	73
IV.6.2 Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	73
IV.6.3 Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	74
IV.7 Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur à trois niveaux	74
IV.7.1 Commandabilité des convertisseurs statiques	74
IV.7.2 Commande complémentaire des interrupteurs.....	74
IV.7.3 Fonction de connexion des interrupteurs.....	75
IV.7.4 Fonction de connexion du demi-bras	75
IV.7.5 Modélisation aux valeurs instantanée	76
IV.8 Stratégie de commande de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC	76
IV.8.1 Commande par modulation vectorielle	77
IV.8.2 Choix des porteuses	77
IV.8.3 Principe de commande	77
IV.8.4 Algorithme de commande	77
IV.8.5 Résultats de simulation.....	78
IV.9 Modélisation et commande du Redresseur de courant triphasé à trois niveaux à structure NPC.....	79
IV.9.1 Commandabilité du redresseur.....	81
IV.10 Modélisation du réseau électrique dans le repère ABC.....	82
IV.11 Régulation du courant dans le repère ABC.....	83
IV.12Commande par la stratégie de modulation vectorielle.....	83

Tableau mtreua

IV.13 Simulation et interprétation des résultats.....	84
IV.14 Simulation et interprétation des résultats.....	87
IV.11 Conclusion	92

Introduction générale

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz contribuant à l'effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose, aujourd'hui, le problème du stockage des déchets radioactifs qui est encore non résolu.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, assuré actuellement principalement par l'hydraulique.

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité de ces ressources d'énergie.

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui sont extrait des gisements respectifs et acheminés « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées des milliers de kilomètres ; par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant. Pour le lieu de transformation seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés. Les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées.

Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et nécessaire, dans la majorité des cas, de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (houle, éolienne), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) et l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique....), en sachant qu'à la base de toutes ces énergies, il y a l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique.

A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité de ces ressources, les fluctuations de demande en puissance, selon les périodes annuelles ou journalières, ne sont pas forcément en phase avec les ressources.

Face à la croissance de la consommation d'électricité et aux problèmes d'environnement planétaires (renforcement de l'effet de serre du fait des émissions de gaz polluants issus des ressources fossiles, pluies acides, développement de l'énergie nucléaire), l'éolien est une solution si l'on veut penser et agir localement. Cette énergie éolienne a l'avantage d'être non polluante à l'utilisation.

Un état de l'art de l'énergie renouvelable éolienne sera présenté dans le premier chapitre de ce mémoire. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolienne et des différentes structures existantes (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution). Ensuite on aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Dans notre travail, on s'est intéressé à la génératrice à double alimentation.

Le second chapitre introduit la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice à double alimentation ; il est effectuée dans un repère diphasé lié au champ statoriques, en premier temps une modélisation détaillée de la turbine éolienne, ensuite une modélisation d'un onduleur de tension contrôlés par MLI est effectuée.

La dernière partie de ce chapitre présente les résultats de simulation qui nous permettrons de passer à la commande.

Dans le troisième chapitre de ce mémoire, on utilisera la commande vectorielle à flux statoriques orienté, puis on présentera le calcul de régulateurs de type PI.

On validera la commande choisie par les résultats de simulation qui seront commentés.

Enfin, le dernier chapitre traitera de la reconfiguration de la stratégie de commande du système éolien alimenté par des convertisseurs NPC à trois niveaux en proposant deux techniques de contrôle en courant de ces convertisseurs. Celles-ci permettent, d'une part, de contrôler les puissances active et réactive transmises au réseau via le contrôle des courants statoriques de la MADA et, d'autre part, d'équilibrer le diviseur capacitif du convertisseur NPC à trois niveaux.

NOTATIONS

m	: La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde
ρ	: La densité de l'air qui est égale à 1.225kg /m ³ a la pression atmosphérique a 15°C.
S	: La surface d'air en m ² balayée par les pales
C_p	: Le coefficient de puissance de la turbine
λ	: La vitesse spécifique
β	: Angle de calage
G	: Gain du multiplicateur
P_{aero}	: Puissance aérodynamique
V	: La vitesse du vent en m/s
R	: Le rayon de la pale en m
$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine rad/s
C_{aer}	: Couple aérodynamique
C_g	: Couple issu du multiplicateur
J_t	: l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice
C_{mec}	: Couple mécanique
C_{vis}	: Couple de frottement visqueux
f	: Coefficient de frottement visqueux
C_{em-ref}	: Couple électromagnétique de référence
$C_{aer-estime}$: Couple aérodynamique estime
V_{estime}	: Vitesse du vent estimé
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation mécanique
M.P.P.T	: Maximum Power Point Tracking
Ω_1	: Vitesse de rotation de la turbine avant multiplicateur
Ω_2	: vitesse de rotation de la turbine après multiplicateur
V_D	: la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
V_M	: la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement
MAS	: Machine Asynchrone à Cage
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	: Machine à Courant Continu
IGBT	: Insulate Gâte Bipolar Transistor
F.O.C	: Field-Oriented-Control
MLI	:Modulation de Largeurs d'Impulsions
s, r	: Indice correspondants au stator et rotor

