

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj – bouira-

Tasdawit Akli Muhend Ulhag – Tubirett –

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Référence :/MM/ 2024



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة أكلي محند اولحاج

-بويرة-

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

المرجع: / م م / 2024

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Electrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

TELDJOUNE Imane Amira

Et

CHEKWI Yasmine

Thème

**Contrôle d'un système éolien basé sur la MADA en utilisant
l'algorithme Super Twisting**

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

MELLAH hacene

M.C. A

Univ. Bouira

Encadreur

Ait Saadi Zohra

M.C.A

Univ. Bouira

Président

Guerish Issam

M.C.A

Univ. Bouira

Examineur

Année Universitaire : 2023 - 2024

Résumé de Travail

Ce mémoire présente la conception et l'implémentation d'un système de contrôle pour une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA), utilisant l'algorithme de contrôle en mode glissant super twisting (STSMC). La MADA est largement utilisée dans les applications d'énergie éolienne en raison de sa capacité à fonctionner efficacement à différentes vitesses de vent. L'algorithme STSMC est choisi pour sa robustesse et sa capacité à gérer les non-linéarités et les incertitudes du système. Ce travail inclut la modélisation de la MADA, le développement de l'algorithme STSMC, ainsi que la simulation et l'analyse des performances du système de contrôle proposé.

En plus de la modélisation et de l'implémentation du STSMC, ce mémoire explore également les commandes directe et indirecte de la MADA. Une comparaison détaillée des performances entre ces différentes approches de commande est effectuée pour évaluer leur efficacité respective. Les résultats montrent que l'algorithme STSMC améliore significativement la stabilité et l'efficacité du système éolien, même en présence de perturbations et de variations des conditions de fonctionnement, par rapport aux méthodes de commande directe et indirecte.

ملخص العمل

يقدم هذا العمل تصميم وتنفيذ نظام تحكم لطاحونة الرياح تعتمد على التوربين الرياح ذو المحرك اللاتزامني مزدوج التغذية (MADA) باستخدام خوارزمية التحكم الانزلاقي المتقدم (STSMC) تُستخدم MADA على نطاق واسع في تطبيقات طاقة الرياح بفضل قدرتها على العمل بكفاءة في سرعات الرياح المختلفة. تم اختيار خوارزمية STSMC لقوتها وقدرتها على التعامل مع اللاخطية وعدم اليقين في النظام. يشمل هذا العمل نمذجة MADA ، وتطوير خوارزمية STSMC ، وكذلك محاكاة وتحليل أداء نظام التحكم المقترح.

بالإضافة إلى نمذجة وتنفيذ STSMC ، يستعرض هذا العمل أيضاً التحكم المباشر وغير المباشر في MADA. تم إجراء مقارنة مفصلة بين أداء هذه الطرق المختلفة للتحكم لتقييم فعاليتها. تظهر النتائج أن خوارزمية STSMC تحسن بشكل كبير من استقرار وكفاءة نظام طاقة الرياح، حتى في وجود اضطرابات وتغيرات في ظروف التشغيل، مقارنة بأساليب التحكم المباشر وغير المباشر.

Dédicace

A mon cher père Karim

Qui m'a appris que le succès ne vient qu'avec la patience. Qui a donné ce qui était précieux et dont j'ai tiré ma force et ma fierté.

A ma mère Fatiha,

Sous les pieds de laquelle Dieu a placé le paradis et m'a facilité les épreuves par ses prières.

Maman, tu es la femme la plus forte et la plus aimante que je connaisse.

A ma deuxième mère Louiza,

Merci pour tout l'amour et le soutien que tu m'as donnés. Je suis tellement reconnaissant de t'avoir dans ma vie.

A ma sœur Khadija et mes frères Achraf et Iyad,

Vous êtes mon soutien. Je suis tellement chanceux de vous avoir comme frères et sœurs. Je vous aime tous de tout mon cœur.

A mes oncles Bougera, Tayeb, Lakhdar, Saad et Amar et mes tantes

Merci pour votre amour et votre soutien. Vous êtes tous très importants pour moi.

A mes amis morts,

Je ne vous oublierai jamais. Vous êtes toujours dans mes pensées.

Je vous remercie de faire partie de ma vie. Je suis tellement chanceux de vous avoir tous.

Fayrouz, Souhaila, Kahina, Sarah, Amira, Warda GE, Warda ,Imane, Yasmine.

Table des matières

Table des matières

Dédicace	
Liste des figures.....	iv
NOTATIONS ET SYMBOLES	vi
Introduction Générale	2
Chapitre 01 : Généralités Sur la production d'énergie éolienne.....	4
1. Introduction.....	5
2. Conception d'énergie renouvelable	5
2.1 Définition.....	5
2.2 Sources de l'énergie renouvelable.....	6
3. L'énergie éolienne	7
3.1 Définition de l'énergie éolienne et types.....	7
3.2 Les usages de l'énergie éolienne.....	8
3.3 Composants d'une éolienne	10
3.4 Configuration dans chaines de conversion éolienne.....	11
4. Machine Asynchrone double Alimentation (MADA) :	12
4.1 Description de MADA.....	12
4.2 Principe de fonctionnement de MADA	14
4.3 Domaine d'application de MADA	16
4.4 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens	17
4.5 Régimes de fonctionnement de MADA.	18
4.6 Intérêt de MADA.	19
4.7 Avantages et inconvénients de la MADA.	19
5. Conclusion.....	20
Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande.....	19
1. Introduction :.....	22
2. Modélisation de la MADA	22
i. Hypothèses et conventions.....	23
ii. Equations de la MADA	24
iii. Application de la transformation de Park à la MADA	25
iv. Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d, q ».....	26
v. Choix du référentiel	28
vi. Equation mécanique	29
vii. Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état	30
b. Alimentation de la MADA	29
c. Commande par modulation sinus-triangle	34

Table des matières

d. Commande vectorielle du MADA :.....	35
3. Résultats de simulation	36
3.1. Commande directe (Figure1)	37
3.2. Commande indirecte (Figure2)	37
3.3. Tests de robustesse figure3	38
Chapitre 03 : Algorithme super-Twisting	40
1. Modèle glissant :	38
a. Commande par mode glissant d'ordre 1	38
b. L'algorithme du super-twisting	39
2. Résultats de simulation	39
c. La commande par modèle glissant avec algorithme super twisting (Figure4)	39
d. Comparaison avec la Commande Directe et Indirecte :	40
e. Robustesse face aux changements de paramètres.....	56
4. Commentaire et Discussion sur les Tests de Robustesse des Trois Modes de Contrôle de la MADA	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion Générale	59
Bibliographie	48

Liste des figures

Liste des figures

Figure	La page
Figure 1 Sources de l'énergie renouvelable	7
Figure 2 Types de l'énergie éolienne	8
Figure 3 Composants d'une éolienne	10
Figure 4 Configuration d'une éolienne	11
Figure 5 Configuration dans chaînes de conversion éolienne	13
Figure 6 Machine asynchrone à double alimentation -structure de Kramer	15
Figure 7 Structure de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de MADA	16
Figure 8.Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA	22
Figure 9.Modèle de la machine après transformation de Park	25
Figure 10.Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation.	26
Figure 11.Choix du référentiel.	28
Figure 12.Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension.	31
Figure 13.Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.	34
Figure 14.Schéma de principe de la commande par MLI.	36
Figure15.Commande directe	36
Figure16 .Commande indirecte	36
Figure17.Tests de robustesse	37
Figure18.La commande par modèle glissant avec algorithme super twisting	41
Figure 19.Tests de robustesse	42

NOTATIONS ET SYMBOLES

NOTATIONS ET SYMBOLES

GADA	Génératrice a double alimentation
MADA	Machine à double alimentation
MAS	Machine Asynchrone
MS	Machine Synchrone
MCC	Machine à Courant Continu
f.e.m	Force électromotrice
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel Intégral
MBPC (MPC)	Model (Based) Predictive Control
MPC	Model Predictive Control
IMC	Internal Model Controller
GPC	Generalized Predictive Control
MPHC	Model Prédictive Heuristic Control
PFC	Predictive Functional Control
UPC	Unified Predictive Control
MAC	Model Algorithmic Control
V_{dr}^*, V_{qr}^*	Tensions rotoriques de référence dans le repère (d, q),
K_p, K_i	Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI,
V_{qrn}, V_{dr}	Composantes normales des tensions rotoriques,
V_{qr}, V_{dr}	Composantes équivalentes des tensions rotoriques,
ω_s, ω_r	Respectivement les pulsations des alimentations statorique et rotorique
ω	Pulsation mécanique du rotor
f_s, f_r	Respectivement les fréquence statorique et rotorique
V_s	Tension applique au stator
V_r	Tension applique au rotor

NOTATIONS ET SYMBOLES

s, r	Indices d'axes correspondants au stator et au rotor
R_s	Résistance d'une phase statorique
R_r	Résistance d'une phase rotorique
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
M	Inductance cyclique mutuelle
C_e	Couple électromagnétique de la machine
C_r	Couple résistant
J	Inertie des masses tournantes
F	Coefficient de frottement visqueux
Ω	Vitesse synchrone en rd/s
P	Nombre de paire de pole de la MADA
Φ_{snom}	Flux statorique nominal
$P_{s_{ref}}$	Puissance satatorique référence
$Q_{s_{ref}}$	Puissance réactive référence
(d, q)	Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant
$I_{ds} I_{qs}$	Courant statorique selon l'axe d, q
$I_{dr} I_{qr}$	Courant rotorique selon l'axe d, q
$\Phi_{ds} \Phi_{qs}$	Flux statorique selon l'axe d, q
$\Phi_{dr} \Phi_{qr}$	Flux rotorique selon l'axe d, q
$V_{ds} V_{qs}$	Tension statorique selon l'axe d, q
$V_{dr} V_{qr}$	Tension rotorique selon l'axe d, q
S	Opérateur dérivé de Laplace
$T_s=L_s/R_s$	Constante de temps statorique
$T_r=L_r/R$	Constante du temps rotorique

NOTATIONS ET SYMBOLES

$\delta = (1 - M^2 / L_r L_s)$	Coefficient de fuite total
$W_r = \frac{d\theta_r}{dt}$	Vitesse du référentiel synchrone par rapport au rotor
$W_s = \frac{d\theta_s}{dt}$	Vitesse du référentiel synchrone par rapport au stator
$\theta_s ; \theta_r$	Positions respectives du référentiel synchrone par rapport à l'axe.
FOC	Field oriented control
U	Commande
ΔU	Incrément de la commande

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie éolienne occupe une place de plus en plus centrale dans le paysage énergétique mondial, représentant une solution durable et écologique pour répondre à la demande croissante en électricité. Avec la prise de conscience accrue des enjeux liés au changement climatique et la nécessité de transitionner vers des sources d'énergie renouvelables, l'énergie éolienne se distingue par ses nombreux avantages environnementaux et économiques. Cette introduction vise à contextualiser l'importance de l'énergie éolienne en mettant en lumière ses bénéfices et en présentant le rôle essentiel de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans le contrôle efficace des systèmes éoliens.

L'adoption de l'énergie éolienne est cruciale pour plusieurs raisons. Premièrement, elle contribue significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, un objectif clé dans la lutte contre le réchauffement climatique. Les parcs éoliens, en capturant l'énergie cinétique du vent, produisent de l'électricité sans émission de CO₂, offrant une alternative propre aux combustibles fossiles. Cela est particulièrement pertinent dans le contexte actuel où les impacts négatifs des énergies fossiles sur l'environnement et la santé publique sont de plus en plus évidents.

Deuxièmement, l'énergie éolienne est une ressource renouvelable abondante. Contrairement aux combustibles fossiles qui sont limités et localisés, le vent est disponible dans de nombreuses régions du monde, permettant une distribution géographique diversifiée des installations éoliennes. Cette disponibilité réduit la dépendance aux importations énergétiques et augmente la sécurité énergétique des pays investissant dans cette technologie.

Troisièmement, l'industrie éolienne favorise la création d'emplois et le développement économique. La construction, l'installation, l'exploitation et la maintenance des parcs éoliens génèrent des emplois locaux et stimulent les économies régionales. En outre, l'innovation dans les technologies éoliennes ouvre de nouvelles opportunités pour les ingénieurs, les techniciens et les chercheurs, consolidant ainsi la position de cette industrie comme un secteur clé de l'économie verte.

Pour maximiser les avantages de l'énergie éolienne, il est essentiel de disposer de systèmes de contrôle avancés et efficaces. C'est là qu'intervient la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production d'énergie des éoliennes. Grâce à sa capacité à ajuster continuellement l'angle de pas des pales, la MADA permet aux éoliennes de fonctionner à leur point de puissance maximale, quelles que soient les conditions de vent. Cela assure non seulement un rendement énergétique optimal mais contribue également à la stabilité et à la fiabilité du réseau électrique.

Le premier chapitre de ce mémoire explore les généralités sur la production d'énergie éolienne. Il met en lumière l'importance de cette source d'énergie renouvelable et les nombreux avantages qu'elle présente, tels que sa propreté, sa disponibilité et sa capacité à générer des emplois dans le secteur des énergies propres. L'accent est également mis sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), une technologie clé pour le contrôle efficace des systèmes éoliens, qui optimise la production d'énergie en ajustant continuellement les paramètres des éoliennes pour maintenir un rendement optimal.

Introduction générale

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation de la MADA et la stratégie de commande associée. Il présente une modélisation complète d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, en abordant successivement la modélisation du système de conversion mécanique-électrique, le convertisseur de puissance associé, et l'application de la transformation de Park. Une attention particulière est accordée à la Commande Orientée Champ (FOC), qui est validée par des simulations rigoureuses utilisant MATLAB/SIMULINK™. Cette modélisation est essentielle pour comprendre et optimiser les performances des systèmes éoliens.

Le troisième chapitre introduit la commande par mode glissant, une méthode de contrôle robuste capable de traiter les écarts entre le système réel et le modèle mathématique. Cette méthode, inventée en Union soviétique, se distingue par sa simplicité et sa robustesse, et vise à résoudre les problèmes de variations paramétriques avec une erreur statique nulle et une réponse rapide. La commande par mode glissant d'ordre 1 et l'algorithme super-twisting, qui réduit les effets indésirables du chattering, sont particulièrement mis en avant.

Chapitre 01 :

Généralités

Sur la production d'énergie éolienne

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

1. Introduction

L'énergie éolienne occupe une place cruciale dans le paysage énergétique mondial, représentant une solution durable et écologique pour répondre à la demande croissante en électricité. Cette introduction vise à contextualiser ce sujet en soulignant l'importance de l'énergie éolienne et en mettant en lumière le rôle essentiel de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dans le contrôle efficace des systèmes éoliens.

Dans un contexte de changement climatique et de transition énergétique, l'énergie éolienne émerge comme une solution incontournable pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et assurer un approvisionnement énergétique durable. En exploitant la force du vent, cette source d'énergie renouvelable offre une alternative propre et abondante aux combustibles fossiles, contribuant ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique et à la préservation de l'environnement.

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages, notamment sa propreté, sa disponibilité et sa capacité à diversifier le mix énergétique. En réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en favorisant le développement des énergies renouvelables, elle contribue à la transition vers une économie bas-carbone et à la création d'emplois dans le secteur des énergies propres.

Au cœur du contrôle efficace des systèmes éoliens se trouve l'utilisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Cette technologie permet d'optimiser la production d'énergie en ajustant continuellement l'angle de pas des pales de l'éolienne pour maintenir le fonctionnement à son point de puissance maximale. En assurant un rendement optimal du système éolien, la MADA joue un rôle crucial dans la maximisation de la production d'électricité éolienne et dans la stabilité du réseau électrique. Cette introduction met en évidence l'importance de la MADA dans le contexte de l'énergie éolienne et prépare le terrain pour une exploration approfondie de son fonctionnement et de son application dans les chapitres suivants.

