

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI - LAGHOUT

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département d'électrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT 3^{ème} CYCLE DLMD

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Option : Commande électrique

Par

BEGHDADI Mohammed

THÈME

**Contribution à L'application des Techniques de
Commande Non Linéaire d'un Système Eolien
Associée à un Système de Stockage Connectée au
Réseau Electrique**

Soutenue le 11/01/2025 devant le Jury:

CHETIH Saliha	Professeur	Univ. Amar Telidji Laghouat	Présidente
KOUZI Katia	Professeur	Univ. Amar Telidji Laghouat	Directeur de thèse
AISSA Ameer	Professeur	Univ. Amar Telidji Laghouat	Co-Directeur
NOUR Mohamed	MCA	Centre universitaire Nour Bachir El Bayadh	Examineur
TOUAL Belkacem	MCA	Univ. Ziane Achour Djelfa	Examineur
BIRANE Mouhoub	MCA	Univ. Amar Telidji Laghouat	Examineur

REMERCIEMENTS

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله وحده و الصلاة و السلام على من لا نبى بعده

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, Pr **KATIA KOUZI**, pour sa guidance éclairée, son soutien constant et ses conseils précieux tout au long de cette aventure intellectuelle. Sa passion pour la recherche et son engagement envers mon travail ont été une source constante d'inspiration et ont grandement enrichi cette expérience doctorale.

Chère **AISSA AMEUR**, je tiens à vous adresser mes plus sincères remerciements pour votre soutien inestimable tout au long de mon parcours de recherche. Votre expertise, votre guidance et votre enthousiasme ont été des éléments clés dans la réalisation de ce projet.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères aux **membres du jury**, pour l'honneur qu'ils ont accordé à évaluer ce travail et pour leurs précieuses remarques et suggestions qui ont contribué à l'amélioration de cette thèse.

Je suis reconnaissant envers l'université de **LAGHOUAT** surtout département de génie électrique pour avoir fourni un environnement académique stimulant et des ressources nécessaires à la réalisation de cette recherche. Les opportunités de collaboration et les discussions enrichissantes avec mes collègues chercheurs ont grandement enrichi mon parcours doctoral.

Mes remerciements vont également à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible, leur encouragement constant et leur compréhension pendant les moments de doute et de difficulté. Leur amour et leur soutien ont été le moteur qui m'a poussé à aller de l'avant.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse. Leur soutien moral, leurs conseils avisés et leur présence ont été des éléments essentiels de cette réussite académique.

الإهداء

إلى روح أبي الغالي الذي طالما شجعني على المثابرة والجد رحمه الله تعالى،

إلى القلب المعطاء والدتي الحبيبة التي بها أعلو و عليها أرتكز أطل الله عمرها على طاعته،

إلى زوجتي، رفيقة دربي، توأم روحي و شريكة حياتي،
إلى بناتي،

إلى إخوتي وأخواتي الذين بذلوا جهداً في مساعدتي وكانوا خير سندٍ،
إلى كل عائلتي و أصدقائي،

إلى خالي محمد الذي كان بمثابة الشعلة التي أوقدت هذا العمل،
إلى كل أساتذتي و كل من ساهم و لو بحرف في حياتي الدراسية،
إلى كل هؤلاء: أهدي هذا العمل الذي أسأل الله تعالى أن يتقبله خالصاً.

محمد بغدادي

LISTE DES TRAVAUX

Les recherches présentées dans cette thèse ont donné lieu à plusieurs publications et communications, parmi lesquelles :

1. Revues Internationales :

- Beghdadi, M., & Kouzi, K. (2022). Novel fully sensorless synergetic control of brushless doubly fed induction machine integrated in wind energy conversion system driven by fuzzy-based HCS MPPT algorithm. *Wind Engineering*, 47(2), 385-407. <https://doi.org/10.1177/0309524x221130723>
- Beghdadi, M., Kouzi, K., & Ameer, A. (2023). Robust fully synergetic control of PMSM-Flywheel Energy Storage System FESS integrated in standalone hybrid PV-wind system. *Revista Română de Informatică Și Automatică*, 33(1), 67-80. <https://doi.org/10.33436/v33i1y202306>

2. Conférences Internationales :

- Beghdadi, M., Kouzi, K., & Ameer, A. (2019). New Design of an Optimized Synergetic Control by Hybrid BFO-PSO for PMSG Integrated in Wind Energy Conversion System Using Variable Step HCS Fuzzy MPPT. Dans *Lecture notes in networks and systems* (p. 30-40). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1_4
- Beghdadi, M., Kouzi, K., & Ameer, A, & Hamidat, M. (2020). A New Robust Synergetic Control of Brushless Doubly Fed Induction Machine Integrated in Wind Energy Conversion. Dans *4th international conference on artificial intelligence in renewable energetic systems, Tipaza, Algérie*.

ملخص

هذه الأطروحة تساهم و تعتني أساسا بتطوير تحكم غير خطي صلب متمثل في التحكم التآزري لآلة كهربائية مميزة ألا وهي الآلة الحثية ثنائية التغذية الغير مزودة بنظام الفرشات الكربونية التي أصبحت تستعمل حديثا في توربينات الرياح بصفة مكثفة.

هذه التحكم التآزري يسمح لنا بصفة شبه كلية بتلافي سلبيات طرق التحكم الخطية الكلاسيكية مثل التحكم السلمي، الشعاعي أو حتى التحكم المعروف ب DTC، مع حل جذري لمشكل الغوغانية الموجود في التحكم غير الخطي الأشهر و هو التحكم بالوضع الانزلاقي. من جهة أخرى فإن استعمال الآلة الحثية ثنائية التغذية الغير مزودة بنظام الفرشات الكربونية ينتج عنه تفادي السلبية الرئيسية للآلة التقليدية الحثية ثنائية التغذية التي كانت تستخدم من قبل في توربينات الرياح و المتمثل في ضرورة استعمال نظام الفرشات الكربونية و ما ينتج عنه من تأكلها الحتمي و بالتالي ضرورة التدخل الدوري لاستبدالها، و كل هذا مع المحافظة على كل المميزات العديدة الممنوحة من الآلة الحثية ثنائية التغذية.

و لبناء نظام أكثر فعالية فقد كان لازما استخدام تحكم غير مرتبط بالحساسات و خاصة الميكانيكية منها و ذلك باستخدام فلتر كالمان الممتد لحساب سرعة دوران الآلة الكهربائية و في الأخير يتم إدراج كل هذه الطرق في نظام واحد لتوليد الطاقة الكهربائية عبر طاقة الرياح مع استخدام خوارزمية لتتبع نقطة الاستطاعة القصوى متطورة تعتمد على المنطق الضبابي ليكون النظام ككل أكثر تطورا و فعالية.

لكن نظرا لعدم استقرار سرعة الرياح و التقطعات التي تعرفها فكان لابد من استخدام نظام تخزين للطاقة لاستخدامها في حالة الضرورة و قد تم اختيار النظام العطالي لتخزين الطاقة و الذي سيدمج في النظام السابق.

الكلمات المفتاحية: التحكم التآزري، الآلة الحثية ثنائية التغذية الغير مزودة بنظام الفرشات الكربونية، توربينات الرياح، فلتر كالمان الممتد، خوارزمية لتتبع نقطة الطاقة القصوى، المنطق الضبابي، النظام العطالي لتخزين الطاقة.

Résumé

Cette thèse contribue principalement à développer une commande non linéaire robuste qui est la commande synergétique pour une machine électrique particulière, à savoir la machine asynchrone à double alimentation sans balais, qui est largement utilisée dans les éoliennes modernes.

Cette commande synergétique permet, dans une large mesure, de pallier les inconvénients des méthodes de commande linéaires classiques telles que la commande scalaire, la commande vectorielle ou même la DTC, avec une solution radicale au problème de la commutation 'chattering' existant dans la commande non linéaire la plus populaire, à savoir la commande par mode glissant. D'autre part, l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais permet d'éviter le principal inconvénient de la machine asynchrone à double alimentation traditionnelle, qui était précédemment utilisée dans les éoliennes et qui nécessitait l'utilisation

de systèmes collecteur-balais et entraînait leur usure inévitable, et donc la nécessité d'interventions périodiques pour les remplacer, tout en conservant tous les avantages nombreux que la machine asynchrone à double alimentation offre.

Pour construire un système plus efficace, il était nécessaire d'utiliser une commande sans capteur mécaniques, en utilisant un filtre de Kalman étendu pour estimer la vitesse de rotation de la machine électrique. Enfin, toutes ces méthodes sont intégrées dans un seul système pour générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne en utilisant un algorithme de suivi de point de puissance maximale avancé basé sur la logique floue, afin de rendre le système dans son ensemble plus avancé et efficace.

Cependant, en raison de l'instabilité de la vitesse du vent et des interruptions qu'elle connaît, il était nécessaire d'utiliser un système de stockage d'énergie pour une utilisation en cas de besoin, et le système inertiel de stockage d'énergie a été choisi pour stocker l'énergie et sera intégré dans le système précédent.

Les mots clés: la commande synergétique, la machine asynchrone à double alimentation sans balais, les éoliennes, filtre de Kalman étendu, algorithme de suivi de point de puissance maximale, la logique floue, le système inertiel de stockage d'énergie.

Abstract

This thesis primarily contributes to developing a robust nonlinear control, which is synergistic control, for a particular electric machine, namely the brushless doubly-fed induction machine, widely used in modern wind turbines.

This synergetic control largely mitigates the drawbacks of classical linear control methods such as scalar control, vector control, or even DTC, offering a radical solution to the chattering phenomenon existing in the most popular nonlinear control, namely sliding mode control. Furthermore, the utilization of brushless doubly-fed induction machine helps avoid the main drawback of traditional doubly-fed induction machines, which previously required the use of brush-collector systems leading to their inevitable wear and thus periodic interventions for replacement, while retaining all the numerous advantages that the doubly-fed induction machine offers.

To construct a more efficient system, it was necessary to employ sensorless control, using an extended Kalman filter to estimate the rotational speed of the electric machine. Finally, all these methods are integrated into a single system to generate electrical energy from wind energy using

an advanced maximum power point tracking algorithm based on fuzzy logic, making the overall system more advanced and efficient.

However, due to the wind speed instability and interruptions it faces, it was necessary to use an energy storage system for use when needed, and the inertial energy storage system was chosen to store energy and will be integrated into the previous system.

Key words: synergistic control, the brushless doubly-fed induction machine, wind turbines, extended Kalman filter, maximum power point tracking algorithm, fuzzy logic, inertial energy storage system.

SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des symboles

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I: ETAT DE L'ART DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Introduction	5
1.1 L'état de l'art d'énergie éolienne	6
1.1.1 Perspectives de l'énergie éolienne en Algérie.....	6
1.1.2 Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne	8
1.1.3 Caractéristiques d'une éolienne.....	9
1.1.4 Les zones de fonctionnement d'une éolienne.....	11
1.1.5 Les machines électriques utilisées comme génératrice dans les éoliennes.....	12
1.2 L'état de L'art de MADASB.....	13
1.2.1 Les différents types de machine à double alimentation sans balais.....	15
1.2.1.1 Machine à double alimentation à reluctance variable MADARV	15
1.2.2 Le principe de fonctionnement de MADASB	16
1.2.3 Modes de fonctionnement de la MADASB.....	17
1.2.4 Les différentes topologies du rotor de MADASB	18
1.2.5 La MADASB dans les éoliennes	20
1.3 État de l'art sur les stratégies de commande de la MADASB.....	21
1.3.1 Les méthodes de commande linéaires de la MADASB.....	21
1.3.1.1 Modèle lié à un système de deux références	21
1.3.1.2 Modèle lié à un système de référence unique.....	23
1.3.2 Les méthodes de commande non linéaires et avancée de la MADASB	26
1.3.2.1 Modèle lié à un système de deux références	26
1.3.2.2 Modèle lié à un système de référence unique.....	28
Conclusion	29

CHAPITRE II: MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Introduction	34
2.1 Modélisation de la turbine éolienne	34
2.1.1 Modélisation de la turbine	35

SOMMAIRE

2.1.2	Modélisation de multiplicateur.....	36
2.1.3	Equation dynamique de l'arbre de turbine	37
2.1.4	Validation du modèle de turbine par simulation	38
2.2	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais MADASB	40
2.2.1	Les hypothèses simplificatrices.....	40
2.2.2	Modèle permanente de la machine	41
2.2.2.1	Schéma équivalent avec une seule alimentation.....	41
2.2.2.2	Schéma équivalent avec double alimentation.....	42
2.2.3	Modèle dynamique de la MADASB	43
2.2.3.1	Modèle de la MADASB dans le repère triphasé abc.....	44
2.2.3.2	Modèle de la MADASB dans le repère biphasé dq avec référence unique.....	46
2.2.3.3	Représentation d'état de la MADASB	48
2.2.4	Validation de modèle de MADASB par simulation	50
2.2.5	La commande vectorielle de la MADASB.....	55
2.2.5.1	Notion sur la commande vectorielle de la MADASB	55
2.2.5.2	Simulation de la commande vectorielle de MADASB.....	56
2.3	Modélisation de convertisseur bidirectionnel de puissance	58
2.3.1	Modèle d'onduleur	60
2.3.2	Modèle du bus continu	62
Conclusion		64

CHAPITRE III: LA COMMANDE ROBUSTE NON LINEAIRE DU SYSTEM DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Introduction	67
3.1 Notion sur la commande non linéaire	67
3.2 La commande synergétique	70
3.2.1 Généralité sur la notion de synergie	70
3.2.2 Etat de l’art de commande synergétique.....	70
3.2.3 Le principe de la commande synergétique	71
3.2.4 Les avantages de la commande synergétique	72
3.2.5 La conception de la commande synergétique.....	73
3.2.6 Etude de la stabilité de commande synergétique	75
3.3 La commande de la turbine par une hybride MPPT	76
3.3.1 L’hybride TSR-Synergétique MPPT	76
3.3.2 Simulation de la commande de la turbine.....	79
3.3.2.1 Simulation de la turbine sans MPPT	80

SOMMAIRE

3.3.2.2	Simulation de la turbine avec l'hybride TSR-synergétique MPPT	80
3.4	La commande synergétique de la MADASB.....	81
3.4.1	La conception du régulateur du courant I_c	83
3.4.2	La conception du régulateur du courant I_p	87
3.4.3	La régulation de puissances active P_p et réactive Q_p	91
3.4.4	La commande du couple électromagnétique	93
3.4.5	La commande du convertisseur de puissance par MLI vectorielle.....	94
3.4.5.1	La modulation vectorielle (SVM)	94
3.4.5.2	Le principe de la modulation vectorielle	94
3.4.5.3	L'algorithme de MLI vectorielle pour un onduleur a deux niveaux	95
3.5	Simulations et discussions	99
3.5.1	Réglage et l'évaluation de variation de paramètres du régulateurs synergétiques	99
3.5.2	Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique de vitesse de MADASB	100
3.5.3	Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique du courant I_{dc}	102
3.5.4	Comparaison de la performance de régulateurs synergétiques et régulateurs PI conventionnels	103
3.5.5	Simulation de la commande synergétique de puissances, couple et vitesse de la MADASB	104
3.5.5.1	La commande de puissances active et réactive P_p et Q_p	104
3.5.5.2	La commande du couple de la MADASB.....	107
3.5.5.3	La commande de la vitesse de la MADASB.....	107
3.5.6	Evaluation de robustesse de la commande synergétique.....	108
3.5.7	Intégration de la MADASB commandée par la commande synergétique dans un éolien avec hybrides MPPT algorithmes.....	111
Conclusion		116

CHAPITRE IV: LA COMMANDE DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE SANS CAPTEUR

Introduction	120
4.1 La commande de la turbine par l'hybride floue-Synergétique P&O MPPT algorithme sans capteur mécanique.....	120
4.1.1 La conception de régulateur flou pour la P&O MPPT	123
4.1.2 La conception et la simulation de régulateur synergétique de la vitesse pour hybride floue-synergétique P&O MPPT	124
4.2 Estimation de la vitesse du générateur 'MADASB'	126
4.2.1 Estimation de la vitesse de MADASB par un estimateur de type MRAS.....	127
4.2.1.1 Adaptation de MRAS au MADASB	128
4.4.2 Estimation de la vitesse de MADASB par EKF	130
4.4.3 Estimation de Ψ_{dp} et Ψ_{qp}	135

SOMMAIRE

4.4.3.1	Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB par EKF	136
4.4.4	Simulation d'estimation des flux magnétiques de l'EP Ψ_{dp} et Ψ_{qp}	138
4.4.5	Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB (variable de façon considérable) par filtre de Kalman étendu EKF	139
4.5	Simulation d'intégration de machine avec une hybride floue P&O-synergétique MPPT	141
4.6	Comparaison entre hybride TSR-synergétique MPPT et hybride floue P&O-synergétique MPPT	145
Conclusion		147

CHAPITRE V: LE SYSTEME INERTIEL DE STOCKAGE D'ENERGIE

Introduction		150
5.1	L'importance et le principe de fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie SSE	150
5.2	Les avantages liés à l'utilisation des SSE	151
5.3	Les différents types de SSE selon la durée de stockage	152
5.3.1	SSE à longue terme	153
5.3.2	SSE à courte terme	155
5.4	Le système inertielle de stockage d'énergie SISE	158
5.4.1	Les différents composants de SISE	158
5.4.1.1	Le volant d'inertie	158
5.4.1.2	Les avantages et les inconvénients de SISE	166
5.4.2	Intégration de SISE dans les éoliennes	167
5.4.3	Modélisation du système inertielle de stockage d'énergie	167
5.4.3.1	Modèle de la machine électrique MSAP	167
5.4.3.2	Validation de modèle de MSAP par simulation	170
5.4.3.3	Modèle de volant d'inertie	171
5.4.3.4	Validation du modèle du volant d'inertie par simulation	174
5.5	La commande synergétique de système inertielle de stockage d'énergie	175
5.5.1	La commande de la MSAP	175
5.5.2	L'obtention de vitesse de référence	177
5.5.3	Résultats de simulation	178
5.6	Intégration du SISE avec le système éolien	180
Conclusion		183
Conclusion générale		186

LISTE DES ABREVIATIONS

MPPT: Maximum power point tracking.

MW: Mégawatt.

KW: kilowatt.

MADA: Machine asynchrone à double alimentation.

DC: Direct courant.

AC: Alternatif courant.

MADASB: Machine asynchrone à double alimentation sans balais.

BDFM: Brushless Doubly Fed Machine.

MADARV: Machine à double alimentation à reluctance variable.

MRV: Machine à réluctance variable.

EP: Enroulement de puissance.

EC: Enroulement de commande.

MAS: Machine asynchrone.

FEM: La force électromotrice.

DTC: Direct torque control.

PI: Proportionnel intégral.

DPC: Direct Power Control.

PID: Proportionnel integral dérivatif.

MRAS: model reference adaptive system.

EKF: Extended Kalman filter.

TSR: Tip speed ratio.

SVM: Space vector modulation.

MLI: Modulation de largeur d'impulsion.

THD: Taux de distorsion harmonique.

P&O: Perturber et observer.

HCS: Hills Climb Search.

MPP: Maximum power point.

SSE: Le systèmes de stockage d'énergie.

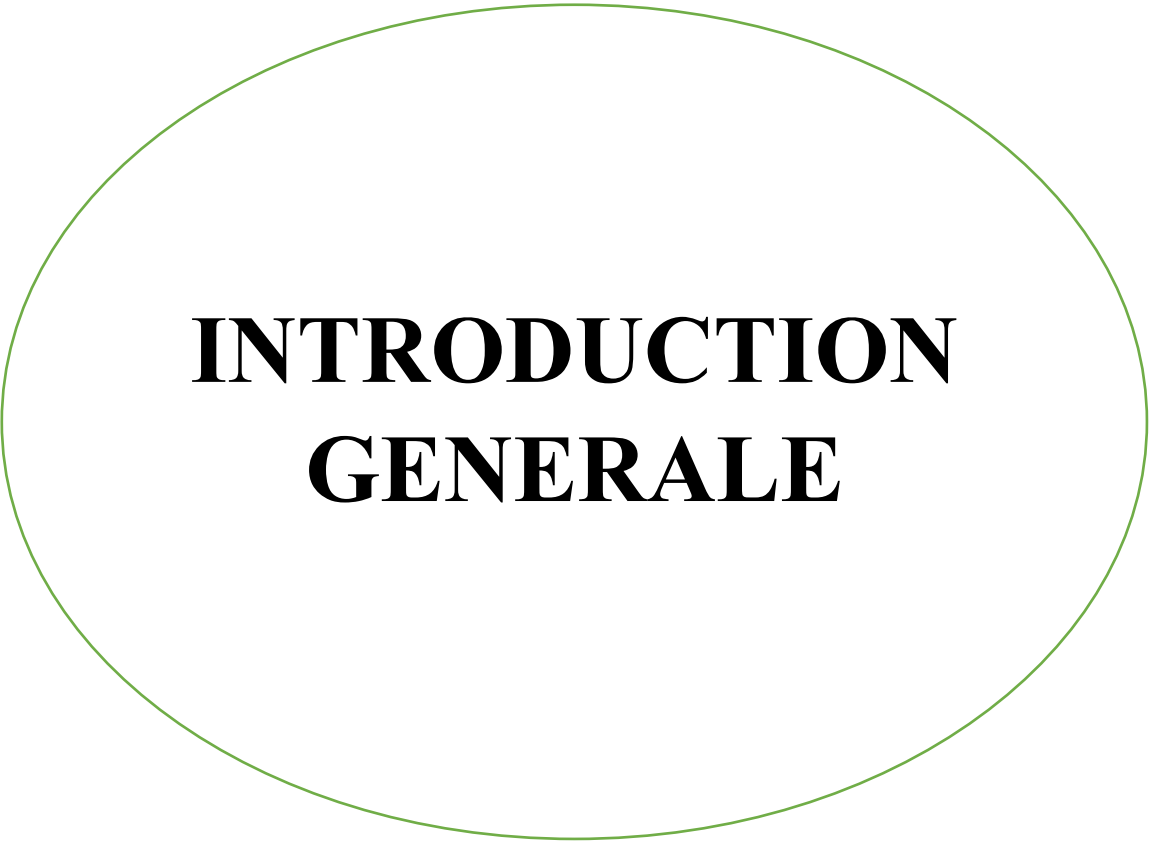
SISE: Le système inertiel de stockage d'énergie.

MSAP: Machine synchrone à aimant permanent.

MASRB: Machine asynchrone à rotor bobiné.

LISTE DE SYMBOLES

SYMBOL	DESIGNATION	UNITE
C_p	Coefficient de puissance	Sans unité
N_r	Nombre de spires rotorique	Sans unité
P_1	Nombre de paire de pôles d'enroulement de puissance	Sans unité
P_2	Nombre de paire de pôles d'enroulement de commande	Sans unité
P_v	La puissance cinétique du vent	w
ρ	La densité d'air	Kg/m ³
v	La vitesse du vent	m/s
β	L'angle d'orientation des pales	rad
R	Le rayon de pales	m
Ω_{turbine}	La vitesse angulaire des pales de turbine	rad/s
C_{aero}	Couple aérodynamique de la turbine	N.m
C_g	Couple du générateur	N.m
Ω_{mec}	La vitesse angulaire mécanique du générateur	rad/s
J_T	L'inertie total de système	Kg.m ²
J_{turbine}	L'inertie de la turbine	Kg.m ²
J_g	L'inertie du générateur	Kg.m ²
C_{eol}	Le couple totale d'éolien	N.m
C_{em}	Le couple électromagnétique	N.m
f	Le coefficient de frottement et viscosité de la machine	N.s/m ²
ω_s	La pulsation statorique	rad/s
M_s	L'inductance mutuelle ramené au stator	H
M	L'inductance mutuelle stator-rotor	H
L_s	L'auto-inductance ramené au stator	H
R_r	La résistance rotorique	Ω
Ω	La vitesse de la machine	rad/s
C_r	Le couple de la charge	N.m
J	L'inertie de la machine	Kg.m ²
$V_{dp}, V_{qp}, V_{dc}, V_{qc}$	dq-composants des tensions d'EP et EC respectivement	V
$I_{dp}, I_{qp}, I_{dc}, I_{qc}, I_{dr}, I_{qr}$	dq-composants des courants d'EP, EC et rotor respectivement	A
R_p, R_c	Les résistances d'EP, EC respectivement	Ω
L_p, L_c	Les inductance d'EP, EC respectivement	H
M_p, M_c	Les inductances mutuelles cyclique EP-rotor et EC-rotor respectivement	H
$\Psi_{dp}, \Psi_{qp}, \Psi_{dc}, \Psi_{qc}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$	dq-composants des courants d'EP, EC et rotor respectivement	Wb
P_p	La puissance active d'EP	w
Q_p	La puissance réactive d'EP	VAR



INTRODUCTION GENERALE

La contribution majeure de cette thèse réside dans l'étude d'un système de conversion d'énergie l'énergie éolienne. Ce système comprend une machine à double alimentation sans balais comme génératrice électrique et un système inertiel de stockage d'énergie, le tout étant commandé par le développement d'une commande robuste non linéaire basée sur la théorie synergétique, dont **ce type de commande a été adapté pour la première fois à ce type de machine.**

À l'heure actuelle, les énergies renouvelables constituent une part essentielle des stratégies énergétiques de nombreux pays dans le monde. Alors que les préoccupations concernant le changement climatique et la pollution environnementale sont croissantes, la recherche de sources d'énergie alternatives et propres est devenue nécessaire pour répondre à la demande croissante en énergie et pour atteindre le développement durable. L'énergie solaire, éolienne, la biomasse et l'énergie hydraulique sont parmi les principales sources d'énergie renouvelable utilisées à l'échelle mondiale.

L'énergie éolienne, tirée de la force du vent, est devenue une composante essentielle du paysage énergétique mondial. Alors que les préoccupations concernant le changement climatique et la pollution atmosphérique augmentent, l'énergie éolienne émerge comme une solution propre et renouvelable pour répondre à la demande croissante en électricité et contribuer à la transition vers une économie à faible émission de carbone. L'énergie éolienne devrait jouer un rôle de plus en plus important dans le paysage énergétique national à l'avenir [Fung et al., 1981][Sesto & Casale, 1998].

D'autre part, la machine asynchrone à double alimentation est devenue un élément essentiel du paysage technologique moderne, offrant des avantages significatifs tel que l'efficacité élevée, capacité à supporter des charges lourdes, limitation des variations de courant et sa conception simple et à la réduction des pièces mobiles.

Effectivement, la présence du système collecteur-balais dans cette machine constitue une faiblesse majeure, en raison de la nécessité d'interventions périodiques pour leur remplacement. Cependant, plusieurs solutions ont été développées pour résoudre ce problème. Parmi ces solutions, l'utilisation de la machine à double alimentation sans balais se démarque. En utilisant cette dernière machine, on chasse deux oiseaux avec une seule pierre, car on évite les inconvénients structurels de la machine classique, tout en bénéficiant de tous ses avantages.

Ces dernières années, la machine sans balais doublement alimentée a suscité un vif intérêt en raison de ses nombreux avantages. Son rotor peut avoir une structure à cage, et l'absence de

contact entre balais et bagues en fait une machine robuste qui offre des avantages significatifs par rapport aux machines conventionnelles lorsqu'elle est utilisée dans les systèmes éoliens [Serhoud, 2015].

La nécessité de se tourner vers des méthodes de commande non linéaires devient de plus en plus cruciale, surtout lorsque l'on utilise des machines dans des systèmes sensibles tels que les éoliennes. En effet, les inconvénients des méthodes de commande traditionnelles deviennent plus apparents dans ces environnements critiques.

Face à ces défis, les méthodes de commande non linéaires offrent une alternative prometteuse. En exploitant des approches telles que la commande par logique floue, la commande par mode glissant, ou la commande synergétique, il devient possible d'améliorer la robustesse, la précision et la réactivité des systèmes de commande, tout en maintenant leur stabilité dans des conditions dynamiques.

La logique floue peut être utilisée avec succès pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes éoliens. Le MPPT est essentiel pour maximiser le rendement énergétique des éoliennes en ajustant continuellement l'angle de pas des pales pour maintenir la puissance de sortie à son niveau optimal, en fonction des conditions variables du vent.

L'utilisation du filtre de Kalman étendu dans l'estimation de la vitesse de rotation représente une avancée significative dans le domaine de la commande et de la surveillance des systèmes dynamiques. Ce filtre, fondé sur des principes probabilistes, offre une méthode robuste et efficace pour estimer la vitesse de rotation d'un système, même en présence de bruit et d'incertitudes.

En raison de la nature très fluctuante et aléatoire du vent, une éolienne seule ne peut pas fournir des services au réseau électrique. Il est donc nécessaire d'ajouter des systèmes de stockage d'énergie pour constituer une réserve supplémentaire. Pour assurer l'équilibre entre la production et la consommation, un système de stockage inertiel est envisagé [Barton & Infield, 2004][EUR 19978 Brochure, 2001].

Le système inertiel de stockage d'énergie, également connu sous le nom de système flywheel, représente une solution innovante et efficace pour le stockage de l'énergie éolienne. Ce système utilise des volants d'inertie pour stocker l'énergie mécanique produite par les éoliennes pendant les périodes de vent fort, puis la restitue lorsque la demande en électricité est élevée ou lorsque le vent est faible.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier un système complet de conversion d'énergie éolienne intégrant l'ensemble des sous-systèmes mentionnés, avec une attention particulière à l'intégration de la machine MADASB dans le processus de production d'énergie. Le système proposé utilise une commande synergétique couplée à un algorithme P&O MPPT, tout en incorporant un système inertiel de stockage d'énergie pour optimiser les performances globales.

Pour cela, la thèse sera divisée en plusieurs chapitres, suivant cette structure :

- ✚ Introduction générale sur le système de génération d'énergie éolienne.
- ✚ Modélisation mathématique du système dans son ensemble, avec un focus sur la modélisation de la machine à double alimentation sans balais (MADASB).
- ✚ Commande non linéaire robuste du système, utilisant la commande synergétique pour l'ensemble du processus, à l'exception de la commande du convertisseur qui sera élaborée à l'aide d'une SVM.
- ✚ Transformation de la commande en une forme ne nécessitant pas de capteurs mécaniques, en utilisant le filtre de Kalman étendu pour estimer la vitesse de la MADASB et la logique floue pour le MPPT.
- ✚ Étude et commande du système de stockage d'énergie, en utilisant le volant inertiel, ainsi que son intégration dans le système global.

Références

- [Barton & Infield, 2004] Barton, J., & Infield, D. (2004). Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy. IEEE Transactions On Energy Conversion, 19(2), 441-448. <https://doi.org/10.1109/tec.2003.822305>
- [EUR 19978 Brochure, 2001] EUR 19978 Brochure. (2001). Energy storage - a key technology for decentralized power, power quality and clean transport. Office For Official Publications Of The European Communities. https://www.cordis.lu/eesd/src/lib_misc.htm
- [Fung et al., 1981] Fung, K., Scheffler, R., & Stolpe, J. (1981). Wind Energy - a utility perspective. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, PAS-100(3), 1176-1182. <https://doi.org/10.1109/tpas.1981.316586>
- [Serhoud, 2015] SERHOUD, H. (2015). Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone sans balais à double alimentations [Thèse de doctorat, Université de Biskra]. <http://dspace.univ-eloued.dz/handle/123456789/8388>
- [Sesto & Casale, 1998] Sesto, E., & Casale, C. (1998). Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, 74-76, 375-387. [https://doi.org/10.1016/s0167-6105\(98\)00034-8](https://doi.org/10.1016/s0167-6105(98)00034-8)

**CHAPITRE I: ETAT DE
L'ART DU SYSTEME
DE CONVERSION
D'ENERGIE
EOLIENNE**

Table des matières

Introduction	5
1.1 L'état de l'art d'énergie éolienne	6
1.1.1 Perspectives de l'énergie éolienne en Algérie.....	6
1.1.2 Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne	8
1.1.3 Caractéristiques d'une éolienne.....	9
1.1.4 Les zones de fonctionnement d'une éolienne.....	11
1.1.5 Les machines électriques utilisées comme génératrice dans les éoliennes.....	12
1.2 L'état de L'art de MADASB.....	13
1.2.1 Les différents types de machine à double alimentation sans balais.....	15
1.2.1.1 Machine à double alimentation à reluctance variable MADARV	15
1.2.2 Le principe de fonctionnement de MADASB	16
1.2.3 Modes de fonctionnement de la MADASB.....	17
1.2.4 Les différentes topologies du rotor de MADASB	18
1.2.5 La MADASB dans les éoliennes.....	20
1.3 État de l'art sur les stratégies de commande de la MADASB.....	21
1.3.1 Les méthodes de commande linéaires de la MADASB.....	21
1.3.1.1 Modèle lié à un système de deux références	21
1.3.1.2 Modèle lié à un système de référence unique.....	23
1.3.2 Les méthodes de commande non linéaires et avancée de la MADASB.....	26
1.3.2.1 Modèle lié à un système de deux références	26
1.3.2.2 Modèle lié à un système de référence unique.....	28
Conclusion.....	29

Introduction

Les énergies renouvelables, également appelées énergies vertes ou énergies propres, font référence à des sources d'énergie qui sont renouvelables et qui ne s'épuisent pas avec leur utilisation. Contrairement aux sources d'énergie fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, les énergies renouvelables sont généralement considérées comme plus durables et moins polluantes sur le plan environnemental.

Les catégories principales d'énergies renouvelables couramment utilisées :

- **Énergie solaire** : L'énergie solaire est obtenue en capturant la lumière du soleil et en la convertissant en électricité à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques, ou en utilisant la chaleur du soleil pour produire de l'électricité ou de la chaleur [Axe Eco Energie, s. d.].
- **Énergie hydraulique** : L'énergie hydraulique, également appelée énergie hydroélectrique, est produite en utilisant la force de l'eau en mouvement, généralement à partir de rivières, de barrages ou de marées. L'eau est canalisée à travers des turbines pour générer de l'électricité.
- **Énergie géothermique** : L'énergie géothermique est extraite de la chaleur naturelle de la Terre. Les installations géothermiques utilisent la chaleur provenant du noyau terrestre, des eaux souterraines chaudes ou des roches chaudes pour produire de la vapeur qui alimente des turbines génératrices d'électricité.
- **Énergie de la biomasse** : L'énergie de la biomasse est produite à partir de la combustion de matières organiques, telles que le bois, les résidus agricoles, les déchets alimentaires et les biocarburants. La biomasse peut être utilisée pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du carburant [Biomasse - Sierterm UEM, 2024].
- **Énergie éolienne** : L'énergie éolienne est générée en utilisant la force du vent pour faire tourner des éoliennes. Les éoliennes convertissent ensuite l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité par des générateurs.

Cette thèse portera sur l'énergie éolienne, considérée comme une source prometteuse d'énergie renouvelable et propre, dans une approche globale.

1.1 L'état de l'art d'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui tire parti de la force du vent pour générer de l'électricité. Elle est produite grâce à des éoliennes, des structures dotées de grandes hélices ou pales qui sont positionnées de manière à capturer l'énergie cinétique du vent et à la convertir en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Généralement il y a trois étapes pour le fonctionnement de système éolien :

- **Captation du vent** : Les éoliennes sont installées dans des zones où le vent est suffisamment fort et régulier. Les pales de l'éolienne sont conçues pour capter le maximum d'énergie du vent qui les fait tourner.
- **Conversion de l'énergie cinétique** : Lorsque les pales de l'éolienne sont en mouvement, elles entraînent un rotor qui est connecté à un générateur électrique. L'énergie cinétique du vent est ainsi convertie en énergie mécanique.
- **Conversion en électricité** : Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette électricité générée par l'éolienne peut être utilisée localement pour alimenter des habitations, des entreprises ou des infrastructures, ou être intégrée au réseau électrique plus large.

L'énergie éolienne est considérée comme une pièce maîtresse de la transition vers un avenir énergétique durable. Elle contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, à diversifier les sources d'énergie et à créer des emplois dans le secteur des énergies renouvelables.

1.1.1 Perspectives de l'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie possède un potentiel éolien important en raison de sa géographie et de son climat favorable. L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie renouvelable prometteuse pour diversifier le mix énergétique du pays et réduire sa dépendance aux combustibles fossiles.

Potentiel éolien : L'Algérie dispose d'un potentiel éolien significatif, principalement dans les régions côtières et montagneuses. Les zones côtières, notamment dans le nord du pays, bénéficient de vents réguliers et forts, offrant des conditions favorables pour l'installation de parcs éoliens.

Projets éoliens : L'Algérie a commencé à développer des projets éoliens ces dernières années. En 2014, le pays a inauguré son premier parc éolien commercial, le parc éolien de Adrar,

d'une capacité de 10 MW. Depuis lors, d'autres projets ont été lancés, notamment le parc éolien de Terga d'une capacité de 24 MW et le parc éolien de Kabertène d'une capacité de 10 MW.

Objectifs et politiques : L'Algérie a établi des objectifs ambitieux en matière d'énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne. Le pays vise à atteindre une capacité éolienne installée de 22 GW d'ici 2030. Pour encourager le développement de l'énergie éolienne, l'Algérie a mis en place des politiques et des réglementations favorables, telles que des tarifs d'achat garantis et des incitations fiscales pour les investisseurs dans les énergies renouvelables [Region, s. d.].

