

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° :...../2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : COMMANDE ELECTRIQUE

Thème

**Commande directe de puissance d'une Génératrice Asynchrone à
Double Alimentation**

Présenté Par : RANDA ZIAOUR

Encadré Par : B. MEDJAHED

NACEREDDINE BOUFROURA

Date de soutenance : 30 / 06 / 2024

Jury de Soutenance

Président : B. MAKHLOUF

Univ MSB Jijel

Encadreur : B. MEDJAHED

Univ MSB Jijel

Examineur : N. LOURCI

Univ MSB Jijel

Promotion : 2023 /2024

Remerciement :

Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre but et d'accomplir notre travail.

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre encadreur M Boubekur Medjahed, Maitre de conférences qui nous a encadrées durant tout le long de ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils, pour sa patience, son soutien permanent et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien cette maîtrise.

Nous remercierons également tous les membres de jury pour avoir bien voulu évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également tous les personnes qui n'est pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail

Dédicaces :

Pour l'esprit de mon père,

A ma mère,

A mes frères et mes soeurs,

A toute ma famille et mes ami(e)s

Et à tous ceux qui me sont chers de loin et de près et qui partagent
une place dans mon cœur.

Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse l'étude, la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), et cet objectif est de contrôler directement la puissance active et réactive générée par la GADA.

La génératrice asynchrone à double alimentation est utilisée dans les systèmes d'énergie éolienne. Elle présente un intérêt particulier en raison de sa capacité à contrôler indépendamment les puissances active et réactive. La GADA est une machine asynchrone avec un stator directement connecté au réseau électrique et un rotor relié au réseau via un convertisseur dos-à-dos avec un bus continu. Le calcul des puissances active et réactive via la mesure des courants et tensions statoriques permet d'estimer les erreurs par rapport aux références établies. L'utilisation de deux comparateurs à hystérésis trois états permet de choisir le vecteur tension rotorique à appliquer selon la position du flux statorique vu par le rotor. Le vecteur tension statorique détermine alors l'état des interrupteurs du convertisseur côté rotor.

Un second convertisseur côté réseau est utilisé et vise à maintenir la tension du bus continu constante et tout en maintenant la forme des courants absorbés en phase avec la tension du réseau. Des simulations numériques sur Matlab/Simulink ont validé cette approche.

Abstract

In this work, we are interested in the study, modelling and control of a wind energy conversion system based on a double-fed asynchronous generator (DFIG), with the aim of directly controlling the active and reactive power generated by the DFIG.

The double-fed asynchronous generator is used in wind energy systems. It is of particular interest because of its ability to control active and reactive power independently. The GADA is an asynchronous machine with a stator directly connected to the grid and a rotor connected to the grid via a back-to-back converter with a DC bus. Active and reactive power are calculated by measuring the stator currents and voltages, enabling errors to be estimated in relation to established references. Two three-state hysteresis comparators are used to select the rotor voltage vector to be applied according to the position of the stator flux as seen by the rotor. The stator voltage vector then determines the state of the rotor-side converter switches.

A second converter on the grid side is used to keep the DC bus voltage constant, while keeping the shape of the absorbed currents in phase with the grid voltage. Numerical simulations using MATLAB/Simulink have validated this approach.

الملخص:

في هذا العمل، نهتم في هذا العمل بدراسة ونمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح القائم على مولد غير متزامن مزدوج التغذية (GADA)، بهدف التحكم المباشر في الطاقة النشطة والمتفاعلة التي يولدها المولد غير المتزامن المزدوج التغذية.

يُستخدم المولد غير المتزامن مزدوج التغذية في أنظمة طاقة الرياح. وهو ذو أهمية خاصة بسبب قدرته على التحكم في الطاقة النشطة والمتفاعلة بشكل مستقل. إن GADA عبارة عن آلة غير متزامنة ذات جزء ثابت متصل مباشرة بالشبكة ودوّار متصل بالشبكة عبر محول من الخلف إلى الخلف مع ناقل تيار مستمر. يتم حساب القوتين النشطة والمتفاعلة عن طريق قياس تيارات الجزء الثابت وفولتية الجزء الثابت لتقدير الأخطاء فيما يتعلق بالمراجع المحددة. يتم استخدام اثنين من مقارنات التباطؤ ثلاثي الحالات لتحديد متجه جهد الجزء المتحرك الذي سيتم تطبيقه وفقاً لموضع تدفق الجزء الثابت كما يراه الدوار. ثم يحدد متجه جهد الجزء الثابت حالة مفاتيح المحول من جانب الدوار.

يتم استخدام محول ثانٍ من جانب التيار الكهربائي، والهدف منه هو الحفاظ على جهد ناقل التيار المستمر ثابتاً مع الحفاظ على شكل التيارات الممتصة في الطور مع جهد التيار الكهربائي. وقد أثبتت المحاكاة العددية باستخدام Matlab/Simulink صحة هذا النهج.

Liste des figures:

Figure I.1	Constitution d'une éolienne.	3
Figure I.2	Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.	4
Figure I.3	Exemples de turbines éoliennes à axe vertical.	5
Figure I.4	Eoliennes à axe horizontal.	5
Figure I.5	Types d'éoliennes à axe horizontal.	6
Figure I.6	Tube de courant autour d'une éolienne.	7
Figure I.7	Coefficient de puissance.	8
Figure I.8	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.	8
Figure I.9	Schéma de l'alimentation de la GADA	10
Figure I.10	Quadrants de fonctionnement de la MADA.	11
Figure I.11	Représentation de la génératrice asynchrone à double alimentation.	13
Figure I.12	Modèle de Park de la GADA	16
Figure I.13	Système de conversion d'énergie éolienne à base d'une GADA.	19
Figure I.14	Les convertisseurs de puissance bidirectionnel AC / DC/ AC pour l'alimentation de la GADA.	20
Figure II.1	Schéma bloc de contrôle de GADA par DPC classique.	23
Figure II.2	Algorithme de la DPC	23
Figure II.3	Onduleur de tension à deux niveaux.	24
Figure II.4	Secteurs et vecteurs des tensions de l'onduleur.	26
Figure II.5	Relation entre les vecteurs de flux du stator et du rotor dans les référentiels stationnaires et rotors.	27
Figure II.6	Evolution du vecteur flux rotorique en fonction du vecteur de tension appliquée.	30
Figure II.7	Représentation des vecteurs tension et des secteurs.	31

Figure II.8	Comparateur de la puissance active et réactive.	34
Figure II.9	Schéma simplifié du Convertisseur Coté Réseau avec un filtre.	36
Figure II.10	Principe de contrôle de la tension du bus continu.	37
Figure III.1	Schéma de Commande directe de puissances alimenté sans redresseur.	39
Figure III.2	Tension et courant rotoriques.	39
Figure III.3	Tension et courant statoriques.	40
Figure III.4	Couple, vitesse de la machine et couple turbine.	40
Figure III.5	Puissance active et réactive.	41
Figure III.6	Schéma de commande de convertisseur côté réseau.	42
Figure III.7	Tension d'entrée de redresseur.	42
Figure III.8	Tension, courant d'entrée du redresseur et courant de référence.	43
Figure III.9	Tension, courant de condensateur et tension de référence.	43
Figure III.10	Schéma de Commande directe de puissance	45
Figure III.11	Tension et courant statoriques.	45
Figure III.12	Tension et courant rotoriques.	46
Figure III.13	Couple, vitesse de machine et couple turbine.	46
Figure III.14	Allure des puissance active et réactive.	47
Figure III.15	Tension, courant d'entrée de redresseur et courant de référence.	47
Figure III.16	Amplitude et angle de flux rotorique.	48
Figure III.17	État des interrupteurs de 1 ^{er} pont de l'onduleur.	48

Liste des tableaux :

Tableau II.1	Etablissement des expressions des tensions.	26
Tableau II.2	L'effet des vecteurs de tension sur la puissance réactive active d'entrée et de sortie.	31
Tableau II.3	Table de commutation.	35

Symboles :

P_m	La puissance extrait de vent (w)
P_{mt}	La puissance théorique de vent (w)
Ω	La vitesse mécanique de rotation du rotor(rad/s)
p	Paires de pôles de machine.
ω	Pulsation mécanique du rotor (rad/sec).
f_r	La fréquence de rotation du rotor
f_m	La fréquence mécanique.
g	Le glissement de la machine.
a_s, b_s, c_s	Trois phases du stator
a_r, b_r, c_r	Trois phases du rotor
V_s, V_r	Vecteurs de tension du stator et du rotor.
I_s, I_r	Vecteurs de courant du stator et du rotor.
ω_P	Pulsation du référentiel d'axe (d, q) (rad/sec)
ω_s	Pulsation électrique des courant statorique(rad/s)
ω_1, ω_r	Vitesse angulaire du Stator et du rotor.
P_s, Q_s	Puissance active et réactive du stator.
P_r	Puissances du rotor.
L_m	Inductance mutuelle.
L_s, L_r	Inductance propre d'une phase rotorique et statorique.
R_s, R_r	Résistance du stator et du rotor.
ϕ_s, ϕ_r	Vecteurs de flux de Stator et du rotor.
θ_s, θ_r	Angles de flux du stator, rotor dans le plan rotorique.
θ	Angle de phase entre les vecteurs de flux statorique et rotorique.
S_p, S_q	États de puissance active et réactive.

SOMMAIRE :

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE1

CHAPITRE 1 Les bases de la production éolienne

I.1. Introduction :	2
I.2. Définition de l'énergie éolienne	2
I.3. Principaux composants d'une éolienne	3
I.4. Les différents types d'éoliennes	4
I.4.1. Eoliennes à axe vertical :	4
I.4.2. Eoliennes à axe horizontal :	5
I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne :	6
I.6. Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique :	7
I.6.1. Loi de Betz :	7
I.6.2. Puissance réelle d'une éolienne.....	9
I.7. La génératrice asynchrone à double alimentation :	10
I.7.1. Principes fondamentaux :	10
I.7.2. Régime et mode de fonctionnement de GADA :	11
I.7.3. Avantages et inconvénients de la GADA :	12
I.7.4. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA :	13
I.8. Schéma de production :	19
I.8.1. Description :	19
I.8.2. Représentation du système d'alimentation de la GADA :	20
I.9. Conclusion :	21

CHAPITRE 2 La commande directe de puissance pour une GADA

II. Introduction :	22
II.1. Principe de la commande direct de puissance :	22
II.2. Algorithme de la DPC :	23
II.3. Onduleur de tension à deux niveaux :	24
II.3.1. Modilisation de l'onduleur :	24
II.3.2. Vecteur de tension généré par l'onduleur :	25
II.3.3. Etat de l'onduleur :	26
II.4. Mesure de tension et courant :	27

II.5. Estimation de la puissance active et réactive :.....	27
II.6. Estimation de flux statorique :.....	32
II.7. Orientation du flux statorique dans le repère rotorique :.....	32
II.8. Détermination du secteur du flux :.....	32
II.9. Calcul de l'erreur des puissances :	33
II.10. Table de commutation	34
II.11. Modélisation du Convertisseur Coté Réseau (CCR).....	35
II.12. Modélisation du filtre :	36
II.13. Modélisation du bus continu :.....	36
II.14. Schéma de commande du redresseur par hystérésis :	37
II.14.1. Calcul des paramètres du PI :.....	37
II.15. Conclusion :	38

CHAPITRE 3 Résultats de Simulation

III. Résultats de Simulation.....	39
III.1. Commande directe de puissances alimenté sans redresseur :	39
III.2. Résultats de simulation du convertisseur côté réseau :.....	43
III.3. Schéma global DPC :.....	46

Introduction générale :

L'énergie électrique est le pilier de notre société moderne. Sans électricité elle serait vraiment "obscur" et ceci sur tous les plans. En outre, c'est une énergie qui est facile à transporter, de ce fait elle devient un élément primordial.

Le vent était à l'origine de l'invention des moulins du même nom dans le but d'en retirer de l'énergie mécanique. Vers le milieu du XIXème siècle, l'arrivée des machines à vapeur industrielles ont "exterminées" les moulins à vent.

En 1974, avec la crise pétrolière, des études et des expériences sur les éoliennes ont été effectuées afin de palier à ce manque d'énergie. D'autant plus que les besoins de la société ont considérablement augmenté.

N'oublions pas aussi que l'exploitation pétrolière ne peut durer indéfiniment ce qui prévoit une pénurie de pétrole, par conséquent d'énergie, d'où la nécessité de prendre très au sérieux l'importance des éoliennes et de mettre l'accent sur son développement.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment pour les applications éoliennes

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones [1]. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude à la commande de puissance sur la GADA (génératrice asynchrone à double alimentation) pour la production de l'énergie éolienne.

Ce travail est structuré en trois chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des bases de la production éolienne accompagnées d'une généralité sur La génératrice asynchrone à double alimentation avec sa modélisation

Dans le second chapitre, on parlera de la commande directe de puissance pour une GADA, une modélisation sur le système d'alimentation de GADA.

Le dernier chapitre concerne l'analyse de la simulation de la commande DPC de GADA.

Chapitre I :
Les bases de la production

I.1. Introduction :

L'essor des technologies de capture du vent, marqué par l'introduction des moulins à vent, a connu une progression constante. Dès les années 1940, l'innovation a franchi un cap significatif avec l'adoption de prototypes d'éoliennes dotées de pales profilées, qui ont démontré leur efficacité dans la production d'électricité. Aujourd'hui, diverses méthodes sont employées pour exploiter l'énergie éolienne, qu'il s'agisse de capteurs à axe vertical ou horizontal. Les avancées technologiques ont permis d'améliorer substantiellement la performance des structures captant le vent.[2]

La conversion efficace de l'énergie mécanique en électricité est un aspect crucial des performances d'une éolienne, au-delà de ses caractéristiques mécaniques. Une multitude de dispositifs sont en place pour cette conversion, utilisant principalement des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de contrôle de ces machines, ainsi que leurs interfaces pour se connecter au réseau électrique, sont conçues pour maximiser la capture d'énergie éolienne. Elles visent à opérer efficacement sur une large gamme de vitesses de vent, afin d'optimiser la rentabilité des installations éoliennes.[3]

L'objectif de ce mémoire est de commander à la technique de DPC (commande directe de puissance) d'étudier l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA) pour maximiser la production d'énergie tout en fonctionnant à vitesse de vent.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète [4].

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes.

Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales.

I.3. Principaux composants d'une éolienne [5]

Il existe plusieurs configurations possibles d'éoliennes qui peuvent avoir des différences importantes. Cependant, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- **Le mat**, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500KW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance ;
- **Les pales**, qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Les premières éoliennes étaient munies de deux pales. Cette solution, même si elle permet des vitesses de rotation plus élevées, présente quelques inconvénients qui sont principalement les vibrations, les bruits et une fatigue accrue du rotor. Actuellement, la majorité des installations sont dotées de système tripale.
- **La fondation**, une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage

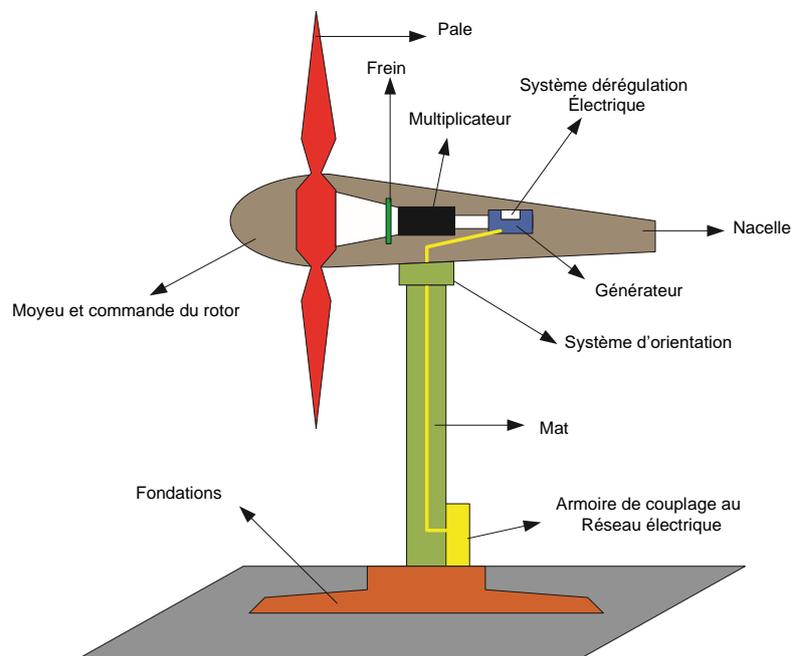


Figure I.1 : Constitution d'une éolienne.

- **La nacelle**, qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine

synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme le montre la figure I.2.