2. Conception d'énergie renouvelable

2.1 Définition

La conception de l'énergie renouvelable fait référence à l'ensemble des processus, technologies et systèmes utilisés pour exploiter les ressources naturelles

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

renouvelables afin de produire de l'énergie. Ces ressources sont renouvelables dans le sens où elles sont régénérées naturellement à un rythme égal ou supérieur à celui de leur utilisation par l'humanité, les rendant ainsi pratiquement inépuisables à l'échelle de temps humaine. La conception d'énergie renouvelable vise à maximiser l'efficacité, la durabilité et la rentabilité de l'exploitation de ces ressources tout en minimisant leur impact environnemental (Rev. Afr. Droit Environ. (2020). Énergies renouvelables, transition énergétique et enjeux climatiques en droit africain, N° 05. Rev. Afr. Droit Environ. (2021).) .

2.2 Sources de l'énergie renouvelable

Les sources d'énergie renouvelable sont diverses et couvrent un large éventail de ressources naturelles. Voici quelques-unes des principales sources d'énergie renouvelable : (Zaatri, A., & LATA. (November 2018). Introduction aux énergies renouvelables. Conférence organisée par l'Association APNE à Constantine, Centrale de Police, Constantine, Algérie.)

- 1) Énergie solaire** : L'énergie solaire est produite par la capture du rayonnement solaire à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques ou de capteurs thermiques. Cette énergie peut être convertie en électricité ou utilisée directement pour le chauffage de l'eau et des bâtiments.
- 2) Énergie éolienne** : L'énergie éolienne est générée par le mouvement de l'air à travers des turbines éoliennes, convertissant ainsi l'énergie cinétique du vent en électricité.
- 3) Énergie hydraulique** : L'énergie hydraulique est produite par l'écoulement de l'eau, qu'il s'agisse de cours d'eau naturels, de barrages ou de marées. Elle est utilisée pour faire tourner des turbines et générer de l'électricité.
- 4) Énergie biomasse** : L'énergie biomasse est produite à partir de la combustion de matières organiques telles que le bois, les déchets agricoles, les résidus forestiers ou les biogaz provenant de la fermentation de déchets organiques.
- 5) Énergie géothermique** : L'énergie géothermique est extraite de la chaleur contenue dans le sous-sol terrestre. Elle est utilisée pour produire de la chaleur et de l'électricité à partir de la vapeur ou de l'eau chaude souterraine.

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

- 6) **Énergie marine** : Cette source d'énergie inclut l'énergie des vagues, des marées et des courants marins, qui peut être capturée à l'aide de technologies telles que les hydroliennes et les dispositifs de harnais des vagues.



Figure 8 : Sources de l'énergie renouvelable (*Rapport spécial n° 5/2018: Énergies renouvelables et développement rural durable. (2018).*
<https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/renewable-energy-5-2018/fr/>)

Ces sources d'énergie renouvelable offrent un potentiel considérable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en minimisant les impacts environnementaux associés à la production d'énergie à partir de combustibles fossiles.

3. L'énergie éolienne

3.1 Définition de l'énergie éolienne et types

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui tire parti de la force du vent pour générer de l'électricité. Les éoliennes, ou turbines éoliennes, captent l'énergie cinétique du vent et la convertissent en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité par le biais d'un générateur électrique. Ce processus est réalisé grâce à des pales de turbine qui tournent lorsque le vent les pousse. (IFP Energies nouvelles. (2023). Rédacteurs-en-chef : Paul Lucchese et Benoît Noetinger. Comité éditorial. eISSN : 2804-7699. Revue en Open Access. Facteur d'impact 2022* : 1,5. Facteur d'impact 2022 à 5 ans* : 1,6. *Journal Citation Reports™ de Clarivate)

Il existe plusieurs types d'éoliennes, chacun adapté à des conditions spécifiques et présentant des caractéristiques particulières. Les principaux types d'éoliennes sont les suivants : (Rio, A. (2021). Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables : un jumeau numérique pour les microgrilles [Mémoire de maîtrise, Université Rennes 1]. ffNNT : 2021REN1S054ff. fftel03512793)

- 1) **Éoliennes à axe horizontal** : Dans ce type d'éolienne, les pales sont montées sur un axe horizontal et tournent comme une hélice autour de ce dernier. Les

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées et se déclinent en différentes tailles, des petites éoliennes domestiques aux grandes éoliennes commerciales installées dans les parcs éoliens.

- 2) **Éoliennes à axe vertical** : Contrairement aux éoliennes à axe horizontal, les éoliennes à axe vertical ont leurs pales disposées autour d'un axe vertical. Elles peuvent capturer le vent provenant de n'importe quelle direction, ce qui les rend plus adaptées à certains environnements urbains ou à des conditions de vent variables.

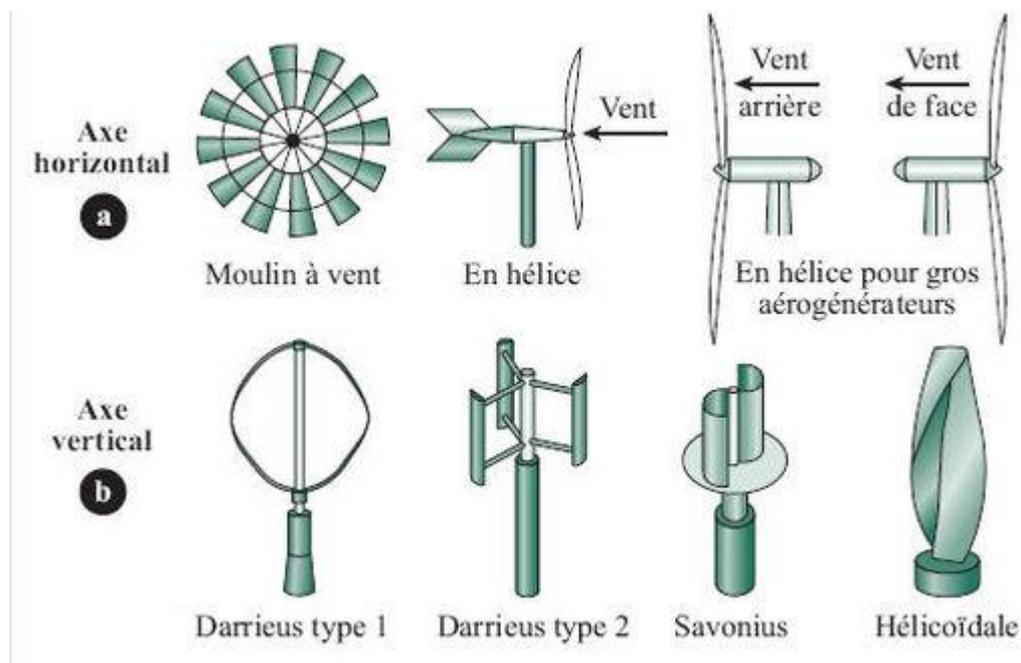


Figure 9 : Types de l'énergie éolienne (Moniteur, L. (2 mars 2021). *Comment ça marche: énergie éolienne.* www.lemoniteur.fr. <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-ca-marche-energie-eolienne.707314>)

Chaque type d'éolienne présente des avantages et des inconvénients en fonction de ses caractéristiques de conception, de son coût, de son rendement énergétique et de son efficacité dans différentes conditions de vent. La sélection du type d'éolienne approprié dépendra des objectifs spécifiques du projet éolien et des conditions environnementales locales.

3.2 Les usages de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée dans une variété d'applications qui contribuent à répondre aux besoins énergétiques, à promouvoir le développement durable et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Voici quelques-uns des principaux usages de

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

l'énergie éolienne : (Lin, X. (2022). Application of wind power generation and its effect on environmental protection [Thesis, Centria University of Applied Sciences, Environment Chemistry and Technology].)

- ❖ **Production d'électricité** : L'usage le plus répandu de l'énergie éolienne est la production d'électricité. Les éoliennes sont installées dans des parcs éoliens terrestres ou offshore où elles captent l'énergie du vent pour faire tourner des turbines et générer de l'électricité. Cette électricité peut être intégrée au réseau électrique pour alimenter les foyers, les entreprises et les industries.
- ❖ **Approvisionnement en énergie renouvelable** : L'énergie éolienne contribue à diversifier le mix énergétique en fournissant une source d'énergie renouvelable et propre. Elle réduit la dépendance aux combustibles fossiles et contribue à la transition vers une économie bas-carbone.
- ❖ **Alimentation des communautés locales** : Dans certaines régions, notamment les zones rurales ou isolées, les éoliennes peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité aux communautés locales qui ne sont pas raccordées au réseau électrique national. Les éoliennes peuvent être combinées avec des systèmes de stockage d'énergie pour assurer un approvisionnement fiable en électricité.
- ❖ **Irrigation agricole** : Dans l'agriculture, l'énergie éolienne peut être utilisée pour alimenter des pompes à eau qui sont utilisées pour l'irrigation des cultures. Cela permet de réduire les coûts liés à l'utilisation de pompes diesel et contribue à la durabilité environnementale de l'agriculture.
- ❖ **Pompage d'eau** : Les éoliennes peuvent également être utilisées pour pomper de l'eau à partir de puits ou de réservoirs pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole, ou d'autres besoins en eau dans les zones où l'accès à l'électricité est limité.
- ❖ **Applications industrielles et commerciales** : L'énergie éolienne peut être utilisée pour alimenter des équipements industriels, des systèmes de refroidissement ou d'autres processus dans les installations industrielles et commerciales, contribuant ainsi à réduire les coûts d'exploitation et l'empreinte carbone des entreprises.

Ces différents usages démontrent la polyvalence et l'importance croissante de l'énergie éolienne dans la transition vers un système énergétique plus durable et résilient.

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

3.3 Composants d'une éolienne

L'éolienne est composée de plusieurs éléments essentiels qui travaillent de concert pour capturer et convertir l'énergie du vent en électricité. Parmi ces composants, on retrouve :

- ❖ **La tour (mât)** : La tour, également appelée mât, constitue la structure principale de l'éolienne. Elle supporte le rotor et la nacelle à une hauteur optimale pour capturer les vents à des altitudes où ils sont plus constants et plus forts.
- ❖ **Le rotor** : Le rotor est l'élément rotatif de l'éolienne. Il est généralement composé de plusieurs pales attachées à un moyeu central. Le rotor capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en mouvement rotatif.
- ❖ **Les pales** : Les pales sont des structures aérodynamiques attachées au moyeu du rotor. Elles sont conçues pour capturer efficacement l'énergie du vent en se déplaçant à travers celui-ci. Les pales sont généralement profilées pour réduire la traînée et maximiser la production d'énergie.
- ❖ **Le moyeu** : Le moyeu est le point central du rotor où les pales sont fixées. Il permet de transmettre le mouvement rotatif des pales à l'arbre de transmission qui entraîne le générateur électrique.
- ❖ **La nacelle** : La nacelle est abritée au sommet de la tour et abrite les composants principaux de l'éolienne, notamment le générateur électrique, le système de contrôle et les mécanismes de transmission. C'est dans la nacelle que l'énergie cinétique capturée par le rotor est convertie en électricité.

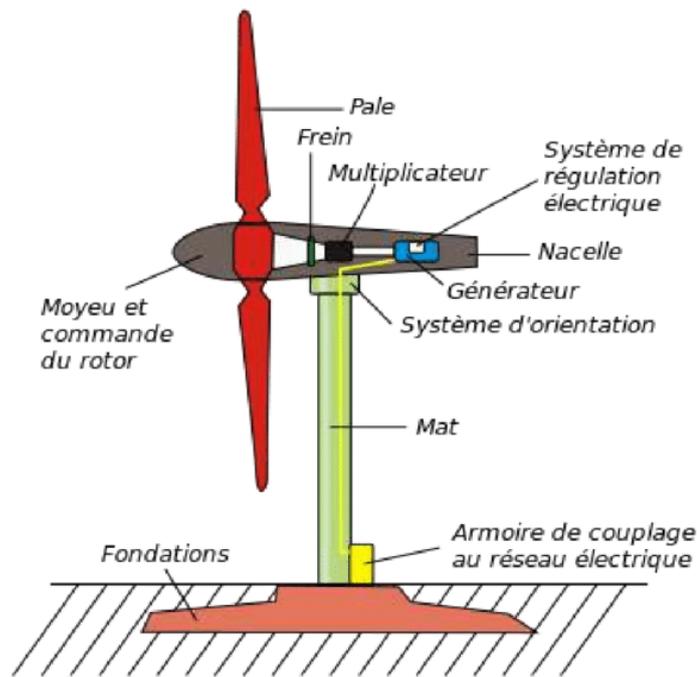


Figure 10 : Composants d'une éolienne (Saba, P., & Saba, D. (2017). *Modélisation Sémantique à base d'Agents pour la Gestion d'Énergie dans un Système Multi Sources à Énergie Renouvelable*)

Chaque composant joue un rôle crucial dans le fonctionnement global de l'éolienne, permettant ainsi de convertir efficacement l'énergie éolienne en une forme d'énergie électrique propre et renouvelable.

3.4 Configuration dans chaînes de conversion éolienne

L'énergie éolienne est générée grâce à l'interaction entre le vent et les pales d'un rotor. Typiquement, le rotor est composé de trois pales qui pivotent autour d'un axe horizontal. Le diamètre de l'arc balayé par ces pales varie généralement de 80 à plus de 200 mètres, et la longueur des pales influe directement sur la capacité de production électrique. En tournant, le rotor entraîne un générateur pour produire de l'électricité. Dans les éoliennes traditionnelles, le générateur nécessite une vitesse de rotation entre 1 000 et 2 000 tours par minute, tandis que les pales tournent à une vitesse beaucoup plus lente, entre 5 et 25 tours par minute. Pour ajuster cette différence de vitesse, un multiplicateur, également appelé boîte de vitesse, est souvent intégré entre le rotor et le générateur. Cependant, des modèles plus récents adoptent une approche à entraînement direct, où le générateur fonctionne à des vitesses de rotation variables, de 5 tours à 2000 tours par minute, sans nécessiter de multiplicateur. La nacelle, qui englobe le multiplicateur et le générateur, est montée au sommet d'un mât pouvant mesurer entre

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

50 et plus de 200 mètres de hauteur. Un système d'orientation permet de maintenir le rotor et les pales face au vent, optimisant ainsi la capture de l'énergie éolienne. Habituellement, les éoliennes opèrent dans des vitesses de vent comprises entre 10 et 90 km/h. Au-delà de cette vitesse maximale, des dispositifs de sécurité arrêtent automatiquement le fonctionnement de l'éolienne pour éviter les accidents. Enfin, l'électricité produite par le générateur est transportée le long du mât via des câbles jusqu'à un transformateur, avant d'être injectée dans le réseau électrique par des câbles souterrains (IFP Energies nouvelles. (2023). Rédacteurs-en-chef : Paul Lucchese et Benoît Noetinger. Comité éditorial. eISSN : 2804-7699. Revue en Open Access. Facteur d'impact 2022* : 1,5. Facteur d'impact 2022 à 5 ans* : 1,6. *Journal Citation Reports™ de Clarivate).

