

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université FERHAT ABBAS -SETIF-

Faculté de technologie

Département de l'électrotechnique

MEMOIRE

En vue de l'obtention d'un diplôme de magistère
En électrotechnique

Option

Réseaux Electrique

Thème

Commande de la tension de sortie d'un redresseur MLI dans le cas de la production d'énergie éolienne

Présenté par : **HAMADOU youcef**

Soutenu le 14/12/2011 devant la commission d'examen :

Mr : BELKHIAT SAAD	PROF	Université de SETIF	Président
Mr : KHENFER NABIL	PROF	Université de SETIF	Rapporteur
Mr : RAHMANI LAZHAR	PROF	Université de SETIF	Examineur
Mr : GHARBI AHMED	M.C	Université de SETIF	Examineur
Mr : RADJAI HAMMOUD	M.C	Université de SETIF	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long de ma vie.

*Ma femme et mes enfants : AMANI, DOUNIA et WASSIM
ABDERAHMAN.*

Ma sœur et mes frères.

Et tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Je tiens à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

*Je tiens à remercier vivement Monsieur **LAZHAR RAHMANI** Professeur et doyen de la faculté de technologie Université de Sétif pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour son aide à accomplir ce travail.*

*Je tiens à remercier également Monsieur **SAAD BELKHIAT**, Professeur à Université de Sétif, d'avoir accepté de présider mon Jury de mémoire. Je suis très reconnaissant pour le grand honneur qu'il m'a accordé en acceptant cette tâche.*

J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs

*- **HAMMOUD RADJAI**, Maitre de conférence Université de Sétif.*

*- **AHMED GHARBI**, Maitre de conférences Université de Sétif.*

Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

*Je tiens à remercier Monsieur **TAREK BOUKTHIR** Professeur à Université de Sétif pour son aide et son soutien*

*Je tiens à remercier aussi Monsieur **SAID BARKATI** Maitre de conférence Université de MSILA pour son aide et son soutien.*

*Sans oublier Monsieur **RIADH KADRI**, je le souhaite bonne chance dans son parcours.*

En fin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	03
CHAPITRE I ETAT DE L'ART DES ENERGIES EOLIENNES	
I-1-INTRODUCTION	06
I-2- DEFINITIONS DE L'ENERGIE RENOUVELABLE	06
I-3- LES DIFFERENTS SORTES D'ENERGIES RENOUVELABLES	06
I-3-1 Energie éolienne	06
I-3-2 Energie solaire	06
I-3-3 Energie hydraulique.....	08
I-3-4 Energie géothermique	09
I-3-5 La biomasse	09
I-4-LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES	10
I-4-1-Eoliennes à axe vertical	10
I-4-2-Eoliennes à axe horizontal.....	11
I-5-ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE	11
I-5-1-loi de BETZ	11
I-5-2-production d'énergie mécanique	14
I-6-PRODUCTION OPTIMALE D'ENERGIE.....	16
I-7-MACHINES ELECTRIQUES ET SYSTEMES DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE.....	17
I-7-1- Machines asynchrones à cage (MAS).....	17
I-7-2-Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	18
I-7-3-Génératrices synchrones.....	19
I-8-CONCLUSION.....	21
CHAPITRE II LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION	
II-1-INTRODUCTION	23
II-2-DEFINITION	23
II-3-FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE A VITESSE VARIABLE	23
II-4-LES DIFFERENTES STRUCTURES A BASE DE MADA.....	25
II-4-1-Double alimentation par le stator	25
II-4-2- Double alimentation par le stator et le rotor.....	27
II-4-2-1- Principe	27
II-4-2-2- Contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique	29
II-4-2-3- Transfert de la puissance rotorique sur le réseau	30
a – Principe	30
b - Pont à diodes et pont à thyristors.....	30
c - Pont à diodes et pont à transistors.....	31
d – Cycloconvertisseur	32
e - Convertisseurs MLI	33
f - Structure à trois convertisseurs MLI.....	33
II-8-CONCLUSION	34

CHAPITRE III MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE MADA

III-1-INTRODUCTION.....	36
III.2. MODELISATION DE LA MADA EN GRANDEURS DE PHASES	36
III.2.1. Hypothèses simplificatrices	36
III.2.2. Équations des tensions	37
III.2.3. Equations des flux.....	38
III.2.4. Equation mécanique.....	39
III.3. MODELISATION DE LA MADA DANS UN REPERE ORTHOGONAL	40
III.3.1. La transformation de Park.....	40
III.3.1.1. Transformation des variables statoriques.....	40
III.3.1.2. Transformation des variables rotoriques.....	41
III.3.2. Equation de la MADA dans le repère arbitraire	42
III.3.2.1. Equations des tensions	43
III.3.2.2. Equations des flux.....	44
III.3.2.3. Equation du couple électromagnétique.....	45
III.3.3. Le choix du référentiel	46
III.3.3.1. Référentiel lié au stator	46
III.3.3.2. Référentiel lié au rotor	46
III.3.3.3. Référentiel lié au champ tournant.....	47
III.4. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE	47
III.5. MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE	48
III.5.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques	49
III.5.2. Expressions des tensions rotoriques.....	50
III.6. CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE.....	51
III.6.1. Commande directe	52
III.6.2. Commande indirecte	53
III.6.2. 1. Commande en boucle ouvert	53
III.6.2.2. Commande en boucle fermé	54
III.7. MODELE DE L'ONDULEUR DE TENSION A DEUX NIVEAUX.....	54
III.7.1. Principe de la MLI	56
III.8. CONCLUSION.....	57

CHAPITRE IV RESULTATS DE SIMULATION

IV-1-INTRODUCTION	60
IV-2-REPRESENTATION GLOBALE DU SYSTEME	60
IV-3- SIMULATION DU MODELE	62
IV-3-1-Cas d'un état sein.....	62
IV-3-2-Cas d'un défaut de creux de tension.....	66
IV-3-3-Cas de variation de vitesse du vent.....	70
IV-3-4-Cas d'un défaut monophasé.....	74
IV-4- CONCLUSION.....	77

CONCLUSION GENERALE.....	79
--------------------------	----

Annexe
Bibliographie

La liste des acronymes

MADA : **M**achine **A**synchrone **D**ouble **A**limentée

MLI : **M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsion

MAS : **M**achine **A**synchrone à **C**age

PMSM: **P**ermanent **M**agnetic **S**ynchronous **M**achine

SM: **S**ynchronous **M**achine

PWM: **P**ulse **W**idth **M**odulation

IGBT: **I**ntegrate **G**ate **B**ipolar **T**ransistor

GTO: **G**ate **T**urn **O**ff

FFT: **F**ast **F**ourier **T**ransformer

THD: **T**otal **H**armonic **D**istortion

IGCT: **I**ntegrated **G**ate **C**ommutated **T**hyristor

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie et l'information sont deux éléments fondamentaux de notre société moderne, toutes deux sont produites, transportées, transformées, stockées... De nombreuses analogies existent entre énergie et information à ceci près que nos « manipulations » énergétiques peuvent perturber gravement notre environnement car nos exigences en terme de transport et de confort font croître à un rythme démesuré nos besoins énergétiques. Depuis l'aube de l'humanité, nous brûlons des combustibles : d'abord le bois, puis les fossiles (charbon, pétrole, gaz), enfin l'uranium, à peine plus d'un siècle.

La combustion à grande échelle des carburants fossiles conduit à des dégagements massifs de composés divers dont on commence à soupçonner qu'ils modifient les équilibres de la planète, par ailleurs, il est probable que nous aurons épuisé leurs réserves durant le siècle prochain. [1]

Parallèlement, la nature nous dispense, généreusement et de façon assez bien répartie sur la terre, une quantité d'énergie (renouvelable) très largement suffisante pour satisfaire à nos besoins. Il existe une multitude de solutions technologiques pour l'utiliser à grande ou petite échelle, que ce soit pour produire de la chaleur, de l'énergie mécanique ou de l'électricité qui, à son tour, peut être transformée.

Il existe alors différentes sortes d'énergie renouvelable dont on va s'intéresser dans ce mémoire plus particulièrement de l'énergie éolienne, où on va décrire les différents types d'éoliennes, et les machines électriques utilisées dans ce sens. Notamment, on va étudier les éoliennes intégrant une Machine Asynchrone à Double Alimentation. (MADA) qui permet le fonctionnement à vitesse variable en ajustant la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent, ainsi que les différentes structures à base de cette dernière.

Le présent travail est réparti en quatre chapitres, le premier présente les divers types de l'énergie renouvelable, notamment l'énergie éolienne, dont on a décrit les différentes éoliennes, la production optimale d'énergie et les systèmes utilisés pour la conversion de ce type d'énergie.

Le deuxième chapitre est consacré à la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en génératrice à vitesse variable, et les diverses structures à base de cette dernière.

Dans le troisième chapitre, on présente la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, le principe de la commande vectorielle, les différentes topologies de commande, et aussi la modélisation de l'onduleur à base de la commande MLI.

Le quatrième chapitre illustre la simulation du système utilisé dans ce mémoire avec des interprétations des résultats obtenus, et en fin, on termine ce travail par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART DES ENERGIES EOLIENNES

I-1-INTRODUCTION

L'énergie est nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes pour la production du chauffage, de l'électricité, dans l'industrie, pour la construction et dans les transports.

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, grâce à la combustion des carburants fossiles ou de l'uranium 235 (fission nucléaire), [1] ressources épuisables. Elle contribue ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement. Les ressources énergétiques renouvelables sont pourtant considérables et parfaitement capables, à long terme, de satisfaire la majeure partie de nos besoins.

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesse.

I-2- DEFINITIONS DE L'ENERGIE RENEUVELABLE

a- L'énergie renouvelable se rapporte à la puissance développée par une source renouvelable, c'est-à-dire, quand l'énergie est produite, la ressource n'est pas épuisée. Elle est naturellement reconstituée, ses réserves sont tellement importantes que l'homme ne puisse jamais les épuiser. En dira alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future [2].

b- Les énergies renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continûment par la nature, elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. [3]

c- Le mot renouveler veut dire remplacer ,renouveler l'énergie ,c'est aussi remplacer l'énergie fossile qui exploite le charbon, le pétrole et le gaz qui sont des réserves limités et qui polluent l'environnement, par des énergies dont les ressources sont inépuisables et non polluantes, qu'on appelle aussi énergie de remplacement. [3]

d- Une énergie renouvelable est une énergie dont la source est illimitée dans le temps et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de possibles dégâts écologiques. [4]

I-3- LES DIFFERENTS SORTES D'ENERGIES RENEUVELABLES [5]

I-3-1 Energie éolienne

Les éoliennes exploitent le mouvement de l'air pour produire de l'énergie et cela par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.

L'énergie éolienne est utilisée soit directement comme dans les éoliennes de pompage ou les anciens moulins à vent (essentiellement pour moudre le grain), soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs [5].

Un aérogénérateur, plus communément 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 (Figure I-1). [6]

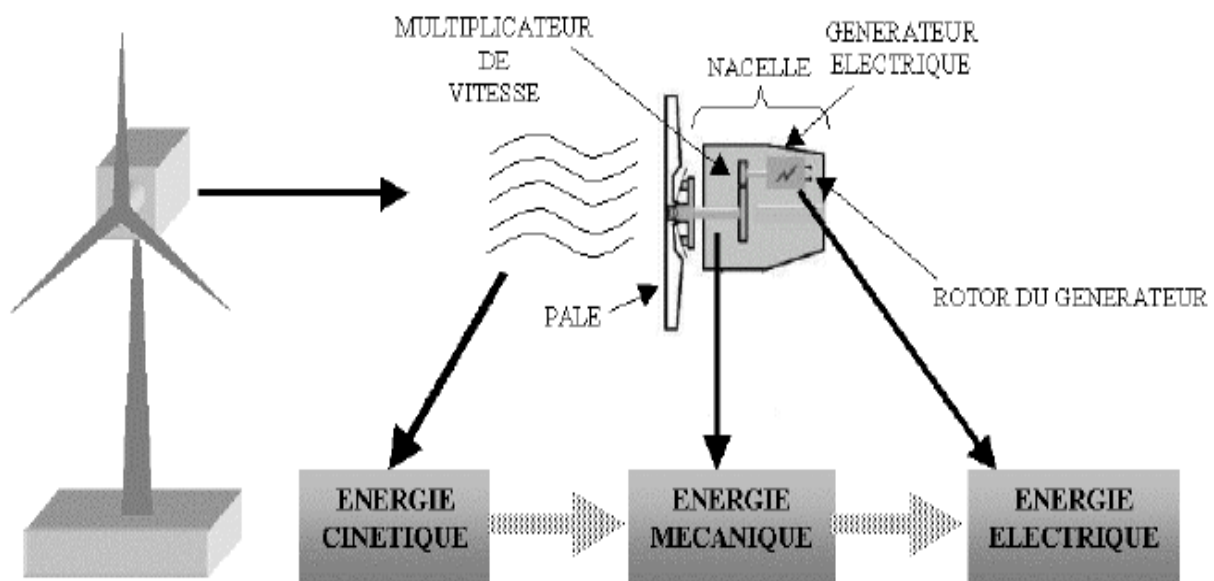


Figure I-1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [5]:

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

Bien sûr les fluctuations naturelles et difficilement prévisibles de la production éolienne posent des problèmes difficiles de stabilisation des réseaux dans lesquels le stockage d'énergie risque de se révéler indispensable. On peut noter que plus de $24,5GW$ étaient installés dans le monde début 2002, pour une production annuelle estimée à $45.10^9 kWh$.

I-3-2 Energie solaire [5]

Les capteurs solaires thermiques sont des éléments qui convertissent directement l'énergie solaire en chaleur, récupérée grâce à un fluide caloporteur, qui s'échauffe en

circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et minimise les pertes par rayonnement infrarouge de l'absorbeur chaud en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet aussi de limiter les échanges de chaleur sensible avec l'atmosphère. Le capteur solaire sera d'autant plus performant que le revêtement de l'absorbeur a un coefficient d'absorption élevé et un coefficient d'émission faible. Les matériaux qui présentent ces caractéristiques sont dits "sélectifs". Les performances du capteur sont encore améliorées en isolant la face arrière du module.

Le fluide caloporteur chauffé par les capteurs solaires circule dans les dalles chauffantes. Celles-ci stockent la chaleur injectée de manière irrégulière, selon l'ensoleillement et la restituent de manière beaucoup plus régulière. Les capteurs peuvent également participer à la production d'eau chaude sanitaire, en particulier en été, lorsque le chauffage n'est plus utilisé.

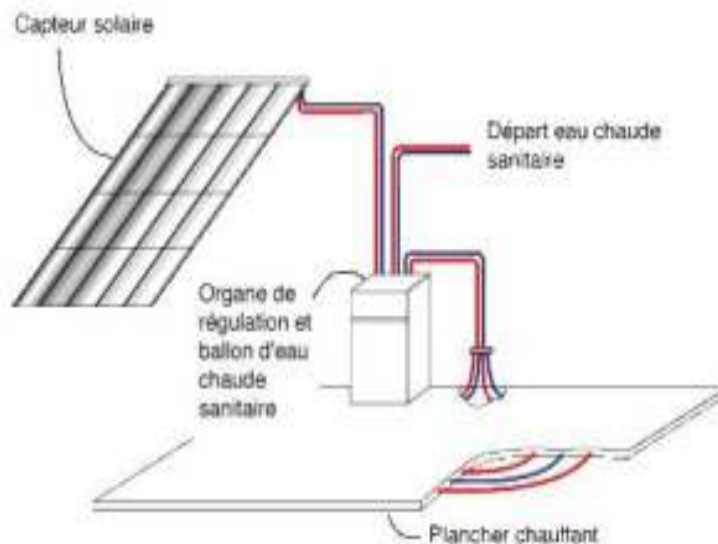


Figure-I-2- Energie solaire photovoltaïque

I-3-3 Energie hydraulique :

L'énergie hydroélectrique (l'énergie potentielle de l'eau accumulée dans des barrages) est transformée en énergie cinétique par écoulement. Celle-ci est transformée en énergie mécanique grâce à une turbine, qui à son tour entraîne un générateur électrique : alternateur ou dynamo. L'énergie mécanique devient alors de l'énergie électrique. La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs : la hauteur de la chute et le débit dérivé.

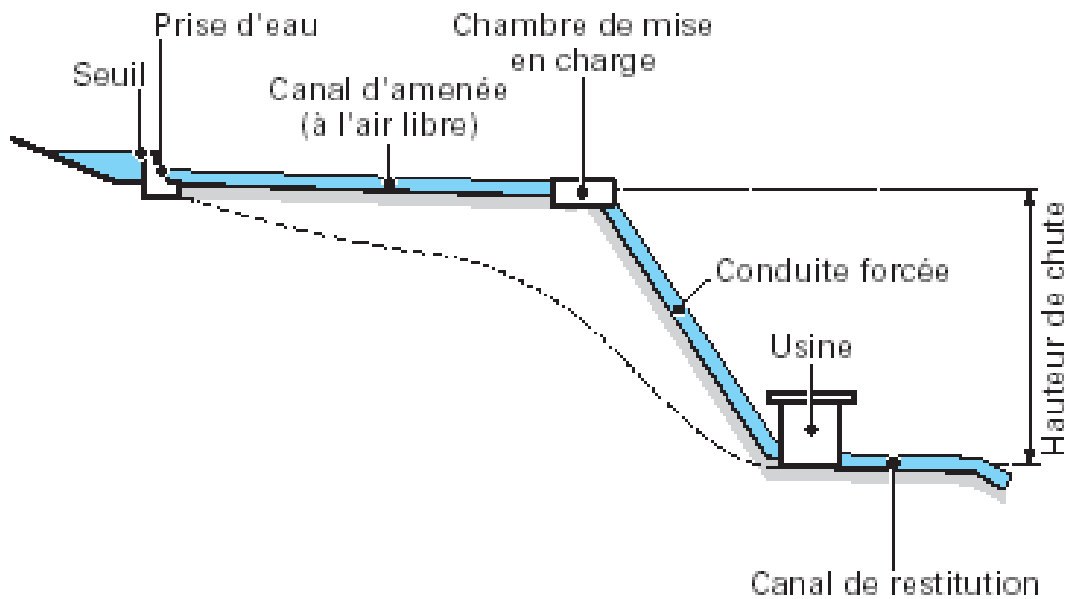


Figure-I-3- schémas de principe [7]

I-3-4 Energie géothermique

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité.

Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100m en moyenne jusqu'à 15 ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000 à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères (nappe souterraine renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau).

I-3-5 La biomasse

La biomasse est le terme utilisé pour décrire l'ensemble des êtres vivants d'un écosystème. Il désigne l'ensemble de la matière vivante, il s'applique aux produits organiques, végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. La biomasse contient du carbone, après combustion on obtient de l'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité. C'est la source la plus ancienne d'énergie renouvelable connue des hommes.

I-4-LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I-4-1-Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [8]

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I-4a).

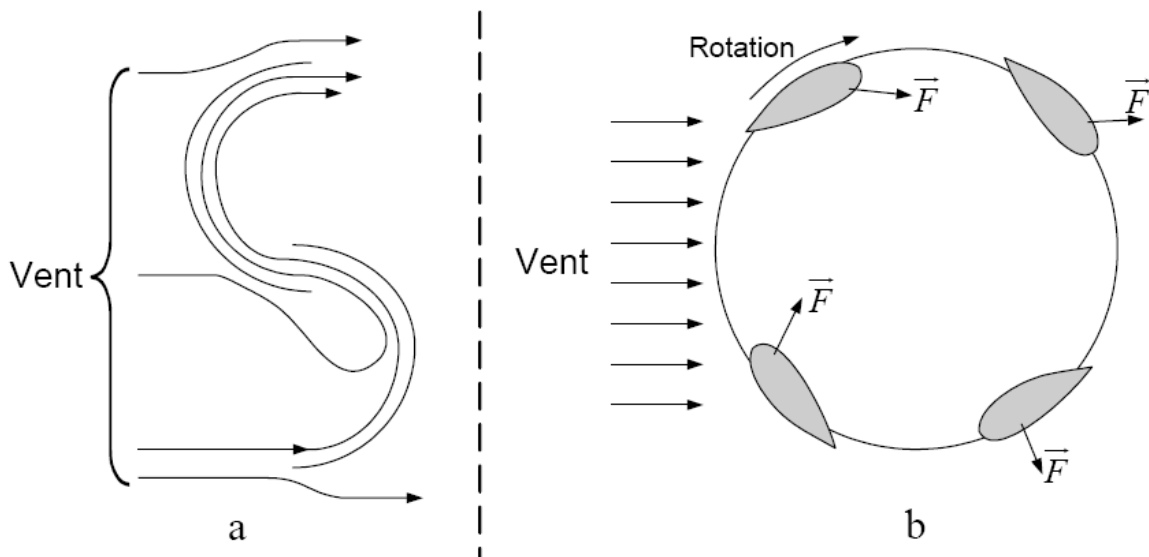


Figure I-4 Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieux (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I-4b) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces

sont créés par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

I-4-2-Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [9]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [10]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

I-5-ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE

I-5-1-loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I-5 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:

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

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 dans (I.1):

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

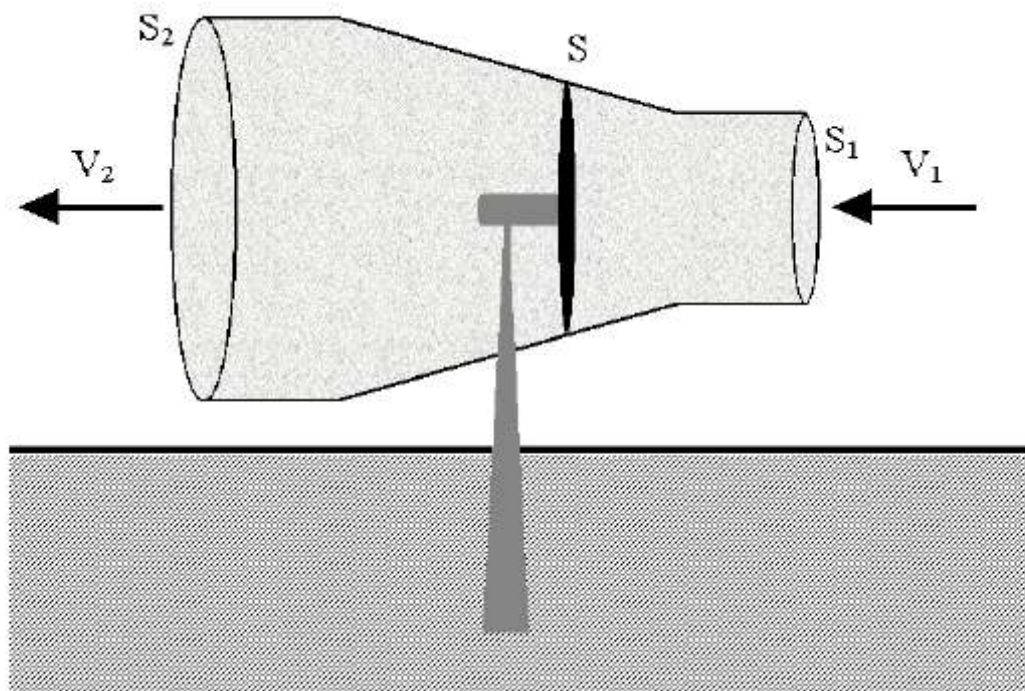


Figure I-5 Tube de courant autour d'une éolienne

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

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

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

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

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I-6), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{16}{27}$ 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.