a_s, b_s, c_s	: Indice des phases statorique
A_r, B_r, C_r	: Indice des phases rotorique
d, q	: Les axes correspondant au référentiel lié au repère de PARK
p	: Nombre de paire de pole
F	: La fréquence du réseau
g	: Le glissement
Ω_s	: La vitesse synchrone
Ω_r	: Vitesse de rotation mécanique
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	: Les tensions des trois phases statoriques
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	: Les courants des trois phases statoriques
I_{ar}, I_{br}, I_{cr}	: Les courants des trois phases rotoriques
$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$: Les flux des trois phases statorique
$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$: Les flux des trois phases rotorique
R_a, R_b, R_c	: Resistance statorique des trois phases abc
R_A, R_B, R_C	: Resistance rotorique des trois phases ABC
R_s, R_r	: Résistance statorique et rotorique
$[L_s], [L_r]$: Les matrices des inductances statoriques et rotoriques
l_s, l_r	: Les inductances de fuites des statoriques et rotoriques
M_s, M_r	: Les inductances de fuite mutuelle (stator, rotor)
$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles entre le stator et rotor
θ	: La position angulaire du rotor par rapport au stator
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
ω	: Pulsation du réseau
C_{em}	: Couple électromagnétique
J	: Le moment d'inertie de la machine
f	: Le coefficient de frottement
C_r	: Couple résistant
ω_r, ω_s	: Les pulsations électriques respectivement du rotor et du stator
ω_a	: Vitesse angulaire électrique
$[P(\theta)]$: La matrice de PARK
$[P(\theta)]^{-1}$: La matrice inverse de PARK
T_s, T_r	: La constante de temps statorique et rotorique
L_m	: Inductance mutuelle cyclique
Φ_{dm}, Φ_{qm}	: Les flux d'entrefer dans le référentiel (d, q)
X	: Vecteur d'état
V_{sdq}	: Tension statorique dans le référentiel (d, q)
I_{sdq}, I_{rdq}	: Courant statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
Φ_{sdq}, Φ_{rdq}	: Les flux statorique et rotorique dans le référentiel (d, q)
F_p	: La fréquence de la porteuse

R	: La résistance du réseau
L	: L'inductance du réseau
S	: L'opérateur de Laplace
C	: La capacité du filtre intermédiaire
R_c	: Résistance de la charge résistive
i_{ch}	: Le courant de charge
U_{red}	: La tension redressée
V_{eff}	: La tension efficace
i_{ond}	: Le courant de sortie de l'onduleur
P_{reseau}	: Puissance du réseau
P_{charge}	: Puissance de la charge
$\cos \varphi$: Facteur de puissance
Δi	: La largeur de la bande d'hystérésis
ε_j	: L'écart entre le courant de référence
U_c	: Tension du filtre capacitif intermédiaire
T_i	: Transistor IGBT
D_i	: Diode anti-parallel
M	: L'indice de modulation
$V_{refj(j=1.2.3)}$: Tension de référence
$I_{resj(j=1.2.3)}$: Courant des trois phases du réseau
$V_{resj(j=1.2.3)}$: Tension des trois phases du réseau
$I_{refj(j=1.2.3)}$: courant de référence
I_{eff}	: La valeur efficace du courant appelé aux réseaux
PI	: Régulateur proportionnel-intégral
K_p	: Le gain proportionnel du régulateur PI (Proportionnel - Intégral)
K_i	: Le gain intégral du régulateur PI (Proportionnel Intégral)
$\phi_{r ref}$: Le flux rotorique de référence
$C_{em ref}$: Couple électromagnétique de référence
I_{dsref}, I_{qsref}	: Courant statorique de référence dans le plan (d, q)
ϕ_r	: Le flux total
Ω_n	: Valeur nominale de la vitesse mécanique
ϕ_n	: Valeur nominale du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)
V_{dsref}, V_{qsref}	: Tension statorique de référence dans le plan (d, q)

Références Bibliographiques

[1] **Tarak GHENNAM**, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat de Ecole Militaire Polytechnique d'Alger Ecole Centrale de Lille 29/09/2011

[2] **S. El Aimani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », *Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille*, 06-12-2004.

[3] **A. Ahmidi** «Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques», *Thèse de doctorat en génie électrique de l'Ecole Centrale de Lille*, pp. 1-200, 2010

[4] **L. Hamane**, « Les ressources éoliennes de l'Algérie », *Bulletin des Energies Renouvelables*, no. 3, Juin 2003.

[5] Site de constructeur Danois, <http://www.wind power .dk/>.

[6] **R. Ghosn**, «Contrôle vectoriel de la machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2001.

[7] **ARDJOUN Sid Ahmed El Mahdi** « Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire Magistère En Electrotechnique , Université DJILLALI LIABES De Sidi-Bel-Abbas, Algérie, 2009

[8] **LEILA BENALIA** « COMMANDE EN TENSION DES MOTEURS A INDUCTION DOUBLE ALIMENTES » Thèse doctorat en sciences en électrotechnique, laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB), Algérie, 2010.