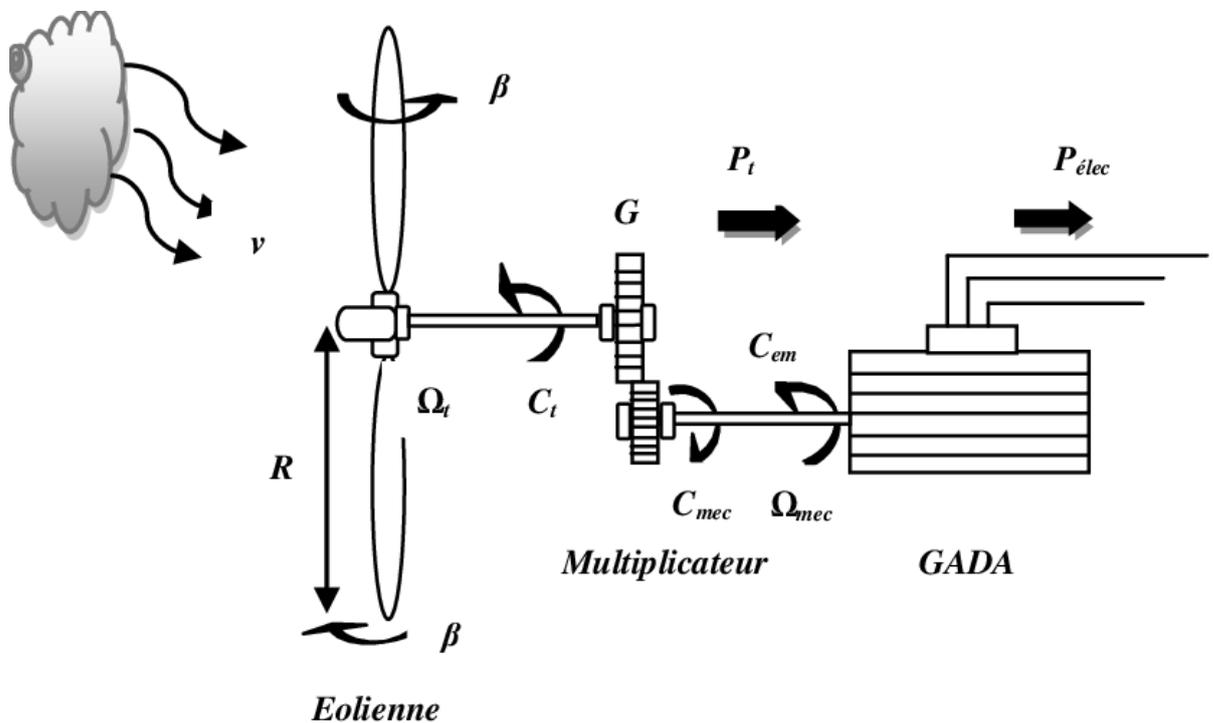


Figure 11 : Configuration d'une éolienne (Bedoud, K., Lakel, R., Rachedi, M. A., & Lekhchine, S., 2013)

4. Machine Asynchrone double Alimentation (MADA) :

4.1 Description de MADA

- 1) **DFIG à rotor bobiné** : La configuration d'un moteur asynchrone à double alimentation (DFIG) avec un rotor bobiné comprend un stator et un rotor. Le stator, similaire à celui d'un moteur asynchrone conventionnel, est constitué de

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

bobinages triphasés. Quant au rotor, il est composé d'enroulements triphasés connectés en configuration étoile.

- 2) **DFIG sans collecteur (sans balais) :** Cette variante de DFIG comprend deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des enroulements est alimenté directement par le réseau, tandis que l'autre est alimenté par un convertisseur AC/AC. Cette configuration nécessite que les enroulements statoriques aient des nombres de paires de pôles différents, le nombre de paires de pôles du rotor devant être la somme de ces deux nombres.
- 3) **DFIG en cascade :** Un DFIG en cascade est formé de deux moteurs asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet un système d'alimentation statorique double face, avec les enroulements du stator connectés à deux sources de tension triphasées. (Olabi, A.G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Salameh, T., Sayed, E.T., Husain, K.S., & Abdelkareem, M.A. (2021). Selection Guidelines for Wind Energy Technologies. *Energies*, 14, 3244. <https://doi.org/10.3390/en14113244>)

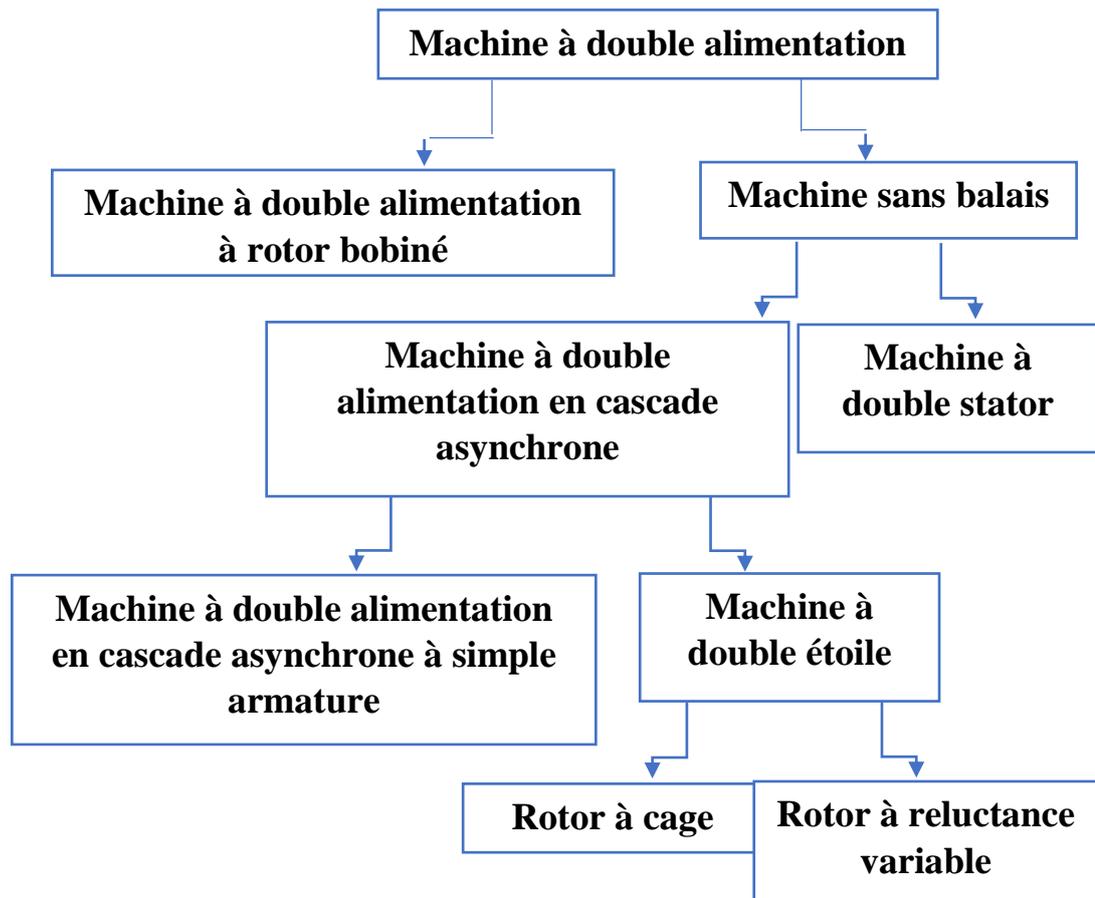


Figure 12 : Configuration dans chaînes de conversion éolienne (Abdessemed, R. (2012). *Modélisation et simulation des Machines Electriques*. Batna : TECHNOSUP.).

4.2 Principe de fonctionnement de MADA

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) représente une avancée significative dans le domaine de la production d'énergie éolienne. Son fonctionnement repose sur une conception sophistiquée, où le stator est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est équipé d'enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel. Cette configuration permet à la MADA de réguler précisément sa vitesse de rotation, ce qui la rend particulièrement efficace dans l'exploitation de l'énergie éolienne dans des conditions variables. Contrairement aux éoliennes conventionnelles qui fonctionnent à vitesse fixe, la MADA peut ajuster sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent, maximisant ainsi la production d'électricité tout en assurant la stabilité du réseau électrique.

Dans le régime stationnaire, la MADA agit essentiellement comme un transformateur. Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

constante, ce qui induit une F.e.m de même fréquence dans le rotor. Ainsi, le rotor tourne à une vitesse constante proportionnelle à la fréquence du réseau. Ce mode de fonctionnement est utilisé lorsque la vitesse du vent est relativement stable et que la demande en électricité est constante. Il permet de maintenir une production d'électricité régulière et stable, contribuant ainsi à la stabilité du réseau électrique.

En mode hypo synchrone, le rotor tourne dans le sens du flux statorique, ce qui entraîne une diminution progressive de sa fréquence (f_r) . À mesure que la vitesse du rotor se rapproche de celle de synchronisme, le glissement (s) tend vers 0 et la tension induite dans le rotor diminue. Cela permet à la MADA de s'adapter aux variations de la vitesse du vent en ajustant sa vitesse de rotation de manière progressive. Ce mode est particulièrement utile dans des conditions de vent variables, où il est nécessaire de maintenir une production d'électricité stable et optimale.

En mode synchrone, la vitesse mécanique du rotor atteint celle de synchronisme, annulant ainsi la fréquence (f_r) . À ce stade, le rotor tourne à la même vitesse que le flux statorique, ce qui annule toute tension induite dans ses enroulements. Ce régime est utilisé lorsque la vitesse du vent est extrêmement faible ou lorsque la demande en électricité est très faible, car il permet d'économiser de l'énergie en évitant de produire de l'électricité inutilement.

Enfin, en mode hyper synchrone, le flux rotorique rattrape le flux statorique, ce qui entraîne une fréquence (f_r) négative. Cette inversion de phase signifie que l'ordre de phase du rotor s'inverse, entraînant une augmentation de la tension induite dans le rotor. Ce mode est utilisé lorsqu'il est nécessaire d'augmenter rapidement la production d'électricité pour répondre à une demande accrue ou pour compenser une chute soudaine de la vitesse du vent. (Lahcen, A. (2020). Contrôle ADRC de l'éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Ecole Supérieure de Technologie, Oujda, Morocco.)

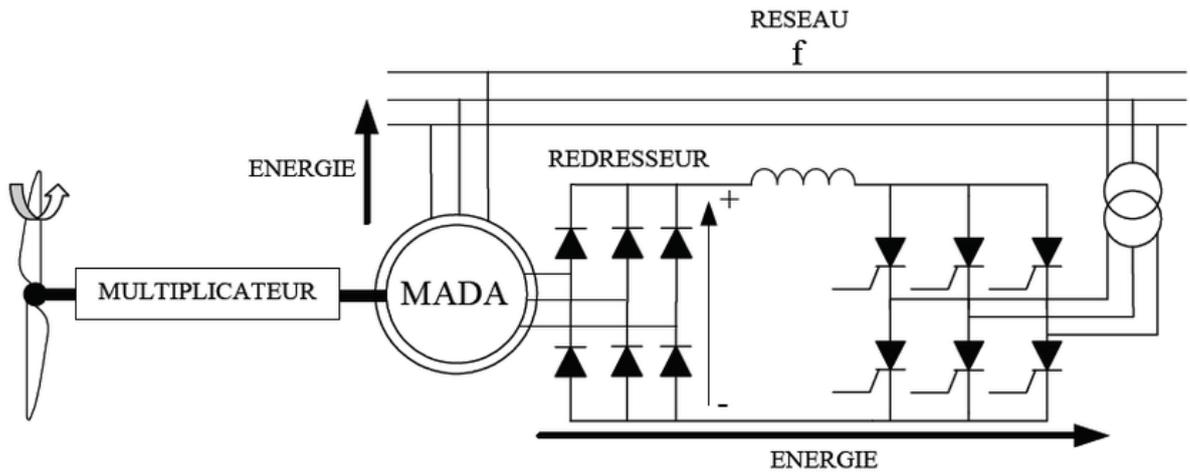


Figure 13 : Machine asynchrone à double alimentation -structure de Kramer- (Chemidi, A. (2015). *Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme* (Thesis for PhD). Ecole supérieure en sciences appliquées Tlemcen, Algeria. DOI: 10.13140/RG.2.2.20191.20641)

4.3 Domaine d'application de MADA

Le domaine d'application de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est principalement centré sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Cette technologie avancée est largement utilisée dans les parcs éoliens terrestres et offshore, où elle offre des avantages significatifs en termes de rendement énergétique et de stabilité du réseau électrique. La MADA est également utilisée dans d'autres applications industrielles nécessitant une alimentation électrique stable et efficace, telles que les systèmes de propulsion pour les navires, les applications minières et les installations industrielles. En raison de sa capacité à réguler précisément sa vitesse de rotation et à s'adapter aux variations de la vitesse du vent, la MADA est particulièrement adaptée aux environnements où les conditions de fonctionnement sont variables et imprévisibles.

Son utilisation dans ces domaines permet de maximiser l'efficacité énergétique et de garantir une production d'électricité fiable et continue, contribuant ainsi à une utilisation plus durable et efficace des ressources éoliennes. La MADA joue un rôle essentiel dans la transition vers une énergie propre et renouvelable, en offrant une solution technologique avancée pour exploiter le potentiel éolien de manière efficace et durable. Grâce à sa capacité à s'adapter aux fluctuations naturelles du vent, elle permet d'optimiser la production d'électricité tout en minimisant les impacts sur l'environnement. En outre, son utilisation dans divers secteurs industriels témoigne de sa

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

polyvalence et de son importance croissante dans la recherche de solutions énergétiques durables. (Gasmi, H. (2023). Contribution à l'amélioration de la commande des chaînes de conversion éoliennes (Thèse de doctorat en 3ème cycle, Domaine: Sciences et Technologie, Filière: Electronique, Spécialité: Contrôle avancé).)

4.4 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens

Dans les systèmes éoliens, la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) trouve une application prépondérante, surtout dans les éoliennes de puissance supérieure à 1 MW. Ces éoliennes, capables de générer jusqu'à 4.5 MW de puissance, sont de plus en plus courantes sur terre et en mer, où les vents sont souvent plus forts et plus constants. Pour exploiter au mieux cette source d'énergie, il est crucial d'adopter des technologies efficaces et adaptables. La MADA répond à ce besoin en permettant une régulation précise de la vitesse de rotation du rotor, grâce à l'utilisation de convertisseurs AC/AC ou AC/DC/AC. Ces convertisseurs sont spécialement dimensionnés pour gérer la puissance du rotor, représentant généralement entre 20% et 30% de la puissance nominale de l'éolienne. Cette approche présente un avantage majeur en permettant une exploitation optimale de l'énergie éolienne disponible, contribuant ainsi à augmenter le rendement global des éoliennes tout en assurant une intégration harmonieuse avec le réseau électrique.

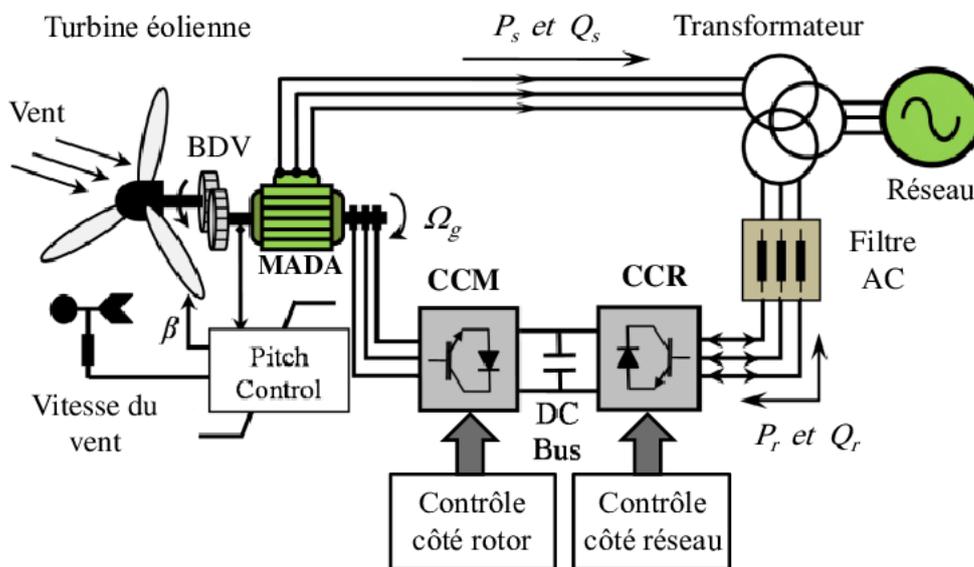


Figure 14 : Structure de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de MADA (Djeriri, Y., Mesai Ahmed, H., & Boudjema, Z. (2018, December). Commande

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

à structure variable de la machine asynchrone à double alimentation destinée à la production d'énergie éolienne.)

4.5 Régimes de fonctionnement de MADA.

Voici un tableau comparatif des régimes de fonctionnement synchrone et asynchrone de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

Tableau 1 tableau comparatif des régimes de fonctionnement synchrone et asynchrone (Alsati, B.A., Ibrahim, G.I. & Moussa, R.R. Study the impact of transient state on the doubly fed induction generator for various wind speeds. J. Eng. Appl. Sci. 70, 65 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00232-6>)

Caractéristique	Fonctionnement Synchrone	Fonctionnement Asynchrone
Vitesse de Rotation	Synchronisée avec la fréquence du réseau électrique	Indépendante de la fréquence du réseau électrique, contrôlée par le convertisseur
Synchronisation	Synchronisée avec le réseau électrique	Non synchronisée avec le réseau électrique, nécessite un convertisseur pour ajuster la vitesse
Contrôle de la Vitesse	Limité, dépend de la fréquence du réseau électrique	Plus flexible, peut être ajustée pour optimiser la production d'électricité en fonction des conditions du vent
Applications	Convient aux systèmes où une vitesse de rotation constante est requise	Adapté aux systèmes où une vitesse de rotation variable est nécessaire pour maximiser l'efficacité énergétique
Stabilité du Système	Contribue à la stabilité du réseau électrique grâce à sa synchronisation avec la fréquence du réseau	Peut nécessiter des dispositifs supplémentaires pour garantir la stabilité du système en raison de sa vitesse variable

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

Ce tableau met en évidence les principales différences entre les régimes de fonctionnement synchrone et asynchrone de la MADA, en mettant en avant leurs avantages et leurs applications respectives.