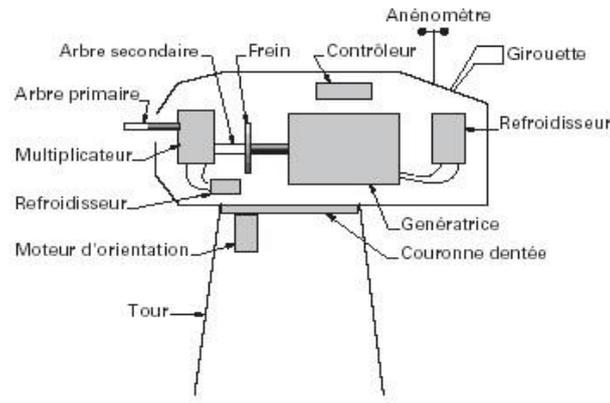


Figure I.2 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

I.4. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux familles d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe vertical.
- Les éoliennes à axe horizontal

I.4.1. Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical (Figure I.3) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité contrairement au traditionnel moulin à vent qui lui est à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol. [6]

Grâce à son axe vertical, il existe une symétrie de révolution et le vent peut venir de n'importe quelle direction sans qu'il soit nécessaire d'orienter le rotor. Par contre, ce type de turbine ne peut pas démarrer de manière autonome et doit être entraînée lorsque le vent est suffisant pour produire.



Figure I.3 : Exemples de turbines éoliennes à axe vertical.

I.4.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus largement employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important., même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales et une nacelle regroupant toute la chaîne de conversion

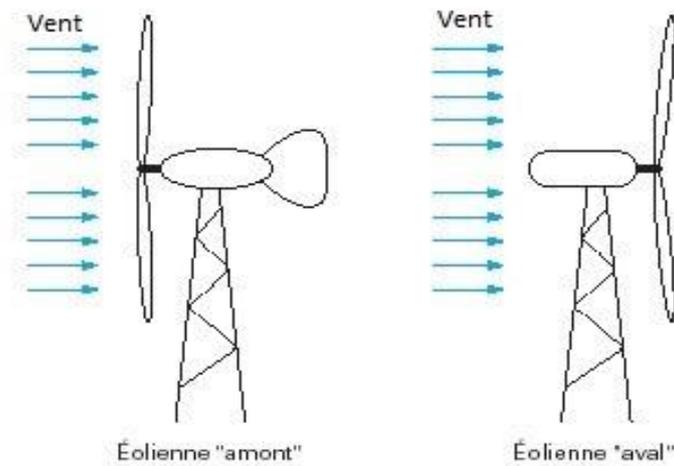
Elles sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. [7]



Figure I.4 : Eoliennes à axe horizontal.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle.

**Figure I.5 :** Types d'éoliennes à axe horizontal.

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique par une génératrice. [8]

Généralement, un système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique, généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance.

I.6. Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique :

I.6.1. Loi de Betz :

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 » [9]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1.5 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 :

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

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) :

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

Soit en remplaçant m par son expression dans :

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

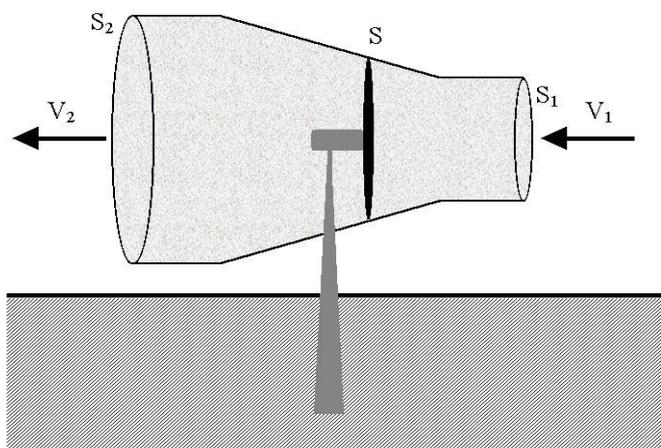


Figure I.6 : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

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

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

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

Si l'on trace ce ratio en fonction du rapport $\frac{V_1}{V_2}$ on obtient une courbe qui définit le coefficient de puissance C_p , représentée en figure I.7. Cette courbe a un maximum théorique à 0,59 qui est appelée limite de Betz et qui correspond à la puissance maximale que l'on peut extraire du vent. Cette limite, théorique, n'est jamais atteinte par les éoliennes qui ont un C_{pmax} de l'ordre de 0,5.

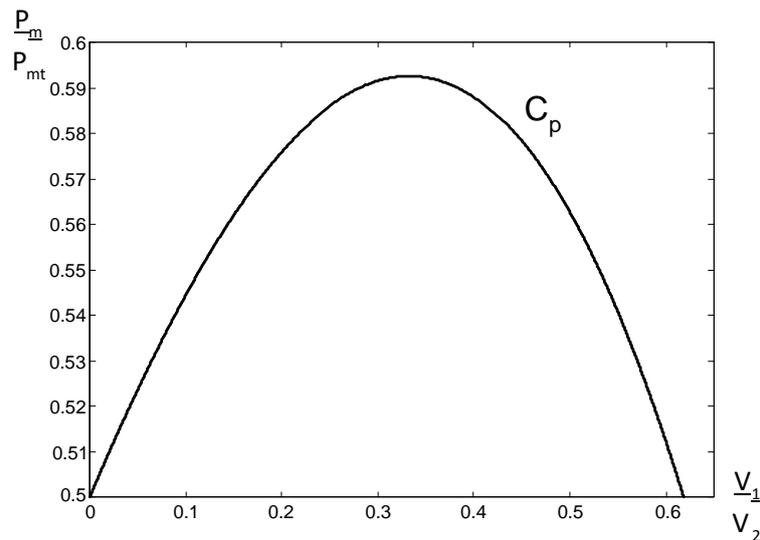


Figure I.7 : Coefficient de puissance.

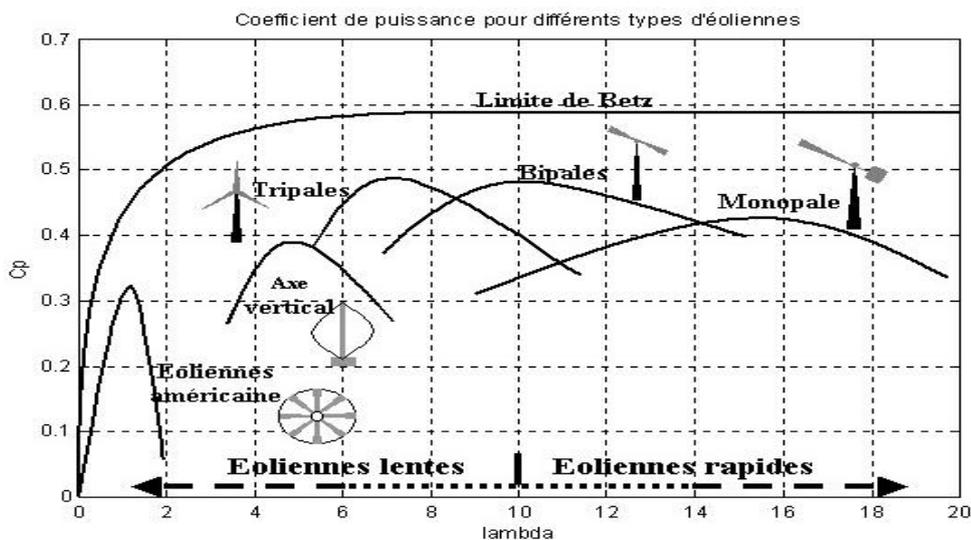


Figure I.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

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.8) 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 [10].

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.8) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s

I.6.2. Puissance réelle d'une éolienne

On donne l'expression de la puissance aérodynamique extraite du rotor comme suit :

$$P_{mr} = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S}{2} v^3$$

Où :

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + c_4 \lambda$$

β : L'angle de calage des pales en (degré)(°).

v : Vitesse du vent incidente sur le rotor (m/s).

λ : Rapport de vitesse de pointe entre la vitesse de pointe de la pale du rotor et la vitesse du vent.

I.7. La génératrice asynchrone à double alimentation :

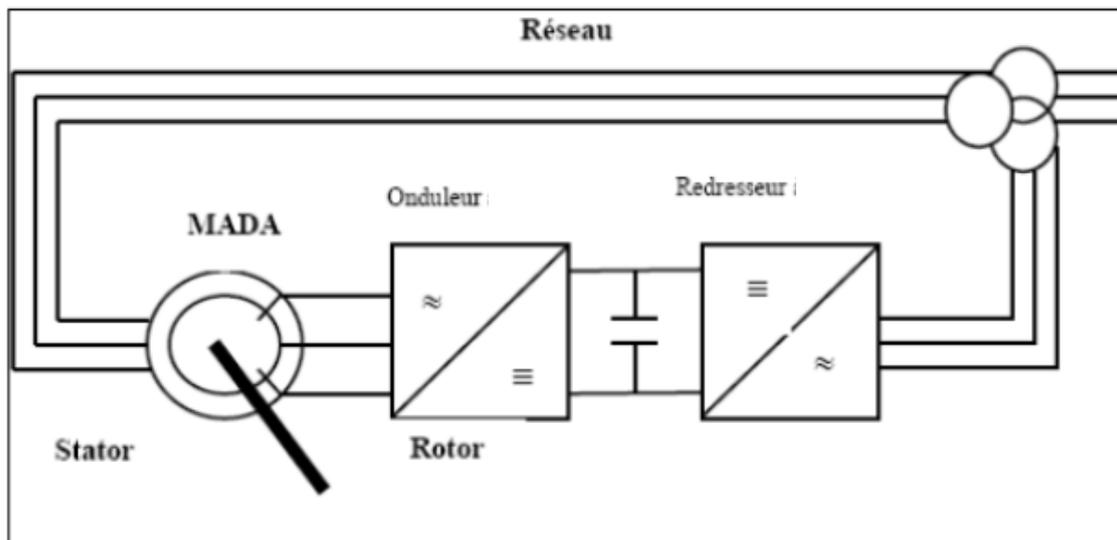


Figure I.9 : Schéma de l'alimentation de la GADA

La figure (I.9) représente un schéma de principe de cette catégorie de GADA [11]. Cette classe est dite GADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur.

I.7.1. Principes fondamentaux :

En admettant que l'enroulement statorique de la génératrice à double alimentation est connecté directement au réseau, que l'enroulement rotorique triphasé est relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel à travers un système balais- bagues et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par :

$$\omega = \omega_s \pm \omega_r ; \omega = p \cdot \Omega \quad (\text{I.6})$$

Le signe positif (+) dans l'équation (I.6) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor

($\omega < \omega_s$), (en régime hypo-synchrone). Le signe négatif (-) signifie que les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés et que la génératrice fonctionne en régime hyper- synchrone [12]

I.7.2. Régime et mode de fonctionnement de GADA :

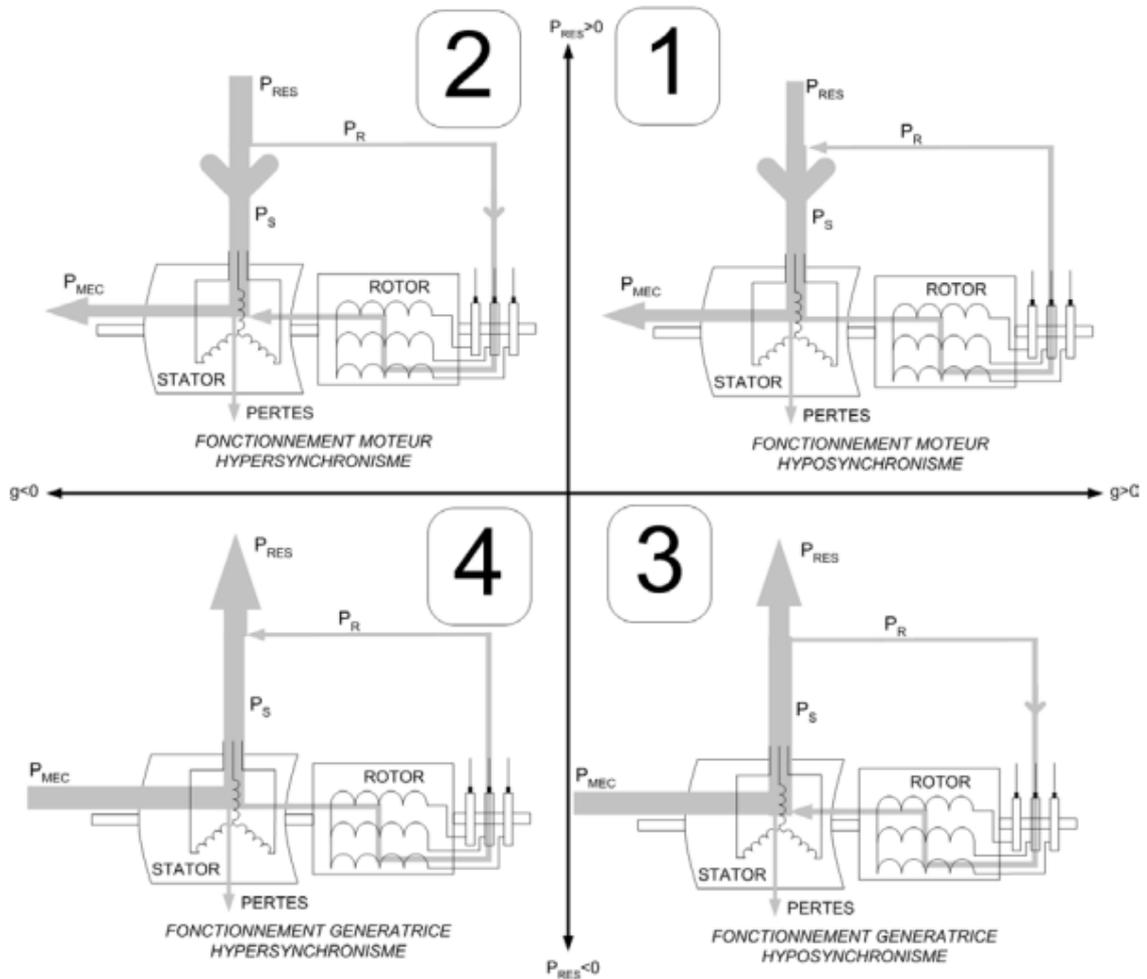


Figure I.10 : Quadrants de fonctionnement de la GADA.[3]

La figure (I.10) 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 statique. P_s représente la puissance statorique, P_r la puissance rotorique, et P_m La puissance mécanique.

1) Fonctionnement hypo-synchrone (Cas moteur) $g > 0$:

Dans ce cas, la machine fonctionne comme moteur, qui tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme. La puissance P_s est fournie par le réseau au stator, et la puissance P_r transite par le rotor puis réinjectée au le réseau.

2) Fonctionnement hyper-synchrone (Cas moteur) $g < 0$:

Dans ce cas, la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor, on a donc un fonctionnement à vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme.

3) Fonctionnement hypo-synchrone (Cas Génératrice) $g > 0$:

En fonctionnement hypo-synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique P_s et envoi une puissance rotorique vers la machine.

4) Fonctionnement hyper-synchrone (Cas Génératrice) $g < 0$:

En fonctionnement hyper-synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

Pour notre étude on s'intéresse au troisième fonctionnement (génératrice en fonctionnement hypo-synchrone).

I.7.3. Avantages et inconvénients de la GADA :

I.7.3.1. Avantages de la GADA :

Les nombreux bénéfices procurés par la GADA incluent notamment [13] [14] :

- L'accessibilité au rotor et au stator permet une mesure précise des courants. Cette caractéristique assure une flexibilité et une exactitude accrues dans la gestion du flux magnétique et du couple électromagnétique.
- Les possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation, ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application ;
- Une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grandes puissances ;
- Un fonctionnement possible à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;
- Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la génératrice et dans le cas où cette dernière fonctionne dans une gamme de vitesse proche de celle de synchronisme, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs seront faibles. Par conséquent, le rendement obtenu du système génératrice -convertisseur sera élevé.

I.7.3.2. Inconvénients de la GADA :

On remarque que :

- La GADA est plus volumineuse que la machine à cage d'écureuil à cause du système balais-bagues ;
- Elle nécessite une maintenance périodique.

I.7.4. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA :

Il est nécessaire de modéliser la GADA avant de procéder à son contrôle. Cette modélisation est essentielle pour saisir les principes physiques qui régissent son fonctionnement et pour développer un modèle d'intervention qui permettra de calculer les correcteurs nécessaires à son contrôle, ainsi que de simuler son comportement en régimes dynamique et permanent. [15].