Développement futur : L'Algérie a identifié plusieurs sites potentiels pour le développement de parcs éoliens supplémentaires. Parmi eux, les régions de Tlemcen, Oran, Jijel, Djelfa et Bejaia sont considérées comme ayant un fort potentiel éolien. Le pays encourage également la participation des investisseurs nationaux et étrangers dans le secteur de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne en Algérie est encore relativement au stade de développement, mais le pays fait des efforts pour exploiter son potentiel éolien et diversifier son mix énergétique. Le développement de l'énergie éolienne pourrait contribuer à la production d'électricité propre, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la création d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables [Nedjari et al., 2018].

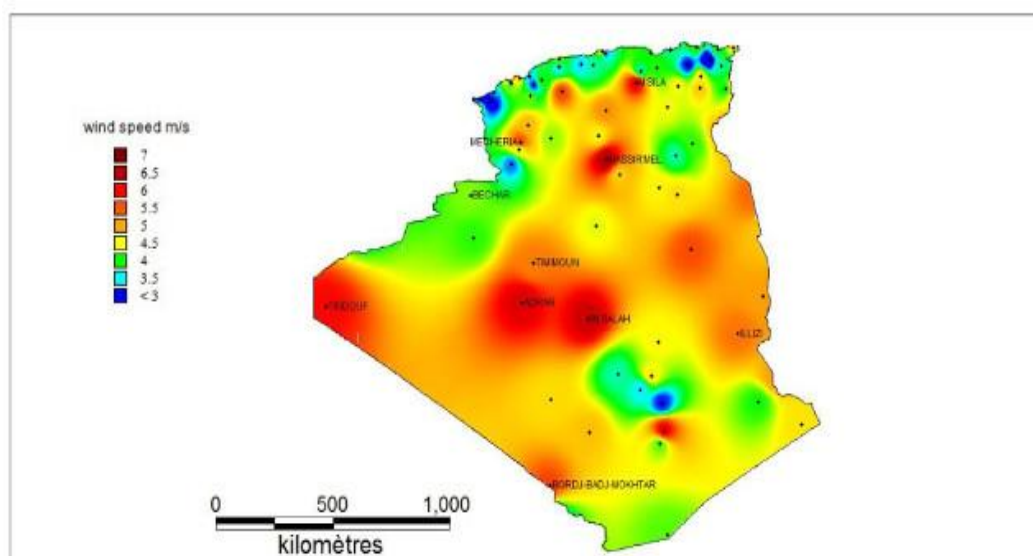


Figure 1.1 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol [Nedjari et al., 2018].

1.1.2 Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne

L'énergie éolienne présente plusieurs avantages [TotalEnergies, 2021]:

- ✓ **Renouvelabilité** : Le vent est une ressource naturelle inépuisable, ce qui fait de l'énergie éolienne une source d'énergie renouvelable à long terme.
- ✓ **Réduction des émissions de gaz à effet de serre** : L'énergie éolienne ne produit pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques nocifs lors de la production d'électricité, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- ✓ **Création d'emplois et développement économique** : L'industrie éolienne crée des emplois dans la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des parcs éoliens, ce qui peut stimuler l'économie locale.
- ✓ **Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles** : En utilisant l'énergie éolienne, il est possible de réduire la dépendance aux combustibles fossiles importés, ce qui peut renforcer la sécurité énergétique.

Bien que l'énergie éolienne présente de nombreux avantages en tant que source d'énergie renouvelable, il existe également quelques inconvénients associés à son utilisation [TotalEnergies, 2021] :

- **Variabilité et intermittence** : L'énergie éolienne dépend de la disponibilité et de la force du vent, ce qui entraîne une production d'électricité intermittente. Les vents peuvent être imprévisibles et fluctuer au fil du temps, ce qui peut rendre difficile la planification de la production d'électricité. Cela nécessite d'avoir d'autres sources d'énergie ou des systèmes de stockage pour compenser les fluctuations de l'énergie éolienne.
- **Impact visuel et sonore** : Les éoliennes peuvent être perçues comme peu esthétiques par certains et peuvent avoir un impact sur le paysage. Les grandes éoliennes peuvent également produire du bruit pendant leur fonctionnement, bien que les avancées technologiques aient permis de réduire considérablement ces nuisances sonores.
- **Effets sur la faune et l'environnement** : Les parcs éoliens peuvent avoir un impact sur la faune aviaire et les chauves-souris, en particulier lorsqu'ils sont situés sur des corridors migratoires ou des habitats sensibles. Les éoliennes peuvent également perturber les écosystèmes marins lorsqu'elles sont installées en mer. Cependant, des

mesures d'atténuation telles que la sélection de sites appropriés et l'utilisation de détecteurs d'oiseaux peuvent être mises en place pour minimiser ces impacts.

- **Besoin d'espace et de ressources :** Les parcs éoliens terrestres nécessitent une emprise au sol considérable, ce qui peut entraîner la conversion de terres agricoles ou l'empiètement sur les habitats naturels. De plus, la fabrication et l'installation des éoliennes nécessitent des matériaux tels que l'acier et le béton, ce qui peut avoir un impact sur l'environnement en termes d'extraction et de transport de ces ressources.
- **Dépendance aux conditions météorologiques :** Comme l'énergie éolienne dépend du vent, il peut y avoir des périodes où la production d'électricité est faible ou nulle, en particulier pendant les périodes de vents calmes. Cela souligne l'importance d'une planification énergétique intégrée et d'un mix énergétique diversifié pour assurer une alimentation électrique stable.

Il est important de noter que de nombreux inconvénients associés à l'énergie éolienne peuvent être atténués grâce à une planification soignée, à des avancées technologiques et à des politiques appropriées. L'évaluation des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne doit prendre en compte les aspects environnementaux, sociaux, économiques et techniques pour une vision globale de cette source d'énergie.

1.1.3 Caractéristiques d'une éolienne

Les turbines éoliennes, également connues sous le nom d'éoliennes, sont les principales composantes des parcs éoliens qui captent l'énergie éolienne et la convertissent en énergie mécanique ou électrique. Les caractéristiques clés d'une turbine éolienne :

- **Puissance nominale :** La puissance nominale d'une turbine éolienne représente la puissance maximale qu'elle peut générer dans des conditions de vent idéales. Elle est généralement mesurée en kilowatts (KW) ou en mégawatts (MW). Les turbines éoliennes varient en puissance nominale, allant de quelques dizaines de kilowatts pour les éoliennes de petite taille à plusieurs mégawatts pour les éoliennes commerciales de grande échelle.
- **Diamètre du rotor :** Le diamètre du rotor d'une turbine éolienne est la distance parcourue par les pales lorsqu'elles effectuent une rotation complète. Il est mesuré en mètres. Le diamètre du rotor est important car il détermine la surface de capture du vent et affecte directement la quantité d'énergie que la turbine éolienne peut extraire

du vent. Plus le diamètre du rotor est grand, plus la turbine éolienne est susceptible de capter une plus grande quantité d'énergie éolienne.

- **Hauteur du mât :** La hauteur du mât fait référence à la distance verticale entre le sol et l'axe du rotor de la turbine éolienne. Une hauteur de mât plus élevée permet à la turbine d'exploiter des vents plus forts et plus réguliers, car la vitesse du vent tend à augmenter avec l'altitude. Les mâts de turbine éolienne peuvent varier de quelques dizaines de mètres à plus de 100 mètres dans les parcs éoliens commerciaux.
- **Vitesse de démarrage et de coupure du vent :** Chaque turbine éolienne a une vitesse de démarrage et une vitesse de coupure du vent spécifiques. La vitesse de démarrage est la vitesse minimale du vent requise pour que la turbine éolienne commence à produire de l'électricité. La vitesse de coupure du vent est la vitesse maximale à laquelle la turbine éolienne doit être arrêtée pour éviter d'endommager ses composants en raison de vents trop forts. Par exemple, une éolienne peut avoir une vitesse de démarrage de 3 m/s et une vitesse de coupure de 20 m/s [Rendement des Éoliennes, s. d].
- **Rendement ou coefficient de puissance :** Le rendement d'une turbine éolienne représente la proportion de l'énergie cinétique du vent qui est convertie en énergie mécanique ou électrique. Il est généralement exprimé sous forme de coefficient de puissance (C_p). Un rendement plus élevé signifie que la turbine éolienne est plus efficace dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie utile.
- **Technologie de l'orientation :** Les turbines éoliennes peuvent utiliser différentes technologies d'orientation pour s'ajuster automatiquement à la direction du vent. Les éoliennes à axe horizontal utilisent souvent un système d'orientation active, où l'angle du rotor est ajusté en fonction de la direction du vent. Les éoliennes à axe vertical, en revanche, peuvent utiliser une conception à traînée pour s'orienter automatiquement vers la direction du vent dominant.

Ces caractéristiques varient d'une turbine éolienne à l'autre en fonction de la technologie, de la taille et du fabricant. Les évolutions technologiques continuent de conduire à des turbines éoliennes plus grandes, plus efficaces et plus performantes pour exploiter l'énergie éolienne de manière plus efficace et rentable.

1.1.4 Les zones de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes ont des zones de fonctionnement spécifiques qui sont déterminées en fonction des caractéristiques du vent et des capacités de l'éolienne elle-même. Les principales zones de fonctionnement d'une éolienne [Robyns et al., 2006] :

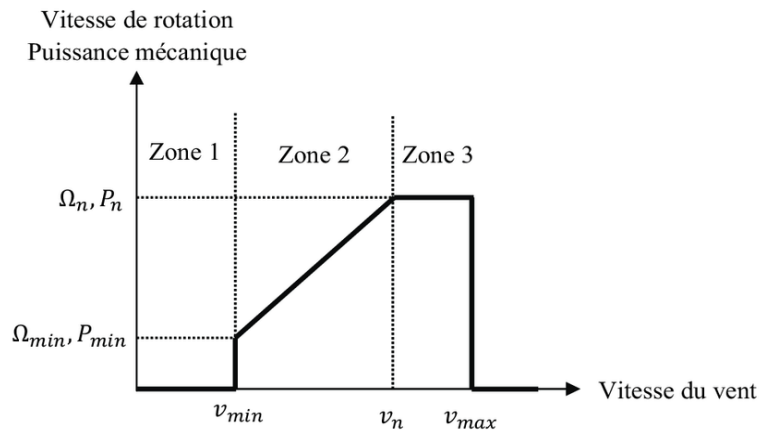


Figure 1.2 Les zones de fonctionnement d'une éolienne.

Démarrage (Zone 1) : Cette zone correspond à la plage de vitesse du vent où l'éolienne commence à produire de l'électricité. Cela se situe généralement au-dessus de la vitesse de démarrage, qui est la vitesse minimale requise pour que l'éolienne commence à tourner et génère de l'énergie. Dans cette zone, la production d'électricité de l'éolienne est faible et augmentera progressivement à mesure que la vitesse du vent augmente.

Régime optimal (Zone 2) : Le régime nominal est la plage de vitesse du vent dans laquelle l'éolienne fonctionne à sa puissance nominale maximale. C'est la plage de vitesse du vent idéale pour obtenir le rendement optimal de l'éolienne. Dans cette zone, l'éolienne convertit efficacement l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.

Surcharge (Zone 3) : La zone de surcharge se situe au-dessus du régime nominal et représente la plage de vitesse du vent où l'éolienne peut produire plus que sa puissance nominale maximale. Les éoliennes modernes sont équipées de systèmes de commande qui permettent de limiter la production d'électricité dans cette zone afin de protéger la turbine des contraintes excessives.

Arrêt : La zone d'arrêt se situe au-dessus de la vitesse de coupure du vent, qui est la vitesse maximale à laquelle l'éolienne doit être arrêtée pour des raisons de sécurité. Lorsque le vent

atteint cette vitesse, l'éolienne est mise en arrêt pour éviter tout dommage aux composants et assurer la sécurité de l'installation.

Il est important de noter que les zones de fonctionnement peuvent varier d'une éolienne à l'autre en fonction de sa conception, de sa taille et de sa technologie. Les fabricants d'éoliennes effectuent des études de vent approfondies pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement spécifiques de chaque modèle d'éolienne et les adapter aux conditions locales du site d'installation.

1.1.5 Les machines électriques utilisées comme génératrice dans les éoliennes

Les générateurs utilisés dans les éoliennes sont des composants clés qui convertissent l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique. Depuis l'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité, de nombreux générateurs ont été utilisés, mais le générateur le plus répandu et utilisé a toujours été la machine à double alimentation MADA.

Les générateurs les plus utilisés dans l'énergie éolienne sont :

Générateurs synchrones à aimants permanents : Les éoliennes modernes utilisent souvent des générateurs synchrones à aimants permanents. Ces générateurs sont équipés d'aimants permanents intégrés dans le rotor, qui génèrent un champ magnétique fixe. Lorsque le rotor tourne, les aimants permanents induisent un courant électrique dans les bobines du stator, produisant ainsi de l'électricité. Les générateurs à aimants permanents sont appréciés pour leur rendement élevé, leur compacité et leur faible maintenance. Cette machine électrique sera longuement discutée dans le chapitre de système de stockage d'énergie éolienne.

Générateurs asynchrones à cage d'écureuil : Les anciennes éoliennes utilisaient souvent des générateurs asynchrones à cage d'écureuil. Ces générateurs sont constitués d'un rotor en forme de cage d'écureuil en court-circuit et d'un stator entourant le rotor. Lorsque le rotor tourne, le champ magnétique tournant induit un courant électrique dans les bobines du stator, produisant de l'électricité. Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil sont moins utilisés dans les nouvelles installations en raison de leur rendement légèrement inférieur et de leur besoin de démarrage externe.

Générateurs à courant continu : Certains types d'éoliennes utilisent des générateurs à courant continu (DC) plutôt que des générateurs à courant alternatif (AC). Ces générateurs produisent de l'électricité sous forme de courant continu, qui est ensuite converti en courant

alternatif par des onduleurs avant d'être injecté dans le réseau électrique. Les générateurs à courant continu peuvent être utilisés pour les éoliennes de petite taille et offrent des avantages en termes de coûts, de simplicité de conception et de commande.

Les générateurs à induction double alimentation : Elles présentent de nombreux avantages lorsqu'ils sont utilisés dans le contexte des éoliennes. Ces avantages incluent la capacité à séparer quasiment totalement la commande de la puissance active et réactive. De plus, ils permettent de réduire considérablement la puissance nominale du convertisseur bidirectionnel, qui peut se situer entre 20% et 40% de la puissance nominale de la machine [Shihabudheen et al., 2018]. Cette réduction a un impact significatif sur le coût et les dimensions globales de la configuration. De plus, ils offrent la possibilité de réguler le facteur de puissance. Enfin, leur large plage de fonctionnement en termes de vitesse, qui peut aller de 60% à 110% de la vitesse nominale de la machine, est particulièrement attrayante dans le contexte des systèmes éoliens à vitesse variable [Simonetti et al., 2018].

Néanmoins, ces avantages exceptionnels sont accompagnés de certains inconvénients significatifs, le plus notable étant l'obligation d'utiliser un système bague-balais (contact glissant). Ce système diminue la fiabilité de la machine en raison de la nécessité de remplacer périodiquement les balais, ce qui en fait une source potentielle de défaillance. Des études ont clairement démontré que les problèmes liés à l'utilisation du système bague-balais sont l'une des principales lacunes dans le fonctionnement des éoliennes, et ce problème devient encore plus critique dans le cas des éoliennes offshore, déployées en mer, comme indiqué dans la référence [Dowec, 2003] .

Il devenait donc impératif pour les chercheurs de trouver une solution radicale à ce problème. D'une part, il était essentiel de préserver les avantages de cette machine, et d'autre part, il fallait améliorer sa fiabilité. La solution optimale, selon de nombreux chercheurs dans ce domaine, consistait à apporter une modification structurelle à la machine afin d'éliminer le système bague-balais. C'est ainsi qu'est apparue la machine à double alimentation sans balais, connue sous le nom de MADASB (Brushless Doubly Fed Machine - BDFM en anglais). Cette nouvelle conception de machine sera abordée en détail dans la section suivante.

1.2 L'état de L'art de MADASB

La machine électrique à double alimentation conventionnelle a longtemps démontré son efficacité et ses excellentes caractéristiques. Pendant de nombreuses années, elle a été

largement utilisée dans les éoliennes. Cela était principalement dû à sa facilité de commande, ainsi qu'à sa polyvalence, puisqu'elle pouvait fonctionner aussi bien en tant que moteur qu'en tant que générateur, même à des vitesses de rotation inférieures ou supérieures à la vitesse de synchronisation.

Cependant, cette machine a présenté certains inconvénients, dont certains étaient graves dans des applications spécifiques. Le principal inconvénient était la présence d'un système bague-balais (voir figure 1.3) qui comportait deux balais de charbon en contact constant avec le rotor. Ce contact continu avec le rotor entraînait une usure inévitable des balais, nécessitant leur remplacement à un moment donné.

La maintenance périodique pour le remplacement de ces balais pouvait être relativement simple dans certaines applications, mais elle devenait extrêmement difficile dans d'autres cas, notamment pour les éoliennes, en particulier celles situées en mer (offshore). Cette difficulté de maintenance s'accompagnait d'un coût financier considérable lié à l'achat des pièces de rechange et à la main-d'œuvre nécessaire pour effectuer les remplacements.

Afin d'améliorer la fiabilité, les fabricants ont donc opté pour la conception de machines électriques à double alimentation, qui conservent les avantages de la MADASB tout en se débarrassant de ce système vulnérable. Dans cette optique, les machines à double alimentation sans balais ont été développées pour augmenter la fiabilité des systèmes, et cette évolution sera détaillée dans la suite de cette discussion.

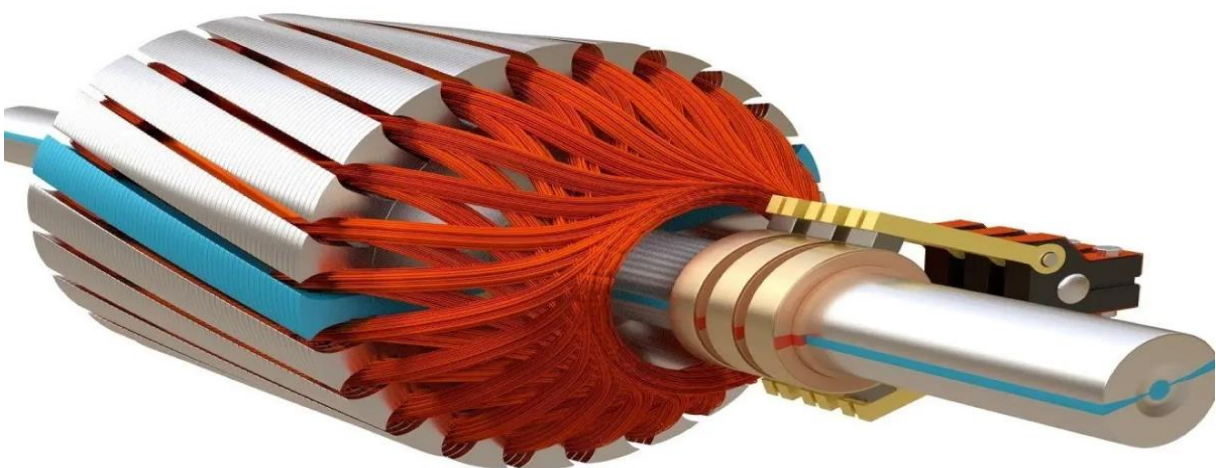


Figure 1.3 Système bague-balais.

1.2.1 Les différents types de machine à double alimentation sans balais

Le terme "machine électrique à double alimentation sans balais" s'applique à toute machine électrique qui répond à certaines conditions, à savoir qu'elle est alimentée par deux sources d'énergie distinctes, et qu'elle ne comporte pas de système bague-balais dans sa structure.

En conséquence, plusieurs types de machines entrent dans cette catégorie, mais notre attention se porte principalement sur les deux types les plus courants et répandus. Ainsi, ces machines sont principalement regroupées en deux grandes familles en fonction de la nature de leur rotor : la première est la machine à double alimentation à reluctance variable (MADARV), et la seconde est la machine asynchrone à double alimentation (MADASB).

1.2.1.1 Machine à double alimentation à reluctance variable MADARV

La machine à double alimentation à reluctance variable, MADARV, représente essentiellement une modification structurelle de la machine originelle, à savoir la machine à reluctance variable (MRV).

L'introduction de la MADARV a été initialement réalisée par Broadway dans sa publication [Broadway, 1971], et elle a ensuite été améliorée et développée par Longya Xu dans les travaux [Xu et al., 1994] [Xu & Wang, 2002]. La MADARV, comme toute machine électrique classique, se compose de deux composants principaux : le stator et le rotor. Le stator comprend deux enroulements statoriques avec un nombre de pôles différent. L'un de ces enroulements est directement connecté au réseau électrique, tandis que l'autre est alimenté par le biais d'un convertisseur bidirectionnel (tel qu'un convertisseur matriciel, un cyclo-convertisseur ou un dispositif redresseur-onduleur). Le rotor, quant à lui, est équipé d'un système à reluctance variable [Serhoud, 2015].

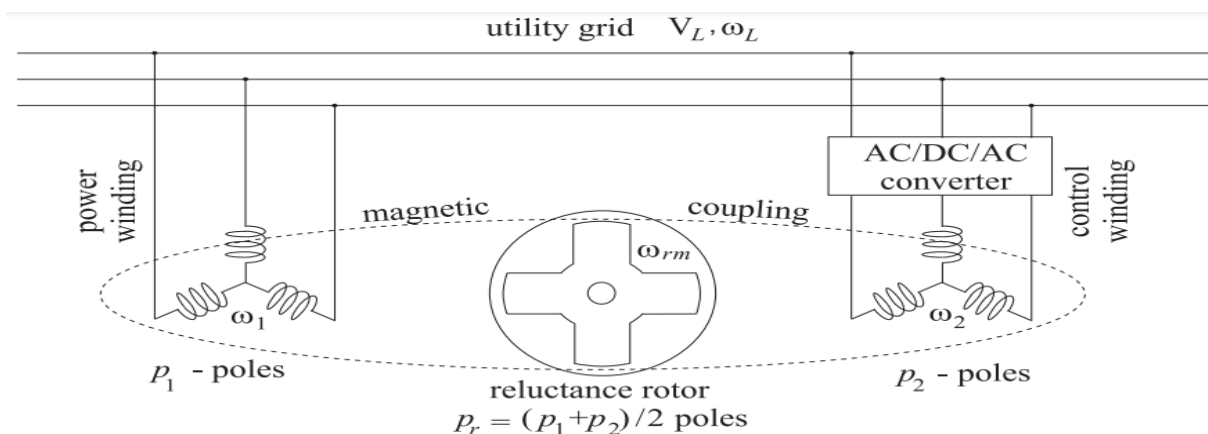


Figure 1.4 Structure de la MADARV.

Pour générer le couple de réluctance, qui est essentiel au fonctionnement de cette machine, le rotor est fabriqué à partir d'un matériau ferromagnétique, en l'occurrence du fer doux, et il est conçu avec une géométrie spéciale qui permet de créer une variation significative de l'épaisseur de l'entrefer. Cette variation entraîne une variation de la réluctance magnétique du rotor.

La présence de deux enroulements statoriques offre la possibilité de commander diverses caractéristiques de la machine, notamment sa vitesse, son couple, son mode de fonctionnement (moteur ou générateur), ainsi que son état de synchronisme. Cela signifie que la machine peut fonctionner en mode hyposynchrone, synchrone ou même en mode hypersynchrone en fonction des besoins.

La structure du rotor à réluctance peut être classée en quatre principaux types : rotor à pôle saillant, rotor à pôle saillant avec barrières magnétiques, rotor à lamelles axiales et rotor à lamelles radiales. La figure 1.5 [El Achkar, 2016] présente symboliquement ces différentes structures de rotor.

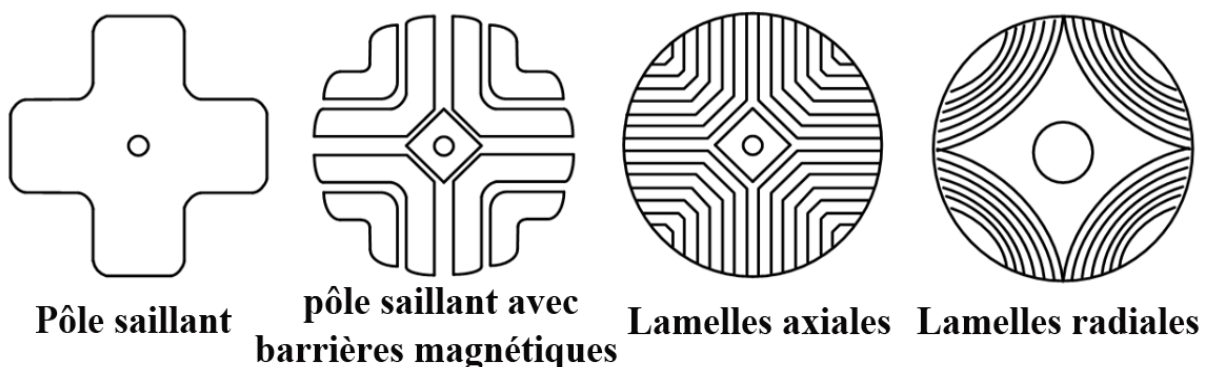


Figure 1.5 Les différentes structures de rotor à réluctance variable [El Achkar, 2016].

1.2.2 Le principe de fonctionnement de MADASB

La MADASB repose sur le principe du couplage magnétique croisé entre les deux enroulements statoriques triphasés, à savoir l'enroulement de puissance (EP) directement connecté au réseau électrique et l'enroulement de commande (EC) alimenté par un convertisseur bidirectionnel. L'idée fondamentale qui sous-tend le fonctionnement de la MADASB est la capacité de moduler les courants rotoriques via l'enroulement de commande (EC), en remplacement du système bague-balais que l'on trouve dans la MADA

conventionnelle. Cette modulation des courants rotoriques permet de réguler et de commander les paramètres clés de la machine, tels que la vitesse et le couple.

La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par l'enroulement de commande, ce qui permet de générer une tension dans l'enroulement de puissance (EP) à la fréquence et à l'amplitude nominales du réseau électrique, même lorsque le rotor fonctionne à une vitesse différente de la synchronisation [Poza, 2003].

En d'autres termes, l'intégration de l'enroulement de commande offre la possibilité de moduler les grandeurs électriques du bobinage de puissance (force électromotrice) en modifiant les forces électromotrices rotoriques induites par le phénomène d'induction électromagnétique.

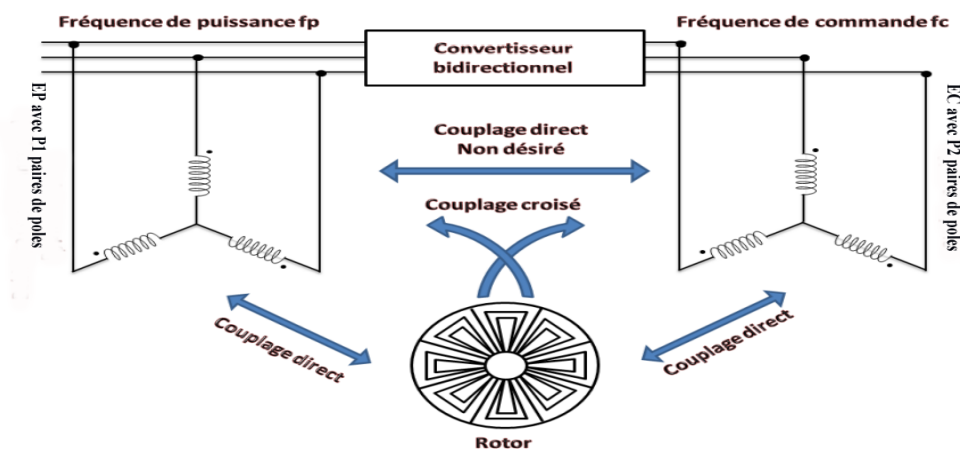


Figure 1.6 Topologie de la MADASB [Serhoud, 2015].

1.2.3 Modes de fonctionnement de la MADASB

Cette machine électrique offre la flexibilité de fonctionner dans plusieurs modes, déterminés par l'état de son enroulement de commande, qu'il soit en court-circuit, en circuit ouvert, ou alimenté par une fréquence variable. Les deux modes de fonctionnement principaux sont les suivants :

- **Mode synchrone** : Dans ce mode, la vitesse de la machine est synchronisée avec le champ tournant du stator. C'est le mode privilégié pour les applications de production d'énergie à vitesse variable.
- **Mode asynchrone** : Dans ce mode, la vitesse de la machine diffère de celle du champ tournant du stator.

Le choix du mode de fonctionnement dépend des besoins spécifiques de l'application. Le tableau ci-dessous [Serhoud, 2015] [Tir, 2014] résume toutes les combinaisons possibles des deux bobinages statoriques, permettant ainsi de définir le mode de fonctionnement optimal en fonction des exigences particulières.

Mode	Enroulement de puissance	Enroulement de commande
Asynchrone	Fréquence de réseau	Circuit ouvert
Asynchrone	Fréquence de réseau	Court-circuit
Asynchrone	Fréquence de réseau	Fréquence variable
Synchrone	Fréquence de réseau	Fréquence variable

Tableau 1.1 modes de fonctionnement de MADASB.

1.2.4 Les différentes topologies du rotor de MADASB

Tout comme dans le cas de la machine asynchrone MAS, le rotor d'une machine MADASB peut être conçu avec un enroulement ou une cage d'écureuil.

Le rotor bobiné de la MADASB est presque identique à celui de la MADA classique. Il est composé d'un enroulement triphasé rotorique avec un nombre de spires adapté pour satisfaire les conditions préalables (comme $N_r = P_1 + P_2$ ou $N_r = P_1 - P_2$) ou N_r est le nombre de spires rotorique, P_1 le nombre de pôles d'enroulement de puissance et P_2 le nombre de pôles d'enroulement de commande. Cet enroulement est logé dans un noyau rotorique fabriqué à partir de matériaux ferromagnétiques, comme illustré dans la figure 1.7.

La principale distinction entre le rotor bobiné de la MADASB et celui de la MADA réside dans le fait que l'enroulement du premier type (MADASB) est fermé sur lui-même pour former un court-circuit, tandis que l'enroulement du second type est connecté au système de bague-balais pour être alimenté par une source d'alimentation externe.

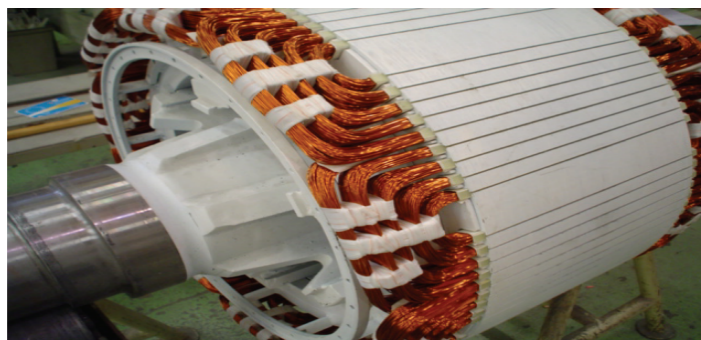


Figure 1.7 Rotor bobiné.

Pour le rotor à cage d'écureuil, il est fabriqué au même principe que celui de MAS. Dont l'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches, et réunie à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportant généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques.

En ce qui concerne le rotor à cage d'écureuil, il est fabriqué selon le même principe que celui des machines asynchrones MAS. Dans ce cas, l'enroulement est remplacé par des barres en cuivre ou en aluminium qui sont logées dans des encoches et reliées à leurs extrémités par deux couronnes en cuivre ou en aluminium. Ces cages sont généralement conçues avec des barres décalées pour réduire les harmoniques d'encoches, ce qui entraîne une légère réduction de la force électromotrice (F.E.M) induite par le champ tournant du stator dans ces barres. Un tel rotor, comme illustré dans la figure 1.8, se distingue par sa robustesse et son coût de construction particulièrement économique.

La cage est généralement réalisée en aluminium, qui est coulé dans les encoches préparées à l'avance. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'isoler les barres ni d'isoler la masse du rotor, car les courants induits se concentrent principalement dans les barres. L'étude théorique de ce type de rotor est similaire à celle des moteurs à rotor bobiné.

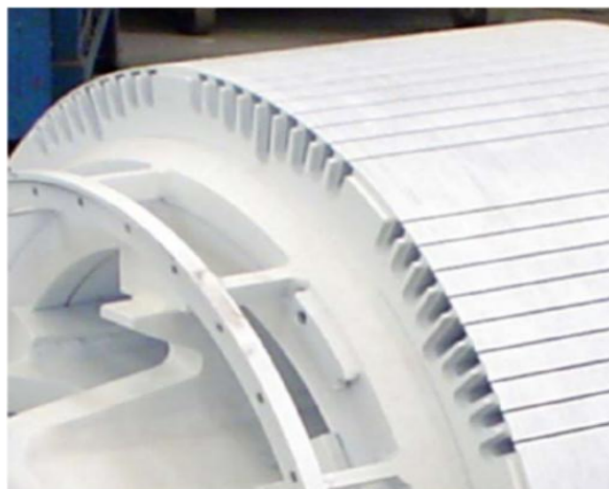


Figure 1.8 Rotor à cage.

Pour satisfaire les conditions liées au nombre de spires du rotor, deux options sont possibles. La première consiste à avoir un rotor avec des barres qui forment des spires isolées et concentriques, comme illustré dans la Figure 1.9a. L'autre option est d'avoir un rotor avec des

spires comportant un anneau commun et des spires extérieures formant une cage, comme montré dans la Figure 1.9b.

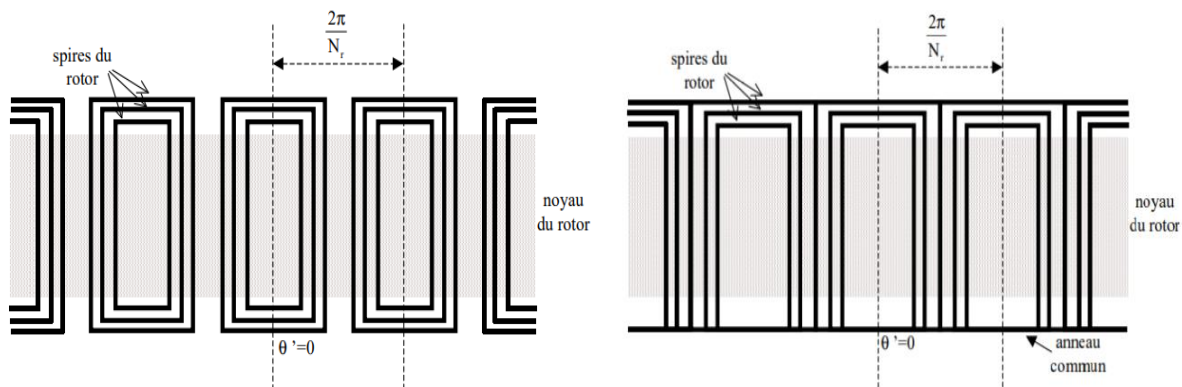


Figure 1.9a. Spires isolées concentriques, b. Anneau commun et spires extérieures à cage [Poza, 2003].

Une topologie hybride existe, où le rotor est composé d'enroulements logés dans des encoches pour créer une apparence similaire à celle des barres d'une cage d'écureuil.

1.2.5 La MADASB dans les éoliennes

La première éolienne au monde intégrant un générateur à induction sans balais à double alimentation (MADASB) a été érigée à Cambridge, au Royaume-Uni, le 31 mars 2009. Il s'agissait d'une éolienne standard de 20 kW, de modèle Gazelle, mais elle était équipée d'un générateur MADASB. Ce choix s'est avéré économiquement avantageux en raison de l'onduleur de puissance nominale fractionnée et de la conception sans balais de la MADASB, réduisant ainsi les coûts d'investissement, les besoins en maintenance et améliorant la fiabilité. Le système de commande avancé de la machine permettait à l'éolienne de suivre la puissance maximale disponible tout en ajustant le facteur de puissance du système [Wind Technologies, s. d.].

En raison de sa réputation solide et de sa fiabilité accrue par rapport aux générateurs MADA conventionnels, la MADASB a gagné en popularité et s'est répandue dans l'industrie éolienne. Elle a récemment été utilisée dans des éoliennes de différentes puissances, allant de quelques kilowatts (KW) à des capacités très élevées atteignant 1,5 mégawatt (MW).

Cette thèse se concentrera sur l'utilisation fondamentale de cette machine, en particulier son intégration dans des éoliennes à vitesse variable, dans le but de générer de l'énergie électrique à partir de vents à vitesse variable (voir figure 1.10).