4.6 Intérêt de MADA.

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) suscite un intérêt particulier dans le domaine de l'énergie éolienne en raison de ses caractéristiques uniques et de son potentiel à améliorer l'efficacité des systèmes éoliens. Sa capacité à ajuster dynamiquement sa vitesse de rotation en fonction des variations du vent permet une meilleure adaptation aux conditions environnementales changeantes. De plus, sa flexibilité opérationnelle offre une gestion plus précise de la production d'électricité, contribuant ainsi à une meilleure utilisation des ressources éoliennes disponibles. La MADA joue un rôle crucial dans la transition vers une énergie plus propre et plus durable, offrant une solution technologique avancée pour répondre aux défis de l'approvisionnement énergétique mondial. Son développement et son adoption croissants soulignent son importance croissante dans le paysage énergétique actuel et futur. (Gu, T., Wang, P., Liu, D., Sun, A., Yang, D., & Yan, G. (2023). Modeling and small-signal stability analysis of doubly-fed induction generator integrated system. *Global Energy Interconnection, 6*(4), 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.08.005>.)

4.7 Avantages et inconvénients de la MADA.

Avantages de la MADA

- Permet une prise de décision structurée
- Favorise la prise en compte des critères pertinents
- Offre une vision globale des alternatives
- Facilite la comparaison entre différentes options
- Peut être adaptée à différents types de décisions

Inconvénients de la MADA

- Peut-être complexe à mettre en œuvre pour les novices
- Nécessite parfois des ressources importantes en termes de temps et de personnel

Chapitre 01 : Généralités sur la production d'énergie éolienne

Risque de subjectivité dans l'évaluation des critères

Sensible aux biais cognitifs et aux préférences individuelles

Demande une bonne connaissance des outils et des techniques de la MADA

Dans cet exemple, les avantages de la MADA sont présentés en premier, suivis des inconvénients. Les avantages sont légèrement plus nombreux que les inconvénients pour mettre en valeur les aspects positifs de cette méthode d'aide à la décision.

5. Conclusion

Le premier chapitre nous a présenté l'énergie éolienne et la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Nous avons exploré leur définition, leur fonctionnement et leurs applications. En comprenant l'importance croissante de l'énergie éolienne et le rôle clé de la MADA dans son exploitation, nous avons posé les fondations pour la suite de notre étude sur cette technologie émergente.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

1. Introduction :

Ce chapitre vise à exposer la modélisation complète d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Il se structure en trois sections distinctes pour une présentation claire et exhaustive :

La première partie traite de la modélisation du système de conversion mécanique-électrique, mettant en lumière le générateur éolien. La deuxième partie aborde la modélisation du convertisseur de puissance associé au générateur éolien. En outre, une troisième quatrième section présente l'application de la transformation de Park à la MADA, suivie de la dernière partie qui traite de la FOC (Commande Orientée Champ), tant directe qu'indirecte. L'ensemble du système sera rigoureusement validé par simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK™, garantissant ainsi la robustesse et la fiabilité des résultats obtenus.

La modélisation de la machine électrique constitue une étape fondamentale dans son développement. Grâce aux avancées dans les domaines de l'informatique et du génie logiciel, il est désormais possible de réaliser des modèles précis et d'envisager l'optimisation des performances des machines électriques. Pour bien appréhender la méthodologie employée dans la détermination de l'algorithme de la commande vectorielle, il est indispensable d'effectuer une modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Ce chapitre se focalise sur la présentation du modèle mathématique et de la commande vectorielle de la MADA. Dans le cadre de ce travail, la MADA fonctionne en tant que moteur (moteur asynchrone à double alimentation, MADA). Dans ce mode de fonctionnement, les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude constantes, tandis que les phases du rotor sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variables.

2. Modélisation de la MADA

Pour établir la modélisation de la MADA, nous allons commencer par déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera construit de la même manière que celui d'une machine à cage, avec comme différence notable l'existence de tensions rotoriques non nulles. La figure suivante illustre l'enroulement triphasé de la MADA.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

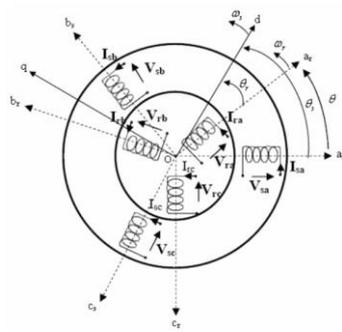


Figure 8 : Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.

Telle que :

as, bs, cs : correspondent aux trois phases du stator.

ar, br, cr : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes Od et Oq, sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.

Oas, Od = θ_s Oar, Od = θ_r Oas, Oar = $\theta_s - \theta_r = \theta$;

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (1)$$

Avec

$$\omega = P \times \Omega \quad (2)$$

Ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P est le nombre de paires de pôles.

i. Hypothèses et conventions

Pour simplifier l'analyse de la machine asynchrone idéalisée, nous partons des hypothèses suivantes :

- La machine est composée d'un stator et d'un rotor cylindriques coaxiaux, avec des enroulements symétriques triphasés répartis de manière sinusoïdale dans les encoches. Les enroulements statoriques et rotoriques sont considérés identiques.
- L'entrefer a une épaisseur uniforme, ce qui garantit une perméance constante.
- Nous ignorons la saturation et l'hystérésis du circuit magnétique, permettant ainsi de définir des inductances constantes.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

- L'induction dans l'entrefer est considérée comme sinusoïdale.
- La composante homopolaire du courant est négligée.
- Seules les grandeurs alternatives fondamentales sont prises en compte.
- Seules les pertes joules dans la machine sont considérées, tandis que les pertes fer sont négligées.

ii. Equations de la MADA

Considérons une machine asynchrone triphasée avec un stator et un rotor, représentée schématiquement par la Figure 1. Les phases sont désignées respectivement par as, bs, cs pour le stator et ar, br, cr pour le rotor. L'angle électrique θ , variable dans le temps, détermine la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases ar et as, choisis comme axes de référence.

a) Equations électriques :

Les équations des phases statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont représentées comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

$[I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

$[\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T, [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

R_s, R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

b) Equations magnétiques

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La dépendance de la matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor est influencée par l'angle θ , qui représente la position angulaire entre l'axe du stator et celui du rotor.

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

M_0 représente le pic de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor, survenant lorsque leurs axes magnétiques sont alignés.

Il est évident que représenter V_{as} et V_{ar} en fonction des courants conduit à un système d'équations dont les coefficients varient dans le temps, ce qui rend leur résolution complexe. Pour aborder ce problème, la transformation de Park est souvent utilisée comme une alternative, permettant ainsi d'obtenir un modèle équivalent plus simple à manipuler.

iii. Application de la transformation de Park à la MADA

La transformation de Park implique de substituer aux courants, tensions et flux des enroulements fictifs d_s, q_s, d_r, q_r , dont les axes magnétiques sont alignés avec les axes (d-q), en tenant compte de l'angle entre les axes des enroulements et les axes d et q, comme illustré dans la figure 2.

Pour transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes (d-q) liés au champ tournant, ainsi que pour inclure la composante homopolaire afin d'équilibrer le système transformé, nous avons :

- La composante directe le long de l'axe (d).
- La composante en quadrature (transversale) le long de l'axe (q).
- La composante homopolaire (o).

Dans le cas d'un système de courant, la transformation est exprimée comme suit :

$$[I_{dqo}] = [P][I_{abc}] \quad (8)$$

$$[I_{abc}] = [P]^{-1}[I_{dqo}] \quad (9)$$

Celle des tensions :

$$[V_{dqo}] = [P][V_{abc}] \quad (10)$$

$$[V_{abc}] = [P]^{-1}[V_{dqo}] \quad (11)$$

La transformation des flux :

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

$$([\phi_{dq0}] = [P][\phi_{abc}]) \quad (12)$$

$$([\phi_{abc}] = [P]^{-1}[\phi_{dq0}]) \quad (13)$$

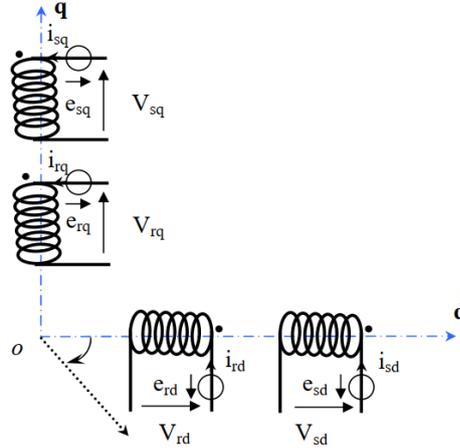


Figure 9. Modèle de la machine après transformation de Park.

Dans le cas d'un système de courant, la transformation est formulée comme suit :

Avec $[P]$ représentant la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale et est définie par l'équation :

$$[P] = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[V_{dq0}] = [V_d \quad V_q \quad V_0]^T \quad (16)$$

$$[I_{dq0}] = [I_d \quad I_q \quad I_0]^T, \quad (17)$$

iv. Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d, q »

Nous appliquons la transformation de Park à la machine à double alimentation, comme illustré dans la figure 3.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

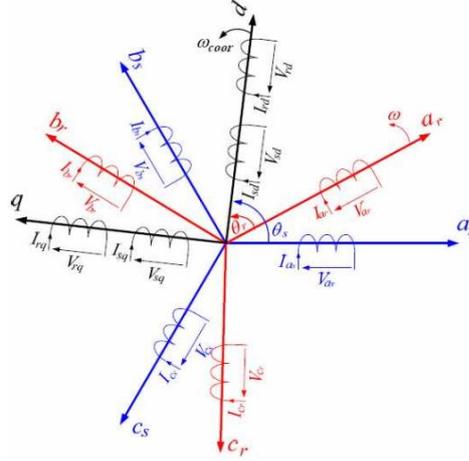


Figure 10.Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation.

a) Equations des tensions

Après l'application de la transformation de Park pour l'équation (2.2) du stator et l'équation (2.3) du rotor, les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (d,q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_{coor} \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_{coor} \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_{coor} - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_{coor} - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (18)$$

Avec :

ω_{coor} : Pulsation du référentiel d'axe (d, q) ;

ω : Pulsation mécanique du rotor

b) Equations des flux

De la même manière que pour l'application de la transformation de Park sur les équations des tensions, nous appliquons cette transformation sur les équations des flux statoriques et rotoriques, ce qui nous donne :

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (19)$$

Avec

$M = \frac{3}{2} M_0$: Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

v. Choix du référentiel

Pour explorer la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes de coordonnées du plan (d, q). Dans la suite, nous supposons que les composantes homopolaires sont nulles.

a) Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) restent fixes par rapport au stator ($\omega_{coord} = 0$). Ce cadre de référence est particulièrement adapté pour manipuler les grandeurs instantanées, et son avantage réside dans le fait qu'il ne nécessite pas de transformation vers le système réel.

L'utilisation de ce système permet d'examiner les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

b) Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont fixes par rapport au rotor, qui tourne à une vitesse (ω), donc ($\omega_{coord} = \omega = P \times \Omega$). L'utilisation de ce référentiel permet d'analyser les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones, notamment avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

c) Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) restent fixes par rapport au champ électromagnétique généré par les enroulements statoriques, ce qui implique que ($\omega_{coord} = \omega_s$; $\omega_r = \omega_s - \omega$). Ce cadre de référence est couramment employé pour appliquer une commande de vitesse, de couple, etc., étant donné que les grandeurs dans ce référentiel sont continuées.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

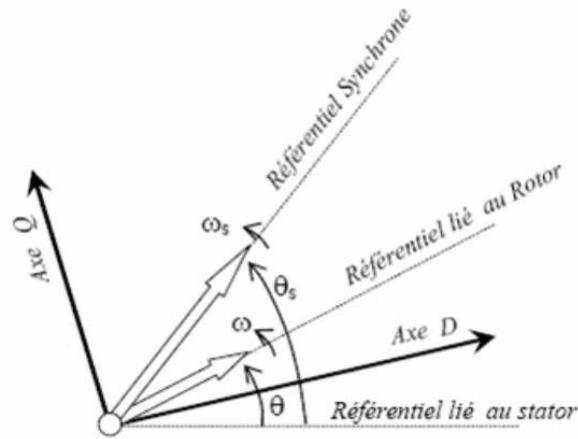


Figure 11. Choix du référentiel.

Dans notre travail, nous utilisons le référentiel lié au champ tournant ($\omega_{coord} = \omega_s$) pour la modélisation et la commande de la MADA. Dans ce contexte, le modèle de la MADA se présente comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (20)$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (21)$$

vi. Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (22)$$

Où :

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

f : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

Le couple électromagnétique peut être dérivé à partir de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Cela conduit à plusieurs expressions qui sont toutes équivalentes :

$$C_e = P(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (23)$$

$$C_e = P \cdot M(i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (24)$$

$$C_e = \frac{P \cdot M}{L_r}(\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (25)$$

$$C_e = \frac{P \cdot M}{L_s}(\phi_{sq} \cdot i_{rd} - \phi_{sd} i_{rq}) \quad (26)$$

P : Nombre de paires de pôles.

vii. Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation, les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. Si l'on considère les courants statoriques et rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot U \quad (27)$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où :

$$X = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^T$$

$$U = [V_{sd} \quad V_{sq} \quad v_{rd} \quad V_{rq}]^T$$

Pour la représentation matricielle :

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ -(\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ -(\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

On pose :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ -(\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

Alors l'équation (2.29) dévient :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} \cdot U \quad (30)$$

Par analogie de l'équation (2.29) avec l'équation (2.30) on trouve :

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot$$

$$B = [L]^{-1}$$

La matrice $\square Z \square \square$ peut être écrite comme suit :

Dans le but de simplifier l'implémentation dans SIMULINK/MATLAB, la matrice Z peut être décomposée selon la forme suivante :

$$[Z] = -[Z_1] - \omega [Z_2] + \omega_s [Z_3]$$

Avec :

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

b. Alimentation de la MADA

Dans notre étude, le stator de la MADA est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté via un onduleur de tension (voir Figure 5). La tension de cet onduleur est régulée à l'aide d'une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), permettant ainsi le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

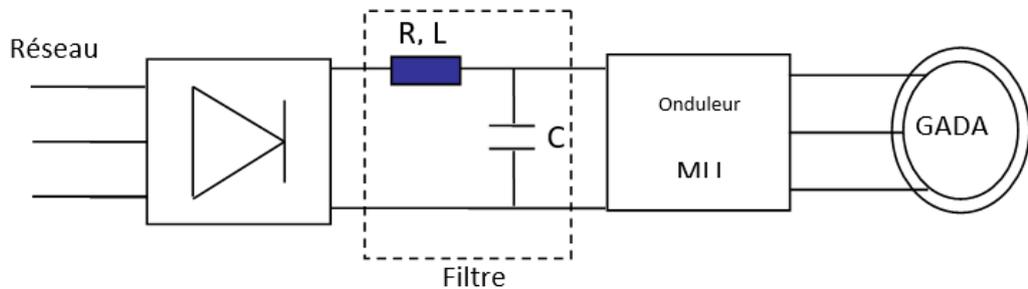


Figure 12. Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension.

Pour modéliser l'onduleur de tension, comme illustré dans la figure 2.6, nous considérons son alimentation comme une source parfaite (un bus continu), qui est supposée être composée de deux générateurs de f.é.m. égales à $(U/2)$ dc, connectés entre eux par un point noté n_0 .

