

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : De Technologie

Département : Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Modélisation et contrôle d'une chaîne de conversion
d'énergie éolienne**

Présenté par : Lakehal Mohammed Islam & Benmakhlouf Akram

Encadrant : Chelli Seif El Islam *MCB* Université d'Annaba

Jury de Soutenance:

Ghoudelbourk Sihem	Professeur	Université-Annaba	Président
Chelli Seif El Islam	MCB	Université-Annaba	Encadrant
Adjabi Mohammed	Professeur	Université-Annaba	Examineur

Année Universitaire: 2023/2024

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr : Chelli Seif El Islam, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.

Nos remerciements aux :

Membres de jury qui ont accepté de juger ce travail, Les enseignants du département de l'électrotechnique d'Université BADJI MOKHTAR-ANNABA.

Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral et l'atmosphère qui nous ont présenté.

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (MADA, convertisseur coté machine, convertisseur coté réseau). une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse du régulateur PI. La MADA étant pilotée par le rotor nous avons appliqué la technique de commande par MLI triangulosinusoïdale à l'onduleur.. Cette étude a été conclue par la simulation dans l'environnement Matlab-Simulink. Nous avons pu ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

MOTS CLES

Machine asynchrone à double alimentation (MADA), éolienne, modélisation, onduleur, convertisseur côté machine, convertisseur coté réseau, commande vectorielle, modulation de largeur d'impulsion.

Abstract

This work presents the modeling and control of the doubly-fed induction generator (DFIG) for wind energy production. To achieve this, a model was established for each component of the wind turbine (DFIG, machine-side converter, grid-side converter). A vector control in stator active and reactive power was developed. The tuning of this control was carried out by synthesizing the PI regulator. Since the DFIG is controlled by the rotor, we applied the triangular-sinusoidal PWM control technique to the inverter. This study was concluded with a simulation on Matlab-Simulink. We were thus able to observe the DFIG's capability to integrate this type of application.

KEY WORDS

Doubly-fed induction generator (DFIG), wind energy, modeling, inverter, machine-side converter, grid-side converter, vector control, pulse-width modulation.

ملخص

يقدم هذا العمل نمذجة والتحكم في الماكينة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة (MADA) لإنتاج طاقة الرياح. لتحقيق ذلك، تم إنشاء نموذج لكل مكون من مكونات طاقة الرياح (MADA، محول جانب الماكينة، محول جانب الشبكة). تم تطوير تحكم شعاعي في الطاقة النشطة والتفاعلية للعضو الساكن. تم ضبط هذا التحكم عن طريق توليف منظم PI. بما أن MADA يتم التحكم بها بواسطة العضو الدوار، قمنا بتطبيق تقنية التحكم PWM ثلاثي الزوايا على العاكس. اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة في بيئة Matlab-Simulink. تمكنا من ملاحظة قدرة MADA على الاندماج في هذا النوع من التطبيقات.

الكلمات المفتاحية :

توربين رياح، نمذجة، عاكس، ماكينة غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة، محول جانب الماكينة، محول جانب الشبكة، تحكم شعاعي، تعديل عرض النبضة

NOTATIONS ET SYMBOLES

$\Omega_{m\grave{e}c}$	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine,
V_1, V_2	(m/s)	Vitesse du vent,
$C_{m\grave{e}c}$	(N.m)	Couple mécanique,
J	(Kg.m ²)	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice »,
K_p	(-)	Composante proportionnelle du correcteur <i>PI</i> ,
K_i	(-)	Composante intégrale du correcteur <i>PI</i> ,
P_m	(W)	Puissance mécanique de la génératrice,
C_{em}	(N.m)	Couple électromagnétique de la génératrice,
R_s	(Ω)	Résistance statorique par phase,
R_r	(Ω)	Résistance rotorique par phase,
L_s	(H)	Inductance cyclique statorique par phase,
L_r	(H)	Inductance cyclique rotorique par phase,
L_m	(H)	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor), inductance magnétisante,
m_s	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,
m_r	(H)	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,
M	(H)	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et autre rotorique,
$[R_s]$		Matrice résistance statorique,
$[R_r]$		Matrice résistance rotoriques,
$[L_{ss}]$		Matrice inductance statorique,
$[L_{rr}]$		Matrice inductance rotoriques,
$[M_{sr}]$		Matrice inductance mutuelle stator-rotor,
σ	(-)	Coefficient de dispersion de Blondel,
P	(-)	Nombre de paires de pôles,
$V_{s\ A.B.C}$	(V)	Tensions instantanées statoriques triphasées,
P_{nom}	(W)	puissance électrique nominale
P_s	(W)	Puissance active statorique,
Q_s	(VAr)	Puissance réactive statorique
P_r	(W)	Puissance active rotorique,

$V_{s\ d.q}$	(V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q) ,
$i_{s\ d.q}$	(A)	Courants statoriques diphasées dans le repère (d, q)
$V_{r\ A.B.C}$	(V)	Tensions instantanées rotorique triphasé
$i_{r\ A.B.C}$	(A)	Courants instantanées rotorique triphasé
$V_{r\ d.q}$	(V)	Tensions rotoriques diphasées dans le repère (d, q) ,
$i_{r\ d.q}$	(A)	Courants rotoriques diphasées dans le repère (d, q)
$\phi_{s\ a.b.c}$	(Wb)	Flux instantané magnétiques au stator,
$\phi_{s\ d.q}$	(Wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) .
Ψ_s	(Wb)	Module du vecteur de flux statorique.
$\phi_{r\ a.b.c}$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques au rotor,
$\phi_{r\ d.q}$	(Wb)	Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) .
g	(-)	Glissement de la vitesse de rotation,
R_f	(Ω)	Resistance de Filtre
L_f	(H)	inductance de Filtre
P_g	(W)	Puissance active transitant vers le réseau
Q_g	(VAR)	Puissance réactive transitant vers le réseau
P_{ch}	(W)	Puissance de charge
P_{dc}	(W)	Puissance du capacite
τ_r	(S)	Temps de réponse
T_f	(S ⁻¹)	Constante de temps inverse
$e(s)$		Erreur de regulation
ω_s	(rad/s)	Vitesse angulaire statorique
ω_r	(rad/s)	Vitesse angulaire rotorique
θ_s	(rad)	Angle électrique statorique
θ_r	(rad)	Angle électrique rotorique
$\blacksquare_f, \blacksquare_{dc}$		Indice du filtre et du bus continue
\blacksquare^*		Indice de reference
\blacksquare_{comp}		Indice du terme de couplage
\blacksquare_{ond}		Indice d'onduleur
(S_A, S_B, S_C)		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique
(r_a, r_b, r_c)		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques,

(d, q)	Axes de référentiel de Park
s	Opérateur de Laplace,
$P(\theta)$	Transformation de Park: $X_{s\ a,b,c} \rightarrow X_{s\ d,q} \rightarrow X_{r\ a,b,c} \rightarrow X_{r\ d,q}$

Abréviation

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation,
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor,
MLI	Modulation de largeur d'impulsion,
FT	Fonction de transfert,
FTBO	Fonction de transfert en boucle fermée ,
FTBF	Fonction de transfert en boucle ouverte,
CCM	Convertisseur Cotè Machine.
CCR	Convertisseur Cotè Réseau
PI	Proportionnel intégrateur
MATLAB	Matrix Laboratoire (logiciel de simulation numérique).

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS	
1. Introduction	4
2. Définition de l'énergie éolienne	4
3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	5
3.1. Avantages	5
3.2. Inconvénients.....	5
4. Types des Aérogénérateur	5
4.1 Eoliennes à axe vertical	6
4.1.1 Avantages	6
4.1.2 Inconvénient	6
4.2 Eolienne à axe horizontal.....	7
4.2.1 Avantages :	7
4.2.2 Inconvénients :	7
5. Constitution d'une éolienne horizontale	8
6. Classement des éoliennes	9
6.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	9
6.2 Les éoliennes à vitesse variable	9
6.2.1 Principe de fonctionnement.....	9
6.2.2 Intérêt de la vitesse variable	10
7. Etat de l'art sur la conversion électromécanique.....	11
7.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	11
7.2 Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur	11
7.3. Structure Back-to-back	12
7.4 Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone.....	12
7.4.1 Avantages :	13
7.4.2 Inconvénients:.....	13
8. Conclusion	14

CHAPITRE 2: ETUDE ET MODELISATION DE LA MADA

1. Introduction	16
2.1 Description sur la MADA :	16
2.2 Les Modes de fonctionnement de la MADA	16
2.3 Domaines d'application de la MADA	18
2.4 Avantages et inconvénients de la MADA	19
2.4.1 Les Avantages :	19
2.4.2 Inconvénients :	19
2.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	20
2.5.1 Modèle mathématique de la MADA.....	20
2.6 Application de la transformation de PARK à la MADA	22
2.7 Modèle simplifié de la MADA	24
3. Synthèse du régulateur PI :	27
4. Modélisation de l'onduleur	28
3.4 Modulation de largeur d'Impulsion (MLI)	29
5. Validation par simulation numérique de la stratégie de contrôle proposée :	30
6. Conclusion.....	35

CHAPITRE 3: STRATEGIE DE CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU DE LA MADA

1. Introduction	37
2. Commande vectorielle du CCR :	37
2.1 Modélisation du CCR :	37
2.2 Application de la commande vectorielle à la commande des courants traversant les filtres :	38
2.3 Dimensionnement des régulateurs des courants :	40
3. Expressions des puissances active et réactive au réseau :	42
4. Contrôle de la tension du bus continu :	42
4.1 Calcul du régulateur de la tension du bus continu :	43
5. Validation par simulation numérique de la stratégie de contrôle vectoriel :	44
Première Essai :	45
Deuxième essai :	46
6. Conclusion:	48
Conclusion generale:	49
Bibliographie:	50

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	4
Figure 1.2: Technologie des éoliennes à axe vertical.	6
Figure 1.3 : Technologie des éoliennes à axe horizontale.	7
Figure 1.4: Éolienne directement connectée au réseau.....	9
Figure 1.5: Aérogénérateur à vitesse variable.....	10
Figure 1.6: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et du vent	10
Figure 1.7: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.	11
Figure 1.8: Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.	11
Figure 1.9: MADA avec structure back-to-back.	12
Figure 1.10: Système éolien basé sur une GSAP.	13
Figure 2.1 : principe du rotor bobiné.....	16
Figure 2.2 : les quatre modes de fonctionnement de la MADA.....	17
Figure 2.3: Représentation simplifiée de la MADA.	22
Figure 2.4: Repère statorique et rotorique et repère de Park.	22
Figure 2.5 : Orientation du flux statorique.....	24
Figure 2.6: Schema bloc du modèle simplifié de la MADA.....	27
Figure 2.7: Système régulé par un régulateur PI.....	27
Figure 2.8: Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA Le modèle algébrique d'un onduleur à deux niveaux est donné par	29
Figure 2.9: Principe de commande en MLI sinus-triangulaire	30
Figure 2.10: Du haut en bas : la vitesse du rotor (ω_r), les tensions du réseau, les courants rotoriques , les puissances active et réactive statoriques , la puissance active du rotor.	32
Figure 2.11 : Du haut en bas : les composantes de la tension statorique, les composantes des courants rotoriques directe et en quadrature et leurs références.	33
Figure 2.12: Du haut en bas : la vitesse du rotor (ω_r), les tensions du réseau, les courants rotoriques , les puissances active et réactive statoriques , la puissance active du rotor.	34
Figure 2.13 : Du haut en bas : les composantes de la tension statorique, les composantes des courants rotoriques directe et en quadrature et leurs références.	34
Figure 3.1 : Structure du convertisseur côté réseau CCR.	37
Figure 3.2: Schéma de principe du contrôle vectoriel des courants traversant le filtre RL.	39
Figure 3.3: Boucle de régulation des courants de ligne par un régulateur PI	40
Figure 3.4 : Schéma de principe du contrôle du bus continu.	44
Figure 3.5: Evolution des grandeurs les plus représentatives du CCR.....	46
Figure 3.6: Evolution des grandeurs les plus représentatives du CCR.....	47

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité est largement appréciée car elle ne génère pas les risques de pollution atmosphérique associés aux centrales conventionnelles telles que les centrales à gaz ou à pétrole, et elle ne présente pas non plus les dangers pour la santé humaine liés aux centrales nucléaires. Les éoliennes utilisent des générateurs à courant alternatif à vitesse variable pour leur fonctionnement. [1].

La génératrice asynchrone à double alimentation munie de deux convertisseurs statiques et entraînée par une turbine éolienne constitue le procédé le plus simple et la plus efficace pour convertir l'énergie emmagasinée dans le vent en énergie électrique envoyée directement au réseau de distribution sous forme de puissances active et réactive à la fréquence du réseau d'une manière flexible et contrôlable [1,2]. Chacune de ces deux puissances peut être asservie à une consigne donnée l'une indépendamment de l'autre grâce à l'application des différentes variantes de la technique d'orientation du flux. [2].

L'établissement des lois de commande régissant le fonctionnement d'un système de conversion de l'énergie éolienne basé sur une MADA est conventionnellement fondé sur l'application de la technique de contrôle vectoriel qui consiste à contrôler le couple électromagnétique et le flux de cette machine d'une façon similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée [3,4].

Le présent travail concerne la validation par simulation de la commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique moyennant une machine asynchrone à

double alimentation. Rappelons que ce système contient principalement une génératrice à induction dont le stator est directement relié à un réseau tandis que le rotor est relié au même réseau via un convertisseur de tension *AC-DC-AC*. Ce dernier est composé de deux convertisseurs reliés entre eux par un étage intermédiaire continu. Le rôle du convertisseur DC-AC ou convertisseur côté machine (CCM) est d'assurer à la fois le contrôle des puissances actives et réactives statoriques à envoyer au réseau présentant. Le convertisseur AC-DC ou convertisseur côté réseau (CCR) quant à lui ; son premier rôle est de maintenir

la tension du rail continu à une valeur pratiquement constante soit en injectant, soit en empruntant de la puissance active du réseau selon la vitesse du rotor de la *MADA* -fonctionnement en hypo ou en hyper synchrone- et ceci en fournissant une valeur prédéterminée de la puissance réactive. Comme il est illustré sur la figure ci-dessous. La génératrice asynchrone est alors entraînée par un moteur à courant continu à excitation séparée ; afin de pouvoir atteindre des vitesses supérieures correspondantes au régime hyper synchrone nous n'aurons qu'à réduire le flux d'excitation.

De ce fait, le manuscrit relatif à la globalité de ce travail est réparti sur quatre chapitres structurés comme suit :

Le premier chapitre décrit les systèmes d'éoliennes et la technologie de transfert utilisée dans les centrales éoliennes, les divers types d'éoliennes et les multiples configurations de la chaîne de conversion des éoliennes.....ect.

Le deuxième chapitre est entièrement consacré à la mise en œuvre du contrôle de la puissance statorique active et réactive générée par la *MADA* au moyen d'une simulation validée dans l'environnement Matlab-Simulink. Afin de réaliser cet objectif, le contrôle vectoriel a été appliqué suite à la modélisation du système en question.