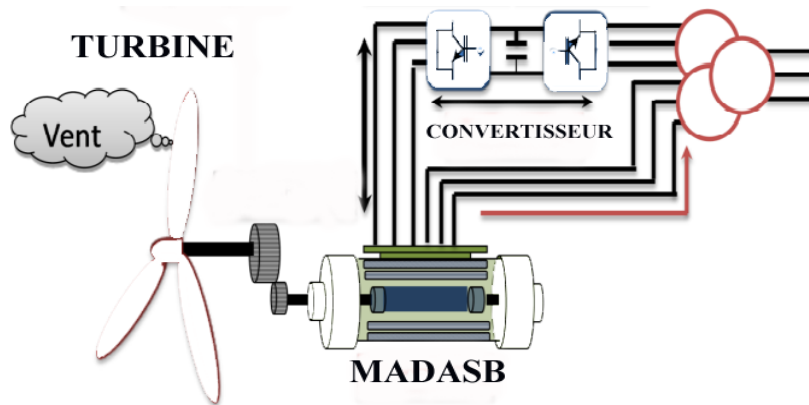


Figure 1.10 Schéma du système éolien à base d'une MADASB.

1.3 État de l'art sur les stratégies de commande de la MADASB

Au fil du temps, plusieurs méthodes de commande ont été développées pour cette machine électrique. Ces méthodes varient en fonction de leurs principes fondamentaux, de leur nature linéaire ou non linéaire, ainsi que des modèles mathématiques sur lesquels elles reposent.

En conséquence, les stratégies de commande seront regroupées en deux grandes sections principales. La première section portera sur les méthodes de commande linéaires, tandis que la seconde section traitera des méthodes de commande non linéaires et avancées. Chacune de ces deux sections sera ensuite subdivisée en deux parties :

Méthodes basées sur le modèle dynamique de la machine à deux références, avec une référence pour l'alimentation d'EP et une autre pour EC.

Méthodes basées sur le modèle dynamique à référence unique, qui se concentre sur l'alimentation d'EP.

1.3.1 Les méthodes de commande linéaires de la MADASB

1.3.1.1 Modèle lié à un système de deux références

A. La commande vectorielle

Les premières tentatives de mise en œuvre de méthodes de commande pour la MADASB ont vu le jour grâce aux travaux de D. Zhou en 1996, comme documenté dans la référence [Zhou et al., 1996]. À cette époque, il a réussi à élaborer la première stratégie de commande pour

cette machine en utilisant la technique de commande vectorielle basée sur deux systèmes d'orientation synchrones. Le premier système était associé à la projection sur la référence synchrone en ce qui concerne l'alimentation du bobinage de puissance EP, tandis que le second était lié à la référence synchronisée avec l'alimentation de l'enroulement de commande EC. Cette méthode de commande reposait principalement sur la régulation de l'angle entre ces deux références, connu sous le nom d'angle synchrone. Tout changement dans cet angle influençait le couple électromagnétique de la machine, permettant ainsi de commander la vitesse de la machine. Cependant, cette approche présentait des inconvénients majeurs, notamment la nécessité de calculs complexes et instantanés impliquant des fonctions trigonométriques très complexes, ce qui la rendait difficile à mettre en œuvre. De plus, elle différait considérablement de la commande vectorielle utilisée pour d'autres types de machines, car il n'existait pas de relation linéaire entre les variables de la machine et le couple, comme expliqué dans la référence [Poza, 2003].

Par la suite, dans la publication [N. D. Zhou et al., 1997], D. Zhou a obtenu les premiers résultats expérimentaux satisfaisants en ce qui concerne la commande vectorielle malgré les relations trigonométriques non linéaires. Cependant, cette structure de commande s'éloignait des modèles conventionnels de commande vectorielle, ce qui la rendait peu propice à une mise en œuvre "naturelle" de techniques de commande vectorielle avancées, telles que les approches adaptatives ou sans capteurs, comme mentionné dans la référence [Serhoud, 2015].

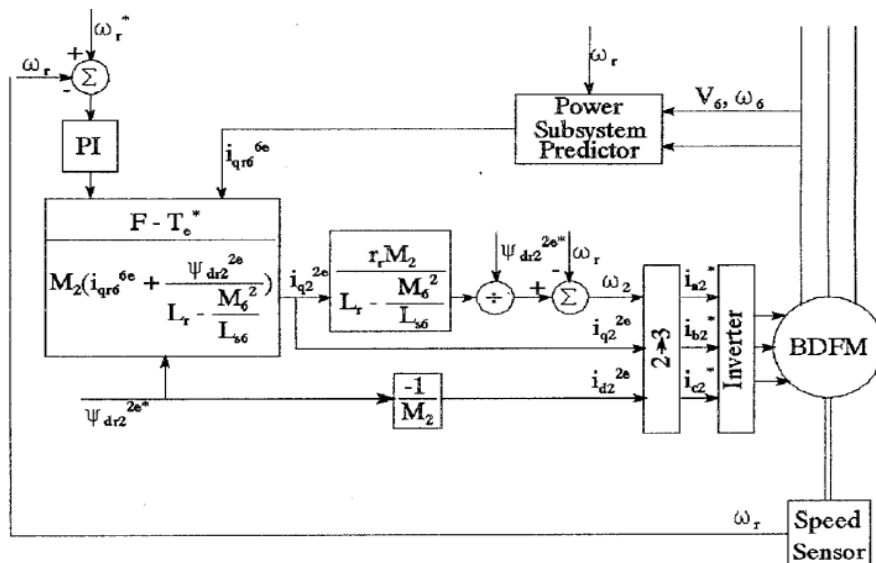


Figure 1.11 Schéma de la commande vectorielle basée sur le modèle lié à un système de deux références [Zhou et al., 1996].

B. La commande directe de couple DTC

Dans leur travail [Brassfield et al., 2003], les chercheurs R. William et W.R. Brassfield ont réussi à développer une méthode de commande direct de couple (DTC) pour la MADASB. Au début, les résultats expérimentaux se sont révélés insatisfaisants en raison des défis liés à la détermination de la vitesse de référence. Par conséquent, les chercheurs ont envisagé d'adopter une approche de commande vectorielle. Cependant, après des expériences et des calculs approximatifs, ils ont finalement obtenu des résultats satisfaisants. Leur travail a démontré la faisabilité de l'utilisation de la commande DTC pour cette machine [Serhoud, 2015].

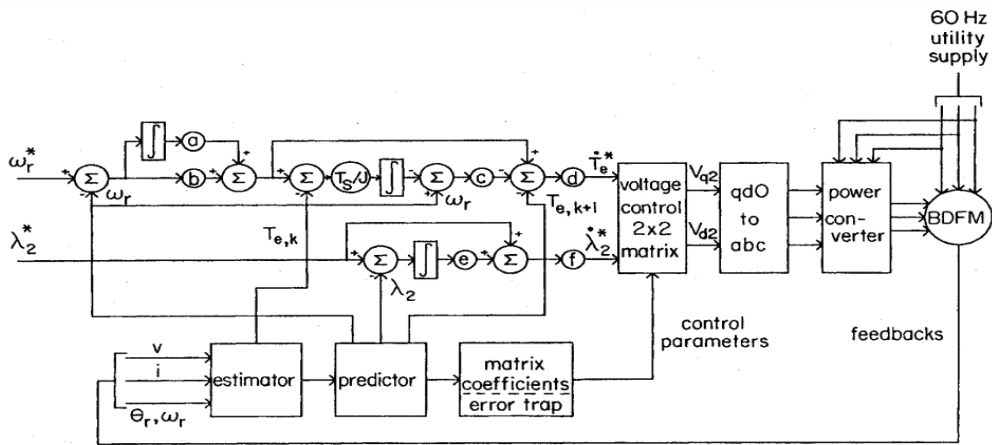


Figure 1.12 Schéma de la commande DTC basée sur le modèle lié à un système de deux références [Brassfield et al., 2003].

1.3.1.2 Modèle lié à un système de référence unique

A. La commande scalaire

Après avoir rencontré des défis importants dans les méthodes de commande basées sur le système à deux références, une avancée majeure a été réalisée par J. Poza dans [J. Poza et al., 2005]. Il a étudié la stabilité d'une MADASB avec une commande scalaire en tension en boucle ouverte. En construisant un modèle mathématique de la MADASB, il a appliqué la méthode des petites variations pour linéariser le modèle et analyser le domaine de fonctionnement stable de la machine.

Par la suite, I. Sarasola dans [Sarasola et al., 2006] s'est penché sur l'analyse de la stabilité en boucle fermée de la MADASB sous une commande scalaire en courant. Il a réalisé une

analyse théorique de la stabilité de la MADASB et a également mené des expériences pour valider ces résultats.

Enfin, S. Shao dans [Shao et al., 2007] a proposé une méthode de commande simple qui comprend deux régulateurs proportionnels intégraux (PI). Cette méthode exige la rétroaction de la vitesse du rotor et a été mise en œuvre dans l'environnement Matlab. Les résultats expérimentaux ont été présentés, mettant en évidence les performances du système dans les modes moteur et générateur [Serhoud, 2015].

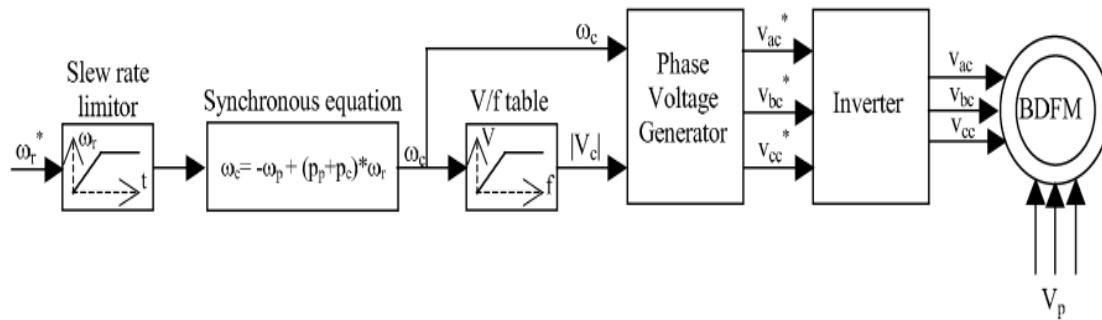


Figure 1.13 Schéma de la commande scalaire basée sur le modèle lié à un système de référence unique [J. Poza et al., 2005].

B. La commande vectorielle

J. Poza a développé un nouvel algorithme de commande basé sur la commande vectorielle pour la MADASB, avec des résultats expérimentaux à l'appui. L'objectif de cette commande de la MADASB est de parvenir à une performance dynamique similaire à celle de la MADA, en mettant l'accent sur la commande indépendante de la puissance active et de la vitesse.

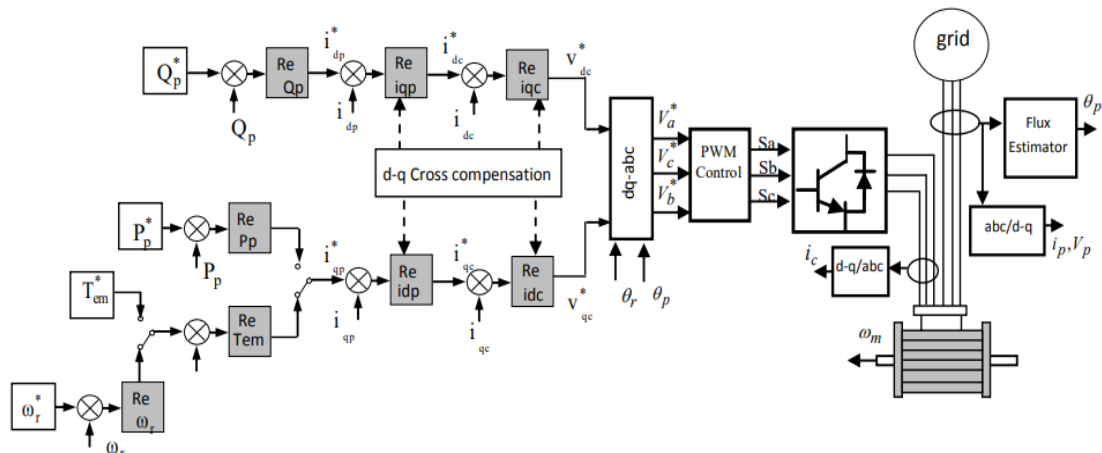
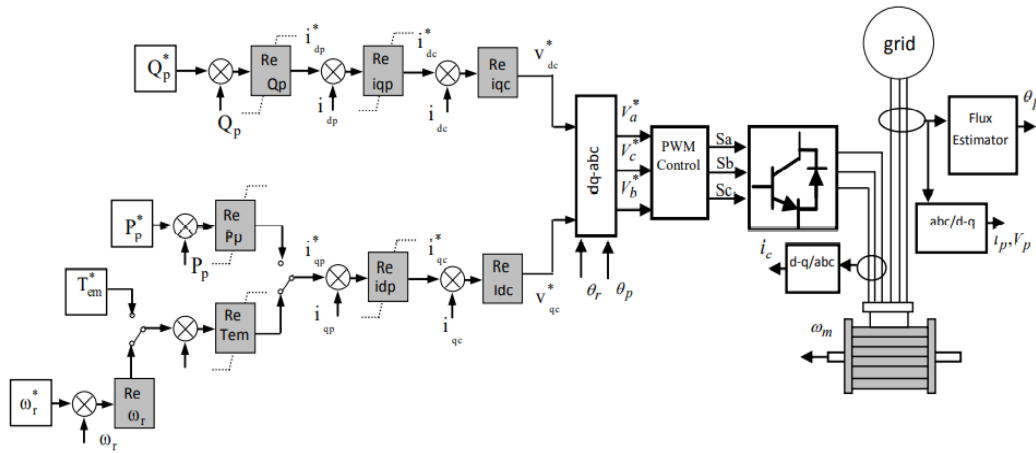


Figure 1.14 Schéma de commande vectorielle proposé par POZA [Poza, 2003].



1.15 Commande vectorielle avec boucles multiples en cascade [Poza, 2003].

Dans ce schéma de commande, une technique de boucles multiples en cascade est utilisée. L'approche de commande proposée vise à réguler le couple de la machine en commandant le courant du EP. Le courant du EP est ajusté en modifiant le courant du EC. Cette stratégie de commande nécessite la connaissance de la position du flux du EP pour orienter les axes d-q, et en ajustant la tension du EC, il est possible de commander le courant du EC.

Par la suite, S. Shao dans [Shao et al., 2007] et [N. S. Shao et al., 2009] a pris l'approche de la commande vectorielle proposée par Poza et l'a transformée en une commande découplée et stable des puissances active et réactive, baptisée DPC (Direct Power Control). L'auteur a développé une commande simplifiée en se concentrant sur l'orientation du flux d'EP et en réalisant une dérivation mathématique complète. Des résultats expérimentaux ont été présentés pour valider cette approche [Serhoud, 2015].

C. La commande DTC

Ensuite, I. Sarasola dans [Sarasola et al., 2007] a réussi à adapter avec succès la commande DTC basée sur le modèle à référence unique pour l'appliquer à la MADASB. Son travail a été couronné de succès, avec des résultats satisfaisants, démontrant ainsi l'efficacité de cette approche de commande.

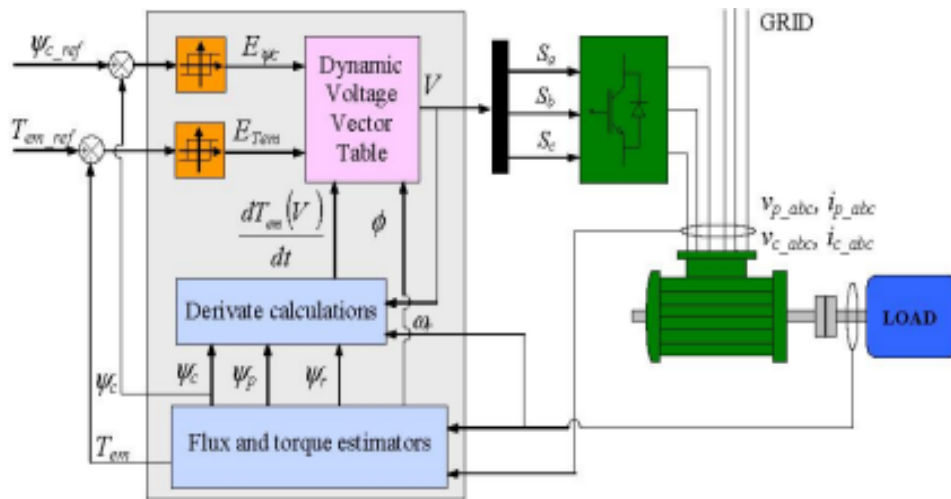


Figure 1.16 Schéma de la commande DTC basée sur le modèle lié à un système de référence unique [Sarasola et al., 2007].

1.3.2 Les méthodes de commande non linéaires et avancée de la MADASB

1.3.2.1 Modèle lié à un système de deux références

A. Commande par logique floue

Dans [Shoudao et al., 2004], H. Shoudao a introduit une méthode de commande basée sur la logique floue, utilisant un régulateur PID pour réguler le facteur de puissance de la MADASB lorsqu'elle fonctionne en mode générateur, directement connectée au réseau et alimentée par un onduleur de tension. Ce dispositif de commande est adaptatif et permet d'ajuster les paramètres en fonction des variations. Les simulations ont démontré que cette approche permet de réguler efficacement le facteur de puissance de la MADASB.

B. Commande sans capteur mécanique (sensorless control)

Par la suite, Y. Zhu dans [Zhu et al., 2011] a examiné le fonctionnement de la MADASB sans l'utilisation de capteurs de vitesse ou de position. L'objectif était d'atteindre des performances en utilisant une estimation de la vitesse à partir de la pulsation, tout en maintenant la commande du capteur grâce à un modèle adaptatif (MRAS). Les auteurs ont présenté une méthode de commande basée sur cette approche, et des simulations ont été utilisées pour vérifier et tester cette méthode de commande [Serhoud, 2015].

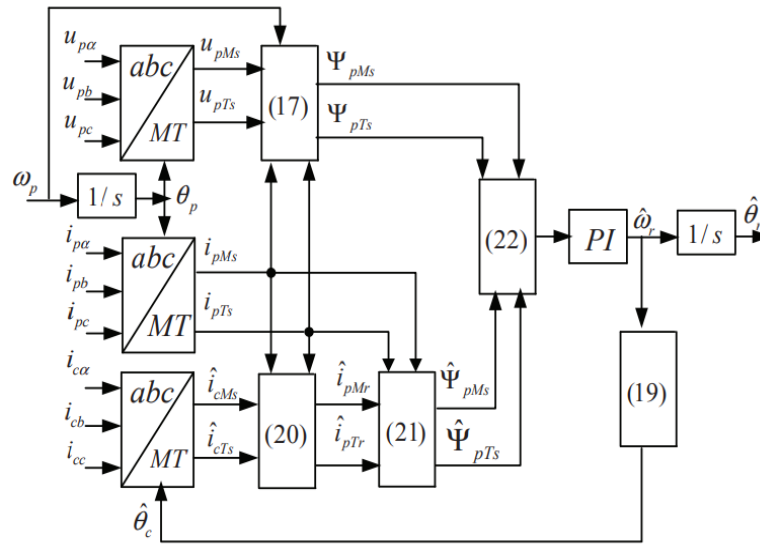


Figure 1.17 Schéma de l'estimation de vitesse de MADASB par MRAS [Zhu et al., 2011].

C. Commande par mode glissant

En 2008, X. Wang et son équipe dans [Wang et al., 2008] ont proposé d'adapter la commande par mode glissant pour l'utiliser avec la MADASB. Cette méthode est très similaire à la commande par mode glissant utilisée pour la MAS. Initialement, cette approche a été validée avec succès par des simulations. Par la suite, plusieurs équipes de recherche ont mis en œuvre cette méthode avec des résultats très positifs lors d'expérimentations pratiques.

Ensuite, Z. Shao dans [Z. Shao & Zhan, 2009] a introduit une variante de la commande par mode glissant appelée "commande par mode glissant adaptative". Cette variante ajuste le gain du régulateur glissant de manière variable pour obtenir une réponse plus douce et éviter le phénomène de chattering. La régulation est réalisée en utilisant une logique floue lorsque la machine fonctionne en mode moteur. Cette approche a été validée par des résultats de simulation [Serhoud, 2015].

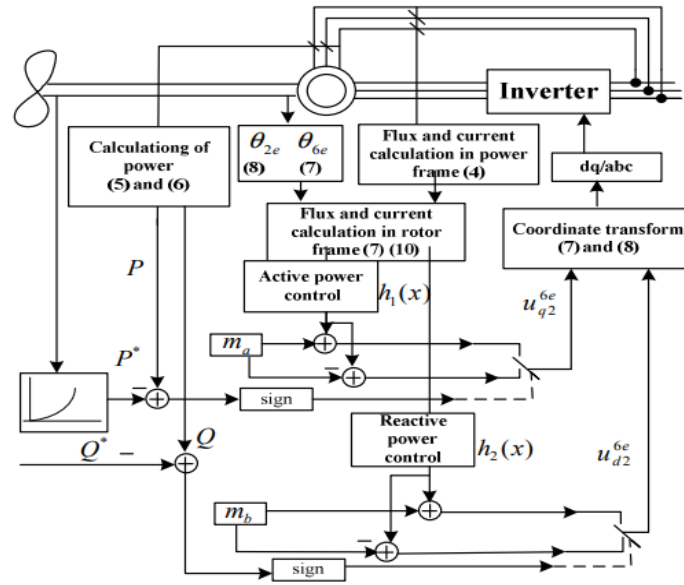


Figure 1.18 commande par mode glissant de MADASB [Wang et al., 2008].

1.3.2.2 Modèle lié à un système de référence unique

A. La commande par logique floue de la BDFM

Plus tard, dans sa publication [Madbouly et al., 2010], S. Madbouly propose une approche basée sur la logique floue pour la commande de la MADASB (Méthode d'Analyse et de Diagnostic des Systèmes à Base de Connaissances). Dans cette méthode, il emploie des régulateurs basés sur la logique floue dans le cadre de deux boucles de commande, l'une interne et l'autre externe, dans le but de substituer les régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) classiques. Cette démarche vise à améliorer la commande DPC. L'auteur procède ensuite à une simulation pour évaluer et comparer les performances des régulateurs flous par rapport aux régulateurs PI traditionnels.

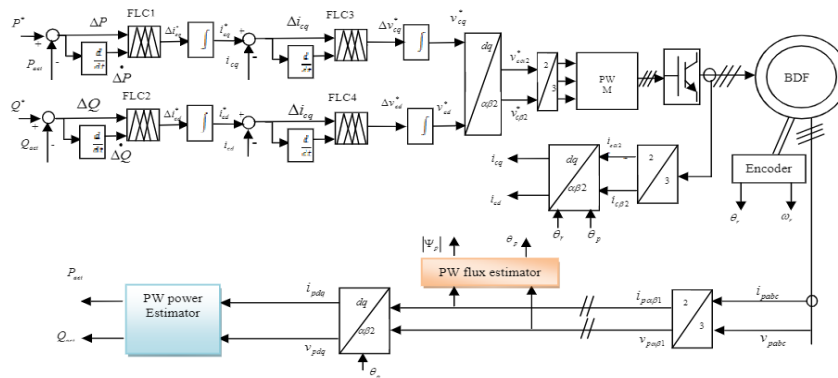


Figure 1.19 La commande par logique floue de la MADASB [Madbouly et al., 2010].

B. Commande sans capteur mécanique

Dans la référence [Serhoud, 2015], Hicham Serhoud a réussi à estimer la vitesse de la MADASB en utilisant un filtre de Kalman étendu (EKF). Ce filtre a démontré son efficacité et ses performances exceptionnelles dans l'exécution de cette tâche. Dans cette étude, le EKF a été associé à des méthodes de commande non linéaires et avancées, telles que le mode glissant et la logique floue, et les résultats obtenus se sont révélés très satisfaisants.

C. La commande synergétique

En 2022, une équipe de recherche, composée de l'auteur de cette thèse et de son encadrant, a réussi à adapter la commande synergétique pour la commande de cette machine dans [Beghdadi & Kouzi, 2022]. Cette méthode de commande a été conçue et testée par simulation, et les résultats obtenus sont très prometteurs. Dans un proche avenir, il est prévu de mettre en œuvre cette méthode de commande sur le terrain. Cette approche sera au cœur de la thèse et fera l'objet d'une discussion détaillée dans le troisième chapitre.

Conclusion

Dans ce chapitre, une vue d'ensemble générale de l'énergie éolienne dans la production d'énergie électrique a été présentée. Cela a inclus une discussion de son importance, de ses avantages et inconvénients, ainsi que de ses perspectives en Algérie. De plus, la machine électrique MADASB a été abordée, en mettant un accent particulier sur ses principes de fonctionnement, ses structures et les différents types de rotor. Cependant, l'accent principal a été mis sur la machine électrique elle-même, en particulier sur les méthodes de commande, car elles occupent une place centrale dans cette thèse. Des détails plus approfondis seront fournis dans les prochains chapitres à venir.

Références

- [Ángel & Javier, 2008] Ángel, R. V. M., & Javier, P. L. F. (2008). *Control robusto de una máquina de inducción doblemente alimentada por el estator en aplicación*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=250099>
- [Axe Eco Energie, s. d.] Axe Eco Energie. (s. d.). *Quelle est la différence entre un panneau solaire et un panneau photovoltaïque ?* <https://axe-ecoenergie.fr/quelle-est-la-difference-entre-un-panneau-solaire-et-un-panneau-photovoltaïque/>
- [Beghdadi & Kouzi, 2022] Beghdadi, M., & Kouzi, K. (2022). Novel fully sensorless synergetic control of brushless doubly fed induction machine integrated in wind energy conversion system driven by fuzzy-based HCS MPPT algorithm. *Wind Engineering*, 47(2), 385-407. <https://doi.org/10.1177/0309524x221130723>
- [Biomasse - Sierterm UEM, 2024] biomasse - Sierterm UEM | *Terminología trilingüe*. (2024, 30 janvier). Sierterm UEM | Terminología Trilingüe. <https://sierterm.es/content/biomasse/?lang=fr>
- [Brassfield et al., 2003] Brassfield, W., Spee, R., & Habetler, T. (2003). Direct torque control for brushless doubly-fed machines. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 32, 1098-1104. <https://doi.org/10.1109/ias.1992.244338>
- [Broadway, 1971] Broadway, A. (1971). Cageless induction machine. *Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers*, 118(11), 1593. <https://doi.org/10.1049/piee.1971.0290>
- [Dowec, 2003] DOWEC, “Estimation of turbine reliability figures within the Dowec project,” *Dutch Offshore Wind Energy Converter Report* Nr. 10048.
- [El Achkar, 2016] El Achkar, M. (2016). *Contribution to the sizing and control of the cascaded doubly fed induction generator* [Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise]. <https://www.theses.fr/2016CERG0814/document>
- [J. Poza et al., 2005] Poza, J., Oarvide, E., Roye, D., & Sarasola, I. (2005). Stability analysis of a BDFM under open-loop voltage control. Dans *European Conference on Power Electronics and Applications*. <https://doi.org/10.1109/epe.2005.219536>
- [Madbouly et al., 2010] Madbouly, S., Soliman, H., Hasanien, H., & Badr, M. (2010). Fuzzy logic control of brushless doubly fed induction generator. Dans *IET Conference Publications*. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0085>
- [N. D. Zhou et al., 1997] Zhou, N. D., Spee, R., & Alexander, G. (1997). Experimental evaluation of a rotor flux-oriented control algorithm for brushless doubly-fed machines. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 12(1), 72-78. <https://doi.org/10.1109/63.554171>
- [N. S. Shao et al., 2009] Shao, N. S., Abdi, E., Barati, F., & McMahon, R. (2009). Stator-Flux-Oriented Vector Control for Brushless Doubly Fed Induction Generator. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 56(10), 4220-4228. <https://doi.org/10.1109/tie.2009.2024660>

- [Nedjari et al., 2018] Nedjari, H. D., Haddouche, S. K., Balehouane, A., & Guerri, O. (2018). Optimal windy sites in Algeria : Potential and perspectives. *Energy*, 147, 1240-1255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.046>
- [Poza, 2003] Poza, F. (2003). *Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble]. <https://theses.hal.science/tel-00385804/document>
- [Region, s. d.] Region, T. (s. d.). *Ministère de l'énergie*. <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [Rendement des Éoliennes, s. d] Rendement des éoliennes. (s. d.). Energie Plus le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes>
- [Robyns et al., 2006] Robyns, B., Davigny, A., Saudemont, C., Ansel, A., Courtecuisse, V., François, B., Plumel, S., & Deuse, J. (2006). Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie. *J3eA*, 5, 003. <https://doi.org/10.1051/j3ea:20060028>
- [Sarasola et al., 2006] Sarasola, I., Poza, J., Oyarbide, E., & Rodriguez, M. A. (2006). Stability Analysis of a Brushless Doubly-Fed Machine under Closed Loop Scalar Current Control. *Proceedings Of The Annual Conference Of The IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon.2006.347553>
- [Sarasola et al., 2007] Sarasola, I., Poza, J., Rodriguez, M. A., & Abad, G. (2007). Direct torque control for brushless doubly fed induction machines. *IEEE International Conference Of Electric Machines & Drives*, 2, 1496-1501. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2007.383649>
- [Serhoud, 2015] SERHOUD, H. (2015). Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone sans balais à double alimentations [Thèse de doctorat, Université de Biskra]. <http://dspace.univ-eloued.dz/handle/123456789/8388>
- [Shao et al., 2007] Shao, S., Abdi, E., & McMahon, R. (2007). Stable operation of the brushless Doubly-Fed Machine (BDFM). Dans *IEEE International Conference of Power Electronics and Drive Systems*. <https://doi.org/10.1109/peds.2007.4487811>
- [Shihabudheen et al., 2018] Shihabudheen, K., Raju, S. K., & Pillai, G. (2018). Control for grid-connected DFIG-based wind energy system using adaptive neuro-fuzzy technique. *International Transactions On Electrical Energy Systems*, 28(5), e2526. <https://doi.org/10.1002/etep.2526>
- [Shoudao et al., 2004] Shoudao, H., Yi, W., Yaonan, W., & Guangfa, R. (2004). Active and reactive power control for brushless doubly-fed machine. *IEEE Power Electronics And Motion Control Conference*, 2, 640-644. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ieee-000001375642>
- [Simonetti et al., 2018] Simonetti, D. S., Amorim, A. E., & Oliveira, F. D. (2018). Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems. Dans Elsevier eBooks (p. 461-490). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812959-3.00015-0>

[Tir, 2014] Tir, Z. (2014). *Contribution à l'Étude d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais en vue de son Appl* [Thèse de doctorat, Université de Batna]. http://theses.univ-batna.dz/index.php/theses-en-ligne/doc_download/4368-contribution-a-letude-dune-machine-asynchrone-a-double-alimentation-sans-balais-en-vue-de-son-appl

[TotalEnergies, 2021] TotalEnergies. (2021, 19 janvier). Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne. TotalEnergies. <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne>

[Wang et al., 2008] Wang, X., Yang, J., Zhang, X., & Wu, J. (2008). Sliding mode control of active and reactive power for brushless Doubly-Fed machine. *International Colloquium On Computing, Communication, Control, And Management*, 294-298. <https://doi.org/10.1109/cccm.2008.167>

[Wind Technologies, s. d.] Wind Technologies. (s. d.). *your partner in wind power projects*. <http://www.windtechnologies.com/>

[Xu et al., 1994] Xu, N. L., Tang, N. Y., & Ye, N. L. (1994). Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 9(1), 165-172. <https://doi.org/10.1109/60.282488>

[Xu & Wang, 2002] Xu, N. L., & Wang, N. F. (2002). Comparative study of magnetic coupling for a doubly fed brushless machine with reluctance and cage rotors. *Industry Applications Conference*, 1, 326-332. <https://doi.org/10.1109/ias.1997.643045>

[Z. Shao & Zhan, 2009] Shao, Z., & Zhan, Y. (2009). Adaptive fuzzy sliding mode control for brushless doubly fed machine. *IEEE International Conference Of Computational Intelligence And Design*, 73-77. <https://doi.org/10.1109/iscid.2009.167>

[Zhou et al., 1996] D. Zhou, R Spee. G. Alexander, and C. Wallace. A simplified method for dynamic control of brushless doubly-fed machines, Dans *Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, Aug. 1996, vo.2, pp. 946-951

[Zhu et al., 2011] Zhu, Y., Zhang, X., & Liu, S. (2011). Study on Speed Sensorless Vector Control of Brushless Doubly-Fed Machine. *Proceeding Of The IEEE International Conference On Consumer Electronics, Communications And Networks (CECNet)*, 16-18. <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768887>

**CHAPITRE II:
MODELISATION ET
SIMULATION DU
SYSTEME DE
CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE**

Table des matières

Introduction	34
2.1 Modélisation de la turbine éolienne	34
2.1.1 Modélisation de la turbine	35
2.1.2 Modélisation de multiplicateur.....	36
2.1.3 Equation dynamique de l'arbre de turbine	37
2.1.4 Validation du modèle de turbine par simulation	38
2.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais MADASB	40
2.2.1 Les hypothèses simplificatrices	40
2.2.2 Modèle permanente de la machine	41
2.2.2.1 Schéma équivalent avec une seule alimentation.....	41
2.2.2.2 Schéma équivalent avec double alimentation.....	42
2.2.3 Modèle dynamique de la MADASB	43
2.2.3.1 Modèle de la MADASB dans le repère triphasé abc	44
2.2.3.2 Modèle de la MADASB dans le repère biphasé dq avec référence unique	46
2.2.3.3 Représentation d'état de la MADASB	48
2.2.4 Validation de modèle de MADASB par simulation	50
2.2.5 La commande vectorielle de la MADASB.....	55
2.2.5.1 Notion sur la commande vectorielle de la MADASB	55
2.2.5.2 Simulation de la commande vectorielle de MADASB.....	56
2.3 Modélisation de convertisseur bidirectionnel de puissance	58
2.3.1 Modèle d'onduleur	60
2.3.2 Modèle du bus continu	62
Conclusion.....	64

Introduction

Après avoir exploré en détail les aspects de l'énergie éolienne, en particulier la machine électrique MADASB qui servira de générateur, on aborde maintenant la création d'un modèle mathématique complet pour décrire l'ensemble du processus de conversion de l'énergie éolienne. Ce modèle vise à simplifier la compréhension du système et à développer des méthodes de commande efficaces. On va suivre une approche séquentielle en modélisant chaque composant étape par étape, dans un ordre logique. On commencera par la modélisation de la turbine, puis on se penchera sur la MADASB, avant de passer au convertisseur bidirectionnel de puissance, ainsi qu'à son filtre et au bus continu. L'objectif principal de ce chapitre est de créer un modèle mathématique global pour le système présenté dans la figure 2.1. Chaque modèle mathématique sera ensuite validé par des simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK®.

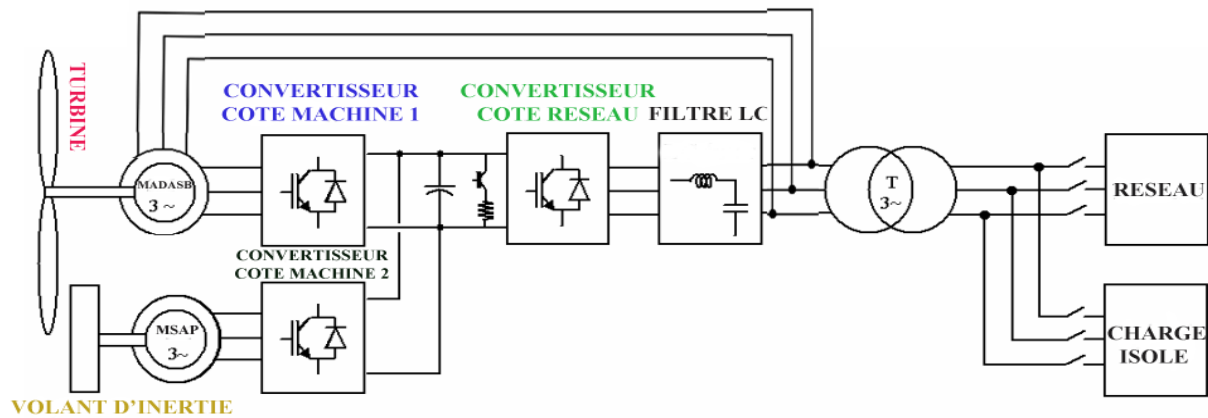


Figure 2.1 Schéma du système étudié.

2.1 Modélisation de la turbine éolienne

L'objectif de cette section est de développer une représentation mathématique du système illustré dans la figure 2.2.

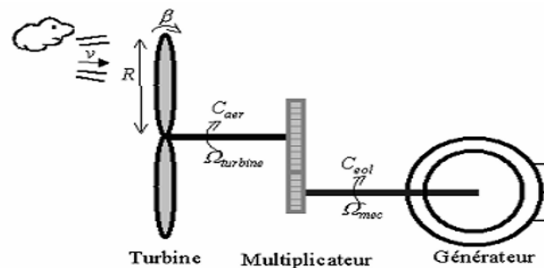


Figure 2.2 Schéma de turbine éolienne.

2.1.1 Modélisation de la turbine

Le rôle principal de la turbine éolienne consiste à exploiter la force du vent pour capturer l'énergie cinétique qu'il transporte, convertissant ainsi cette énergie en un couple qui fait tourner les pales. Par conséquent, il est essentiel de commencer la modélisation mathématique des éoliennes en comprenant d'abord la formule mathématique de la puissance cinétique du vent qui agit sur la turbine [Wang & Chang, 2004] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad 2.1$$

Avec :

- P_v : c'est la puissance cinétique du vent ;
- ρ : c'est la densité d'air ;
- S : c'est la surface balayée par les pales de turbine ;
- v : c'est la vitesse du vent.