[9] **S. Khojet El Khil**, « Commande vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement

Alimentée (MADA) », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse & école Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2006.

[10] **Naouel HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », *Mémoire de magister En Electrotechnique*, Université MENTOURI de CONSTANTINE, Algérie, 2008.

[11] **P-E. Vidal**, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[12] **M. Pietrzak-David et B. Fornel**, "Comparaison et Synthèse des Procédés de Commande Vectorielle", SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.

[13] **G. A. Capolino et Y. Y. Fu**, "Commande des Machines Asynchrones par Flux Orienté : Principe, Méthodes et Simulation" SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.

[14] **J. P. Caron et G. P. Hautier**, "Systèmes Electrotechniques : Applications Industrielles, Problèmes et Solutions", Edition Technip, Paris, France, 2000.

[15] **S. Peresada**, A. Tilli and A. Tonielli, "Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of a Doubly Fed Induction Machine", IEEE Transactions on Control Systems and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 875-888, November 2003.

[16] **S. Drid**, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie et Expérimentation", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.

les parametres de la MADA

$f_s = 50;$	fréquence statorique Hz
$\omega_s = 2 * \pi * f_s ;$	pulsation statorique red
$f_r = 13;$	fréquence rotorique Hz
$\omega_r = 2 * \pi * f_r ;$	pulsation rotorique red
$f_v = .0026 ;$	coefficient de frottement de la mada N.m.s=red
$p_n = 1.5 * 10^6;$	Puissance nominale W
$v_n = 1440;$	Vitesse nominale red/s
$T_{en} = 690 ;$	Tension nominale statorique V
$V_s = (T_{en} * \sqrt{2}) / \sqrt{3} ;$	Tension max V
$\% V_s = 380;$	Tension max V
$V_r = 16;$	tension rotorique V
$N = 1440 ;$	Vitesse nominale tr/min
$v_{it} = (2 * \pi * N) / 60;$	Vitesse nominale red/s
$\omega_n = 2 * \pi * v_n / 60;$	Pulsation nominale
$c_{en} = p_n / \omega_n;$	Couple nominale N/m
$F_{sn} = 0.98;$	Flux statorique nominal wb
$R_s = 0.012;$	Résistance statorique
$R_r = 0.021;$	Résistance rotorique
$L_s = 0.0137;$	Inductance cyclique statorique hf
$L_r = 0.0137;$	Inductance cyclique rotorique HF

L'annexe

$M = 0.0135 ;$	Inductance mutuelle HF
$P = 2 ;$	Nombre de paires de pôles
$J = 1000 ;$	Moment d'inertie kg.m ²
$f_p = 0.89 ;$	Facteur de puissance
$T_s = L_s / R_s ;$	Constante de temps statorique (s)
$T_r = L_r / R_r ;$	Constante de temps rotorique (s)
$f_p = 0.89 ;$	Facteur de puissance

les parametres de l'onduleur

$m = 63 ;$	L'indice de modulation
$r = 0.7 ;$	Le coefficient de réglage
$a = 0.5 ;$	La porteuse
$f_m = m * f_r ;$	la fréquence de modulation
$T_m = 1 / f_m ;$	la periode de modulation

les parametres de la turbine

$n_p = 3 ;$	nombre des pales
$R = 35.25 ;$	rayon d'une pale
$G = 90 ;$	Gain du multiplicateur
$J_g = 50 ;$	l'inertie de la génératrice
$J_t = 50 ;$	l'inertie de la turbine

L'annexe

$J_{tt} = (J_t / (G^2)) + J_g$; l'inertie total

$\% f_v = 0.0071$; coefficient de viscosité

$S = \pi * (R^2)$; la surface

$R_o = 1.22$ la masse volumique

$c_{em} = 4000$; couple électromagnétique nominale

$v_{vent_nom} = 12$; vitesse nominale du vent (m/s)

$v_{pal_nom} = 18.5$; vitesse nominale de la pale (tr/min)

$w_{pal_nom} = 2 * \pi * v_{pal_nom} / 60$; vitesse nominale de la pale (rad/s)

$c_{p_nom} = 0.3578$; Coefficient aérodynamique nominal de puissance

$c_{p_max} = 0.5$; Coefficient aérodynamique maximal de puissance

$v_{nom} = 300$;

$P_{pal_nom} = 1/2 * (c_{p_nom} * R_o * S * v_{pal_nom}^3)$; puissance nominale de la pale (W)

General Electric 1,5 MW	
ROTOR	
Diametre	70,5 (m)
pales	3
Régulation	pitch/optiSpeed
Tour	
Hauteur	67-78-85 (m)
Données opérationnelles	
Cut in wind speed	4m/s
Nominal wind speed	16m/s
Stop wind speed	25m/s
Génératrice	
Type	MADA
Puissance Nominale	1,5 MW
Tension et fréquence	690V/50Hz
Poids	
Tour	160t
Nacelle	57t
Rotor	23t