Dans le dernier chapitre, nous étudions la commande du convertisseur côté réseau (CCR) qui forme une partie très importante pour le fonctionnement global de la chaîne de la conversion. Le but étant d'assurer la régulation de la tension du bus continu en amont du convertisseur côté machine (CCM) à une valeur constante.

Une conclusion générale incluant l'ensemble des résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées est présentée à la fin de ce manuscrit.

Chapitre 1

Generalite sur les systèmes éoliens

1. Introduction

Depuis l'utilisation des moulins à vent, La technologie des capteurs de vent continue d'évoluer. Au début des années 1940, de véritables prototypes d'éoliennes aux pales profilées ont été utilisés avec succès pour produire de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur ou éolienne est un appareil qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice. (Figure 1-1).

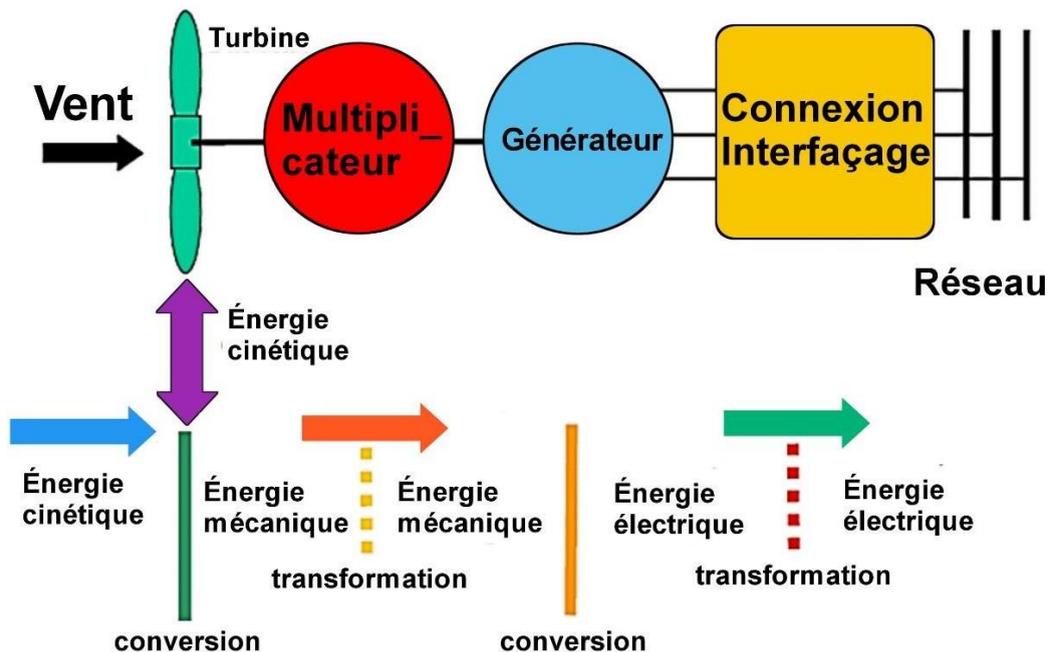


Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie « renouvelable » non dégradée, géographiquement répandue et surtout saisonnière (l'énergie électrique est beaucoup plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). En outre, il s'agit d'une énergie qui ne jette ni atmosphère ni déchet radioactif. Cependant, sa durée est variable et son captage demeure assez complexe, exigeant des mâts et des pales de grande taille (jusqu'à 90m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées afin d'éviter les phénomènes de turbulences [01].

3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Parmi les avantages spécifiques de l'énergie éolienne par rapport à d'autres sources d'énergie, on peut citer les suivants :

3.1. Avantages :

- ✓ L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [08].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées[28].
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [28].
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie .Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.[28].
- ✓ L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gazes à effet de serre [04].

3.2. Inconvénients

L'énergie éolienne a également quelques inconvénients qu'il faut citer:

- ✓ L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel [01].
- ✓ Le bruit: la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur [08].
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production [01].

4. Types des Aérogénérateur

Il y a deux principaux types d'éoliennes qui se distinguent principalement par leur élément de captation d'énergie, appelé aéro turbine. En fonction de la position de la turbine par rapport au sol, on trouve soit une éolienne à axe vertical, soit une éolienne à axe horizontal. [04].

4.1 Eoliennes à axe vertical

Ces ont été les premières constructions conçues pour générer de l'électricité. Plusieurs variantes technologiques ont été expérimentées, mais seules deux d'entre elles ont atteint le stade de l'industrialisation : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. (figure1.2).



Figure 1.2: Technologie des éoliennes à axe vertical.

Ce genre d'éolienne est aujourd'hui assez rare et son utilisation est beaucoup moins répandue. Les avantages et les inconvénients qu'elles comportent peuvent être mentionnés comme suit [04][08].

4.1.1 Avantages

- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent son sa voir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite moins d'entretien.

4.1.2 Inconvénient

- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ✓ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est freiné par le relief.

4.2 Eolienne à axe horizontale :

Ces éoliennes sont actuellement les plus couramment utilisées, probablement en raison de leurs avantages remarquables. Elles sont généralement équipées d'hélices à deux ou trois pales, orientées vers le vent ou placées sous le vent. (Figure 1.3)[09].



Figure 1.3: Technologie des éoliennes à axe horizontale.

4.2.1 Avantages :

- ✓ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ✓ Le générateur et les appareils de commande sont situés dans la nacelle au sommet de la tour. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'ajouter de l'espace pour l'équipement.

4.2.2 Inconvénients :

- ✓ Coût de construction très élevé.
- ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Bien qu'elle présente des désavantages, cette structure est la plus répandue aujourd'hui. Toutefois, les installations à axe vertical continuent d'être employées pour générer de l'électricité dans les zones isolées.

Elles ont une puissance limitée et sont conçues pour des utilisations prolongées telles que la charge des batteries, par exemple [09]

Dans le reste de notre recherche, nous examinons la structure la plus adaptée et la plus performante, à savoir celle avec un axe horizontal et trois pales à pas variable (variable pitch) [09].

5. Constitution d'une éolienne horizontale

En général, les éoliennes à axe horizontal sont composées de trois éléments principaux :

La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu. [10].

- **La tour** : Il s'agit d'un support, habituellement un tube en acier ou un treillis en métal. Au fur et à mesure que les puissances nominales des éoliennes augmentent, le mat augmente de plus en plus afin d'éviter les perturbations près du sol et de permettre l'utilisation de pales plus longues. L'architecture de la tour est conique ou cylindrique. À l'intérieur se trouvent répartis les câbles électriques de transport, les dispositifs de contrôle, les équipements de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants:
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.
 - Le frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de sur charge.
 - La génératrice.
 - Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).
- **Les pales**: Elles sont utilisées pour capter la force du vent et la transmettre au rotor. Dans la plupart des aérogénérateurs, il y a trois pales, car ce nombre offre un compromis entre les performances de la machine et des raisons de protection. [CMADA].

- **Le moyeu:** Il s'agit de l'objet qui accueille les pales. Il est nécessaire qu'il puisse supporter des coups violents, en particulier lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de variations brusques de la vitesse du vent.

6. Classement des éoliennes

Il y a principalement deux types de technologies d'éoliennes : celles à vitesse constante et celles à vitesse variable. Les deux procédés sont décrits de manière assez générale dans la partie suivante.

6.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes à vitesse fixe ont été développées. La génératrice asynchrone est directement connectée au réseau dans cette technologie. La fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles de la génératrice déterminent donc sa vitesse $\Omega_{méc}$ (Figure 1.4)[11].

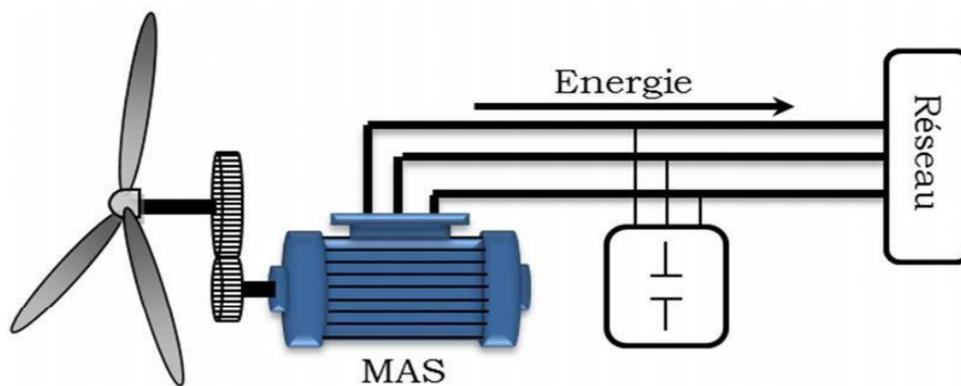


Figure 1.4:Éolienne directement connectée au réseau.

La vitesse de la génératrice est accélérée par le couple mécanique entraînant (produit par la turbine). Ainsi, cette dernière opère en hyper-synchrone et produit de l'électricité sur le réseau[11].

6.2 Les éoliennes à vitesse variable

6.2.1 Principe de fonctionnement

Étant donné les difficultés engendrées par un fonctionnement à vitesse fixe, nous avons cherché à optimiser l'utilisation de l'énergie cinétique du vent. Afin d'y parvenir, il est nécessaire d'ajuster constamment la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Les commandes sur la turbine, ainsi que sur la partie électrotechnique (le générateur électrique lui-même et/ou les paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) peuvent être utilisées pour optimiser la production souhaitée.

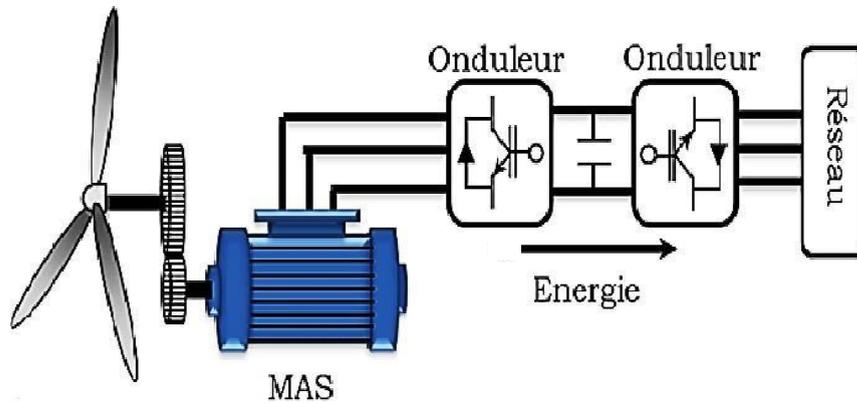


Figure 1.5: Aérogénérateur à vitesse variable.

6.2.2 Intérêt de la vitesse variable

On peut observer la représentation de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse sur la (Figure 1.6)[11].

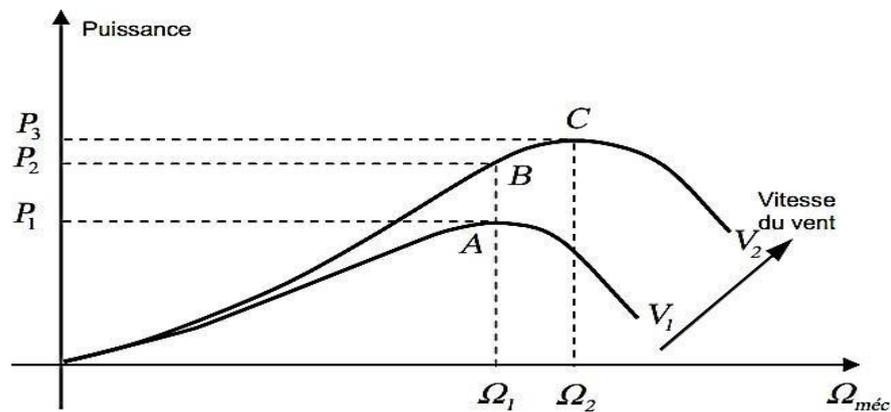


Figure 1.6: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Une puissance nominale P_1 (point A) est obtenue pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 . Dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe, lorsque la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée, la puissance P_2 se situe sur la deuxième caractéristique (point B). La puissance maximale est située à l'autre extrémité de ce point (point C). La puissance maximale doit être obtenue en fixant la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Ainsi, il est nécessaire de modifier la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent afin d'obtenir le maximum de la puissance produite.

7. Etat de l'art sur la conversion électromécanique

7.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

La (figure 1.7) illustre cette configuration à vitesse variable, où le stator est directement relié au réseau et le rotor est relié à un redresseur. On ajoute alors une charge résistive à la sortie du redresseur en utilisant un hacheur à IGBT ou GTO [11]. Grâce à l'IGBT, il est possible de modifier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à différentes vitesses tout en maintenant la caractéristique de couple/vitesse stable de la machine asynchrone. La vitesse de rotation du moteur entraîne donc une modification du glissement.

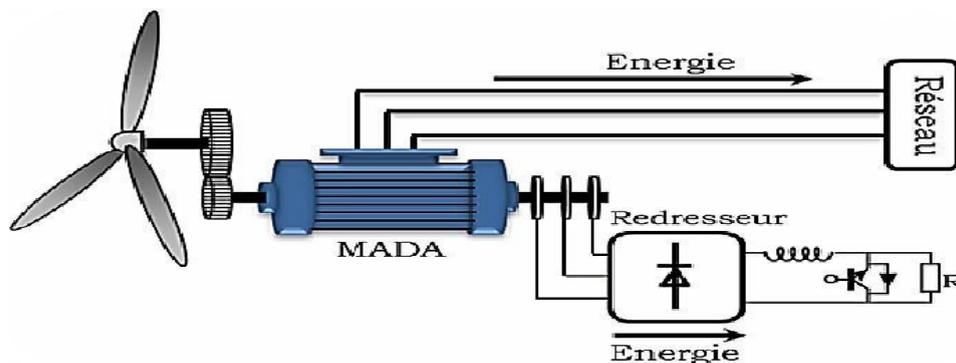


Figure 1.7: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

7.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Lorsqu'un cyclo-convertisseur est utilisé pour remplacer l'association redresseur-onduleur (Figure 1.7) afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, on désigne alors l'ensemble sous le nom de « structure de Scherbius ». On observe une augmentation de la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de la Figure 1.8 [04].

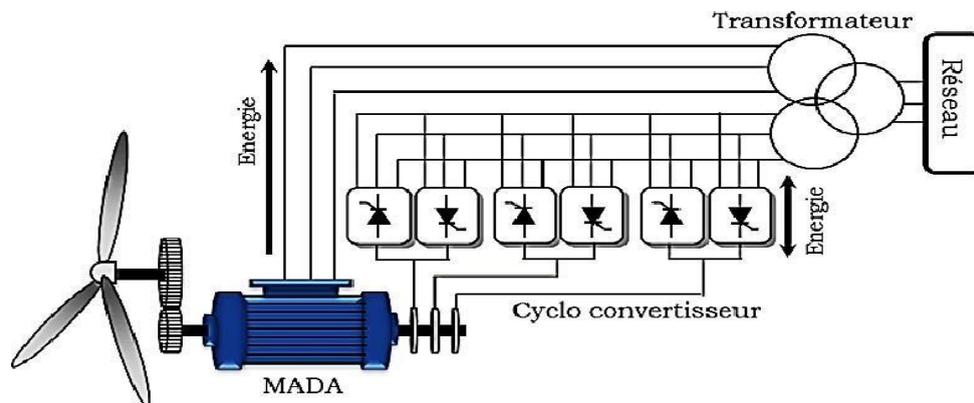


Figure 1.8: Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

7.3 Structure Back-to-back

La sélection de cette configuration offre à chaque convertisseur la possibilité de fonctionner avec deux niveaux de liberté : Il est nécessaire de surveiller le flux magnétique et la vitesse MADA de la machine, ainsi que la puissance active et réactive transmise du réseau.