Compte tenu du fait que le vent continue de se déplacer après avoir traversé une éolienne et que sa vitesse ne diminue que partiellement, il est physiquement impossible pour les pales de capter toute l'énergie cinétique disponible du vent.

En conséquence, les éoliennes ne capturent qu'une fraction de la puissance cinétique du vent, cette fraction étant connue sous le nom de puissance aérodynamique P_{aero} . Cette puissance aérodynamique peut être mathématiquement exprimée comme suit [Soetedjo et al., 2011] :

$$P_{aero} = C_p \cdot P_v \quad 2.2$$

Où C_p est le coefficient de puissance qui représente le rapport entre la puissance captée et la puissance disponible du vent.

Au fil des dernières années, de nombreuses tentatives ont été entreprises, tant par des scientifiques que par des chercheurs, pour développer une formule mathématique plus précise afin de déterminer le rapport entre la puissance captée par une éolienne et la puissance disponible du vent. Ces efforts ont impliqué des expérimentations et des mesures effectuées sur de véritables turbines éoliennes.

Ces expériences ont abouti à différentes formules mathématiques approximatives pour le coefficient de puissance C_p , mais elles poursuivent toutes le même objectif et produisent des

résultats très similaires. Cependant, la formule la plus célèbre et largement utilisée est la suivante [Soetedjo et al., 2011] :

$$C_p = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\lambda_i}} \quad 2.3$$

Avec

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad 2.4$$

Et

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad 2.5$$

Où

- β c'est l'angle d'orientation des pales ;
- R c'est le rayon de pales ;
- $\Omega_{turbine}$ c'est la vitesse angulaire des pales de turbine.

Il existe une limite connue sous le nom de "limite de Betz" pour ce coefficient, qui est mathématiquement démontrée, mais en résumé, elle est égale à :

$$C_{p-max} = \frac{16}{27} \quad 2.6$$

Avec la connaissance de la vitesse de la turbine, on peut directement calculer le couple aérodynamique à l'aide de l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \quad 2.7$$

2.1.2 Modélisation de multiplicateur

Le multiplicateur, ou boîte de vitesse, joue le rôle d'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Son objectif principal est d'ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la turbine, qui est généralement plus lent, pour qu'elle se rapproche de la vitesse de synchronisme de l'arbre du générateur. Cette adaptation de la vitesse peut être modélisée de la manière suivante :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad 2.8$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad 2.9$$

Où G est le gain de multiplication de vitesse.

2.1.3 Equation dynamique de l'arbre de turbine

La masse de la turbine éolienne est transférée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie, symbolisée par $J_{turbine}$, qui englobe à la fois la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique suggéré inclut l'inertie totale J_T , qui se compose de l'inertie de la turbine transmise au rotor du générateur, ainsi que de l'inertie de la génératrice elle-même.

$$J_T = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad 2.10$$

Où J_g est l'inertie de générateur.

En utilisant la deuxième loi de Newton, également connue sous le nom de loi de la dynamique, on peut calculer que le couple mécanique total C_{eol} appliqué au rotor est le suivant [Tir, 2014]:

$$\begin{cases} J_T \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{eol} \\ C_{eol} = C_{aer} - C_{em} - f\Omega_{mec} \end{cases} \quad 2.11$$

Où:

- C_{em} : est le couple de la machine ;
- f : est le coefficient de frottement et viscosité de la machine.

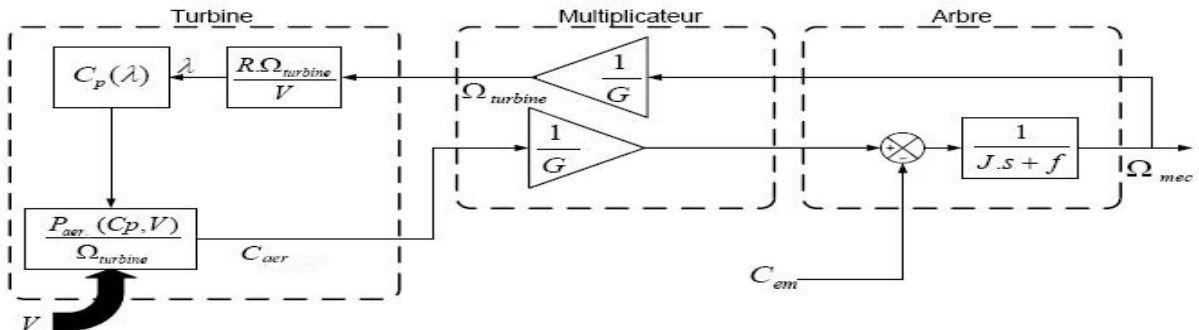


Figure 2.3 Schéma bloc de la turbine.

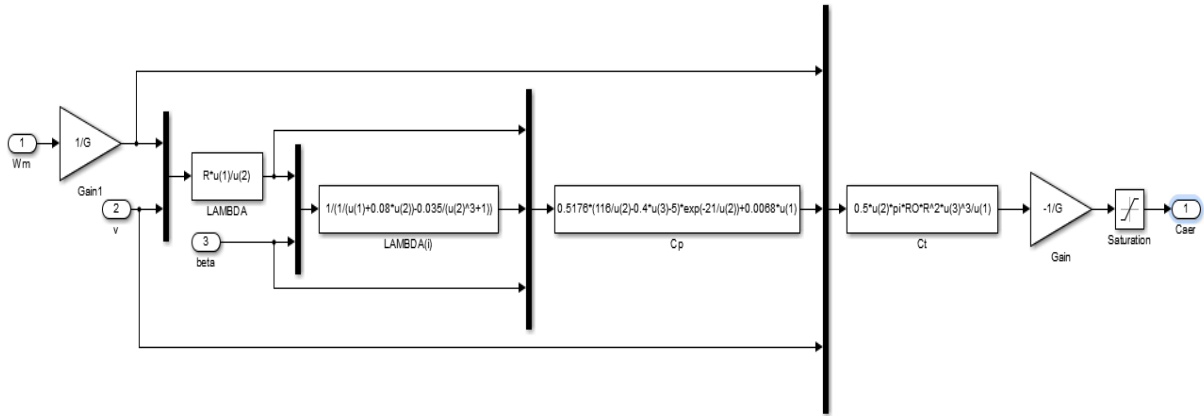


Figure 2.4 Modèle SIMULINK® de turbine éolienne.

2.1.4 Validation du modèle de turbine par simulation

Après avoir élaboré le modèle mathématique complet de la turbine éolienne, on passe maintenant à sa validation par simulation dans SIMULINK®. Dans cette section, l'attention est portée principalement sur la turbine elle-même, tandis que le générateur sera représenté sous forme d'une vitesse constante, comme illustré dans la figure 2.5.

Les paramètres spécifiques de la turbine sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1 Paramètres de la turbine [Beghdadi & Kouzi, 2022].

Désignation	Symbol	Valeur
Rayon de la turbine	R	5m
Gain de multiplicateur	G	40
Densité d'air	ρ	1.225Kg/m ³
Inertie de la turbine	J_{turbine}	21N.m.s/rad
Vitesse du vent maximal	V_{max}	16m/s

Le modèle de la turbine sera soumis à des tests en utilisant des vents de vitesse variable, comme illustré dans la figure 2.5b. Cette approche permettra d'obtenir une compréhension approfondie des performances de cette turbine, ainsi que de l'efficacité du modèle mathématique.

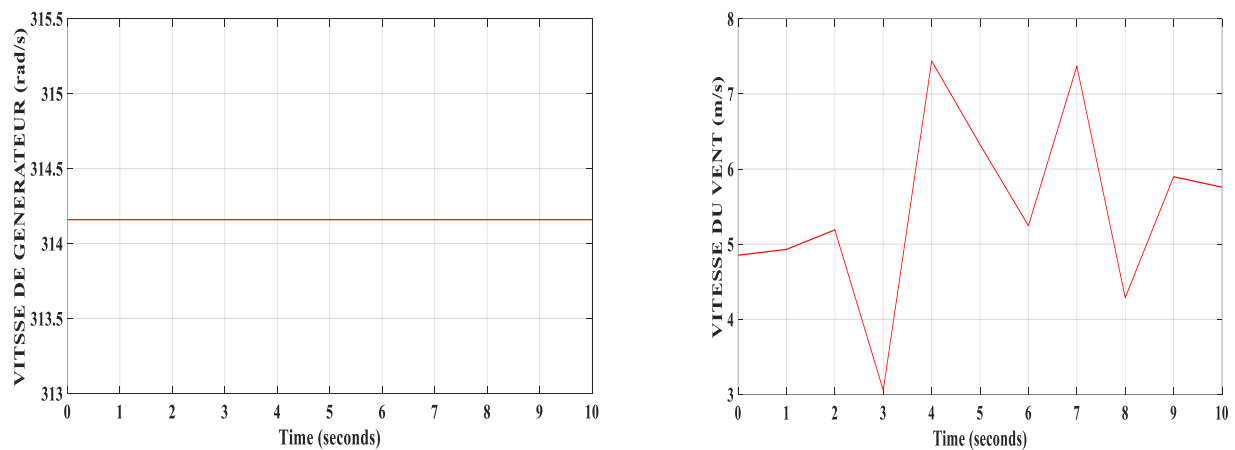


Figure 2.5 a. Vitesse du générateur constante « $\Omega=100*\pi$ », b. Vitesse du vent.

Les résultats obtenus par simulation sont les suivants :

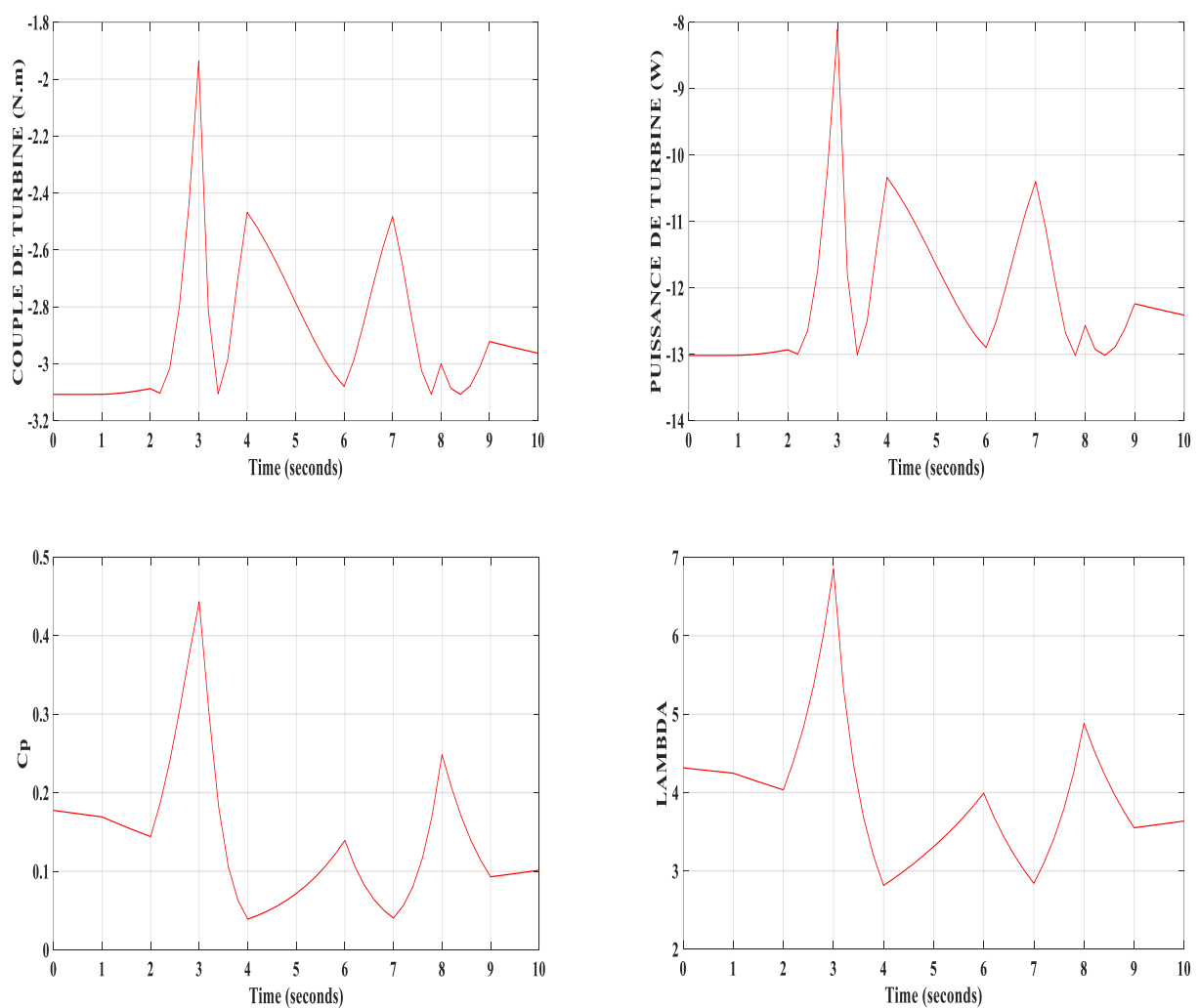


Figure 2.6 Couple, puissance mécanique, C_p et λ de la turbine.

En observant la figure 2.6, plusieurs constatations importantes sont à relever :

- ❖ Le couple et la puissance de la turbine sont étroitement corrélés à la vitesse du vent, car ils suivent une évolution similaire à cette dernière.
- ❖ Ces valeurs de couple et de puissance sont négatives, ce qui indique que la turbine génère la puissance nécessaire pour entraîner le rotor du générateur.
- ❖ Les coefficients C_p et λ se révèlent instables du fait que la turbine fonctionne à une vitesse constante tandis que la vitesse du vent varie. Par conséquent, pour maximiser la capture d'énergie éolienne, il est impératif d'ajuster la vitesse de la turbine en fonction du vent.

En conclusion, ce modèle mathématique a clairement démontré son efficacité et sa pertinence. Il est donc envisageable de l'utiliser dans des systèmes futurs avec confiance.

2.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais MADASB

2.2.1 Les hypothèses simplificatrices

Dans cette thèse, le principal domaine d'intérêt et de recherche porte sur les méthodes de commande des machines électriques, en mettant moins l'accent sur leurs composants internes et leur structure complexe. Afin de rendre la modélisation mathématique de ces machines plus accessible, on a été amenés à faire usage de certaines hypothèses simplificatrices.

Ces hypothèses sont les suivantes :

- On considère que l'entrefer reste constant, en négligeant les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques.
- On suppose que le circuit magnétique demeure non saturé, c'est-à-dire qu'il possède une perméabilité constante.
- Les résistances des enroulements sont considérées comme constantes, indépendantes de la température, et on néglige l'effet de peau.
- Les enroulements statoriques EP et EC sont modélisés comme ayant une distribution sinusoïdale avec un nombre différent de pôles.
- On suppose une parfaite symétrie de construction.
- Les nids rotoriques sont considérés comme symétriques, et chaque nid est traité comme une unique boucle pour chaque nid.

Ces hypothèses simplificatrices ont été nécessaires pour rendre la modélisation plus abordable malgré la complexité intrinsèque de ces machines électriques.

2.2.2 Modèle permanente de la machine

Il est essentiel d'étudier et de développer un modèle mathématique de la machine dans son état permanent afin de faciliter la compréhension de son fonctionnement fondamental. De plus, cela permet de concevoir des méthodes de commande basées sur le modèle permanent plutôt que sur le modèle dynamique, tel que la commande scalaire. Dans ce paragraphe, on va établir le modèle permanent de la MADASB sous forme d'un schéma équivalent réduit à l'enroulement de puissance, en considérant que la machine fonctionne de manière synchrone [Poza, 2003].

Il existe deux méthodes possibles pour construire un modèle permanent de cette machine. La première consiste à la représenter sous forme d'un circuit électrique alimenté par une seule source d'alimentation connectée à l'enroulement de puissance (EP). La deuxième méthode implique de la représenter comme un circuit électrique alimenté par deux sources d'alimentation distinctes, l'une pour EP et l'autre pour EC.

Chacune de ces méthodes présente ses avantages et ses inconvénients. On va donc examiner les deux modèles.

2.2.2.1 Schéma équivalent avec une seule alimentation

La figure 2.7 montre le schéma équivalent en régime permanent de la machine avec une seule alimentation dans à EP [Poza, 2003].

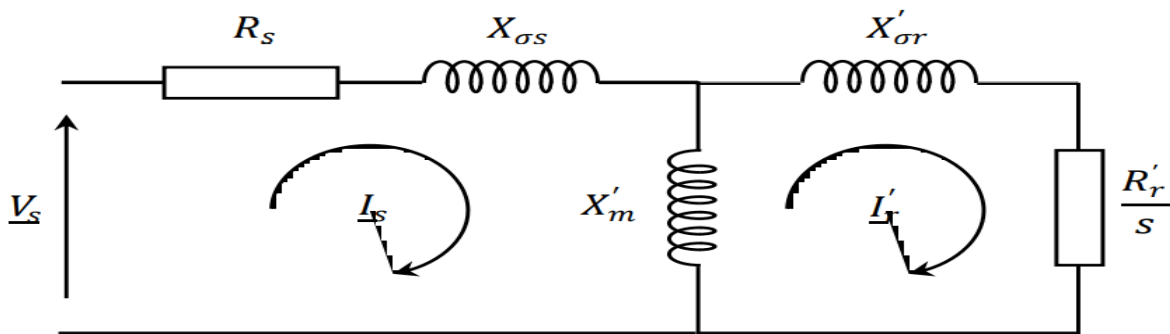


Figure 2.7 Circuit équivalent de MADASB avec une seule alimentation [Tir, 2014].

Avec

- $X'_m = \frac{3}{2} \omega_s M_s$, $X_{\sigma s} = \omega_s \left(L_s - \frac{3}{2} M_s \right)$ Où ω_s est la pulsation statorique, M_s et L_s représentent l'inductance mutuelle et auto-inductance ramené au stator respectivement.
- $R'_r = \frac{3M_s^2}{nM^2} R_r$, $X'_{\sigma r} = \omega_s \left(\frac{3M_s^2}{nM^2} L_r - \frac{3}{2} M_s \right)$ et $s = \frac{(\omega_s - (P_1 + P_2) \omega_r)}{\omega_s}$ Où ω_s est la pulsation rotorique, M , L_r et R_r représentent l'inductance mutuelle stator-rotor, inductance et résistance rotorique respectivement [Tir, 2014].

On peut modéliser le circuit électrique précédent sous la forme des deux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + X_{\sigma s} I_s + X'_m (I_s - I'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s} I'_r + X'_{\sigma r} I'_r + X'_m (I'_r - I_s) \end{cases} \quad 2.12$$

2.2.2.2 Schéma équivalent avec double alimentation

Après avoir élaboré le modèle de la machine sous la forme d'une équation mathématique pour un circuit électrique alimenté par une seule source, on va désormais explorer le modèle de la machine sous la forme d'un circuit électrique alimenté par deux sources distinctes, comme illustré dans la figure 2.8 [Poza, 2003].

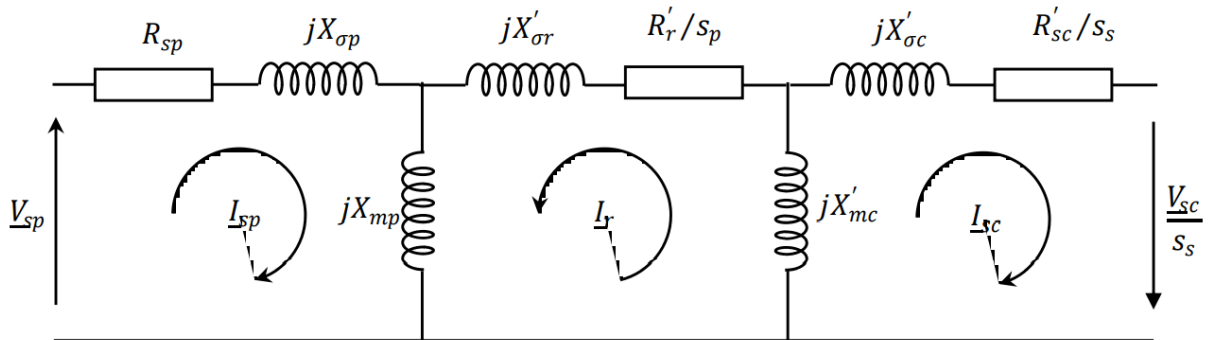


Figure 2.8 Circuit équivalent de MADASB avec deux alimentations [Tir, 2014].

Les équations de la MADASB sont décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{sp} = R_{sp} I_{sp} + X_{\sigma p} I_{sp} + X'_{mp} (I_{sp} - I'_r) \\ 0 = \frac{R'_r}{s_p} I'_r + X'_{\sigma r} I'_r + X'_{mc} (I'_r - I_{sc}) \\ \frac{V_{sc}}{s_c} = \frac{R_{sc}}{s_c} I_{sc} + X_{\sigma c} I_{sc} + X'_{mc} (I_{sc} - I'_r) \end{cases} \quad 2.13$$

En observant le schéma ci-dessus, on peut conclure que le schéma équivalent de la MADASB présente de fortes similitudes avec celui de la machine asynchrone à double alimentation classique (MADA). Cependant, la différence notable réside dans le fait que le circuit équivalent de la MADASB comporte une boucle additionnelle, ce qui crée ce que l'on appelle le couplage magnétique entre les deux enroulements statoriques (EP-Rotor-EC) [Poza, 2003].

En conséquence, le modèle de la MADASB est plus complexe que celui de la MADA, bien que le mode de fonctionnement soit identique. Au lieu d'alimenter directement les bobinages du rotor, comme c'est le cas pour la MADA, l'alimentation d'excitation de la MADASB passe par l'intermédiaire de l'enroulement EC [Poza, 2003] [Tir, 2014].

2.2.3 Modèle dynamique de la MADASB

Dans ce modèle mathématique de la machine électrique, on prend en compte les transitions des grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques de la machine. Dans cette section, on mettra principalement l'accent sur le modèle proposé par J. Poza dans [Poza, 2003].

Cependant, notre modélisation mathématique sera divisée en trois parties distinctes :

- ✓ La première partie sera dédiée au modèle mathématique de la machine dans un repère triphasé (abc).
- ✓ La deuxième partie sera consacrée au modèle mathématique équivalent en biphasé (dq), en utilisant la transformation de Park.
- ✓ Enfin, la troisième partie du modèle sera axée sur la représentation d'état de la machine.

Tout au long de cette démarche, on adoptera le modèle de la machine à référence unique. Cette approche est privilégiée en raison de sa simplicité et de sa praticité, ce qui la rend adaptée à la création de méthodes de commande efficaces pour cette machine électrique.

2.2.3.1 Modèle de la MADASB dans le repère triphasé abc

En tenant compte des hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, les équations de la machine dans le repère triphasé abc (figure 2.9) s'écrivent comme suit :

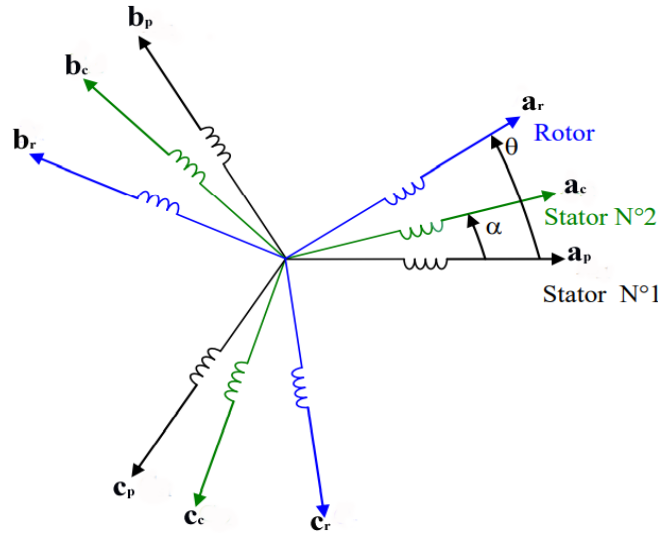


Figure 2.9 Représentation triphasique de MADASB.

A. Les équations électriques

$$\begin{cases} [V_{abc_p}] = [R_p][I_{abc_p}] + \frac{d}{dt}[\Psi_{abc_p}] \\ [V_{abc_c}] = [R_c][I_{abc_c}] + \frac{d}{dt}[\Psi_{abc_c}] \\ [V_{abc_r}] = [R_r][I_{abc_r}] + \frac{d}{dt}[\Psi_{abc_r}] \end{cases} \quad 2.14$$

Avec :

- R_p , R_c et R_r sont les matrices des résistances d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement sachant que $R_{ap}=R_{bp}=R_{cp}$, $R_{ac}=R_{bc}=R_{cc}$ et $R_{ar}=R_{br}=R_{cr}$ sont les résistances par phase d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement et :

$$[R_p] = \begin{bmatrix} R_{ap} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bp} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cp} \end{bmatrix}, [R_c] = \begin{bmatrix} R_{ac} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cc} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

- V_{abcp} , V_{abcc} et V_{abc_r} sont les vecteurs des tensions d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement :

$$\begin{bmatrix} V_{abcp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ap} \\ V_{bp} \\ V_{cp} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_{abcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ac} \\ V_{bc} \\ V_{cc} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}$$

- I_{abcp} , I_{abcc} et I_{abc_r} sont les vecteurs des courants d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement :

$$\begin{bmatrix} I_{abcp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ap} \\ I_{bp} \\ I_{cp} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_{abcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ac} \\ I_{bc} \\ I_{cc} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

- Ψ_{abcp} , Ψ_{abcc} et Ψ_{abc_r} sont les vecteurs des flux magnétiques d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{abcp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{ap} \\ \Psi_{bp} \\ \Psi_{cp} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Psi_{abcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{ac} \\ \Psi_{bc} \\ \Psi_{cc} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Psi_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \\ \Psi_{cr} \end{bmatrix}$$

B. Les équations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{abcp} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Psi_{abcc} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Psi_{abc_r} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} L_p \end{bmatrix} & [0] & \begin{bmatrix} L_{pr} \end{bmatrix} \\ [0] & \begin{bmatrix} L_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_{cr} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} L_{rp} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_{rc} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad 2.15$$

Avec :

- L_p , L_c et L_r sont les matrices des inductances d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement sachant que $L_{ap}=L_{bp}=L_{cp}$, $L_{ac}=L_{bc}=L_{cc}$ et $L_{ar}=L_{br}=L_{cr}$ sont les inductances par phase d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement et :

$$\begin{bmatrix} L_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ap} & 0 & M_p \\ 0 & L_{bp} & M_p \\ M_p & M_p & L_{cp} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ac} & 0 & M_c \\ 0 & L_{bc} & M_c \\ M_c & M_c & L_{cc} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ar} & 0 & M_r \\ 0 & L_{br} & M_r \\ M_r & M_r & L_{cr} \end{bmatrix}$$

- M_p , M_c et M_r sont les inductances mutuelles entre les bobines d'enroulement de puissance, de commande et de rotor respectivement :

$$\begin{bmatrix} L_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a_p a_r} & L_{a_p b_r} & L_{a_p c_r} \\ L_{b_p a_r} & L_{b_p b_r} & L_{b_p c_r} \\ L_{c_p a_r} & L_{c_p b_r} & L_{c_p c_r} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a_c a_r} & L_{a_c b_r} & L_{a_c c_r} \\ L_{b_c a_r} & L_{b_c b_r} & L_{b_c c_r} \\ L_{c_c a_r} & L_{c_c b_r} & L_{c_c c_r} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_{rp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{pr} \end{bmatrix}^t, \begin{bmatrix} L_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{cr} \end{bmatrix}^t$$

C. Les équations mécaniques

- L'équation dynamique de la machine est :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_{em} - C_r - f\Omega}{J} \quad 2.16$$

- L'équation de couple électromagnétique de machine est :

$$C_{em} = \frac{(P_1 + P_2)}{2} \left(\begin{bmatrix} I_{abc_p} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{pr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc_r} \end{bmatrix}^t + \begin{bmatrix} I_{abc_c} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc_r} \end{bmatrix}^t \right) \quad 2.17$$

Avec:

- Ω : est la vitesse de la machine ;
- C_r : est le couple résistant (de la charge) ;
- J : est l'inertie de la machine.

2.2.3.2 Modèle de la MADASB dans le repère biphasé dq avec référence unique

Le modèle mathématique biphasé dq équivalent est un outil extrêmement précieux dans la modélisation de toutes les machines électriques, car la transformation de Park permet de réduire le nombre d'équations nécessaires pour décrire la machine. Dans le cas de la MADASB, le nombre d'équations passe ainsi de neuf à seulement six. De plus, cette approche offre des avantages considérables sur le plan mathématique, car elle élimine la variation de l'inductance mutuelle en fonction de l'angle entre les bobines. Cela simplifie grandement les calculs en évitant l'utilisation de fonctions trigonométriques complexes.

Il est à noter que la transformation de Park qu'on utilise est basée sur la transformation Concordia plutôt que sur la transformation Clarke. Cela signifie que la puissance est préservée, mais les modules des grandeurs de modélisation sont transformés.

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

Il est plus avantageux d'adopter une référence unifiée pour l'ensemble du système d'équations. Dans ce contexte, il est logique de choisir l'enroulement de puissance comme référence, car il est alimenté par un réseau puissant à fréquence fixe. En faisant de son angle électrique la référence, les équations du système sont alors formulées comme suit [Poza, 2003] [Beghdadi & Kouzi, 2022] :

A. Les équations électriques

$$\begin{cases} V_{dp} = R_p I_{dp} + \frac{d\Psi_{dp}}{dt} - \omega_p \Psi_{qp} \\ V_{qp} = R_p I_{qp} + \frac{d\Psi_{qp}}{dt} + \omega_p \Psi_{dp} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_p - P_1 \Omega) \Psi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_p - P_1 \Omega) \Psi_{dr} \\ V_{dc} = R_c I_{dc} + \frac{d\Psi_{dc}}{dt} - (\omega_p - (P_1 + P_2) \Omega) \Psi_{qc} \\ V_{qc} = R_c I_{qc} + \frac{d\Psi_{qc}}{dt} + (\omega_p - (P_1 + P_2) \Omega) \Psi_{dc} \end{cases} \quad 2.18$$

B. Les équations magnétiques

$$\begin{cases} \Psi_{dp} = L_p I_{dp} + M_p I_{dr} \\ \Psi_{qp} = L_p I_{qp} + M_p I_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r I_{dr} + M_p I_{dp} + M_c I_{dc} \\ \Psi_{qr} = L_r I_{qr} + M_p I_{qp} + M_c I_{qc} \\ \Psi_{dc} = L_c I_{dc} + M_c I_{dr} \\ \Psi_{qc} = L_c I_{qc} + M_c I_{qr} \end{cases} \quad 2.19$$

C. Les équations mécaniques

- L'équation dynamique de la machine est :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_{em} - C_r - f\Omega}{J} \quad 2.20$$

- L'équation de couple électromagnétique de machine est :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P_1 M_p (I_{qp} I_{dr} - I_{dp} I_{qr}) + P_2 M_c (I_{qc} I_{dr} - I_{dc} I_{qr}) \quad 2.21$$

D. La puissance active et réactive

$$\begin{cases} P_p = V_{qp} I_{qp} + V_{dp} I_{dp} \\ Q_p = V_{qp} I_{dp} - V_{dp} I_{qp} \end{cases} \quad 2.22$$

Avec:

- $V_{dp}, V_{qp}, V_{dc}, V_{qc}$: sont les dq-composants des tensions d'EP et EC respectivement ;
- $I_{dp}, I_{qp}, I_{dc}, I_{qc}, I_{dr}, I_{qr}$: sont les dq-composants des courants d'EP, EC et rotor respectivement ;
- R_p, R_c, R_r : sont les résistances d'EP, EC et rotor respectivement ;
- L_p, L_c, L_r : sont les inductance d'EP, EC et rotor respectivement ;
- M_p, M_c : sont les inductances mutuelles cyclique EP-rotor et EC-rotor respectivement ;
- $\Psi_{dp}, \Psi_{qp}, \Psi_{dc}, \Psi_{qc}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$: sont les dq-composants des courants d'EP, EC et rotor respectivement ;
- P_p, Q_p : sont les puissance active et réactive d'EP respectivement.

2.2.3.3 Représentation d'état de la MADASB

L'objectif de la représentation d'état pour n'importe quel système physique est de parvenir à une formulation mathématique du système sous la forme :

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][U] \quad 2.23$$

Où :

- X c'est le vecteur des variables d'état ;
- A c'est la matrice d'état ;
- B c'est la matrice de commande ;
- U c'est le vecteur des entrées.

La représentation d'état pour toute machine électrique présente deux avantages significatifs :

- Tout d'abord, elle simplifie le processus de création d'un modèle de la machine dans des logiciels de simulation tels que MATLAB®.

- Deuxièmement, elle permet de gagner du temps lors de la conception d'un filtre de Kalman étendu (EKF) pour la machine.

La représentation d'état de la MADASB a déjà été documentée dans plusieurs références, par exemple, dans [Serhoud, 2015] . Cependant, un défi récurrent concernait la matrice A, qui nécessitait des calculs longs et complexes des matrices inverses pour être définie. Les recherches antérieures ont résolu ce problème en utilisant deux matrices distinctes, AL et AR, au lieu d'une seule matrice A, comme suit :

$$\frac{d}{dt}[X] = [AL]^{-1}([AR][X] - [U]) \quad 2.24$$

Cependant, cette approche a conduit à une augmentation de la complexité des équations d'état et a rendu la création du modèle et du filtre de Kalman étendu de la machine plus ardue par rapport au premier cas, où une seule matrice A était utilisée.

Pour ces raisons, cette matrice a été calculée dans le but de simplifier le processus et de rendre cette ressource accessible à la communauté scientifique à l'avenir.

Dont :

$$[X] = \begin{bmatrix} \Psi_{dp} \\ \Psi_{qp} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \\ \Psi_{dc} \\ \Psi_{qc} \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [U] = \begin{bmatrix} V_{dp} \\ V_{qp} \\ 0 \\ 0 \\ V_{dc} \\ V_{qc} \end{bmatrix} \text{ et}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_p \sigma_c}{A_p} & \omega_p & \frac{R_p M_p}{A_p L_r} & 0 & \frac{R_p A_1}{A_p} & 0 \\ -\omega_p & \frac{-R_p \sigma_c}{A_p} & 0 & \frac{R_p M_p}{A_p L_r} & 0 & \frac{R_p A_1}{A_p} \\ \frac{R_r M_p}{A_r L_p} & 0 & \frac{-R_r}{A_r} & \omega_r & \frac{R_r M_c}{A_r L_c} & 0 \\ 0 & \frac{R_r M_p}{A_r L_p} & -\omega_r & \frac{-R_r}{A_r} & 0 & \frac{R_r M_c}{A_r L_c} \\ \frac{-R_r A_2}{A_c} & 0 & \frac{R_c M_c}{A_c L_r} & 0 & \frac{-R_c \sigma_p}{A_c} & \omega_c \\ 0 & \frac{-R_r A_2}{A_c} & 0 & \frac{R_c M_c}{A_c L_r} & -\omega_c & \frac{-R_c \sigma_p}{A_c} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\sigma_c = 1 - \frac{M_c^2}{L_c L_r}, \quad \sigma_p = 1 - \frac{M_p^2}{L_p L_r}, \quad A_p = L_p - \frac{M_c^2 L_p}{L_c L_r} - \frac{M_p^2}{L_r}, \quad A_r = L_r - \frac{M_c^2}{L_c} - \frac{M_p^2}{L_p},$$

$$A_c = L_c - \frac{M_p^2 L_c}{L_p L_r} - \frac{M_c^2}{L_r}, \quad A_1 = \frac{M_c M_p}{L_c L_r} \text{ et } A_2 = \frac{M_c M_p}{L_p L_r}.$$

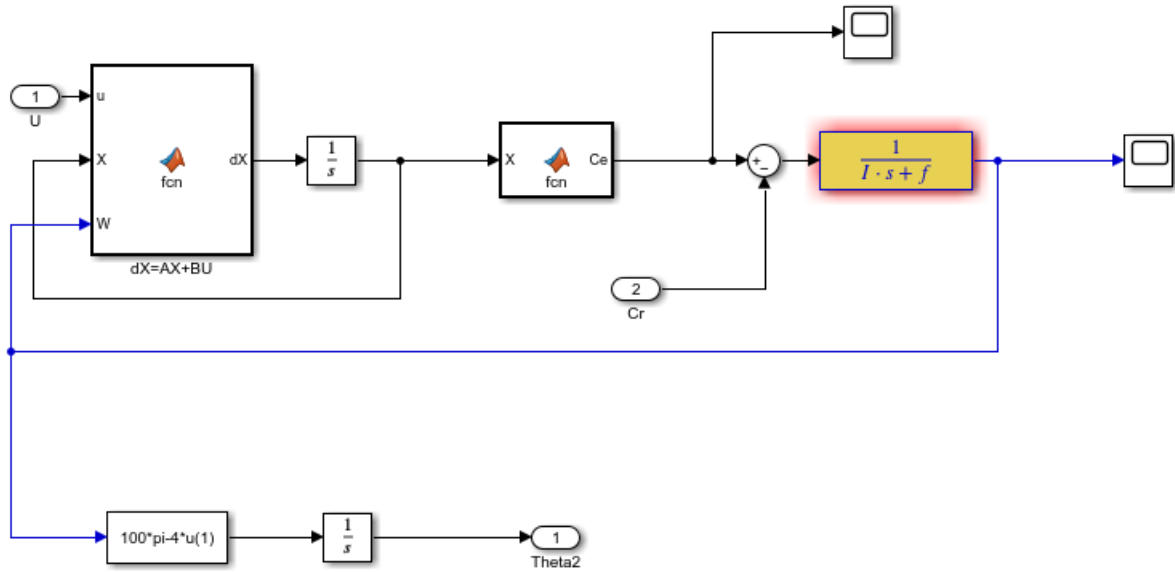


Figure 2.10 Représentation d'état sous SIMULINK® de MADASB.

```
function dX = fcn(u,X,W)
dX=zeros(6,1);
Lp=0.7148; Lc=0.1217; Lr=0.1326; Mp=0.2421; Mc=0.0598; Rp=1.732; Rc=1.079; Rr=0.473; P1=3; P2=1;
Am=-1*[Rp*(1-Mc^2/(Lr*Lc))/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc)) -100*pi -Rp*Mp/Lr/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc)) 0 Rp*Mc*Mp/(Lr*Lc)/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc)) 0;
100*pi Rp*(1-Mc^2/(Lr*Lc))/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc)) 0 -Rp*Mp/Lr/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc)) 0 Rp*Mc*Mp/(Lr*Lc)/(Lp-Mp^2/Lr-Mc^2/Lp/(Lr*Lc));
-Rr*Mp/Lp/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc) 0 Rr/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc) -(100*pi-P1*W) -Rr*Mc/Lc/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc) 0;
0 -Rr*Mp/Lp/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc) (100*pi-P1*W) Rr/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc) 0 -Rr*Mc/Lc/(Lr-Mp^2/Lp-Mc^2/Lc);
Rc*Mc*Mp/(Lr*Lp)/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp)) 0 -Rc*Mc/Lr/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp)) 0 Rc*(1-Mp^2/(Lr*Lp))/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp)) -(100*pi-(P1+P2)*W)
0 Rc*Mc*Mp/(Lr*Lp)/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp)) 0 -Rc*Mc/Lr/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp)) (100*pi-(P1+P2)*W) Rc*(1-Mp^2/(Lr*Lp))/(Lc-Mc^2/Lr-Mp^2/Lc/(Lr*Lp))];
dX=Am*X+u;
```

Figure 2.11 La matrice A sous MATLAB®.