La représentation schématique d'une génératrice triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure (I.10)

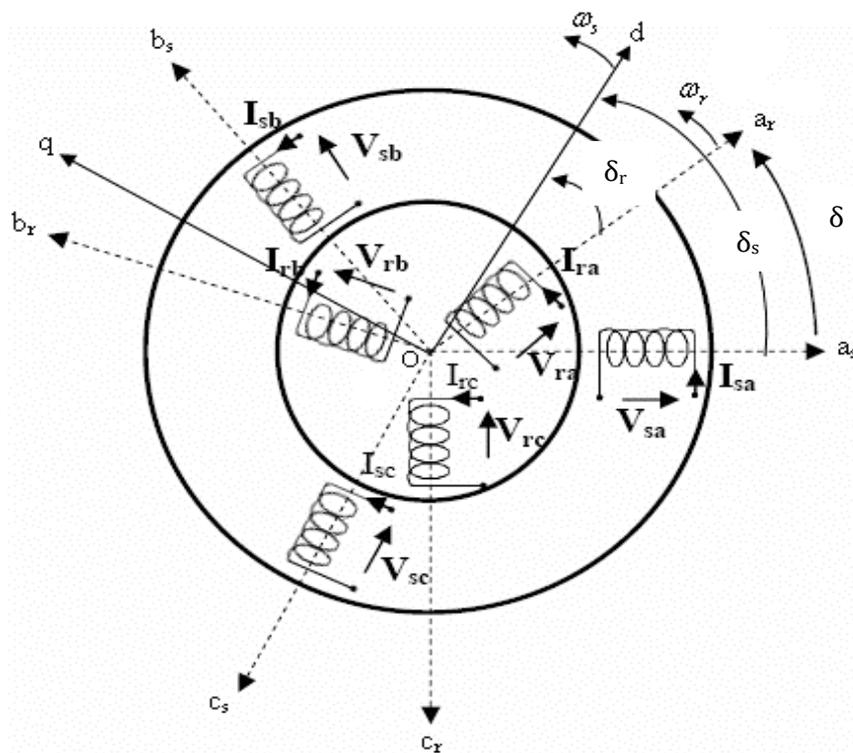


Figure I.11 : Représentation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Telle que :

a_s, b_s, c_s : correspondent aux trois phases du stator.

a_r, b_r, c_r : correspondent aux trois phases du rotor.

I.7.4.1. Hypothèses simplificatrices : [16]

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les pertes joules et les pertes fer sont négligeables.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.
- La composante homopolaire du courant est nulle.
- La machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.

I.7.4.2. Modèle mathématique de la GADA dans le repère triphasé- triphasé :

Les phases statoriques sont alimentées par un réseau de tensions sinusoïdales équilibrées à amplitude et fréquence constantes.

➤ **Équations électriques :**

En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la machine asynchrone. On représente les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{I.7})$$

$V_{s,a,b,c}$, $V_{r,a,b,c}$: la tension appliquée au trois phases statoriques et rotoriques.

$I_{s,a,b,c}$, $I_{r,a,b,c}$: le courant des trois phases statoriques et rotoriques.

$\varphi_{s,a,b,c}$, $\varphi_{r,a,b,c}$: le flux statorique et rotorique.

R_s , R_r : la résistance d'une phase statorique et rotorique.

➤ **Equation magnétique :**

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

La matrice des inductances mutuelles s'écrit :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \delta & \cos(\delta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\delta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\delta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\delta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

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

En remplaçant l'équations (I.8), (I.9) et (I.10) dans l'équations (I.7) on obtient le système suivant

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Où

$[V_s]$ et $[V_r]$ représentent respectivement, les vecteurs tension statorique et rotorique

$[I_s]$ et $[I_r]$ représentent respectivement, les vecteurs courants statorique et rotorique

M_s et M_r sont respectivement les inductances mutuelles entre phases statoriques et entre phases rotoriques

m_{sr} est la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phases statorique et rotorique

➤ **Equation mécanique :**

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [I_r] \tag{I.12}$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \tag{I.13}$$

J : moment d'inertie de rotor.

K_f : coefficient de frottement.

I.7.4.3. Changement de repère :

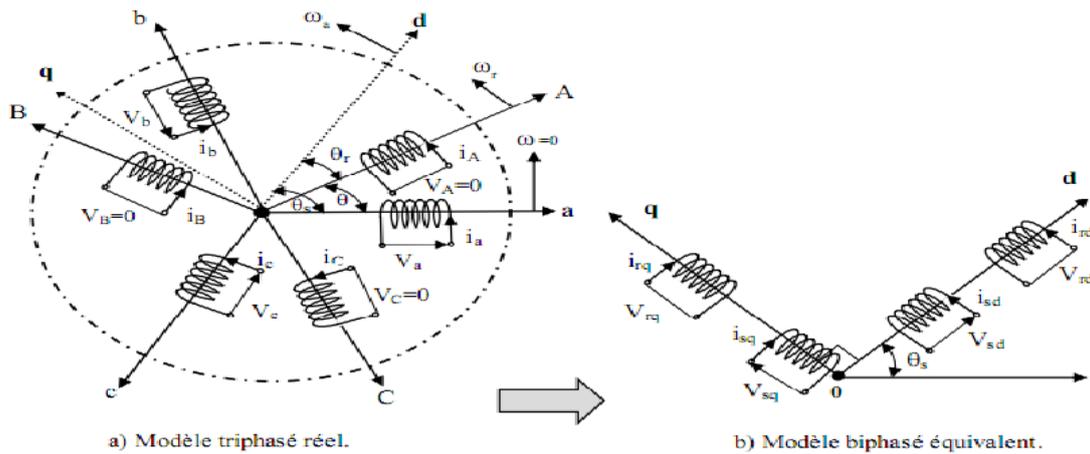


Figure I.12 : Modèle de Park de la GADA.

Dans le repère de Park (d,q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = \frac{d\theta_s}{dt}$

Pour passer du système triphasé abc au système biphasé dq il faut utiliser les transformations de Park :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_h \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \tag{I.14}$$

$$\text{Et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_h \end{bmatrix} \quad (\text{I. 15})$$

$X_a X_b X_c$: sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

$X_d X_q$: sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

X_h : est la composante homopolaire.

$[P]$: est la matrice de Park.

$[P]^{-1}$: est la matrice inverse de Park.

Les matrices de Park sont données par :

$$[P] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\vartheta) & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 16})$$

Donc la matrice inverse $[P]^{-1}$ écrit comme suite :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\vartheta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 17})$$

ϑ Est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé

I.7.4.4. Choix du référentiel [17] :

Trois systèmes d'axes de référence du plan d'axes (d, q) peuvent être choisis. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

I.7.4.4.1. Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est immobile par rapport au stator ($\omega_p = 0$) et est adopté pour l'étude du démarrage et freinage des machines à courant alternatif avec branchement de résistances. Ce référentiel est fixe par rapport au stator.

I.7.4.4.2. Référentiel lié au rotor :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc ($\omega_s = \omega = P \cdot \Omega$). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

I.7.4.4.3. Référentiel lié au champ tournant :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où ($\omega_r = \omega_s - \omega$). Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

I.7.4.5. Modèle de la GADA dans le repère biphasé :

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au stator ($\omega_p = 0$) pour la modélisation et la commande de la GADA.

- Les tensions statoriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{I. 18})$$

- Les tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - \omega \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \omega \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{I. 19})$$

ω : Pulsation mécanique du rotor.

Les flux statoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{I. 20})$$

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

Les flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

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

$M = (3/2) \cdot m_{sr}$: inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

I.8. Schéma de production :

L'étude de cette thèse concerne le système de conversion d'énergie éolienne qui repose sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui fonctionne à des vitesses variables. La configuration étudiée est illustrée dans la Figure I.13

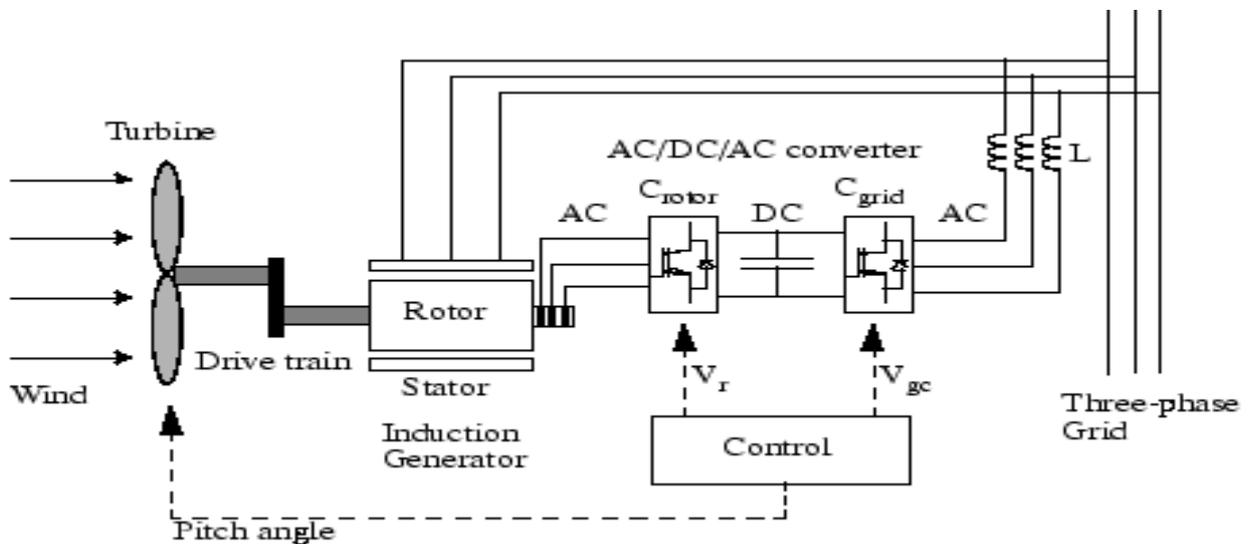


Figure I.13 : Système de conversion d'énergie éolienne à base d'une GADA.

I.8.1. Description :

Le convertisseur AC/DC/AC est divisé en deux composants : le convertisseur côté rotor (Crotor) et le convertisseur côté réseau (Cgrid). Crotor et Cgrid sont des convertisseurs alimentés en tension qui utilisent des dispositifs électroniques de puissance à commutation forcée (IGBT) pour synthétiser une tension alternative à partir d'une source de tension continue. Un condensateur connecté côté DC agit comme source de tension DC. Un inducteur de couplage L est utilisé pour connecter Cgrid au réseau. L'enroulement triphasé du rotor est relié au Crotor par des bagues collectrices et des balais et l'enroulement triphasé du stator est directement connecté au réseau. La puissance captée par l'éolienne est convertie en puissance électrique par le générateur à induction et elle est transmise au réseau par le stator et

les enroulements du rotor. Le système de commande génère la commande les signaux de commande de tension V_r et V_{gc} pour Crotor et Cgrid respectivement afin de contrôler la puissance de l'éolienne, la tension du bus CC et la puissance réactive ou la tension aux bornes du réseau.

I.8.2. Représentation du système d'alimentation de la GADA :

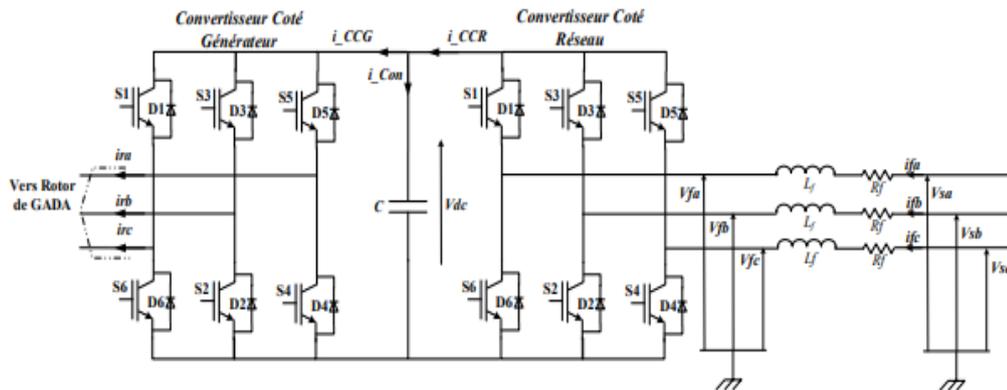


Figure I.14 : Les convertisseurs de puissance bidirectionnel AC / DC/ AC pour l'alimentation du GADA.

On utilise fréquemment des convertisseurs de puissance dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Le schéma simplifié des deux convertisseurs de source de tension triphasé à deux niveaux est présenté dans la figure I.14. Chaque convertisseur est constitué de six commutateurs, de S1 à S6, chacun équipé d'une diode de roue libre antiparallèle. Selon la puissance et la tension nominale du convertisseur, les commutateurs peuvent être des dispositifs IGBT. Le convertisseur a été couramment employé dans le domaine industriel pour diverses applications [18].

Les deux convertisseurs statiques à deux niveaux de la chaîne de conversion d'électronique de puissance sont connectés sur un bus continu commun, l'un à la génératrice (CCG) et l'autre à la source (CCR). Le CCR est connecté au réseau électrique via le filtre $R_f L_f$ entre le rotor de la génératrice et le réseau, tandis que le stator est directement connecté à la source triphasée [2].

Le convertisseur est souvent désigné comme un onduleur lorsque celui-ci convertit une tension continue fixe en une tension alternative triphasée à amplitude et fréquence variables pour une charge alternative. Le convertisseur est généralement appelé redresseur actif lorsque le convertisseur convertit une tension alternative d'un réseau électrique d'amplitude et de

fréquence fixes en une tension à courant continu réglable. Que ce soit dans le cas d'un onduleur ou d'un redresseur, le flux de puissance dans le circuit du convertisseur est bidirectionnel : le courant peut être transféré de son côté courant continu (CC) vers le côté courant alternatif (CA), et inversement [19].

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques bases sur la production éolienne.

Dans ce contexte, on a rappelé les principes de fonctionnement d'une éolienne ainsi que ses composants, les différents types de ce système. La seconde partie du chapitre présente la génératrice asynchrone à double alimentation. On a cité principe de fonctionnement, régime et mode de fonctionnement, les avantages et les inconvénients. Enfin, nous décrivons les schémas de production et représentons le système d'alimentation de GADA.

Pour bien exploiter la génératrice à double alimentation dans l'étude d'un système éolienne, sa modélisation et sa commande sont indispensables. Le prochain chapitre est consacré à la technique directe de puissance pour une GADA.

Chapitre II :

La commande directe de puissance pour une GADA

II. Introduction :

La grande similitude entre une machine électrique, alimentée par un onduleur de tension triphasé, et le redresseur à MLI triphasé connecté au réseau, a permis l'émergence d'une technique de contrôle analogue au DTC, appelée contrôle direct de puissance (DPC : Direct Power Control en anglais).

La commande directe de puissance (DPC) a été proposée par Noguchi en 1969, il est basé initialement sur la commande directe de couple (DTC), destinée au contrôle des moteurs électriques. Dans le cas de la DPC, les puissances active (P) et réactive (Q) remplacent le couple électromagnétique et l'amplitude du flux statorique de la DTC.

La DPC est devenue une stratégie de contrôle usuelle pour les convertisseurs connectés au réseau du fait qu'elle offre une très bonne dynamique sur le système.

Dans ce chapitre, on va présenter une étude sur la commande DPC de la MADA, dont le fonctionnement est en mode génératrice (génératrice asynchrone à double alimentation, GADA) et où les phases statoriques sont connectées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude constante et les phases rotoriques sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variable.

II.1. Principe de la commande direct de puissance :

Cette stratégie de contrôle est définie comme une technique de contrôle direct, car elle choisit le vecteur de tension appropriée du convertisseur sans aucune technique de modulation.

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande dans une table de commutation (000, 100, 110, 010, 011, 001, 101, 111 ; Chaque état correspond à une configuration donnée des bras de l'onduleur).

La commande directe de puissance permet la variation de la puissance active et réactive générée par la machine par application d'un vecteur tension au niveau de rotor, on va considérer que la machine alimentée par un réseau de fréquence et de tension constante donc le flux statorique et le flux rotorique sont constants donc la puissance va dépendre uniquement de l'angle entre le flux statorique et le rotor.

La figure (II.1) montre la configuration globale de la commande directe de puissance pour une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

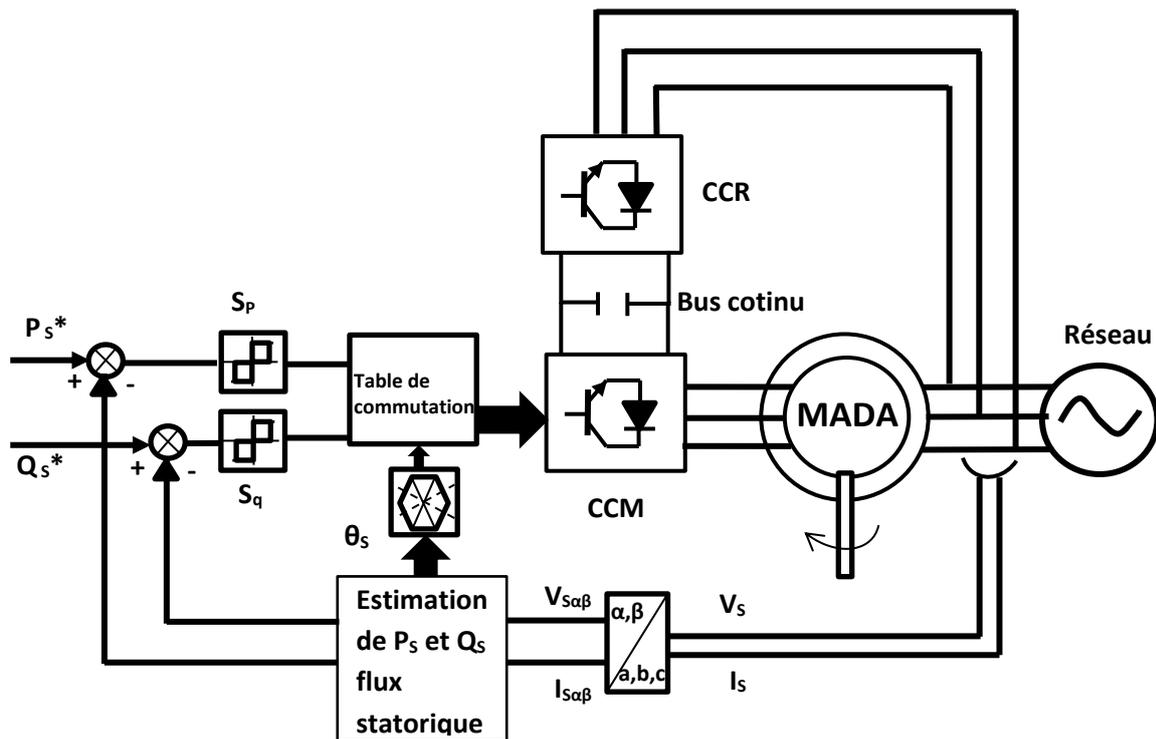


Figure II.1: Schéma bloc de contrôle de GADA par DPC classique.