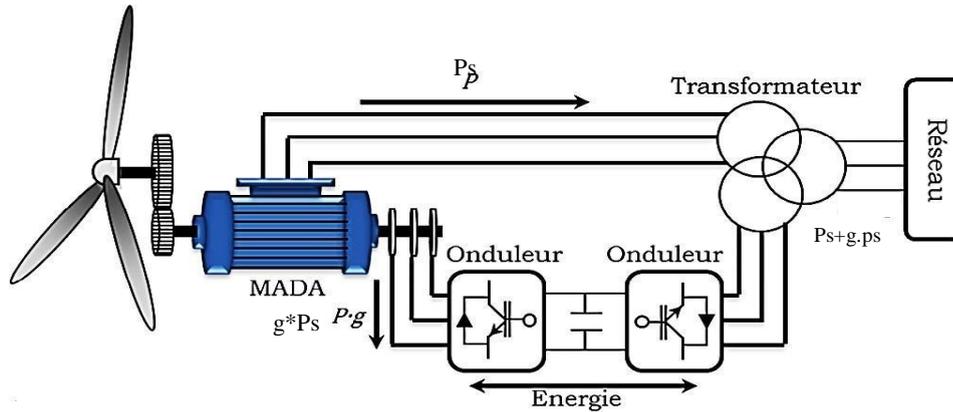


Figure 1.9: MADA avec structure back-to-back.

Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants:

- ✓ Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système.
- ✓ Le fonctionnement au tour de la vitesse de synchronisme est adéquat.
- ✓ Il ya une faible distorsion des tensions et courants rotoriques et des courants statoriques.
- ✓ Le contrôle du couple de la génératrice est indépendant de ce lui de la puissance réactive injectée par le rotor.

Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse du vent en utilisant des pâles orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 30% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans les convertisseurs sont peu importantes [12].

7.4 Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone

Ce genre de dispositif est employé dans la majorité des méthodes classiques de production d'électricité, en particulier dans celles à grande puissance (thermiques, hydrauliques ou nucléaires). La vitesse de rotation de ce genre de machine est constante et proportionnelle à la fréquence du réseau lorsqu'elle est directement

connectée au réseau. En raison de cette rigidité extrême de la connexion entre le générateur et le réseau, les variations du couple capté par l'aéro turbine se répandent dans tout le réseau de puissance, jusqu'à la production d'électricité. D'où l'absence d'utilisation des machines synchrones dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. En revanche, elles sont employées lorsqu'elles sont reliées au réseau grâce à des convertisseurs de puissance.

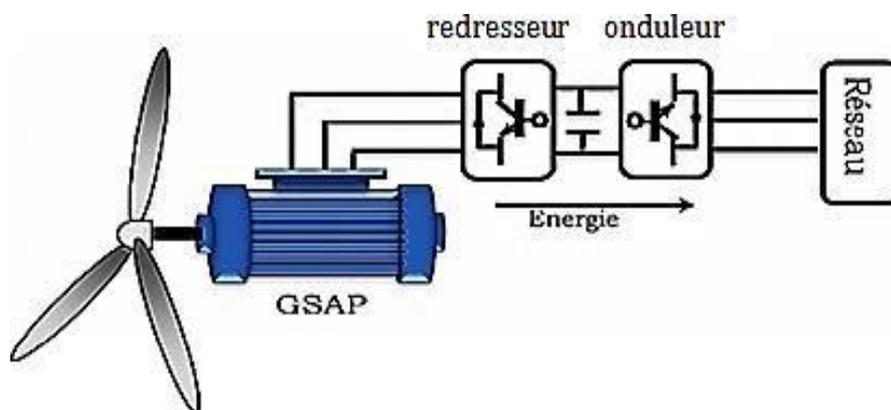


Figure 1.10: Système éolien basé sur une GSAP.

7.4.1 Avantages :

- ✓ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse [16].
- ✓ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles [16].
- ✓ Connexion de la machine facile à gérer [16].
- ✓ Elle est utilisée en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique) [16].

7.4.2 Inconvénients:

- ✓ Grand diamètre de machine [16].
- ✓ Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice [16].
- ✓ L'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [17].

8. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé des informations générales sur les systèmes éoliens. Après avoir rappelé les différents types d'éoliennes (axe horizontal et axe vertical), nous avons décrit les différentes machines utilisées dans les éoliennes récentes, y compris la machine asynchrone à double alimentation avec une structure "back-to-back" commandée par un rotor. Grâce à cette technologie, il est possible de diminuer de 30% la taille des convertisseurs statiques en ne transportant que la puissance de glissement. De plus, elle offre la possibilité de modifier la puissance réactive.

Chapitre 2

Etude et modelisation de la MADA

1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons démontré que pour maximiser la puissance éolienne, il est nécessaire que la génératrice fonctionne à vitesse variable. Pour atteindre cet objectif, il est crucial de développer une stratégie de commande visant à atteindre une performance optimale. La modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est donc essentielle pour mettre en place une commande efficace et adaptée. Dans cette perspective, la MADA sera contrôlée par les tensions appliquées au rotor, ce qui nous permettra de gérer les puissances actives et réactives produites. Cette approche est particulièrement bénéfique pour l'optimisation de la gestion de l'éolienne.

2. Machine asynchrone à double alimentation

2.1 Description sur la MADA :

Le stator de la MADA ressemble à celui d'une machine asynchrone à cage. Le rotor diffère surtout par le fait qu'il ne se compose pas d'aimants permanents ou d'une cage d'écureuil, mais d'enroulements triphasés disposés de la même façon que les enroulements du stator. Il est nécessaire qu'il y ait des sources actives à la fois sur le stator et le rotor pour être considérée comme une machine à double alimentation [5].

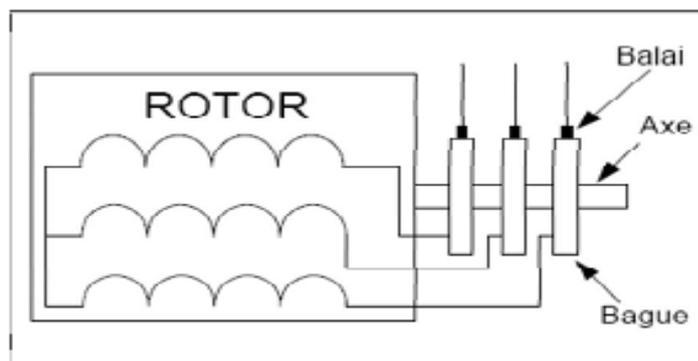


Figure 11 : principe du rotor bobiné

2.2 Les Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA propose plusieurs options de reconfiguration du mode de fonctionnement grâce à sa double alimentation. Les quatre modes de fonctionnement sont disponibles : mode moteur (hypo-synchrone et hyper-synchrone), mode générateur (hypo-synchrone et hyper-synchrone). La figure 2.2 illustre le fonctionnement d'une MADA dans quatre quadrants. Les puissances absorbées ou fournies par le stator et le rotor de la machine sont représentées par P_s et P_r , tandis que P_m correspond à la puissance mécanique.

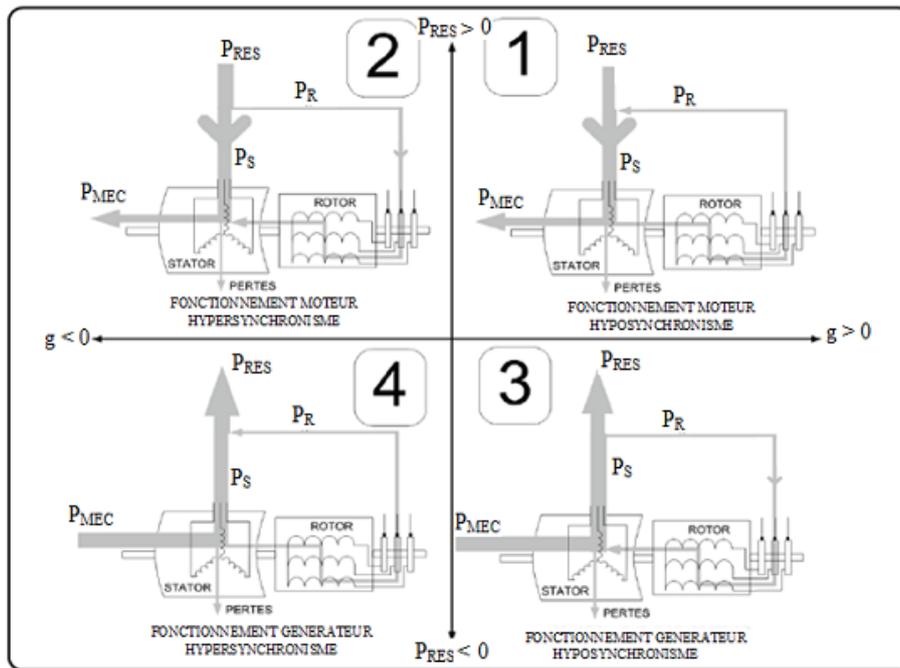


Figure 12 : les quatre modes de fonctionnement de la MADA [14].

- **Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :**
 - ✓ Le stator reçoit la puissance du réseau.
 - ✓ La force de rotation est transmise au réseau.
 - ✓ La rotation est plus lente que le synchronisme.
 - ✓ Il est possible de fonctionner la machine asynchrone à cage de cette manière, mais la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [01].
- **Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone:**
 - ✓ La puissance fournie par le réseau va au rotor et au stator.
 - ✓ La vitesse de la machine dépasse la vitesse de synchronisation
 - ✓ La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [14].
 - ✓ La puissance est transmise par le réseau au rotor et au stator.
- **Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone:**
 - ✓ La puissance est fournie par le stator au réseau.
 - ✓ Une partie de la puissance transmise par le stator est réabsorbée par le rotor.
 - ✓ La vitesse de rotation est en-dessous de la vitesse de synchronisme.

✓ La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [01].

- **Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone:**

✓ Le stator fournit de la puissance au réseau.

✓ La puissance de glissement est collectée par le rotor afin d'être réintroduite dans le réseau.

✓ La vitesse de la machine dépasse celle de synchronisation.]

✓ Dans les mêmes conditions, la machine asynchrone à cage peut être utilisée, mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [14].

2.3 Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation a été développée pour opérer en tant que moteur sur une large gamme de vitesses en tant que première application. L'utilisation de cette MADA permet de réguler la vitesse en agissant sur la fréquence d'alimentation des enroulements du rotor, ce qui rend ce dispositif économique en réduisant les dimensions des convertisseurs entre le rotor et le réseau d'environ 70% [01][12]. Par conséquent, cette solution est économique et peut même fournir de la puissance réactive. Ces caractéristiques ont conduit à l'adoption de la MADA dans diverses applications industrielles telles que :

✓ L'utilisation des enrouleuses et des dérouleuses de bobines dans la métallurgie.

✓ La traction, en particulier dans les domaines du transport urbain ou de la propulsion maritime.

✓ Les usages de levage, d'ascenseurs, de monte-charge,...etc. [23].]

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, Grâce à l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable, il est possible de fournir une fréquence constante au stator, même lorsque la vitesse varie. De nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée sont également présents [01]:

✓ Création des systèmes de communication à bord des navires ou avions.

✓ Centrales hydrauliques qui ont un débit et une vitesse personnalisés [12].

✓ Des éoliennes ou des turbines marémotrices à différentes vitesses.

✓ La réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire considérablement la consommation de carburant pour les groupes électrogènes [12].

2.4 Avantages et inconvénients de la MADA

En réalité, aucune machine parfaite n'existe, toutes les machines ont des avantages et des inconvénients. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques avantages et inconvénients de la MADA [24][02][12][25]

2.4.1 Les Avantages :

Les principaux avantages de la MADA sont :

- ✓ Contrairement à la machine à cage, elle permet de mesurer les courants au stator et au rotor, ce qui permet un contrôle plus souple et plus précis du flux et du couple électromagnétique.
- ✓ De plus, elle a une puissance massique légèrement supérieure à celle des autres machines de grandes puissances.
- ✓ Il est possible de fonctionner avec un couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- ✓ Les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont réduites lorsque le convertisseur associé au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine, ce qui permet d'atteindre une vitesse de fonctionnement proche de celle de synchronisme, ce qui entraîne un rendement élevé du système de conversion.
- ✓ Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo et en hyper) [27].
- ✓ En ce qui concerne le partage des fréquences entre le stator et le rotor, il est envisageable et conseillé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, ce qui permet de diminuer les pertes de fer et d'améliorer son rendement [27].

2.4.2 Inconvénients :

- ✓ La maintenance supplémentaire causée par l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse et du système de bagues-balais de la MADA.
- ✓ Son poids est supérieur à celui d'une MAS à cage de puissance similaire en raison de la présence du système de bagues-balais.
- ✓ -La présence de plusieurs convertisseurs entraîne une augmentation du nombre de convertisseurs et donc du prix.

2.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Il est extrêmement difficile d'analyser sa configuration précise en raison de la répartition de ses enroulements et de sa géométrie propre. Ainsi, pour établir un modèle simple, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices : [26]

- ✓ La machine présente une structure symétrique.
- ✓ Il est supposé que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté à la fois au stator et au rotor, et que la densité de courant peut être considérée comme étant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (sans effet pelliculaire).
- ✓ Les résistances des bandes ne fluctuent pas en fonction de la température.
- ✓ L'hypothèse est que le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui est essentiel pour prendre en compte les flux comme une fonction linéaire des courants.
- ✓ La force magnétique générée par chaque phase statorique et rotorique est considérée comme étant à répartition sinusoïdale.
- ✓ L'épaisseur de l'entrefer est homogène et l'effet d'encoche est ignoré, les inductances propres sont le résultat de l'angle entre les axes rotorique et statorique.

2.5.1 Modèle mathématique de la MADA

La représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation dans un châssis triphasé est illustrée à la Figure 2.3.