2.2.4 Validation de modèle de MADASB par simulation

Le modèle de représentation d'état qui a été précédemment élaboré sera mis en œuvre pour la simulation de la MADASB, en utilisant les paramètres de la machine tels que spécifiés dans le tableau 2.2.

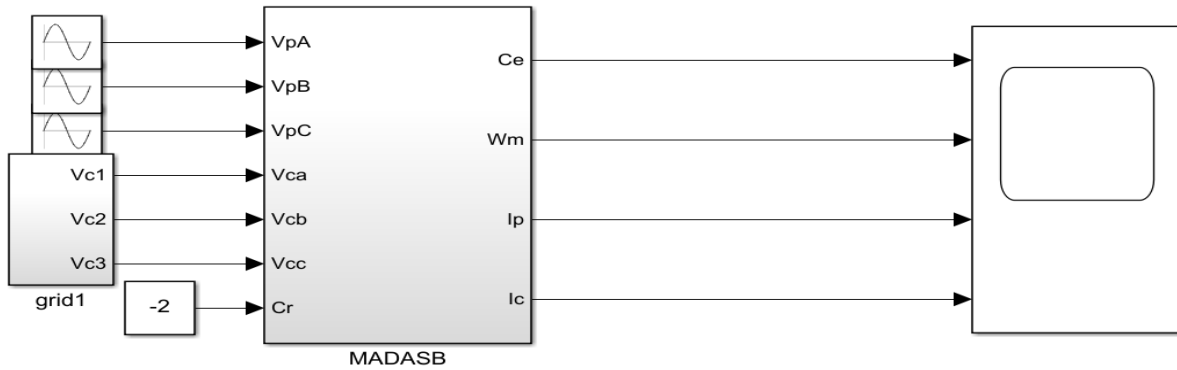


Figure 2.12 Le schéma d'évaluation de représentation d'état sous SIMULINK® de MADASB.

Tableau 2.2 Paramètres de la MADASB [Poza, 2003].

Désignation	Symbol	Valeur
Résistances d'EP, EC et rotor	R_p , R_c et R_r	1.732, 1.079 et 0.474 Ω
Inductances d'EP, EC et rotor	L_p , L_c et L_r	0.714, 0.1217, 0.1326 H
Inductances mutuelles cycliques EP-rotor et EC-rotor	M_p et M_c	0.2421 et 0.0598 H

Pour une étude plus approfondie et pour avoir une vue d'ensemble des modes de fonctionnement de la MADASB, la simulation sera menée selon trois axes principaux :

- Dans un premier temps, le modèle mathématique de la MADASB sera soumis à des tests en court-circuit de l'enroulement de commande EC.
- Ensuite, l'enroulement EC sera mis en circuit ouvert.
- Enfin, l'enroulement EC sera alimenté électriquement avec des tensions de fréquences et d'amplitudes variables.

Ces différentes étapes de simulation permettront d'explorer les performances et le comportement de la MADASB dans divers scénarios.

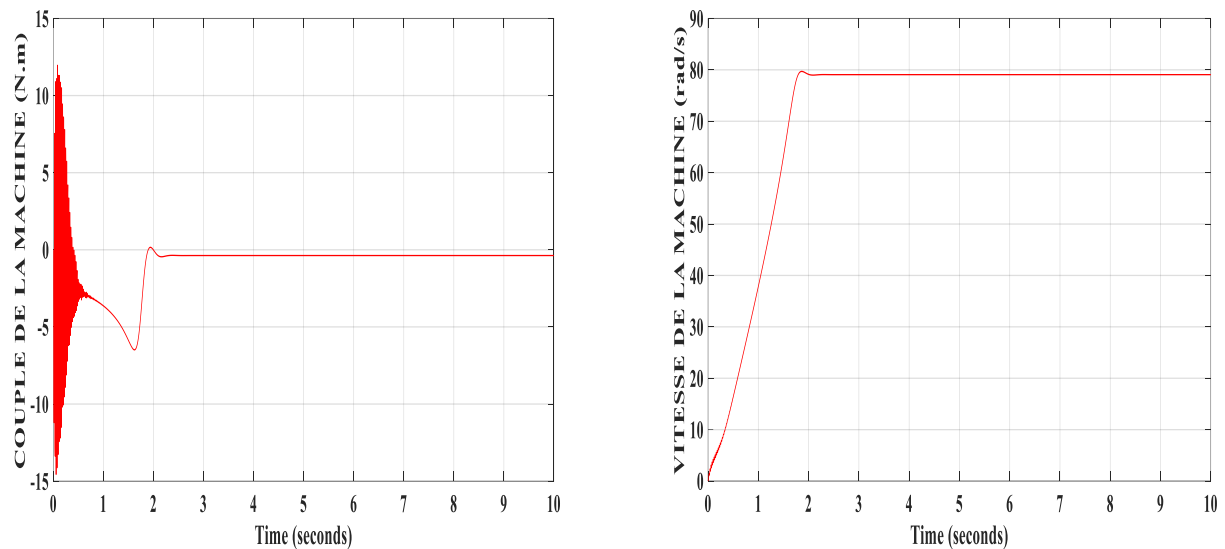
A. EC en court-circuit

Figure 2.13 Couple et vitesse de la machine (EC en court-circuit).

Comme la montre clairement les figure, lorsque l'enroulement de commande est court-circuité, la machine électrique se transforme en une machine asynchrone classique (MAS) ou une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans ce cas, la machine devient entièrement identique à une MADA classique avec un nombre de pôles égal à la somme de P1 et P2.

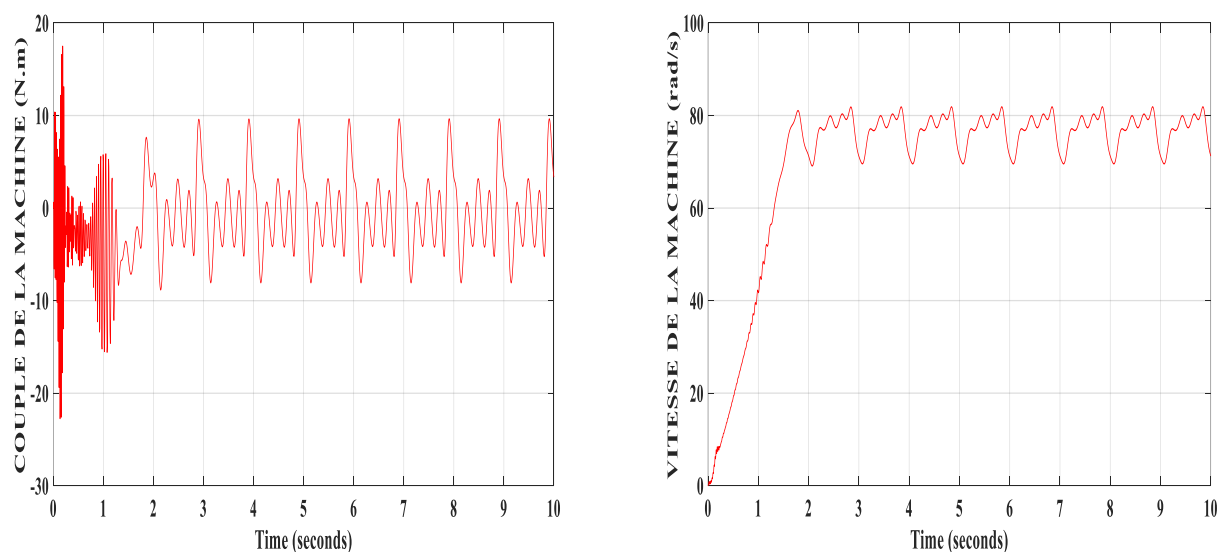
B. EC en circuit ouvert

Figure 2.14 Couple et vitesse de la machine (EC en circuit ouvert).

Lorsque l'enroulement EC est laissé en circuit ouvert, la machine devient instable, ce qui se traduit par d'importantes fluctuations du couple et de la vitesse de la machine. Ce mode de fonctionnement s'avère inutile, en particulier lorsque la machine est destinée à être utilisée comme un générateur éolien.

C. EC est alimenté par tensions de fréquence variable

Ce mode de fonctionnement est le plus intéressant et est couramment utilisé. Initialement, au démarrage, l'enroulement de commande électrique sera alimenté par une tension d'amplitude de 7 V et une fréquence de 2 Hz. Après dix secondes, l'intensité et la fréquence de la tension seront modifiées pour atteindre une amplitude de 14 V et une fréquence de 4 Hz. Enfin, après encore dix secondes, la tension et la fréquence seront portées à 21 V et 6 Hz, comme illustré dans la figure 2.15 à gauche.

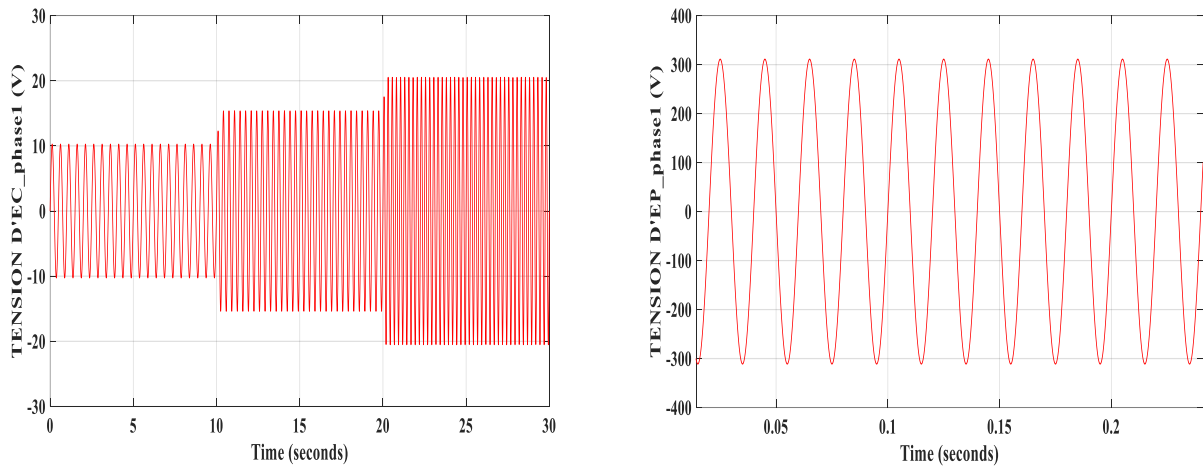


Figure 2.15 Tensions d'EC et EP 'phase 1'.

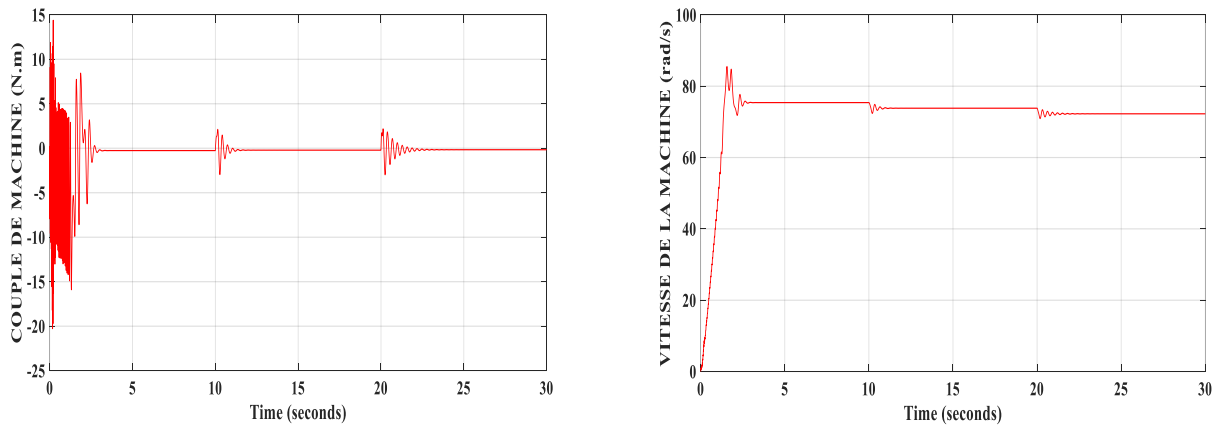


Figure 2.16 Couple et vitesse de la machine.

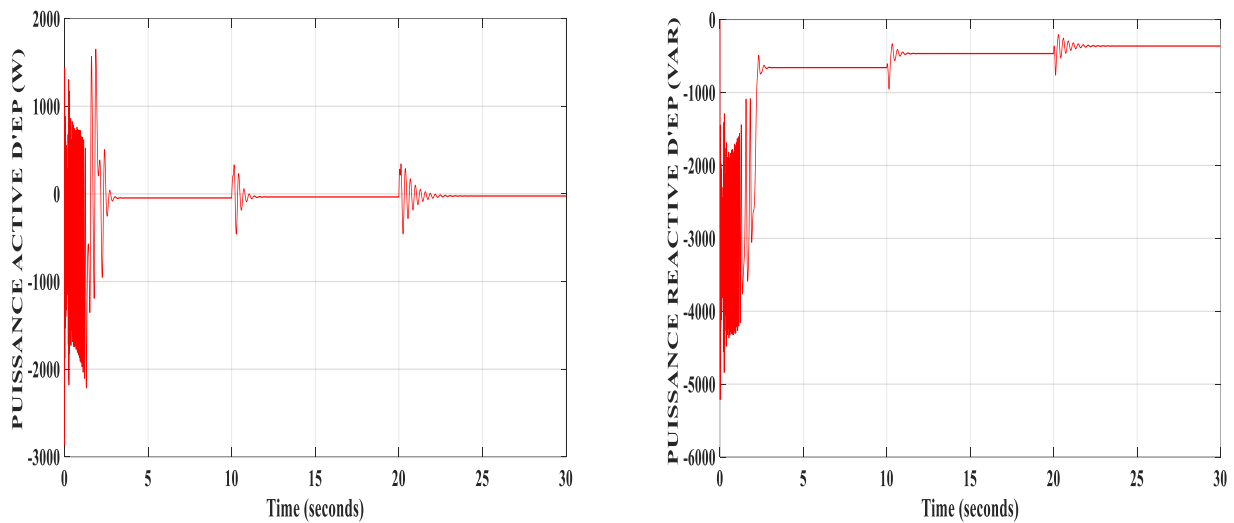


Figure 2.17 La puissance active et réactive d'EP.

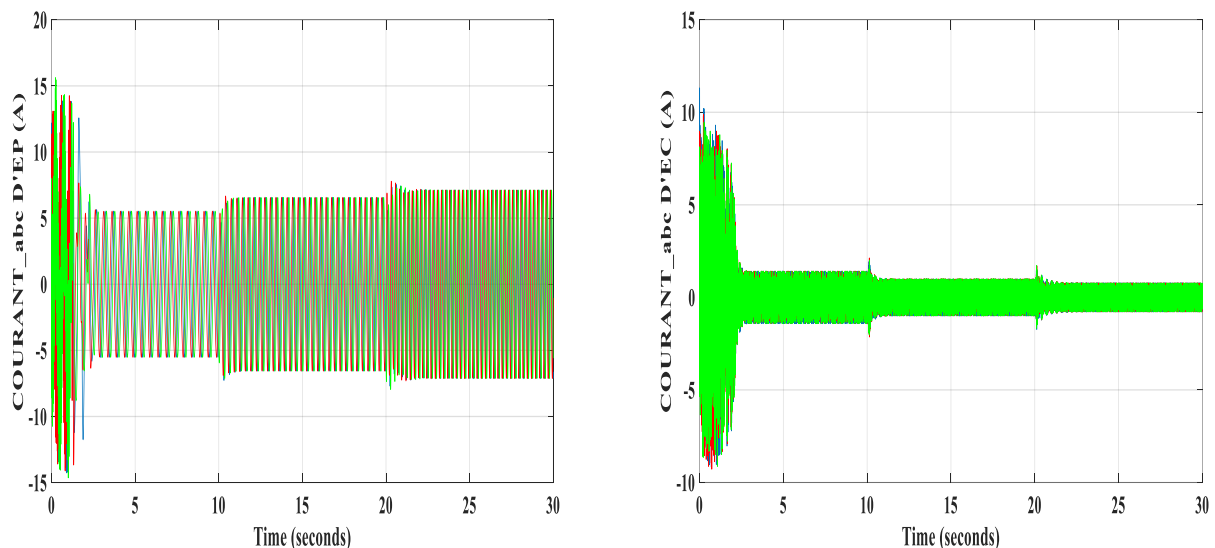


Figure 2.18 Les courants triphasés d'EP et EC.

En se basant sur les figures précédentes, plusieurs observations significatives peuvent être formulées :

- Toutes les grandeurs électriques et mécaniques de la machine varient en fonction de la fréquence d'alimentation de l'enroulement de commande.
- Des oscillations apparaissent dans toutes les grandeurs de la machine lors du changement de fréquence de la tension d'alimentation de l'enroulement de commande.
- Ces oscillations s'amortissent rapidement, ramenant la machine à son état stable précédent.

- La vitesse de la machine diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension d'alimentation de l'enroulement de commande.
- La puissance active d'EP a une valeur négative, indiquant que la machine fonctionne en tant que générateur.
- La puissance réactive d'EP a également une valeur négative, ce qui signifie que la machine agit comme un compensateur de puissance réactive.

En résumé, la vitesse de la machine est principalement influencée par la fréquence de la tension d'alimentation de l'enroulement de commande, ce qui ouvre la possibilité de commander la vitesse de la machine. La machine peut fonctionner en tant que moteur ou générateur, ainsi qu'en tant que compensateur ou consommateur d'énergie réactive. Ces caractéristiques font de cette machine électrique un choix très intéressant et utile, notamment en tant que générateur électrique dans les éoliennes.

2.2.5 La commande vectorielle de la MADASB

2.2.5.1 Notion sur la commande vectorielle de la MADASB

Pour élaborer des algorithmes de commande, il est essentiel de travailler avec les équations du modèle mathématique de la MADASB dans un repère unique lié à l'alimentation du EP, comme illustré dans les équations 2.18 à 2.22. Cela permet d'établir des relations entre différentes variables de la machine. L'orientation le long du flux du EP simplifie considérablement les équations dynamiques, car la valeur de $|\Psi_p|$ est presque constante, réduisant ainsi au minimum les termes contenant le facteur $d|\Psi_p|/dt$, qui deviennent presque négligeables [Poza, 2003].

Comme mentionné précédemment, le schéma de commande repose sur l'utilisation de la technique de boucles multiples en cascade. Ce schéma de commande vise à déterminer le couple de la machine en commandant le courant du EP. La commande du courant du EP est obtenue en ajustant le courant du EC, et en modifiant la tension du EC, il est possible de commander le courant du EC, comme illustré dans la figure 2.19 [Poza, 2003].

Ceci constitue un aperçu succinct de la commande vectorielle classique de la MADASB. Les détails de la conception des régulateurs deviendront plus clairs à mesure qu'on approfondira cette approche.

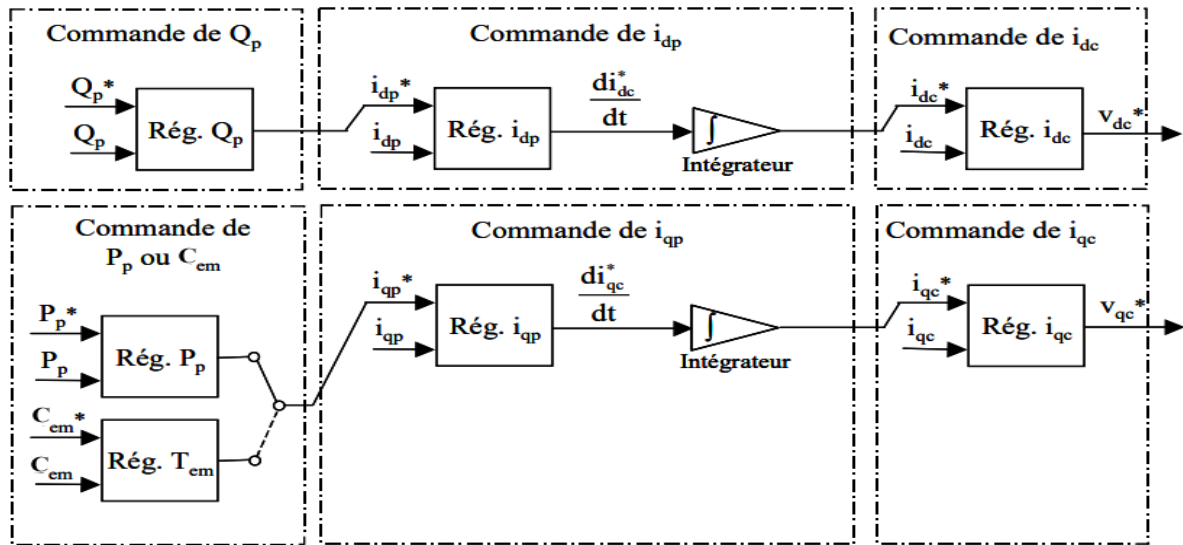
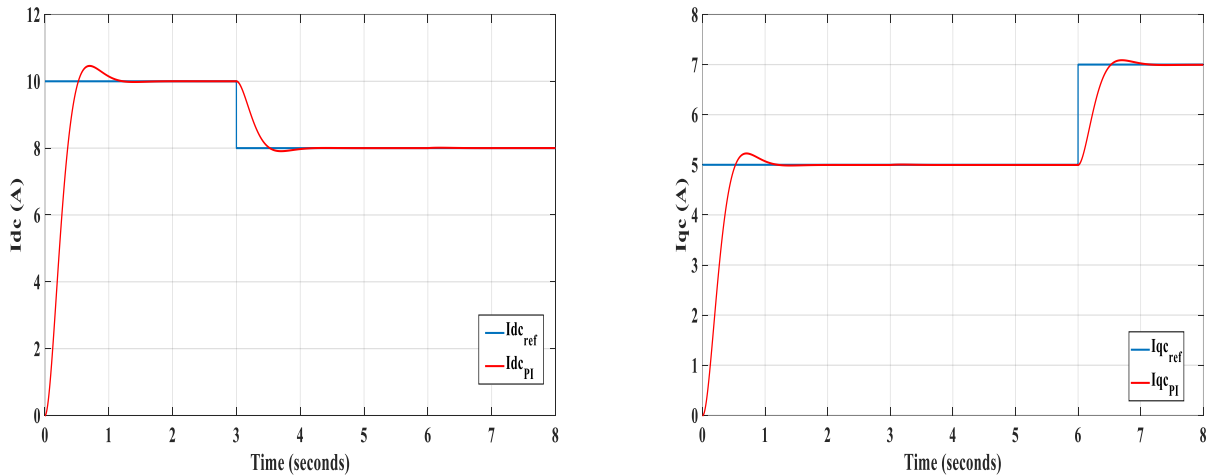


Figure 2.19 Structures des régulateurs dans la commande vectorielle [Poza, 2003].

2.2.5.2 Simulation de la commande vectorielle de MADASB

Dans cette simulation, on utilisera la commande vectorielle de la MADASB basée sur le modèle à référence unique de J. POZA (figure 2.19).

Figure 2.20 commande directe des courants I_{dc} et I_{qc} par l'utilisation des régulateurs PI.

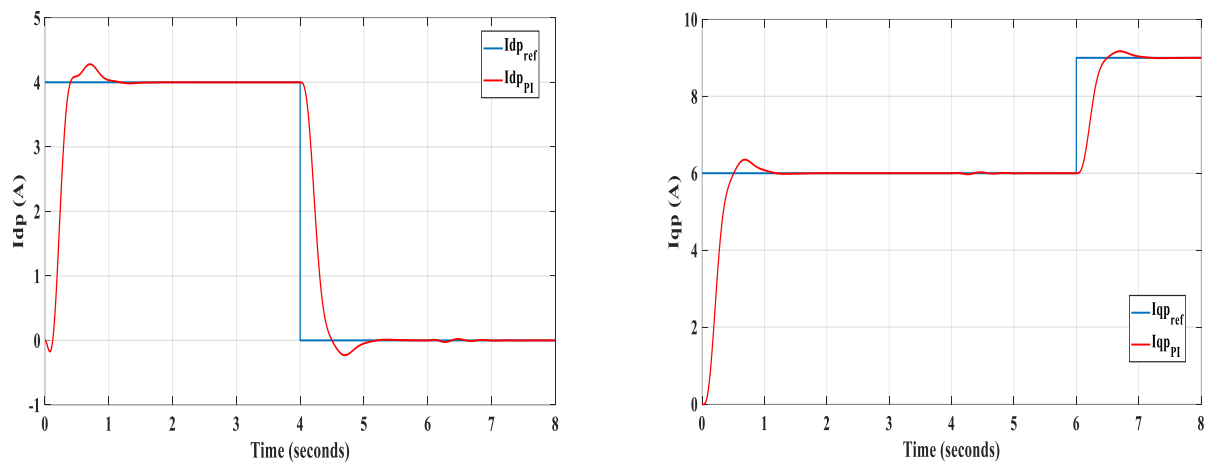


Figure 2.21 commande des courants I_{dp} et I_{qp} par l'utilisation du régulateurs PI.

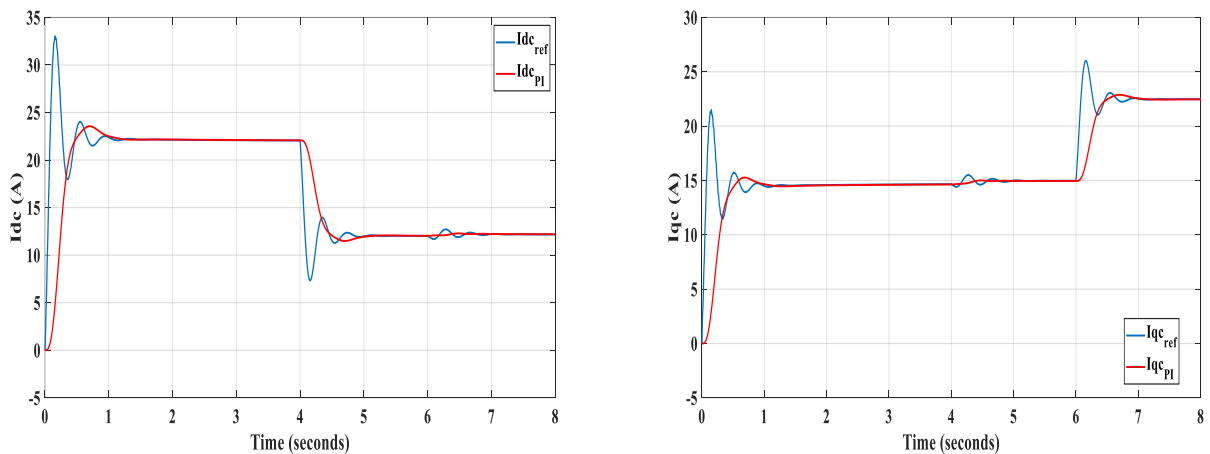


Figure 2.22 commande directe des courants I_{dc} et I_{qc} par l'intermédiaire des courants I_{dp} et I_{qp} .

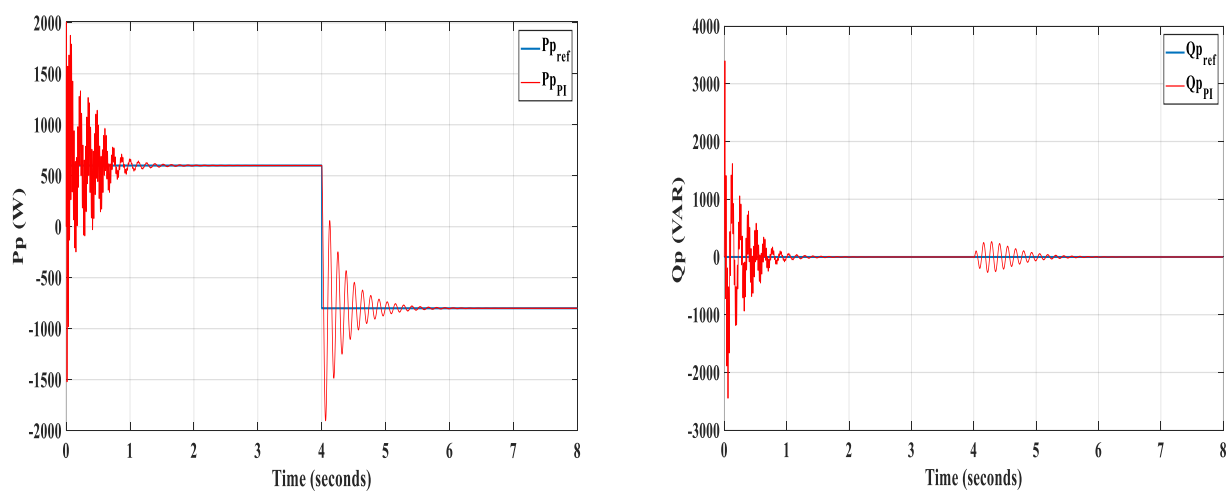


Figure 2.22 commande directe des courants I_{dc} et I_{qc} par l'utilisation du régulateurs PI.

La commande vectorielle de cette machine électrique présente certaines limitations, en particulier lors des transitions brusques des références. On peut observer des oscillations plus ou moins importantes au moment où les références changent de valeur. Plusieurs observations peuvent être faites à partir des figures de la commande :

- Pour la commande directe des courants I_{dc} et I_{qc} (sans passer par les courants I_{dp} et I_{qp}) avec un régulateur conventionnel PI, la commande donne généralement de bons résultats, mais y avoir des dépassements et des temps de réponse considérables.
- La même tendance se remarque pour la commande des courants I_{dp} et I_{qp} .
- Dans le troisième cas, où l'on régule I_{dc} et I_{qc} par I_{dp} et I_{qp} , les inconvénients deviennent plus évidents, surtout en phase transitoire. La méthode de commande ne parvient pas toujours à suivre efficacement la valeur de référence, entraînant un retard et un déphasage entre les valeurs commandées et les références. Cependant, elle se rétablit rapidement en régime permanent.
- Les puissances P_p et Q_p présentent également des oscillations significatives en phase transitoire, tout comme les autres grandeurs. De plus, des fluctuations peuvent se produire lors de la variation d'autres références.

En conclusion, la commande vectorielle traditionnelle donne de bons résultats et peut être fiable dans des applications où les changements de référence ne sont ni importants ni soudains. Cependant, dans les applications où les variations de référence sont brusques et importantes, cette méthode peut provoquer des déséquilibres et des oscillations dans les grandeurs commandées.

Il est essentiel de noter que dans les applications de production d'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne, la vitesse du vent peut varier de manière imprévisible et significative, ce qui rend cette méthode de commande traditionnelle inefficace. C'est là que les méthodes avancées de commande non linéaire interviennent, comme on le verra dans le chapitre suivant.

2.3 Modélisation de convertisseur bidirectionnel de puissance

L'entraînement des machines électriques à vitesse variable requiert la génération de tensions statoriques de fréquence et d'amplitude variables. Dans ce contexte, l'utilisation de la commutation est une approche naturelle [Maafa, 2011].

La principale fonction d'un convertisseur bidirectionnel de puissance AC-AC est de déterminer le sens de transfert de l'énergie électrique, permettant ainsi au système de consommer ou de générer de l'énergie électrique. De plus, il peut modifier la fréquence et la tension d'entrée à partir d'un réseau électrique dont la tension (valeur efficace) et la fréquence sont supposées constantes.

Dans cette thèse, ce convertisseur sera employé pour alimenter deux machines. Il servira à alimenter l'enroulement de commande EC de la machine MADASB et également à alimenter la MSAP (Machine Synchrone à Aimants Permanents) du système de stockage inertiel d'énergie. Ces convertisseurs ont la même structure et configuration, leur différence réside uniquement dans leur puissance. Par conséquent, un modèle mathématique unique sera utilisé pour les décrire, valable pour les deux.

Il existe plusieurs types de convertisseurs bidirectionnels qui peuvent être utilisés pour accomplir cette tâche, parmi lesquels figurent le cyclo-convertisseur, le convertisseur matriciel et le convertisseur Buck to Buck (convertisseur du côté du réseau - filtre - convertisseur du côté de la machine). Ce dernier type (illustré dans la figure 2.23) a été choisi pour deux raisons :

- Le véritable apport de cette thèse réside dans le domaine de la commande des machines électriques, c'est pourquoi le choix s'est porté sur le convertisseur le plus largement reconnu et utilisé.
- De plus, il s'agit du convertisseur le plus facile à commander, offrant ainsi les résultats les plus satisfaisants et efficaces.

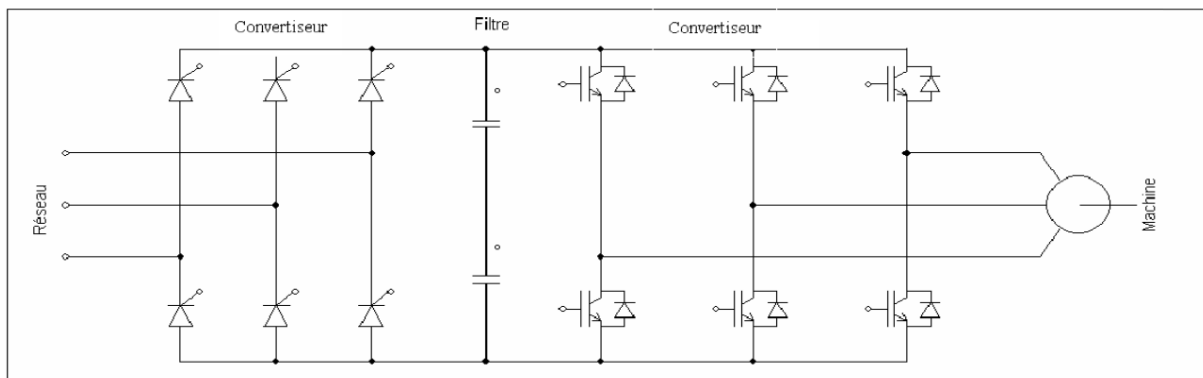


Figure 2.23 Structure générale d'alimentation d'une machine alternative.

Comme mentionné précédemment, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur bidirectionnel pour alimenter simultanément les deux machines électriques. L'installation sera donc

configurée selon le schéma illustré dans la figure ci-dessous, comprenant un unique convertisseur côté réseau partagé ainsi qu'un seul bus continu qui sera connecté à deux convertisseurs côté machines.