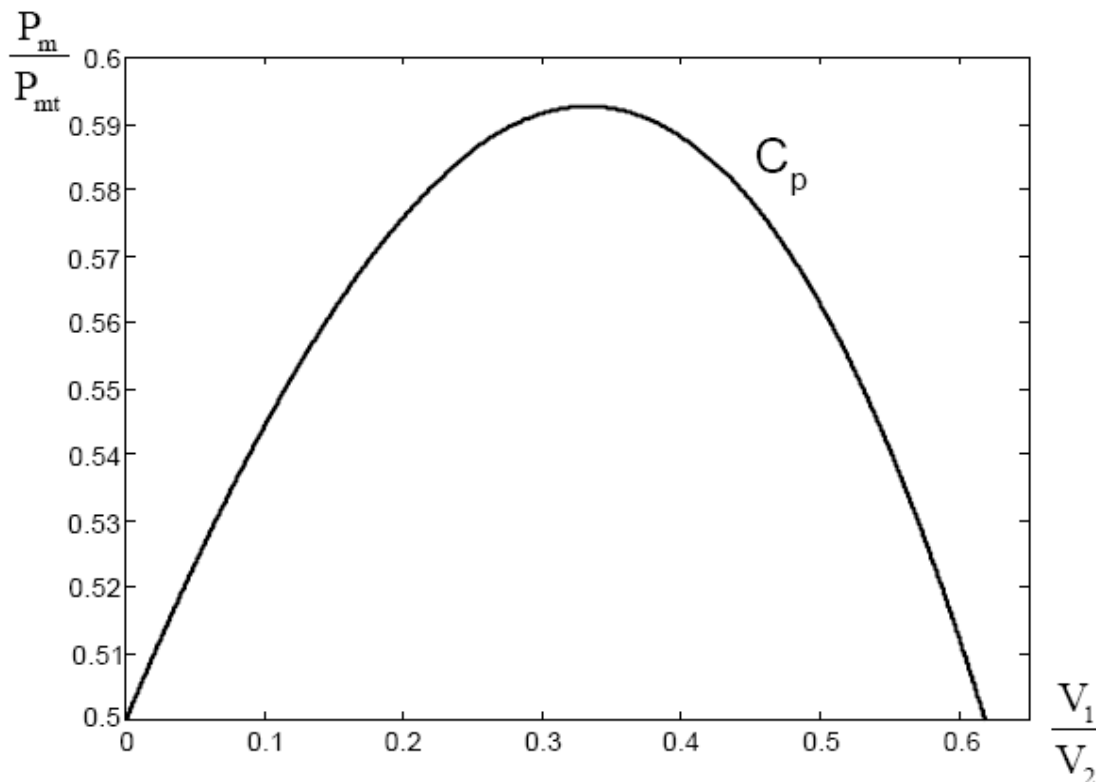


Figure I-6 Coefficient de puissance

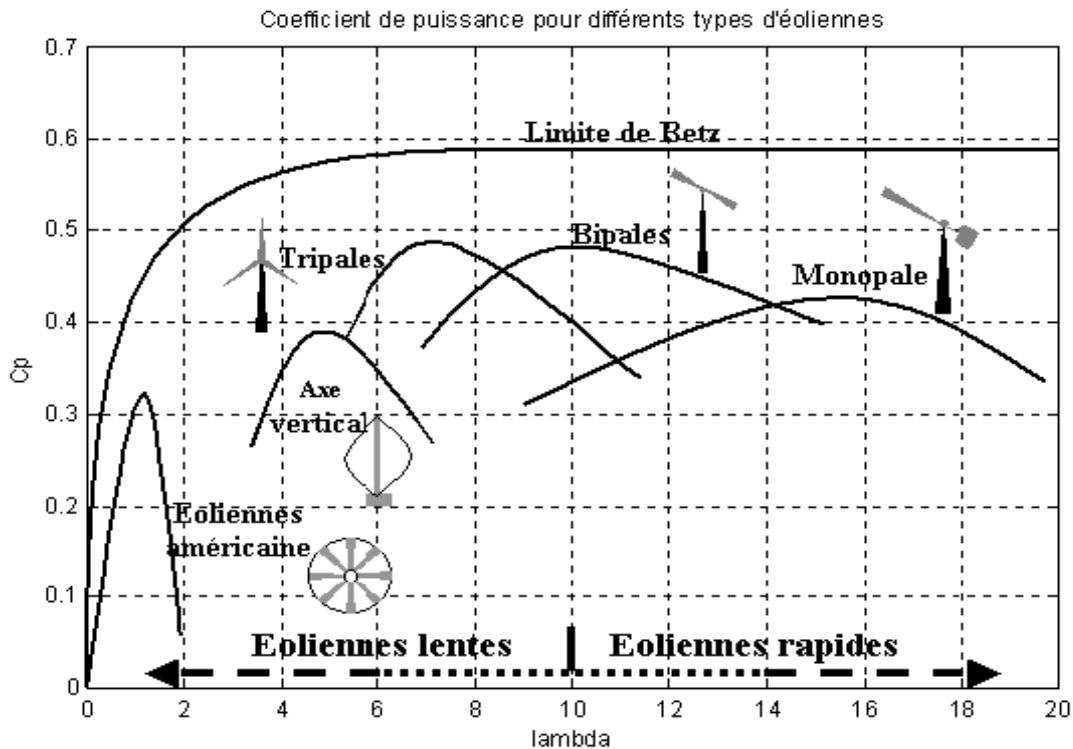


Figure I-7 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

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 (Figure I-7) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 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.

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 I-7) 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 [11].

I-5-2-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 :

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

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (I.7)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

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 (Figure I-8) [11].

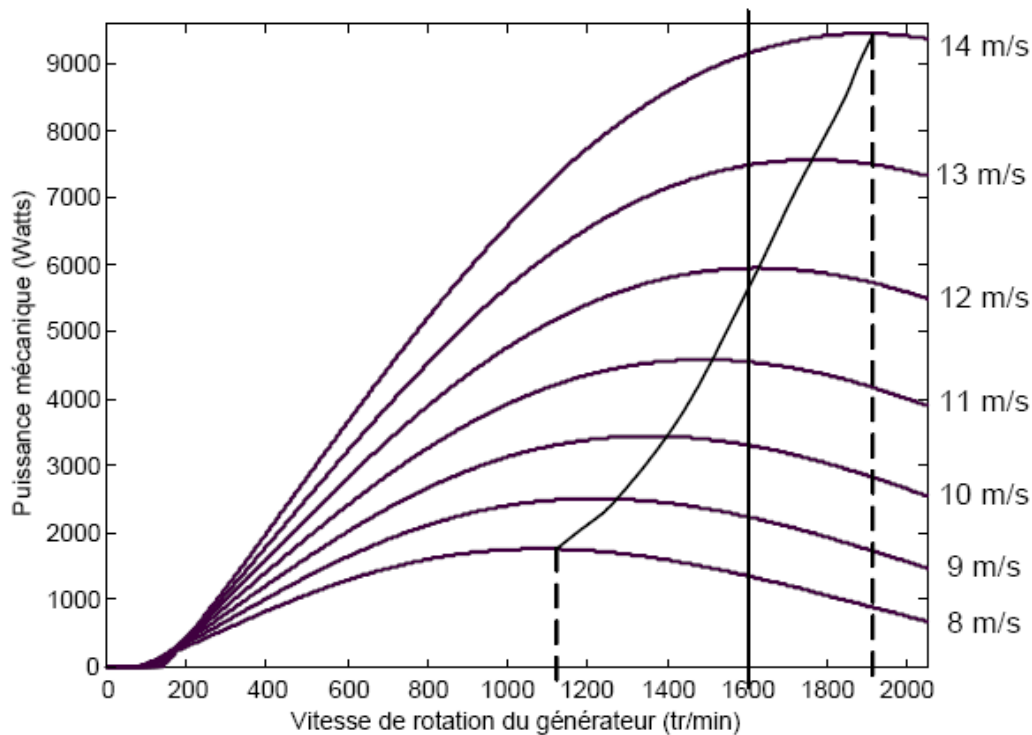


Figure I-8 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure I-8) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert

de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

I-6-PRODUCTION OPTIMALE D'ENERGIE

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure I-8. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (I.8)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la (Figure I-9) [12]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

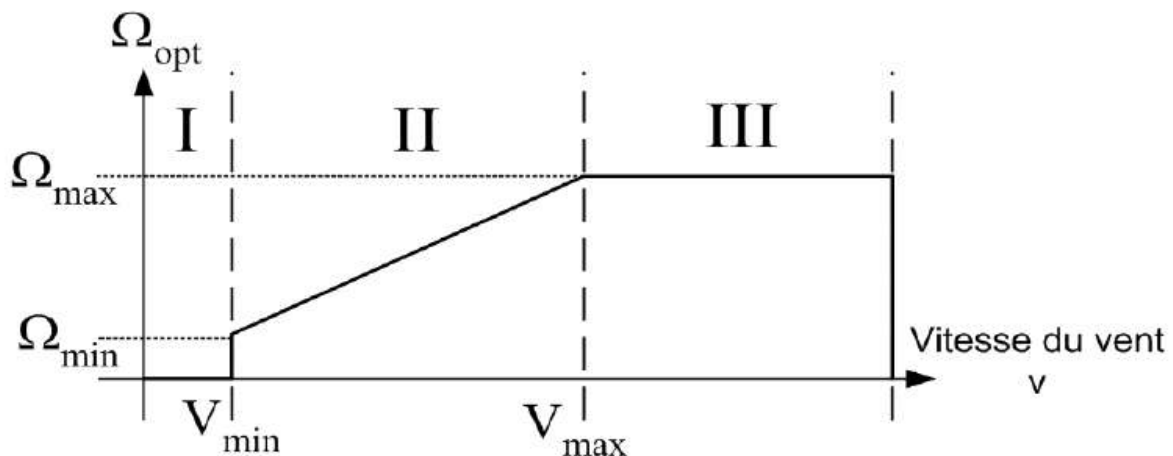


Figure I-9 Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure I-10).

Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté

réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine.

Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

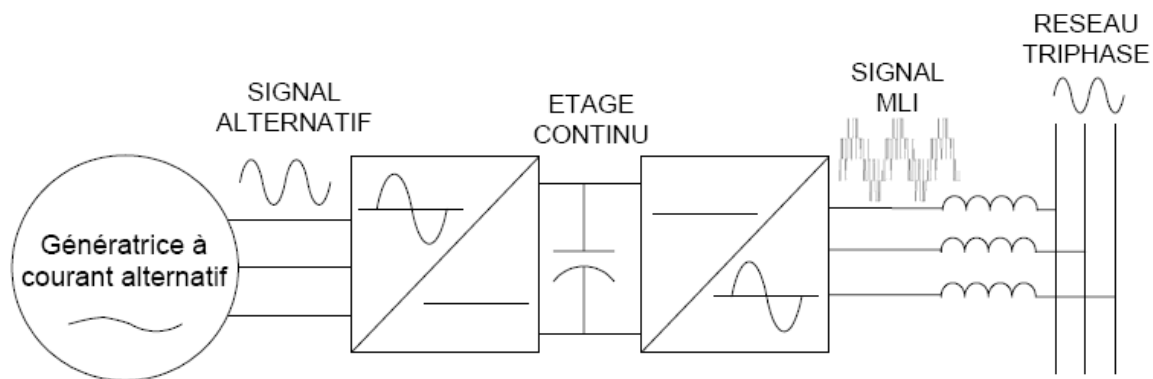


Figure I-10 interface d'électronique de puissance

I-7-MACHINES ELECTRIQUES ET SYSTEMES DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [13].

I-7-1- Machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances.

Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la Figure I-11

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible.

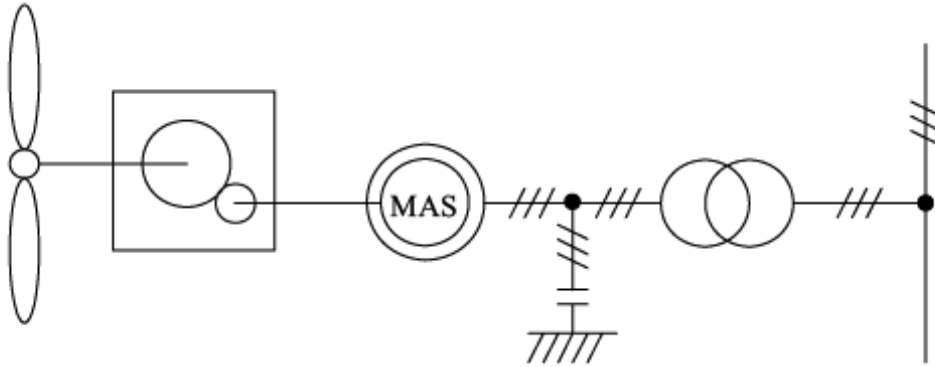


Figure I-11 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

I-7-2-Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

Avec les génératrices asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau (cf. Figure I-12 et Figure I-13) le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor.

La Figure I-12 montre la technologie (Optislip de Vestas) qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs.

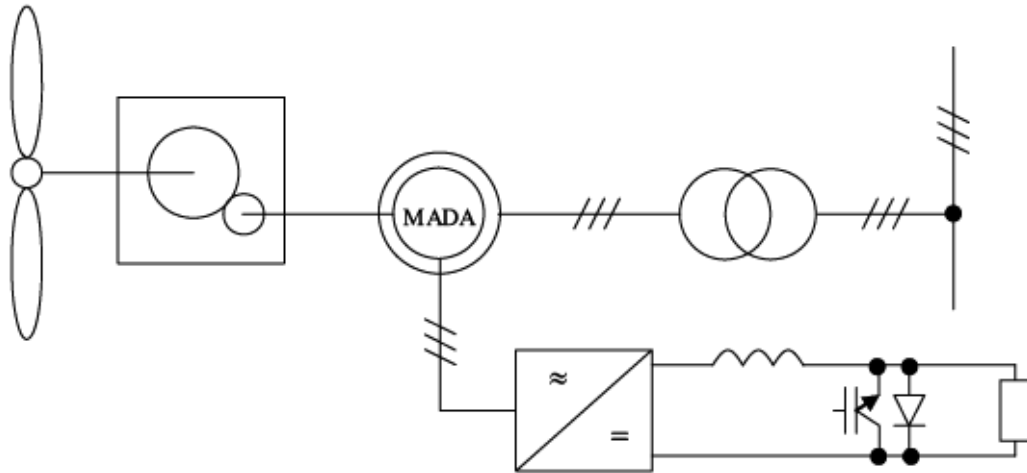


Figure I-12 *Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor*

Une autre solution très intéressante et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (cf Figure I-13). En général, le dimensionnement de la chaîne rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique., ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

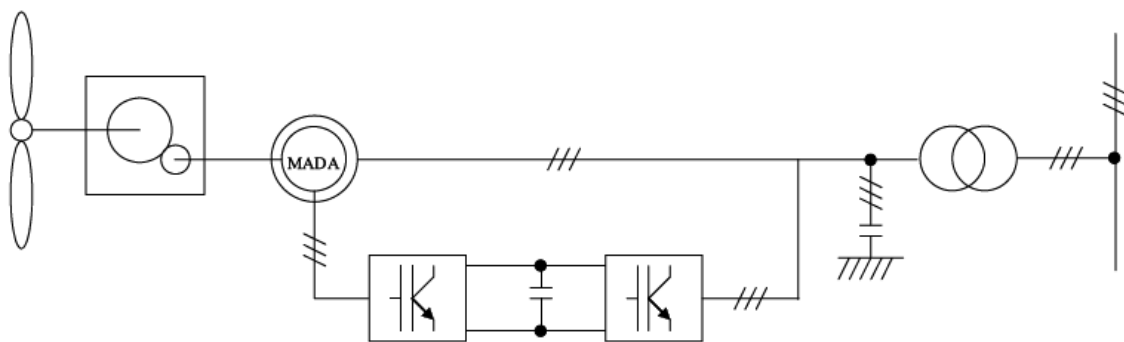


Figure I-13 *Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation*

I-7-3-Génératrices synchrones

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation

relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables.

. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (Figure I-14).

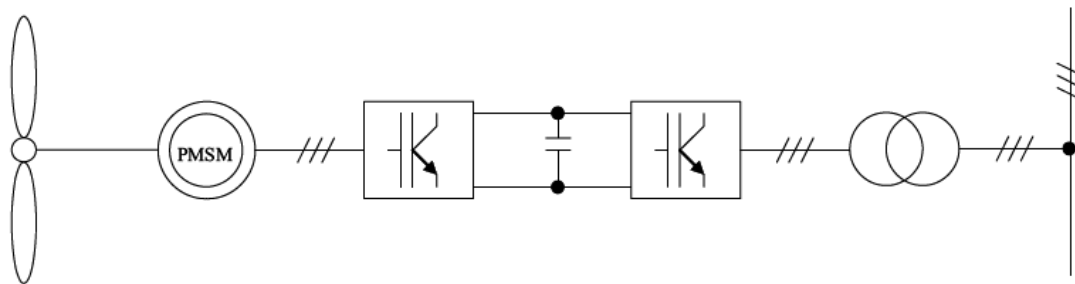


Figure I-14 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Une autre solution (Figure I-15) est le redressement à diodes placé directement derrière la génératrice. L'optimisation de la gestion énergétique n'est alors possible que si l'excitation est réglable.

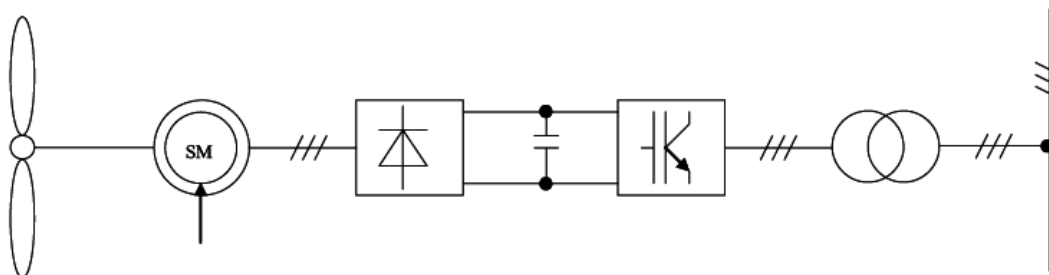


Figure I-15 Système basée sur la machine synchrone et redresseur à diodes

Les systèmes de très petite puissance peuvent être simplifiés radicalement. En choisissant judicieusement les paramètres (paramètres machine et tension continue) du système représenté sur la Figure I-16, un système à vitesse « non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu [14].

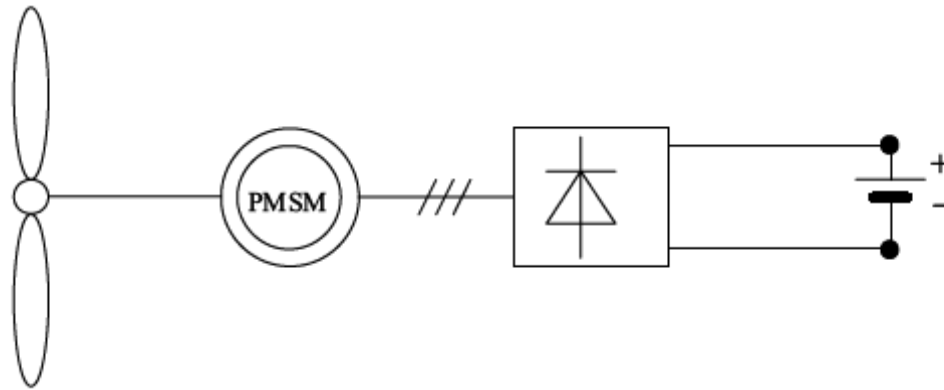


Figure I-16 Système éolien à coût minimum

I-8-CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a décrit les différentes sortes d'énergies renouvelables, les différents types d'éoliennes qui existent, la production optimale d'énergie, les diverses machines électriques utilisées, et les systèmes de conversion d'énergie.

Parmi les machines électriques citées, on va s'occuper notamment dans le prochain chapitre de la machine asynchrone double alimentée

CHAPITRE II

LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

II-1-INTRODUCTION

Les machines électriques sont utilisées depuis longtemps pour produire de l'énergie électrique ou mécanique, au fil du temps, cette tendance s'est accentuée à la fois dans les domaines industriels et domestiques. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

La machine à double alimentation (MADA) porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variable (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur). Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages.

II-2-DEFINITION

Connue depuis 1899 [15], la machine à induction double alimentée, DFIM (de l'anglais, Doubly fed induction machine), est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor .Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse.

Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle de flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper-synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70 [16], appliquée à la MADA avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.

II-3-FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE A VITESSE VARIABLE

La Figure II-1 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius PWM). P_{res} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s la puissance transitant par le stator, P_r la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} , la puissance mécanique.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée

sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à gP_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale.

Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [17],

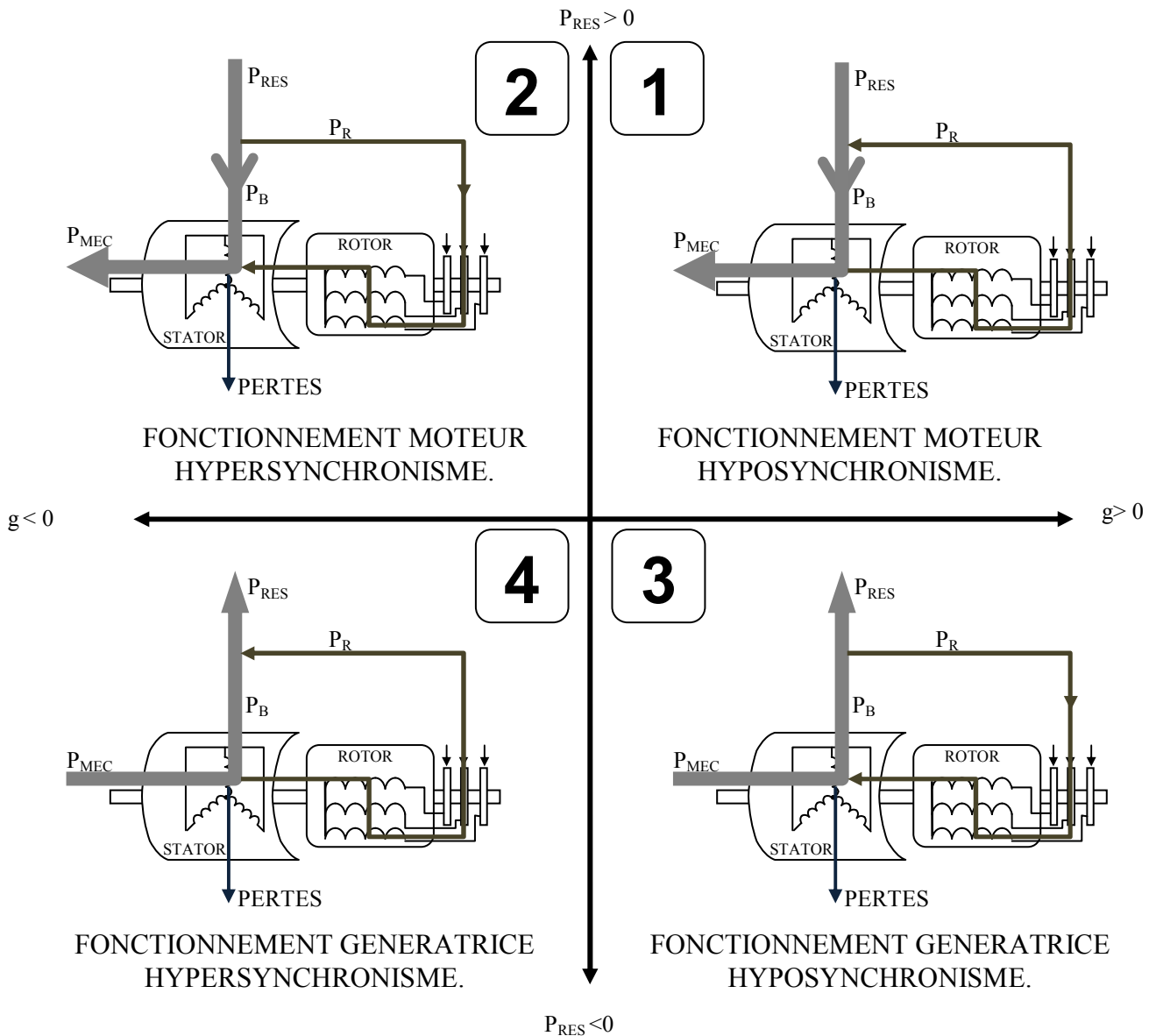


Figure II-1 Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

II-4-LES DIFFERENTES STRUCTURES A BASE DE MADA

Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables :

II-4-1-Double alimentation par le stator :

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Figure II-2).

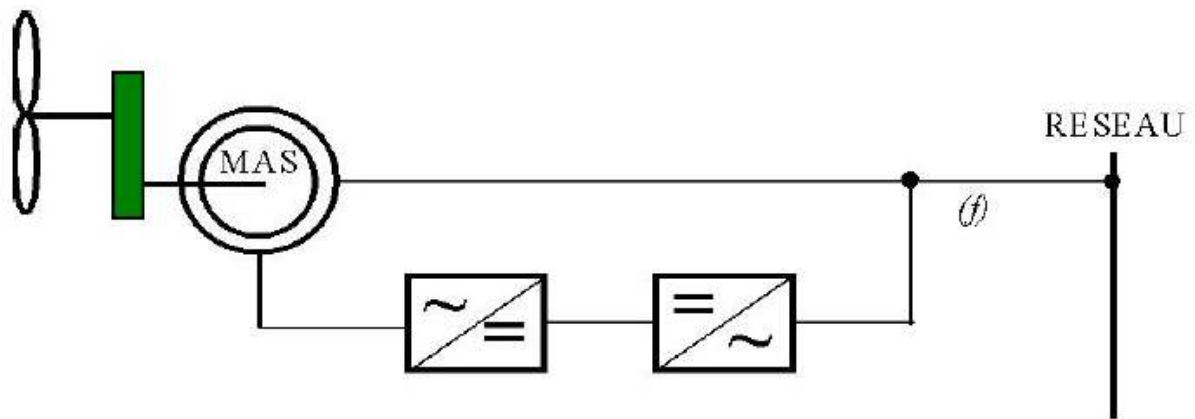


Figure II-2-Machine asynchrone à double bobinage statoriques

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage.

L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal du générateur y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit. Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation, permet de contrôler le flux statorique de la machine, le glissement peut être ainsi contrôlé, et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également.

Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive.

Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers [18].

II-4-2- Double alimentation par le stator et le rotor

II-4-2-1- Principe

La structure de conversion est constituée d’une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (Figure II-3).

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l’entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf .

Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l’intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$ [19]. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (Figure II-4). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

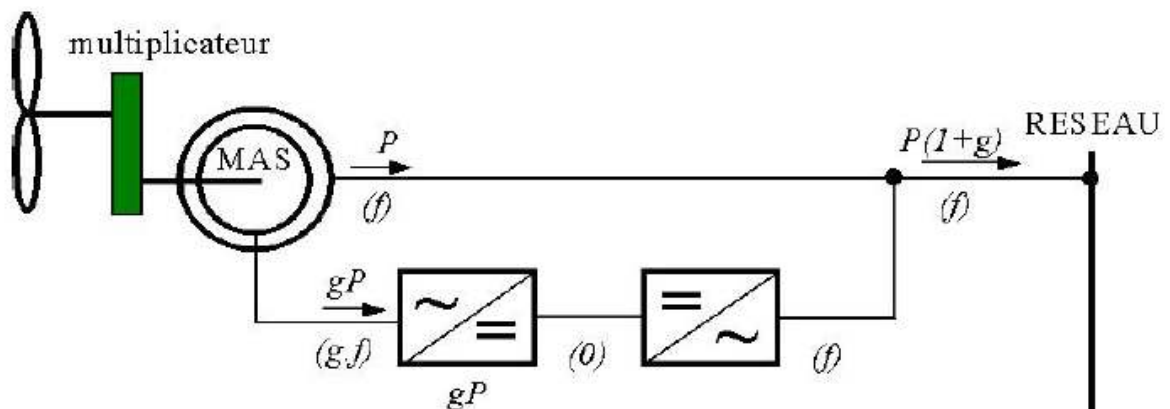


Figure II-3– Schéma de principe d’une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

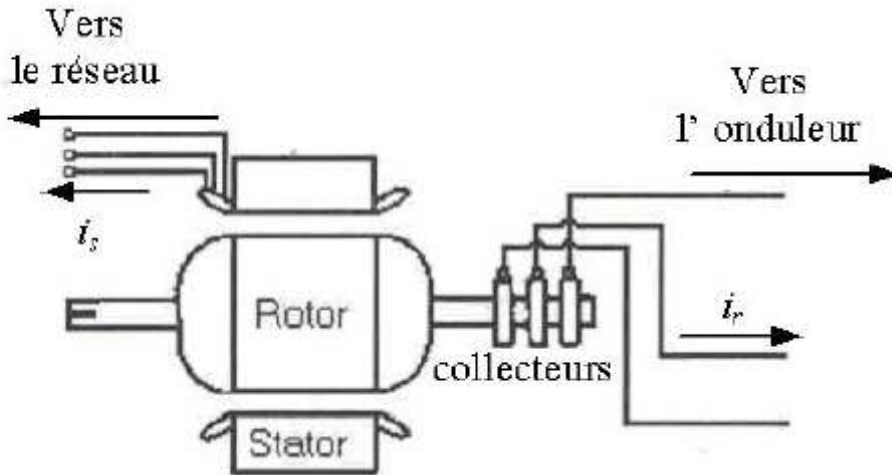


Figure II-4-Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. crée au rotor et au stator est [20] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (II.1)$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques. ω_s et ω_{mec} sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine. En définissant le glissement par

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (II.2)$$

L'équation II.1 devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (II.3)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (II.4)$$

Donc, le rapport entre la puissance S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r E_r}{i_s E_s} = g \tag{II.5}$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice (équation II.2) en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g .

II-4-2-2- Contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

Le glissement peut être rendu variable par extraction d’une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé (Figure II-4). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation du synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante.

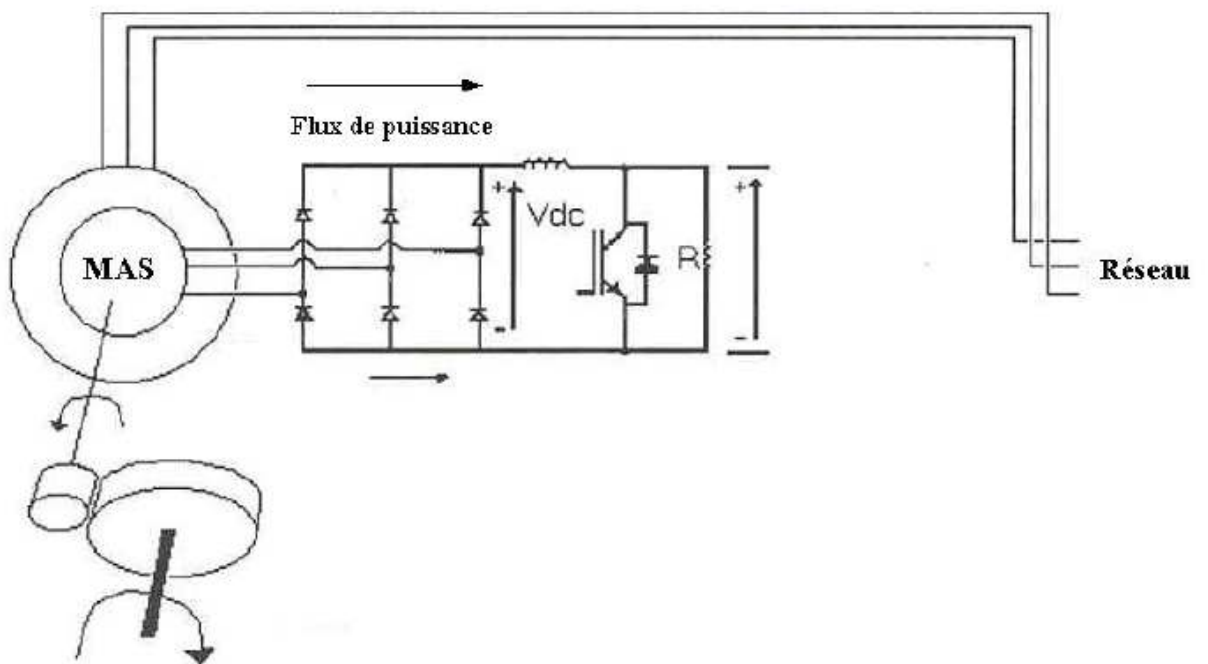


Figure II-4- MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

Vue la taille réduite de la résistance R (car située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse. Le fabricant des turbines éoliennes Vestas utilise cette topologie, sans bagues collectrices.

Le convertisseur de puissance et la charge résistive sont assemblés sur le rotor et tournent avec lui. Le signal de commande du hacheur est transmis via un signal optique. Le glissement maximum obtenu avec ce système Vestas appelé "opti-slip" est de 10% [21].

L'inconvénient de ce principe est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion.

II-4-2-3- Transfert de la puissance rotorique sur le réseau

a – Principe

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet Joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Dans le passé, on utilisait à cet effet des machines tournantes à courant continu ou alternatif (montages Kramer, Sherbius, Rimcoy, etc). De nos jours, on utilise, pour cette récupération, un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseurs de puissance ainsi qu'un transformateur.

Le convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 25% de la puissance nominale) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominale.

C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté du réseau.

Il faut noter que tous les éléments du circuit de récupération (courants du circuit rotorique) ne sont dimensionnés que pour gP , donc, pour une puissance d'autant plus faible que le glissement maximum désiré est plus faible. Ce procédé est intéressant quand on peut se contenter d'une variation de vitesse réduite.

b - Pont à diodes et pont à thyristors

Une première structure pour l'alimentation électrique consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors [22], cette structure est appelée "Montage de Kramer". Les tensions entre bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Figure II-5). Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

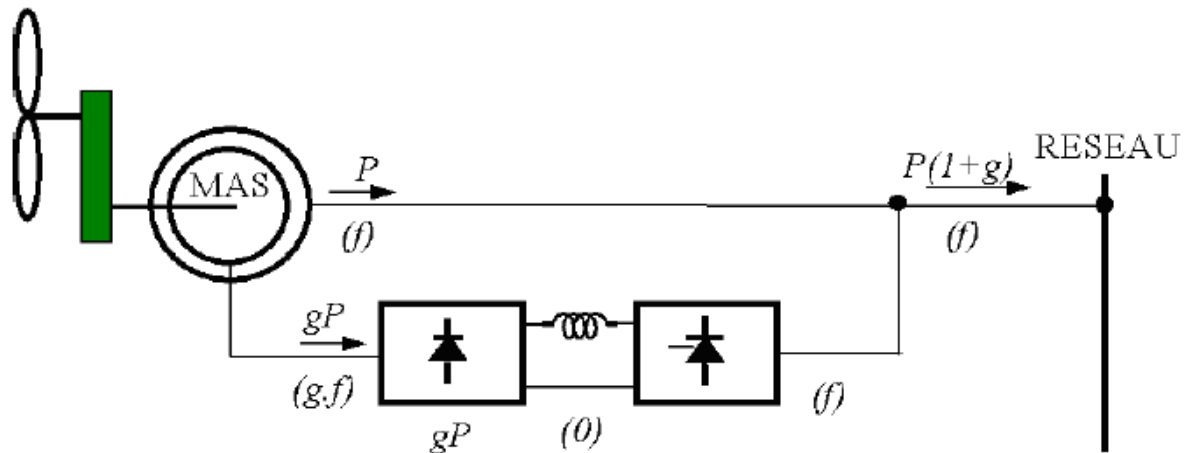


Figure II-5-MADA alimentée par un pont à diodes et thyristors

L'inconvénient de cette structure d'alimentation c'est qu'elle ne permet pas l'asservissement électrique de la vitesse de la machine. De plus, l'onduleur triphasé utilisé pour cette structure injecte des courants harmoniques basses fréquences d'amplitude importante. Cette injection d'harmoniques multiples de 50Hz est préjudiciable pour la durée de vie des appareillages électriques raccordés sur le réseau. Pour éviter cet inconvénient, on utilise d'autres structures.

c - Pont à diodes et pont à transistors

La structure consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle constitués de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées et à modulation de largeur d'impulsion (MLI), constitués par des transistors de puissance (Figure II-6). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont de diodes.

Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des $\frac{dv}{dt}$ importants qui peuvent réduire leur durée de vie [23].

glissements très faibles. Ainsi, ceci permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants du point de vue coût.

Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur.

e - Convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante (Figure II-8) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables par modulation de largeur d'impulsions. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau.

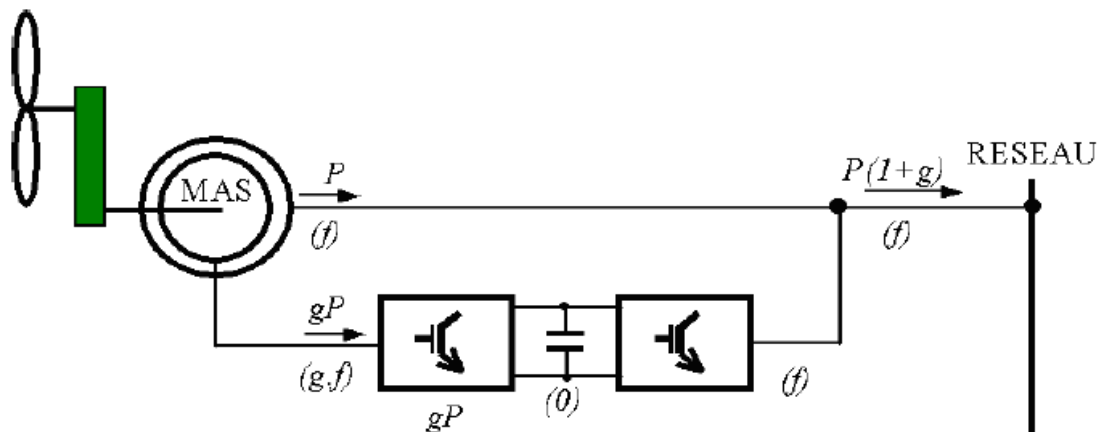


Figure II-8-MADA alimentée par deux onduleurs à MLI

Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

f - Structure à trois convertisseurs MLI :

On peut également disposer les convertisseurs à la fois au rotor et au stator, la structure est montrée sur la Figure II-9, Cette structure est intéressante car elle permet de contrôler le flux statorique. En effet suite aux variations du vent, la réponse du système en fonctionnement transitoire peut causer des variations significatives du flux statorique. Ceci provoque à la fois des oscillations mécaniques et électriques faiblement atténuées.

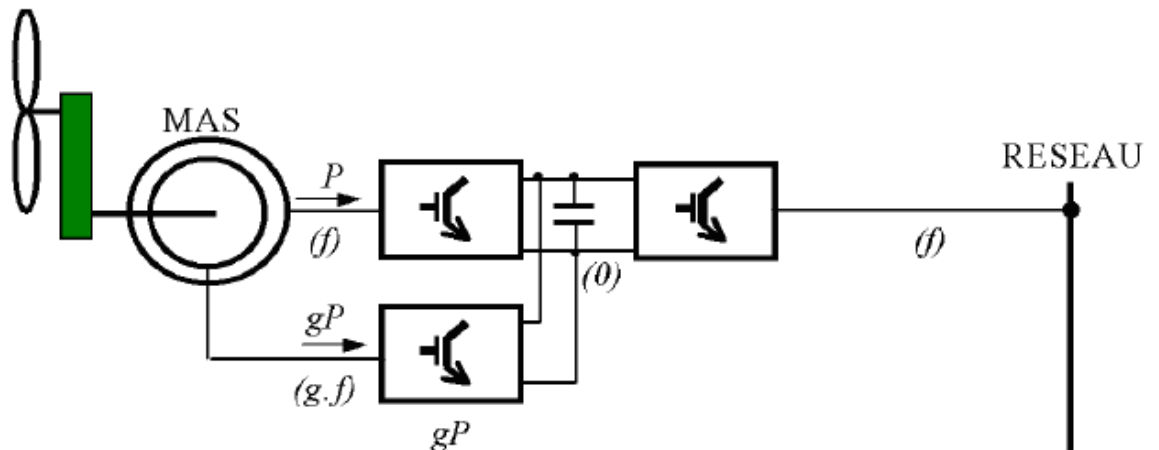


Figure II-9-Structure à convertisseurs au stator et au rotor

Les avantages de cette structure d'alimentation sont les suivants :

- Les convertisseurs disposés aux bornes du circuit rotorique et statorique permettent le contrôle de leur flux.

- Cette configuration présente une certaine insensibilité par rapport à des défauts provenant du réseau électrique (creux de tension). En effet, un découplage est réalisé avec le réseau entre les circuits rotorique et statoriques par l'utilisation d'un bus continu intermédiaire.

- Elle offre deux degrés de libertés supplémentaires pour la commande des puissances transitées par le stator.

L'inconvénient majeur est l'utilisation de trois onduleurs dont un connecté au réseau de très forte puissance. Ils sont donc assez coûteux [24].

II-5-CONCLUSION

La MADA, la machine la plus répandue dans le domaine de la production d'énergie éolienne. Les plus utilisées sont : double alimentation par le stator et double alimentation par le stator et le rotor. Cette dernière est le cœur de notre sujet, vu son meilleur rendement par rapport à la première. Ce système qui est le contenu du prochain chapitre sera étudié et modélisé.

CHAPITRE III

MODELISATION ET COMMANDE DE LA MADA

III.1. INTRODUCTION

Un intérêt sans cesse croissant est de plus en plus accordé à la machine asynchrone au détriment des autres machines. En effet, cette machine est devenue le choix par excellence de la majorité des industriels, grâce à son prix et sa robustesse. Cependant, elle a une dynamique très complexe à cause des interactions stator rotor, ce qui rend la modélisation basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant insuffisante pour décrire son comportement dynamique. De nouvelles méthodes tel que la méthode du vecteur spiral et la modélisation dans le repère de Park sont développées et devenus la base pour la modélisation, la simulation et la commande des machines à induction.

Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la modélisation dynamique de la machine asynchrone en double alimentation ainsi que son contrôle des puissances actives et réactives .

III.2. MODELISATION DE LA MADA EN GRANDEURS DE PHASES

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

III.2.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes : [25].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courant et des tensions est égale a zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additive des flux,
- La constance des inductances propres,

- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est fonction de la vitesse de rotation Ω , tel que $\Omega = d\theta/dt$ où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement du rotor (a) en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

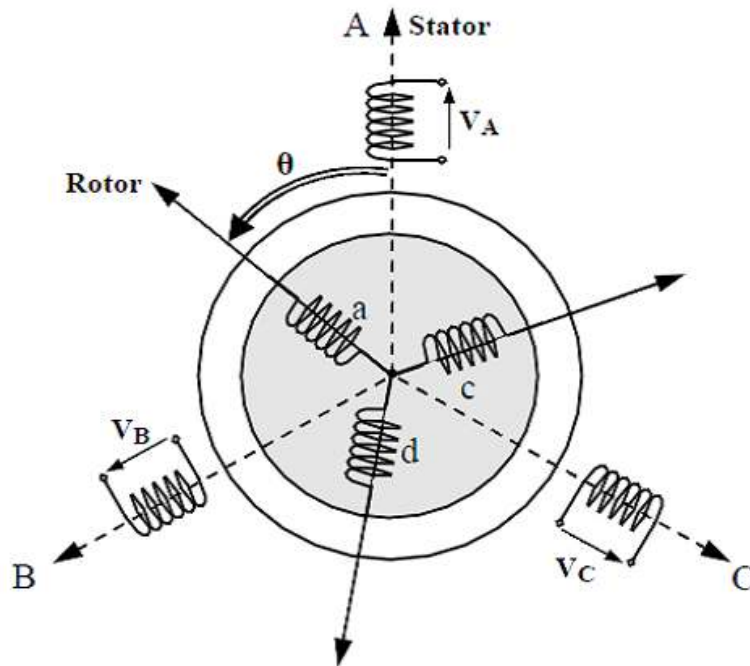


Figure III.1 Représentation schématique de la machine asynchrone.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant [26].