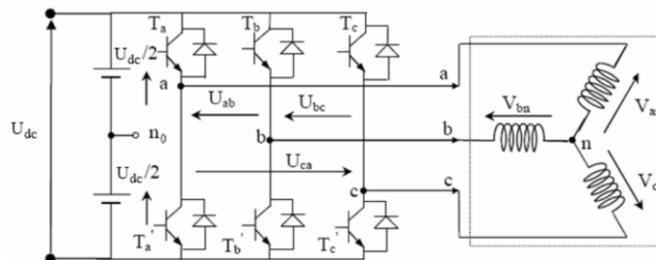


Figure 13. Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

La machine a été modélisée en utilisant les tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . Les transistors, notés T_i et $T_{i'}$ (supposés être des interrupteurs idéaux), sont définis comme suit :

- Si $S_i = 1$, alors T_i est conducteur et $T_{i'}$ est non conducteur.
- Si $S_i = 0$, alors T_i est non conducteur et $T_{i'}$ est conducteur.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (31)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, ainsi :

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (32)$$

Elles peuvent être exprimées à partir des tensions de sortie de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (33)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (34)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits $\square\square\square S_i$ ($i = a, b, c$) on a :

$$V_{in_0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (35)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn_0} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn_0} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (36)$$

En remplaçant l'équation (2.35) dans l'équation (2.36), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} + \frac{2}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{2}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad (37)$$

En remplaçant l'équation (2.36) dans l'équation (2.37), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (38)$$

Effectivement, il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

c. Commande par modulation sinus-triangle

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinus-triangle est réalisée en comparant une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} v_{ref_a} = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{ref_b} = v_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{ref_c} = v_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (39)$$

L'équation de la porteuse est donnée par

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} = [4(t/T_p) - 1] \text{ si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} = [-4(t/T_p) + 3] \text{ si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (40)$$

Où : $T_p = \frac{1}{f_p}$

f : Fréquence de la tension de référence (Hz).

T_p : Période de la porteuse (s).

V_m : Amplitude de la tension de référence (V).

V_{ref} : Tension de référence (V).

V_{pm} : Valeur crête de l'onde de modulation (V)

f_p : fréquence de la porteuse (Hz)

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation m, égal au rapport de la fréquence de modulation f_p sur la fréquence de référence f .
2. Le coefficient de réglage en tension r, égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence V_m à la valeur crête de l'onde de modulation V_{pm} .

Il existe différents types de modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

- MLI naturelle ou intersective : Les instants de commutation sont calculés par intersection du signal de référence avec un signal triangulaire.
- MLI avec contrôle d'amplitude : L'amplitude crête est maintenue constante et la largeur des impulsions est ajustée pour obtenir la valeur efficace du fondamental désirée. Pour maintenir U/f constante, les angles de début de la MLI sont précalculés et stockés dans une mémoire pour chaque valeur de vitesse.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

- MLI vectorielle : Les instants de commutation sont calculés en temps réel.

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, nous utilisons la technique de MLI naturelle. Cette méthode consiste à comparer le signal de référence (modulante) de forme sinusoïdale à basse fréquence avec un signal triangulaire (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est à l'état haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et à l'état bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, comme illustré dans la figure 2.7.

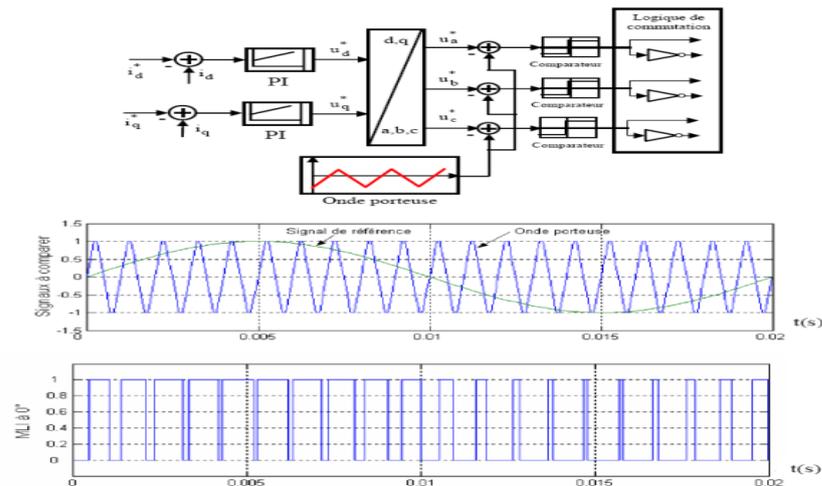


Figure 14. Schéma de principe de la commande par MLI.

d. Commande vectorielle du MADA :

La commande des machines électriques est devenue un domaine de recherche très actif durant ces trois dernières décennies. Cet intérêt est motivé par le fait que les machines électriques constituent un actionneur peu coûteux et peu encombrant pour la plupart des entraînements industriels. La difficulté de la commande des machines asynchrones réside dans le découplage des deux paramètres de commande : flux magnétique et couple électromagnétique.

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

Depuis plusieurs années, plusieurs recherches universitaires et industrielles ont été réalisées et proposées pour remédier le problème de commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées et de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ; et les techniques de commande classiques deviennent insuffisantes surtout dans les applications industrielles réclamant un couple important en basse vitesse (traction, positionnement). Pour maîtriser ces difficultés, et pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu Blaschke et Hasse ont proposé une technique de commande dite la commande vectorielle en anglais (FOC : Field Oriented control) ou la commande par orientation du flux.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

Plusieurs techniques, ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d-q) :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.

- Le flux de l'entrefer.

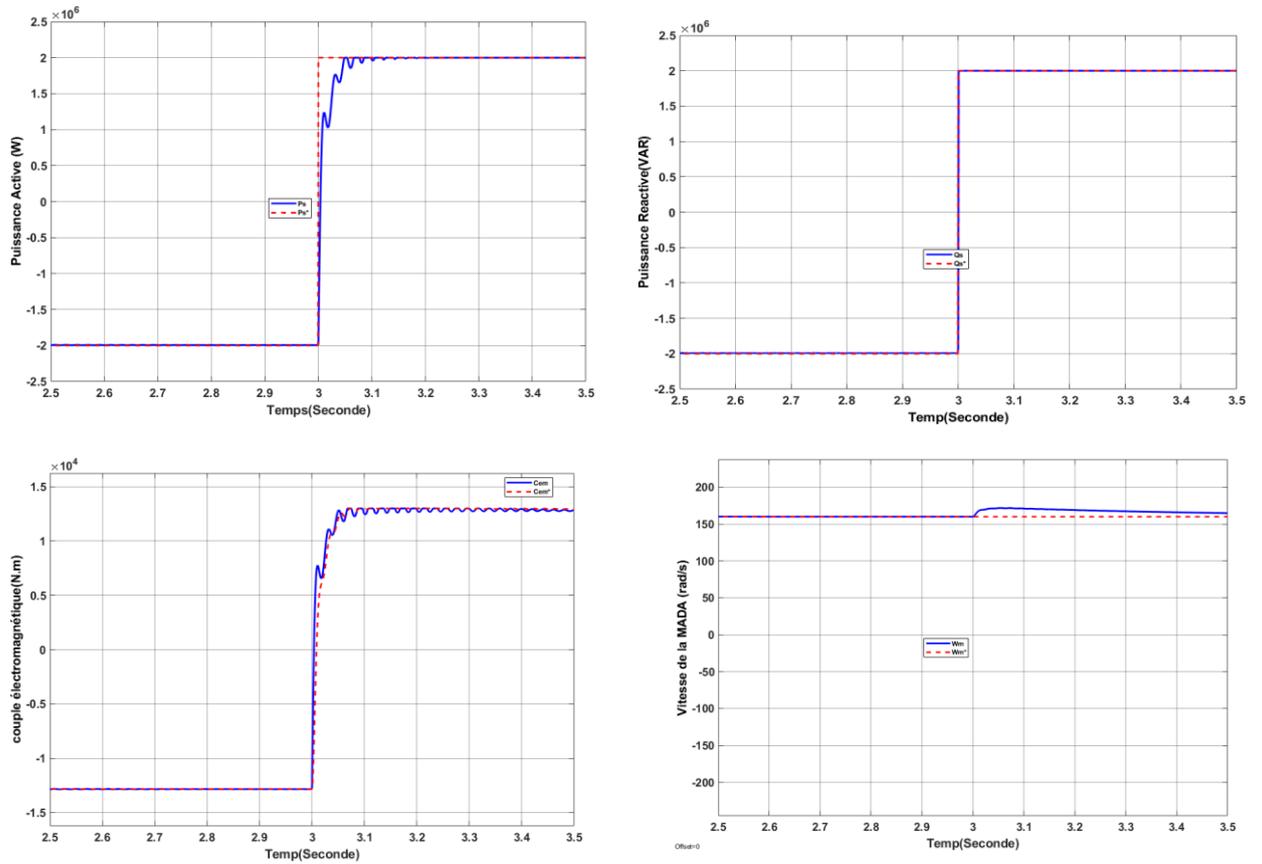
Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

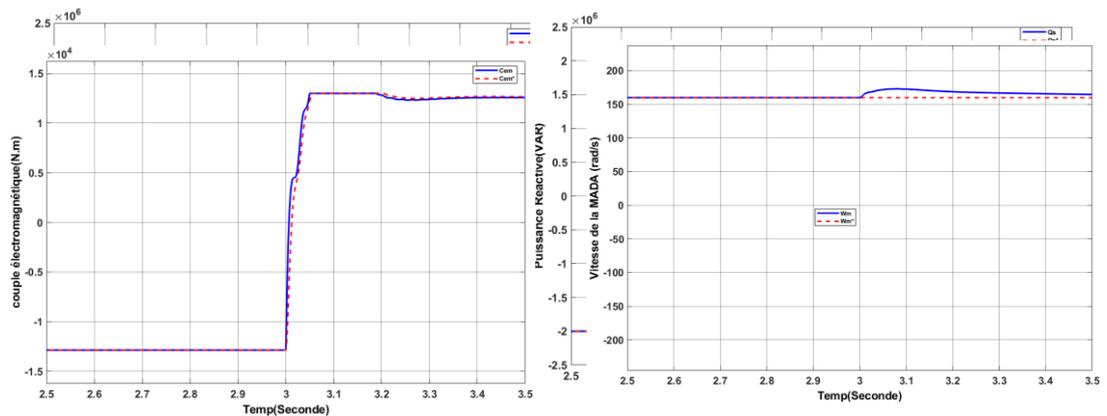
3. Résultats de simulation

3.1. Commande directe (Figure15)

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande



3.2. Commande indirecte (Figure16)



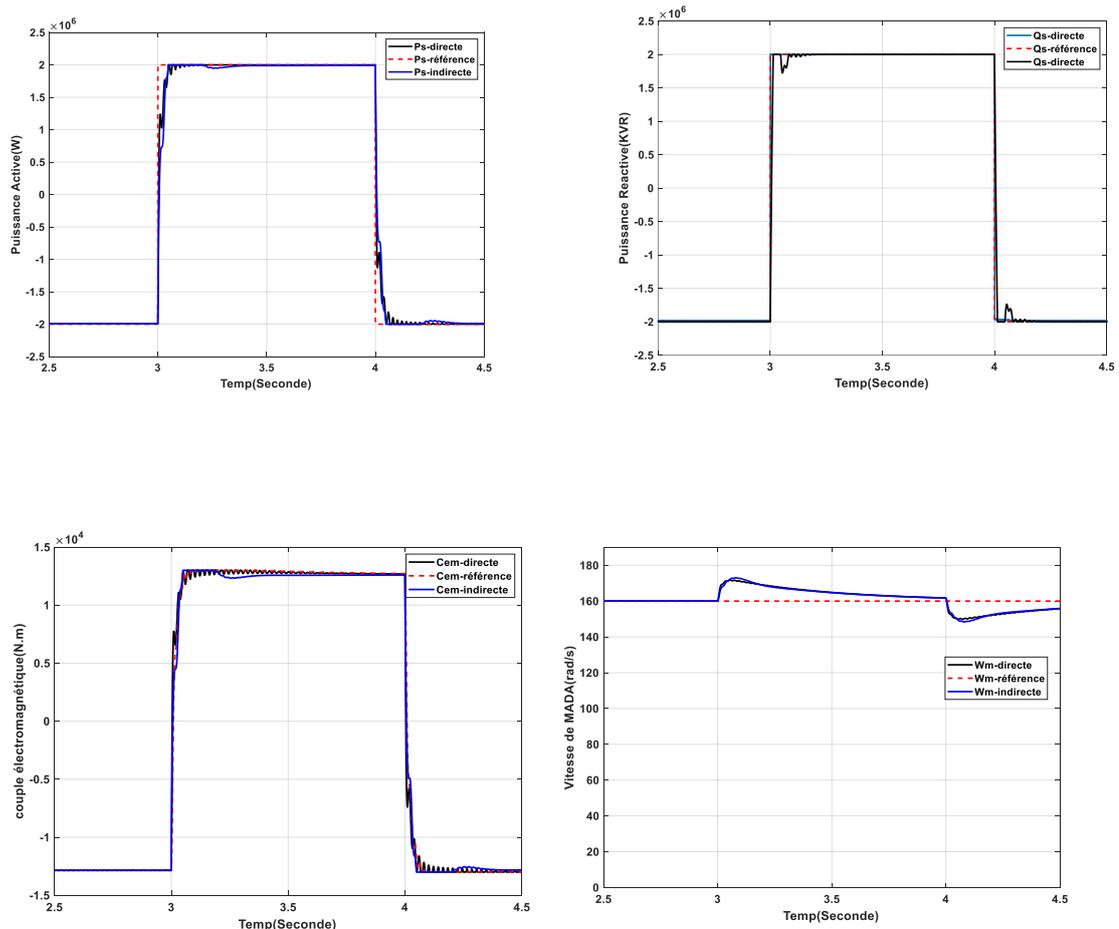
La simulation a été exécutée en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Nous avons soumis le système à des échelons de puissance active et réactive pour étudier son comportement en régulation. Les figures (Fig.1) et (Fig.2) illustrent respectivement les résultats de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

Pour la (fig.1), il est notable que la génératrice suit efficacement les échelons de puissance, tant pour la puissance active que pour la puissance réactive. Il est également observé que la puissance active statorique, P_s , est influencée par le courant rotorique en quadrature, I_{qr} , tandis que la puissance réactive statorique, Q_s , dépend du courant rotorique direct, I_{dr} . Ceci démontre l'effet du couplage entre les deux axes de commande d et q. La puissance active et réactive du côté statorique sont ajustables en fonction des besoins du réseau, comme en témoigne leur fluctuation. Une valeur négative de la puissance active indique que le réseau, dans ce cas, absorbe l'énergie fournie par la MADA.

Quant à la (fig. 2), elle met en évidence la dynamique satisfaisante du système avec une erreur statique pratiquement nulle, tant pour la puissance active que pour la puissance réactive. La réaction dynamique est rapide et sans dépassement significatif. De plus, le couplage entre les deux puissances est minime et peu perceptible.

3.3. Tests de robustesse figure17



L'évaluation de la robustesse des commandes revêt une importance cruciale, particulièrement pour les systèmes impliquant plusieurs entités en interaction ou

Chapitre 02 : Modélisation de la MADA et la stratégie de commande

présentant des variations importantes de paramètres. La (Fig. 3) illustre une comparaison de la robustesse entre la commande vectorielle directe et indirecte.

Il est vrai que la commande directe se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, mais elle ne garantit pas les performances optimales. En revanche, la méthode indirecte, grâce à son bouclage en cascade, offre un niveau de performance supérieur. Bien qu'elle soit plus complexe à mettre en œuvre que la commande directe, elle permet d'atteindre un fonctionnement optimal du système de génération électrique.