II.2. Algorithme de la DPC :

La DPC repose sur l’algorithme suivante :

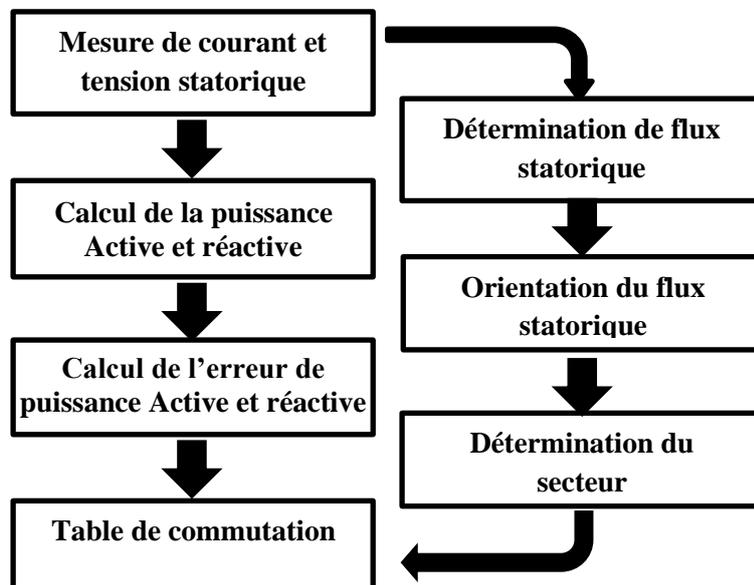


Figure II.2: Algorithme de la DPC.

II.3. Onduleur de tension à deux niveaux :

II.3.1. Modilisation de l'onduleur :

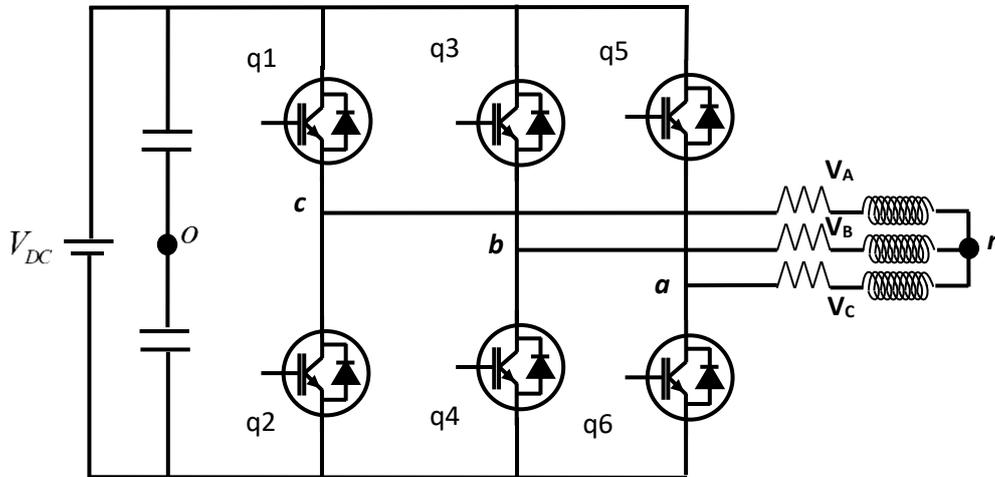


Figure II.3 : Onduleur de tension à deux niveaux.

Il est composé de trois bras trois phases, chacun composé de deux interrupteurs commandés d'une façon complémentaire.

La tension composée entre les phases d'onduleur.

A partir le point au milieu de source o :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases}$$

A partir de neutre n :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases}$$

La tension entre la charge et le neutre : système de tension équilibré :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

Donc :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} - V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} - V_{on} \end{cases}$$

On déduit que :

$$V_{on} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

Après le remplacement on trouve que :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

On peut écrire le système (II.1) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix}$$

II.3.2. Vecteur de tension généré par l'onduleur :

Les tensions de sortie de l'onduleur (tensions statoriques de la machine) sont exprimées en fonction de la tension continue de son entrée V_{dc} et des fonctions de commutation de ces interrupteurs q_1 , q_2 et q_3 :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de tension correspondant à ces tensions est exprimé par :

$$\bar{V}_s = \frac{2}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) \quad (\text{II. 2})$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = \frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{II. 3})$$

On remplace (II. 3) dans (II. 2) :

$$\bar{V}_s = \frac{2}{3} \left(V_A + \left(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) V_B + \left(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) V_C \right)$$

On applique la transformation triphasé biphasé lié au repère stationnaire $\alpha\beta$.

$$\bar{V}_s = V_{\alpha s} + V_{\beta s}$$

II.3.3. Etat de l'onduleur :

Le tableau résume la correspondance entre les états de l'onduleur, les états des interrupteurs, les tensions des phases et les positions du vecteur de tension de sortie \bar{V}_s .

S _a	S _b	S _c	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}	V _{sα}	V _{sβ}	Vecteur \bar{V}_i	Nom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	V ₀
0	0	1	-E/3	-E/3	2E/3	$-\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}E e^{j\frac{4\pi}{3}}$	V ₅
0	1	0	-E/3	2E/3	-E/3	$-\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}E e^{j\frac{2\pi}{3}}$	V ₃
0	1	1	-2E/3	E/3	E/3	$-\sqrt{\frac{2}{3}}E$	0	$-\sqrt{\frac{2}{3}}E$	V ₄
1	0	0	2E/3	-E/3	-E/3	$\sqrt{\frac{2}{3}}E$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}E$	V ₁
1	0	1	E/3	-2E/3	E/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}E e^{j\frac{5\pi}{3}}$	V ₆
1	1	0	E/3	E/3	-2E/3	$\sqrt{\frac{1}{6}}E$	$\sqrt{\frac{1}{2}}E$	$\sqrt{\frac{2}{3}}E e^{j\frac{\pi}{3}}$	V ₂
1	1	1	0	0	0	0	0	0	V ₇

Tableau II.1 : Etablissement des expressions des tensions.

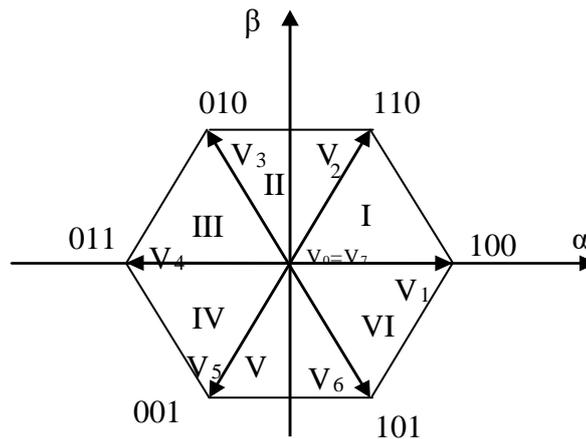


Figure II.4 : secteurs et vecteurs des tensions du l'onduleur.

Le tableau II.1 montre toutes les possibilités de tension $\alpha\beta$. En représentant ces $\alpha\beta$ tensions dans le diagramme vectoriel, la Figure II.4 montre les huit vecteurs. Deux des vecteurs de tension, V₀ et V₇, sont appelées vecteurs zéro, car elles produisent une tension nulle à chaque

sortie de phase. D'autre part, le reste des tensions apparaît déphasé de 60 dans le diagramme vectoriel.

II.4. Mesure de tension et courant :

On peut calculer les tensions et les courants statorique dans le plan stationnaire α, β à partir des trois tensions et courants des phases utilisant la transformation de Clarke.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

II.5. Estimation de la puissance active et réactive :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive ;

- Par la mesure des courants et des tensions,
- Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants,
- Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

Pour estimer les deux grandeurs P_s et Q_s , on met la commande directe de puissance (DPC) au niveau du rotor de la MADA, sachant que le modèle de la MADA est celui qui est simplifié à partir de la transformé du Park. Nous pouvons trouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel (α_r, β_r) . Ce référentiel tourne avec l'angle de rotation constant.

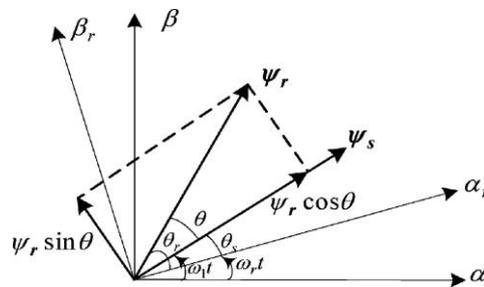


Figure II.5: Relation entre les vecteurs de flux du stator et du rotor dans les référentiels stationnaires et rotors

Dans le référentiel du rotor, l'expression vectorielle de tension statorique est donnée par :

$$V_s^r = R_s I_s^r + \frac{d\phi_s^r}{dt} + j \omega_r \phi_s^r \quad (\text{II. 4})$$

Les vecteurs de flux du rotor et stator peuvent être exprimés sous la forme :

$$\begin{aligned} \phi_s^r &= L_s I_s^r + L_m I_r^r \\ \phi_r^r &= L_r I_r^r + L_m I_s^r \end{aligned} \quad (\text{II. 5})$$

D'après (II.5), le courant du stator peut être calculé comme suit :

$$I_s^r = \frac{L_r \phi_s^r - L_m \phi_r^r}{L_s L_r - L_m^2} = \frac{\phi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \phi_r^r}{\sigma L_s L_r} \quad (\text{II. 6})$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: c'est le coefficient de dispersion

D'après l'équation (II.4) la puissance absorbée active du stator peut être exprimée comme suit:

$$P_s = \frac{3}{2} V_s^r I_s^r = \frac{3}{2} \left(R_s I_s^r + \frac{d\phi_s^r}{dt} + j \omega_1 \phi_s^r \right) I_s^r \quad (\text{II. 7})$$

Négligent les pertes de cuivre du stator :

$$P_s = \frac{3}{2} \left(\frac{d\phi_s^r}{dt} + j \omega_1 \phi_s^r \right) I_s^r \quad (\text{II. 8})$$

La puissance réactive du stator est donnée par

$$Q_s = -\frac{3}{2} V_s^r \times I_s^r = -\frac{3}{2} \left(\frac{d\phi_s^r}{dt} + j \omega_1 \phi_s^r \right) \times I_s^r \quad (\text{II. 9})$$

Le flux du stator et du rotor dans le référentiel stationnaire α_r, β_r ,peut s'exprimer sous la forme :

$$\phi_s^r = |\phi_s^r| \cdot e^{j\theta_s} \quad (\text{II.10})$$

$$\phi_r^r = |\phi_r^r| \cdot e^{j\theta_r} \quad (\text{II.11})$$

Où θ_r, θ_s sont les angles des flux du rotor et du stator dans le référentiel α_r, β_r .

Tandis que la transformation du flux du stator dans le référentiel du rotor est donnée par :

$$\phi_s^r = \phi_s^s \cdot e^{-j\omega_r t}$$

De la figure (II.7) on peut aussi trouve :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_1 - \omega_r \quad (\text{II.12})$$

Dans le référentiel stationnaire, le flux du stator peut être exprimé sous la forme

$$\phi_s^s = \int (V_s^s - R_s I_s^s) dt \quad (\text{II.13})$$

Si on néglige la chute de tension due à la résistance du stator et en supposant que le réseau alternatif connecté au stator est bien équilibré et que la vitesse du rotor ne change pas au cours de la période d'échantillonnage T_s , ce qui est généralement vrai en raison de l'inertie relativement grande de l'éolienne, on déduit les relations suivantes :

$$|\phi_s^s| = \left| \int V_s^s dt \right| = \text{Constant}$$

$$\frac{d|\phi_s^s|}{dt} = 0 \quad (\text{II.14})$$

A partir de (II.10) et prise en compte (II.12) et (II.14)

$$\frac{d|\phi_s^r|}{dt} = |\phi_s^r| j \dot{\theta}_s e^{j\theta_s} = j(\omega_1 - \omega_r) \phi_s^r \quad (\text{II.15})$$

Ensuite, en remplaçant (II.8), (II.9) par (II.4) et (II.15), on obtient les formulations suivantes :

$$P_s = \frac{3}{2} (j(\omega_1 - \omega_r) |\phi_s^r| + j\omega_1 \phi_s^r) \left(\frac{\phi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \phi_r^r}{\sigma L_s L_r} \right) = \frac{3}{2} (j\omega_1 |\phi_s^r| e^{j\theta_s}) \left(\frac{\phi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \phi_r^r}{\sigma L_s L_r} \right)$$

Ensuite, on peut déduire que la puissance active est calculée en termes de flux du stator et du rotor et que l'angle de phase entre les deux vecteurs θ comme suit :

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\phi_s^r| |\phi_r^r| \sin(\theta) \quad (\text{II.16})$$

De la même manière, la puissance réactive peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned} Q_s &= -\frac{3}{2} (j(\omega_1 - \omega_r) |\phi_s^r| + j\omega_1 \phi_s^r) \times \left(\frac{\phi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \phi_r^r}{\sigma L_s L_r} \right) \\ &= \frac{3}{2} (j\omega_s |\phi_s^r| e^{j\theta_s}) \times \left(\frac{\phi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \phi_r^r}{\sigma L_s L_r} \right) \end{aligned}$$

Alors ;

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s} |\phi_s^r| \left(\frac{L_m}{L_r} |\phi_r^r| \cos(\theta) - |\phi_s^r| \right) \quad (\text{II. 17})$$

La dérivation de (II.14) et (II.15) donne les équations suivantes

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\phi_s^r| \frac{d(|\phi_r^r| \sin \theta)}{dt} \quad (\text{II. 18})$$

$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\phi_s^r| \frac{d(|\phi_r^r| \cos \theta)}{dt} \quad (\text{II. 19})$$

Ainsi, à partir de (II.18) et (II.19), on peut déduire que les puissances active et réactive du GADA peuvent être contrôlées en contrôlant l'angle de phase θ entre les deux vecteurs de flux et leurs amplitudes.

La Figure II.6 montre deux situations de changement de puissance statorique lorsque deux tensions différentes sont appliquées.

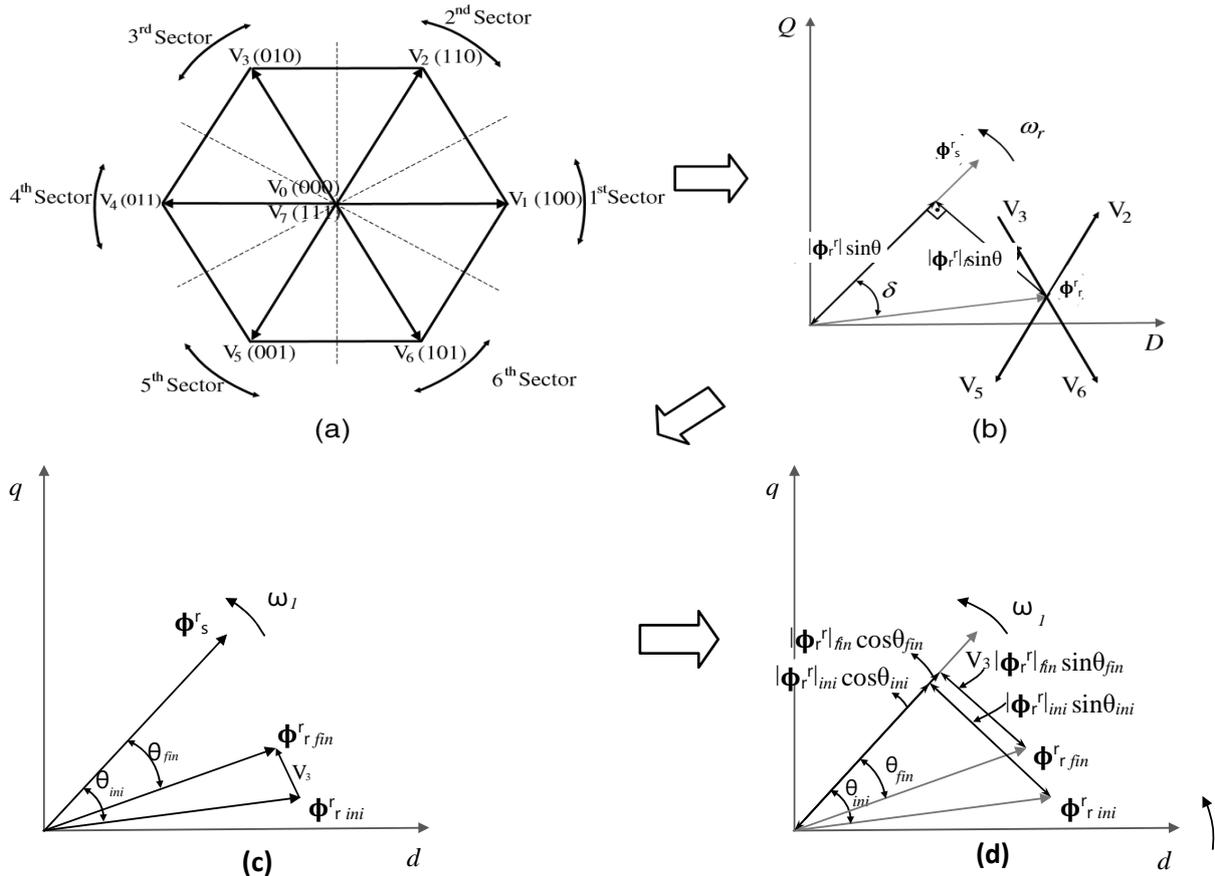


Figure II.6 : Evolution du vecteur flux rotorique en fonction du vecteur de tension appliquée.