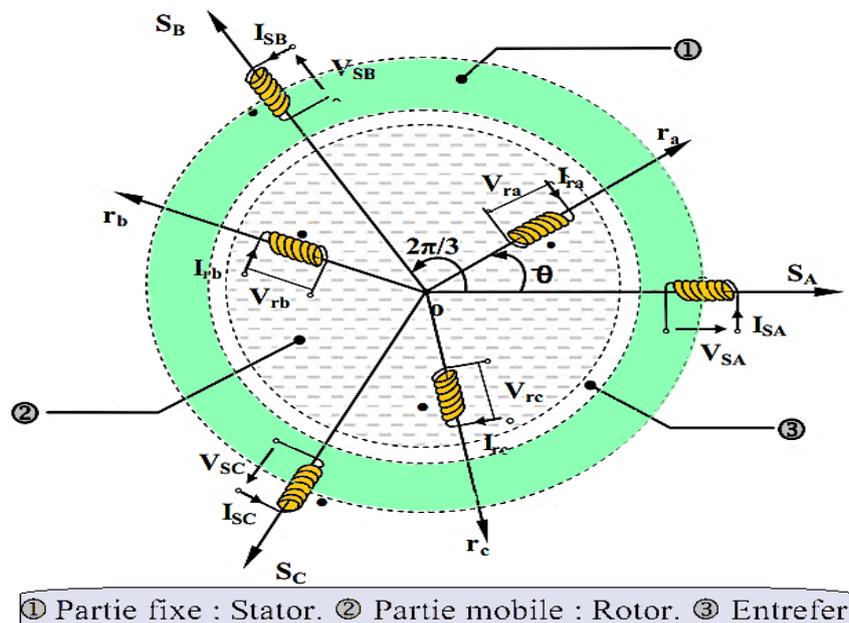


Figure 13: Représentation simplifiée de la MADA.

Equation électrique de la machines

- Equations des tensions

En tenant compte aux hypothèses ci-dessus, les équations électriques des tensions du stator et du rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné sont exprimées dans le référentiel triphasé (abc) de la manière suivante [21]:

✓ Au stator

$$[V_s]_{3 \times 1} = [R_s]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_{3 \times 1} \quad (2.1)$$

✓ Au rotor

$$[V_r]_{3 \times 1} = [R_r]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_{3 \times 1} \quad (2.2)$$

Où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{As} \\ V_{Bs} \\ V_{Cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{As} \\ I_{Bs} \\ I_{Cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{As} \\ \Phi_{Bs} \\ \Phi_{Cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{Ar} \\ \Phi_{Br} \\ \Phi_{Cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec:

R_s , R_r : sont les résistances des enroulements statoriques et rotorique respectivement.

- Equations magnétiques

Les flux sont donnés par :

✓ Au stator

$$[\Phi_s]_{3 \times 3} = [L_{ss}]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} + [M_{sr}]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} \quad (2.3)$$

✓ Au rotor

$$[\Phi_r]_{3 \times 3} = [L_{rr}]_{3 \times 3} \cdot [I_r]_{3 \times 1} + [M_{sr}]_{3 \times 3} \cdot [I_s]_{3 \times 1} \quad (2.4)$$

Où :

$$[L_{ss}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}]_{3 \times 3}^T = [M_{sr}]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Avec :

$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [\phi_{sa} \quad \phi_{sb} \quad \phi_{sc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques;

$[\Phi_r]_{3 \times 1} = [\phi_{ra} \quad \phi_{rb} \quad \phi_{rc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques;

$[I_s]_{3 \times 1} = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[I_r]_{3 \times 1} = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

2.6 Application de la transformation de PARK à la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est une machine fortement interconnectée, ce qui rend sa représentation dans un système triphasé très complexe. Pour mieux décrire son comportement, il est préférable d'adopter un modèle précis mais simplifié. Dans ce cas, le modèle diphasé (dq) obtenu par la transformation de Park sera utilisé [24]. Ce nouveau modèle est dérivé en multipliant les équations du flux et des tensions par la matrice de Park. Les matrices de Park directe (2.5) et inverse (2.6) sont utilisées pour effectuer cette transformation. [12] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Les grandeurs électriques de la MADA peuvent être exprimées dans le référentiel (dq) comme illustré à la figure 2.4:

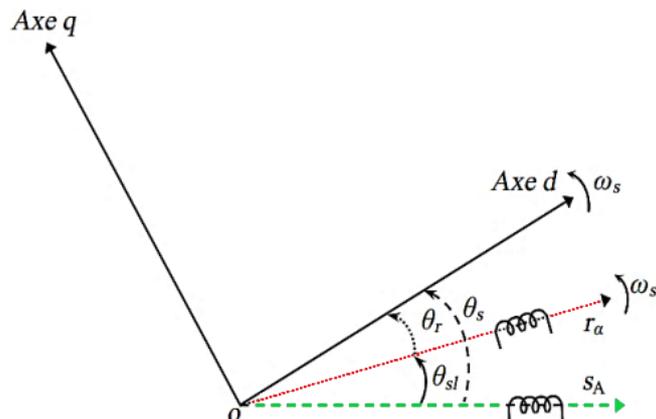


Figure 14: Repère statorique et rotorique et repère de Park.

La composante homopolaire (O) n'est pas prise en compte parce que nous considérons que le système est équilibré,

Les grandeurs réelles (abc) sont projetées (abc) sur le repère (dq) en utilisant la matrice de Park de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix}_y = [P(\theta_y)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}_y \quad (2.7)$$

Et inversement:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

✓ **Au stator**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (2.9)$$

✓ **Au rotor**

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.10)$$

✓ On peut représenter le flux magnétique statorique de la manière suivante :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec :

$$L_m = \frac{3}{2} \cdot M_{sr}$$

✓ On peut représenter le flux magnétique rotorique de la manière suivante :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (2.12)$$

- ✓ Les puissances actives et réactives statoriques s'expriment par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Re} \{ \vec{V}_s \times \vec{I}_s \} = (v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \\ Q_s = \text{Im} \{ \vec{V}_s \times \vec{I}_s \} = (v_{sq}i_{sd} - v_{sd}i_{sq}) \end{cases} \quad (2.13)$$

- ✓ Les puissances statoriques actives et réactives sont représentées par [6] :

$$Cem = p \frac{M}{Lr} (i_{sq} \Phi_{sd} - i_{sd} \Phi_{sq}) \quad (2.14)$$

$$Cem = p \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (2.15)$$

2.7 Modèle simplifié de la MADA

En ce qui concerne la commande vectorielle de la MADA, il est préférable d'opter pour le système de coordonnées d-q associé au champ tournant, qui est synchronisé avec la fréquence du réseau électrique de 50 Hz. Ainsi, le repère de Park sera aligné avec le flux statorique (voir figure 2.5).

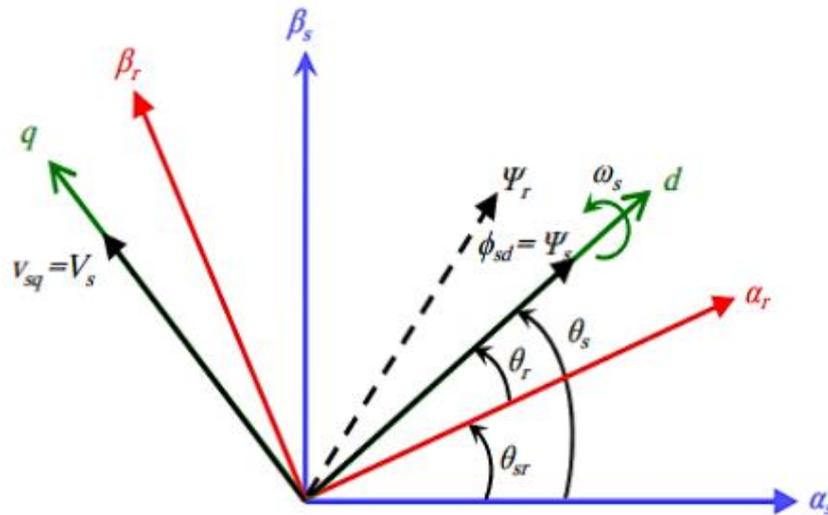


Figure 15 :Orientation du flux statorique.

En supposant donc que la résistance statorique R_s peut être négligée (le cas d'une MADA de grande puissance [12]) et que le flux statorique reste constant (ce qui est le cas lorsque la MADA est connectée à un réseau stable), et est aligné sur l'axe d, nous pouvons conclure :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = cst \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \mathbf{0} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (2.17)$$

Donc les expressions des puissances deviennent :

$$\begin{cases} P_{S_{ref}} = V_s i_{sq} \\ Q_{S_{ref}} = V_s i_{sd} \end{cases} \quad (2.18)$$

Le contrôle de la MADA se fait par le côté rotor dès que le stator de la MADA est directement connecté au réseau. Afin de commander la MADA, nous devons écrire les expressions des tensions du rotoriques et les puissances en fonction des courants du rotor. :

En se basant sur l'équation (2.17), il est possible de rédiger les équations qui relient les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (2.19)$$

En substituant les courants statoriques dans l'équation des flux(2.12) par l'expression (2.19),on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \Psi_s \\ \phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2.20)$$

Avec : $\sigma = 1 - (M^2/L_s L_r)$ (coefficient de dispersion de Blondel).

En substituant à l'équation (2.20) l'expression des flux rotoriques par leurs expressions dans l'équation (2.10), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.21)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + -g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.22)$$

Nous concluons que les régulateurs des courants rotoriques i_{rd} et i_{rq} nous donnent les tensions rotoriques V_{rd} et V_{rq} (en tenant compte des termes de couplage).

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone,

L'adaptation des équations des puissances (2.13) au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd}=0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{sq} \\ Q_s = V_s i_{sd} \end{cases} \quad (2.23)$$

Dans l'équation (2.23), en substituant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (2.19), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = (V_s \frac{\Psi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd}) \end{cases} \quad (2.24)$$

Comme nous le remarquons, les puissances P_s et Q_s sont proportionnelles aux courants i_{rq} et i_{rd} respectivement. Il est possible de les contrôler de manière linéaire en ajustant les deux éléments du vecteur courant rotorique.

L'étude précédente nous permet de définir le schéma bloc simplifié de la MADA (Figure 2.6).

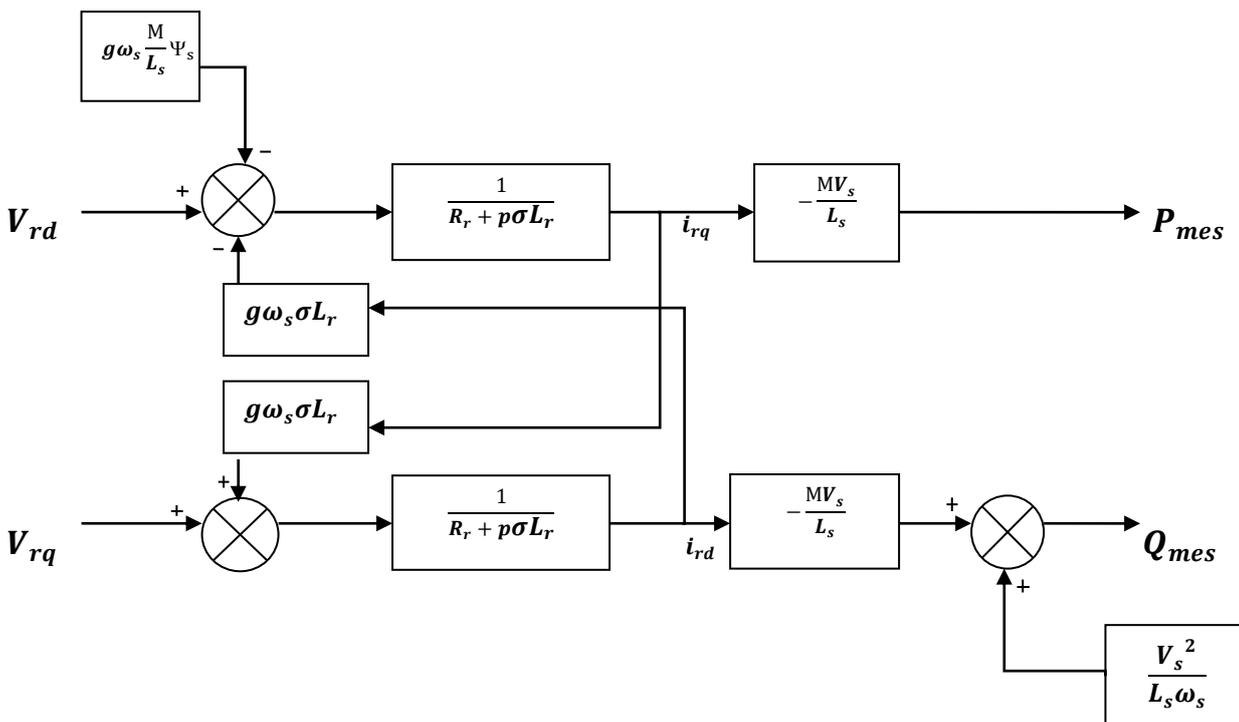


Figure 16 : Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

3. Synthèse du régulateur PI :

La synthèse des régulateurs requis pour effectuer la commande en puissance active et réactive de la MADA sera effectuée. Le PI demeure le régulateur le plus couramment employé pour contrôler la MADA en génératrice [31], ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Il est facile et rapide à mettre en place tout en garantissant des résultats satisfaisants [29]. Les régulateurs de chaque axe ont pour fonction de réduire la différence entre les puissances actives et réactives des références et la puissance active et réactive mesurée. La fonction de transfert du régulateur est attribuée à notre système par :

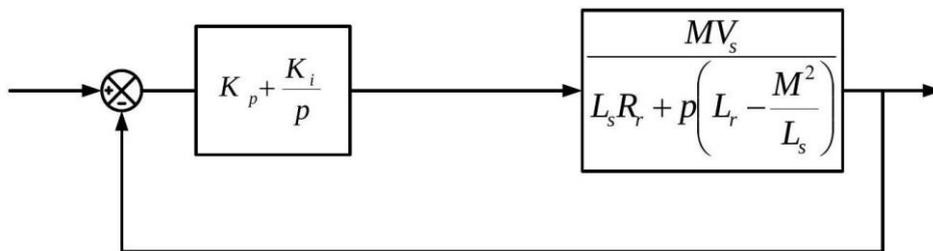


Figure 17: Système régulé par un régulateur PI

En utilisant le régulateur PI, la fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est représentée par :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (2.25)$$

La méthode utilisée pour la synthèse des régulateurs est celle de compensation des pôles [30]. Nous obtiendrons donc l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (2.26)$$

Il convient de souligner que la réduction des pôles n'est bénéfique que si les paramètres de la machine sont bien connus, car les bénéfices des correcteurs en dépendent directement. Si tel n'est pas le cas, la régulation sera inefficace. En compensant la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci se transforme en :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (2.27)$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau_r p} \text{ Avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (2.28)$$

Lors de la simulation, on sélectionnera le temps de réponse τ_r pour trouver le meilleur équilibre entre performances et rapidité. De plus, une valeur inappropriée entraînerait des perturbations pendant les périodes de transition et entraînerait des dépassements et des instabilités indésirables[26].

Les bénéfices des correcteurs seront donc calculés en fonction des paramètres de la machine de la manière suivante :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{MV_s} \end{cases} \quad (2.29)$$

La méthode de la compensation des pôles n'est évidemment pas la seule option pour synthétiser les régulateurs PI. Cependant, cette approche présente l'avantage de s'appliquer rapidement à une fonction de premier plan [30].

4. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est un dispositif électronique de puissance utilisé pour convertir le courant continu en courant alternatif. Il fonctionne en utilisant des transistors (tels que les IGBT, GTO, MOSFET) et opère par commutation forcée. Sa commande peut se faire de manière conventionnelle ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans cette étude, nous utilisons la technique MLI pour contrôler l'onduleur de tension. Celui-ci est constitué de trois bras indépendants, chacun équipé de deux interrupteurs composés d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Ces interrupteurs permettent de réguler les tensions ou les courants envoyés à la machine avec une amplitude et une fréquence variables. L'alimentation du rotor de la MADA se fait via un onduleur de tension à deux niveaux équipé de dispositifs semi-conducteurs commandés pour l'ouverture et la fermeture. Pour simplifier la modélisation du convertisseur de puissance, nous supposons que les interrupteurs semi-conducteurs fonctionnent de manière idéale.

La structure d'un onduleur à deux niveaux est montrée sur la figure (2.8) suivant [10] :

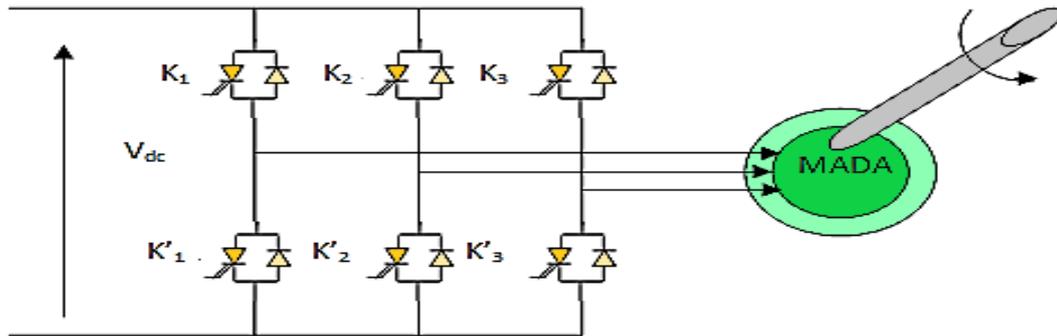


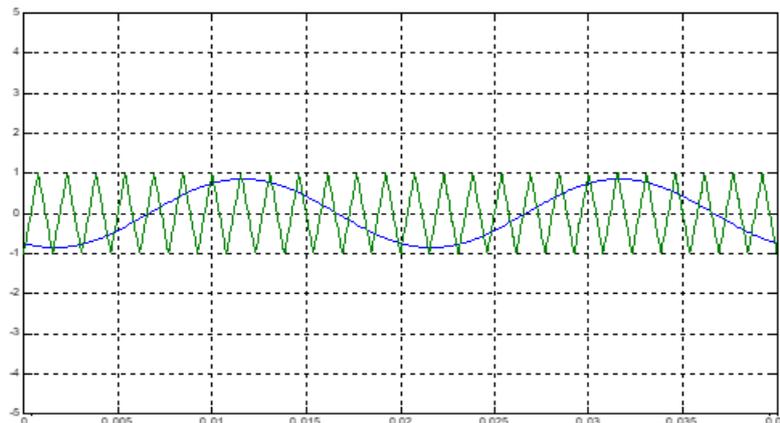
Figure 18: Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA Le model algébrique d'un onduleur à deux niveaux est donné par [7] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

Où S_a S_b S_c sont des fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs (Lorsque l'interrupteur haut d'un bras de l'onduleur est fermé, 0 quand il est ouvert) [1].

3.4 Modulation de largeur d'Impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) implique de générer chaque cycle de la tension de sortie de l'onduleur à l'aide d'une série d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires, dont les largeurs sont ajustées pour se rapprocher d'une forme sinusoïdale. Cette technique permet de reconstruire ces tensions (ou courants) à partir d'une source de tension continue et de fréquence fixe. Le réglage se fait en contrôlant les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs ainsi que les séquences d'opération. Le principe de la modulation sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence, appelé signal modulant, et un signal de référence, appelé signal porteuse. Le rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante est choisi pour équilibrer une bonne suppression des harmoniques et un rendement optimal de l'onduleur.



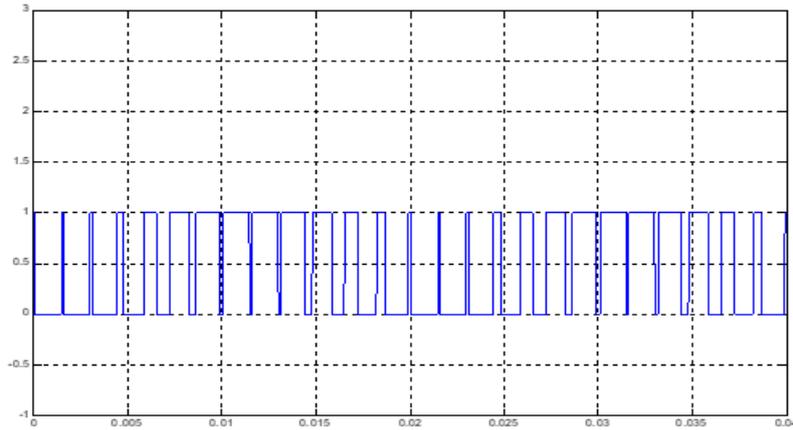


Figure 19: Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

5. Validation par simulation numérique de la stratégie de contrôle vectoriel :

La stratégie de contrôle vectoriel appliquée à la MADA a été vérifiée par des essais de simulation à l'aide de l'environnement de simulation Matlab/Simulink. Le modèle de machine asynchrone à double alimentation utilisé dans cette simulation est celui dont les paramètres sont décrits dans les tableaux (2.1) et (2.2).

Paramètre	Valeur
Puissance nominale P_N , [kW]	1.5
Tension nominale V_N , [V]	220
Fréquence nominale f_N [Hz]	50
Nombre de paires de pôles	2
Vitesse nominale [tr/min]	1420
$\cos \varphi$	0.82

Tableau.2.1. La plaque signalétique du moteur asynchrone à rotor bobiné

Paramètre	Valeur
La résistance statorique R_s	4.700 Ω
L'inductance cyclique statorique L_s	0.393H
La résistance rotorique R_r	0.500 Ω
L'inductance cyclique rotorique L_r	0.023H
L'inductance mutuelle stator/rotor L_m	0.089H

Tableau 2.2 Paramètres de la machine utilisée

On a effectué deux tests de simulation :

1. **Première essai** : la machine fonctionne en régime hypo-synchrone, le rotor de la MADA étant entraîné à une vitesse de 1400 tr/min.

2. **Deuxième essai** : présente le passage du régime hypo-synchrone au régime hyper-synchrone le rotor de la MADA étant entraîné à une vitesse de 1400 tr/min, suivi d'une augmentation jusqu'à une vitesse de 1600 tr/min.

Première Essai :

Sur la figure (2.10) :

- La première figure montre la vitesse du rotor.
- La deuxième figure présente le système de tension d'alimentation triphasée (V_a , V_b , V_c) ; ce système est équilibré.
- La troisième figure affiche l'évolution des courants du rotor du MADA .
- Les deux dernières figures de la figure (2.10) illustre l'évolution de la puissance active envoyée au réseau au stator P_s , ainsi que sa consigne, tout en gardant la puissance réactive au stator Q_s à zéro. De plus, il montre la puissance active au niveau du rotor P_r . Dans le cas du mode hypo-synchrone, la puissance active au niveau du rotor P_r est positive, indiquant que le rotor absorbe l'énergie du réseau. Il est important de se rappeler que la puissance P_r est directement liée à la puissance P_s , le facteur de proportionnalité étant le glissement. Pour améliorer la qualité de l'énergie réinjectée dans le réseau, la puissance réactive Q_s est maintenue à zéro, ce qui entraîne un facteur de puissance unitaire côté stator.

En vue de mieux apprécier la capacité de la stratégie de contrôle vectoriel des puissances de la MADA, nous avons imposé une consigne pour la puissance active P_s sous la forme d'un créneau variant entre 100 et 600 W.

La première ligne de la figure (2.11) illustre l'évolution des deux composantes de la tension statorique directe u_{sd} qui est nulle et quadratique u_{sq} qui est constante.

La réponse des courants de rotor du système de contrôle de puissance, comme illustré dans les deuxième et troisième lignes de la figure (2.11) de MADA, a fait preuve d'une rapidité et d'une précision remarquables pour répondre à ce critère.

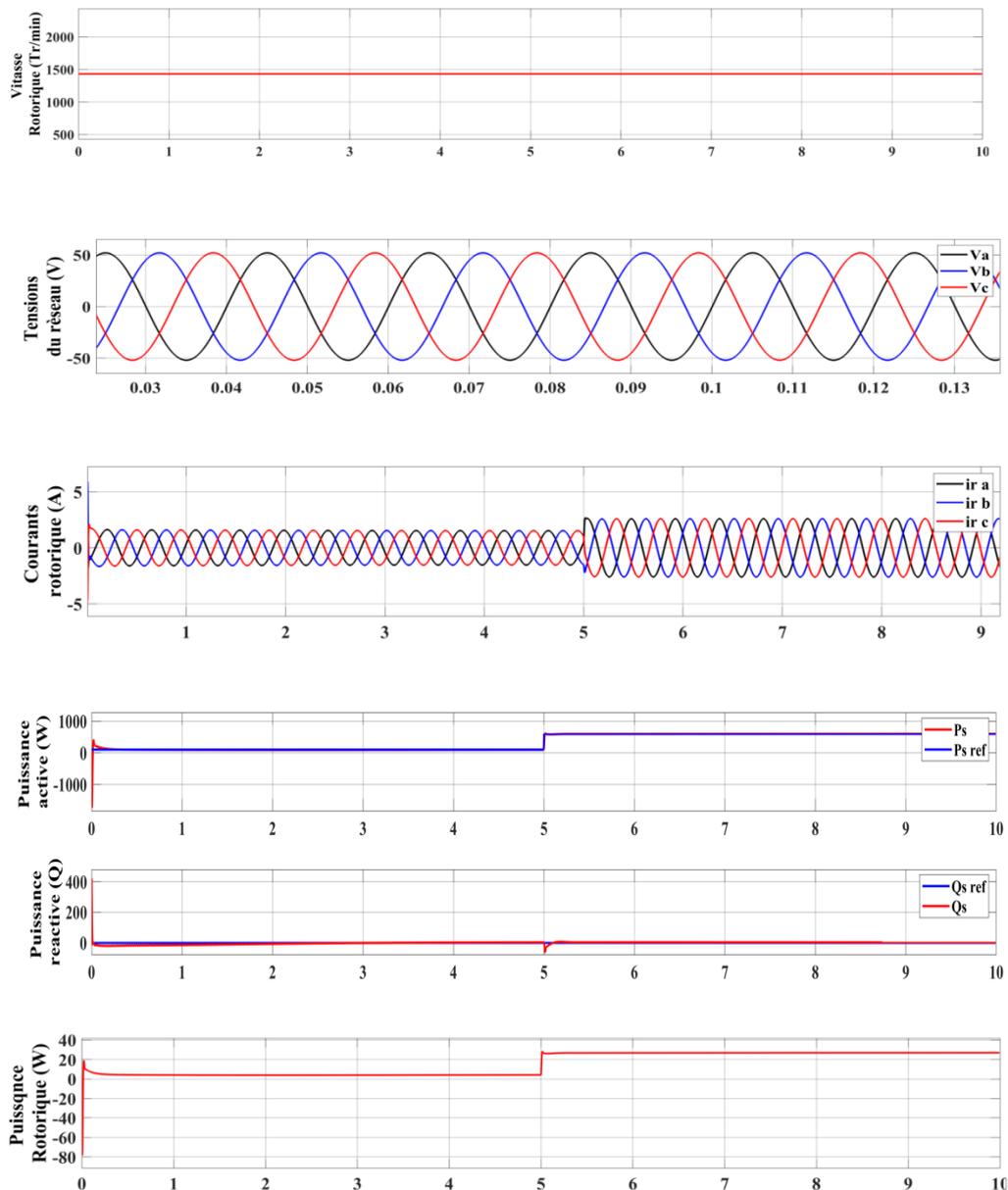


Figure 20: Du haut en bas : la vitesse du rotor (tr/min), les tensions du réseau, les courants rotoriques, les puissances active et réactive statoriques, la puissance active du rotor.

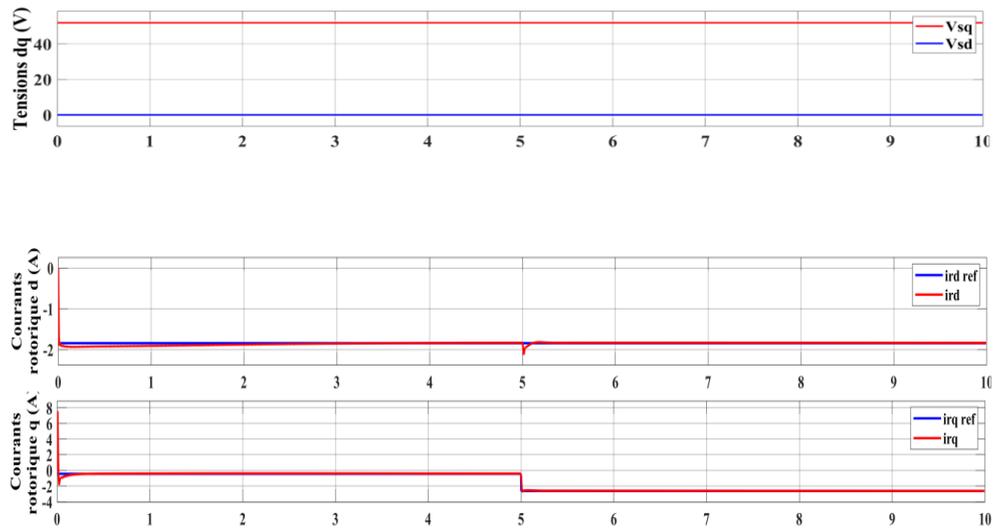


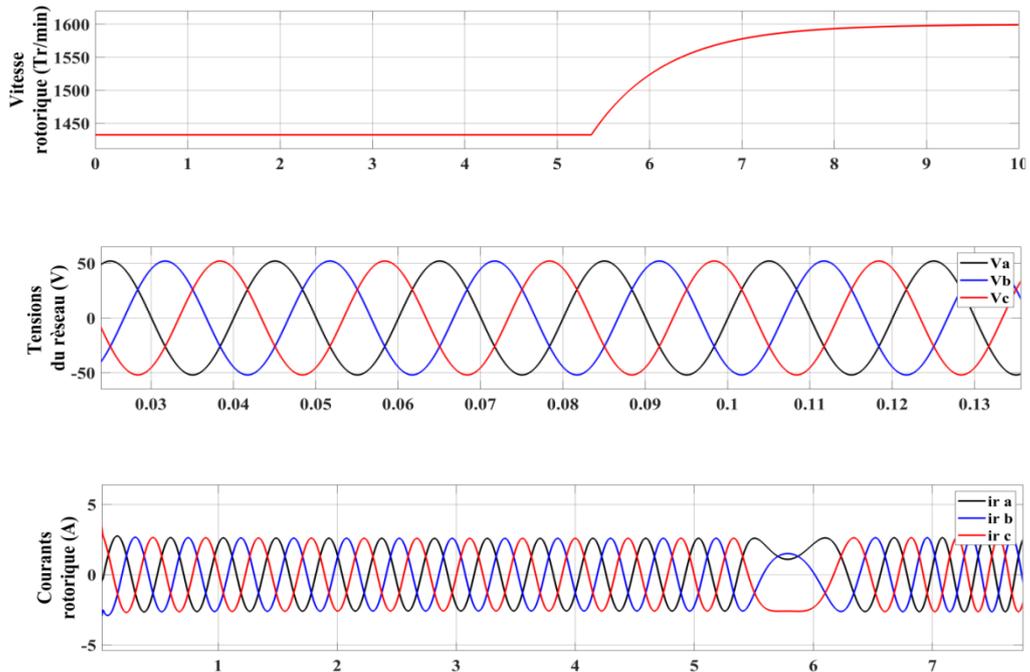
Figure 21 : Du haut en bas : les composantes de la tension statorique, les composantes des courants rotoriques directe et en quadrature et leurs références.