III.2.2. Équations des tensions

En écriture matricielle, les équations de tension de la MADA s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (III.1)$$

V_s, V_r : Les tensions simples statorique et rotorique.

I_s, I_r : Les courants de phase statorique rotorique.

φ_s, φ_r : Les flux statorique et rotorique respectivement.

R_s, R_r : Les résistances par phase statorique et rotorique.

Les équations de tensions du stator sont écrites dans un repère lié au stator et les équations du rotor dans un repère lié au rotor, ce qui explique l'absence des tensions induites dues au mouvement [27].

III.2.3. Equations des flux

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme suivante :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (III.2)$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (III.2) dans (III.1), on obtient le système d'équations ci-dessous, qui représente le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (III.3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, & [I_s] &= \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, & [\varphi_s] &= \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \\ [V_r] &= \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, & [I_r] &= \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, & [\varphi_r] &= \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$[R_s] = \text{diag} [R_s \ R_s \ R_s], \quad [R_r] = \text{diag} [R_r \ R_r \ R_r]$$

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix}, [L_{rr}] = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{\max} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

L_s, L_r : Les inductances propres statorique et rotorique.

M_s, M_r : Les mutuelles entre les bobines statoriques respectivement rotoriques.

III.2.4. Equation mécanique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$\Gamma_e = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Sachant que les matrices inductances $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à termes constante, l'expression du couple devient comme suit.

$$\Gamma_e = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (III.5)$$

D'autre part nous avons l'équation du mouvement qui est donnée par :

$$J_g \frac{d}{dt} \Omega = \Gamma_e - \Gamma_r - f_g \cdot \Omega \quad (III.6)$$

Les systèmes d'équations différentielles (III.3), (III.5) et (III.6) représente le modèle de la MADA dans le repère naturel. Les équations différentielles de ce système sont fortement couplées l'une à l'autre par la mutuelle inductance entre les bobines. Plus particulièrement, la mutuelle inductance entre les bobines statoriques et rotoriques qui est fonction de la position du rotor θ . Ce couplage rend la résolution de ce système très complexe.

Les transformations mathématiques comme la transformation de Park (d, q) ou la transformation (α, β) peuvent faciliter la résolution d'un tel système en transformant ces

équations différentielles à paramètres variable dans le temps en équations différentielles à paramètres constantes écrites dans un repère à axes orthogonaux. [27]

III.3. MODELISATION DE LA MADA DANS UN REPERE ORTHOGONAL

III.3.1. La transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o), et donc d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution.

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}$$

$[P(\theta_s)]$ Est Orthonormée ce qui permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé, et inversement.

θ : L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

III.3.1.1. Transformation des variables statoriques

La transformation des variables réelles statorique de la machine consiste à appliquer la matrice de Park $[P(\theta_s)]$ aux vecteurs des variables tensions $[V_s]$, courant $[I_s]$ et flux $[\varphi_s]$ pour obtenir leurs composantes relatives correspondantes $[V_{dqos}]$, $[I_{dqos}]$, et $[\varphi_{dqos}]$ respectivement suivant les équations :

$$[V_{dqo}]_r = [P(\theta_s)] \cdot [V_s] \Rightarrow [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_s \quad (\text{III.7})$$

$$[I_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [I_s] \Rightarrow [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{dqo}]_s \quad (\text{III.8})$$

$$[\varphi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_s] \Rightarrow [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]_s \quad (\text{III.9})$$

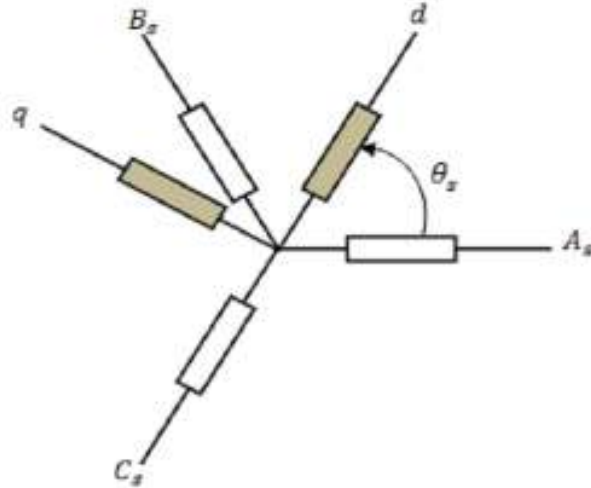


Figure III.2 Transformation des variables statoriques.

$[P(\theta_s)]$ est la matrice de la transformation de Park appliquée au stator de la machine. θ_s étant l'abscisse angulaire du référentiel (d, q) tournant à la vitesse ω_s par rapport à l'axe de la phase statorique (A). θ_s est donnée par la relation suivante : [28]

$$\theta_s(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt + \theta_s(0) \quad (III.10)$$

$\theta_s(0)$ Est l'abscisse initiale du référentiel arbitraire par rapport à la phase (a) du stator.

III.3.1.2. Transformation des variables rotoriques

De la même manière que pour le stator, les composantes relatives correspondantes aux variables rotoriques peuvent être calculées à partir des équations suivantes :

$$[V_{dqo}]_r = [P(\theta_r)] \cdot [V_r] \Rightarrow [V_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_r \quad (III.11)$$

$$[I_{dqor}] = [P(\theta_r)] \cdot [I_r] \Rightarrow [I_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{dqor}] \quad (III.12)$$

$$[\varphi_{dqor}] = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_r] \Rightarrow [\varphi_r] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqor}] \quad (III.13)$$

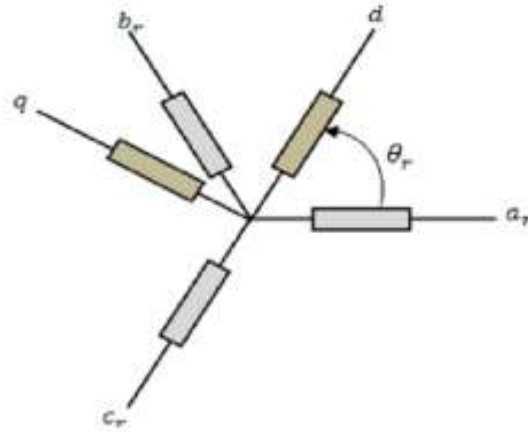


Figure III.3 Transformation des variables rotoriques.

$[P(\theta_r)]$ Est la matrice de la transformation de Park appliquée au rotor de la machine.

θ_r Est l'abscisse du référentiel orthogonal par rapport à la phase rotorique (ar) tel que : [28]

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta_r(0) \quad (III.14)$$

$\theta_r(0)$ Est la position initiale du référentiel par rapport à la phase rotorique (a).

III.3.2. Equation de la MADA dans le repère arbitraire

Il parait clairement que le repère de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celui des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (III.15)$$

Cette relation est dite condition de simplification de Park.

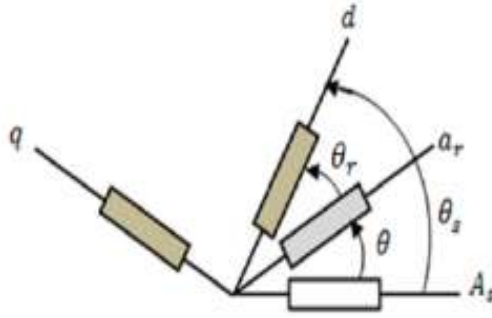


Figure III.4 La MADA dans le référentiel arbitraire.

III.3.2.1. Equations des tensions :

En introduisant les équations (III.7), (III.8), (III.11) et (III.12) dans les équations de la machine, on obtient :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_s = [R_s] \cdot [p(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{dqo}]_s + \frac{d}{dt} \left([P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]_s \right) \\ [P(\theta_s - \theta)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_r = [R_r] \cdot [p(\theta_s - \theta)]^{-1} \cdot [I_{dqo}]_r + \frac{d}{dt} \left([P(\theta_s - \theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]_r \right) \end{cases} \quad (III.16)$$

D'où :

$$\begin{cases} [V_{dqo}]_s = [R_s] \cdot [I_{dqo}]_s + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]_s \\ [V_{dqo}]_r = [R_r] \cdot [I_{dqo}]_r + [P(\theta_s - \theta)] \cdot \frac{d}{dt} [P(\theta_s - \theta)]^{-1} \cdot [\varphi_{dqo}]_r \end{cases} \quad (III.17)$$

Sachant que :

$$[p(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [p(\theta_s)]^{-1} = \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[p(\theta_s - \theta)] \cdot \frac{d}{dt} [p(\theta_s - \theta)]^{-1} = \frac{d(\theta_s - \theta)}{dt} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.18)$$

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: Les tensions directe et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: Les courants directe et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}$: Les flux direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\omega_s, \omega_r, \omega$: La pulsation statorique, rotorique et mécanique respectivement.

III.3.2.2. Equations des flux :

De la même manière on peut trouver les équations de flux qui sont donner par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (III.19)$$

En substituant les flux dans le système d'équations (III.18) par leurs expressions, le système d'équations des tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega) M & R_r & -(\omega_s - \omega) L_r \\ (\omega_s - \omega) M & 0 & (\omega_s - \omega) L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

Ou encore :

$$V = G.I + L. \frac{d}{dt} I \quad (III.21)$$

Qui devient sous forme d'équation d'état :

$$I = L^{-1} [V - G.I] \quad (III.22)$$

Où :

$$V = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} R & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega) M & R_r & -(\omega_s - \omega) Lr \\ (\omega_s - \omega) M & 0 & (\omega_s - \omega) Lr & Rr \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{pmatrix}; \quad M = \frac{3}{2} M_{sr}$$

III.3.2.3. Equation du couple électromagnétique

Etant donné que la matrice de transformation que nous avons utilisée conserve la puissance instantanée, nous pouvons écrire alors :

$$P_e = (V_{sa} I_{sa} + V_{sb} I_{sb} + V_{sc} I_{sc}) + (V_{ra} I_{ra} + V_{rb} I_{rb} + V_{rc} I_{rc}) = (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) + (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \quad (III.23)$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions, on trouve :

$$P_e = \omega_s \{ \varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds} \} + (\omega_s - \omega) \{ \varphi_{dr} I_{qr} - \varphi_{qr} I_{dr} \}$$

En exprimant les flux par leur expression à partir du système (III.19), on constate que :

$$\{ \varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds} \} = \{ \varphi_{dr} I_{qr} - \varphi_{qr} I_{dr} \}$$

D'autre part on a :

$$\Gamma_e = P_e / \Omega$$

D'où :

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= p \cdot (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) = p \cdot M \cdot (I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ &= p \cdot \frac{M}{Lr} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \end{aligned} \quad (III.24)$$

Tel que : p est le nombre de paire de pôles de la machine.

III.3.3. Le choix du référentiel

Le système d'équation (III.22) représente le modèle linéaire de la machine asynchrone double alimentation dans un repère arbitraire tournant à une vitesse quelconque ω . Le choix d'un référentiel dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité avec les autres composantes du système étudié. [26]

III.3.3.1. Référentiel lié au stator

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire, est caractérisé par la relation suivante :

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

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega M & R_r & \omega L_r \\ -\omega M & 0 & -\omega L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel ont les mêmes caractéristiques que celles du réseau d'alimentation, ce qui convient pour l'étude de la machines dans un réseau complexe. Il est aussi souvent utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation. [26]

III.3.3.2. Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il est caractérisé par la relation suivante :

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

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -M & R_r & -L_r \\ M & 0 & L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

III.3.3.3. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel n'importe aucune simplification aux équations de la machine, il est caractérisé par la relation :

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

Tel que : g est la vitesse de glissement.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -g\omega_s M & R_r & -g\omega_s L_r \\ g\omega_s M & 0 & g\omega_s L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel sont constantes ce qui justifie son large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones [26]

III.4. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE

Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone φ_s , φ_r ou φ_m au choix, afin d'obtenir un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux [29].

Prenons l'une des trois expressions du couple électromagnétique trouvées dans l'équation (III.24), par exemple :

$$\Gamma_e = p \cdot (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (III.28)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura

$$\varphi_s = \varphi_{ds} \Rightarrow \varphi_{qs} = 0 \quad (III.29)$$

Donc l'expression du couple électromagnétique devient [30] :

$$\Gamma_e = p \cdot \varphi_{ds} \cdot I_{qs} \quad (III.30)$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant I_{qs} , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle.

III.5. MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [25,31]

Prenons le système d'équations différentielles (III.18), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant, et avec un flux statorique constant et orienté, $\varphi_s = \varphi_{ds}$ et $\varphi_{qs} = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.31)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [32] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (III.32)$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.33)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$\Gamma_{\varepsilon} = p \cdot \frac{V_{\varepsilon}}{\omega_s} \cdot I_{qs} \quad (III.34)$$

Γ_{ε} : Le couple électromagnétique.

p: Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances actives et réactives aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

III.5.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques:

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.35)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (III.36)$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques I_{ds} et I_{qs} respectivement, sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (III.37)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (III.38)$$

Il ressort de l'expression (III.38) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau.

III.5.2. Expressions des tensions rotoriques :

A partir du système d'équation (III.35), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad (III.39)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.32), on trouve [33] :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{dr} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{qr} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{dr} + g\frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.40)$$

A partir des systèmes d'équations (III.38) et (III.40), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

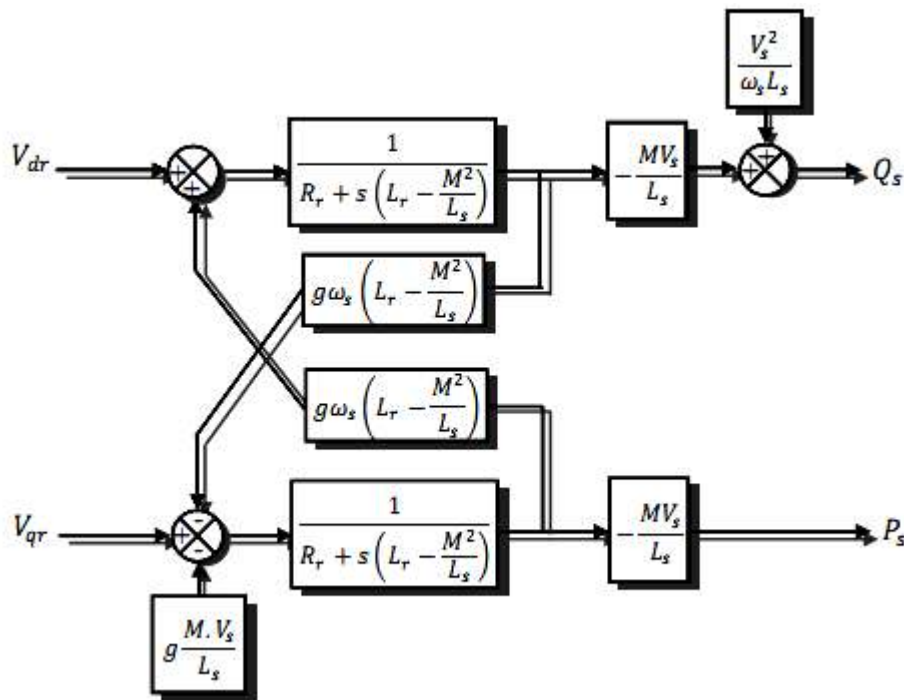


Figure III.5 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

L'expression $g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

III.6. CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

III.6.1. Commande directe

Si l'on observe les équations (III.38), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M V_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (III.40) disparaissent en régime permanent[27]. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.41)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'effet du terme de couplage $g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme $g \frac{M V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure III.6).

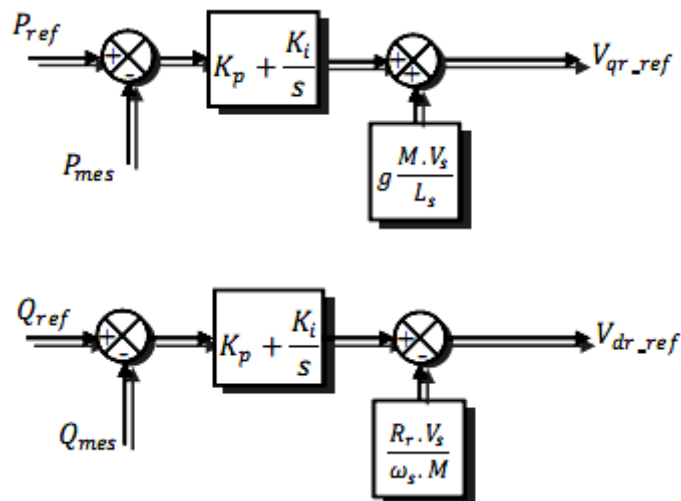


Figure III.6 Schéma bloc de la commande direct.

III.6.2. Commande indirecte

III.6.2. 1. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (III.38) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr_ref} = -\frac{L_s}{M V_s} P_{s_ref} \\ I_{dr_ref} = -\frac{L_s}{M V_s} Q_{s_ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (III.42)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

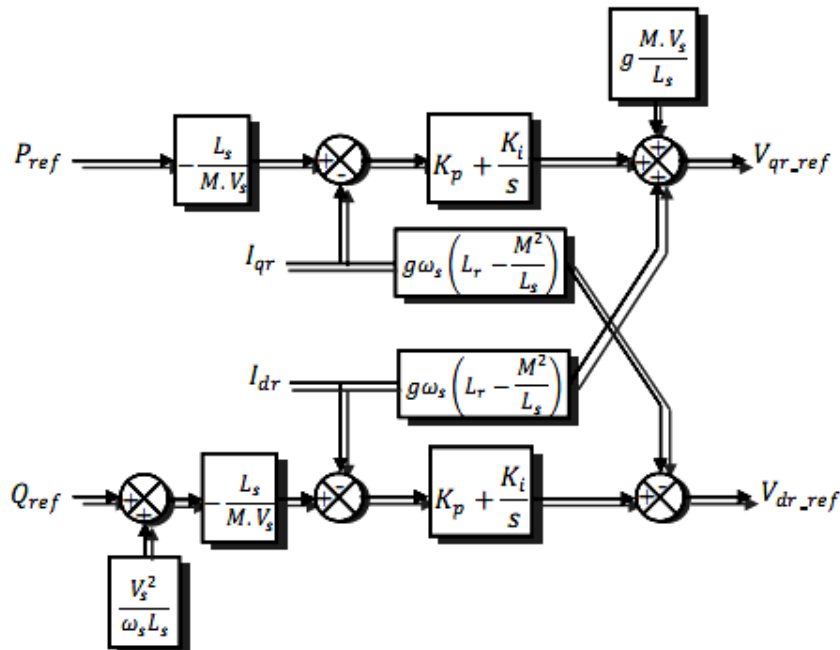


Figure III.7 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

III.6.2.2. Commande en boucle fermé

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

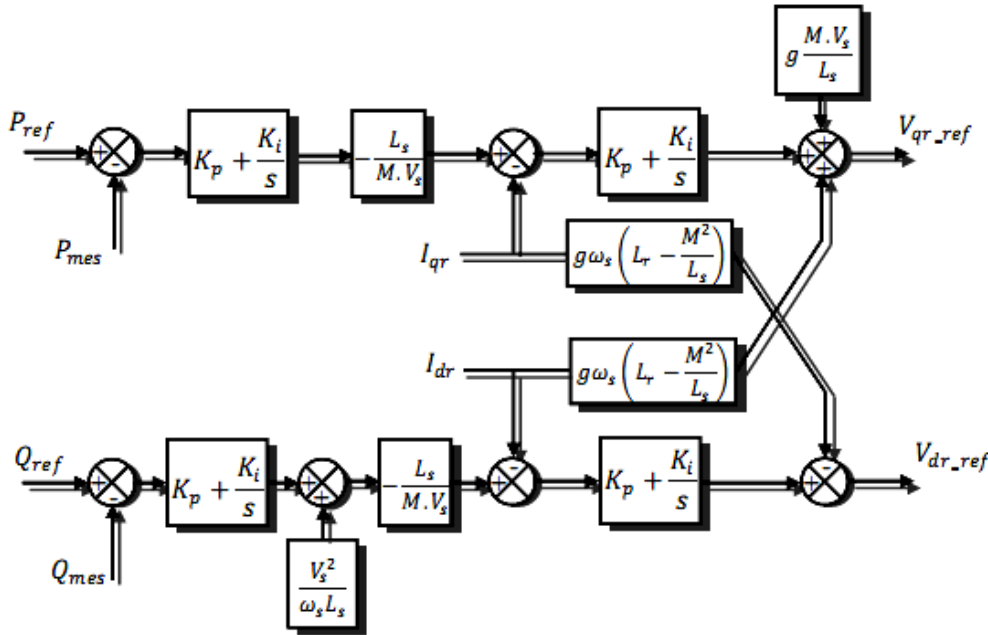


Figure III.8 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique.

III.7. MODELE DE L'ONDULEUR DE TENSION A DEUX NIVEAUX

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits (Figure III.9).