Chapitre 03 :

Algorithme super-Twisting

1. Contrôle en mode glissant

Le contrôle en mode glissant (Sliding Mode Control, SMC) est une technique de contrôle non linéaire robuste utilisée pour la commande de systèmes dynamiques. Il s'agit d'une méthode efficace pour gérer les systèmes incertains ou soumis à des perturbations. Le principe fondamental du SMC repose sur l'application d'une loi de contrôle discontinue qui force l'état du système à glisser le long d'une surface de glissement prédéfinie dans l'espace des états. Voici les éléments clés de cette méthode :

- Surface de glissement : Une surface de glissement est définie dans l'espace des états du système. Lorsque le système est sur cette surface, il suit une dynamique réduite et souhaitée. La surface est souvent choisie de manière à stabiliser l'erreur de suivi ou à atteindre une performance désirée.
- Phases du contrôle en mode glissant : Attraction : Le contrôle est conçu pour attirer l'état du système vers la surface de glissement. Glissement : Une fois sur la surface, le système "glisse" le long de celle-ci, suivant la dynamique imposée par la surface de glissement.
- Loi de contrôle discontinue : Le contrôle en mode glissant utilise une loi de contrôle discontinue qui change brusquement en fonction de la position de l'état par rapport à la surface de glissement. Cette discontinuité est cruciale pour garantir que le système reste sur la surface malgré les perturbations et les incertitudes.

2. Avantages

- Robustesse: Le SMC est intrinsèquement robuste aux incertitudes du modèle et aux perturbations externes, car une fois le système en mode glissant, sa dynamique n'est plus affectée par ces perturbations.
- Convergence rapide : Le système converge rapidement vers la surface de glissement et reste dessus, assurant ainsi une performance de suivi élevée.

3. Inconvénients

- Effet de chattering : La nature discontinue du contrôle peut entraîner des oscillations rapides, appelées "chattering", autour de la surface de glissement.
-

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

- Cela peut être problématique pour les systèmes mécaniques en raison de l'usure et des vibrations induites.
- Complexité de mise en œuvre : La conception de la surface de glissement et de la loi de contrôle nécessite une compréhension approfondie de la dynamique du système et des techniques mathématiques avancées.

4. Applications

Le contrôle en mode glissant est utilisé dans divers domaines tels que :

- La robotique, pour le contrôle de bras manipulateurs.
- Les systèmes de puissance, pour le contrôle des convertisseurs et des moteurs.
- Les véhicules autonomes, pour le contrôle de la trajectoire.
- Les systèmes de télécommunications, pour la gestion de la qualité de service et de l'interférence.

En résumé, le contrôle en mode glissant est une méthode puissante pour gérer les systèmes dynamiques non linéaires, offrant une robustesse remarquable face aux incertitudes et aux perturbations. Cependant, son implémentation nécessite de surmonter des défis comme le chattering et la complexité de conception.

5. Contrôle en mode glissant de premier ordre

Le contrôle en mode glissant de premier ordre est une commande à structure variable qui peut changer de structure et commuter entre deux valeurs selon une logique de commutation très spécifique ($S(x)$) [16, 14]. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface, puis le glissement le long de celle-ci (Fig. 1).

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

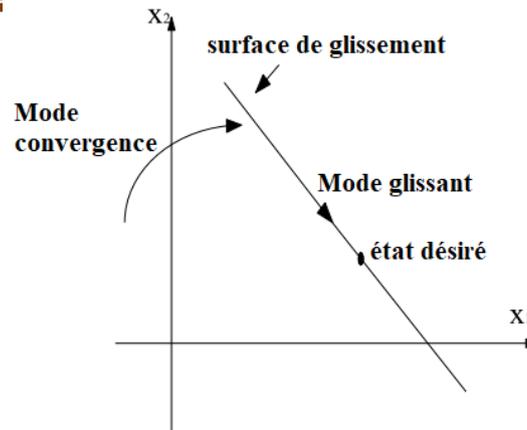


Figure 15. Différents modes de convergence.

La synthèse du contrôle en mode glissant se fait en trois étapes [17, 18] :

- 1- Choix de la surface de glissement.
- 2- Condition d'existence du mode glissant.
- 3- Détermination de la loi de commande.

o Choix de la surface de glissement

Pour un système non linéaire présenté dans l'équation (10) :

$\begin{cases} \dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u(x, t) \\ x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R} \end{cases}$	(1)
--	-----

où, $f(x,t)$ et $g(x,t)$ sont deux fonctions non linéaires continues et incertaines supposées bornées. Nous prenons la forme d'une équation générale proposée par Slotine et Li [6] :

$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x)$ $e = x - x_d$	(2)
---	-----

Où :

- e : erreur sur la grandeur à ajuster.
- λ : coefficient positif.
- n : ordre du système.
- x_d : grandeur désirée.

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

- x : variable d'état de la grandeur commandée.

○ Condition d'existence du mode glissant

Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapunov de l'équation (13) :

$\left\{ V(S) = \frac{1}{2} S^2 \right.$	(3)
--	-----

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement ($S(x, t)$) tende vers 0 est que la dérivée temporelle de ($V(S)$) soit négative [21, 22]:

$\left\{ \dot{S} \cdot S < 0 \right.$	(3)
---------------------------------------	-----

Pour une convergence en temps fini, la condition de l'équation (3), qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement, est remplacée par une condition plus restrictive appelée (η)-attractivité et donnée par :

$\dot{S} \cdot S \leq -\eta S , \eta > 0.$	(4)
---	-----

Cela garantit que la variable de glissement ($S(x, t)$) tend vers zéro de manière plus rapide et assure une convergence en temps fini vers la surface de glissement.

○ Loi de commande

Dans notre cas, la méthode choisie est celle du contrôle équivalent, illustrée de manière schématique sur la figure 3. La commande équivalente est une fonction continue qui sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement ($S = 0$). Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface : ($S = 0$) et (\dot{S}) [23, 24].

Cependant, cette commande n'oblige pas les trajectoires du système à converger vers la surface de glissement. Ainsi, la commande (u) est la somme de la commande équivalente et d'une composante discontinue (Figure 3) assurant une convergence et un régime de glissement [25].

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

$u = u_{eq} + u_d$	(5)
--------------------	-----

Où :

u_{eq} : Commande équivalente.

u_d : Composante discontinue.

La composante discontinue (u_d) est définie par :

$u_d = -\alpha \text{sign}(S)$	(5)
--------------------------------	-----

Où (α) est une constante positive. Cette composante discontinue (u_d) est cruciale pour forcer le système à converger vers la surface de glissement ($S = 0$) et maintenir le régime de glissement, assurant ainsi une performance de contrôle efficace sous contraintes.

6. Chattering

Un régime de glissement idéal nécessite une commande capable de commuter à une fréquence infinie. Ainsi, pendant le régime de glissement, les discontinuités appliquées au contrôle peuvent provoquer un phénomène de chattering . Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement (Figure 3). Les principales raisons de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au contrôle. Ces commutations affectent la précision du contrôle et peuvent être néfastes pour le contrôleur en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une augmentation de la température dans les systèmes électriques (perte significative d'énergie).

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

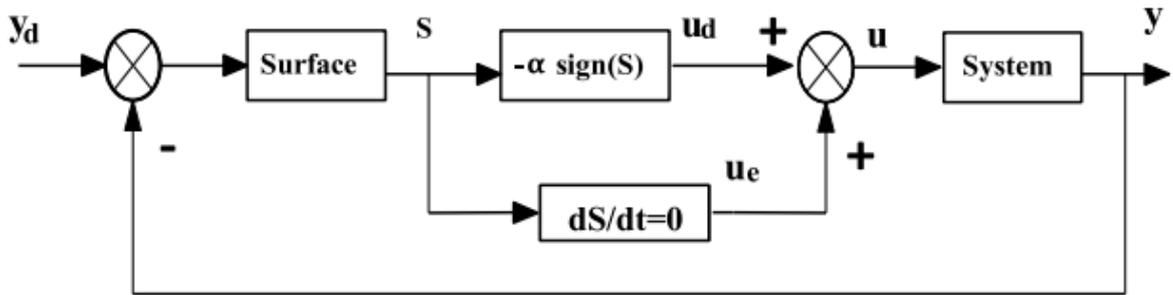


Figure 16.Principe de la commande coulissante à commande équivalente.

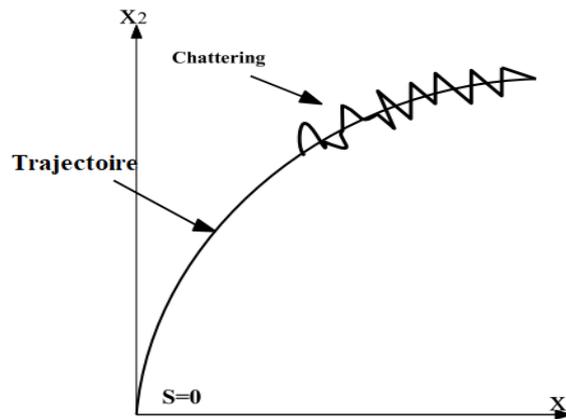


Figure 17.Le phénomène du chattering.

Pour réduire ou éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, telles que la solution de couche limite, le mode glissant flou, le mode glissant de haut ordre, la loi d'approche, etc. Dans notre travail, nous choisissons la méthode du contrôle en mode glissant super-twisting.

7. Mode glissant de haut ordre

La théorie du contrôle en mode glissant de haut ordre est une alternative au problème des modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans la commande synthétisée mais dans l'une de ses dérivées élevées, ce qui permet de réduire le chattering. Les modes glissants de haut ordre ont été introduits pour surmonter le problème du chattering tout en conservant les propriétés de convergence en temps fini et la robustesse des contrôles en mode glissant conventionnels, tout en améliorant également la précision asymptotique. La plupart des commandes utilisant ce concept sont basées sur la notion d'homogénéité, avec un ensemble particulier de coefficients (poids).

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

○ Concepts de base du contrôle en mode glissant de haut ordre

Considérons un système non linéaire incertain dont la dynamique est décrite par :

$\begin{cases} \dot{x}^n = f(x, t) + g(x, t)u(x, t) \\ S = S(x, t) \end{cases}$	(6)
---	-----

Où $x = [x_1, \dots, \dots, x_n]^T \in x \subset R^n$ représente l'état du système. La commande $u \in U \subset R$ est une fonction discontinue et bornée dépendant de l'état et du temps. f et g sont des champs vectoriels suffisamment différentiables mais dont la connaissance est incertaine. S est la variable de glissement choisie pour assurer la convergence en temps fini vers l'ensemble de glissement d'ordre n . L'ensemble de glissement d'ordre n par rapport à $S(x, t)$ est défini par :

$$S_n = \{x \in X : S = \dot{S} = \dots = S^{n-1} = 0\}$$

Par abus de langage, cet ensemble est souvent appelé surface de glissement d'ordre n . Si le système est de degré relatif $n > 1$ par rapport à la variable de glissement, le contrôle en mode glissant d'ordre n permettra une convergence en temps fini vers la surface, en forçant les trajectoires de l'état du système à être confinées à l'ensemble de glissement.

○ Algorithme de twisting

En plus de la commutation du signe du contrôle, son amplitude est commutée entre deux valeurs selon le quadrant dans lequel se trouve l'état du système. La trajectoire du système dans le plan de phase tourne autour de l'origine, s'en approchant comme une spirale. Son expression pour un système de degré relatif 2 est :

$u = -r_1 \text{sign}(S) - r_2 \text{sign}(\dot{S}), r_2 > r_1 > 0$	(7)
---	-----

Sous les conditions décrites par les inégalités (Figure 4), la trajectoire du système différentiel converge au point d'équilibre (\dot{S}, S) en un temps fini sous les conditions suivantes :

$\begin{cases} (r_1 - r_2)K_m - C_0 > (r_1 - r_2)K_m + C_0 \\ (r_1 + r_2)K_m > C_0 \end{cases}$	(8)
---	-----

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

L'homogénéité de cette loi de contrôle est évidente, car son expression ne dépend pas de la valeur de S ou \dot{S} , mais seulement de leur signe, qui ne varie pas en les multipliant par $K > 0$.

o Algorithme de super-twisting

L'algorithme de super-twisting est une exception dans une classe de contrôle en mode glissant du second ordre. Cet algorithme a été développé pour le contrôle des systèmes de degré relatif égal à 1 par rapport à la surface de glissement. Super-twisting n'utilise pas d'information sur, ce qui peut être considéré comme un avantage. Il se compose de deux parties, une partie discontinue et une partie continue :

$ \begin{aligned} u(t) &= u_1(t) + u_2 \\ \dot{u}_1 &= \begin{cases} -u & \text{si } u > U_M \\ -\alpha \text{sign}(S) & \text{sinon} \end{cases} \\ u_2 &= \begin{cases} -\lambda S_0 ^\rho \text{sign}(S) & \text{si } u > S_0 \\ -\lambda S ^\rho \text{sign}(S) & \text{sinon} \end{cases} . \end{aligned} $	(9)
--	-----

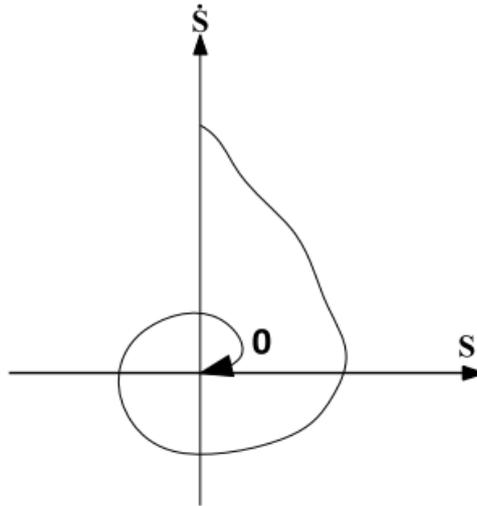


Figure 18. Convergence de l'algorithme de twisting dans le plan (\dot{S}, S)

Avec α, λ, ρ , vérifiant les inégalités suivantes :

$ \begin{cases} \alpha > \frac{C_0}{K_m}, 0 < \rho < 0.5 \\ \lambda^2 = \frac{4C_0K_M(\alpha + C_0)}{K_m^2K_m(\alpha - C_0)} \end{cases} $	(10)
--	------

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

Cette commande se décompose en un terme algébrique (non dynamique) et un terme intégral. Par conséquent, nous pouvons considérer cet algorithme comme une généralisation non linéaire d'un régulateur Proportionnel Intégral (PI).

Si ($S_0 = \infty$), nous pouvons simplifier l'algorithme :

$\begin{cases} u = -\lambda S ^\rho \text{sign}(S) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -\alpha \text{sign}(S) \end{cases}$	(10)
---	------

En choisissant spécifiquement le modèle et la surface de glissement, l'algorithme de commande par glissement super-twisting peut être formulé comme un algorithme d'observation pour estimer la dérivée d'un signal mesuré \cite{ref31, ref32}..

8. Contrôle en mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

Pour contrôler la puissance, nous prenons ($n = 1$). L'expression de la surface de contrôle de la puissance active et réactive est la suivante :

$\begin{aligned} S(P) &= P_{s-ref} - P_s \\ S(Q) &= Q_{s-ref} - Q_s \end{aligned}$	(11)
--	------

Ces expressions définissent l'erreur entre les valeurs réelles des sorties de puissance (P_s) et (Q_s) et leurs valeurs de référence respectives (P_{s-ref}) et (Q_{s-ref}). Le contrôle en mode glissant ajuste ces paramètres pour assurer une régulation optimale de la puissance dans les systèmes MADA.

Pendant le mode de convergence, pour que la condition ($(\dot{S}(P) \cdot S(P) \leq 0)$) soit satisfaite, nous posons :

$\dot{S}(P) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{qr}^n$	(12)
---	------

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

$V_{qr}^n = KV_{qr}sat(S(P))$	(13)
-------------------------------	------

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre (KV_{qr}) doit être positif [26]. Pour atténuer tout dépassement éventuel de la tension de référence (V_{qr}), il est souvent utile d'ajouter un limiteur de tension exprimé par :

$V_{qr}^{lim} = V_{qr}^{max}sat(S(P))$	(14)
--	------

Pendant le mode de convergence, pour que la condition ($(S(\dot{P}).S(P) \leq 0)$) soit satisfaite, nous posons :

$\dot{S}(Q) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{dr}^n$	(15)
---	------

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$V_{dr}^n = KV_{dr}sat(S(Q))$	(16)
-------------------------------	------

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre (KV_{dr}) doit être positif. Pour atténuer tout dépassement éventuel de la tension de référence (V_{dr}), il est souvent utile d'ajouter un limiteur de tension exprimé par :

$V_{dr}^{lim} = V_{dr}^{max}sat(S(Q))$	(17)
--	------

9. Contrôle en mode glissant super-twisting de la MADA

Un STSMC (Super-Twisting Sliding Mode Control) est un contrôle continu de mode glissant du deuxième ordre. Le STSMC contrôle les régulateurs de puissance active et réactive conçus pour modifier les tensions des axes d et q (V_{dr} , V_{qr}), respectivement, comme dans l'équation (18).