Deuxieme Essai :

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement des courants et de la puissance du rotor P_r , on a appliqué une vitesse sous forme d'un créneau variant entre 1400 et 1600 tr /min (voire la 1^{ère} figure).

La 3^{ème} figure de la figure (2.12) démontre le phénomène d'inversion de l'ordre des phases des courants rotoriques lorsque la vitesse du rotor atteint la vitesse synchrone de 1500 tr/min.

Dans La dernière figure de la figure (2.12), en remarque que la puissance P_r devient négative ce qui indique que la MADA est entrain de fournir une puissance active par son stator et par son rotor à la fois.



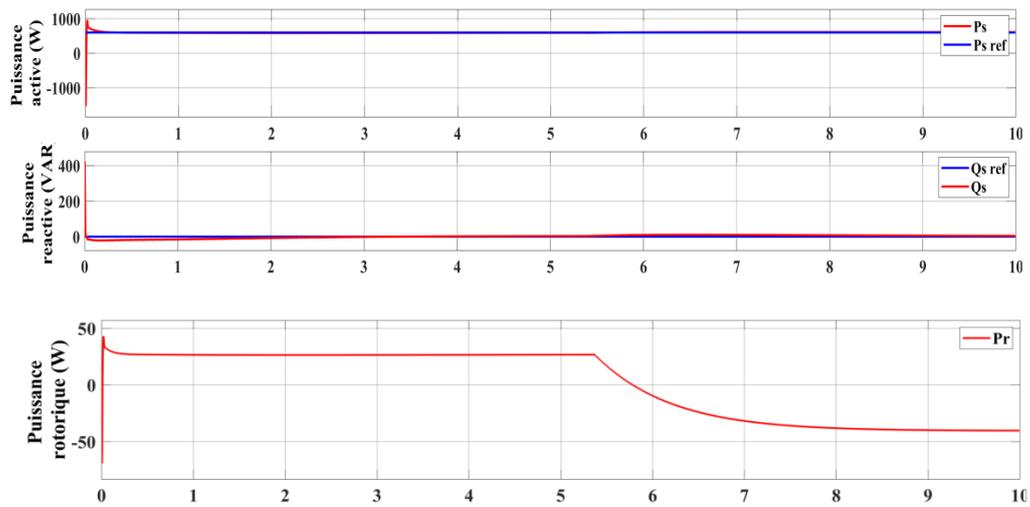


Figure 22:Du haut en bas : la vitesse du rotor (tr/min), les tensions du réseau, les courants rotoriques , les puissances active et réactive statoriques ,la puissance active du rotor.

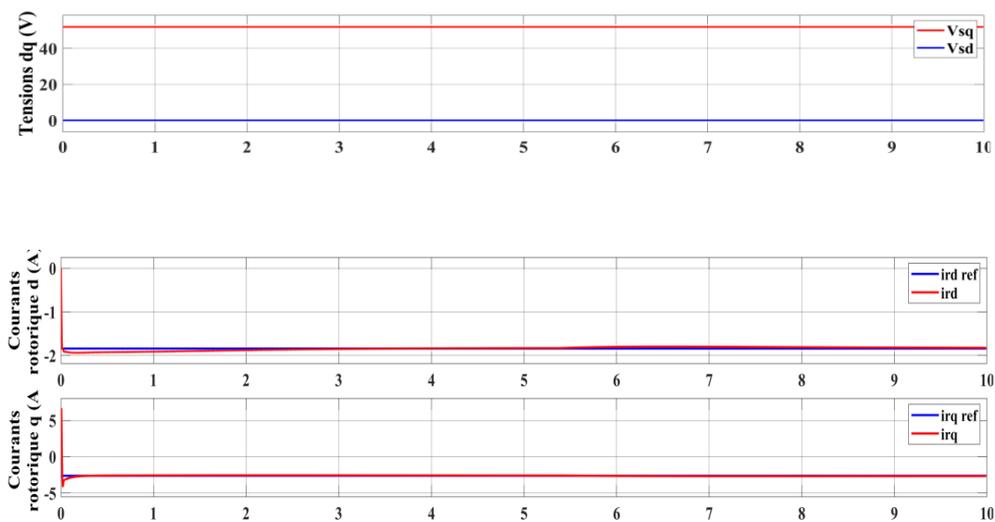


Figure 23 :Du haut en bas : les composantes de la tension statorique, les composantes des courants rotoriques directe et en quadrature et leurs références.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la commande du convertisseur côté machine, qui assure l'alimentation des enroulements du rotor de la MADA, dans le but de ramener les différentes composantes du courant à leurs valeurs de référence. Pour appliquer le principe de la commande vectorielle, il était nécessaire de mener une modélisation de cette machine en considérant le système était équilibré. Les lois de commande de ce système, qui sont régies par les exigences d'orientation du flux statorique, ont été appliquées. Les résultats de simulation montrent que la stratégie de la commande vectorielle assure à la fois un découplage de contrôle de la puissance active et réactive statoriques, une bonne poursuite des valeurs de consignes imposées avec une réduction des oscillations sur les puissances fournies au réseau. De cette façon, la qualité de l'énergie générée se trouve alors nettement améliorée et les effets des contraintes mécaniques exercées sur les différents arbres de transmission seront diminués, ce qui permet d'augmenter leur durée de vie et de réduire les coûts de la maintenance.

Chapitre 3

Strategie de contrôle du convertisseur cote reseau de la MADA

1. Introduction :

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter la stratégie de contrôle nécessaire pour le convertisseur côté réseau (CCR), celui-ci étant connecté entre le bus CC et le réseau électrique par l'intermédiaire d'un filtre RL. Le convertisseur CCR possède deux fonctions : maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique. Le contrôle effectue les deux tâches suivantes : contrôler les courants traversant le filtre RL et contrôler la tension du bus DC.

2. Commande vectorielle du CCR :

2.1 Modélisation du CCR :

Différentes méthodes sont disponibles pour superviser le convertisseur du côté du réseau CCR [32]. Nous nous contenterons dans notre travail d'une méthode simple qui consiste à appliquer le principe de la commande vectorielle de la même façon que celle employée pour la commande des machines à courant alternatif. En réalité, ce convertisseur permet de contrôler deux entrées supplémentaires : la tension du rail continu U_{dc} peut être maintenue à une valeur constante en contrôlant la composante directe du courant du réseau i_d , tandis que la puissance réactive peut être contrôlée en contrôlant la composante en quadrature i_q du courant du réseau.

Une structure à deux niveaux est présentée dans la figure (3.1) : le côté continu est connecté au rail continu alimentant le convertisseur rotorique, tandis que le côté alternatif est directement connecté au réseau grâce à un filtre ($R_f - L_f$)

En mettant en pratique la loi des mailles sur le côté opposé :

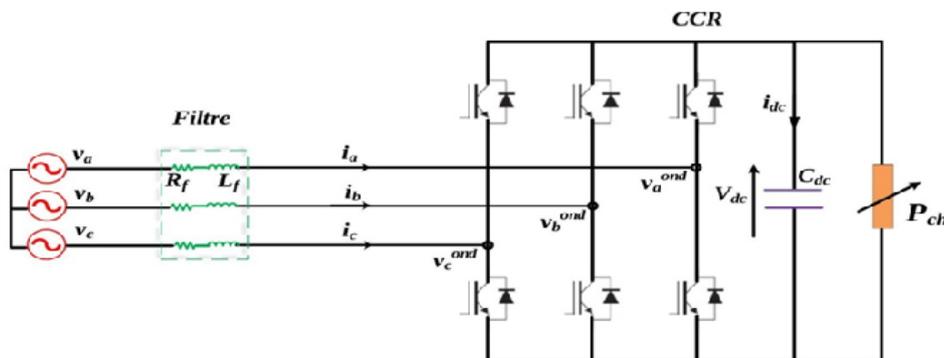


Figure 24 : Structure du convertisseur côté réseau CCR.

En utilisant la loi des mailles pour le côté opposé, les équations de tensions du convertisseur côté du réseau électrique peuvent être rédigées de la manière suivante [33] :

$$[v_{abc}] = [R_f][i_{abc}] + [L_f] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + [v_{abc}^{ond}] \quad (3.1)$$

Avec:

$$[v_{abc}] = [v_a \quad v_b \quad v_c], [i_{abc}] = [i_a \quad i_b \quad i_c], [R_f] = R_f \times I_{3 \times 3}, [L_f] = L_f \times I_{3 \times 3},$$

$$[v_{abc}^{ond}] = [v_a^{ond} \quad v_b^{ond} \quad v_c^{ond}].$$

Si le conducteur du neutre n'est pas connecté, l'équation (3.1) peut être rédigée en utilisant la transformation triphasé/biphasé dans le référentiel synchrone (dq) à la vitesse ω_s , comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = [R_f] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + [L_f] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_f \omega_g \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d^{ond} \\ v_q^{ond} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Toutefois, la formule du bus continu est fournie par :

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{rotor} - i_{dc} \quad (3.3)$$

Dans les référentiels synchrones (dq) tourne au vitesse ω_s et si le conducteur du neutre n'est pas relié, l'équation (3.4) s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_f \omega_g \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_d^{ond} \\ v_q^{ond} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

2.2 Application de la commande vectorielle à la commande des courants traversant les filtres :

Il est possible de réorganiser l'équation (3.4) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} v_d &= R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} - L_f \omega_s i_q + v_d^{ond} \\ v_q &= R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} + L_f \omega_s i_d + v_q^{ond} \end{aligned} \quad (3.5)$$

En se basant sur l'équation (3.5), il est possible de calculer les deux éléments des tensions à fournir par l'onduleur pour réguler les courants triphasés fournis par le réseau. Ces tensions de contrôle se manifestent par :

$$\begin{aligned} v_d^{ond} &= - \left(R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} \right) + L_f \omega_s i_q + v_d \\ v_q^{ond} &= - \left(R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} \right) - L_f \omega_s i_d + v_q \end{aligned} \quad (3.6)$$

Nous constatons que les deux équations du système (3.7) renferment des systèmes de premier ordre en ce qui concerne les composantes des courants.

La constante de temps inverse est $T_f = \frac{L_f}{R_f}$. Les termes de découplage croisés entre les axes direct et en quadrature sont présents dans les équations (3.7) pour les séquences directe et inverse respectivement. En général, ces termes de couplage sont supprimés par une méthode de compensation traditionnelle.

Dans un premier temps, on ne prend pas en compte les termes de couplage pour réguler les courants (i_d, i_q) . Ces termes seront ajoutés aux sorties des régulateurs correspondants pour obtenir les tensions de référence (v_d^{ond*}, v_q^{ond*}) à synthétiser par l'onduleur côté CCR.

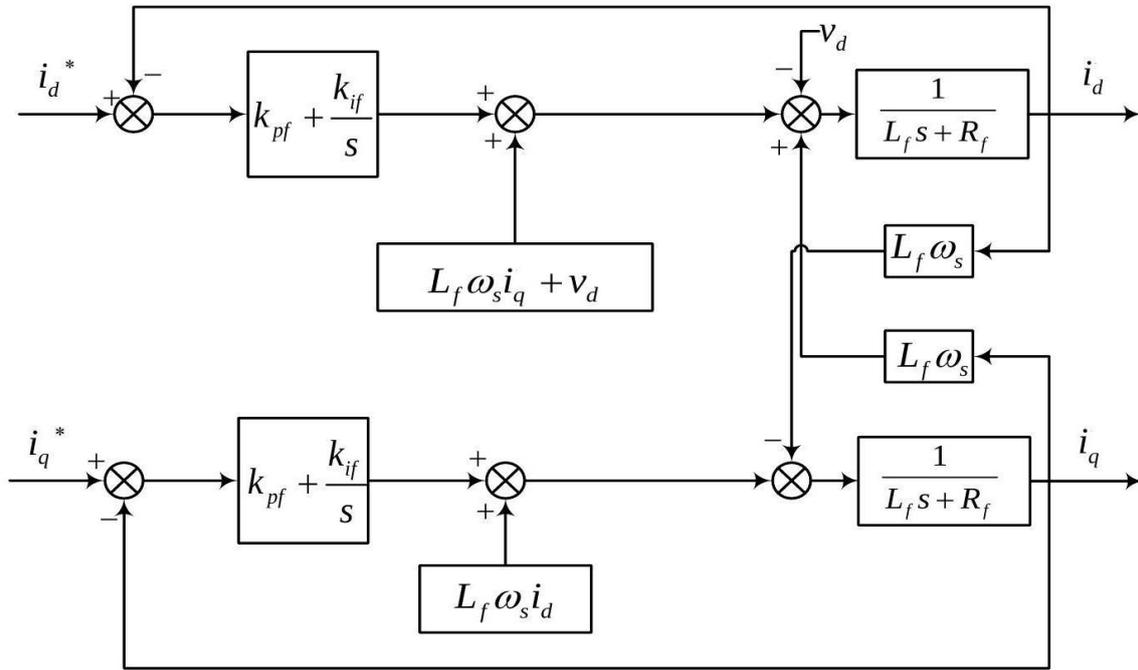


Figure 25: Schéma de principe du contrôle vectoriel des courants traversant le filtre RL.

Ainsi, l'équation (3.7) peut être réécrite de la manière suivante :

$$\begin{aligned} v_d^{ond*} &= -v_d^{reg} + v_d^{comp} \\ v_q^{ond*} &= -v_q^{reg} + v_q^{comp} \end{aligned} \tag{3.7}$$

Les sorties des régulateurs (v_d^{reg}, v_q^{reg}) correspondant aux courants (i_d, i_q) respectivement sont donc définies par :

$$\begin{aligned} v_d^{reg} &= R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} \\ v_q^{reg} &= R_f i_q + L_f \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \tag{3.8}$$

Cependant, les termes de couplage (v_d^{comp}, v_q^{comp}) se définissent par :

$$\begin{aligned} v_d^{comp} &= L_f \omega_s i_q + v_d \\ v_q^{comp} &= -L_f \omega_s i_d + v_q \end{aligned} \quad (3.9)$$

Les sorties des régulateurs (v_d^{reg}, v_q^{reg}) qui représentent les grandeurs de commande lorsqu'on utilise des régulateurs de type PI sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{aligned} v_d^{reg} &= k_{pf}(i_d^* - i_d) + k_{if} \int (i_d^* - i_d) dt \\ v_q^{reg} &= k_{pf}(i_q^* - i_q) + k_{if} \int (i_q^* - i_q) dt \end{aligned} \quad (3.10)$$

2.3 Dimensionnement des régulateurs des courants :

La mise en place du régulateur proportionnel intégral (PI) pour contrôler les courants de lignes est aisée et facile, tout en assurant des performances très satisfaisantes.