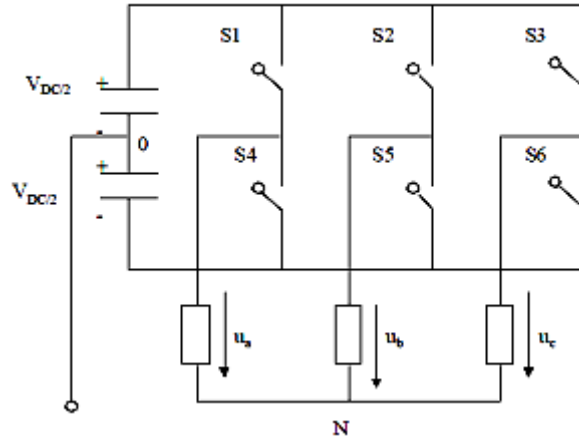


Figure III.9 Onduleur de tension à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a, S_b, S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur :

Branche 1

$S_a=0$ Si S_1 est en position *Off* et S_4 est à *On*

$S_a=1$ Si S_1 est en position *On* et S_4 est à *Off*

Branche 2

$S_b=0$ Si S_2 est en position *Off* et S_5 est à *On*

$S_b=1$ Si S_2 est en position *On* et S_5 est à *Off*

Branche 3

$S_c=0$ Si S_3 est en position *Off* et S_6 est à *On*

$S_c=1$ Si S_3 est en position *On* et S_6 est à *Off*

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DC} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DC} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DC} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (III.43)$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (III.44)$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} u_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ u_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ u_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (III.45)$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} u_a = \frac{V_{DC}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_b = \frac{V_{DC}}{3}(2S_b - S_c - S_a) \\ u_c = \frac{V_{DC}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (III.46)$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.47)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulosinusoidale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

III.7.1. Principe de la MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulosinusoidale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire $\omega(t)$ de fréquence f_p , que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés u_a , u_b et u_c . Ces signaux u_i sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase [34]. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type :

$$u_i(t) = \omega(t) \quad (III.48)$$

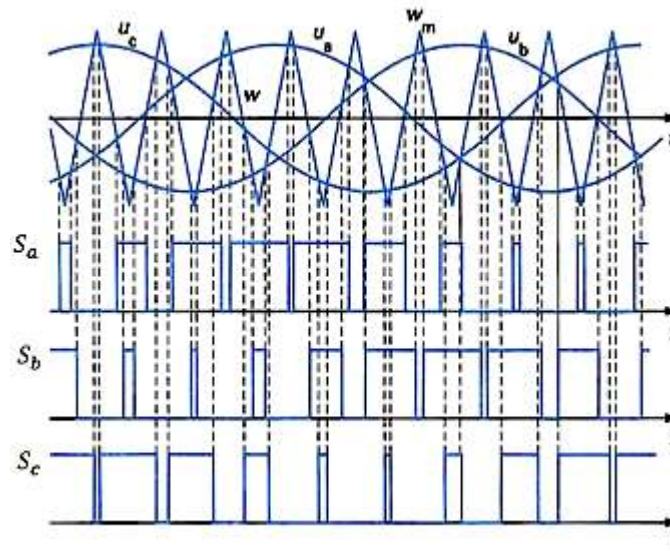


Figure III.10 Principe de la MLI triangulosinusoidale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (III.49)$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p):

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (III.50)$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

III.8. CONCLUSION

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé, dans le quel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans le quel les équations sont devenues à coefficients

constantes dans le temps, aussi bien nous avons pu élaborer des différents schémas bloc de commande de la MADA, ainsi que la commande MLI.

CHAPITRE IV
RESULTATS DE SIMULATION

IV-1-INTRODUCTION

Afin de compléter notre étude sur la machine asynchrone double alimentée entrainée par une éolienne nous allons simuler le système par le Matlab (SIMULINK).

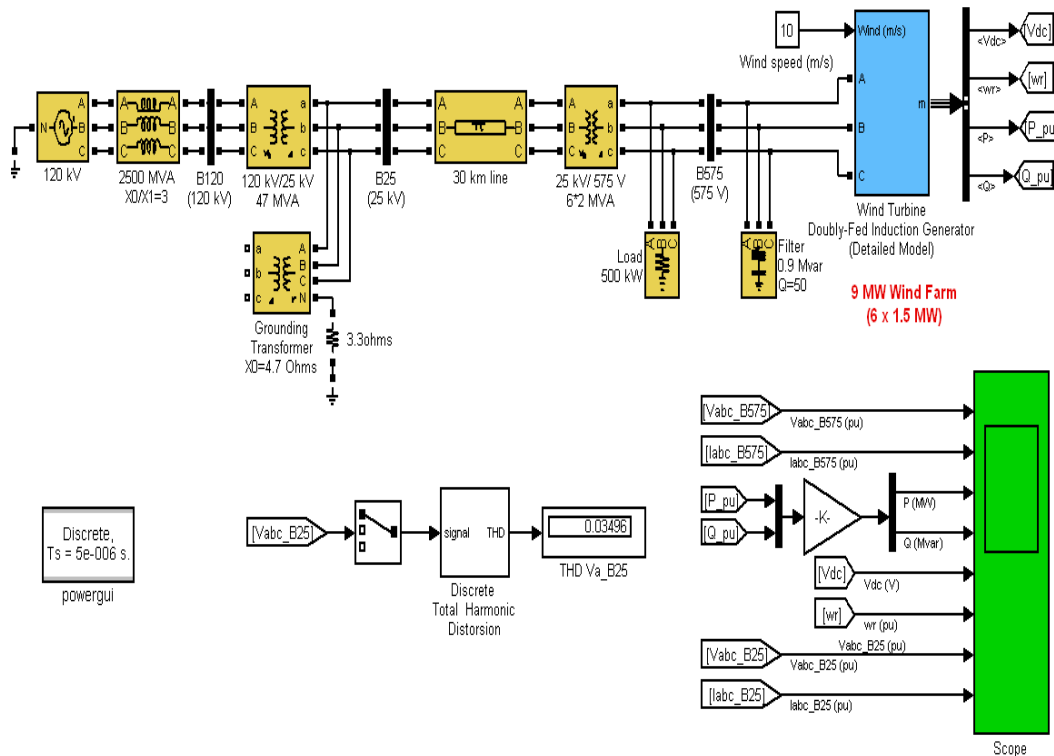
Le système est composé en trois parties essentielles, la machine asynchrone double alimentée, le convertisseur statique, et la turbine éolienne.

Quatre cas sont envisageables dans la suite de se travail, Où on va voir le comportement de la machine asynchrone double alimentée envers ces quatre cas :

- Cas d'un état sain sans aucune perturbation externe et avec une vitesse du vent constante égale à 10m/s.
- Cas d'un creux de tension au jeu de barre B575 provoqué au moment 0.8s jusqu'au 0.9s avec une amplitude de tension variant de 1 *Pu* au 0.8 *Pu* et revenant à nouveau au 1 *Pu*.
- Cas de variation de vitesse du vent de 8m/s à 14m/s au point 0.5s, et on revient à 8m/s au moment 1s.
- Cas d'un défaut monophasé provoqué au jeu de barre B575 qui déclenche au moment 0.5s, de durée 0.15s.

IV-2-REPRESENTATION GLOBALE DU SYSTEME

La figure- IV-1 représente le système globale de la production d'énergie éolienne:



La figure-IV-1- le modèle Simulink globale du système de production d'énergie éolienne

La figure-IV-2 représente le modèle Simulink de la machine asynchrone MADA et les deux convertisseurs M.L.I, alors que la figure-IV-3 représente le modèle Simulink de la turbine éolienne.

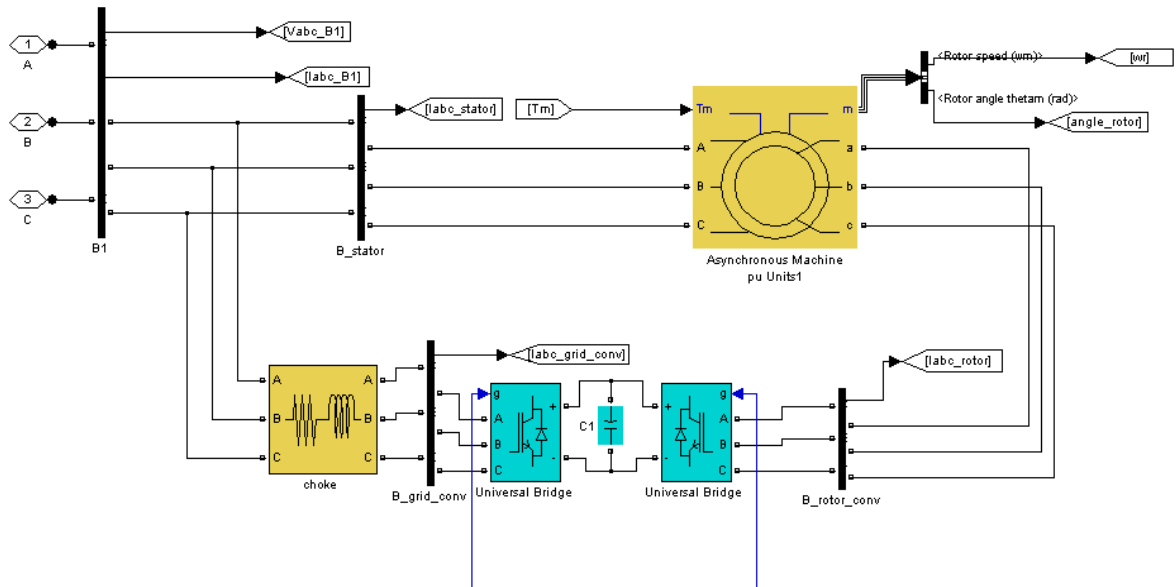


Figure-IV-2- le modèle Simulink d’une machine asynchrone MADA avec un convertisseur M.L.I

Les paramètres de la MADA sont mentionnés en annexe 1.

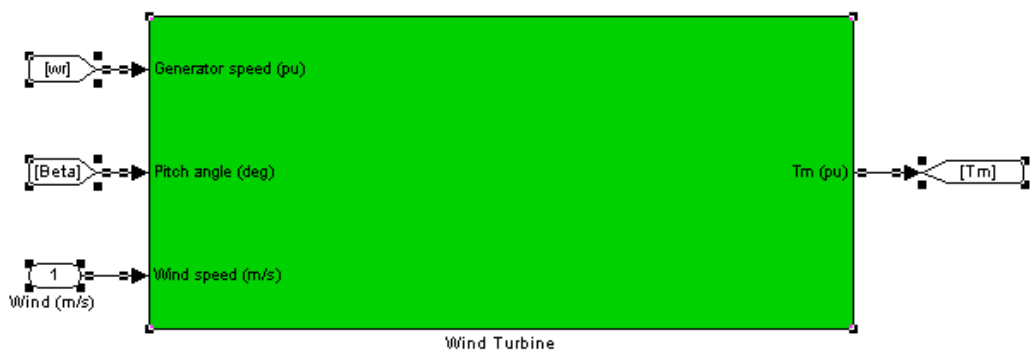


Figure-IV-3- le modèle Simulink d’une turbine éolienne

IV-3- SIMULATION DU MODELE

Nous avons étudiés quatre cas différents :

IV-3-1-Cas d'un état sein

Les résultats de la simulation obtenus par le modèle précédent sont représentés dans les figures suivantes pour une vitesse du vent de 10m/s :

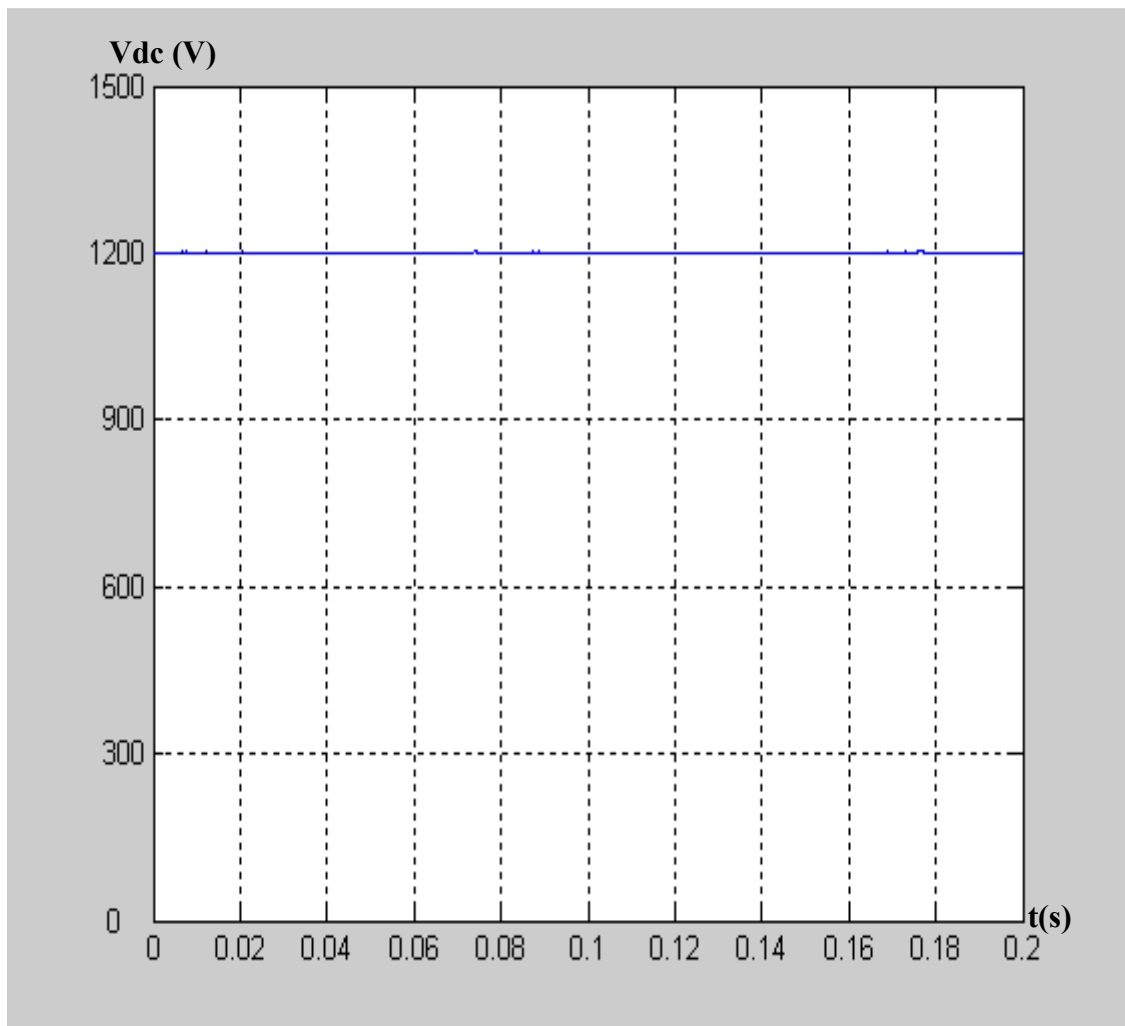


Figure-IV-4-la tension au bus continu Vdc

-D'après La Figure-IV-4, on remarque que la tension au bus continu V_{dc} est constante à une valeur de 1200 Volts ce qui nous va donner une tension de sortie de l'onduleur régulée entre -1200 et +1200 Volts.

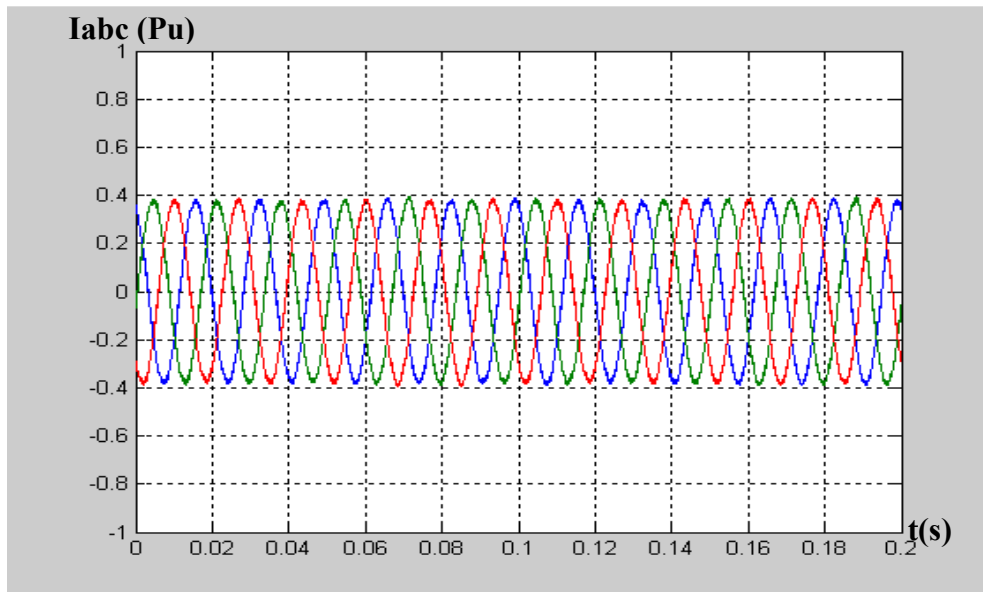


Figure-IV-5-les courants des trois phases au jeu de barre B575

La Figure-IV-5 nous montre que Les courants de phase statorique au jeu de barre B575 sont de forme sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constante.

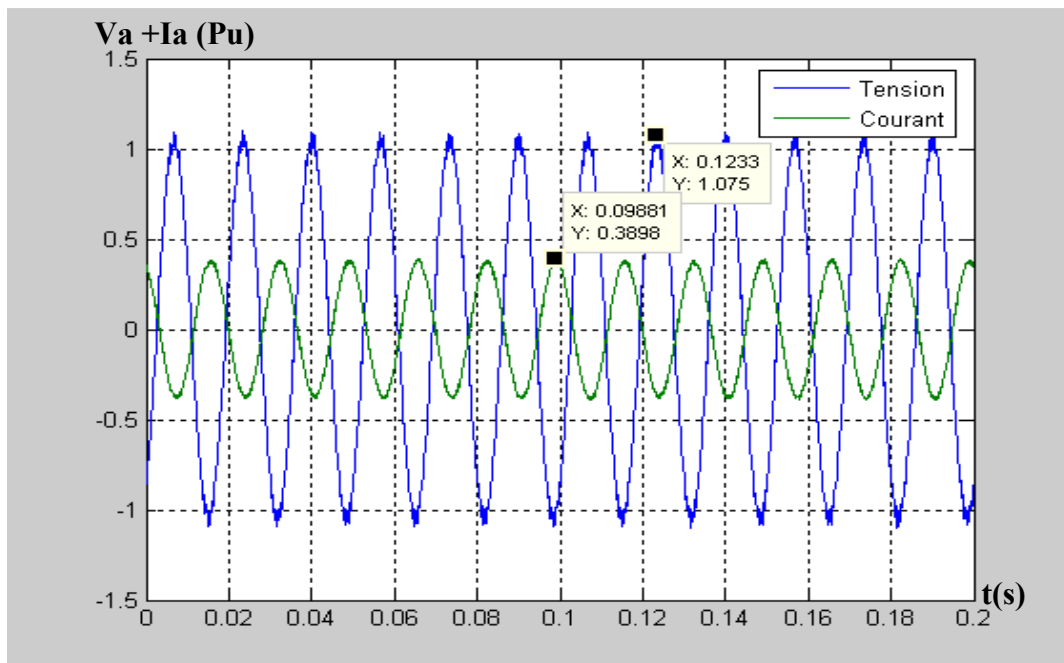


Figure-IV-6- le courant et la tension au jeu de barre B575

On constate que la tension de phase statorique est déphasée par rapport au courant d'un angle de π Figure-IV-6, c'est-à-dire que la puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournit par la machine asynchrone double alimentée.

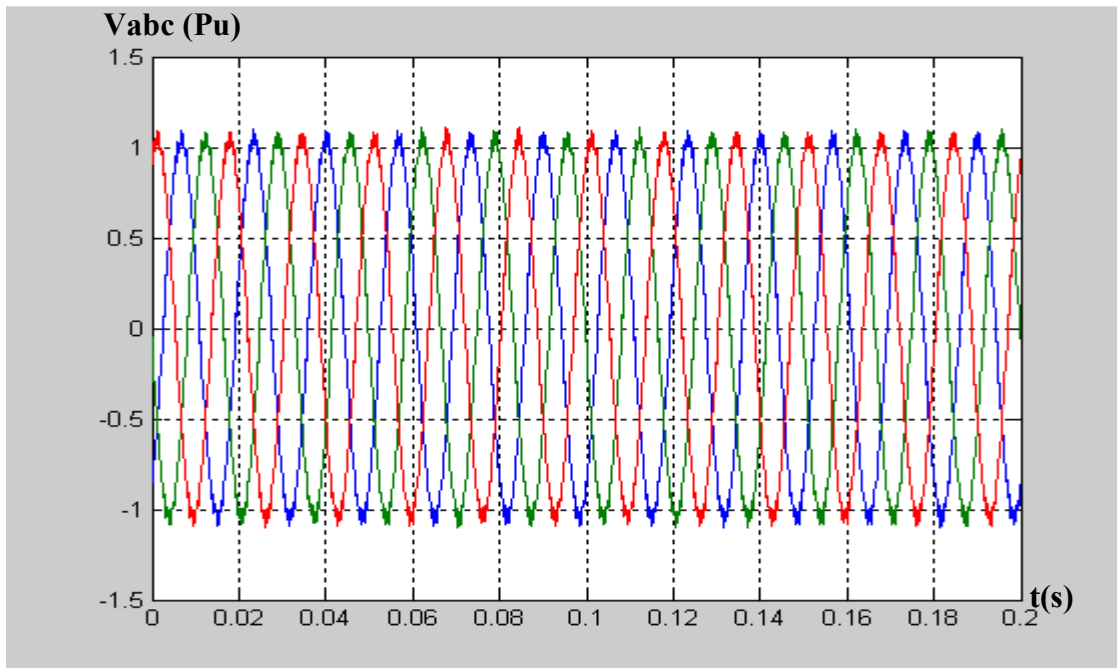


Figure-IV-7- les tensions triphasées au jeu de barre B575

On constate que la tension de phase statorique fournit au réseau a une forme sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constante Figure-IV-7.