Si le vecteur de tension V_3 est appliqué pendant un intervalle de temps h , la Figure II.6c montre le mouvement du vecteur de flux du rotor de sa position initiale à sa position finale. On considère que pendant l'intervalle de temps h la position du vecteur de flux du stator n'est pas modifiée. Par conséquent, la Figure II.6d illustre graphiquement les variations du terme $|\phi_r^r| \sin(\theta)$ et des variations de terme $|\phi_r^r| \cos(\theta)$ dues à l'injection du vecteur de tension V_3 . Notez que $|\phi_r^r| \sin(\theta)$ est diminué tandis que $|\phi_r^r| \cos(\theta)$ est légèrement augmenté, produisant selon les équations (II.16) et (II.17), une diminution de P_s et une diminution de Q_s également :

$$V_3 = \begin{cases} |\phi_r^r| \cos(\theta) \uparrow \Rightarrow Q_s \downarrow \\ |\phi_r^r| \sin(\theta) \downarrow \Rightarrow P_s \uparrow \end{cases}$$

ϕ_s^r Région N		I	II	III	IV	V	VI
V_1 (001)	P_s	↑	↓↑	↓	↓	↑↓	↑
	Q_s	↓	↓	↓	↑	↑	↑
V_2 (001)	P_s	↓	↓	↑↓	↑	↑	↓↑
	Q_s	↓	↑	↓	↑	↓	↓
V_3 (001)	P_s	↓↑	↓	↑	↑↓	↑	↑
	Q_s	↓	↓	↑	↑	↑	↓
V_4 (001)	P_s	↑↓	↑	↑	↓↑	↓	↓
	Q_s	↑	↑	↓	↓	↓	↑
V_5 (001)	P_s	↑	↑	↓↑	↓	↓	↑↓
	Q_s	↑	↓	↓	↓	↑	↑
V_6 (001)	P_s	↓	↑↓	↑	↑	↓↑	↓
	Q_s	↑	↑	↑	↓	↓	↓

Tableau II.2 : L'effet des vecteurs de tension sur la puissance réactive active.

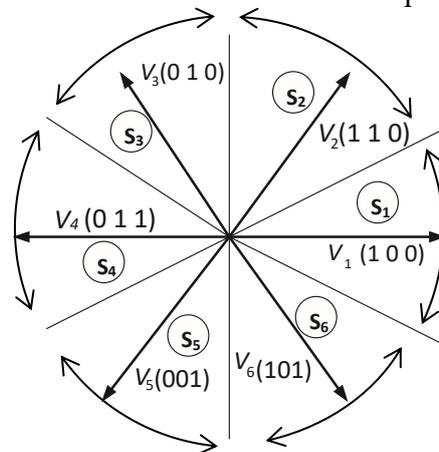


Figure II.7 : Représentation des vecteurs tension et des secteurs.

II.6. Estimation de flux statorique :

Afin de calculer le vecteur de liaison de flux du stator dans le référentiel du rotor, on estime d'abord sa valeur dans le référentiel stationnaire. Il est ensuite transformé en châssis α_r, β_r du rotor à l'aide de l'information de position du rotor qui, dans la pratique, est normalement obtenue par l'intermédiaire d'un codeur d'arbre. Dans le référentiel stationnaire, la liaison de flux du stator est estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$\phi_s^s = \int (V_s^s - R_s I_s^s) dt$$

Étant donné que la tension du stator est relativement exempte d'harmoniques et que sa fréquence est fixe, l'équation ci-dessus peut fournir une estimation précise du flux du stator.

Dans le plan (α, β) , les composantes du flux rotorique sont déterminées comme suit :

$$\phi_{s\alpha}^s = \int (V_{s\alpha}^s - R_s I_{s\alpha}^s) dt$$

$$\phi_{s\beta}^s = \int (V_{s\beta}^s - R_s I_{s\beta}^s) dt$$

Où l'estimation des flux nécessite la connaissance des composantes des vecteurs courants et tensions statoriques : $I_{s\alpha}, I_{s\beta}, V_{s\alpha}, V_{s\beta}$. Les composantes du vecteur courant statorique sont obtenues par l'application de la transformation de Clarke aux composantes triphasées mesurés I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} .

II.7. Orientation du flux statorique dans le repère rotorique :

L'orientation du flux statorique dans le repère rotorique nécessite seulement le calcul de l'angle θ_r par l'intégration de la vitesse, puis on multiplie les flux statorique fois la matrice de transformation pour obtenir un flux statorique orienter dans le repère rotorique.

$$\begin{bmatrix} \phi_{s\alpha}^r \\ \phi_{s\beta}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{s\alpha}^s \\ \phi_{s\beta}^s \end{bmatrix}$$

II.8. Détermination du secteur du flux :

On divise le plan (α, β) en six secteurs égaux, de largeur 60° chacun. L'angle θ définissent la position du vecteur de tension dans le plan (α, β)

$$S = \begin{cases} 1 \text{ si } -\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{6} \\ 2 \text{ si } \frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{2} \\ 3 \text{ si } \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{2\pi}{3} \\ 4 \text{ si } \frac{2\pi}{3} < \theta < \frac{5\pi}{6} \\ 5 \text{ si } -\frac{5\pi}{6} < \theta < -\frac{\pi}{2} \\ 6 \text{ si } -\frac{\pi}{2} < \theta < -\frac{\pi}{6} \end{cases}$$

II.9. Les puissances de référence :

La puissance active de référence suit deux schémas :

Selon le besoin du réseau ; Injecter la puissance demander par l'opérateur pour compenser les pertes de puissance.

Selon la recherche du point de maximum de la puissance ; Si le réseau est infini il demande de la puissance sans limites on aimera bien d'extraire le maximum de puissance pour injecter au réseau.

La puissance active de référence suit deux schémas :

Injecter de la puissance négative ; consommer la puissance réactive du réseau.

Garder le facteur de puissance unitaire ;

Injecter une puissance positive ; injecter la puissance réactive au niveau du réseau pour pouvoir compenser la consommation de la puissance réactive.

II.10. Calcul de l'erreur des puissances :

Il permet de contenir les erreurs des puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Cette méthode est basée sur deux comparateurs à hystérésis qui utilisent comme entrée le signal d'erreur entre les valeurs de références et calculées des puissances active et réactive [20]. La sortie du correcteur à hystérésis, représentée par une variable booléenne indique directement si l'amplitude de l'erreur de la puissance doit être augmentée ($dp = 1$), ($dq = 1$) ou diminuée ($dp = 0$), ($dq = 0$).[21]

L'erreur de la puissance active ΔP c'est la différence entre la valeur de la puissance active de référence P_{ref} et la valeur instantanée de la puissance active P :

$$\Delta P = P_{ref} - P$$

L'erreur de la puissance réactive Δq c'est à la différence entre la valeur de puissance réactive de référence q_{ref} et à la valeur de puissance réactive instantanée q :

$$\Delta q = q_{ref} - q$$

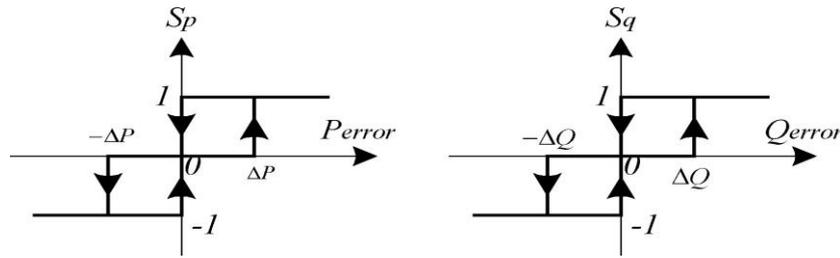


Figure II.8 : Comparateur de la puissance active et réactive.

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter la commande suivante :

$$\text{Si } \Delta q \geq h_q \rightarrow S_q = 1$$

$$\text{Si } -\Delta q \leq Q_{error} \leq \Delta q \rightarrow S_q = 0$$

$$\text{Si } \Delta q \leq -Q_{error} \rightarrow S_q = -1$$

$$\text{Si } \Delta p \geq P_{error} \rightarrow S_p = 1$$

$$\text{Si } -\Delta p \leq P_{error} \leq \Delta p \rightarrow S_p = 0$$

$$\text{Si } \Delta p \leq -P_{error} \rightarrow S_p = -1$$

II.11. Table de commutation

La table de commutation est la partie primordiale dans la commande directe de puissance

Elle sélectionne le vecteur de tension approprié de l'onduleur qui permet d'orienter les puissances active et réactive instantanées dans leur valeur désirée, il faut connaître la position

du vecteur de rotation dans les six secteurs ainsi que les sorties booléennes des comparateurs a hystérésis S_p et S_q .

En utilisant cette table de commutation ; les états de commutation optimales du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés, comme il est montré sur le tableau suivant :

		I	II	III	IV	V	VI
$S_q = 1$	$S_p = 1$	101	100	110	010	011	001
	$S_p = 0$	100	110	010	011	001	101
	$S_p = -1$	110	010	011	001	101	100
$S_q = 0$	$S_p = 1$	001	101	100	110	010	011
	$S_p = 0$	111 /000	111 /000	111 /000	111 /000	111 /000	111 /000
	$S_p = -1$	010	011	001	101	100	110
$S_q = -1$	$S_p = 1$	001	101	100	110	010	011
	$S_p = 0$	011	001	101	100	110	010
	$S_p = -1$	010	011	001	101	100	110

Tableau II.3 : table de commutation.

II.12. Modélisation du Convertisseur Coté Réseau (CCR).

Le redresseur triphasé à (MLI) est un convertisseur statique "alternatif/continu" (AC/DC). Son circuit principal est similaire à celui d'un onduleur, constitué par des interrupteurs statiques bidirectionnels.

La partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, monté en parallèle avec l'onduleur. [22]

La puissance nominale du CCR est principalement déterminée par la puissance de glissement maximale, car elle fonctionne généralement avec un facteur de puissance égal à un (unitaire) pour minimiser les pertes dans le convertisseur. [23]

L'objectif principal du contrôleur côté réseau est de maintenir une tension de liaison CC constante, indépendamment de la valeur et de la direction du flux de puissance du rotor.

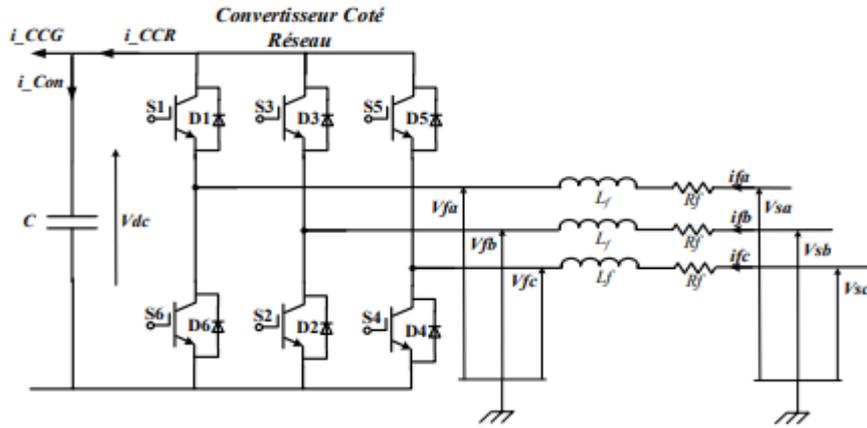


Figure II.9 : Schéma simplifié du Convertisseur Coté Réseau avec un filtre.

II.13. Modélisation du filtre :

Le CCR est relié au réseau à travers un filtre triphasé. Celui-ci a pour rôle d’atténuer les harmoniques de courant. [22]

Le courant circulant entre le CCR et le réseau est donné par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} V_{Lf}$$

Ainsi la tension à la borne du filtre s’écrit :

$$V_{Lf} = V_r - V_f - V_{Rf}$$

Où : $V_{Rf} = R_f i_f$

Avec :

V_r [V] : la tension du réseau.

L_f [H] : l’inductance du filtre.

R_f [Ω] : la résistance du filtre.

II.14. Modélisation du bus continu :

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l’intégration du courant circulant dans le condensateur : [22]

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c$$

Avec C [F] représente la capacité du bus continu. Le courant dans le condensateur est issu d’un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCG et CCR :

$$i_c = i_{rm} - i_{fm}$$

II.15. Schéma de commande du redresseur par hystérésis :

La stratégie de contrôle de la tension du bus continu est présentée sur la Figure II.5, où la référence du courant sur l'axe q est obtenue à partir de la boucle externe de la tension du bus.

La référence du courant sur l'axe d est fixée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire.

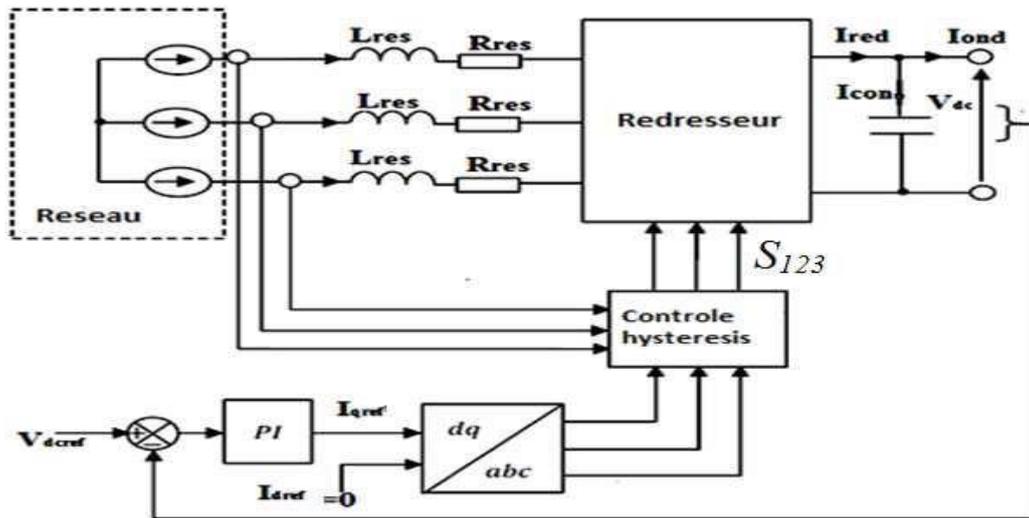


Figure II.10 : Principe de contrôle de la tension du bus continu.

II.15.1. Calcul des paramètres du PI :

Le régulateur PI est utilisé pour le contrôle de la tension du bus continu. Les gains des régulateurs de la tension du bus, où ω_n et t_{sdc} sont respectivement la dynamique de la commande et le temps de réponse du système.

$$K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot C_{dc}$$

$$K_i = \omega_n^2 \cdot C_{dc}$$

Où ;

$$\omega_n = \frac{5.8}{t_{sdc}}$$

II.16. Conclusion :

Ce chapitre, nous l'avons consacré à la commande directe de puissance (DPC), qui est basée sur le contrôle direct des puissances active et réactive instantanées. Nous avons indiqué les notions de base liée à la commande directe de puissance. Nous avons montré la relation entre la puissance active et réactive et le flux rotorique, ainsi que l'effet de vecteur tension rotorique sur le flux et nous avons présenté les comparateurs à hystérésis et la table de commutation utilisé.