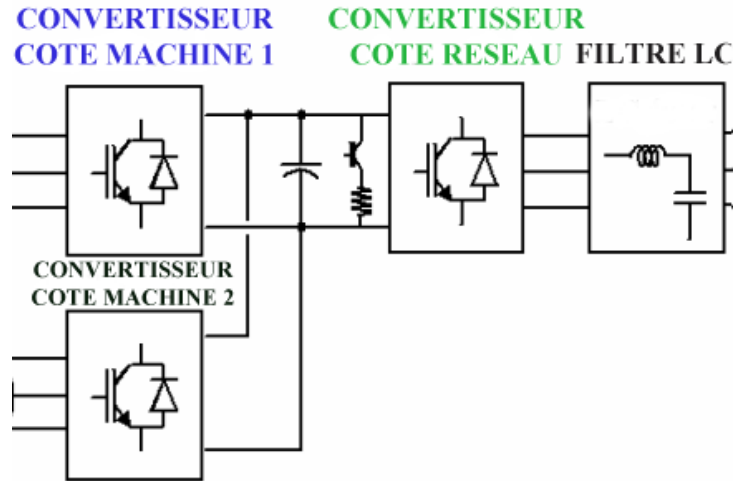


Figure 2.24 L'ensemble des convertisseurs de puissance.

2.3.1 Modèle d'onduleur

Lorsque l'on parle du modèle mathématique de l'onduleur, on fait référence au modèle mathématique des convertisseurs numérotés 1, 2 et 3. Au cours de cette modélisation mathématique, on utilise des hypothèses simplificatrices, notamment les suivantes [Seguier & Bausiere, 1995] [SEGUIER, 1999] :

- On considère que tous les interrupteurs de puissance sont idéaux.
- On suppose que la chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable par rapport à la tension d'alimentation, qui est de l'ordre de quelques centaines de volts.

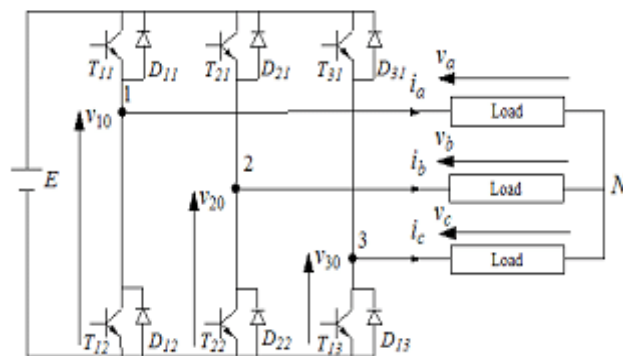


Figure 2.25 Structure d'onduleur triphasé à deux niveaux.

Chaque interrupteur est symbolisé par une paire transistor-diode (figure 2.26) et est modélisé par deux états distincts définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1: \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé} \\ 0: \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

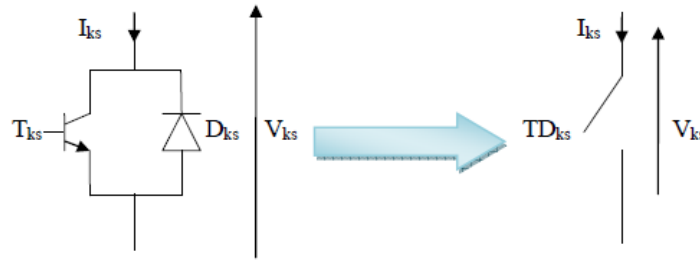


Figure 2.26 Interrupteur bidirectionnel parfait équivalent de la paire diode-transistor.

Les interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire.

Avec : $S_i + \overline{S_i} = 1$ et $i = 1...3$. On peut écrire la relation de Chasles pour les trois tensions en prenant en considération le point fictif "o" :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{aN} + V_{No} \\ V_{bo} = V_{bN} + V_{No} \\ V_{co} = V_{cN} + V_{No} \end{cases} \quad 2.25$$

Avec :

- V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont des tensions d'entrée de l'convertisseur c'est à dire des tensions continues ;
- "N" l'indice du point neutre du côté alternatif (côté machine) ;
- V_{No} la tension fictive entre le neutre de la machine et le point fictif d'indice "o".

Les tensions simples V_{aN} , V_{bN} et V_{cN} forment un système triphasé équilibré, donc :

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad 2.26$$

La substitution d'Eq 2.25 dans l'Eq 2.26 donne :

$$V_{No} = \frac{1}{3}(V_{aN} + V_{bN} + V_{cN}) \quad 2.27$$

En remplaçant l'Eq 2.27 dans l'Eq 2.25, finalement on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad 2.28$$

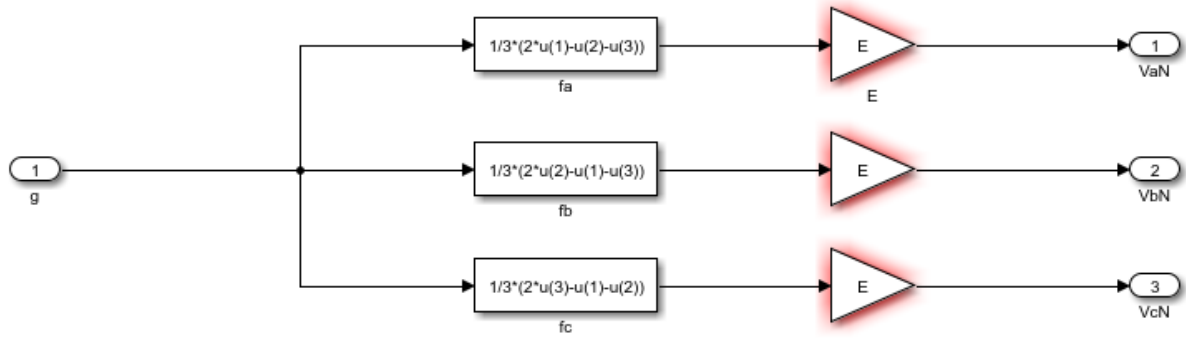


Figure 2.27 Modèle SIMULINK® d'onduleur.

2.3.2 Modèle du bus continu

Le système illustré dans la figure 2.1 comprend un système inertiel de stockage d'énergie couplé à un générateur éolien. Le lien entre ces deux systèmes se fait par le biais d'un bus continu. La figure 2.28 présente en détail ce bus continu, qui est représenté par le condensateur C auquel sont connectés tous les bus continus des convertisseurs électroniques de puissance. Chaque convertisseur a un impact sur le circuit en modifiant le courant qu'il fournit au condensateur ou qu'il prélève de celui-ci [Cimuca, 2005].

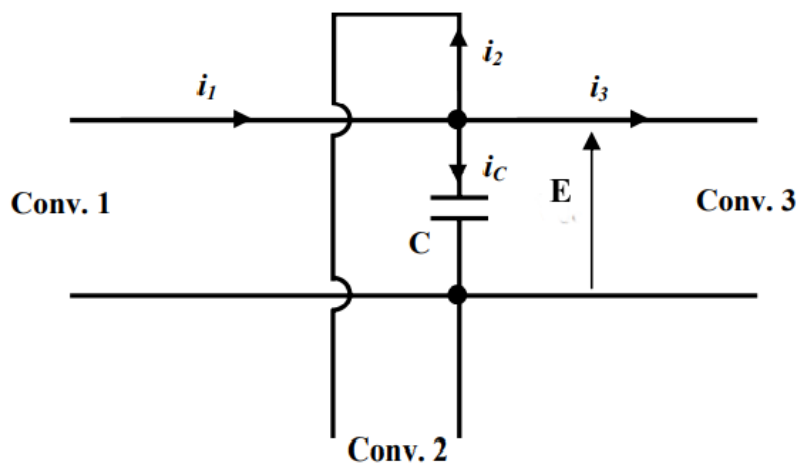


Figure 2.28 Bus à courant continu [Cimuca, 2005].

Les directions des courants de la figure 2.28 ont été définies dans le cas où seule l'éolienne fournit de l'énergie au bus à courant continu. En d'autres termes, la charge n'a pas besoin de toute l'énergie produite par l'éolienne, et c'est le système de stockage d'énergie SSE qui absorbe l'excès d'énergie générée. Les courants circulant dans le bus à courant continu ont un impact direct sur la valeur de la tension du bus continu, notée E. À partir de la figure précédente, on peut formuler l'équation suivante :

$$i_c = i_1 - i_2 - i_3 \quad 2.29$$

La tension E est une fonction du courant i_c :

$$\begin{cases} i_c = C \frac{dE}{dt} \\ E = E_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c \cdot dt \end{cases} \quad 2.30$$

Avec :

- C la capacité du condensateur ;
- E_0 est la tension initiale de bus.

A partir de ces équations, on a réalisé le schéma de la figure 2.29, où est modélisé le bus continu.

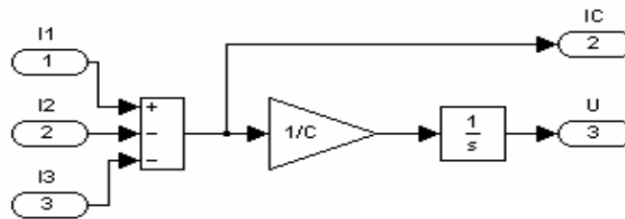


Figure 2.29 Modèle SIMULINK® de bus continu.

La tension E revêt une grande importance dans la régulation d'ensemble du système de car tous les convertisseurs électroniques de puissance agissent sur elle via les courants des bus continus. Pour expliquer ce concept, la valeur de la tension E dépend des courants i_1 et i_2 . Si le générateur produit plus d'énergie, la tension E augmente car l'excès d'énergie est accumulé dans le condensateur. En revanche, si le générateur ne peut pas fournir toute l'énergie demandée par la charge, celle-ci puise dans le condensateur pour combler le déficit, ce qui fait baisser la tension E.

Cependant, notre objectif est de maintenir la tension E à une valeur de référence constante, et c'est le rôle du SSE d'assurer cette régulation. En d'autres termes, le SSE stocke l'énergie électrique en surplus et la restitue lorsque cela est nécessaire [Cimuca, 2005].

Contrairement aux autres systèmes, la commande est essentielle dans l'évaluation et la validation du modèle du convertisseur de puissance. Étant donné que les méthodes de commande n'ont pas encore été discutées et qu'un chapitre entier leur est consacré, le processus de validation du modèle mathématique sera reporté jusqu'à ce que ce chapitre soit abordé.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a traité des modèles mathématiques complets de l'ensemble du processus de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique tel que la turbine, la machine MADASB et le convertisseur de puissance. Chaque modèle mathématique a été individuellement testé et validé grâce à des simulations.

Maintenant que tous ces systèmes et modèles mathématiques ont été validés par les simulations, on pourra aborder les méthodes de commande de ces systèmes dans le chapitre suivant.

Références

- [Beghdadi & Kouzi, 2022] Beghdadi, M., & Kouzi, K. (2022). Novel fully sensorless synergetic control of brushless doubly fed induction machine integrated in wind energy conversion system driven by fuzzy-based HCS MPPT algorithm. *Wind Engineering*, 47(2), 385-407. <https://doi.org/10.1177/0309524x221130723>
- [Cimuca, 2005] Cimuca, G. (2005). *Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens* [Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille]. <http://www.theses.fr/2005ENAM0027>
- [Maafa, 2011] Maafa, A. (2011). *Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence* [Thèse de magister, Université de Batna]. <http://eprints.univ-batna2.dz/1320/1/inj%20MAAFA%20AMAR.pdf>
- [Poza, 2003] Poza, F. (2003). *Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble]. <https://theses.hal.science/tel-00385804/document>
- [Seguier, 1999] SEGUIER, G. (1999). *Electronique de puissance, les fonctions de base et leurs principales applications* (7 Edition). DUNOD.
- [Seguier & Bausiere, 1995] Seguier, G., & Bausiere, R. (1995). *Les convertisseurs de l'Electronique de puissance : la conversion DC-AC* (Lavoisier, Vol. 4).
- [Serhoud, 2015] SERHOUD, H. (2015). *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone sans balais à double alimentations* [Thèse de doctorat, Université de Biskra]. <http://dspace.univ-eloued.dz/handle/123456789/8388>
- [Soetedjo et al., 2011] Soetedjo, A., Lomi, A., & Mulayanto, N. W. P. (2011). Modeling of wind energy system with MPPT control. Dans *International Conference on Electrical Engineering and Informatics* (p. 1-6). <https://doi.org/10.1109/iceei.2011.6021836>
- [Tir, 2014] Tir, Z. (2014). *Contribution à l'Étude d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais en vue de son Appl* [Thèse de doctorat, Université de Batna]. http://theses.univ-batna.dz/index.php/theses-en-ligne/doc_download/4368-contribution-a-letude-dune-machine-asynchrone-a-double-alimentation-sans-balais-en-vue-de-son-appl
- [Wang & Chang, 2004] Wang, Q., & Chang, L. (2004). An Intelligent Maximum Power Extraction Algorithm for Inverter-Based Variable Speed Wind Turbine Systems. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 19(5), 1242-1249. <https://doi.org/10.1109/tpel.2004.833459>

**CHAPITRE III: LA
COMMANDE ROBUSTE
NON LINEAIRE DU
SYSTEM DE
CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE**

Table des matières

Introduction	67
3.1 Notion sur la commande non linéaire	67
3.2 La commande synergétique	70
3.2.1 Généralité sur la notion de synergie	70
3.2.2 Etat de l'art de commande synergétique.....	70
3.2.3 Le principe de la commande synergétique	71
3.2.4 Les avantages de la commande synergétique	72
3.2.5 La conception de la commande synergétique.....	73
3.2.6 Etude de la stabilité de commande synergétique.....	75
3.3 La commande de la turbine par une hybride MPPT	76
3.3.1 L'hybride TSR-Synergétique MPPT	76
3.3.2 Simulation de la commande de la turbine.....	79
3.3.2.1 Simulation de la turbine sans MPPT	80
3.3.2.2 Simulation de la turbine avec l'hybride TSR-synergétique MPPT	80
3.4 La commande synergétique de la MADASB.....	81
3.4.1 La conception du régulateur du courant I_c	83
3.4.2 La conception du régulateur du courant I_p	87
3.4.3 La régulation de puissances active P_p et réactive Q_p	91
3.4.4 La commande du couple électromagnétique	93
3.4.5 La commande du convertisseur de puissance par MLI vectorielle.....	94
3.4.5.1 La modulation vectorielle (SVM)	94
3.4.5.2 Le principe de la modulation vectorielle	94
3.4.5.3 L'algorithme de MLI vectorielle pour un onduleur a deux niveaux	95
3.5 Simulations et discussions	99
3.5.1 Réglage et l'évaluation de variation de paramètres du régulateurs synergétiques	99
3.5.2 Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique de vitesse de MADASB	100
3.5.3 Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique du courant I_{dc}	102
3.5.4 Comparaison de la performance de régulateurs synergétiques et régulateurs PI conventionnels	103
3.5.5 Simulation de la commande synergétique de puissances, couple et vitesse de la MADASB	104
3.5.5.1 La commande de puissances active et réactive P_p et Q_p	104
3.5.5.2 La commande du couple de la MADASB.....	107
3.5.5.3 La commande de la vitesse de la MADASB.....	107
3.5.6 Evaluation de robustesse de la commande synergétique.....	108
3.5.7 Intégration de la MADASB commandée par la commande synergétique dans un éolien avec hybrides MPPT algorithmes.....	111
Conclusion.....	116

Introduction

Après avoir examiné l'état actuel des connaissances et effectué une modélisation mathématique complète du système dans son ensemble, il est maintenant temps de se pencher sur les méthodes de commande de ce système. Cette étude se concentrera sur les systèmes de commande séquentiel, en commençant par la turbine éolienne et en se terminant par le convertisseur de puissance. La gestion du système inertielle de stockage d'énergie fera l'objet d'un chapitre distinct.

La première étape consistera donc à commander la turbine afin de maximiser l'extraction d'énergie cinétique du vent en utilisant des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Une fois que la méthode de commande de la turbine aura déterminé la vitesse et le couple de référence, on utilisera ce couple pour réguler le générateur électrique "MADASB" afin qu'il fonctionne à la vitesse de référence. En même temps, cette commande gèrera la puissance réactive produite ou consommée par le générateur.

La commande du générateur MADASB nécessitera l'alimentation de l'électronique de commande avec une tension de sortie variable en termes d'intensité et de fréquence, grâce à l'utilisation du convertisseur de puissance. On va donc étudier la méthode de commande de ce convertisseur, connue sous le nom de "commande rapproché", qui génère les tensions de référence requises.

Pour toutes les méthodes de commande mentionnées précédemment, à l'exception de la commande du convertisseur de puissance côté machine, on mettra en œuvre une technique de commande avancée, non linéaire et relativement récente, appelée "commande synergétique".

3.1 Notion sur la commande non linéaire

Contrairement à la commande linéaire, la commande non linéaire implique un régulateur dont la relation et les coefficients ne suivent pas une forme linéaire. Cette approche présente l'avantage d'améliorer la stabilité, la robustesse et les performances générales du système de commande.

Il existe diverses méthodes de commande non linéaire qui ont été développées, notamment :

- **Commande Adaptative** : Cette méthode vise à ajuster le système de commande pour qu'il s'adapte aux nouvelles ou aux conditions changeantes, de manière à ce que le comportement de la commande demeure conforme à ces circonstances.
- **Commande Prédictive** : Elle repose sur l'utilisation d'un modèle dynamique du processus au sein du contrôleur en temps réel, permettant d'anticiper le comportement futur du système. Cette méthode a été initialement développée par J. Richalet en 1978 [Richalet et al., 1978].
- **Backstepping** : Cette approche relativement récente pour les systèmes non linéaires permet, de manière séquentielle et systématique, de déterminer la loi de commande du système en choisissant une fonction de Lyapunov. Elle consiste à considérer certaines variables d'état comme des commandes virtuelles et à concevoir des lois de commande intermédiaires [Chaouch & Naït-Saïd, 2006] [Slotine & Li, 1991] [Benaskeur, 2000].
- **Commande par Mode Glissant** : Pendant longtemps, la commande par mode glissant a été la méthode la plus courante et étudiée en détail. Elle se caractérise par une loi de commande basée sur la commutation de fonctions des variables d'état, créant ainsi une variété ou une hypersurface de glissement. Son objectif est d'ajuster la dynamique du système pour qu'elle corresponde à celle définie par l'équation de l'hypersurface.

Lorsque l'état du système reste sur cette hypersurface, il entre en régime glissant. À ce stade, il devient insensible aux perturbations extérieures et aux variations de paramètres, tant que les conditions du régime glissant sont maintenues [Kazmierkowski & Sobczuk, 2002] [Utkin, 1992] [Laribi et al., 2023].

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état du système sur l'hypersurface de glissement et à la faire commuter autour de celle-ci à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'à atteindre le point d'équilibre, où le phénomène de glissement se produit.

La figure 3.1 illustre la forme générale d'une commande à structure variable.

$$\begin{cases} U_i = U_{\max} \rightarrow si \rightarrow S_i(x) > 0 \\ U_i = U_{\min} \rightarrow si \rightarrow S_i(x) < 0 \end{cases} \quad 3.1$$

Avec : U_i ($i=1,...,m$) : les composantes du vecteur de commande.

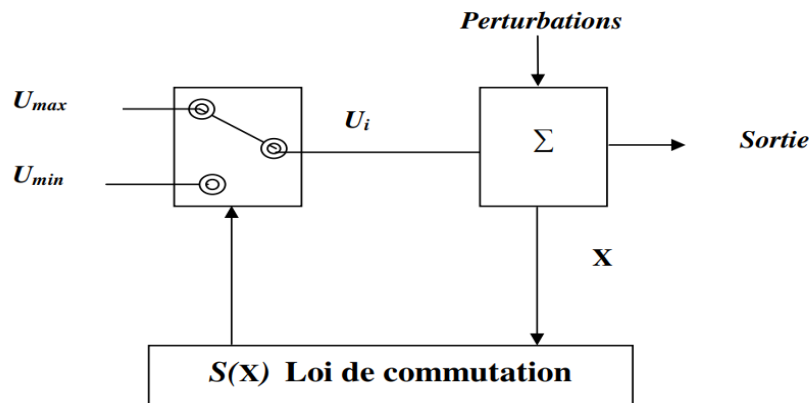


Figure 3.1. Principe de la commande par mode glissant.

Nonobstant sa renommée, son utilisation généralisée, ses performances solides et son efficacité, la commande par mode glissant est entachée d'un inconvénient majeur qui peut représenter un obstacle dans certaines situations : le phénomène de broutement (chattering). Ce phénomène survient en raison de la nature discontinue de la commutation de l'organe de commande [Fan & Yu, 2011] [Neila & Tarak, 2011], impliquant une commutation infinie entre les structures de commande, en particulier au niveau de l'onduleur. Cette commutation infinie est impossible à réaliser avec des composants réels et peut perturber le bon fonctionnement du système global [Utkin, 1992].

Pour remédier à cet inconvénient, d'importants efforts ont été déployés, mais souvent au détriment de la robustesse et des performances du système. Des tentatives antérieures pour résoudre le problème de chattering ont consisté à modifier la structure de base de l'organe de commande afin de rendre la réponse du système plus douce et moins violente. Cela a conduit à la création de plusieurs variantes de la commande, telles que la commande par mode glissant à plusieurs rampes, la commande par mode glissant intégrale, la commande par mode glissant terminal et de plus haut ordre [Utkin, 1992] [Komurcugil, 2012] [Abderrezek et al., 2016].

Cependant, ces dernières années, une nouvelle approche de commande a été proposée pour résoudre radicalement ce problème de chattering en modifiant la loi fondamentale de commutation de la commande par mode glissant. Cette approche est connue sous le nom de "commande synergétique".

3.2 La commande synergétique

3.2.1 Généralité sur la notion de synergie

La synergie implique une collaboration ou un travail conjoint de plusieurs éléments pour obtenir un effet global plus important et meilleur que ce qui serait obtenu si chaque élément travaillait individuellement. Un exemple concret de synergie se trouve dans le domaine de la physiologie humaine, où différents muscles interagissent pour accomplir un mouvement spécifique, ce qui est connu sous le nom de synergie musculaire. Par exemple, les muscles deltoïdes, pectoraux et triceps coopèrent lors du mouvement de poussée, ce qui serait beaucoup plus difficile si chaque muscle travaillait de manière indépendante.

Le concept de synergie trouve également des applications dans divers domaines et disciplines, notamment en pharmacie, où plusieurs composés sont combinés dans un médicament ou dans différents médicaments pour traiter une maladie. Il est également utilisé en économie, en industrie et dans d'autres domaines pour décrire les avantages qui découlent de la collaboration et de la coopération entre différentes parties ou éléments.

3.2.2 Etat de l'art de commande synergétique

La synergétique, un terme d'origine grecque signifiant "travailler ensemble vers un objectif commun", représente un domaine interdisciplinaire de recherche initié par H. Haken en 1969. En ce qui concerne la commande synergétique d'un système, cela renvoie à la manière dont les différents éléments d'un système sont coordonnés pour atteindre un but commun. Cette approche de commande est fréquemment employée dans des contextes impliquant des systèmes complexes, comme les systèmes de commande de processus industriels, la navigation aérienne, ou encore la sécurité informatique.

Dans le domaine de la commande des systèmes physiques, la notion de commande synergétique a été introduite pour la première fois par A. Kolesnikov et G. Veselov en l'an 2000, comme décrit dans leurs travaux [Kolesnikov & Veselov, 2000] et [Kolesnikov et al., 2000]. Ils ont proposé de remédier au phénomène de chattering en modifiant la loi de commutation discontinue caractéristique de la commande par mode glissant. Leur approche consiste à utiliser une équation dynamique d'évolution pour guider le système vers des attracteurs (manifolds) spécifiques, plutôt que de simplement le maintenir sur une surface de glissement.

Récemment, la commande synergétique a gagné une reconnaissance significative au sein de la communauté de la commande robuste, et elle a suscité l'intérêt de partenaires industriels. Son succès repose en grande partie sur son application réussie dans le domaine de l'électronique de puissance ainsi que dans diverses applications industrielles, telles que la gestion de la charge des batteries.

3.2.3 Le principe de la commande synergétique

Certaines méthodes avancées, comme les techniques de linéarisation ou la commande par modes glissants, ont permis aux concepteurs de résoudre certains problèmes de non-linéarité, mais la complexité multi connectée et multidimensionnelle reste difficile à surmonter. Cette situation a poussé les chercheurs à explorer d'autres approches plus efficaces, notamment la commande synergétique.

La commande synergétique peut être vue comme un ensemble de méthodes analytiques [Ni et al., 2014]. Elle repose sur le même principe de base que la commande par mode glissant, qui consiste à guider un système vers un attracteur souhaité avec une dynamique spécifiée par le concepteur à l'aide d'une loi de commande continue. Cependant, la commande synergétique se distingue par son efficacité, car elle parvient à atteindre l'état désiré du système sans le problème du chattering, qui est caractéristique de la commande par mode glissant.

La clé de l'efficacité de cette méthode de commande réside dans la manière dont le système parvient à l'état d'équilibre souhaité. Alors que la commande par mode glissant agit en orientant le système vers l'état d'équilibre en utilisant une surface de glissement avec une commutation discontinue entre deux valeurs, $U_{\max}$ et $U_{\min}$ (comme illustré dans la figure 3.1), la commande synergétique adopte une approche différente qui permet d'éviter le chattering.

La commande synergétique guide le système vers le point d'équilibre en utilisant des manifolds grâce à l'application d'équations d'évolution dynamique continues de la forme suivante :

$A \frac{dX}{dt} + BX = 0$ (figure 3.2), Ainsi, on garantit la convergence vers la solution optimale sans

aucun problème de chattering.

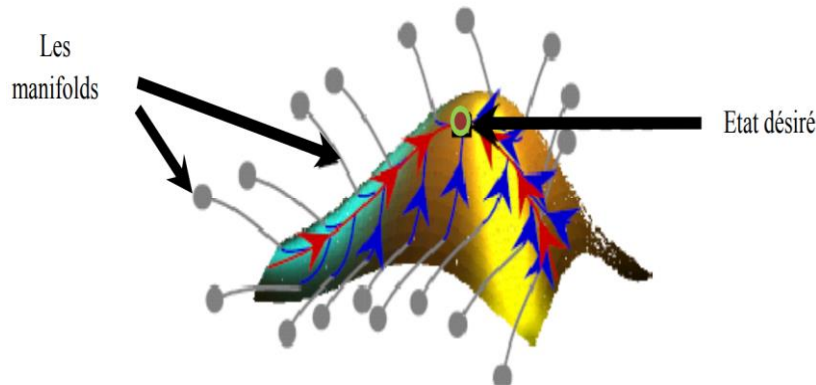


Figure 3.2 Orientation de système vers point d'équilibre par des manifolds.

Un autre aspect essentiel qui distingue la commande synergétique réside dans sa dépendance à la coopération de multiples facteurs pour commander un système donné. Dans ce cadre, plusieurs facteurs interagissent les uns avec les autres pour réguler une variable unique, créant ainsi un effet global supérieur à ce que chaque facteur individuel pourrait accomplir seul.

En établissant des relations entre ces facteurs au sein d'un canal de commande et en appliquant des lois d'évolution dynamique à ces relations, la commande synergétique permet de réduire la dimensionnalité du système. Cela signifie que le système est commandé par un nombre réduit de variables, simplifiant ainsi les calculs et accélérant le processus de commande, ce qui améliore l'efficacité globale du système.

Pour illustrer cela plus clairement, prenons un exemple où on souhaite commander deux grandeurs, A et B, d'un système via deux canaux de commande. Chacune de ces grandeurs dépend de trois variables. En utilisant des méthodes de commande classiques, la dimension du système de commande serait de $[6 \times 6]$, ce qui est assez complexe. Cependant, en utilisant la commande synergétique et en établissant une seule relation entre les trois variables pour chaque canal de commande, on réduit les dimensions du système à $[2 \times 2]$. Cela simplifie considérablement la commande tout en maintenant des performances optimales.

3.2.4 Les avantages de la commande synergétique

En résumé, la commande synergétique présente deux avantages distincts par rapport à d'autres méthodes de commande non linéaires :

- **Convergence rapide de la commande :** La commande synergétique permet une convergence rapide du système vers l'état désiré, ce qui signifie que le système atteint rapidement sa condition de travail optimale.
- **Évolution dynamique continue du système :** Contrairement à d'autres approches, la commande synergétique assure une évolution douce et continue du système vers l'état désiré. Cela élimine le phénomène de chattering, généralement causé par des commutations discontinues dans d'autres méthodes de commande.

De plus, un autre avantage significatif est la capacité de réduire les dimensions du système commandé. Cette réduction dimensionnelle simplifie considérablement la commande en minimisant la complexité des calculs, ce qui se traduit par une réponse plus rapide et plus stable du système.

Notez que dans tout ce qui est à venir, toute grandeur suivie d'un astérisque (*) indique qu'il s'agit d'une valeur de référence.

3.2.5 La conception de la commande synergétique [Beghdadi & Kouzi, 2022]

Tout système non linéaire d'ordre n peut être exprimé sous la forme de l'équation suivante :

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad 3.2$$

Où :

- x : est le vecteur des variables d'état ;
- u : est le vecteur des entrées ;
- t : est le temps.

On a en général quatre étapes dans la conception de la commande synergétique :

1. La sélection de la macro-variable

La macro-variable Ψ_s est une variable globale qui résulte d'une combinaison simple ou d'une relation linéaire entre les variables d'état du système. Cette approche permet d'ajuster la grandeur à commander en utilisant ces variables. Par exemple, si on a une grandeur à commander, appelée A , qui dépend de deux variables d'état, x et y , on peut établir une relation entre ces deux variables, telle que $\Psi_s = \alpha x + \beta y$. Ainsi, au lieu de commander deux variables distinctes (x et y), on peut concentrer sur une seule variable de commande (Ψ_s).

L'objectif principal de la commande synergétique est de guider le système pour qu'il suive le manifold où $\Psi_s = 0$, ce qui permet d'atteindre l'état d'équilibre souhaité.

2. Définir de la loi de commande continue

La loi de commande continue se présente sous la forme d'une équation d'évolution dynamique. Elle est utilisée pour ramener le système à son point d'équilibre lorsque l'erreur entre la consigne et la valeur mesurée de la grandeur à commander dépasse les limites d'une précision préalablement spécifiée dans le cahier des charges. Cette équation dynamique peut être formulée comme suit :

$$T\dot{\Psi}_s + \varphi(\Psi_s) = 0 \quad 3.3$$

Avec :

- T : est un paramètre de commande qui affecte les performances de la commande surtout la stabilité comme on le verra plus tard ;
- φ : est une fonction de macro-variable Ψ_s .

Le choix de la fonction φ doit être effectué avec une grande précaution afin de garantir à la fois la précision et la stabilité de la commande. Cette sélection doit répondre à deux conditions fondamentales :

- $\varphi(0) = 0$;
- $\varphi(\Psi_s) \cdot \Psi_s > 0$.

La manière la plus simple d'assurer ces deux conditions précédentes consiste à sélectionner la fonction φ de telle manière qu'elle soit identique à la macro-variable elle-même, c'est-à-dire que $\varphi(\Psi_s) = \Psi_s$. En conséquence, l'équation précédente (Eq 3.3) peut être reformulée de la manière suivante :

$$T\dot{\Psi}_s + \Psi_s = 0 \quad 3.4$$

3. L'écriture de l'équation Eq 3.4 en fonction d'équation Eq 4.2

L'équation précédente Eq 3.4 peut être réécrite sous la forme :

$$T \frac{\dot{\Psi}_s}{\dot{x}} \dot{x} + \Psi_s = 0 \quad 3.5$$

Lorsque on remplace l'équation 3.2 par l'équation 3.5, on obtient :

$$T \frac{\dot{\Psi}_s}{\dot{x}} f(x, u, t) + \Psi_s = 0 \quad 3.6$$

4. Calcul de vecteur des entrées u

À partir de l'équation 3.6, on peut calculer le vecteur des entrées u^* qui est la solution assurant les performances désirées du système à commander selon la relation :

$$u^* = g(x, \Psi_s, T, t) \quad 3.7$$

3.2.6 Etude de la stabilité de commande synergétique

Dans cette section, on abordera la stabilité de la commande synergétique en utilisant la méthode directe de Lyapounov. Le principe fondamental de la méthode directe de Lyapunov repose sur l'idée que si l'énergie totale d'un système se dissipe continuellement, alors le système finira par converger vers un point d'équilibre et s'y maintiendra. La méthode directe de Lyapunov implique deux étapes essentielles :

Tout d'abord, on doit choisir une fonction scalaire appropriée, appelée fonction de Lyapunov [Hahn, 1967]. Cette fonction joue un rôle crucial dans l'analyse de la stabilité.

Ensuite, on doit évaluer la dérivée temporelle de cette fonction le long de la trajectoire du système. Si cette dérivée diminue au fil du temps le long de la trajectoire du système, alors cela signifie que l'énergie du système se dissipe, et le système finira par atteindre son point d'équilibre [Pukdeboon, 2011].

Mathématiquement, si on choisit une fonction scalaire de Lyapunov V et que sa dérivée temporelle est négative le long de la trajectoire du système (c'est-à-dire que $dV/dt < 0$), alors le système convergera inévitablement vers son point d'équilibre et y restera.

En ce qui concerne la commande synergétique, si on choisit la fonction $\phi(\Psi_s) = \Psi_s$ comme fonction de Lyapunov, alors on peut exprimer ceci comme suit : Si $d\Psi_s/dt < 0$, alors le système de commande synergétique convergera vers son point d'équilibre et y restera. Cette analyse de la stabilité permet de comprendre comment la commande synergétique assure la stabilité du système dans le contexte spécifique de cette étude.

Concernant la commande synergétique, si on choisit la fonction $\phi(\Psi_s) = \Psi_s$ comme une fonction de Lyapunov, donc :

$$\begin{cases} V = \Psi_s \\ \dot{V} = \dot{\Psi}_s \end{cases} \quad 3.8$$

Par la substitution d'Eq 3.8 dans l'Eq 3.4 on trouve :

$$T\dot{V} + \Psi_s = 0 \Leftrightarrow \dot{V} = -\frac{\Psi_s}{T} \Leftrightarrow V\dot{V} = \Psi_s \cdot \left(-\frac{\Psi_s}{T}\right) = -\frac{\Psi_s^2}{T}$$

Lorsque on fixe le paramètre de commande T à une valeur positive, cela signifie que le terme $\frac{\Psi_s^2}{T}$ est toujours positif, tandis que le produit $V\dot{V}$ est toujours négatif. En d'autres termes, une valeur positive de T garantit une stabilité de la commande.

3.3 La commande de la turbine par une hybride MPPT

L'efficacité des éoliennes et la quantité d'énergie tirée du vent dépendent principalement de l'algorithme MPPT intégré à ces éoliennes. Cet algorithme joue un rôle essentiel dans la conversion optimale de l'énergie éolienne en énergie électrique en maintenant le coefficient de puissance C_p à son niveau maximal et le plus stable possible, ce qui permet d'extraire la puissance maximale de l'énergie cinétique du vent. Comme mentionné précédemment, ces algorithmes se divisent en deux catégories principales : ceux avec asservissement de vitesse et ceux sans asservissement de vitesse.

Cependant, en attendant de disposer d'un algorithme de référence, il est important de comparer les performances de l'algorithme en cours de développement avec un algorithme déjà établi. C'est grâce à cet algorithme de référence que on peut évaluer l'efficacité et les performances de l'algorithme qu'on propose. Étant donné qu'on est actuellement dans la section traitant des algorithmes avec asservissement de vitesse, il est logique de choisir l'algorithme 'TSR MPPT' comme point de référence [Pao & Johnson, 2009].

3.3.1 L'hybride TSR-Synergétique MPPT

Le principe de la TSR est assez simple : il implique l'utilisation de la valeur du rapport de pointe optimal (tip speed ratio) λ_{opt} , fournie par le fabricant ou obtenue à partir de simulations, ainsi que la mesure de la vitesse du vent à l'aide d'un anémomètre. Ces informations sont utilisées pour déterminer la vitesse de référence qui permettra d'exploiter au maximum la puissance éolienne disponible.

Dans cet algorithme hybride qui combine la TSR MPPT classique avec une approche de commande synergétique, il existe deux étapes principales :

- Calcul de la vitesse de référence du générateur Ω^* en utilisant λ_{opt} et la vitesse du vent mesurée v :

$$\Omega^* = \frac{\lambda_{opt} G \cdot v}{R} \quad 3.9$$



Figure 3.3 Bloc de TSR sous SIMULINK®.

- À l'aide d'un régulateur synergétique, le couple de référence C^*_{em} est calculé en se basant sur la vitesse de référence de la turbine Ω^* .

1. La sélection de la macro-variable

La macro-variable de ce régulateur synergétique Ψ_{ss} sera choisi comme une relation **PI** pour être :

$$\begin{cases} \Psi_{ss} = k_1 (\Omega^* - \Omega) + k_2 \int (\Omega^* - \Omega) dt \\ \dot{\Psi}_{ss} = k_1 (\dot{\Omega}^* - \dot{\Omega}) + k_2 (\Omega^* - \Omega) \end{cases} \quad 3.10$$

Avec:

- k_1 et k_2 : sont des paramètres de commande influencent principalement les performances, en particulier la précision.