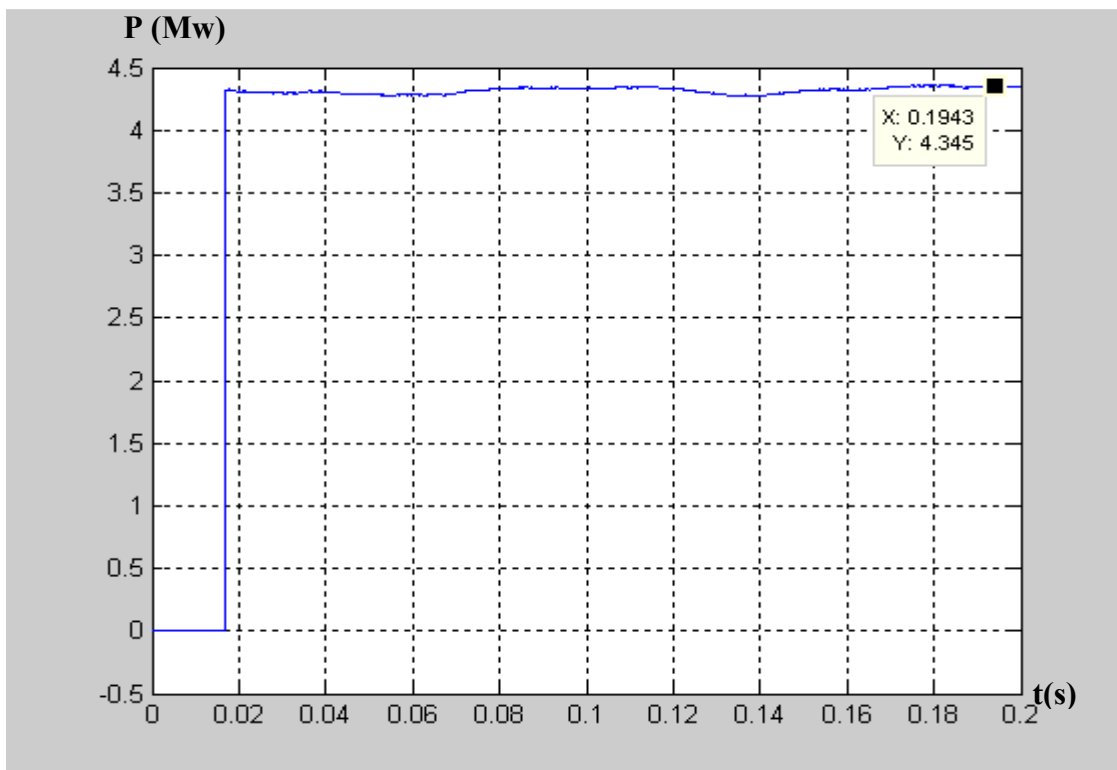


Figure-IV-8- La puissance active fournie par la MADA

La Figure IV-8 nous montre que la machine asynchrone double alimentation est entrain de fournir une puissance active au réseau au alentour de 4.5Mw.

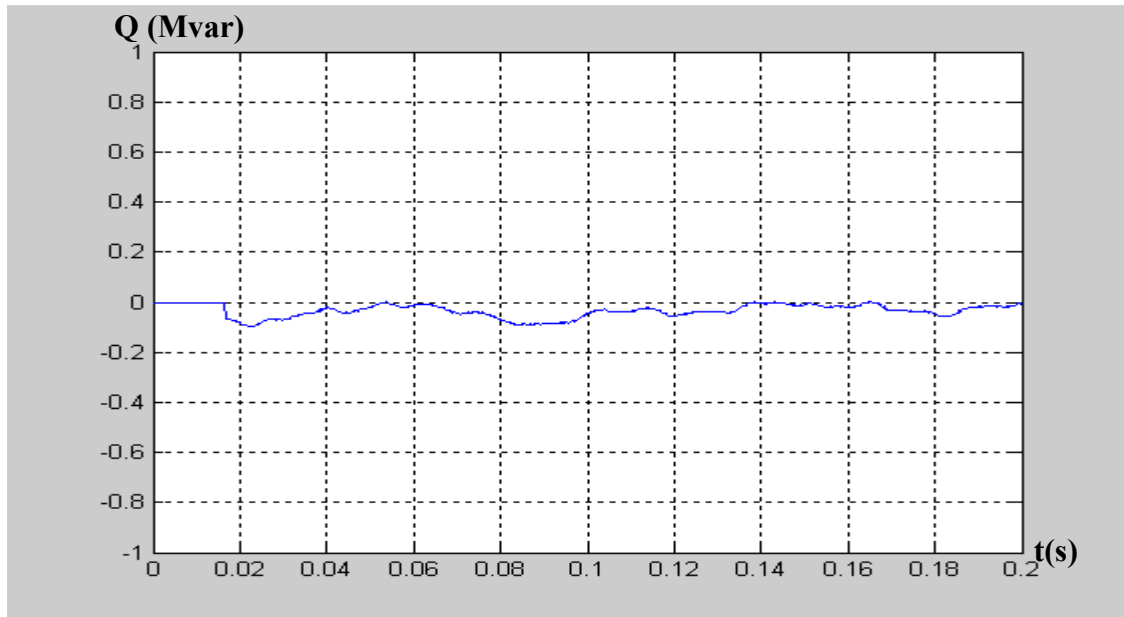


Figure-IV-9- La puissance réactive fournie par la MADA

La puissance réactive n'est toujours presque nulle Figure-IV-9, c'est une condition de fonctionnement de la machine asynchrone double alimentée pour avoir un facteur de puissance unitaire.

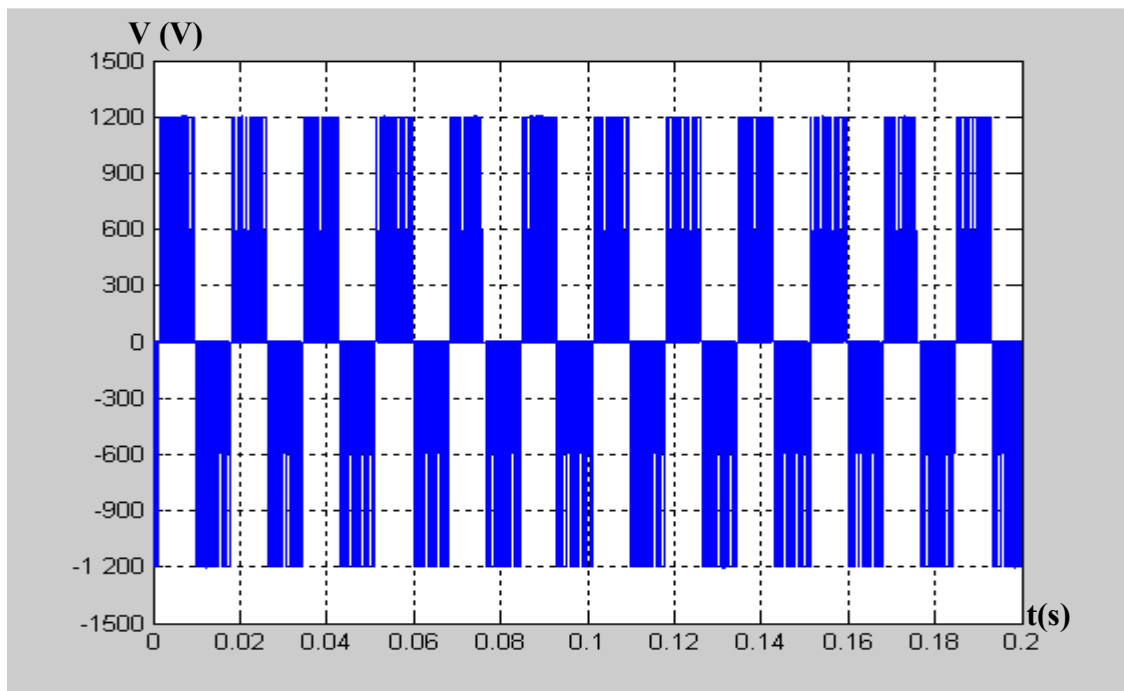


Figure-IV-10- la tension de la sortie de l'onduleur coté réseau

La figure IV-10 nous montre que la tension de sortie de l'onduleur est réglée entre -1200 et +1200 Volts.

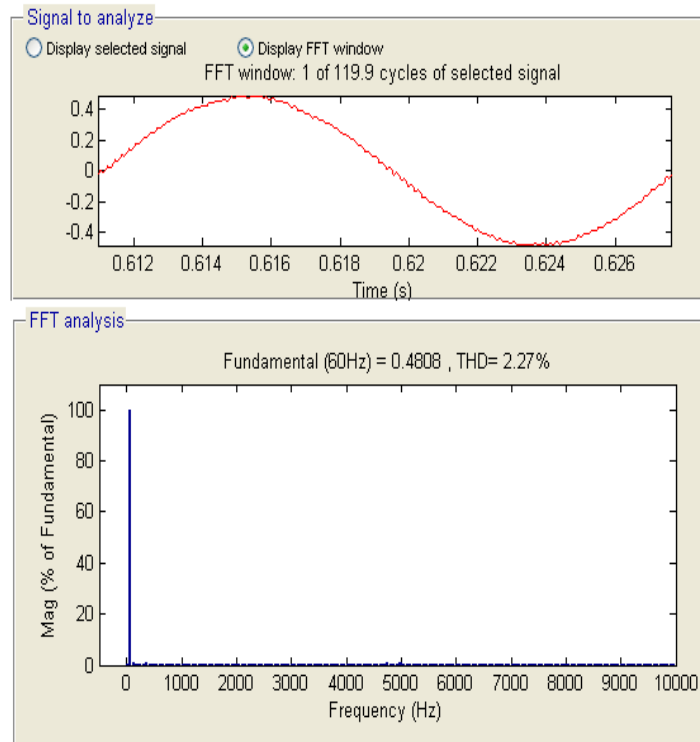


Figure-IV-11- la représentation spectrale du courant d'une phase

La figure-IV-11 nous montre une représentation spectrale du courant d'une phase au jeu de barre B575 avec un THD égale à 2.27% ce qui est conforme à la réglementation internationale.

IV-3-2-Cas d'un défaut de creux de tension

Dans ce cas nous avons simulé un creux de tension de [1-0.8-1] Pu au moment [0-0.8-0.9] $second$ Figure IV-12.

Vabc (Pu)

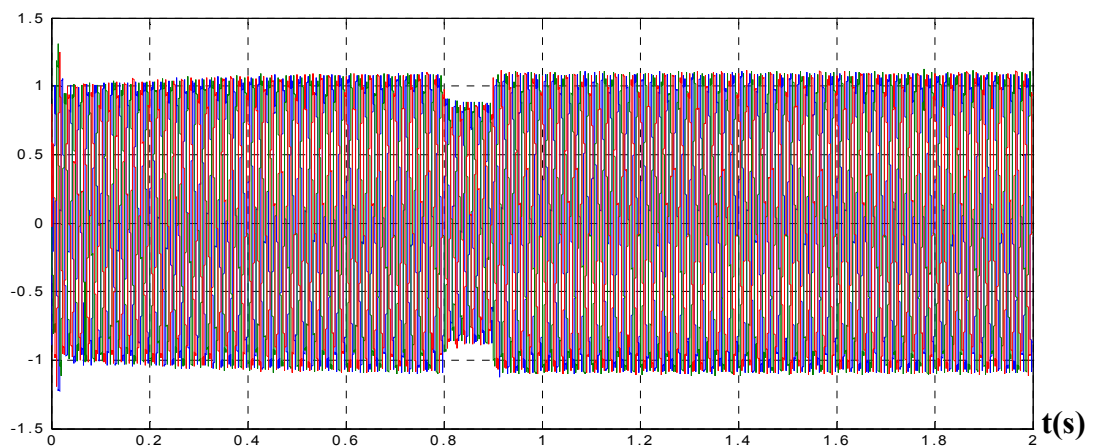
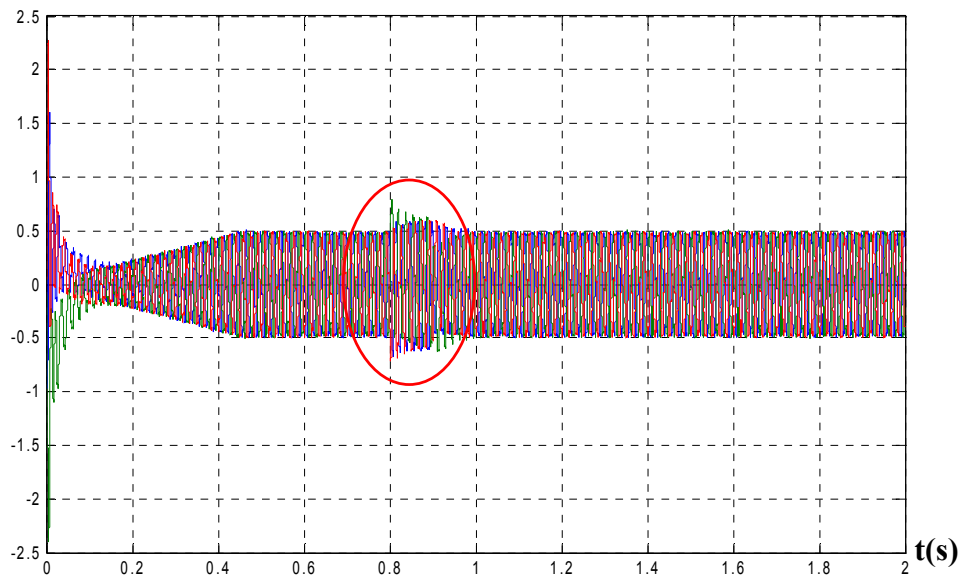
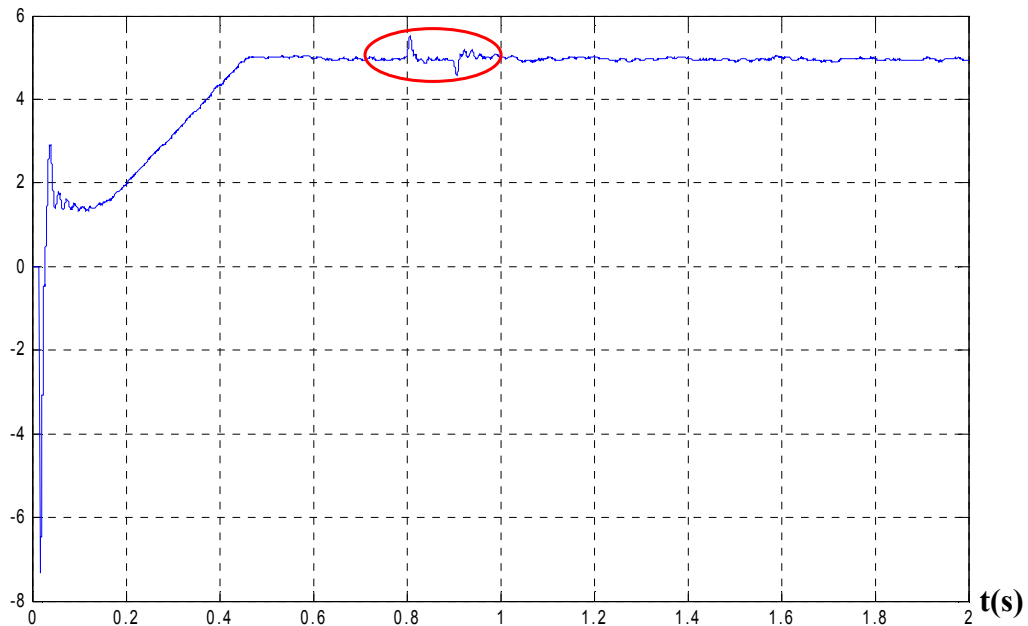


Figure-IV-12- les tensions triphasées au jeu de barre B575

Iabc (Pu)**Figure-IV-13-les courants des trois phases au jeu de barre B575**

La figure IV-13 nous montre que les courants des trois phases au jeu de barre B575 sont infectés au même moment du défaut.

P (Mw)**Figure-IV-14- La puissance active fournie par la MADA**

Dans la figure IV-14, on remarque que la puissance active produite par la MADA s'est déstabilisée au moment de défaut et revient à se stabiliser lors de l'absence de défaut de creux de tension.

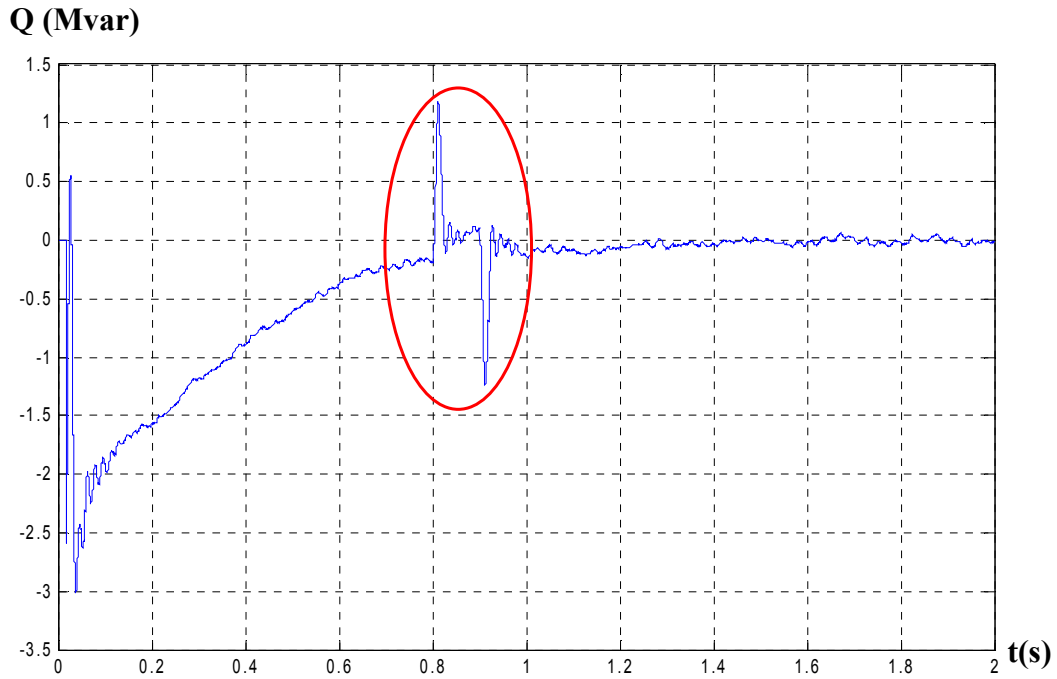


Figure-IV-15- La puissance réactive fournie par la MADA

Il est clairement apparent l'impact de ce défaut sur la puissance réactive fournis par la MADA, Figure-IV-15

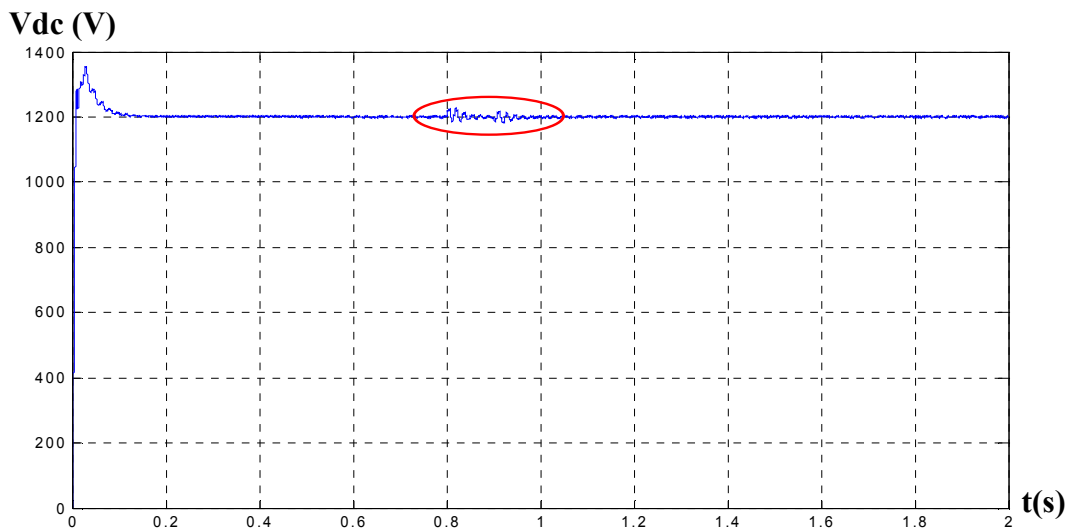


Figure-IV-16-la tension au bus continu Vdc

La figure-IV-16 nous montre les perturbations de la tension au bus continu au moment de défaut de creux de tension.

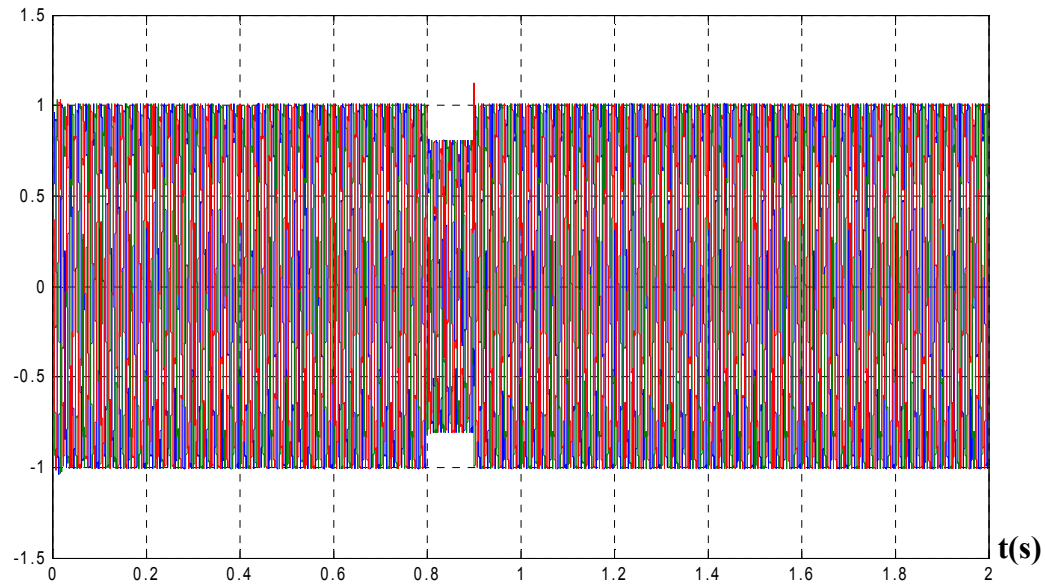
Vabc (Pu)

Figure-IV-17- les tensions triphasées au jeu de barre B25

La Figure-IV-17 nous montre l'influence du creux de tension sur les tensions triphasées au jeu de barre B25

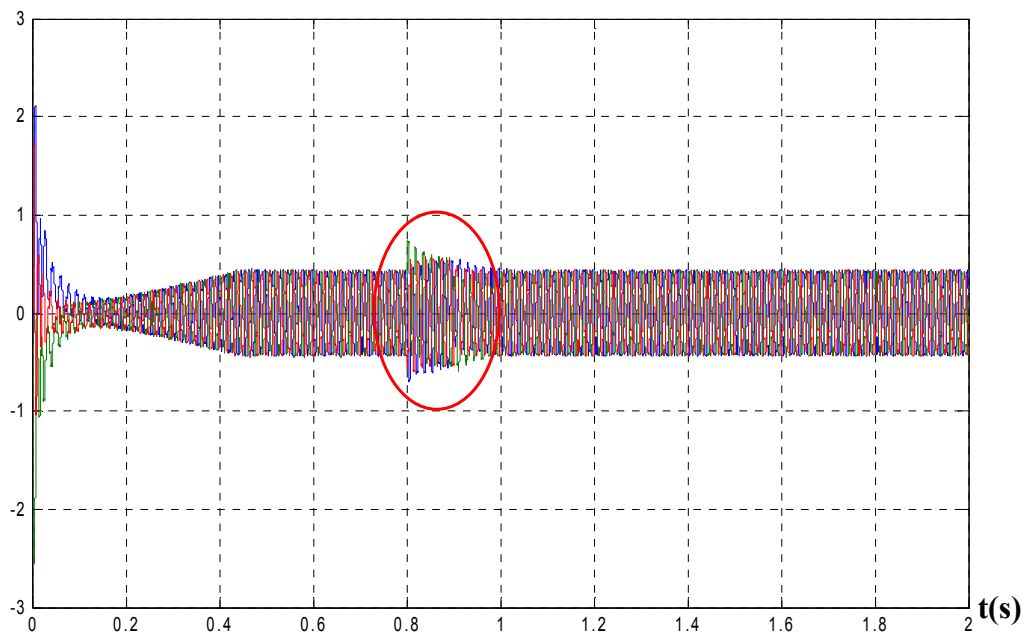
Iabc (Pu)

Figure-IV-18-les courants des trois phases au jeu de barre B25

Dans la figure-IV-18, on remarque les perturbations des courants des trois phases au jeu de barre B25 dû au défaut de creux de tension.