Chapitre III :
Résultats de simulation

III. Résultats de Simulation

III.1. Commande directe de puissances alimenté sans redresseur :

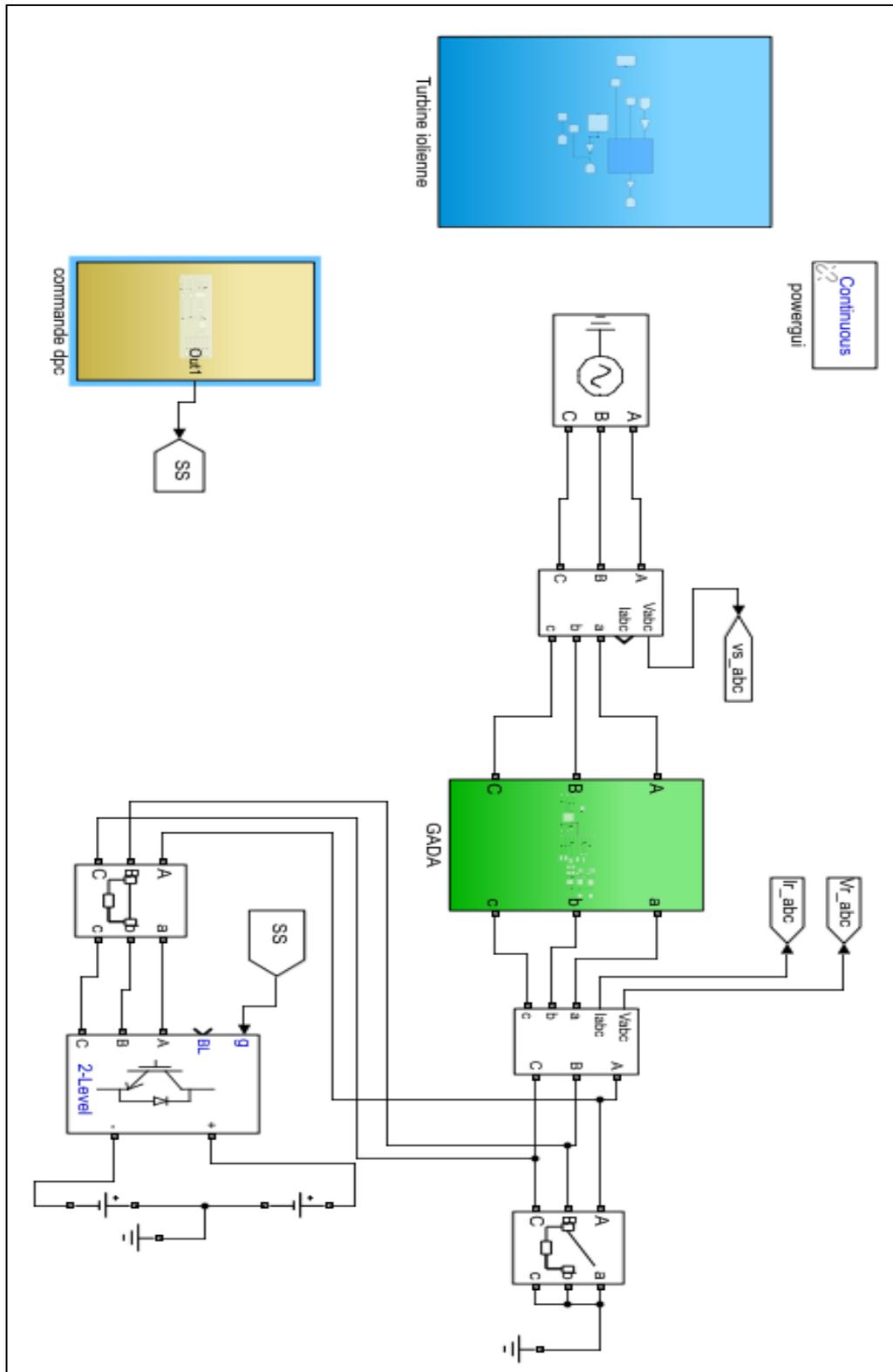


Figure III.1 : Schéma de Commande directe de puissances alimenté sans redresseur.

La simulation passe par un état de démarrage où le rotor de la génératrice est en court-circuit jusqu'au régime permanent 9s. On impose alors la commande à travers l'alimentation du rotor :

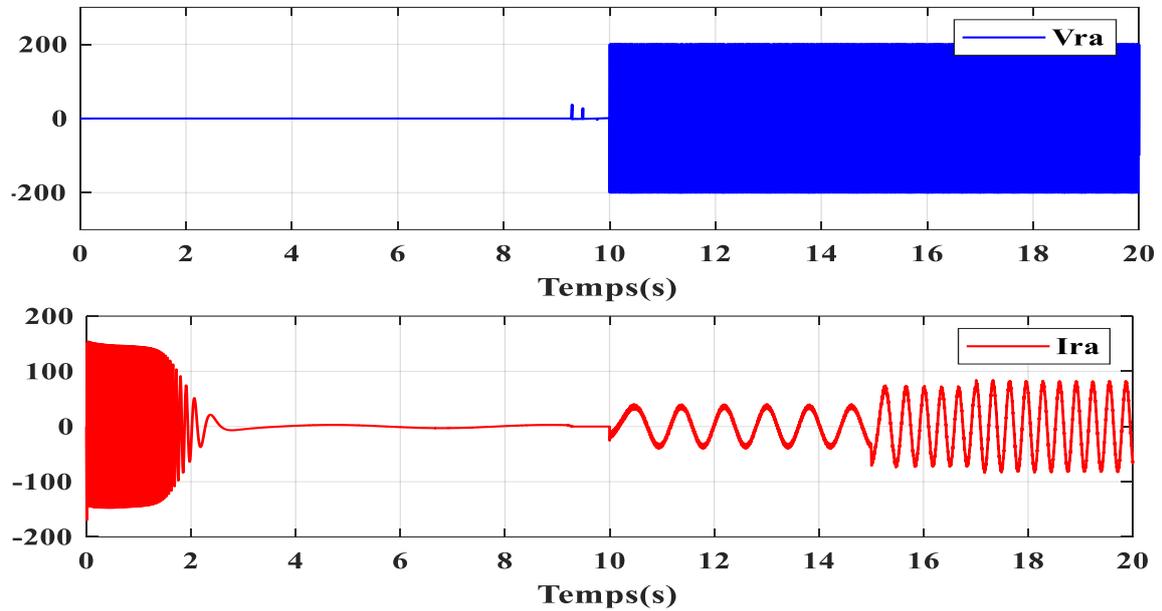
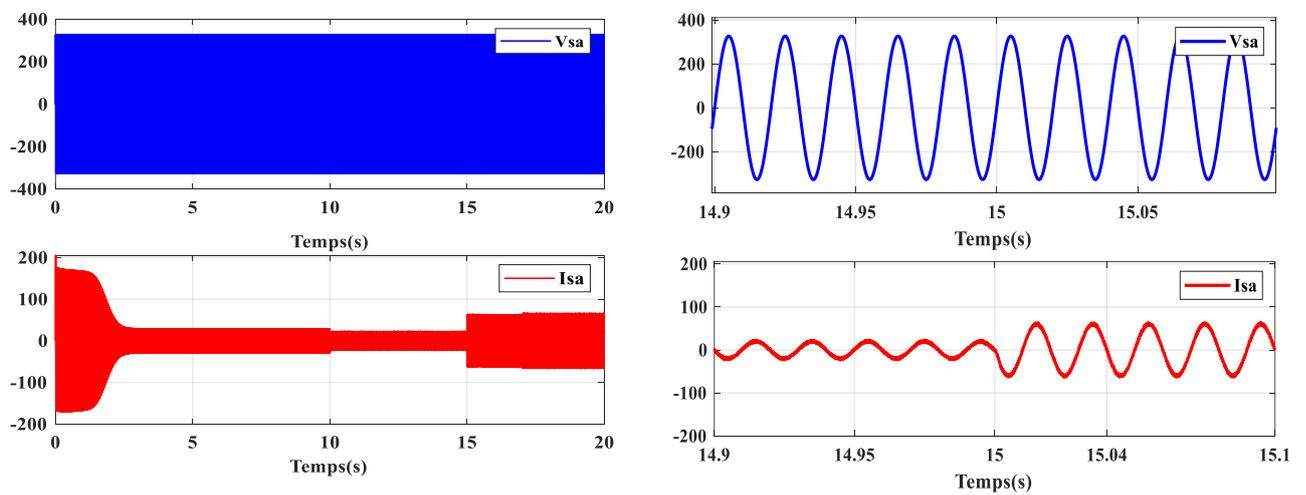


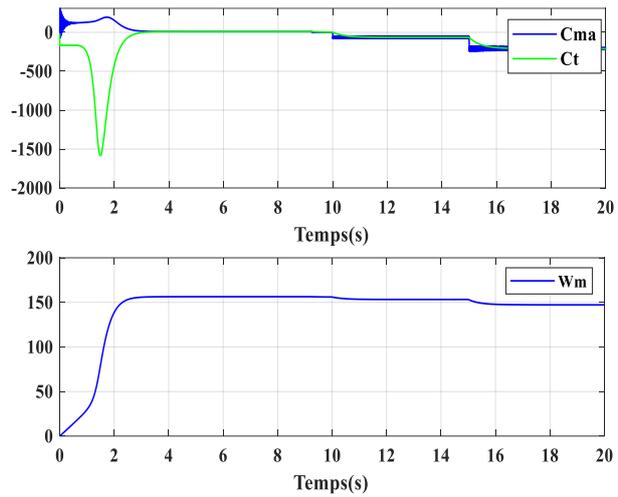
Figure III.2 : Tension et courant rotoriques.



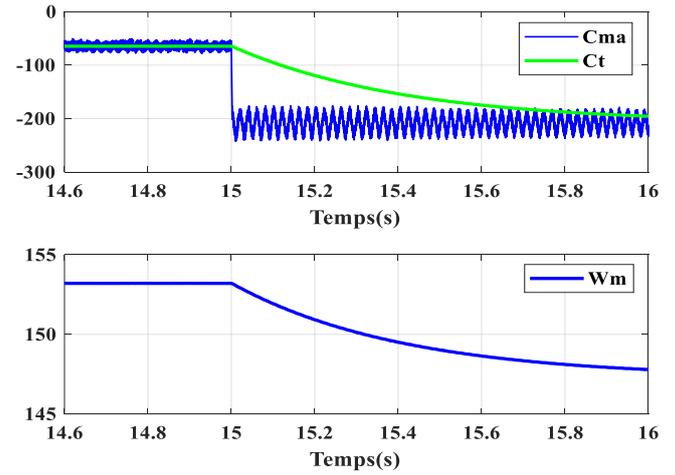
a. la tension et le courant statorique

b. zoom sur la tension et le courant statorique

Figure III.3 : Tension et courant statoriques.

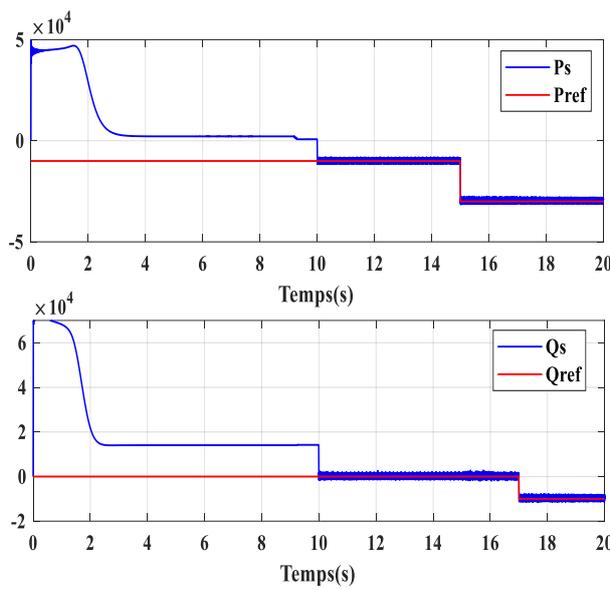


a. couple, vitesse de machine et couple turbine

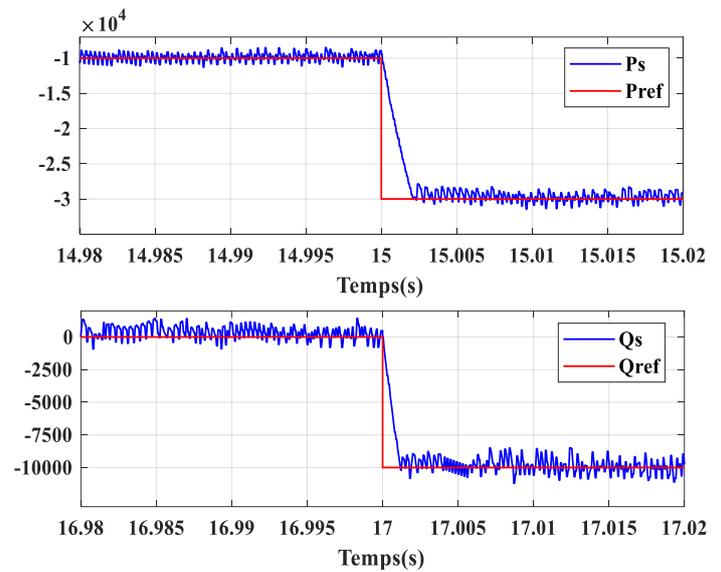


b. zoom sur couple de la turbine, la machine et la vitesse

Figure III.4 : Couple, vitesse de la machine et couple turbine



a. la puissance active et réactive



b. zoom sur la puissance active et réactive

Figure III.5 : Puissance active et réactive

Remarques et interprétations :

Les résultats de la simulation dans la figure (III.5) montrent que les échelons de la puissance active et réactive mesurer par la génératrice sont bien suivis la puissance référence à l'instant 10(s) de fonctionnement de l'onduleur, avec dépassement à l'instant 15(s) pour la puissance active et 17(s) pour la puissance réactive et des oscillations à régime permanent.

On voit que la variation de la puissance active et réactive influe directement sur l'amplitude du courant statorique (figure III.3), les courants rotoriques (figure II.2) suivent la variation de la consigne de puissance, implique directement sur le couple électromagnétique et la vitesse (figure III.4).

Concernant le courant et la tension statorique (figure III.3.b) ils sont bien en phase quand la puissance réactive est nulle, mais comme la puissance active est négative, le courant circule dans le sens opposé il est donc négatif et apparait en opposition de phase avec la tension.

III.2. Résultats de simulation du convertisseur côté réseau :

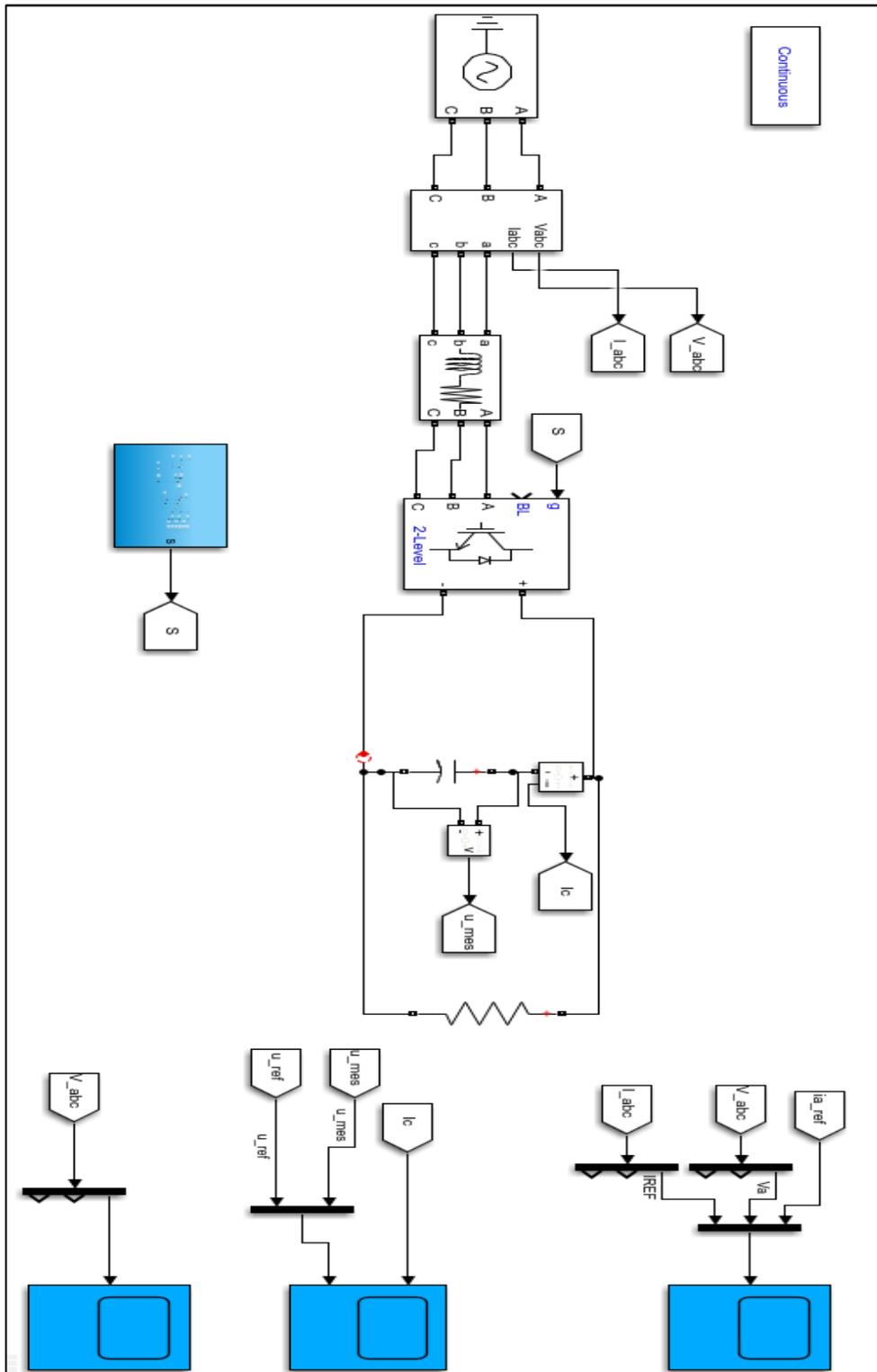
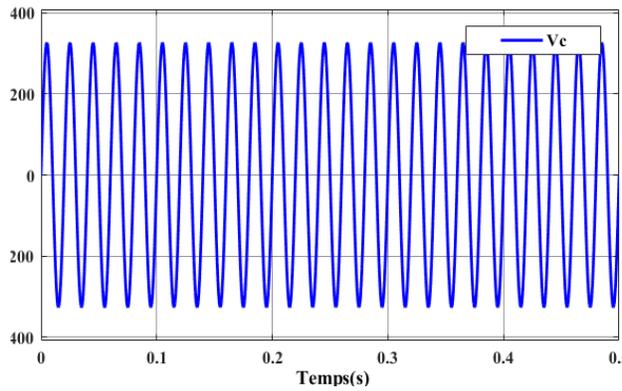
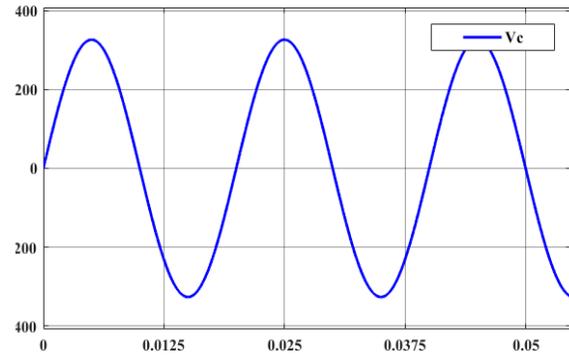


Figure III.6 : Schéma de commande de convertisseur côté réseau.