2. Définir de la loi de commande continue

En remplaçant Ψ_{ss} dans l'Eq 3.4, on trouvera :

$$T_1 \left(k_1 (\dot{\Omega}^* - \dot{\Omega}) + k_2 (\Omega^* - \Omega) \right) + k_1 (\Omega^* - \Omega) + k_2 \int (\Omega^* - \Omega) dt = 0 \quad 3.11$$

3. L'écriture de l'équation Eq 3.11 en fonction d'équation dynamique du générateur

Par la substitution de l'Eq 2.20 dans l'Eq 3.11, on a :

$$T_1 \left(k_1 \left(\frac{C_{em}^* - C_r - f\Omega}{J} - \dot{\Omega} \right) + k_2 (\Omega^* - \Omega) \right) + k_1 (\Omega^* - \Omega) + k_2 \int (\Omega^* - \Omega) dt = 0 \quad 3.12$$

4. Calcul de vecteur des entrées u

En fin, on obtient :

$$C_{em}^* = -\frac{k_2 J}{k_1} (\Omega^* - \Omega) - \frac{J}{T_1} (\Omega^* - \Omega) - \frac{k_2 J}{T_1 k_1} \int (\Omega^* - \Omega) dt + C_r + f\Omega + J\dot{\Omega} \quad 3.13$$

Et ce C_{em}^* est le couple de référence nécessaire pour la commande du générateur MADASB.

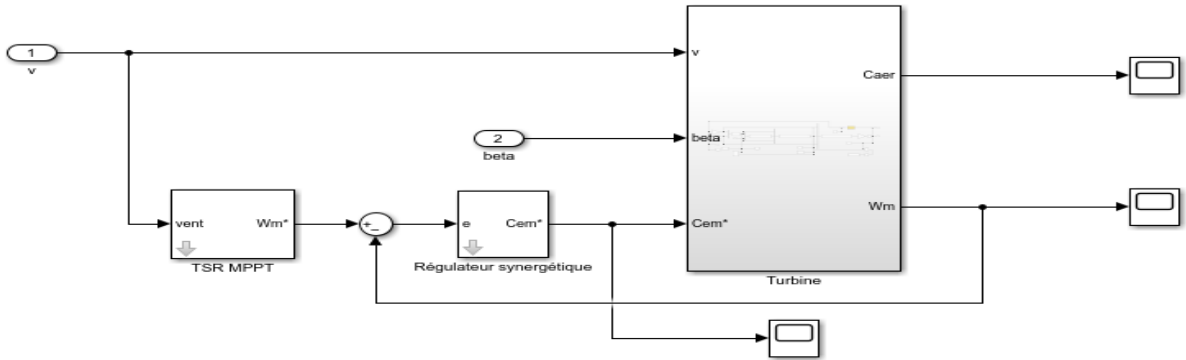


Figure 3.4 Schéma global de la commande hybride TSR-synergétique.

5. Simulation de régulateur synergétique de vitesse

Après avoir détaillé la conception du régulateur de vitesse, on fait une évaluation brusque de sa performance par la simulation selon le schéma de figure suivante :

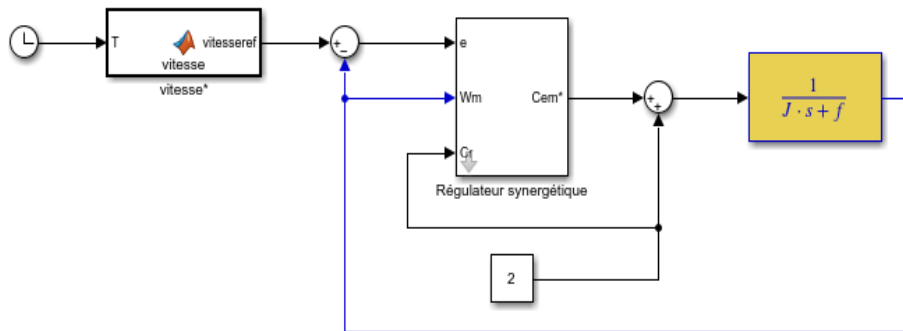


Figure 3.5 Schéma d'évaluation du régulateur synergétique sous MATLAB®.

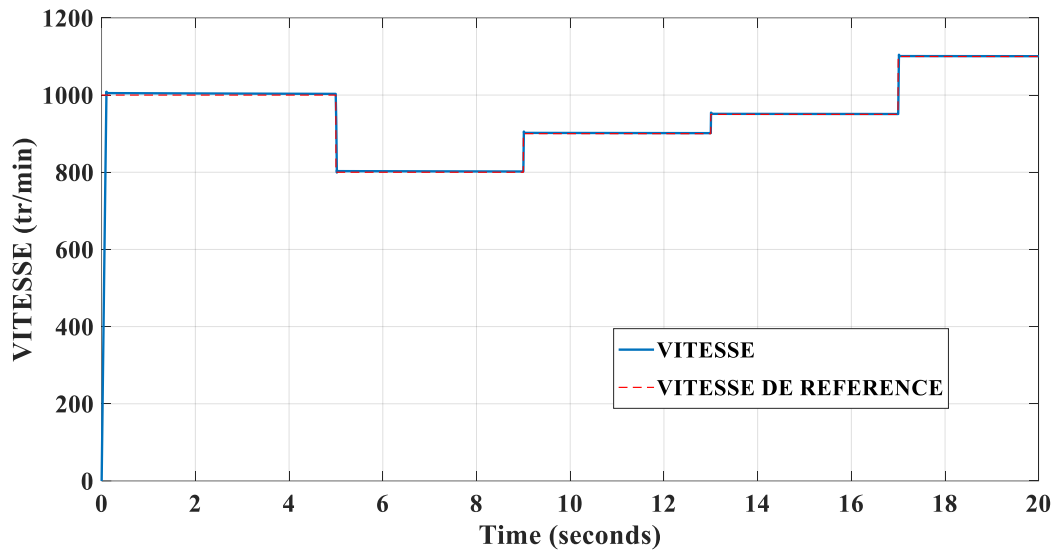


Figure 3.6 Vitesse avec $T_1=0.2$, $K_1=0.01$, $K_2=7$, $J=0.1$, $f=0.03$ et $C_r=2$.

Le régulateur synergétique produit des résultats très satisfaisants, où la vitesse de la machine, décrite par l'équation dynamique de la vitesse, suit sa référence avec une précision élevée, sans overshoot notable, et une erreur statique minime. Cette démonstration renforce la confiance dans l'intégration potentielle du régulateur dans le système, une fois qu'une expérimentation plus approfondie sera menée. Cependant, cette discussion sera reportée au chapitre suivant, après avoir exploré plus en détail la commande synergétique du MADASB.

Un autre aspect positif est l'absence totale de phénomène de chattering.

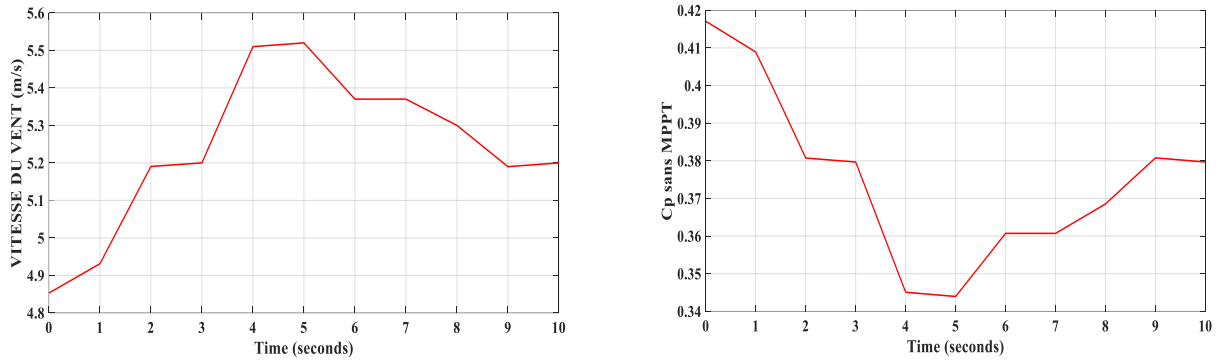
3.3.2 Simulation de la commande de la turbine

Après avoir discuté et élaboré tous les aspects relatifs à la commande des éoliennes, il est maintenant temps d'approuver cette régulation et d'analyser ses performances grâce à des simulations. On commencera par simuler la turbine équipée de l'algorithme hybride TSR-synergétique MPPT, puis on comparera les résultats obtenus avec ceux d'une turbine ne disposant pas de la MPPT.

Toutes les simulations de la turbine seront réalisées en utilisant le même profil de vent. Au moment de l'évaluation des algorithmes MPPT, et initialement le générateur sera représenté uniquement par l'équation dynamique de vitesse (Eq 2.16).

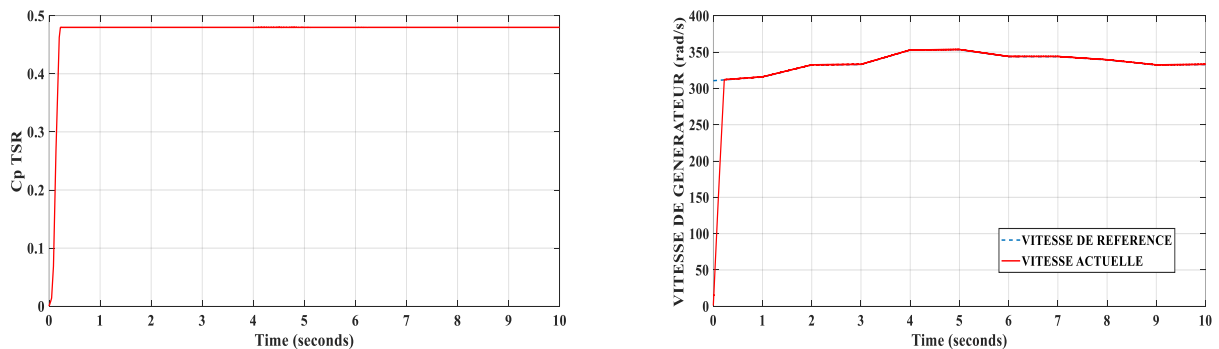
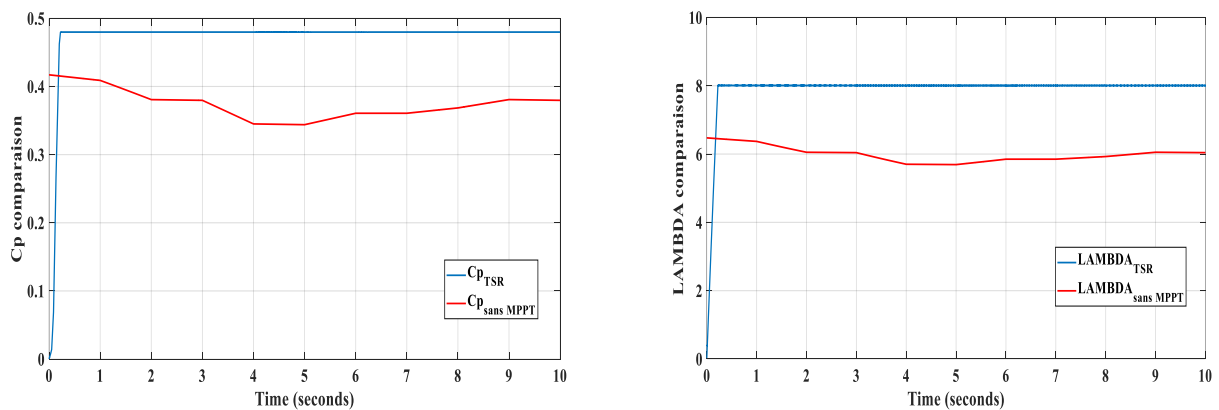
Les paramètres de la turbine et du MADASB resteront les mêmes que ceux présentés dans le chapitre précédent.

3.3.2.1 Simulation de la turbine sans MPPT

Figure 3.7 vitesse de vent et C_p -sans MPPT.

On remarque que le coefficient de puissance C_p n'est pas du tout stable, et qu'il évolue avec le changement de vitesse du vent, ce qui n'est pas idéal, car dans ce cas, la puissance prélevée sur l'énergie cinétique du vent n'est pas à sa valeur maximale, et elle diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent.

3.3.2.2 Simulation de la turbine avec l'hybride TSR-synergétique MPPT

Figure 3.8 C_p et la vitesse de la machine avec l'hybride TSR-synergétique MPPT.Figure 3.9 Comparaison de C_p et λ de l'hybride TSR-synergétique MPPT et sans MPPT.

Contrairement au premier scénario, dans le cas d'utilisation de l'algorithme TSR MPPT, le coefficient de puissance C_p demeure complètement stable et maintient une valeur constante, $C_{p_max}=0.48$, le long d'une certaine plage. La vitesse de référence varie en fonction des fluctuations de la vitesse du vent, augmentant avec une hausse de cette dernière et diminuant avec sa baisse. Cette variation est conforme à ce que l'on attend, contrairement au premier scénario où la vitesse de référence restait constante. La vitesse de la machine suit de manière précise la vitesse de référence, démontrant ainsi l'excellente performance du régulateur synergétique.

Lorsque on intègre la puissance aérodynamique de la turbine, on constate que l'énergie produite pendant la période de simulation est de 834.6 Joules pour le scénario avec l'algorithme TSR MPPT. Cette valeur dépasse largement l'énergie produite dans le premier cas sans MPPT, qui était de 651.5 Joules, soit une différence de 183.1 Joules en seulement 10 secondes. Il est clair que cette différence serait encore plus prononcée si la période de simulation était prolongée.

En comparant les valeurs de C_p et λ entre l'algorithme hybride TSR-synergétique MPPT et le cas sans MPPT, on constate que l'approche hybride TSR-synergétique excelle dans tous les aspects, que ce soit en termes de C_p ou même de λ , qui atteint sa valeur optimale de $\lambda_{opt}=8$.

3.4 La commande synergétique de la MADASB

Passons maintenant à la mise en œuvre de la commande synergétique de la MADASB, après avoir attribué au couple de référence de l'algorithme MPPT. La première étape du processus consiste à réguler les niveaux de courant d'excitation de la MADASB. Étant donné que le flux du stator est maintenu pratiquement constant grâce à la tension du réseau, il n'est pas nécessaire d'utiliser une consigne I_{dc} pour maintenir ce flux à une valeur constante. Cette liberté permet de commander la puissance réactive de l'EP [Kolesnikov et al., 2000]. Par conséquent, dans la chaîne de commande, on a choisi de réguler la puissance réactive de l'EP, notée ' Q_p '. Du fait de l'utilisation de cette machine électrique unique, cette puissance peut être commandée de différentes manières, que ce soit en permettant à la machine de l'absorber, de la produire, ou de la maintenir à zéro.

L'un des avantages principaux de la MADA et de la MADASB réside dans leur capacité à effectuer un découplage complet entre la commande de la puissance active P_p (couple-vitesse) et la puissance réactive Q_p . Ainsi, la commande de P_p et du couple C_{em} est géré par l' I_{qp} , tandis que la commande de Q_p est réalisée par l' I_{dp} . Ces courants sont, à leur tour, régulés

respectivement par I_{qc} et I_{dc} , qui sont eux-mêmes influencés par la tension de l'EC [Poza, 2003].

Le schéma de l'algorithme de commande est le suivant :

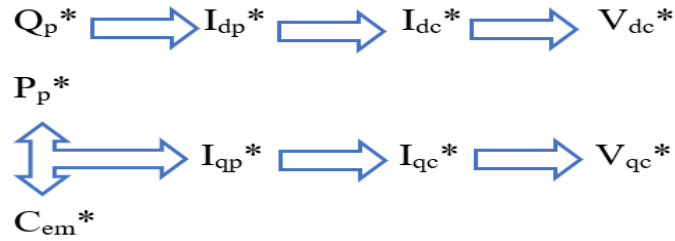


Figure 3.10 Hiérarchie de la commande synergétique de la MADASB.

Il existe deux canaux de commande, le premier étant réservé à Q_p , tandis que le second peut être configuré pour la commande de P_p , vitesse ou du couple C_{em} . Par la suite, tous les types de cas seront développés pour offrir toutes les options d'intégration de la machine dans le système éolien avec n'importe quel algorithme MPPT.

Il est remarquable de travailler avec un flux de l'EP orienté selon l'axe d, c'est-à-dire $\Psi_{dp} = \Psi_p$ et $\Psi_{qp} = 0$. Cela suit le même principe que la commande vectorielle classique de la MADASB proposée par Poza dans [Poza et al., 2009], simplifiant ainsi la commande tout en améliorant les performances. Cependant, avec la commande synergétique, même sans utiliser une commande à flux orienté, on peut toujours atteindre les performances requises, ce qui constitue un avantage remarquable de cette technique.

La commande synergétique conserve la même structure que la commande vectorielle classique, avec la principale différence résidant au niveau du régulateur. Dans la commande classique, les coefficients du régulateur sont fixes (commande linéaire à structure fixe), tandis que dans la commande synergétique, on travaille avec des régulateurs synergétiques, dont les coefficients sont variables (commande non linéaire à structure variable). En fin de compte, la commande synergétique équivaut à la commande vectorielle avec des régulateurs synergétiques.

Par la suite, l'algorithme de commande sera développé étape par étape, en commençant par la commande de la boucle de courant de l'EC, puis du courant de l'EP, suivi de la régulation de la puissance active et réactive, et enfin de la commande du couple de la machine.

3.4.1 La conception du régulateur du courant I_c

Le principal but de ce régulateur est d'atteindre les tensions de référence pour la commande en courant (EC), à savoir V_{dc}^* et V_{qc}^* .

A. La boucle d' I_{dc}

1. La macro-variable

Lorsqu'il s'agit de mettre en place une commande synergétique, la première étape consiste à sélectionner la macro-variable Ψ_{s-dc} , qui sera la suivante :

$$\begin{cases} \Psi_{s-dc} = k_3 (I_{dc}^* - I_{dc}) + k_4 \int (I_{dc}^* - I_{dc}) dt \\ \dot{\Psi}_{s-dc} = k_3 (\dot{I}_{dc}^* - \dot{I}_{dc}) + k_4 (I_{dc}^* - I_{dc}) \end{cases} \quad 3.13$$

Avec:

- k_3 et k_4 : sont des paramètres de la commande ;

2. L'équation dynamique

$$T_2 \dot{\Psi}_{s-dc} + \Psi_{s-dc} = 0 \quad 3.14$$

Où:

- T_2 : est un paramètre de la commande.

3. Calcul de dI_{dc}/dt

En remplaçant l'Eq 3.13 dans l'Eq 3.14, on a :

$$T_2 (k_3 (\dot{I}_{dc}^* - \dot{I}_{dc}) + k_4 (I_{dc}^* - I_{dc})) + k_3 (I_{dc}^* - I_{dc}) + k_4 \int (I_{dc}^* - I_{dc}) dt = 0 \quad 3.15$$

L'objectif actuel est d'exprimer les variables qui ne peuvent pas être mesurées directement en termes d'autres variables directement mesurées. Par conséquent, on cherche à représenter le courant rotorique, qui ne peut pas être mesuré directement, en fonction du courant du EP.

En se basant sur les équations de flux du EP, il est possible d'exprimer le courant rotorique en termes du flux et du courant du EP de la manière suivante :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{\Psi_p - L_p I_{dp}}{M_p} \\ I_{qr} = \frac{-L_p I_{qp}}{M_p} \end{cases} \quad 3.16$$

Ainsi, après la substitution du courant du rotor et la simplification de l'équation de tension du EC, il en résulte :

$$\dot{I}_{dc} = \frac{1}{L_c} \left[V_{dc} - R_c I_{dc} - G_{dc} (I_{dc}, I_{dp}, \Psi_p, I_{qc}, I_{qp}, \Omega, \omega_p, t) \right] \quad 3.17$$

Avec:

- G_{dc} : est le terme perturbateur de commande d' I_{dc} défini comme :

$$G_{dc} = \frac{M_c}{M_p} \dot{\Psi}_p - \frac{M_c L_p}{M_p} \dot{I}_{dp} - (\omega_p - (P_1 + P_2) \Omega) \left(L_c I_{qc} - \frac{M_c L_p}{M_p} I_{qp} \right) \quad 3.18$$

Ce terme est composé de trois termes :

- Le premier terme est nul car $\Psi_p = \text{ct}$;
- Le deuxième terme est négligeable ;
- Le troisième terme peut être mis en considération par action feedback.

L'un des avantages de la commande synergétique réside dans le fait que, même en négligeant les termes perturbateurs, le régulateur synergétique offre de bonnes performances et des résultats satisfaisants. Cela est possible grâce à la loi dynamique de commande qui garantit la convergence de l'état du système vers le point souhaité.

Donc :

$$\dot{I}_{dc}^* = \frac{1}{L_c} \left[V_{dc}^* - R_c I_{dc}^* - G_{dc} \right] \quad 3.19$$

4. Calcul de V_{dc}^*

On va négliger le terme perturbateur d'Eq 3.19 et par la substitution d'Eq 3.19 dans l'Eq 3.15, on trouve :

$$T_2 \left(k_3 \left(\frac{1}{L_c} [V_{dc}^* - R_c I_{dc}^*] - \dot{I}_{dc} \right) + k_4 (I_{dc}^* - I_{dc}) \right) + k_3 (I_{dc}^* - I_{dc}) + k_4 \int (I_{dc}^* - I_{dc}) dt = 0 \quad 3.20$$

D'après la simplification d'Eq 3.20 :

$$V_{dc}^* = \frac{L_c}{T_2 k_3} \left(-k_3 (I_{dc}^* - I_{dc}) - k_4 \int (I_{dc}^* - I_{dc}) dt \right) - \frac{L_c k_4}{k_3} (I_{dc}^* - I_{dc}) + R_c (I_{dc}^* - I_{dc}) + L_c \dot{I}_{dc} \quad 3.21$$

B. La boucle d'I_{qc}

Les étapes sont les mêmes que celles de la boucle précédente, et elles seront rapidement résumées sans entrer dans les détails.

1. La macro-variable

$$\begin{cases} \Psi_{s-qc} = k_3 (I_{qc}^* - I_{qc}) + k_4 \int (I_{qc}^* - I_{qc}) dt \\ \dot{\Psi}_{s-qc} = k_3 (\dot{I}_{qc}^* - \dot{I}_{qc}) + k_4 (I_{qc}^* - I_{qc}) \end{cases} \quad 3.22$$

2. L'équation dynamique

$$T_2 \dot{\Psi}_{s-qc} + \Psi_{s-qc} = 0 \quad 3.23$$

3. Calcul de dI_{qc}/dt

$$\dot{I}_{qc} = \frac{1}{L_c} \left[V_{qc} - R_c I_{qc} - G_{qc} (I_{qc}, I_{qp}, I_{dc}, I_{dp}, \Omega, \omega_p, t) \right] \quad 3.24$$

Avec:

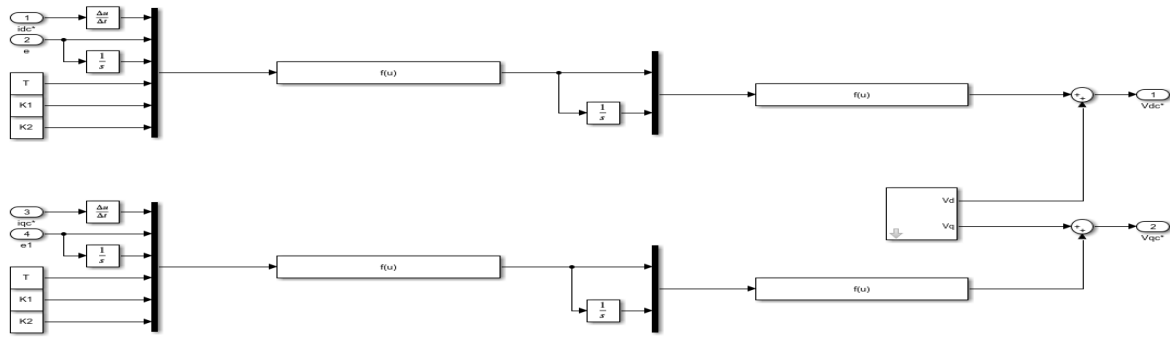
- G_{qc} : est le terme perturbateur de commande d'I_{qc} défini comme :

$$G_{qc} = -\frac{M_c L_p}{M_p} \dot{I}_{qp} - (\omega_p - (P_1 + P_2) \Omega) \left(L_c I_{dc} - \frac{M_c L_p}{M_p} I_{dp} - \frac{M_c}{M_p} \Psi_p \right) \quad 3.25$$

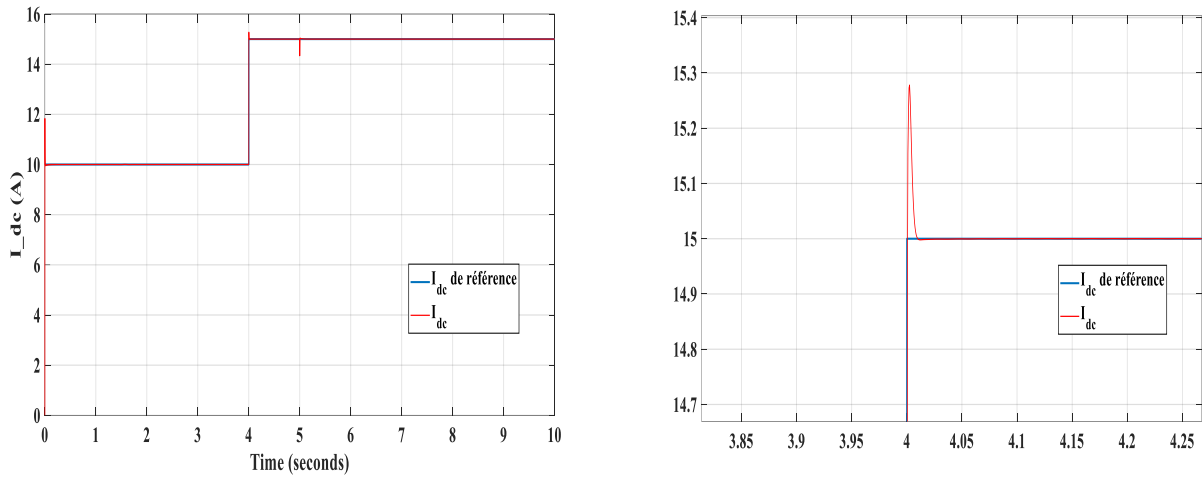
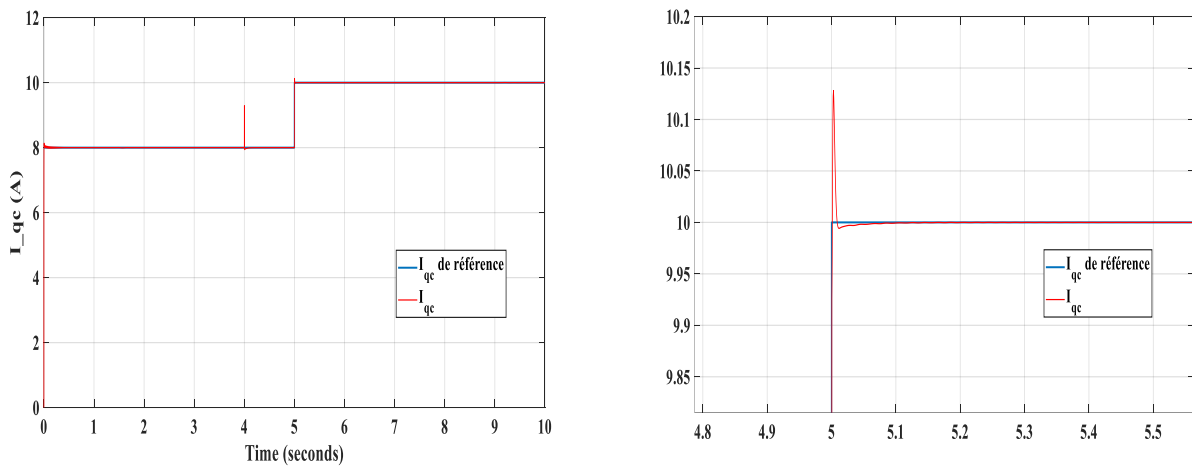
$$\dot{I}_{qc}^* = \frac{1}{L_c} \left[V_{qc}^* - R_c I_{qc}^* \right] \quad 3.26$$

4. Calcul de V_{qc}*

$$V_{qc}^* = \frac{L_c}{T_2 k_3} \left(-k_3 (I_{qc}^* - I_{qc}) - k_4 \int (I_{qc}^* - I_{qc}) dt \right) - \frac{L_c k_4}{k_3} (I_{qc}^* - I_{qc}) + R_c (I_{qc}^* - I_{qc}) - L_c \dot{I}_{qc} \quad 3.27$$

Figure 3.11 Schéma du régulateur synergétique du courant I_c .

C. Evaluation de performance du régulateur synergétique d' I_c par simulation

Figure 3.12 Le courant I_{dc} et sa référence, zoom ($3.8s < t < 4.3s$).Figure 3.13 Le courant I_{qc} et sa référence, zoom ($4.8s < t < 5.6s$).

Le régulateur synergétique, que ce soit pour le courant I_c ou la vitesse de la machine, offre d'excellents résultats avec des performances élevées. Sa précision est exceptionnelle, se traduisant par une erreur statique extrêmement faible. De plus, il présente un temps de réponse très court, permettant au courant d'atteindre sa référence en un temps très bref ($< 0.05s$). Bien qu'il y ait un léger dépassement, celui-ci reste relativement limité ($< 2\%$) et il n'y a pas de phénomène de chattering.

Il convient de noter que ce dépassement n'est pas préoccupant, d'autant plus que la simulation est effectuée avec un pas de temps, ce qui provoque des changements abrupts dans la référence de courant. Dans une utilisation dynamique réelle de la machine, le dépassement disparaît complètement, comme cela sera abordé dans le prochain régulateur et les simulations suivantes.

3.4.2 La conception du régulateur du courant I_p

Le but ici est d'obtenir les courants de référence du EC : I_{dc}^* et I_{qc}^* , qui seront les entrées du régulateur d' I_c .

A. La boucle d' I_{dp}

1. La macro-variable

$$\begin{cases} \Psi_{s-dp} = k_5 (I_{dp}^* - I_{dp}) + k_6 \int (I_{dp}^* - I_{dp}) dt \\ \dot{\Psi}_{s-dp} = k_5 (\dot{I}_{dp}^* - \dot{I}_{dp}) + k_6 (I_{dp}^* - I_{dp}) \end{cases} \quad 3.28$$

Avec:

- k_5 et k_6 : sont des paramètres de la commande ;

2. L'équation dynamique

$$T_3 \dot{\Psi}_{s-dp} + \Psi_{s-dp} = 0 \quad 3.29$$

Où:

- T_3 : est un paramètre de la commande.

3. Calcul de dI_{dp}/dt

$$T_3 (k_5 (\dot{I}_{dp}^* - \dot{I}_{dp}) + k_6 (I_{dp}^* - I_{dp})) + k_5 (I_{dp}^* - I_{dp}) + k_6 \int (I_{dp}^* - I_{dp}) dt = 0 \quad 3.30$$

$$\dot{I}_{dp} = \frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left[M_c \dot{I}_{dc} - \frac{R_r L_p}{M_p} + G_{dp} (I_{dc}, I_{dp}, \Psi_p, I_{qc}, I_{qp}, \Omega, \omega_p, t) \right] \quad 3.31$$

Avec:

- G_{dp} : est le terme perturbateur de commande d' I_{dp} défini comme :

$$\begin{cases} \sigma_p = 1 - \frac{M_p^2}{L_p L_r} \\ G_{dp} = \frac{L_r}{M_p} \dot{\Psi}_p - \frac{R_r}{M_p} I_{dp} - (\omega_p - P_1 \Omega) \left(L_c I_{qp} - \frac{L_r L_p \sigma_p}{M_p} I_{qc} \right) \\ \dot{I}_{dp}^* = \frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left(M_c \dot{I}_{dc}^* - \frac{R_r L_p}{M_p} \right) \end{cases} \quad 3.32$$

4. Calcul de I_{dc}^*

$$T_3 \left(k_5 \left(\frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left(M_c \dot{I}_{dc}^* - \frac{R_r L_p}{M_p} \right) - \dot{I}_{dp} \right) + k_6 (I_{dp}^* - I_{dp}) \right) + k_5 (I_{dp}^* - I_{dp}) + k_6 \int (I_{dp}^* - I_{dp}) dt = 0 \quad 3.33$$

$$I_{dc}^* = \frac{L_p L_r \sigma_p}{T_3 k_5 M_p} \left(-k_5 (I_{dp}^* - I_{dp}) - k_6 \int (I_{dp}^* - I_{dp}) dt \right) - \frac{L_p L_r \sigma_p k_6}{k_5 M_p} (I_{dp}^* - I_{dp}) + \frac{R_r L_p}{M_p} + \frac{L_p L_r \sigma_p}{M_p} \dot{I}_{dp} \quad 3.34$$

B. La boucle d' I_{qc}

1. La macro-variable

$$\begin{cases} \Psi_{s-qp} = k_5 (I_{qp}^* - I_{qp}) + k_6 \int (I_{qp}^* - I_{qp}) dt \\ \dot{\Psi}_{s-qp} = k_5 (\dot{I}_{qp}^* - \dot{I}_{qp}) + k_6 (I_{qp}^* - I_{qp}) \end{cases} \quad 3.35$$

2. L'équation dynamique

$$T_3 \dot{\Psi}_{s-qp} + \Psi_{s-qp} = 0 \quad 3.36$$

3. Calcul de dI_{qp}/dt

$$T_3 \left(k_5 (\dot{I}_{qp}^* - \dot{I}_{qp}) + k_6 (I_{qp}^* - I_{qp}) \right) + k_5 (I_{qp}^* - I_{qp}) + k_6 \int (I_{qp}^* - I_{qp}) dt = 0 \quad 3.37$$

$$\dot{I}_{qp} = \frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left[M_c \dot{I}_{qc} - \frac{R_r L_p}{M_p} + G_{qp} (I_{dc}, I_{dp}, \Psi_p, I_{qc}, I_{qp}, \Omega, \omega_p, t) \right] \quad 3.38$$

Avec:

- G_{qp} : est le terme perturbateur de commande d' I_{qp} défini comme :

$$\begin{cases} G_{qp} = -\frac{R_r}{M_p} I_{qp} - (\omega_p - P_1 \Omega) \left(L_c I_{dp} - \frac{L_r L_p \sigma_p}{M_p} I_{dc} \right) \\ \dot{I}_{qp}^* = \frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left(M_c \dot{I}_{qc}^* - \frac{R_r L_p}{M_p} \right) \end{cases} \quad 3.39$$

4. Calcul de I_{qc}^*

$$T_3 \left(k_5 \left(\frac{M_p}{L_p L_r \sigma_p} \left(M_c \dot{I}_{qc}^* - \frac{R_r L_p}{M_p} \right) - \dot{I}_{qp} \right) + k_6 (I_{qp}^* - I_{qp}) \right) + k_5 (I_{qp}^* - I_{qp}) + k_6 \int (I_{qp}^* - I_{qp}) dt = 0 \quad 3.40$$

$$I_{qc}^* = \frac{L_p L_r \sigma_p}{T_3 k_5 M_p} \left(-k_5 (I_{qp}^* - I_{qp}) - k_6 \int (I_{qp}^* - I_{qp}) dt \right) - \frac{L_p L_r \sigma_p k_6}{k_5 M_p} (I_{qp}^* - I_{qp}) + \frac{R_r L_p}{M_p} + \frac{L_p L_r \sigma_p}{M_p} \dot{I}_{qp} \quad 3.41$$

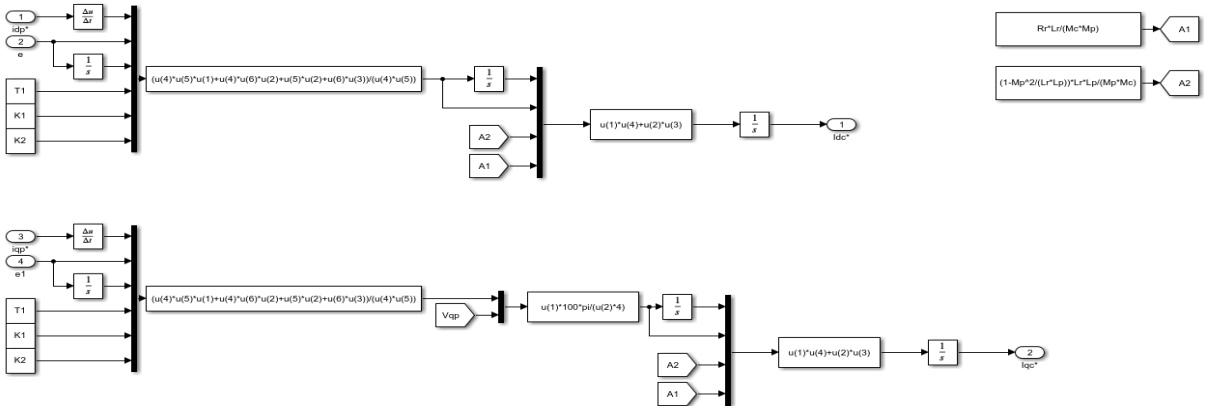


Figure 3.12 Schéma du régulateur synergetique du courant I_p .