IV-3-3-Cas de variation de vitesse du vent

Dans ce cas, on a fait varier la vitesse du vent de 8m/s à 14m/s au point 0.5s, et on revient à 8m/s au moment 1s Figure-IV-19:

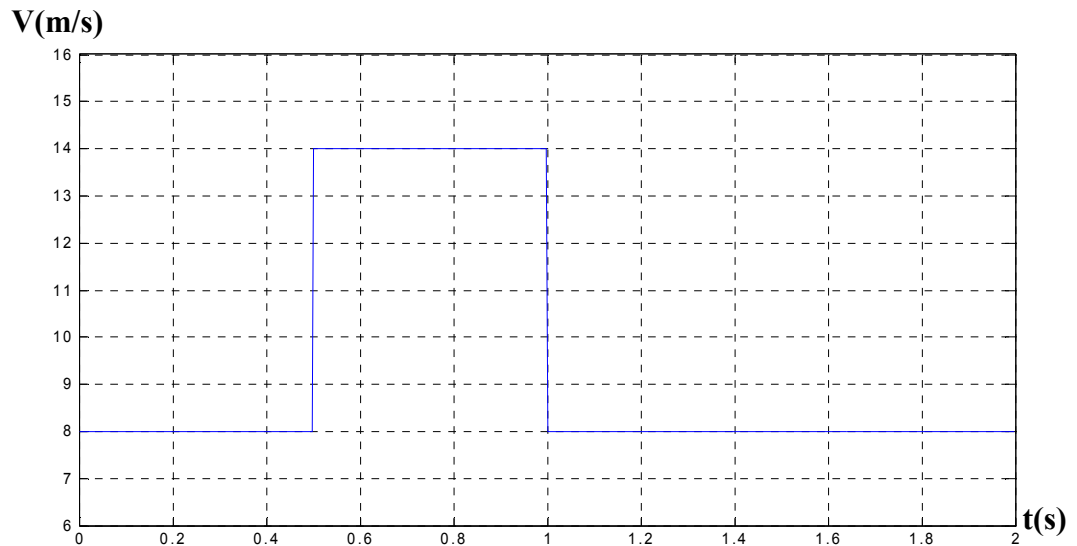


Figure-IV-19- Vitesse du vent

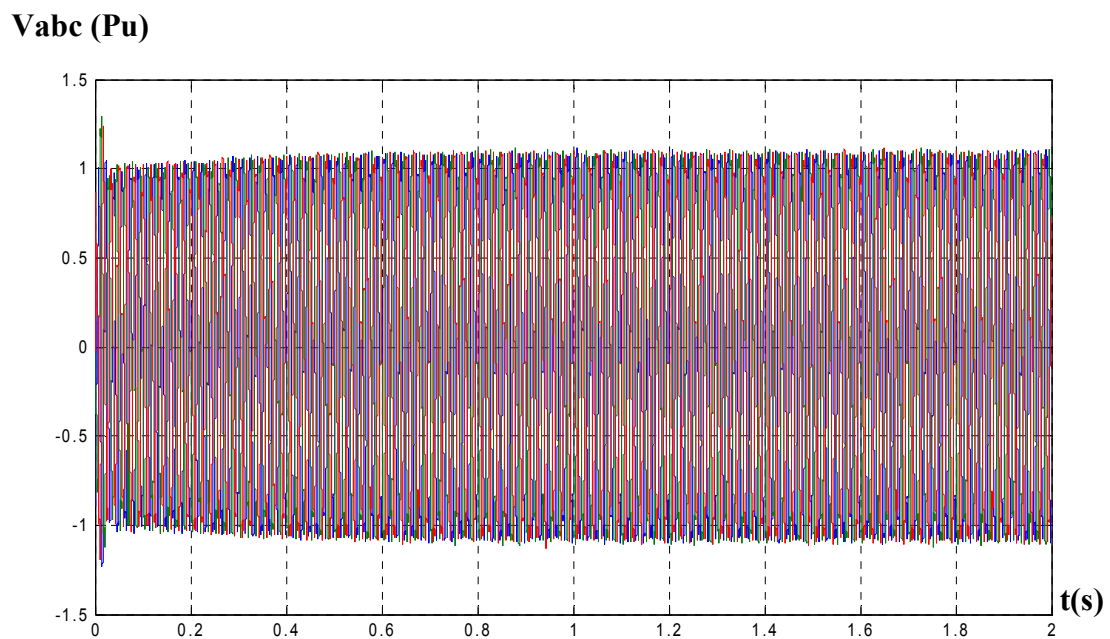


Figure-IV-20- les tensions triphasées au jeu de barre B575

Les tensions triphasées au jeu de barre B575 restent stable malgré le changement de vitesse du vent ce qui signifie que la tension est imposée par le réseau Figure-IV-20.

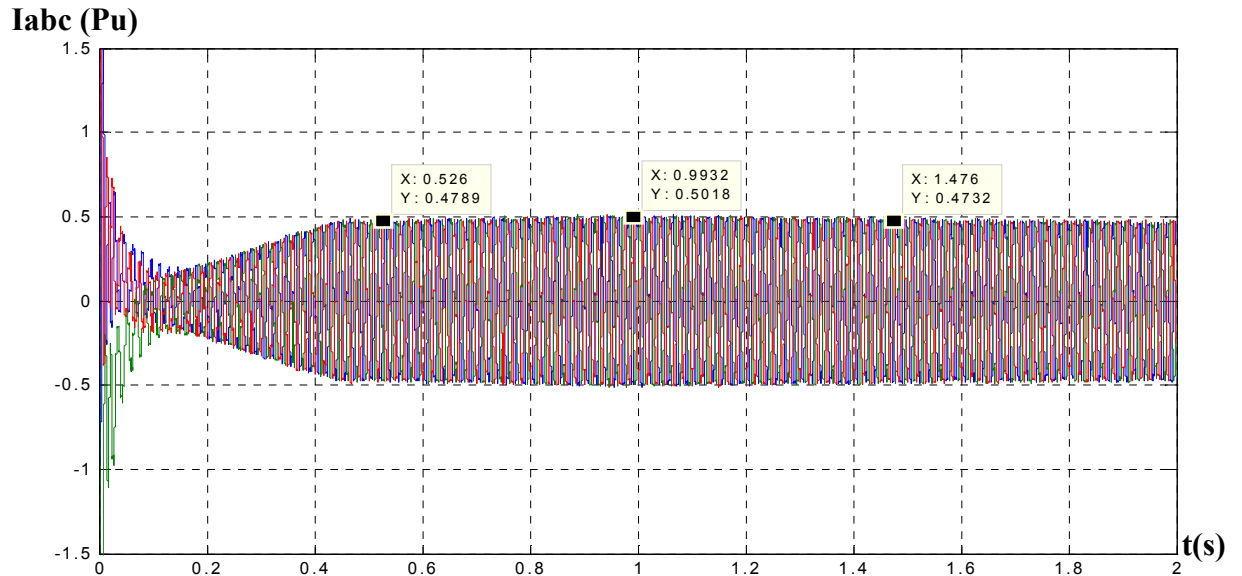


Figure-IV-21-les courants des trois phases au jeu de barre B575

On remarque bien que les valeurs des courants des trois phases au jeu de barre B575 augmentent en terme d'amplitude de $0.4Pu$ au $0.5 Pu$ et revient à $0.4Pu$ au moment de la variation de vitesse c-à-d dans l'intervalle 0.5s à 1s Figure-IV-21.

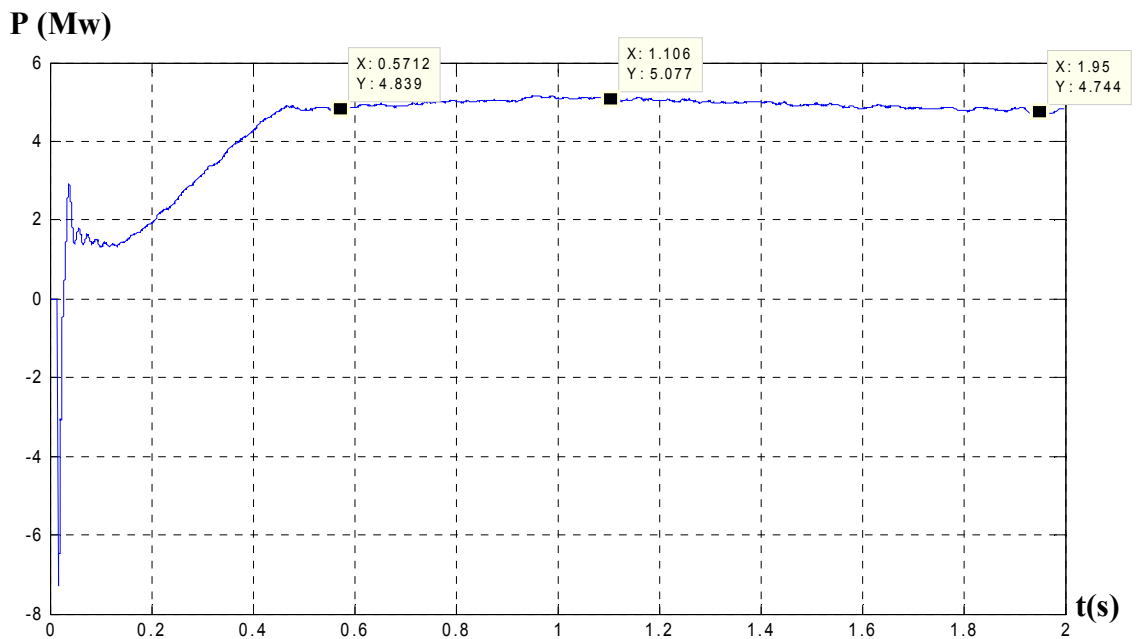
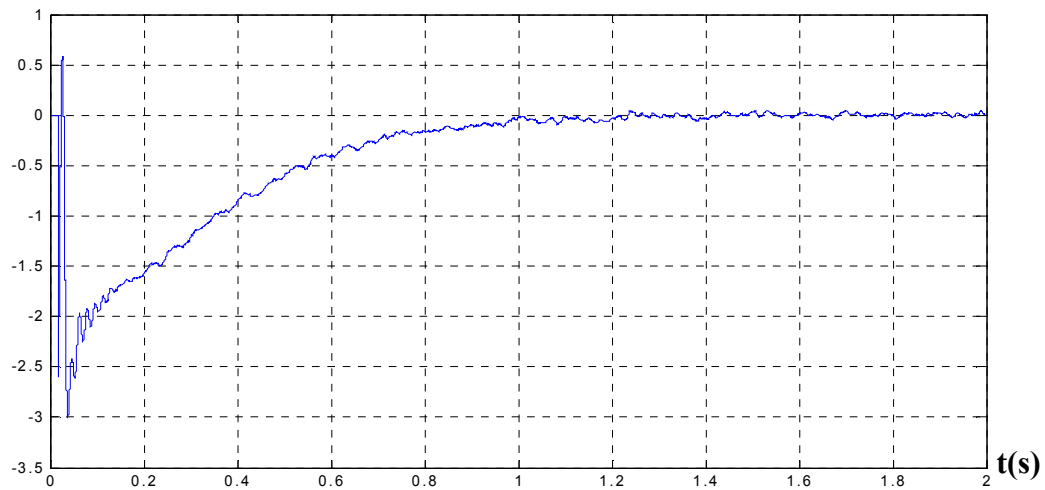
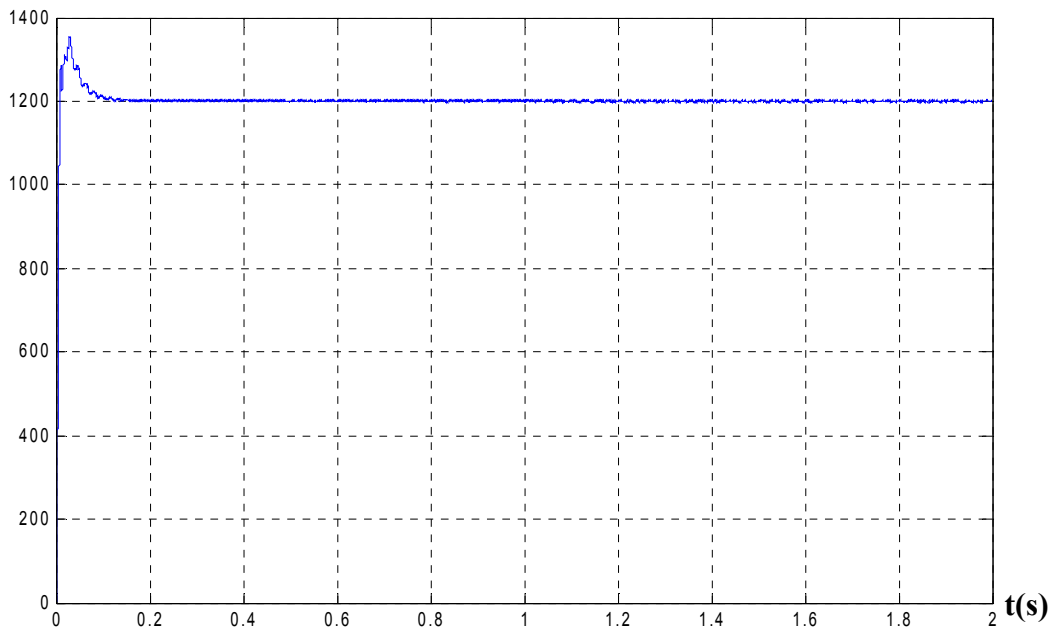


Figure-IV-22- La puissance active fournie par la MADA

L'effet de la variation de vitesse est apparent sur la puissance active fournie par la MADA, c-à-d que la puissance à augmenter de 4.83Mw à 5.07Mw dans l'intervalle 0.5s à 1s Figure-IV-22.

Q (Mvar)**Figure-IV-23- La puissance réactive fournie par la MADA**

La puissance réactive fournie par la MADA restait toujours autour de zéro malgré qu'il y ait une variation de vitesse du vent Figure-IV-23.

Vdc (V)**Figure-IV-24-la tension au bus continu Vdc**

La tension au bus continu Vdc est régulée toujours à 1200V quelque soit la vitesse du vent c-à-d que le circuit intermédiaire doit toujours garder la tension continue constante à 1200V Figure-IV-24.

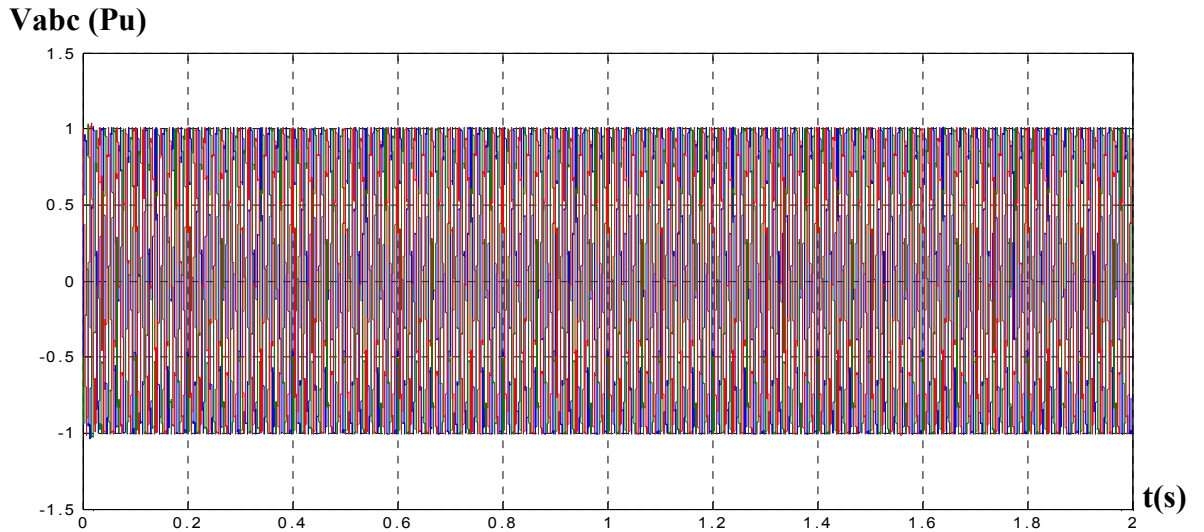


Figure-IV-25- les tensions triphasées au jeu de barre B25

Les tensions triphasées au jeu de barre B25 restent stable malgré le changement de vitesse du vent ce qui signifie que la tension est imposée par le réseau Figure-IV-25.

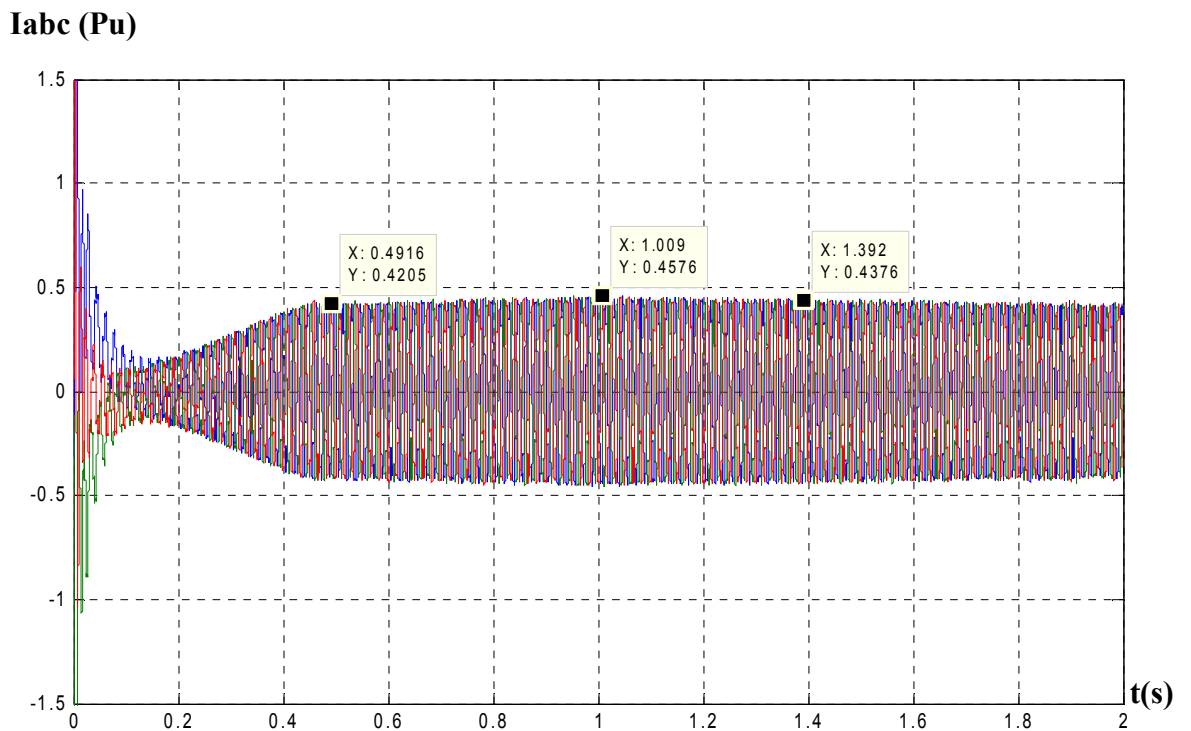


Figure-IV-26-les courants des trois phases au jeu de barre B25

Les valeurs des courants des trois phases au jeu de barre B25 ont augmentés en terme d'amplitude de $0.42Pu$ au $0.45 Pu$ et revient à $0.43Pu$ au moment de la variation de vitesse c-à-d dans l'intervalle 0.5s à 1s Figure-IV-26.

IV-3-4-Cas d'un défaut monophasé

Dans ce cas, on va simuler un défaut monophasé au niveau du jeu de barre 575 à l'instant 0.5s et la disparition du défaut à l'instant 0.5+0.15s, et cela pour une vitesse du vent de 10m/s.