$\begin{aligned} V_{dr} &= -\lambda S_0(P) ^\rho \text{sign}(S(P)) - \alpha_1 S ^\rho \text{sign}(S(P)) \\ &\quad + \int -\alpha \text{sign}(S(P)) \\ V_{qr} &= -\lambda S_0(Q) ^\rho \text{sign}(S(Q)) - \alpha_2 S(Q) ^\rho \text{sign}(S(Q)) \\ &\quad + \int -\alpha \text{sign}(S(Q)). \end{aligned}$	(18)
--	------

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

Où l'erreur de puissance active du stator (S(P)) et l'erreur de puissance réactive du stator (S(Q)) sont les variables de glissement, et les gains constants (α_1) et (α_2) vérifient les conditions de stabilité.

La condition adéquate pour la convergence vers la surface de glissement et pour la stabilité est que les gains soient suffisamment grands [29].

$\alpha_1 > \frac{C_0}{K_m}, \alpha_2 \geq \frac{4C_0K_M(\alpha_1 + C_0)}{K_m^2K_m(\alpha_1 - C_0)}$	(19)
--	------

Où ($C \leq C_0$) et ($K_M \leq K \leq K_m$) sont les bornes supérieures et inférieures de (C) et (K), respectivement, dans la seconde dérivée de (y).

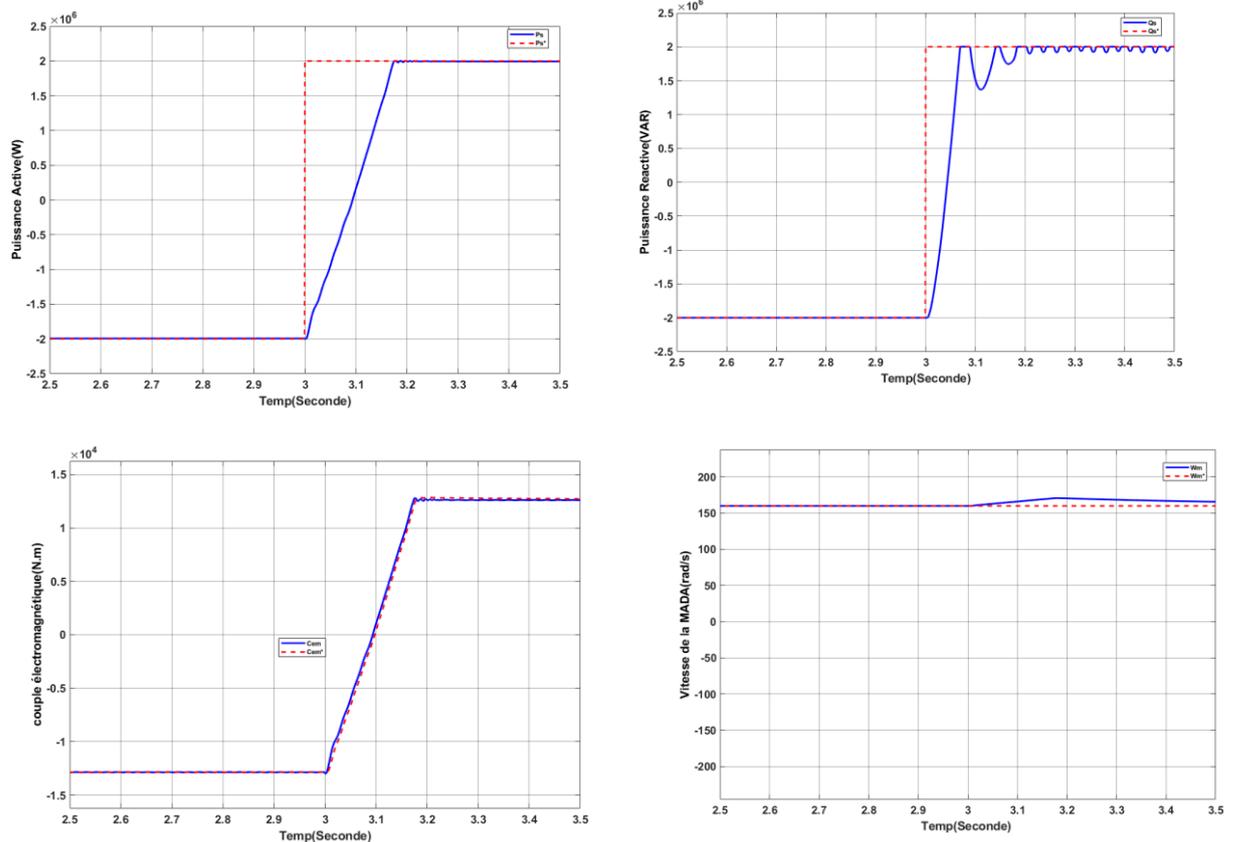
$\ddot{y} = C(x, t) + K(x, t) \frac{du}{dt}$	(20)
--	------

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

2. Résultats de simulation

c. La commande par modèle glissant avec algorithme super twisting

(Figure18)



La figure (Fig.4) présente les résultats de la commande par modèle glissant avec l'algorithme super twisting appliquée à la MADA.

9.1.1. Suivi de la Puissance Active et Réactive

- La courbe de la puissance active (P_s) montre un suivi efficace des échelons de référence, avec des oscillations minimales indiquant une bonne performance dynamique.
- La puissance réactive (Q_s) présente également une réponse stable avec peu d'oscillations, démontrant un contrôle précis sur le comportement réactif du système.

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

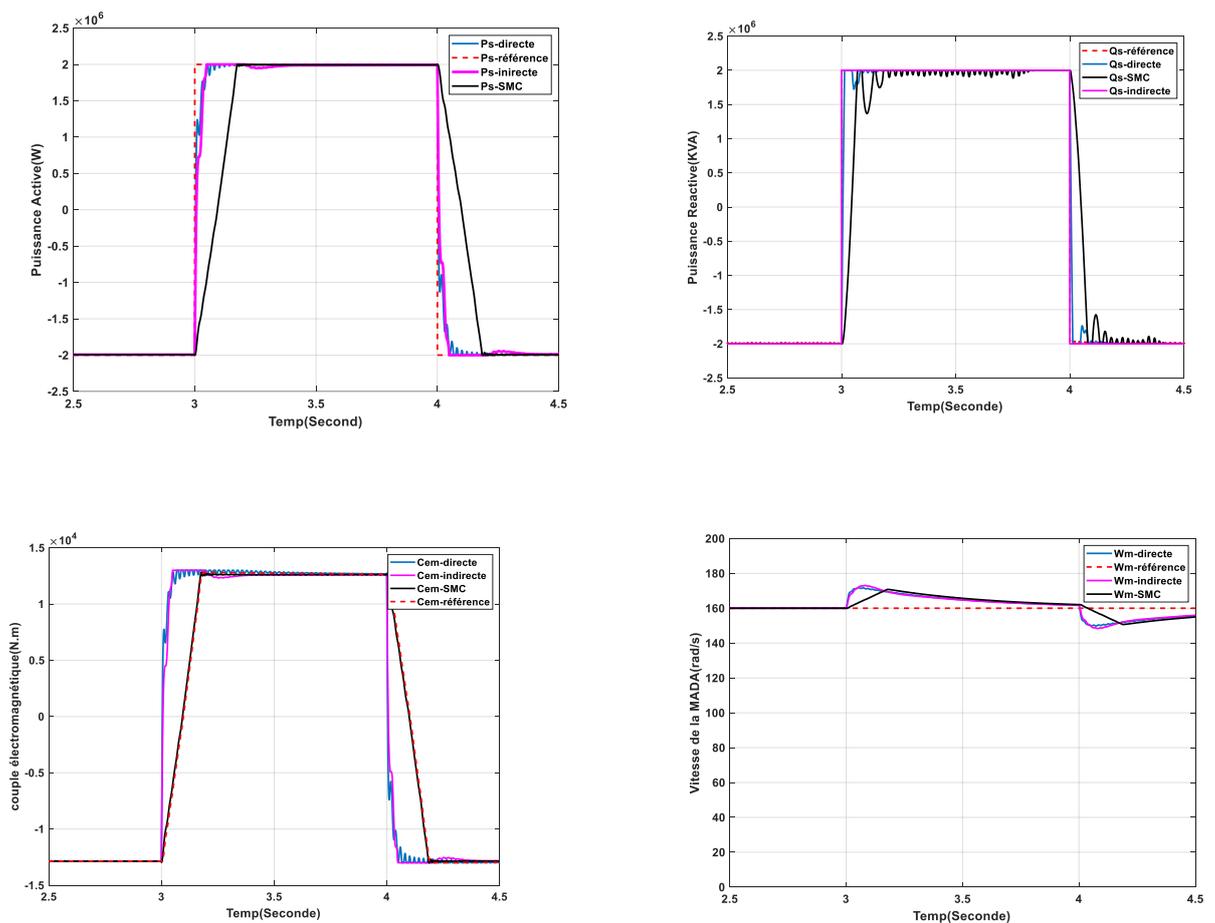
9.1.2. Réponse Dynamique

- Les courbes montrent une réponse dynamique rapide avec des temps de montée courts et une erreur statique pratiquement nulle.
- L'algorithme super twisting améliore clairement la performance transitoire par rapport aux méthodes directes et indirectes.

9.1.3. Couplage Minimal

- Contrairement à la commande indirecte, le couplage entre les puissances active et réactive est minimal avec le modèle glissant super twisting, indiquant une gestion efficace des interactions entre les axes d et q.

10.2. Comparaison avec la Commande Directe et Indirecte : Tests de



. L'étude et les simulations des trois modes de contrôle de la MADA – contrôle vectoriel direct, contrôle vectoriel indirect et commande par modèle glissant avec algorithme

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

super twisting – ont permis d'évaluer leur performance en termes de réponse dynamique, stabilité et robustesse face aux variations de paramètres.

9.1.4. Contrôle Vectoriel Direct

- Performance Dynamique : Satisfaisante en termes de suivi des consignes de puissance active et réactive, mais sensible aux variations de paramètres.
- Stabilité : Oscillations significatives et stabilisation lente après des perturbations.
- Robustesse : Moins robuste que les autres méthodes avec des fluctuations notables.

9.1.5. Contrôle Vectoriel Indirect

- Performance Dynamique : Meilleure réponse dynamique que le contrôle direct avec une erreur statique pratiquement nulle.
- Stabilité : Réaction rapide sans dépassement significatif, montrant un comportement global satisfaisant.
- Robustesse : Modérément robuste avec une meilleure gestion des variations de paramètres.

9.1.6. Commande par Modèle Glissant avec Algorithme Super Twisting :

- Performance Dynamique : Excellente réponse dynamique avec des temps de montée courts et une précision élevée.
- Stabilité : Stabilité remarquable avec des oscillations minimales et une réaction rapide aux variations de consignes.
- Robustesse : La plus robuste des trois méthodes, maintien des performances optimales malgré les variations significatives des paramètres de la machine.

9.1.7. Mode de Contrôle Direct

- Puissance Active (P_s) : La réponse de P_s montre des fluctuations notables après la variation des paramètres à 2s. La stabilisation prend du temps, indiquant que le contrôle direct est sensible aux variations de paramètres.
- Puissance Réactive (Q_s) : Q_s présente également des oscillations après la variation des paramètres, bien que moins prononcées que P_s . La stabilisation est relativement lente.

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

- Couple Électromagnétique (Cem) : Des fluctuations significatives sont observées dans le couple, démontrant que le contrôle direct peut être affecté par des variations soudaines des paramètres.

9.1.8. Mode de Contrôle Indirect :

- Puissance Active (Ps) : La réponse de Ps est plus stable par rapport au contrôle direct, bien que des oscillations soient toujours présentes après la variation des paramètres.
- Puissance Réactive (Qs) : Qs montre une meilleure robustesse avec moins d'oscillations et une stabilisation plus rapide.
- Couple Électromagnétique (Cem) : Le couple électromagnétique est relativement stable, mais des fluctuations mineures persistent. Le contrôle indirect gère mieux les variations de paramètres que le contrôle direct.

9.1.9. Mode de Contrôle par Modèle Glissant avec Algorithme Super Twisting :

- Puissance Active (Ps) : Ps montre une excellente robustesse, avec très peu d'oscillations après la variation des paramètres. La stabilisation est rapide, indiquant une meilleure adaptation aux changements.
- Puissance Réactive (Qs) : Qs est remarquablement stable, avec une réponse rapide et presque sans oscillations, démontrant l'efficacité du modèle glissant avec super twisting.
- Couple Électromagnétique (Cem) : Le couple électromagnétique est stable et présente des oscillations minimales, même après la variation des paramètres. Ce mode de contrôle montre une supériorité claire en termes de robustesse et de stabilité.

Les tests de robustesse montrent que la commande par modèle glissant avec algorithme super twisting est la plus performante des trois modes de contrôle testés. Elle offre une meilleure stabilité, une réponse rapide et des oscillations minimales, même en présence de variations significatives des paramètres de la machine. Le contrôle indirect offre une robustesse intermédiaire, tandis que le contrôle direct est le plus sensible aux variations de paramètres. Ces résultats suggèrent que pour des applications exigeantes nécessitant une grande robustesse face aux perturbations, la commande par modèle glissant avec algorithme super twisting est la solution optimale.

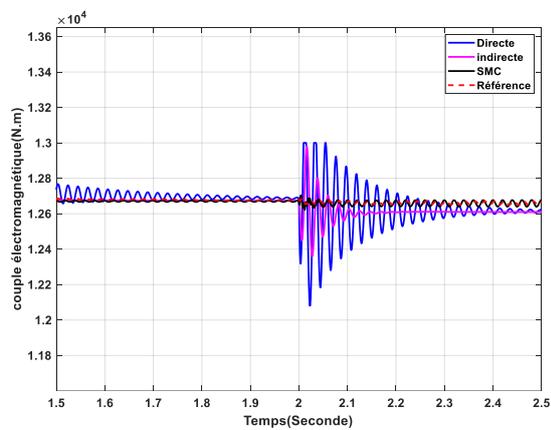
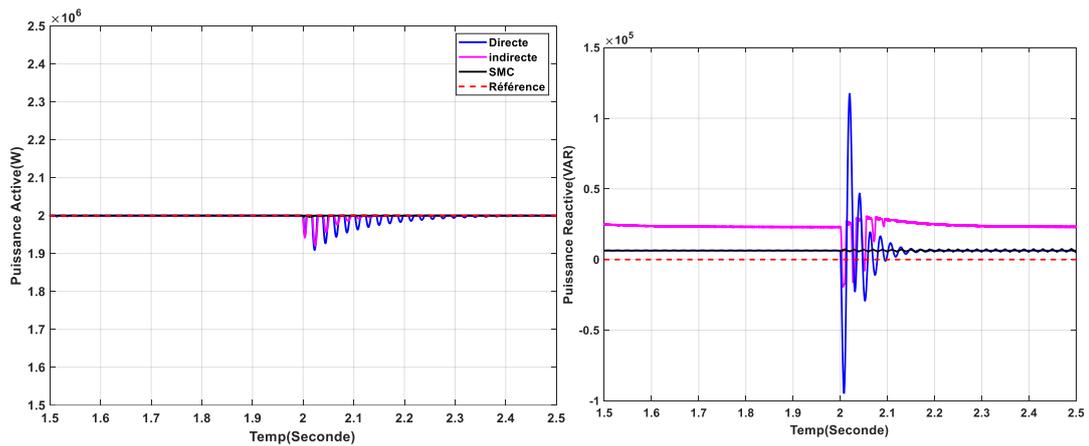
Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