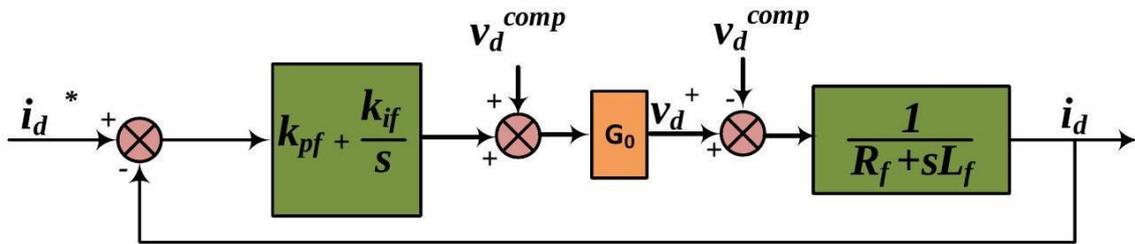


Figure 26: Boucle de régulation des courants de ligne par un régulateur PI

Comme référence, la figure (3.3) illustre la boucle d'asservissement du courant, dont le système de premier ordre correspondant est indiqué par la première ligne du système d'équations (3.9). Effectivement, en comparant cette équation à celle de la première ligne de l'équation (3.11), nous obtiendrons :

$$v_d^{reg} = R_f i_d + L_f \frac{di_d}{dt} = k_{pf}(i_d^* - i_d) + k_{if} \int (i_d^* - i_d) dt \quad (3.11)$$

En modifiant la forme de Laplace de l'équation (3.12), nous obtenons :

$$R_f I_d(s) + L_f s I_D(s) + \left(k_{pf} + \frac{k_{if}}{s}\right) I_D(s) = \left(k_{pf} + \frac{k_{if}}{s}\right) I_d^*(s) \quad (3.12)$$

En considérant le courant de ligne mesuré comme une grandeur de sortie tandis que le courant de référence $I_d^*(s)$ comme une grandeur d'entrée, ceci conduit à la fonction de transfert de second ordre suivante :

La fonction de transfert de second ordre suivante est obtenue en prenant le courant de ligne mesuré comme une grandeur de sortie et le courant de référence $I_d^*(s)$ comme une grandeur d'entrée.

$$\frac{I_d(s)}{I_d^*(s)} = \frac{k_{pf}s + k_{if}}{s^2 + (R_f + k_p)s + L_f + k_i} \quad (3.13)$$

Des résultats similaires sont obtenus pour les autres éléments des courants. Pour évaluer les deux coefficients k_{pf} et k_{if} qui caractérisent ce régulateur, nous allons identifier le dénominateur du transfert (4.15) à la forme canonique d'un second ordre défini par le couple (ω_n, ξ) , c'est-à-dire :

$$s^2 + (R_f + k_{pf})s + L_f + k_{if} = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.14)$$

ω_n et ξ sont respectivement la pulsation propre et le coefficient d'amortissement. Les coefficients k_{pf} et k_{if} dont il est question sont fournis par :

$$\begin{cases} k_{if} = \omega_n^2 - L_f \\ k_{pf} = 2\xi\omega_n - R_f \end{cases} \quad (3.15)$$

Prenons l'exemple d'un coefficient d'amortissement unitaire ($\xi = 1$), ce qui donne au second ordre canonique un pôle réel double correspondant à $s = -\omega_n$. Si tel est le cas, nous pouvons ajouter :

$$s^2 + \frac{R_f + k_{pf}}{L_f} s + \frac{L_f + k_{if}}{L_f} = (s + \omega_n)^2 \quad (3.16)$$

Le concepteur a la possibilité de choisir les pôles du système en boucle fermée de manière à ce que les dynamiques correspondantes à ceux-ci pour une pulsation ω_n soient x fois plus rapides que celles relatives au pôle du système en boucle ouverte définie par la constante de temps $\frac{L_f}{R_f}$:

$$\omega_n = \frac{x}{\frac{L_f}{R_f}} \quad (3.17)$$

3. Expressions des puissances active et réactive au réseau :

En négligeant les pertes dans la résistance R_f du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère $d - q$ lié au champ tournant statorique ($V_{sd} = 0$), les équations sont donc définies par :

En excluant les variations de la résistance R_f du filtre RL et en prenant en considération l'orientation du repère $d - q$ lié au champ tournant statorique ($V_{sd} = 0$), les équations sont donc :

$$\begin{cases} P_f = V_{sq} \cdot i_{fd} \\ Q_f = V_{sq} \cdot i_{fq} \end{cases} \quad (3.18)$$

Pour imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici P_f^* et Q_f^* , on peut donc utiliser ces relations pour imposer les courants de référence suivants :

$$\begin{cases} i_{fd}^* = \frac{Q_f^*}{V_{sq}} \\ i_{fd}^* = \frac{P_f^*}{V_{sq}} \end{cases} \quad (3.19)$$

La puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique est régulée par la composante directe du courant. De son côté, la composante en quadrature sert à contrôler la tension du bus continu. En utilisant ce principe, il est possible d'imposer une puissance réactive de référence nulle ($Q_f^* = 0 \text{ VAR}$)

4. Contrôle de la tension du bus continu :

Si un onduleur idéal est utilisé, la puissance totale du réseau P_g à transmettre à la charge via le bus continu est égale à la somme de la puissance active consommée au niveau de ce dernier P_{dc} et celle demandée par la charge P_{ch} , soit [34] :

$$P_{dc} = P_g - P_{ch} \quad (3.20)$$

N'oublions pas que le condensateur qui forme le bus continu consomme une puissance P_{dc} qui est exprimée par :

$$P_{dc} = V_{dc} i_{dc} \quad (3.21)$$

La tension V_{dc} correspond à la tension aux bornes du condensateur, tandis que le courant i_{dc} correspond au courant qui traverse ce condensateur. Ce dernier se manifeste à son tour par :

$$i_{dc} = C \dot{V}_{dc} = CsV_{dc} \quad (3.22)$$

Où C représente la capacité de ce condensateur et s est l'opérateur de Laplace.

En tenant compte de l'équation (3.23), l'équation (3.22) sera donnée par :

$$P_{dc}(s) = CsV_{dc}^2(s) = P_g(s) - P_{ch}(s) \quad (3.23)$$

Selon (3.23), il est évident que la quantité $V_{dc}^2(s)$ peut être utilisée pour contrôler la puissance du réseau $P_g(s)$ tandis que la puissance $P_{ch}(s)$ agit pour perturber. Si l'on prend en compte un fonctionnement à vide où $P_{ch}(s) = 0$ alors l'équation (3.23) sera :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{1}{cs} P_g(s) \quad (3.24)$$

4.1 Calcul du régulateur de la tension du bus continu :

En raison de la non-linéarité de la relation entre la puissance du réseau et la tension du bus continu, il est préférable de contrôler le carré de cette tension liée à la puissance du réseau par une simple intégration (équation 3.24) plutôt que la tension elle-même. Ainsi, il est légitime d'utiliser un régulateur PI dans cette situation. Il s'agit donc d'atteindre une dimension adéquate de ce régulateur pour garantir un réglage avec des performances très positives. La sortie en question présente une erreur de régulation :

$$e(s) = \left(V_{dc}^2(s)\right)^* - V_{dc}^2(s) \quad (3.25)$$

La dérivation de (3.25) donne :

$$se(s) = s\left(V_{dc}^2(s)\right)^* - sV_{dc}^2(s) \quad (3.26)$$

En considérant l'équation (3.24), l'équation (3.25) se transforme en :

$$se(s) = s\left(V_{dc}^2(s)\right)^* - \frac{1}{cs} P_g(s) \quad (3.27)$$

Si un régulateur de type PI est utilisé, la dérivée de l'erreur de régulation sera la suivante :

$$se(s) = -k_{pdc}e(s) - \frac{k_{idc}}{s}e(s) \quad (3.28)$$

Effectivement, en égalisant les deux équations (3.27) et (3.28), il est possible d'obtenir la grandeur de commande $P_g^*(s)$ requise pour ajuster le carré de tension du bus continu $V_{dc}^2(s)$ à sa valeur de référence, c'est-à-dire :

$$P_g^*(s) = C \left(\left(V_{dc}^2(s)\right)^* + k_{pdc}e(s) + \frac{k_{idc}}{s}e(s) \right) \quad (3.29)$$

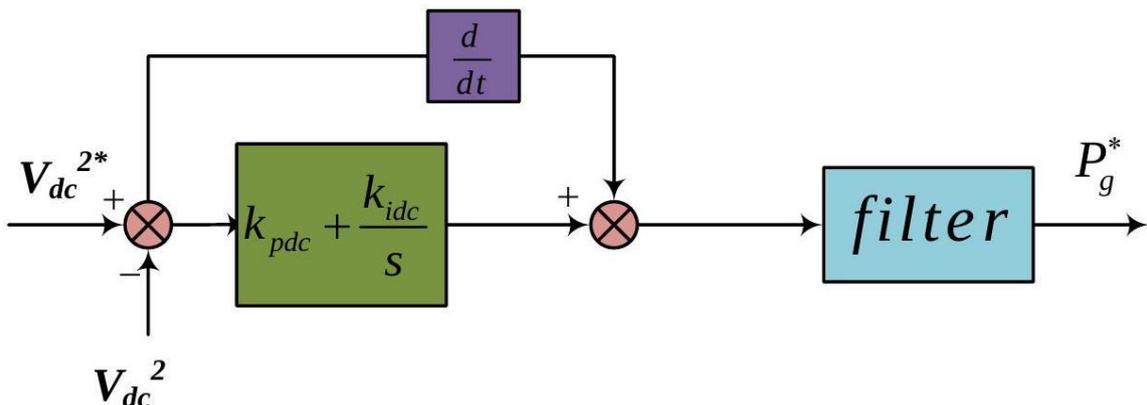


Figure 27 : Schéma de principe du contrôle du bus continu.

La multiplication de l'équation (3.28) par l'opérateur s de Laplace nous donne :

$$s^2 e(s) = -k_{pdc} s e(s) - k_{idc} s e(s) \quad (3.30)$$

L'équation (3.30) est équivalente à :

$$s^2 e(s) + k_{pdc} s e(s) + k_{idc} s e(s) = 0 \quad (3.31)$$

En mettant le terme $e(s)$ dans l'équation (3.31), nous aurons :

$$e(s)(s^2 + k_{pdc} s + k_{idc} s) = 0 \quad (3.32)$$

5. Validation par simulation numérique de la stratégie de contrôle vectoriel :

Pour vérifier les performances du contrôle vectoriel de CCR, la commande correspondante est exécutée au moyen du logiciel Matlab-Sumilink. Pour une charge DC qui devra être alimentée sous une tension asservie du bus continu dont la capacité du condensateur est de $1100\mu\text{F}$, et qui est associé à un onduleur triphasé commande en MLI, les trois courants de lignes correspondants sont filtrés moyennant un filtre RL ($R=2.2\ \Omega$; $L=6\text{e-}3\text{H}$).

Deux tests de simulation ont été réalisés :

1. Premier test : nous avons choisi les valeurs 200v et 300w comme références pour la tension du bus DC et la puissance active respectivement.

2. Deuxième test : nous avons gardé la même valeur pour la tension du bus DC et une valeur variant entre 200w et 300w pour la puissance active.

Première Essai :

La figure 3.5 donne une représentation graphique de la progression des différentes grandeurs caractérisant cet asservissement, concernant une allure fixe que doit suivre la tension du bus continu tout en maintenant une référence de puissance réactive nulle.

Nous remarquons que la tension du bus continu de même que les deux composantes des courants traversant les filtres suivent parfaitement leurs références, tandis que la composante directe de la tension

statorique est maintenue à zéro, ce qui reflète une synchronisation idéale de l'asservissement avec le réseau dans lequel on travaille.

La dernière ligne de la figure 3.5 montre le taux de distorsion harmonique des courants, on observe une faible valeur de THD qui est quasiment de 0.5% cela indique la bonne qualité du filtre RL utilisé, celui-ci permettant notamment de réduire les harmoniques.