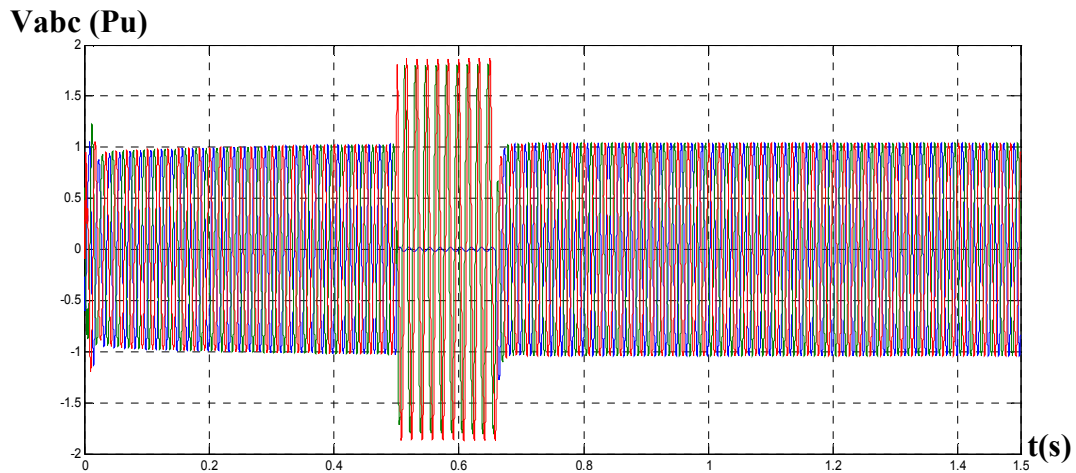


Figure-IV-27- les tensions triphasées au jeu de barre B575

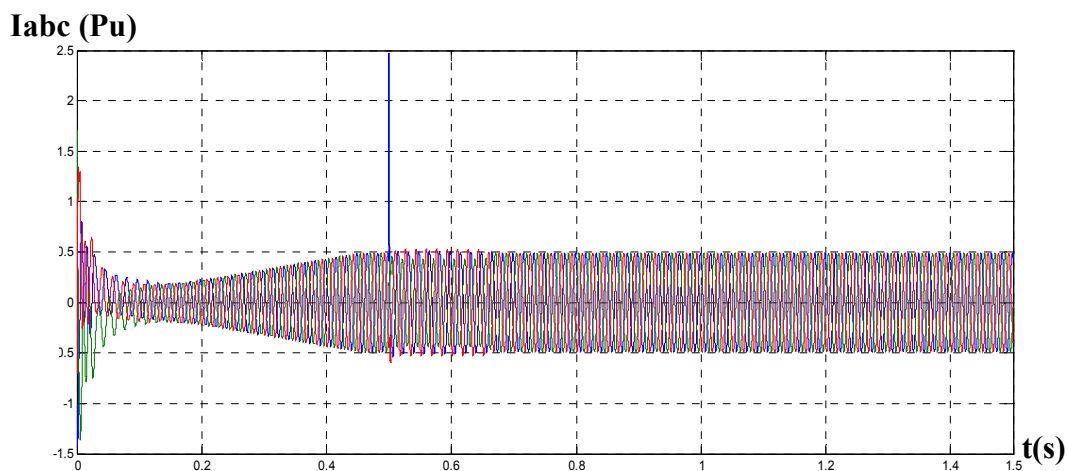


Figure -IV-28-les courants des trois phases au jeu de barre B575

L'effet du défaut monophasé sur les courants des trois phases au jeu de barre B575 est montré sur la Figure -IV-28.

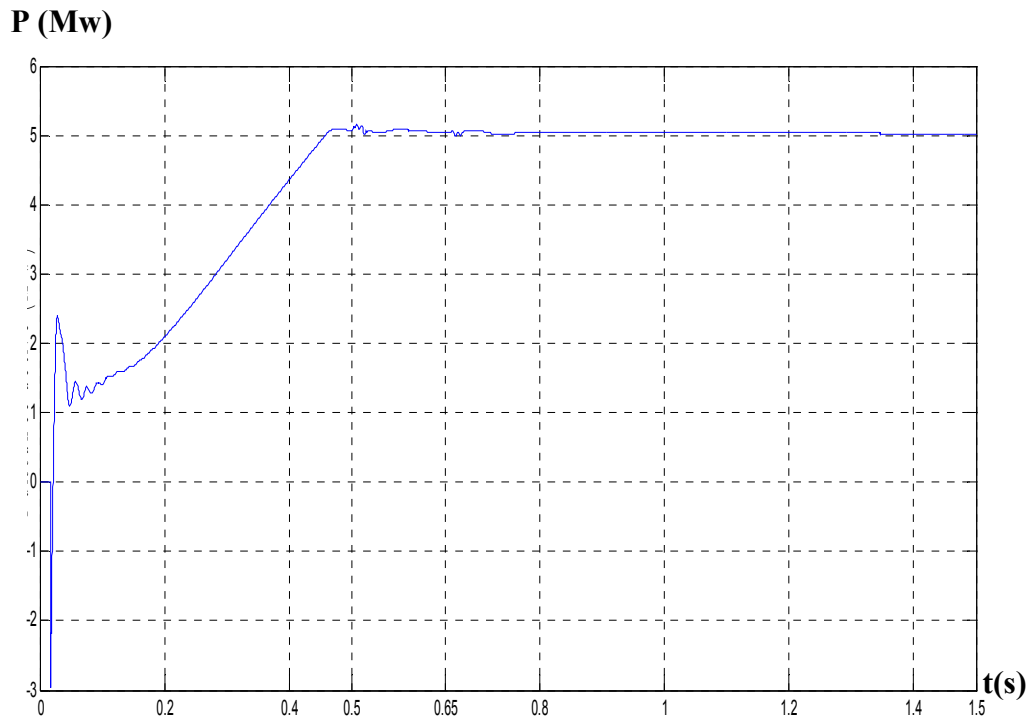


Figure-IV-29- La puissance active fournie par la MADA

Au moment du défaut, on constate une perturbation sur la puissance active jusqu'au l'absence de défaut Figure-IV-29.

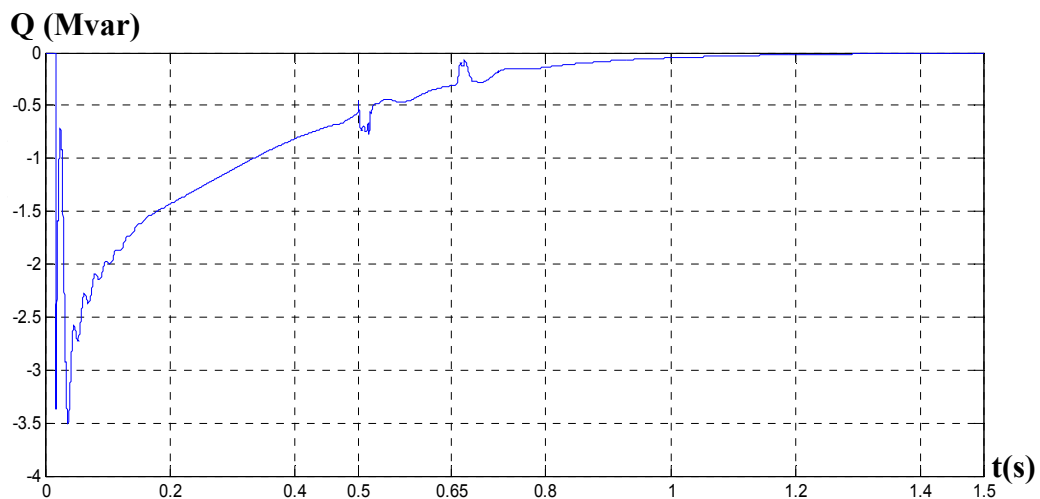


Figure-IV-30- La puissance réactive fournie par la MADA

Sur la Figure-IV-30, on remarque aussi une perturbation sur la puissance réactive jusqu'au l'absence de défaut.

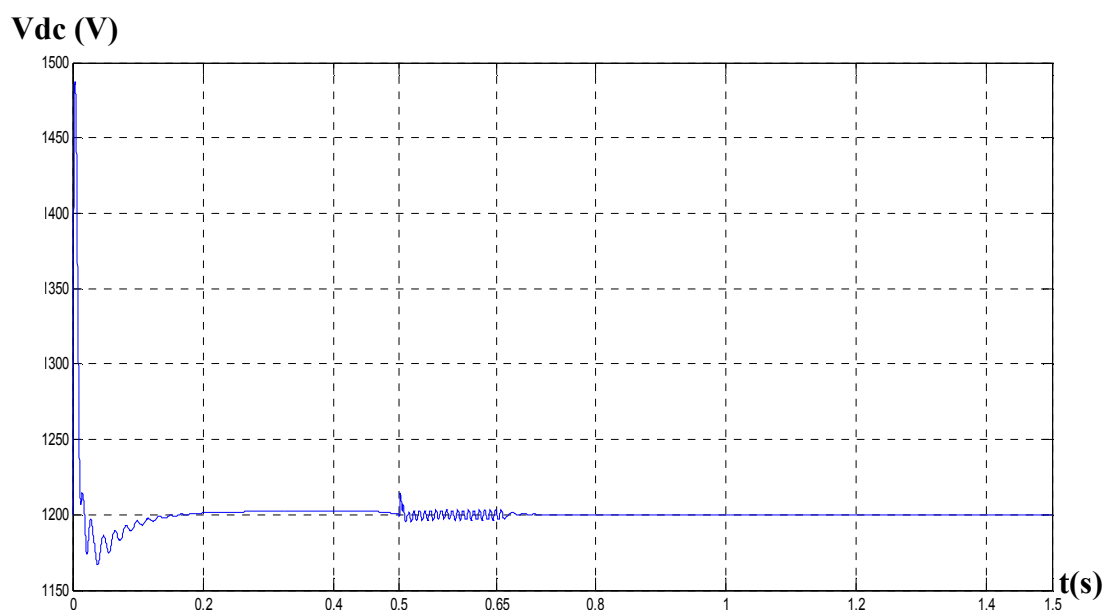


Figure-IV-31-la tension au bus continu Vdc

Au moment du défaut, on constate aussi une perturbation sur la tension du bus continu Figure-IV-31.

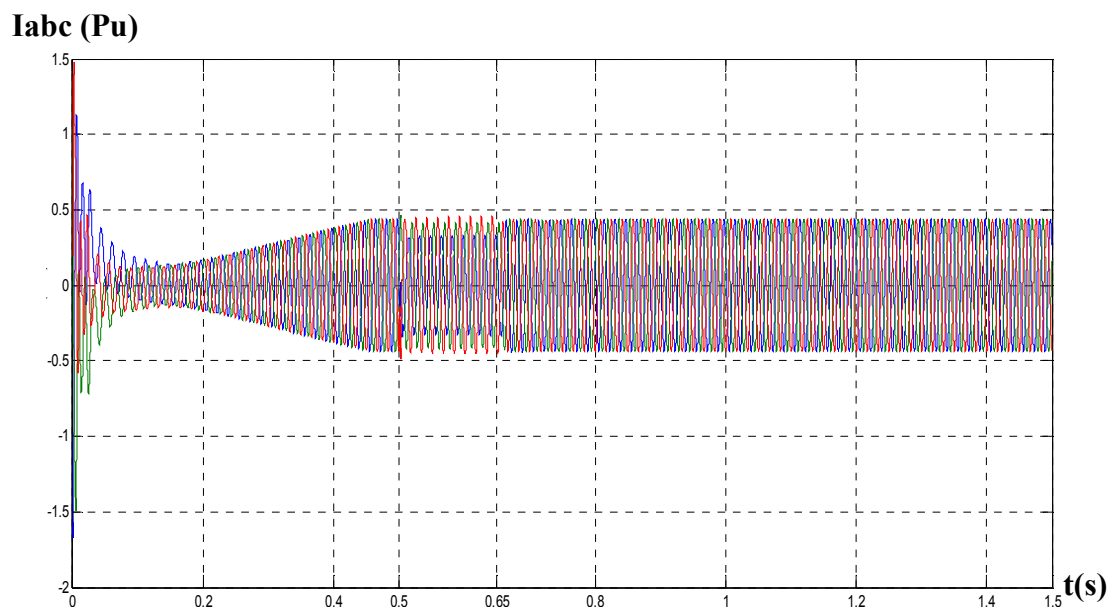


Figure-IV-32-les courants des trois phases au jeu de barre B25

L'impact du défaut monophasé sur les courants des trois phases au jeu de barre B25 est clair sur la Figure -IV-32 dans l'intervalle de 0.5s au 0.65s.

IV-4- CONCLUSION

Dans cette partie nous avons présentés le modèle SIMULINK globale du système c'est-à-dire la MADA, les deux convertisseurs statique et la turbine éolienne puis on a simulé ce système de production d'énergie éolienne avec quatre cas différent :

-Cas d'un état sain sans aucune perturbation externe et avec une vitesse du vent constante égale à 10m/s où on a présenté les allures des tensions continu, triphasés au jeu de barres B575 etB25 et les courants triphasés au même jeu de barre ainsi que les puissance active et réactive fourni par la MADA, les résultats obtenus indiquent que la qualité de signal courant fourni par la MADA est bonne avec un THD égal à 2.27% et que la MADA entrain de fournir de la puissance active au réseau tout en gardant toujours la puissance réactive autour de zéro .

-Cas d'un creux de tension au jeu de barre B575 provoqué au moment 0.8s jusqu'au 0.9s, les graphes présentés de tension continu, des tensions triphasés au jeu de barres B575 etB25 et les courants triphasés au même jeu de barre nous présentent l'influence du creux de tension sur la production de l'énergie électrique via l'énergie éolienne.

-Cas de variation de vitesse du vent de 8m/s à 14m/s au point 0.5s, d'où on a conclu d'après les graphes présentés que les courants triphasés varient en fonction de la vitesse du vent et par conséquent la puissance active fourni par la MADA par contre les tensions triphasés sont imposées par le réseau électrique.

-Cas d'un défaut monophasé provoqué au jeu de barre B575 qui déclenche au moment 0.5s, de durée 0.15s, et d'après les figures présentées on a constater l'effet du défaut sur les puissances actives et réactives fournis par la MADA ainsi que sur les tensions et les courants au jeu de barres B575 etB25.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La maîtrise de l'énergie est de nos jours un défi politique et économique qui engendre des conflits. Mais comment maîtriser la demande énergétique ? Une alternative est déjà de réduire nos consommations d'énergie primaire (gaz, pétrole, charbon...) en utilisant des énergies primaires renouvelables plus abondantes et moins coûteuses lors de leur transformation ou de leur conversion. Parmi ces énergies, l'énergie éolienne, qui est appelée à jouer un rôle plus important dans la production d'énergie renouvelable, sans rejet toxique ni émission de CO₂.

Dans ce travail, une recherche bibliographique sur le domaine des énergies renouvelables nous a permis de connaître les différentes formes d'énergies existantes dans le monde, en particulier l'énergie éolienne, à laquelle nous accordons plus d'importance, car elle était l'objet de ce travail.

Une étude théorique des systèmes éoliens de production d'électricité a été effectuée, ainsi que les différentes machines électriques utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.

La machine asynchrone double alimentation et ces différentes structures sont aussi étudiés dans ce mémoire particulièrement le double alimenté par le stator et le rotor, cette dernière est proposée dans le système de conversion d'énergie éolienne.

L'objectif du système proposé est d'utiliser dans les convertisseurs des composants électronique de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture, qui existent actuellement sur le marché tel que les IGBT.GTO et les IGCT, ce qui nous permet d'appliquer la commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour la minimisation des harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance dans le but d'optimiser et d'améliorer le rendement de toute la chaîne de conversion d'énergie électrique.

Des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du système proposé sont envisageables :

- Réalisation concrète et installation du système dans un site favorable en Algérie.
- Une étude expérimentale pour confirmer les résultats de la simulation.
- Contrôle du système par les techniques d'intelligence artificielle.
- Réaction du système vis à vis des déséquilibres du réseau.

ANNEXE 1

Paramètre de la machine asynchrone :

$P_{nom}=1.5e6/0.9*6$ Mw Puissance nominale
 $V_{nom}=575$ v; Tension composée nominale
 $F_{nom}=60$ Hz; Fréquence nominale
 $R_s=0.00706$ pu; Résistance satatorique
 $L_{ls}=0.171$ pu; Inductance satatorique
 $R_r=0.005$ pu ; Résistance rotorique
 $L_{lr}=0.156$ pu; Inductance rotorique
 $L_m=2.9$ pu; Inductance mutuelle
 $H=5.04$ s; Constante d'énergie
 $F=0.01$ pu; Facteur de frottement
 $p=3$; Nombre de paires de pôles

Paramètre de la commande MLI :

$PWM_freq=27*F_{nom}$

Paramètre de la capacité intermédiaire :

$V_{dc_nom}=1200$ V; La tension intermédiaire
 $C_DClink=10000e-6*6$ Farads;

Paramètre de la bobine de connexion au réseau :

$R_{RL}=0.30/100$ pu;
 $L_{RL}=0.30$ pu;

Paramètre de la turbine :

$P_{mec}=1.5e6*6$ W; La puissance mécanique nominale de sortie
 $power_C=0.73$ pu; La puissance mécanique nominale en unité relative
 $speed_C=1.2$ pu; La vitesse de génératrice nominale en unité relative

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B.Multon "l'énergie électrique : analyse des ressources et de la production", Journées électrotechnique du club EEA, Paris 29 Janvier 1999.
- [2] B.Multon "production d'électricité par sources renouvelable", technique de l'ingénieur D4005.
- [3] Site internet : <http://sitestest.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/Enjeux/Sources/sources.htm> "Les sources d'énergies renouvelables"
- [4] Site internet : [http:// www.éléments.hbca/thème/fuels/table/boulot.htm](http://www.éléments.hbca/thème/fuels/table/boulot.htm). "Les énergies renouvelable".
- [5] H.Camblong "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable" thèse de doctorat, Ecole nationale supérieur d'arts et métiers centre de BORDEAUX, 18 Décembre 2003.
- [6] Article : état de l'art dans les aérogénérateurs électriques
Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002
- [7] S. BELAKEHAL " Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables", Thèse de doctorat, Université de Constantine, 10 Juin 2010.
- [8] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conférence, St Louis, november 5-8, 1998.
- [9] F.Poitiers "étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne" thèse de doctorat, l'Université de Nantes, 2003
- [10] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [11] O. De Vries "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech.1983, 15, pp. 77-96.
- [12] J.L. Menet L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", Renewable Energy 22, 2001, pp. 491-506.
- [13] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [14] A. D. Diop "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique D'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.

- [15] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'ingénieur D3960, Novembre 2004
- [16] O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. »
Thèse. ENS de Cachan. Décembre 2002
- [17] Tapia A. Tapia G. Ostolaza J.X. and Sienz J.R., "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transaction on energy conversion vol 18 N° 2* June 2003 pp
- [18] Djurovic Double feed Induction Generator with Two Pair of Poles Electrical Machines and Drives 11-13 September 1995, Conference Publication N°412 TEE 1995. 103
- [19] C. Kelber W. Schumacher "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines", VSSH 2000. European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 26-28 Jan. 2000.
- [20] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson, Doubly-fed a. c. machines : classification and comparison 9th European Conference on Power Electronics and Applications, 27- 29 Aout 2001, *Graz*, Autriche.
- [21] G.Seguirer, F. Notelet, *Electrotechnique industrielle* , Editions technip 1990.
- [22] J. Lesenne, F. Notelet, G.Seguirer, ' Introduction à l'électrotechnique approfondie ', Technique et documentation, Paris, 1981, ISBN 2-85206-089-2.
- [23] Heir Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems Publications John Whiel et Sons ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [24] T.Kriiger B.Anderson Advance control strategy for variable speed wind turbine European Wind Energy Conference 2001 Copenhagen Denmark pp. 9R3-9R13. 198
- [25] A. Boyette. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nancy I 2006.
- [26] O. Chee-Mun. « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Prentice hall, 1998.
- [27] I. Boldea. « Variable speed generators ». Taylor & Francis 2006.
- [28] A. Nesba. « Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat d'état, ENP, 2007.
- [29] R. KRISHNAN. « Electric motor drives modeling, analysis and control». Prentice Hall, 2001.

[30] D. AOUZELLAG, K. GHEDAMSI, E.M. BERKOUK. « Network power flux control of a wind generator ». *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 3, pp 615- 622, Elsevier 2009.

[31] N. P. QUANG, J.-A. DITTRICH. « Vector control of three-phase ac machines ». Springer, 2008.

[32] K. GHEDAMSIA, D. AOUZELLAGA, E.M. BERKOUK. « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system ». *Renewable Energy*, Volume 33, Issue 9, pp 2145-2156, Elsevier 2008.

[33] A. M. TRZYNADLOWSKI. « Control of induction motors ». Academic press, 2001.

[34] J.-P LOUIS, C. BERGMANN. « Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires ». *Techniques d'ingénieur D 3 643*.

خلاصة

ان انتاج الطاقة الكهربائية انطلاقا من الطاقات المتجددة (الهوائية، الشمسية...) قد عرفت تقدما واضحا و كبير لكي تكون انظمة انتاج الطاقة فعالة يجب تكييف كل سلسلة الانتاج للحصول على مردود جيد
 الالة غير المتزامنة ثنائية التغذية هي الالة الاكثر استعمالا في مجال انتاج الطاقة الهوائية
 الهدف من النظام المقترح هو استعمال داخل المحولات مكونات الكترونيك الطاقة المتحكم فيها في الفتح و الغلق المتوفرة حاليا في السوق مثل IGBT، GTO، IGCT... الذي يسمح لنا بتطبيق تقنية (MLI) من اجل خفض المموجات غير المرغوب فيها و تحسين معامل الطاقة و بالتالي تحسين مردود كل سلسلة الانتاج

كلمات مفتاحية نظام هوائى-مولد حيثي مزدوج الطاقة -محاكاة-التحكم-الطاقة.

Résumé

La production de l'énergie électrique à partir des énergies renouvelable (éolien, solaire,...) connaît un grand essor. Pour que ces systèmes de production soient rentables, il faut optimiser toute la chaîne de production pour obtenir de bons rendements.

La machine asynchrone double alimentée est la machine la plus répandue dans le domaine de production d'énergie éolienne.

L'objectif du système proposé est d'utiliser dans les convertisseurs des composants électroniques de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture qui existent actuellement sur le marché tel que les IGBT, GTO, IGCT,... Ce qui nous permet d'appliquer la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour la minimisation des harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance dans le but d'optimiser et d'améliorer le rendement de toute la chaîne de conversion électrique.

Mots clés : Eolienne – MADA- modélisation– commande MLI-contrôle-puissance.

Abstract

The production of electrical energy starting from renewable energies (wind, solar...) makes great rise. For these production systems are effective cost, we must optimize the entire production chain to obtain good returns.

The double fed asynchronous machine is the most widespread machine in the field of wind energy production

The objective of the proposed system is to use converters in the power electronics components ordered at the opening and closing currently on the market such as IGBT, GTO, IGCT,... This allows us to apply the pulse-width modulation (PWM) for the minimization of harmonics and improving the power factor in order to optimize and improve the performance of the entire chain of electrical conversion.

Key words: wind system – DFIG – modelling–MLI control-control–Power.