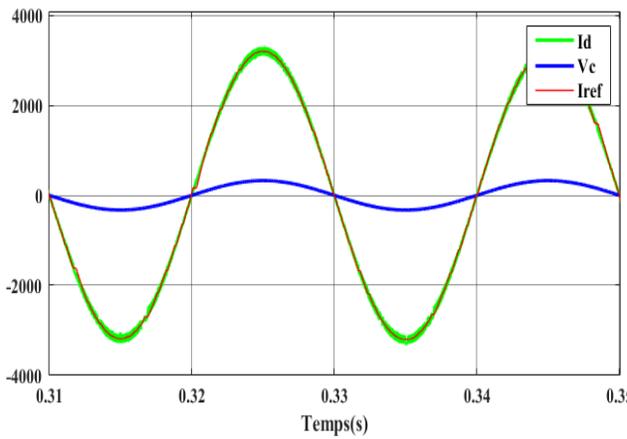


a. Tension d'entrée de redresseur

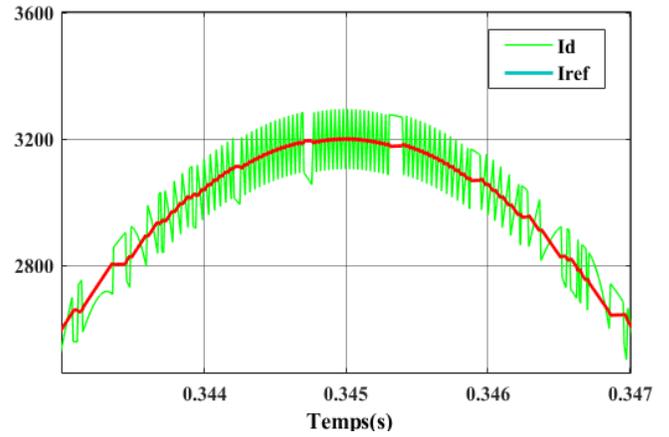


b. zoom sur la tension d'entrée de redresseur

Figure III.7 : Tension d'entrée du redresseur.

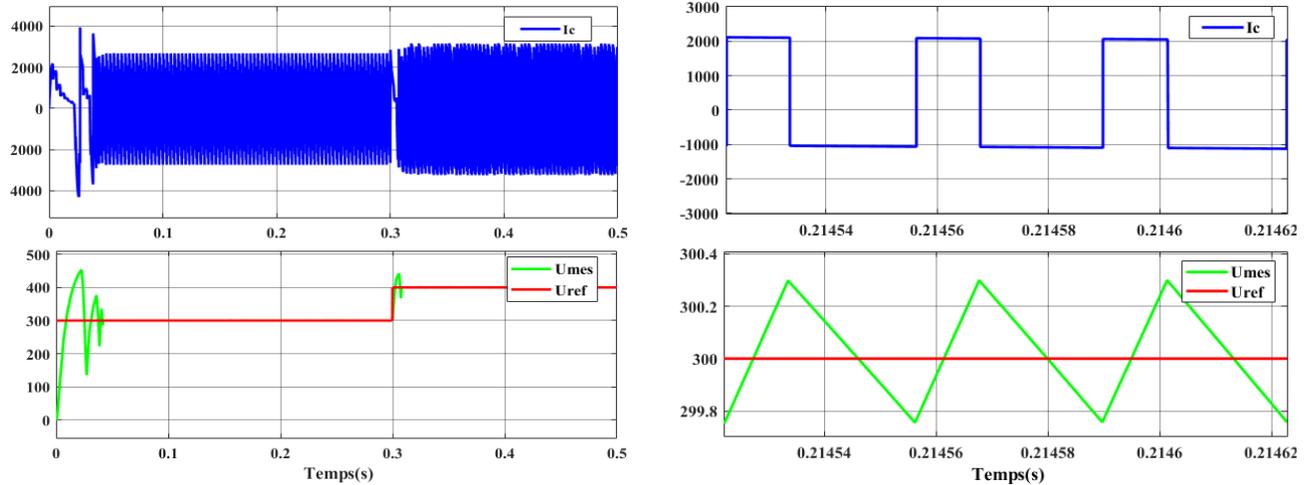


a. Tension, courant (I_d) d'entrée de redresseur et courant de référence



b. courant d'entrée de redresseur (I_d) et courant de référence

Figure III.8 : Tension, courant d'entrée du redresseur et courant de référence.



a. Tension (U_{mes}), courant de condensateur et tension de référence

b. Zoom de tension (U_{mes}), courant de condensateur et tension de référence

Figure III.9 : Tension, courant de condensateur et tension de référence.

Remarque et interprétation :

De la figure III.7 On remarque que la tension augmente.

On voit bien que le courant mesurer suit sa référence (des oscillations au tour de la référence) et le courant et la tension sont en phase (Figure III.8).

On voit que le courant de condensateur est très important entre -3200 et +3200 aux moyennes est nulle et la tension suit la référence .si on fait un zoom (figure III.8.b) on voit la variation du courant par rapport de la tension, la tension quand elle passe de V_{min} à V_{max} la valeur de courant elle va aller à 3200 donc le croisement de la tension va induire un courant de valeur important.

III.3. Schéma global DPC :

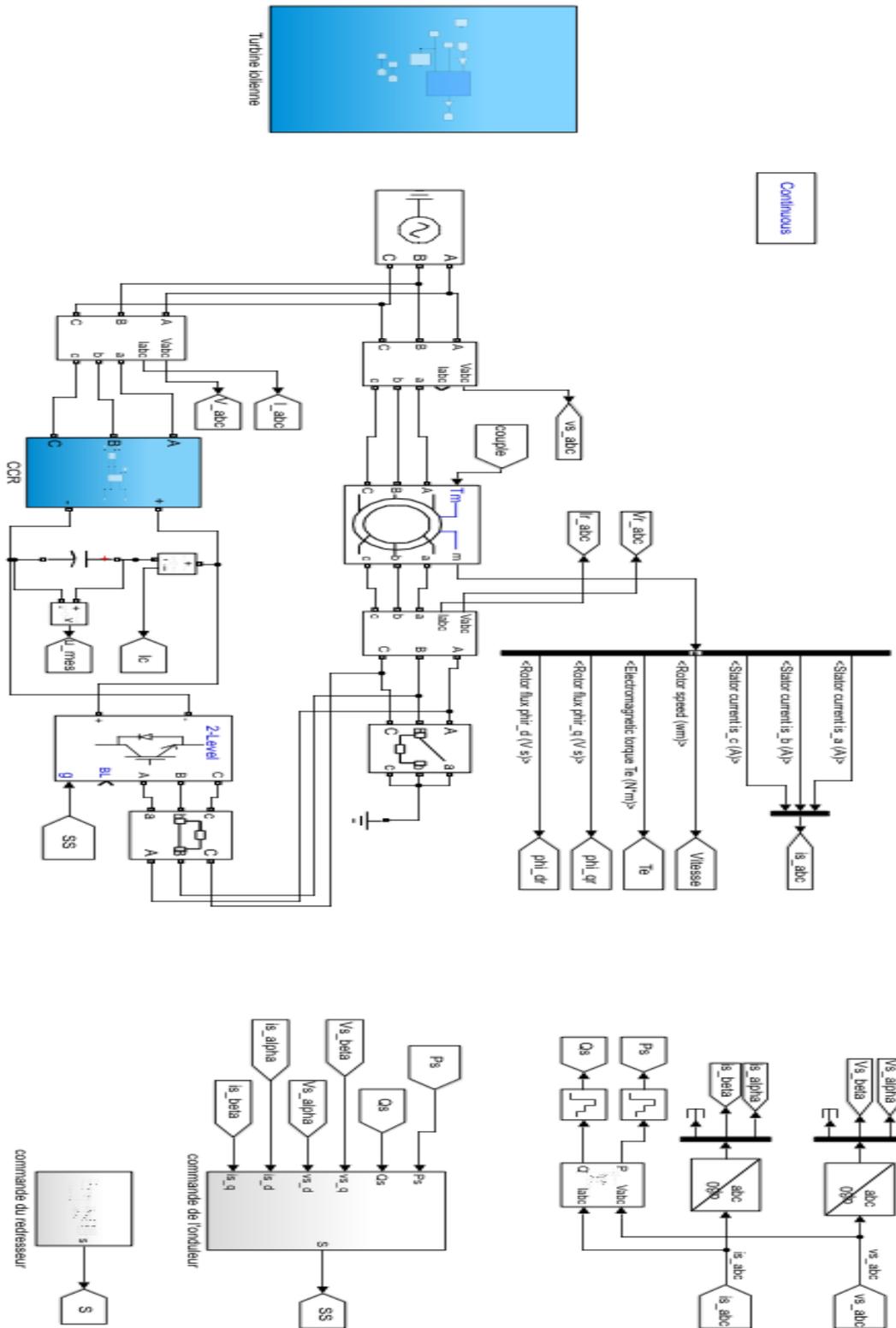
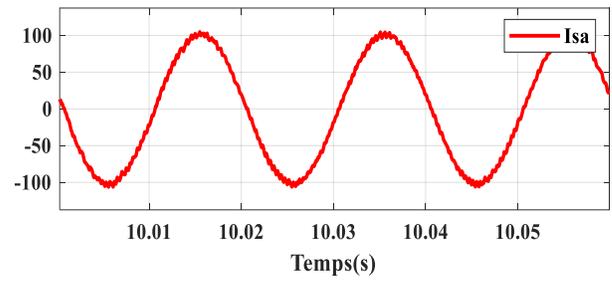
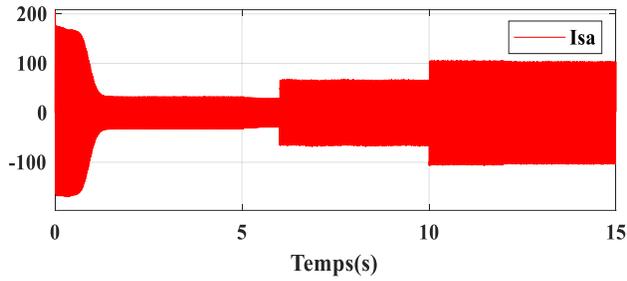
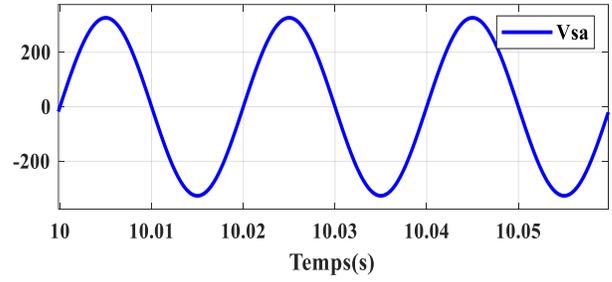
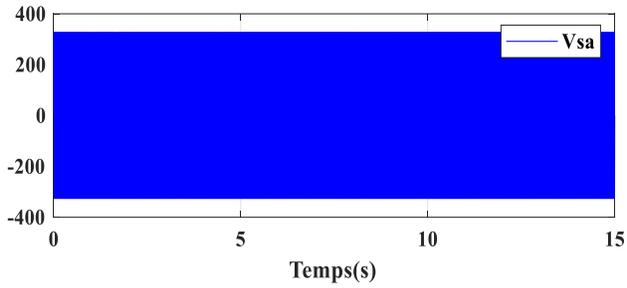


Figure III.10 : Schéma de Commande directe de puissance.



a. Tension et courant statoriques.

b. Zoom de tension et courant statoriques.

Figure III.11 : Tension et courant statoriques.

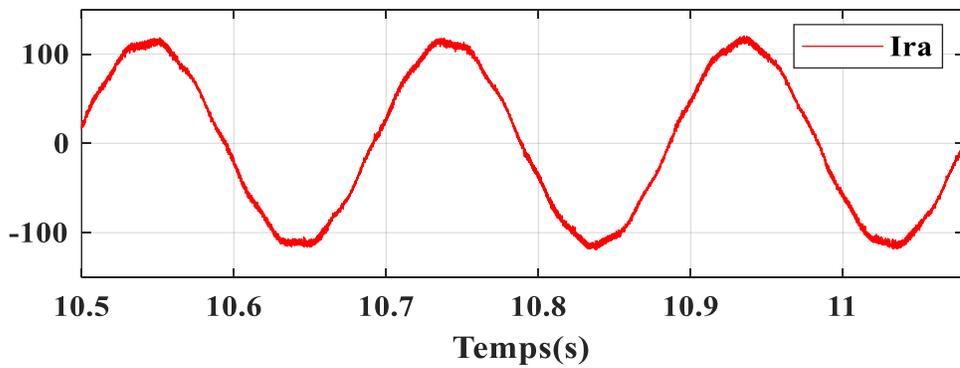
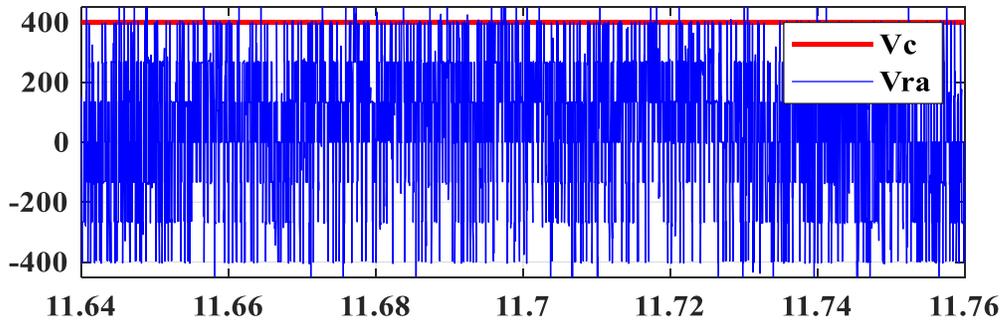
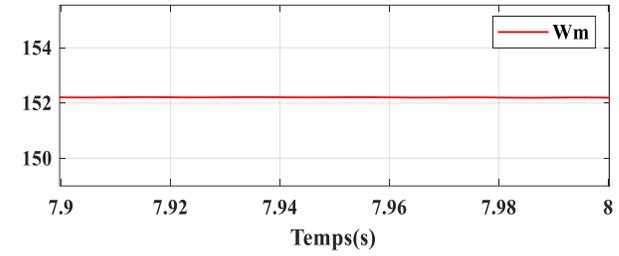
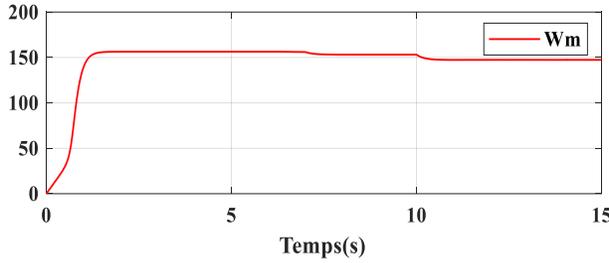
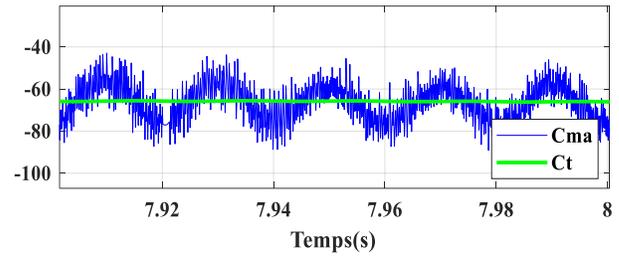
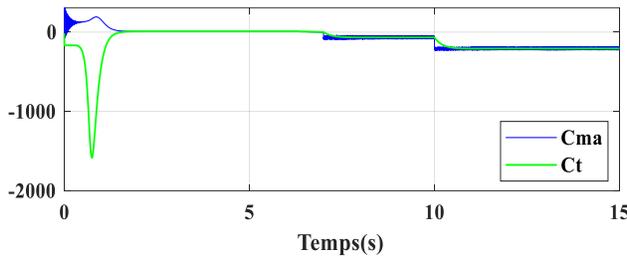