a. Robustesse face aux changements de paramètres

Variation des paramètres de la machine

Resistance statorique

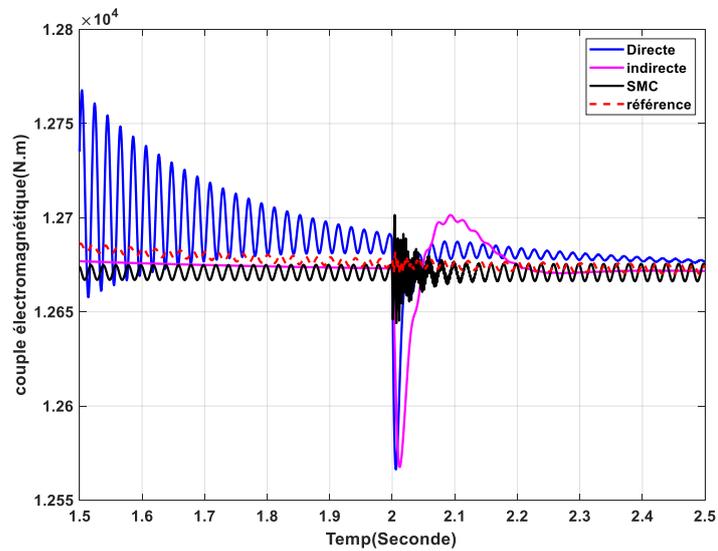
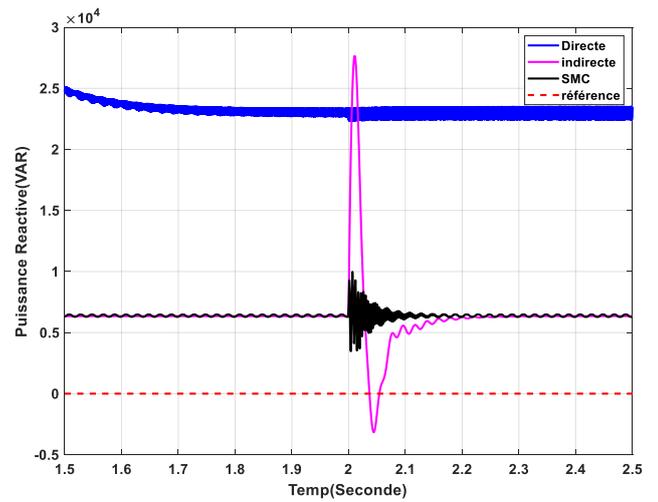
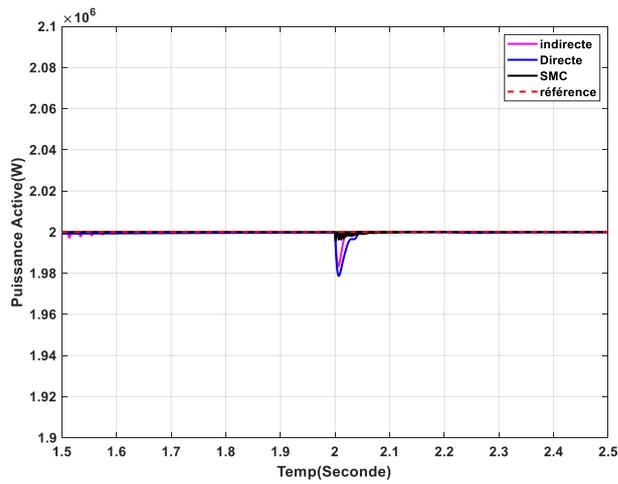
Temps $< 2s$ $R_s = 2$.



Resistance Rotorique

temps $< 2s$ $R_r = 2.89e-3$;

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting

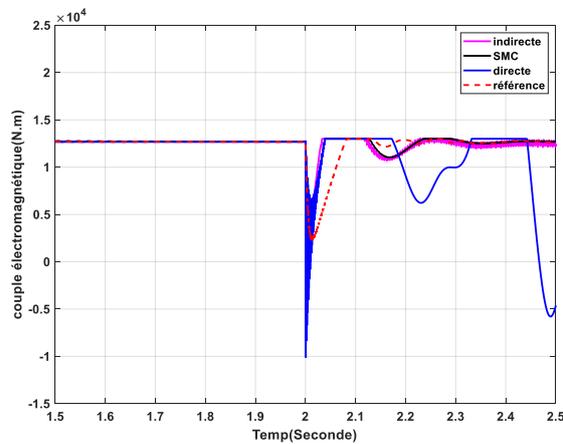
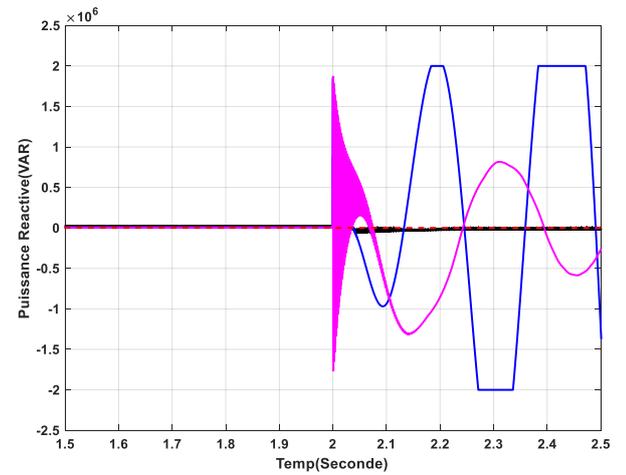
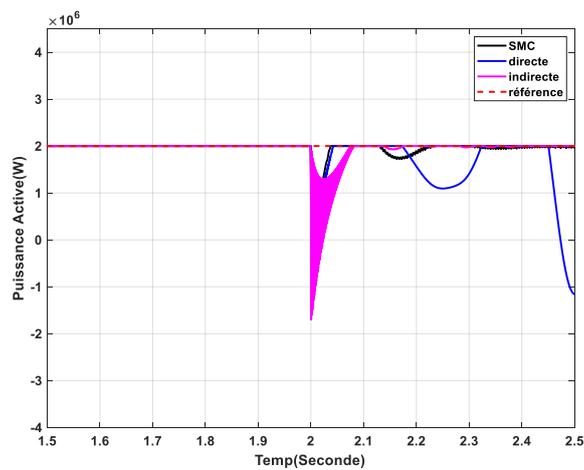


temps $> 2s$ $R_r = 2 * 2.89e-3$;

Inductance Statorique

temps $< 2s$ $L_s = 2.586e-3$;

Chapitre 03 : Algorithme super- Twisting



temps > 2 s $L_s = 2 * 2.586e-3$;

Pour évaluer la robustesse des trois modes de contrôle (direct, indirect et par modèle glissant avec algorithme super twisting) de la MADA, des variations des paramètres de la machine ont été introduites. Voici les variations spécifiques appliquées : - Résistance statorique (R_s) : Doublement de R_s après 2s. - Résistance rotorique (R_r) : Doublement de R_r après 2s. - Inductance statorique (L_s) : Doublement de L_s après 2s. Les courbes de puissance active (P_s), puissance réactive (Q_s) et couple électromagnétique (C_{em}) ont été tracées pour chaque mode de contrôle. Voici les commentaires et discussions basés sur ces courbes

Conclusion Générale

Conclusion generale

Ce mémoire a exploré en profondeur divers aspects de la production et du contrôle de l'énergie éolienne, mettant en évidence les avancées technologiques et les méthodologies de commande qui permettent d'optimiser cette source d'énergie renouvelable cruciale.

Dans le premier chapitre, nous avons souligné l'importance de l'énergie éolienne dans le contexte mondial actuel de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique. L'énergie éolienne, avec ses nombreux avantages écologiques et économiques, joue un rôle clé dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la diversification du mix énergétique. La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) a été identifiée comme une technologie essentielle pour le contrôle efficace des systèmes éoliens, permettant d'optimiser la production d'énergie et d'assurer un fonctionnement stable du réseau électrique.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur la modélisation de la MADA et les stratégies de commande associées. Nous avons détaillé la modélisation complète d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, en mettant en avant l'importance de la transformation de Park et de la Commande Orientée Champ (FOC). Les simulations réalisées avec MATLAB/SIMULINK™ ont validé la robustesse et la fiabilité des modèles proposés, démontrant leur pertinence pour l'optimisation des performances des systèmes éoliens.

Le troisième chapitre a introduit la commande par mode glissant, une méthode de contrôle robuste capable de gérer les écarts entre le système réel et le modèle mathématique. La commande par mode glissant d'ordre 1 et l'algorithme super-twisting ont été particulièrement mis en avant pour leur capacité à réduire les effets indésirables du chattering et à offrir une réponse rapide et stable même en présence de variations des paramètres du système.

Les tests de robustesse ont montré que la commande par modèle glissant avec algorithme super-twisting est la plus performante parmi les méthodes testées, offrant une meilleure stabilité, une réponse rapide et des oscillations minimales. Ces résultats suggèrent que cette méthode de commande est optimale pour des applications exigeantes nécessitant une grande robustesse face aux perturbations.

En conclusion, ce mémoire a démontré l'importance de l'énergie éolienne et des technologies de commande avancées pour l'optimisation des systèmes éoliens. La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) et la commande par mode glissant avec algorithme super-twisting se révèlent être des solutions prometteuses pour maximiser la production d'énergie éolienne et assurer la stabilité du réseau électrique. Ces contributions sont essentielles pour avancer vers un futur énergétique durable et réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Les perspectives de recherche futures incluent l'amélioration continue des algorithmes de commande et l'intégration de nouvelles technologies pour encore mieux exploiter le potentiel de l'énergie éolienne.

Bibliographie

Bibliographie

- (s.d.). *Abdessemed, R. (2012). Modélisation et simulation des Machines Electriques. Batna : TECHNOSUP.*
- (s.d.). *Alsati, B.A., Ibrahim, G.I. & Moussa, R.R. Study the impact of transient state on the doubly fed induction generator for various wind speeds. J. Eng. Appl. Sci. 70, 65 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00232-6>.*
- Bedoud, K., Lakel, R., Rachedi, M. A., & Lekhchine, S. (2013). Modélisation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation. In 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 2013.*
- Bouyekni. (2018). Commande par mode glissant d'ordre 2 pour une capture maximale d'énergie d'une turbine éolienne. Revue des Energies Renouvelables, 21(1).*
- (s.d.). *Chemidi, A. (2015). Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme (Thesis for PhD). Ecole supérieure en sciences appliquées Tlemcen, Algeria. DOI: 10.13140/RG.2.2.20191.20641.*
- (s.d.). *Din, Z., Zhang, J., Xu, Z., Zhang, Y., Milyani, A. H., Cheema, K. M., ... & Song, Y. (2022). Recent development and future trends of resonance in doubly fed induction generator system under weak grid. IET Renewable Power Generation, 16(5), 807-834.*
- (s.d.). *Djeriri, Y., Mesai Ahmed, H., & Boudjema, Z. (2018, December). Commande à structure variable de la machine asynchrone à double alimentation destinée à la production d'énergie éolienne. . Paper presented at the 2nd International Symposium on Mechatronics & Renewable Energy (ISMRE'2018), Algeria.*
- (s.d.). *Gasmi, H. (2023). Contribution à l'amélioration de la commande des chaines de conversion éoliennes (Thèse de doctorat en 3ème cycle, Domaine: Sciences et Technologie, Filière: Electronique, Spécialité: Contrôle avancé). . Faculté des sciences et de la technologie, Département Electronique et télécommunications, Laboratoire de Contrôle Avancé LABCAV.*
- (s.d.). *Gu, T., Wang, P., Liu, D., Sun, A., Yang, D., & Yan, G. (2023). Modeling and small-signal stability analysis of doubly-fed induction generator integrated system. *Global Energy Interconnection, 6*(4), 438-449. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.08.005>.*
- (s.d.). *IFP Energies nouvelles. (2023). Rédacteurs-en-chef : Paul Lucchese et Benoît Noetinger. Comité éditorial. eISSN : 2804-7699. Revue en Open Access. Facteur d'impact 2022* : 1,5. Facteur d'impact 2022 à 5 ans* : 1,6. *Journal Citation Reports™ de Clarivate.*
- (s.d.). *Lahcen, A. (2020). Contrôle ADRC de l'éolienne utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Ecole Supérieure de Technologie, Oujda, Morocco.*
- (s.d.). *Lin, X. (2022). Application of wind power generation and its effect on environmental protection [Thesis, Centria University of Applied Sciences, Environment Chemistry and Technology].*
- Moniteur, L. (2 mars 2021). Comment ça marche: énergie éolienne. www.lemoniteur.fr. <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-ca-marche-energie-eolienne.707314>.*
(s.d.).

Bibliographie

- (s.d.). *Olabi, A.G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Salameh, T., Sayed, E.T., Husain, K.S., & Abdelkareem, M.A. (2021). Selection Guidelines for Wind Energy Technologies. Energies, 14, 3244. <https://doi.org/10.3390/en14113244>.*
- Rapport spécial n° 5/2018: Énergies renouvelables et développement rural durable. (2018). <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/renevable-energy-5-2018/fr/>. (s.d.).*
- (s.d.). *Rev. Afr. Droit Environ. (2020). Énergies renouvelables, transition énergétique et enjeux climatiques en droit africain, N° 05. Rev. Afr. Droit Environ. (2021). . La protection de l'environnement par les juridictions africaines : avancées nationales et régionales, N° 06.*
- (s.d.). *Rio, A. (2021). Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables : un jumeau numérique pour les microgrilles [Mémoire de maîtrise, Université Rennes 1]. ffnNT : 2021REN1S054ff. fftet03512793.*
- (s.d.). *Saba, P., & Saba, D. (2017). Modélisation Sémantique à base d'Agents pour la Gestion d'Energie dans un Système Multi Sources à Energie Renouvelable. DOI: 10.13140/RG.2.2.23077.42722: [Thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien]. République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. .*
- SANCHEZ, J. (2015). Sliding Mode Control Theory and Applications. Revue des Sciences de l'Ingénieur.*
- (s.d.). *Zaatri, A., & LATA. (November 2018). Introduction aux énergies renouvelables. Conférence organisée par l'Association APNE à Constantine, Centrale de Police, Constantine, Algérie.*

Annexe

Annexe

```
f=50
Ps=2e6
n=1500
Vs=690
Tem=13000
P=2
Rs=2.59e-3
Rr=2.89e-3
Ls=2.586e-3
Lr=Ls
M=2.5e-3
sigma=1-M^2/(Ls*Lr)
ws = 2*pi*f
J=10
D=0.8e-3
Vbus=1200
Fs = Vs * sqrt(2 / 3) / (2 * pi * f)
%% Model de la machine
Z1=[ Rs 0 0 0
     0 Rs 0 0
     0 0 Rr 0
     0 0 0 Rr ]

Z2=[ 0 0 0 0
     0 0 0 0
     0 M 0 Lr
     -M 0 -Lr 0 ]

Z3=[ 0 Ls 0 M
     -Ls 0 -M 0
     0 M 0 Lr
     -M 0 -Lr 0 ]

L=[ Ls 0 M 0
    0 Ls 0 M
    M 0 Lr 0
    0 M 0 Lr ]

B= inv(L);
%% Parameters des regulateurs machine
% Regulation de la vitesse
Kpq_vt = 2000
Kiq_vt = 4000
% Commande directe
% puissance reactive
Kpq_cd = 0.1
Kiq_cd = 1

%% Puissance active
Kpp_cd = 2e-05
```

Annexe

Kip_cd = 0.003

% Commande indirecte

% puissance reactive

Kpq_id = 14

Kiq_id = 330

%% Puissance active

Kpp_id = 1

Kip_id = 330

% current direct

Kpid_id = 0.001

Kiid_id = 0.09

%% current quadratique

Kpiq_id = 0.001

Kiiq_id = 0.09

Kd=500

Kq=500

Pw = 1.0e+06 * [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.0472, 0.1097, 0.1815, 0.2568, 0.3418,...
0.4437, 0.5642, 0.7046, 0.8667, 1.0518, 1.2616, 1.4976, 1.7613, 2.0534,...
2.3513, 2.4024, 2.4024, 2.4024, 2.4024, 2.4024, 2.4024]

Vw = [0.0000, 0.5556, 1.1111, 1.6667, 2.2222, 2.7778, 3.3333, 3.8889, 4.4444,...
5.0000, 5.5556, 6.1111, 6.6667, 7.2222, 7.7778, 8.3333, 8.8889, 9.4444,...
10.0000, 10.5556, 11.1111, 11.6667, 12.2222, 12.7778, 13.3333, 13.8889,...
14.4444, 15.0000]