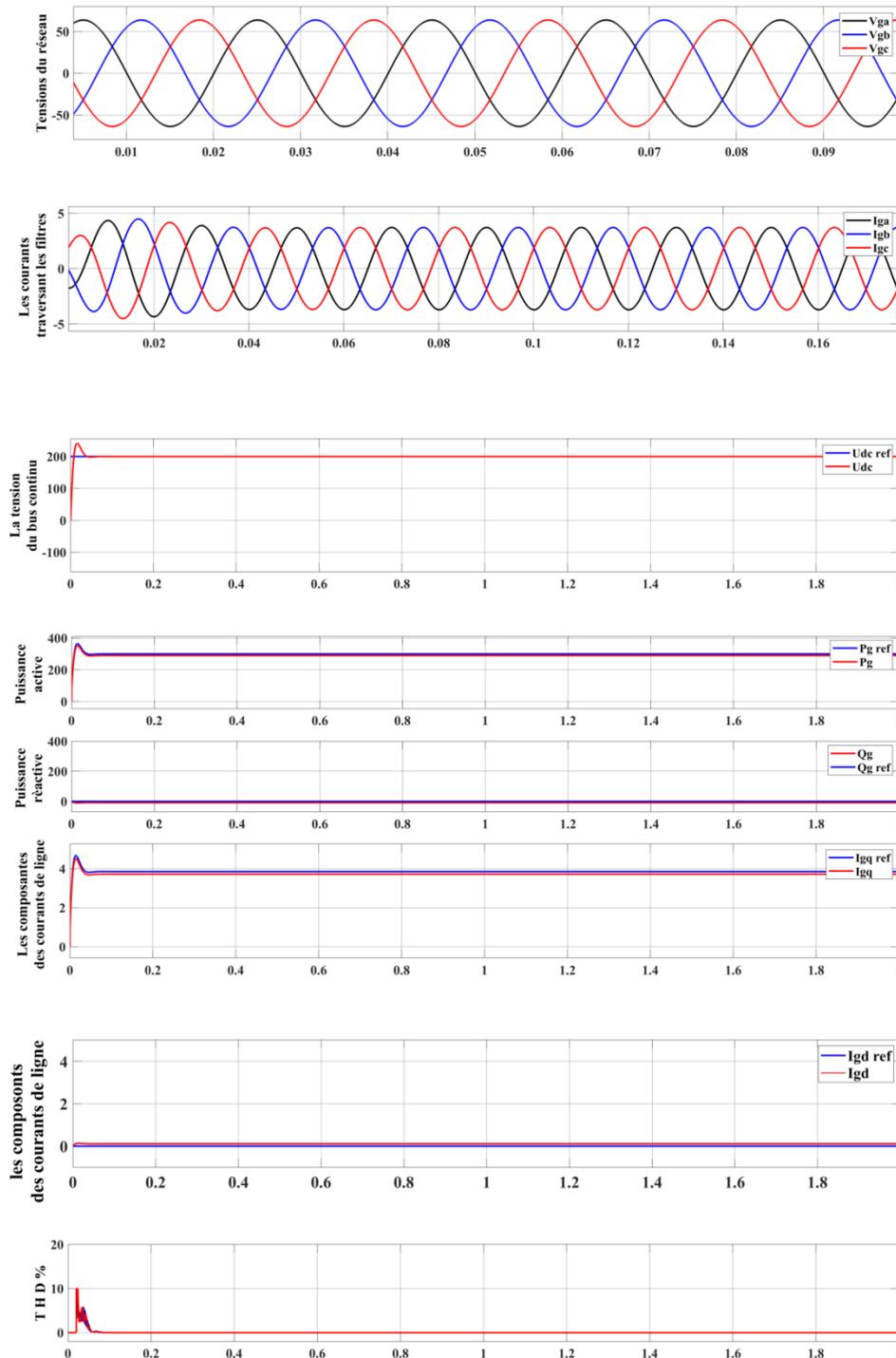


Figure 28: Evolution des grandeurs les plus représentatives du CCR

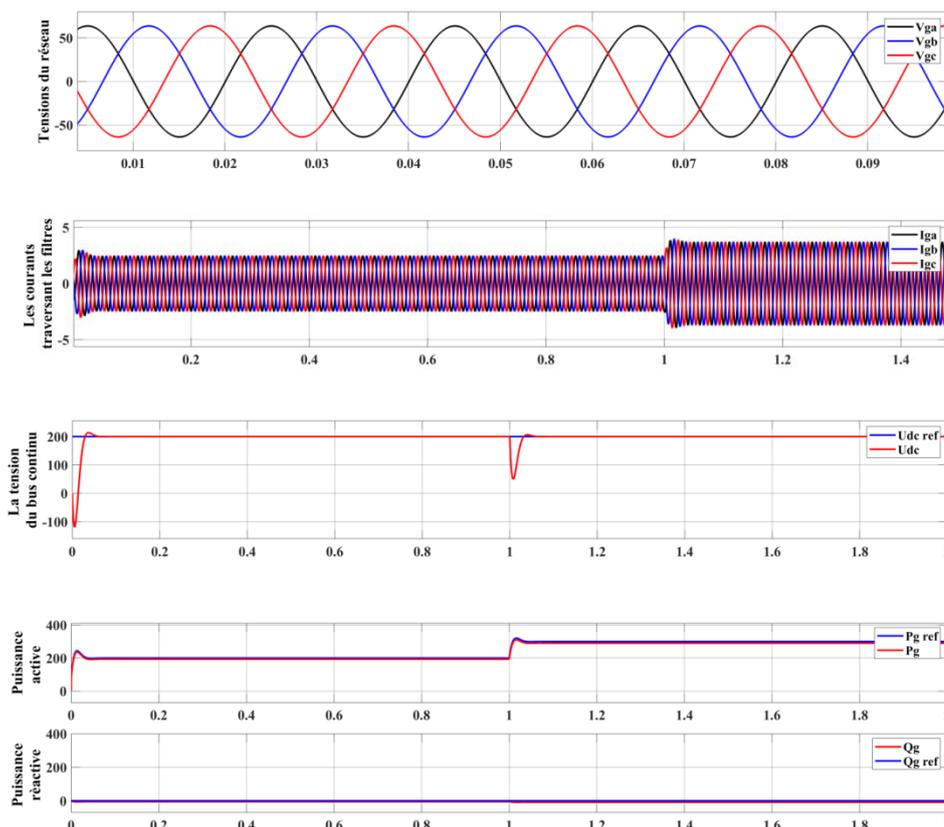
Deuxième essai :

Pour mieux comprendre et assurer le fonctionnement du contrôle vectoriel, nous avons impliqué une valeur de puissance active variant entre 200w et 300w, comme illustré dans la figure 3.6.

En observant les 2^{ème} et 3^{ème} lignes, les courants traversant les filtres et la tension du bus DC suit bien leurs consignes pendant ce test. Le contrôle vectoriel confirme donc son efficacité et sa fiabilité à répondre à cette exigence.

Une puissance réactive Q élevée peut causer des fluctuations de tension. En maintenant Q égale zéro, la tension du réseau est plus stable, ce qui améliore la qualité de l'alimentation électrique. Le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est optimal (égal à 1) lorsque Q est nul, signifiant que toute la puissance fournie est utilisée pour effectuer un travail utile. Un facteur de puissance élevé est un indicateur d'une utilisation efficace de l'énergie.

La THD est un indicateur clé de la qualité du réseau électrique. Une faible THD est essentielle pour assurer l'efficacité énergétique, la longévité des équipements et la stabilité des systèmes électriques. La mesure et la gestion proactive de la THD sont cruciales pour maintenir une alimentation électrique de haute qualité et minimiser les problèmes associés aux harmoniques.



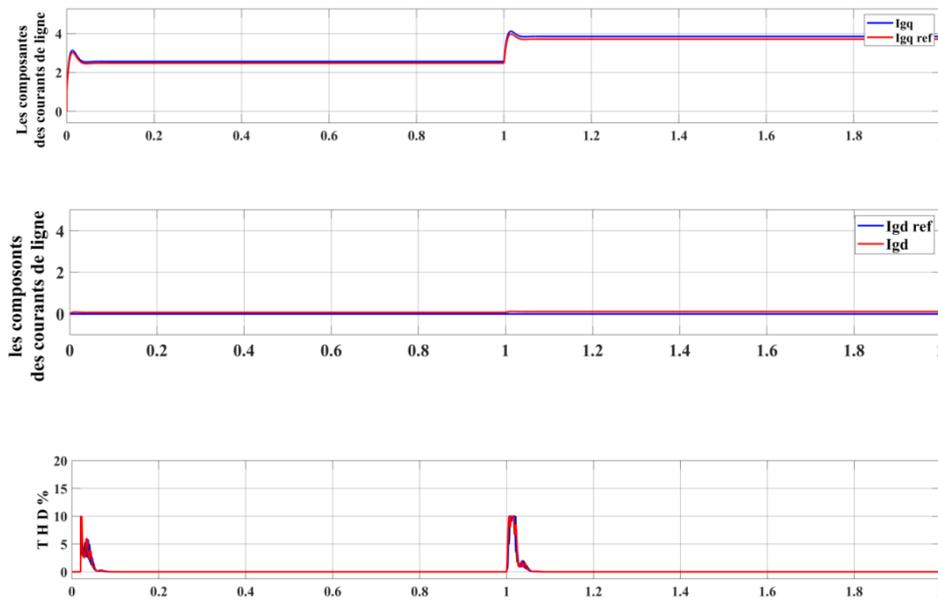


Figure 29: Evolution des grandeurs les plus représentatives du CCR

6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié et réalisé une stratégie de contrôle vectoriel du convertisseur côté réseau CCR. Nous avons commencé par la modélisation du CCR avec la commande vectorielle, en soulignant son rôle crucial dans la stabilisation de la tension du bus continu indépendamment des variations d'amplitude et de la direction de la puissance réactive générée par le MADA. Ensuite, nous avons abordé le dimensionnement du régulateur de courant, garantissant une régulation précise du courant à travers le filtre RL. L'expression des puissances actives et réactives au réseau a permis de mieux comprendre l'interaction entre le CCR et le réseau électrique. Par ailleurs, le contrôle du bus continu a été optimisé grâce à un calcul précis du régulateur de tension, assurant une stabilité optimale du système.

Finalement, la validation numérique de la stratégie de contrôle vectoriel a prouvé sa capacité à maintenir la tension du bus continu stable tout en régulant de manière fiable les puissances active et réactive.

Le travail effectué dans ce chapitre permet donc de contribuer de manière significative à l'amélioration des performances et de la stabilité des systèmes d'énergie éolienne, afin de préparer la voie à des applications plus efficaces et plus robustes de cette technologie.

CONCLUSION GENERALE

Les besoins en énergie augmentent, contrairement aux ressources énergétiques qui s'amenuisent. Les sources d'énergie renouvelables permettent non seulement de produire et d'utiliser l'énergie de manière plus efficace, mais elles offrent également un grand potentiel de réduction des gaz à effet de serre. L'énergie éolienne pour sa part reste le moyen le plus efficace et le plus économique de production d'électricité.

Dans le cadre de ce mémoire, la modélisation et le contrôle d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont étudiés de manière détaillée.

Lors du premier chapitre, nous avons examiné les bases des systèmes d'énergie éolienne, en mettant en évidence les différents types d'éoliennes et les configurations de la chaîne de convertisseurs éoliens. Le second chapitre était dédié à la modélisation et au contrôle du convertisseur côté machine (MSC), en se focalisant sur la régulation précise de la puissance active et réactive. Finalement, un troisième chapitre examine la stratégie de contrôle du convertisseur côté réseau (CCR), en mettant l'accent sur son rôle crucial dans le maintien de la stabilité du système.

Cette étude nous a permis de valider par simulation les performances de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, en démontrant sa capacité à produire de l'électricité de manière efficace et fiable, tout en préservant la stabilité du réseau électrique. Avec les résultats obtenus, nous ouvrons le chemin à des avancées importantes dans le domaine de l'énergie éolienne, ce qui offre des perspectives prometteuses pour des applications plus efficaces et plus durables de cette technologie.

En perspective, le présent travail ouvre de nombreuses directions qui pourront être exploitées dans le futur, on peut citer entre autres :

- La modélisation et le contrôle de la partie mécanique de la chaîne de conversion de l'éolienne.
- Faire recours à d'autres techniques de commande avancées de l'automatique dans le but d'améliorer les avantages et les performances obtenues avec des régulateurs de type PI.
- Réaliser l'étude expérimentale de contrôle de la chaîne de conversion éolienne.
- Étudier cette chaîne de conversion dans le cas du déséquilibre du système d'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

- [01] **MOUSSAOUI TAHA YACINE** «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique ,Université d'EL-Oued,09 sept 2015.
- [02] **TOUATI MUSTAPHA KAMEL** «Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique» Mémoire de magistère en électrotechnique, Université de Batna,15/01/2015.
- [03] **WWW.GWEC.net**
- [04] **LATRECHE MOHAMMED TAHAR**« Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» Mémoire Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif ,24/06/2012.
- [05] **BOUDIA SIDI MOHAMMED**« Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie» Thèse de Doctorat .Université de Tlemcen.2013.
- [06] **AZZOUZ TAMAARAT** « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » Thèse dedoctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider–Biskra,08/12/2015.
- [07] **www.edf.fr**
- [08] **MADJID SI BRAHIM** « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de lamachine asynchrone» Thèsededoctorat3^{eme} cycle en Électrotechnique , Université mouloud mammeri de Tizi-ouzou,16juin2015.
- [09] **METATLA SAMIR** « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger,2009.
- [10] **CHERFIA NAÏM** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens» Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri – Constantine,07/06/2010.
- [11] **DJERIRI YUCEF**« Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien» Mémoire de magister en Électrotechnique, université Djilali li abes, sidi bel-abbès, December 2009.

- [12] **DJERIRI YUCEF** «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle »Thèse de Doctorat en Electrotechnique ,Université Djilalili abes,sidibel-abbès,november2015.
- [13] **Machines électrique tome 1(j.châtelain)A.62_T.1EX1.livrer**
- [14] **MOHAMMED MALKI**« Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret» Mémoire Master en Electrotechnique,Université Aboubekr Belkaid Tlemcen,20/10/2014.
- [15] **FREDERIC POITIERS** «Etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'energie eolienne Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de doctorat Electronique et Génie Electrique, l'Université de Nantes,19décembre2003.
- [16] **BELFEDHAL ABDELKADER SEIFEDDINE** «Modélisation et commande d'une chaîne éolienneavec intégration du stockage inertiel» Mémoire de Magister Ecole doctorale de Génie Electrique,Université Ibn Khaldoun-Tiaret,
- [17] **MEGHLAOUI ISSAM** « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal» Mémoire de magister en électromécanique, Universite badji mokhtar-annaba,2009.
- [18] **TARAK GHENNAM** «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation» Thèse de doctorat en Génie Electrique, Ecole militaire poly technique d'Alger Ecole centrale de Lille, 29/09/2011.
- [19] **BOURAKI MOULOUD** «Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: Application sur un site à TINDOUF» Mémoire Magister en Génie Electrique, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2011/2012.
- [20] **BOUHEDDA ALI** «Contribution à l'étude de systemes de commande d'une éolienne» Mémoire Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri. Tizi-ouzou, 07/07/2011.
- [21] **BOULAA MAHAMMED** «commande d'une éolienne à base d'une GADA pour la production de l'énergie dans le réseau électrique» Mémoire de Fin d'Etudes en Génie Electrique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès ,2016. Références bibliographiques
- [22] **DENDOUGA ABDELHAKIM** «Contrôle des puissances active et Réactive de la machine a double alimentation (DFIM)» Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, 10/02/2010.
- [23] **MKELKOUL BAHIA** «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation» Mémoire Magister API de Génie Electrique et Electronique, Université de Tlemcen, 29/06/2011.
- [24] **YACINE ABDERRAHMANE BENCHERIF** «modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne» Mémoire deFin d'Etudes en Electrotechnique, Ecole nationale polytechnique, juin 2008.

- [25] **MALKI RIDHA** «Filtrage actif des harmoniques par une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation» Mémoire de Fin d'Etudes en génie électrique, Université Djilali Liabes, sidibel-abbès, 2016.
- [26] **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 2009.
- [27] **Litamie Toufik** «Modélisation et commande d'une MADA destinée à la production d'énergie éolienne»
- [28] **MESAI AHMED HAMZA** «Commande de la machine asynchrone à double alimentation—apport des techniques de l'intelligence artificielle»Thèse de master universite djillalili abes de sidibel-abbes, Juin 2017.
- [29] **KHIRENNAS Abd elhamid** « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue d'une application pour la Conversion de l'Énergie Éolienne», Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, École militaire polytechnique, Alger, 2010.
- [30] **F. POITIER** "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [31] **S. Mekhtoub** « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne», mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2007]
- [32] **A. Khan** "Development of a power conditioner for a PMSG-based wind energy system integrated into a weak grid." Thèse de doctorat, University of Cape Town (2020).
- [33] **A-L. NEMMOUR** ''Contribution au controle de la machine asynchrone à double alimentation''. Thèse de doctorat. Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences. 2009.
- [34] **A. L. Nemmour**, et al. "Advanced Backstepping controller for induction generator using multi-scalar machine model for wind power purposes." *Renewable Energy* 35.10 (2010):2375-2380.