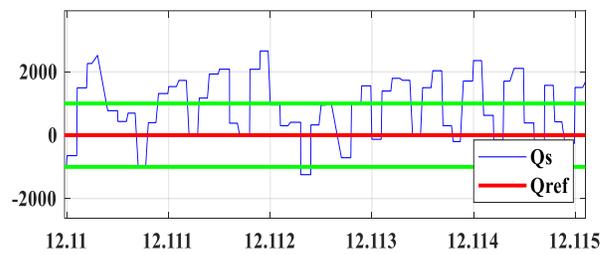
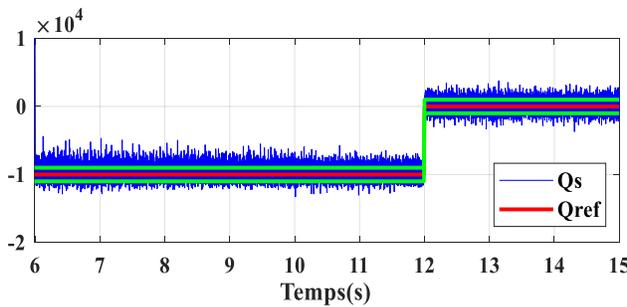
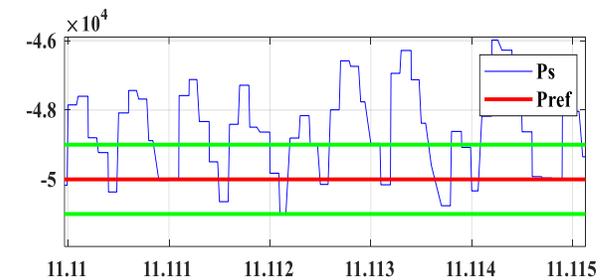
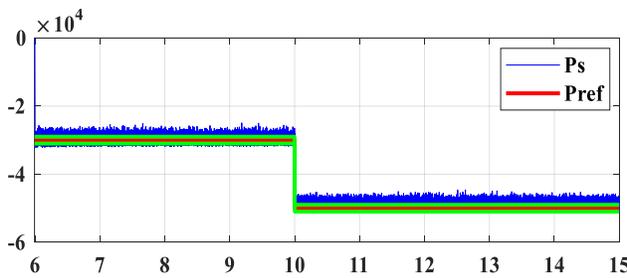
Figure III.12 : Tension et courant rotoriques.



a. Couple, vitesse de machine et couple turbine

b. zoom de couple, vitesse de machine et couple turbine

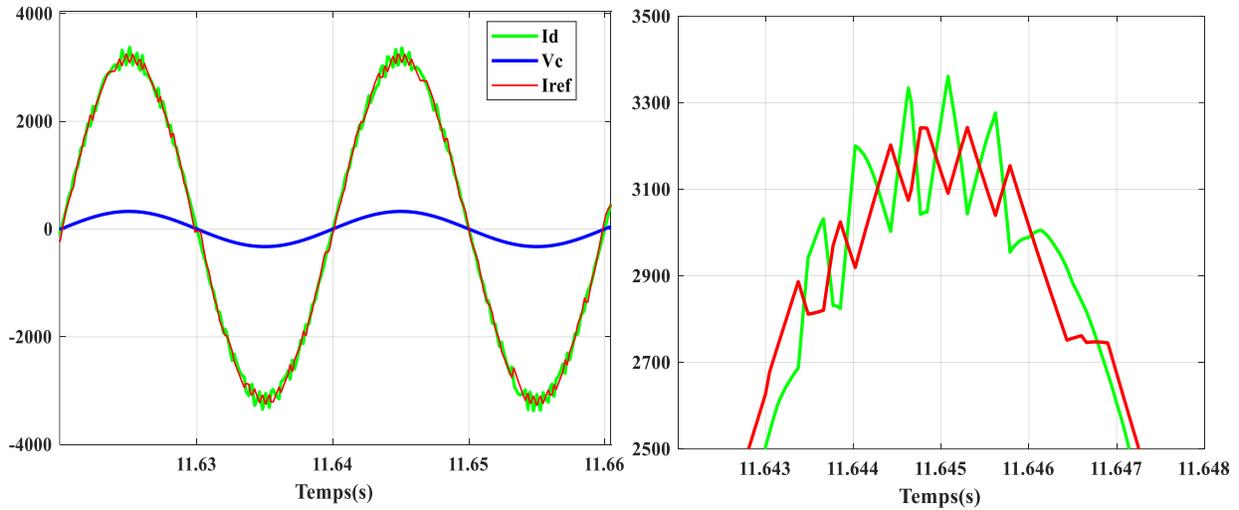
Figure III.13 : Couple, vitesse de machine et couple turbine.



a. La puissance active et réactive et leur référence

b. zoom de la puissance active et réactive et leur référence

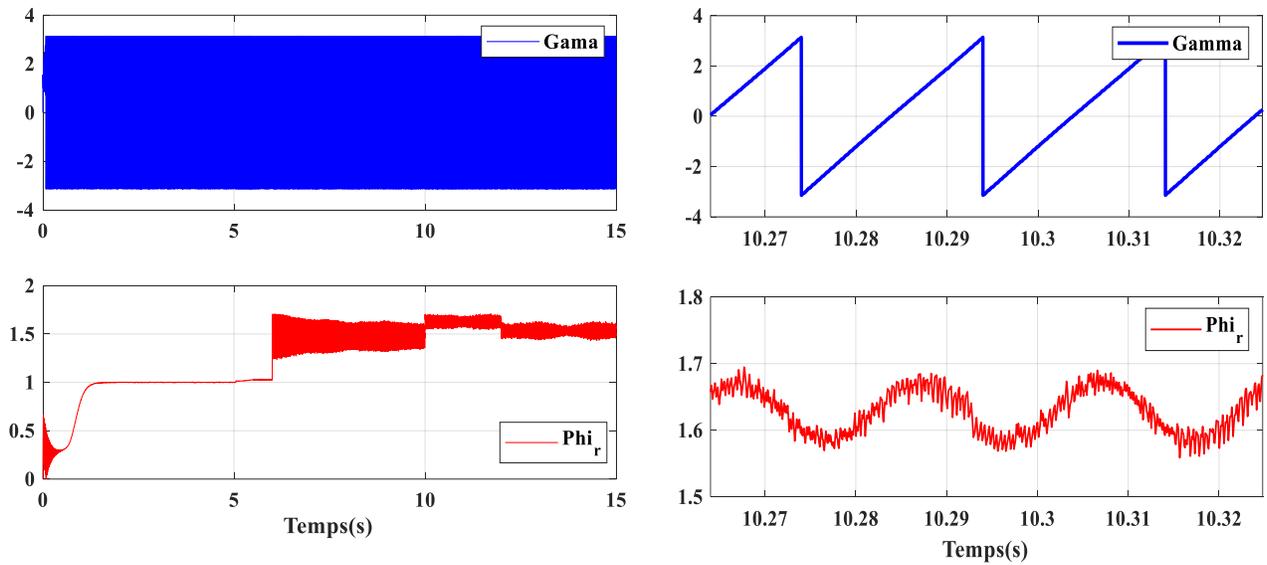
Figure III.14 : Allure de puissance active et réactive.



a. Tension, courant (I_d) d'entrée de redresseur et courant de référence

b. courant d'entrée de redresseur (I_d) et courant de référence

Figure III.15 : Tension, courant d'entrée de redresseur et courant de référence.



a. Amplitude et angle de flux rotorique

b. Zoom d'amplitude et angle de flux rotorique

Figure III.16 : Amplitude et angle de flux rotorique.

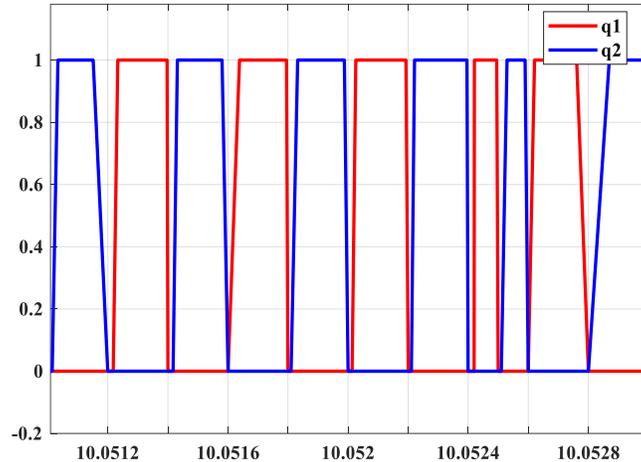


Figure III.17 : État des interrupteurs de 1^{er} pont de l'onduleur.

Remarque et interprétation :

Dans la figure (Figure III.11) A partir de temps (10s) la commande est appliquée on voit que le courant statorique devient plus important.

La tension qui soit être appliquer au rotor (-400 et +400) on voit des créneaux sur tension rotorique

La figure (Figure III.13) le basculement des interrupteurs se fait à l'instant (7s) on voit que le couple machine suit le couple turbine puis à l'instant (10s) le couple se diminue à cause de changement de valeur de la puissance active.

La valeur de courant (figure III.15) est grande on explique cela par :

La puissance du générateur doit générer une partie passe au rotor et autre injecter au réseau donc le générateur produit une certaine puissance qui va être injecter au réseau mais une partie va retourner pour commander le rotor donc ce n'est pas la totalité de puissance générer qui va injecter au réseau.

Si on voit notre cas le générateur produit de la puissance au stator mais la puissance qui passe au rotor elle est plus importante que la puissance générer (on trouve une puissance positive au lieu qu'elle soit négative) ça veut dire que le rotor va extraire de la puissance du réseau c'est pour ça que le courant est important.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire intéresse au contrôle des puissances active et réactive d'une génératrice asynchrone double alimentation (GADA), un composant clé des systèmes éoliens modernes, Ce type de Commande est approuvée par des résultats de simulation numérique en utilisant l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB.

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les bases de la production éolienne, ainsi qu'un rappel théorique sur la génératrice asynchrone à double alimentation à savoir : le principe de fonctionnement de ses modes de fonctionnement, des configurations de son alimentation et ses applications comme moteur et comme générateur, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Il est noté que l'utilisation de la GADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines.

Le deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation sur le système d'alimentation de GADA et la structure de contrôle la DPC classique, cette méthode prometteuse pour améliorer la performance et la fiabilité des génératrice éoliennes en régulant efficacement le flux d'énergie.

Enfin, le dernier chapitre a présenté les résultats de simulation qui valident l'efficacité de la commande directe de puissance, démontrant son potentiel pour optimiser l'exploitation d'énergie renouvelables. Ensemble, ces chapitres contribuent à une meilleure compréhension et à l'avancement des technologies de conversion d'énergie éolienne, soutenant ainsi la transition vers un avenir plus durable.

La structure de contrôle DPC classique présente quelques avantages par rapport à la structure de boucles imbriquées. Pourtant, elle a aussi plusieurs inconvénients. On résume les points forts et faibles de cette structure de contrôle :

Les avantages :

- ✓ Le calcul rapide des puissances instantanées permet l'obtention d'une dynamique très élevée.
- ✓ Il est basé sur le contrôle direct des puissances active et réactive sans boucle de courant
- ✓ Ces puissances sont commandées indépendamment les unes des autres à l'aide de deux contrôleurs à hystérésis et sont donc découplées ;

- ✓ Il n'inclut pas de transformations de coordonnées, ce qui rend son implémentation aisée sur des systèmes temps réel peu onéreux

Les inconvénients :

- ✓ La DPC peut produire des oscillations (ondulations, ce qui peut être gênant dans certaines applications.
- ✓ La commande directe de puissance peut entraîner des pertes d'énergie supplémentaires, en particulier dans les dispositifs de commutation, ce qui peut réduire l'efficacité globale du système.

Perspectives :

On peut utiliser les techniques de l'intelligence artificielle pour pouvoir améliorer les performances ou bien intégrer une commande bidirectionnelle des convertisseurs pour fonctionner en hyper en hypo-synchrone, on peut aussi ajouter la poursuite de point de maximum de puissance ... etc.

ANNEXE :

Les paramètres PI utilisés sont $k_p = 35.728$ et $k_i = 14802$.

Paramètres de simulation :

T_s : Période de commutation. $1e-4$ s.

Paramètres de réseau :

E : Tension d'alimentation 400 V.

f : Fréquence 50 Hz.

Paramètres de filtre :

Resistance 0.1Ω .

Inductance $0.2e-3 \Omega$.

Paramètres de multiplicateur :

G : Gain du multiplicateur de vitesse 60.

Paramètres de la machine :

Symbole	Nom du paramètre	Valeur numérique
P	Nombre de paires de pôles	2
R_s	Résistance statorique	0.5968Ω
R_r	Résistance rotorique	0.5268Ω
L_s	Inductance statorique	0.0003495 H
L_r	Inductance rotorique	0.005473 H
L_m	Inductance mutuelle	0.0354 H
J	Inertie du moteur	5
K_d	Coefficient du frottement	0 N.m/rad/s

Paramètres de la turbine :

Symbole	Nom du paramètre	Valeur numérique
P_n	Puissance mécanique nominale de sortie	1.5e6 W
Ω_b	Vitesse du vent de base	12 m/s
R	Rayon de l'éolienne	14 m

Références bibliographiques :

- [1] **A. MERICKI**, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] **P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi**, "The History and State of Art of Variable-Speed. Ferrier 2001.
- [3] **J.-P CARON J.-P HAUTIER**. « Modélisation et commande de la machine asynchrone » .1995
- [4] **F. POITIERS**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, » thèse de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [5] **H. Alhamed Aldwaihi**, « Commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien » thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2013.
- [6] **Armand BOYETTE** « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006
- [7] **M. HASSAD**, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », Mémoire de Magister, université Sétif 1, 2012
- [8] **N. HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2008
- [9] **D. LE GOURIERE**, "Energie éolienne", éditions EYROLLES, pp 28-31.
- [10] **F. Poitiers**, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'Energie éolienne », Thèse de Doctorat. Université de Nantes, 2003.
- [11] **AKKARI NADIA**, « Contribution à l'alimentation de la Robustesse de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.

[12] **abdessemed Rachid**, modélisation et simulation des machines électriques. France: ellipses éditions marketing s.a.,2011 32,rue bague 75740 paris cedex. r. (2011).

[13] **Elbia Yousef**, « commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à double alimentation et à flux orienté », Thèse Magistère, Université de Batna, 15 Juin 2009

[14] **Vidal P. E.**, "Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation" Thèse de doctorat, I.N.P.de Toulouse, France,2004

[15]. **Y, Bekakra**, étude et commande du moteur asynchrone à double alimentation MADA par différentes techniques avancées mémoire magister centre universitaire d el oued 2010

[16] **G. Salloum**, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.

[17] **E. Merabet**, "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile" Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.

[18] **A. A. Tanvir, A. Merabet, and R. Beguenane**, "Real-time control of active and reactive power for doubly fed induction generator (DFIG)-based wind energy conversion system," *Energies*, vol. 8, no. 9, pp. 10389–10408, 2015.

[19] **Zouggar, el, Oualid**, contribution modélisation commande robuste d'un système éolien basé génératrices asynchrones thèse doctorat université Batna 2 Mostefa ben boulaïd 2021.

[20] **Jean-Paul Gaubert**. « Générateur photovoltaïque avec une commande directe de puissance connecté et avec adjonction de services au réseau de distribution », Symposium de Génie Electrique, Jun 2016.

[21] **A.Chebabhi, MK.Fellah, N.Rouabah, Dj Khodja** « Commande d'un filtre actif shunt par la technique de control directe de puissance basée sur le flux virtuel », article, Université Djilali Liabes,2011.

[22] **F. Kaddour**, (2017). Systèmes des énergies renouvelables et leurs intégrations dans les réseaux électriques, Thèse doctorat, Université Mohammed Boudiaf, USTO, Oran.

[23] **C. Wang**, "Control, stability analysis and grid integration of wind turbines.," Thesis, Imperial College London, 2008.