C. Evaluation de performance du régulateur synergetique d' I_p par simulation

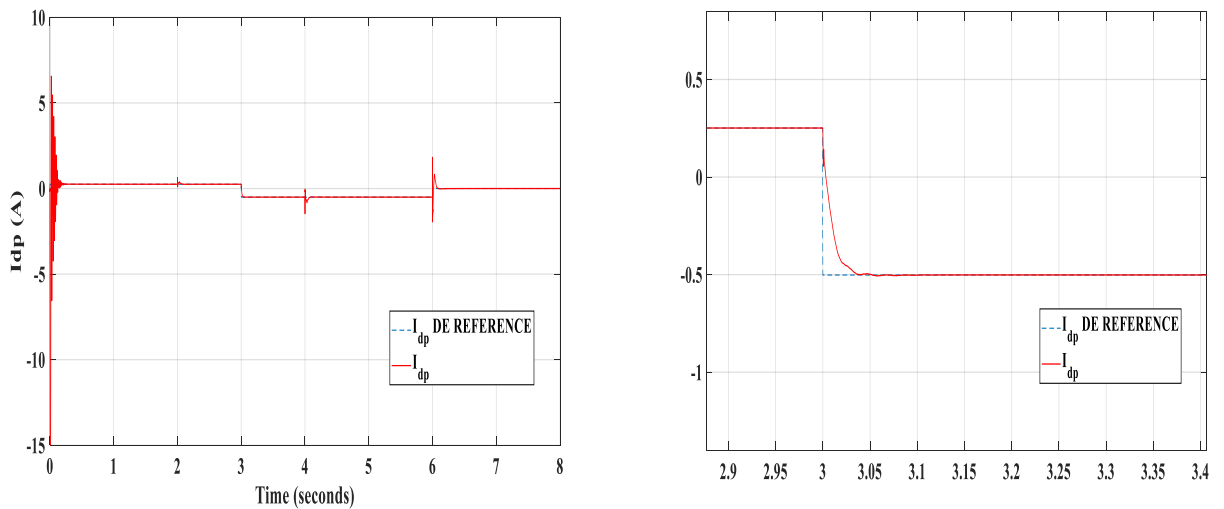
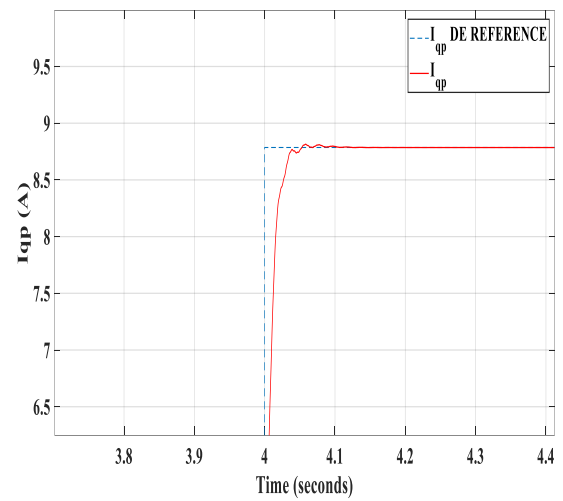
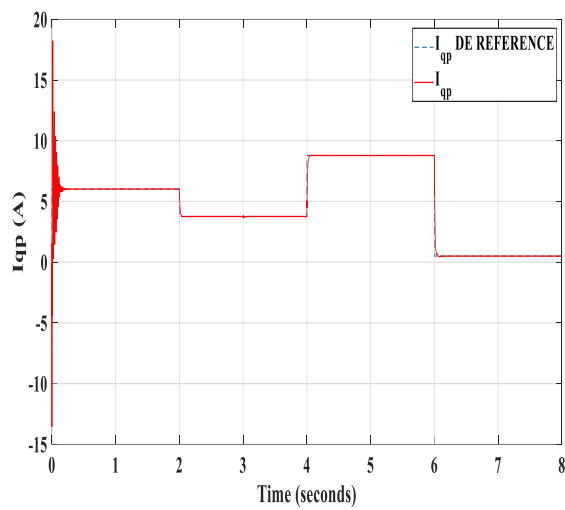
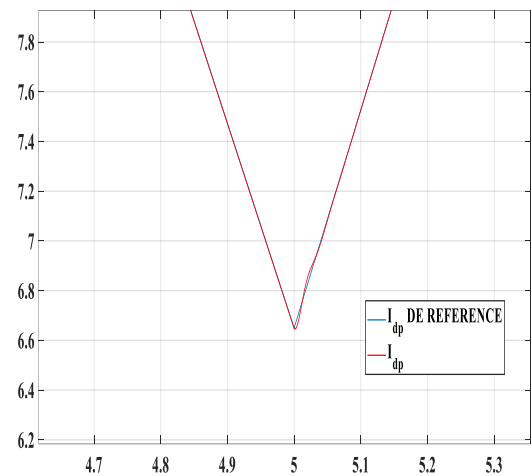
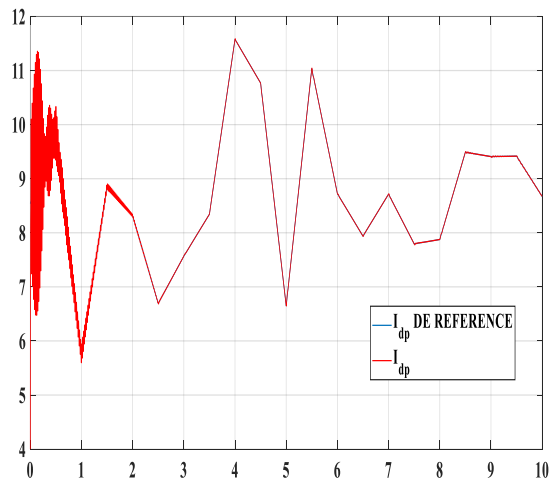
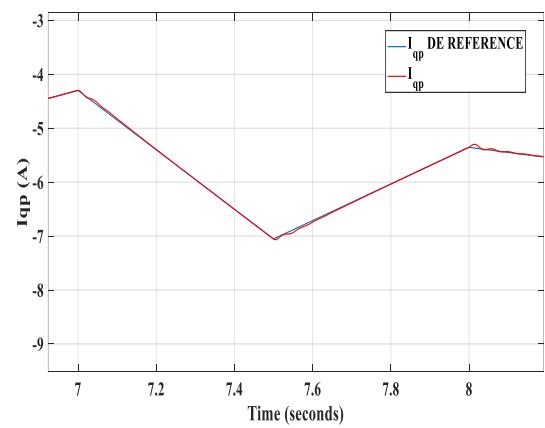
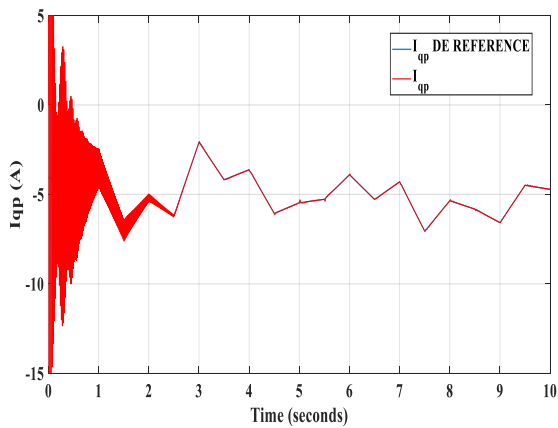


Figure 3.13 Le courant I_{dp} et sa référence (step), zoom ($2.8s < t < 3.45s$).

Figure 3.14 Le courant I_{qp} et sa référence (step), zoom ($3.7s < t < 4.45s$).Figure 3.15 Le courant I_{dp} et sa référence (variable), zoom ($4.6s < t < 5.4s$).Figure 3.16 Le courant I_{qp} et sa référence (variable), zoom ($6.9s < t < 8.2s$).

Étant donné que ce régulateur revêt une importance capitale dans toutes les simulations, il fait l'objet d'un traitement particulier. Il a été testé de deux manières différentes : tout d'abord, en utilisant un pas de référence où le changement est significatif et rapide, puis en utilisant un changement dynamique mais aléatoire à fréquence élevée.

Ce régulateur a livré des résultats prometteurs, surpassant même le régulateur du courant I_c . En effet, le courant I_p suit efficacement sa référence, affichant des performances élevées avec une précision extrême, sans aucun dépassement ni phénomène de chattering. La réponse du régulateur est très rapide et en douceur.

Il convient de noter qu'il existe de légères perturbations, mais elles demeurent très limitées et de courte durée sous forme d'impulsions au moment du changement de référence dans d'autres boucles de commande, en particulier dans la régulation d' I_{dp} . Cette situation est tout à fait naturelle, car bien que on ait une commande séparée "DPC", elle n'est pas totalement indépendante, car l' I_{qp} est toujours légèrement liée à l' I_{dp} , et vice versa. Cette liaison est évidente lors de l'utilisation d'un pas comme référence, mais lors de l'utilisation d'une référence avec un changement dynamique, les perturbations sont presque inexistantes.

3.4.3 La régulation de puissances active P_p et réactive Q_p

Contrairement à la situation précédente, l'obtention des courants de référence du EP est relativement simple en utilisant les puissances actives et réactives.

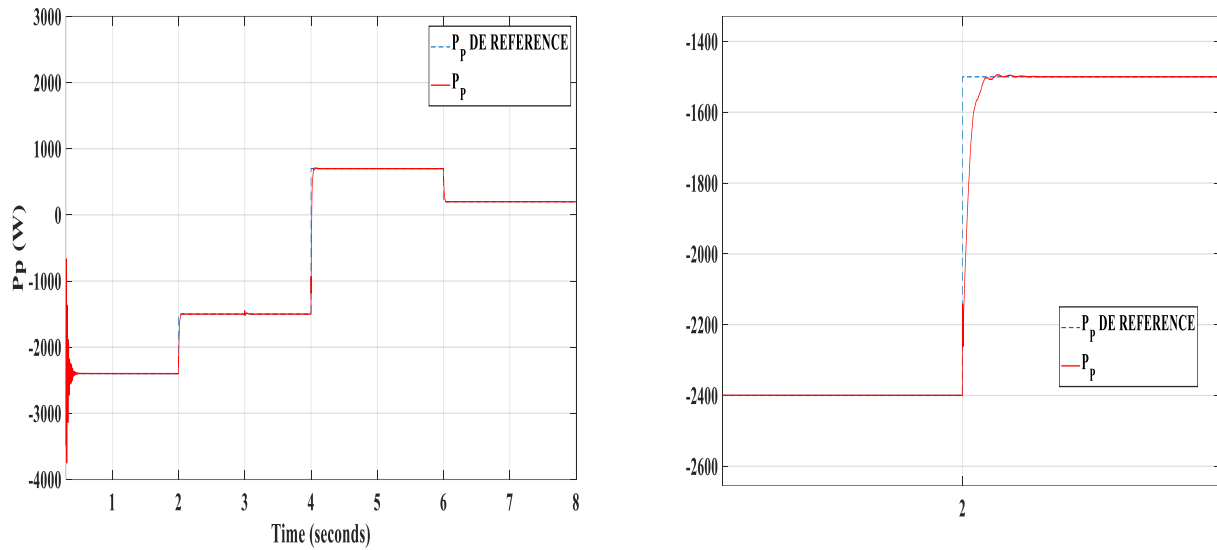
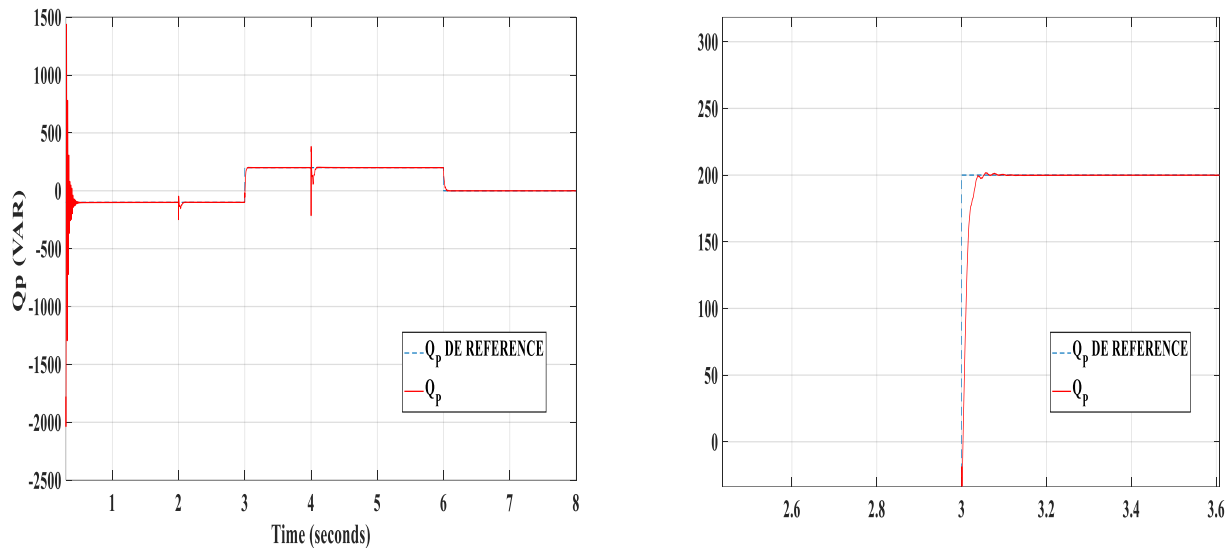
Donc, à partir d'Eq 2.22, on conclure :

$$\begin{cases} I_{dp}^* = \frac{Q_p^* - V_{dp} I_{qp}}{V_{qp}} \\ I_{qp}^* = \frac{P_p^* - V_{dp} I_{dp}}{V_{qp}} \end{cases} \quad 3.42$$

Si la MADASB est connectée à un réseau solide où ' $V_{qp}=0$ ', alors l'équation précédente peut être simplifiée de la manière suivante :

$$\begin{cases} I_{dp}^* = \frac{P_p^*}{V_{dp}} \\ I_{qp}^* = \frac{Q_p^*}{V_{dp}} \end{cases} \quad 3.43$$

A. Résultats de simulation

Figure 3.17 La puissance active P_p et sa référence, zoom ($1s < t < 3s$).Figure 3.18 La puissance réactive Q_p et sa référence, zoom ($2.4s < t < 3.6s$).

Comme prévu, les résultats de la régulation de puissance sont similaires à ceux du régulateur d' I_p , car ces puissances ne sont en fin de compte que des représentations du courant I_p . Les puissances suivent leurs références de manière efficace, avec une grande précision, et sans présenter de chattering ou de dépassement notable.

Ce constat est également valable pour le courant Q_p , car on observe des perturbations limitées sous forme d'impulsions lors du changement de la référence de puissance active.

Dans cette simulation, divers scénarios ont été testés pour la MADASB. En ce qui concerne la puissance active, la commande a été réalisée en utilisant des références à la fois négatives et positives, afin d'évaluer l'efficacité de la machine en tant que générateur ou moteur. En ce qui concerne la puissance réactive, la machine a été commandée pour être tour à tour productrice, consommatrice ou neutre en termes de puissance réactive.

3.4.4 La commande du couple électromagnétique

L'objectif ici est d'obtenir le courant de référence I_{qp}^* à partir du couple de référence C_{em}^* .

En calculant le courant I_c en fonction du courant I_p et en négligeant la dynamique des courants, on peut reformuler la formule du couple en fonction uniquement du courant et du flux du EP de la manière suivante [Neila & Tarak, 2011] :

$$C_{em}^* = (P_1 + P_2) \frac{\omega_p}{V_{qp}} I_{qp}^* + P_2 \frac{2R_r L_p}{M_p^2 (\omega_p - P_1 \Omega)} \Psi_{dp} I_{dp} - P_2 \frac{R_r}{M_p^2 (\omega_p - P_1 \Omega)} (L_p^2 I_{dp}^2 - \Psi_{dp}^2) \quad 3.44$$

Et de lui, il peut être obtenu l' I_{qp}^* :

$$I_{qp}^* = \frac{C_{em}^* V_{qp}}{(P_1 + P_2) \omega_p} + G_{qp}^* (I_{dp}, \Psi_{dp}, \Omega, \omega_p, t) \quad 3.45$$

Avec:

- G_{qp}^* : est le terme perturbateur qu'est comme les autres très petit et peut être négligé :

$$G_{qp}^* = \frac{V_{qp}}{(P_1 + P_2) \omega_p} \left[-P_2 \frac{2R_r L_p}{M_p^2 (\omega_p - P_1 \Omega)} \Psi_{dp} I_{dp} + P_2 \frac{R_r}{M_p^2 (\omega_p - P_1 \Omega)} (L_p^2 I_{dp}^2 - \Psi_{dp}^2) \right] \quad 3.46$$

A. Résultats de simulation

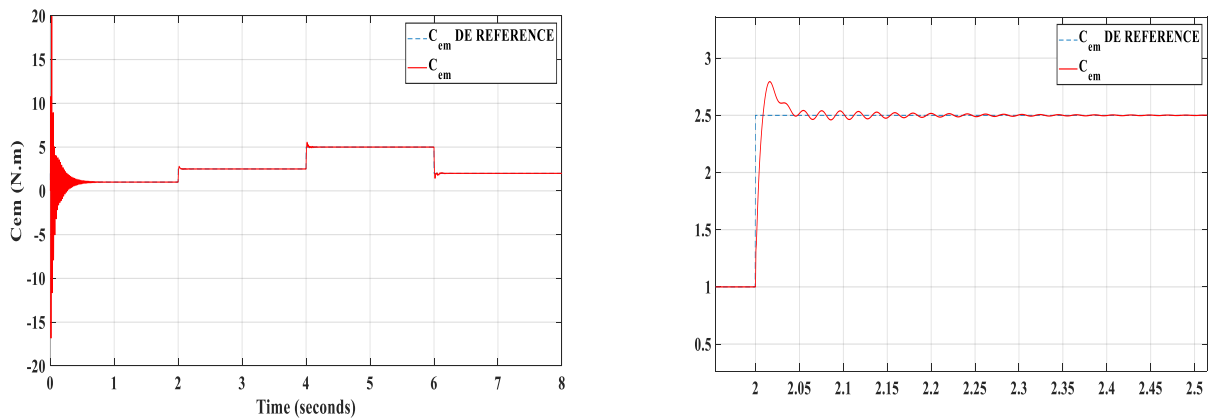


Figure 3.19 Le C_{em} et sa référence, zoom ($1.95 < t < 2.55$).

En ce qui concerne le couple électro-magnétique généré par la machine, il est bien régulé et suit efficacement sa référence avec une grande précision. Cependant, on observe quelques dépassements de courte durée, après quoi le couple revient rapidement à sa référence en moins de 0.05 seconde.

Ce problème peut être résolu en ajustant les paramètres de commande T_3 , K_5 et K_6 , mais toute modification doit être cohérente avec diverses considérations, notamment la vitesse de réponse, les oscillations et la précision de la régulation. Ces ajustements seront examinés en suivant.

3.4.5 La commande du convertisseur de puissance par MLI vectorielle

La commande pour les deux convertisseurs de puissance du côté de la machine (côté MADASB et côté machine de SSE) est la même et ils sont contrôlés de manière identique, ce qui signifie qu'une seule approche de commande peut être appliquée aux deux convertisseurs.

3.4.5.1 La modulation vectorielle (SVM)

La stratégie de modulation vectorielle, introduite par Der Broek et al. en 1988, repose sur la génération d'une séquence spécifique d'états pour l'onduleur. Cette modulation se fait en temps réel en tirant parti du fait qu'un vecteur peut représenter les trois tensions d'un système triphasé dont la somme est nulle.

La modulation vectorielle de l'onduleur, également appelée modulation de vecteur spatial, est particulièrement adaptée aux variateurs de vitesse triphasés qui n'ont pas de point neutre. La SVM (Space Vector Modulation) est une méthode de commande récemment développée qui s'avère particulièrement adaptée à la commande des moteurs asynchrones, se distinguant par une réduction significative des harmoniques dans les tensions générées. Cette technique de commande repose sur la transformation des variables triphasées en un système simplifié à deux coordonnées (α, β) . L'objectif de la commande vectorielle est de simplifier la complexité du modèle mathématique associé à la commande des machines électriques.

3.4.5.2 Le principe de la modulation vectorielle

Le principe de la SVM implique la reconstruction du vecteur de tension de référence V_{ref} à partir d'un ensemble de vecteurs de tension possibles, qui sont au nombre de n^3 , où n est le nombre de niveaux. Ainsi, pour deux niveaux, on a 8 vecteurs possibles, pour trois niveaux, on a 27. Chacun de ces vecteurs représente une combinaison de l'état des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, déterminant ainsi la tension de sortie.

Cette approche consiste à traiter le système triphasé de manière globale et à lui appliquer une transformation de Clarke ou de Concordia, en fonction du choix de conservation de puissance pour la première ou de conservation d'amplitude pour la seconde. Cela permet de le ramener dans le plan (V_α, V_β) . Dans ce plan, les tensions triphasées à générer pendant la période d'échantillonnage actuelle peuvent être représentées comme un unique vecteur. Bien que ce vecteur ne soit pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, on peut rechercher les trois configurations les plus proches (situées aux sommets et au centre de l'hexagone) et les appliquer successivement pendant une fraction appropriée de la période d'échantillonnage. Cela permet d'obtenir en valeur moyenne le vecteur recherché.

3.4.5.3 L'algorithme de MLI vectorielle pour un onduleur à deux niveaux

En utilisant l'équation 2.28, on peut déterminer les tensions aux bornes des charges. Pour obtenir ces tensions dans le repère α, β , on applique la transformation de Concordia. En ce qui concerne les huit vecteurs de commutation de l'onduleur, on dispose du tableau suivant :

Tableau 3.2 Les tensions possibles pour un onduleur de deux niveaux.

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
V_{an}	0	$+\frac{2}{3} \cdot E$	$+\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{2}{3} \cdot E$	$-\frac{E}{3}$	$+\frac{E}{3}$	0
V_{bn}	0	$-\frac{E}{3}$	$+\frac{E}{3}$	$+\frac{2}{3} \cdot E$	$+\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{2}{3} \cdot E$	0
V_{cn}	0	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{2}{3} \cdot E$	$-\frac{E}{3}$	$+\frac{E}{3}$	$+\frac{2}{3} \cdot E$	$+\frac{E}{3}$	0
V_α	0	$+\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot E$	$+\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot E$	$-\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot E$	$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot E$	$-\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot E$	$+\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot E$	0
V_β	0	0	$+\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E$	$+\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E$	0	$-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E$	$-\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E$	0

1. Transformation de système triphasé à système biphasé (α, β)

Pour déterminer le vecteur de référence, on doit transformer le système triphasé dans le plan (α, β) en utilisant la transformation de Concordia ou de Clarke :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad 3.47$$

Où :

- k est $2/3$ pour Clark et $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ pour Concordia.

2. Détermination de secteur

La détermination de secteur est facile à partir des tensions (V_α , V_β), on doit déterminer l'angle de vecteur de référence par rapport l'axe α qui est égale $\arctan(\beta/\alpha)$:

$$\begin{cases} 0^\circ < \text{angle} \leq 60^\circ \Rightarrow \text{secteur 1} \\ 60^\circ < \text{angle} \leq 120^\circ \Rightarrow \text{secteur 2} \\ 120^\circ < \text{angle} \leq 180^\circ \Rightarrow \text{secteur 3} \\ 180^\circ < \text{angle} \leq 240^\circ \Rightarrow \text{secteur 4} \\ 240^\circ < \text{angle} \leq 300^\circ \Rightarrow \text{secteur 5} \\ 300^\circ < \text{angle} \leq 360^\circ \Rightarrow \text{secteur 6} \end{cases} \quad 3.48$$

3. Calcul des temps d'application des états de l'onduleur T_1 et T_2

Dans ce plan, les vecteurs V_0 à V_7 définissent un domaine de tension (figure 3.20) à l'intérieur duquel doit se trouver le vecteur V_s .

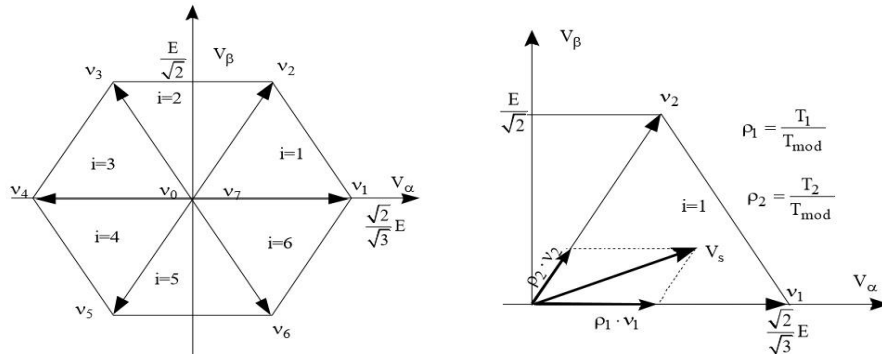


Figure 3.20 Hexagone de MLI vectorielle, calcul de temps d'application des états de l'onduleur.

On peut noter ici, comme c'est courant, que les vecteurs de tension correspondant aux différents états de commutation de l'onduleur d'un module sont $\sqrt{3}$ fois plus faibles que ceux du montage en étoile et sont orientés de $-\pi/6$ radians. Les tensions à appliquer à la charge peuvent être exprimées dans le plan α , β à l'aide d'un vecteur V_s , comme suit :

$$\vec{V}_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \frac{T_1}{T_{\text{mod}}} \vec{V}_1 + \frac{T_2}{T_{\text{mod}}} \vec{V}_2 \quad 3.49$$

Par exemple pour le premier secteur le vecteur V_s , on a :

$$V_{s\alpha} + V_{s\beta} = \frac{T_1}{T_{\text{mod}}} \sqrt{\frac{2}{3}} E (\cos(0) + j \sin(0)) + \frac{T_2}{T_{\text{mod}}} \sqrt{\frac{2}{3}} E \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) \quad 3.50$$

Après la résolution d'Eq 3.50, on obtient :

$$\begin{cases} T_1 = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} - \frac{1}{2} V_{s\beta} \right) \frac{T_{\text{mod}}}{E} \\ T_2 = \sqrt{2} V_{s\beta} \frac{T_{\text{mod}}}{E} \end{cases} \quad 3.51$$

Pour l'ensemble des secteurs les temps d'application des vecteurs non nuls sont tabulés ci-après

Tableau 3.3 Les temps T_1 et T_2 pour l'ensemble des secteurs.

i=1	i=2	i=3
$T_1 = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_2 = \sqrt{2} V_{s\beta} \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$	$T_2 = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_3 = \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$	$T_3 = \sqrt{2} V_{s\beta} \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_4 = \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$
i=4	i=5	i=6
$T_4 = \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_5 = -\sqrt{2} V_{s\beta} \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$	$T_5 = \left(-\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_6 = \left(+\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} - \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$	$T_6 = -\sqrt{2} V_{s\beta} \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$ $T_1 = \left(+\sqrt{\frac{3}{2}} V_{s\alpha} + \frac{1}{\sqrt{2}} V_{s\beta} \right) \cdot \frac{T_{\text{mod}}}{E}$

4. Calcul des rapports cycliques de commutation pour chaque bras

Pour des impulsions centrées par rapport à la période de commutation les chronogrammes sont les suivants (figure 3.21) et on obtient (tableau 3.4) évidemment les mêmes expressions des rapports cycliques que dans le couplage triangle.

Ici V_z représente un vecteur de tension nul, soit V_0 soit V_7 .

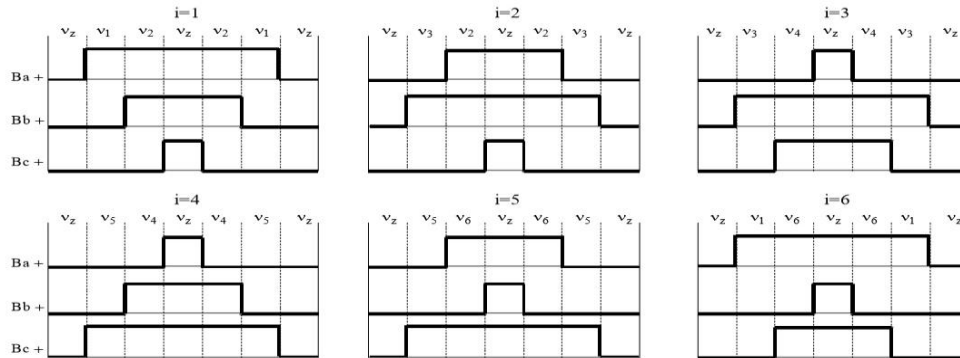


Figure 3.21 Les chronogrammes de commutation.

Tableau 3.4 Les rapports de commutation pour l'ensemble des secteurs.

Secteur	Bras A ρ_A	Bras B ρ_B	Bras C ρ_C
1	$0,5 \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{3}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$
2	$0,5 \left(1 + \sqrt{3} \cdot \hat{V}_{s\alpha} \right)$	$0,5 \left(1 + \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \hat{V}_{s\beta} \right)$
3	$0,5 \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{3}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$
4	$0,5 \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{3}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$
5	$0,5 \left(1 + \sqrt{3} \cdot \hat{V}_{s\alpha} \right)$	$0,5 \left(1 + \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \hat{V}_{s\beta} \right)$
6	$0,5 \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} + \frac{1}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$	$0,5 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{V}_{s\alpha} - \frac{3}{2} \cdot \hat{V}_{s\beta} \right)$

Avec :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{s\alpha}}{E} \\ V_{s\beta} = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{s\beta}}{E} \end{cases} \quad 3.52$$

3.4.5.4 Résultats de simulation

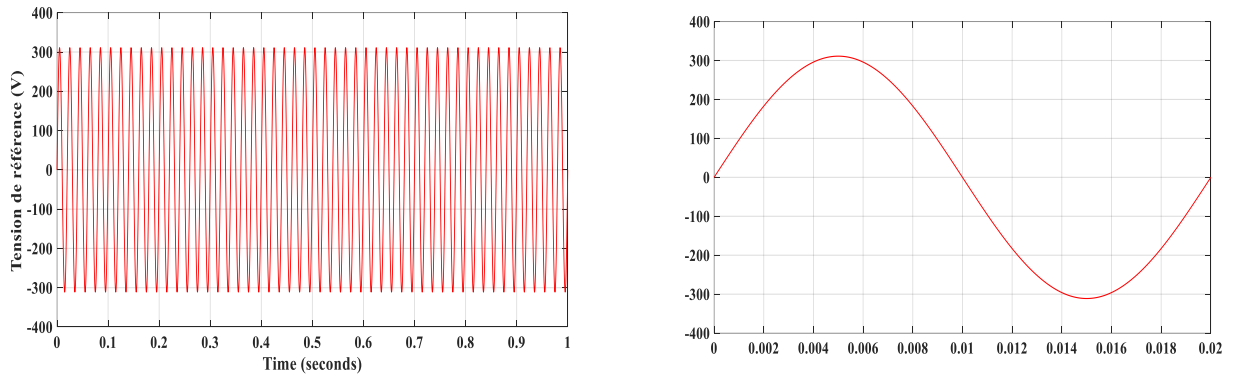


Figure 3.22 La tension de référence, zoom (une onde).

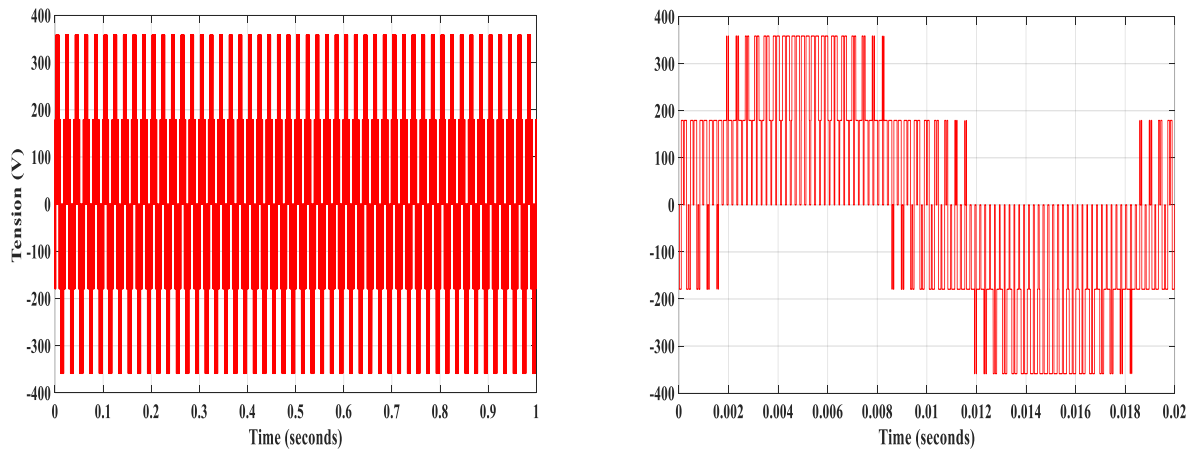


Figure 3.23 La tension générée par MLI vectorielle, zoom (une onde).

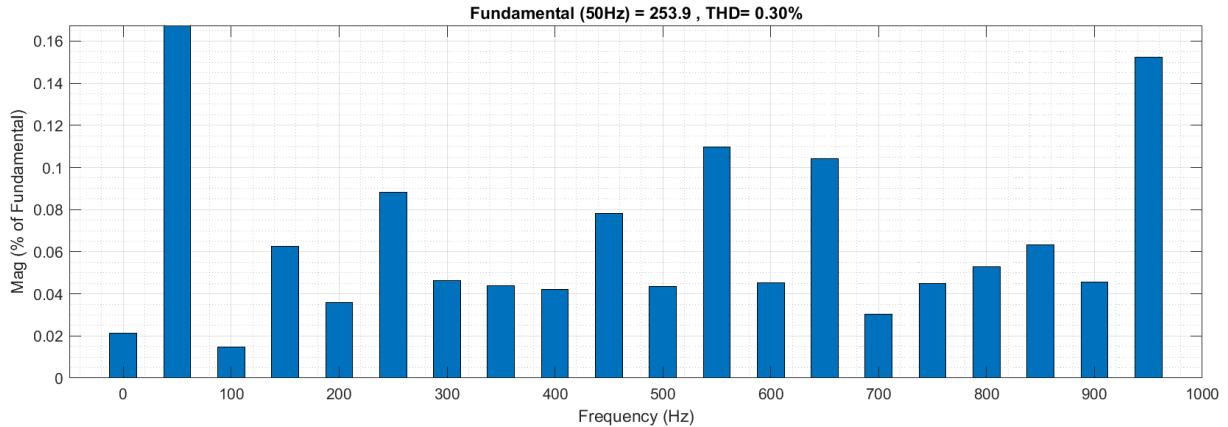


Figure 3.24 THD de la tension générée par MLI vectorielle.

La commande MLI vectorielle du convertisseur de puissance a atteint son objectif principal, qui consiste à générer une tension électrique de haute qualité, avec un faible taux d'harmoniques et un THD (taux de distorsion harmonique) de seulement 0,3 %. Les harmoniques, en particulier celles de fréquence élevée, peuvent avoir des conséquences néfastes sur la machine électrique et la commande, entraînant des problèmes tels que des vibrations mécaniques, des fluctuations dans les grandeurs de la machine, notamment la vitesse et le couple, ainsi qu'une surchauffe du système.

En utilisant la méthode de MLI vectorielle, une tension générée par le convertisseur de puissance de haute qualité a été obtenue, évitant ainsi les inconvénients mentionnés précédemment. Cette approche a également permis de tirer pleinement parti de la commande synergétique. En effet, il serait peu judicieux d'opter pour une commande ordinaire pour le convertisseur de puissance alors que la commande synergétique, plus avancée et efficace, est disponible. En utilisant cette dernière, tous les avantages associés à cette approche de commande sont préservés.

3.5 Simulations et discussions

3.5.1 Réglage et l'évaluation de variation de paramètres du régulateurs synergétiques

Dans la section précédente, il a été noté que tous les régulateurs synergétiques possèdent trois paramètres : T_a , K_b et K_c , avec ' $a=1,2,3,4$ ', ' $b=1,3,5,7$ ' et ' $c=2,4,6,8$ '. T_a est principalement lié à la stabilité du régulateur, et son changement n'affecte pas sensiblement les performances dynamiques, tant qu'il reste positif.

Cependant, les deux autres paramètres ont un impact significatif sur les performances et les caractéristiques de réponse du régulateur, notamment le temps de montée, le dépassement, les oscillations et l'erreur statique.

Étant donné la similitude entre les régulateurs synergétiques et pour éviter de prolonger la discussion, un seul régulateur de chaque type sera sélectionné : un régulateur synergétique de vitesse pour la MADASB et un régulateur synergétique de courant I_{dc} pour l'analyse.

3.5.2 Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique de vitesse de MADASB

Afin d'assurer un jugement équitable sur les caractéristiques du régulateur synergétique et de mesurer dans quelle mesure ses performances sont influencées par la modification de ses paramètres, on va réduire le rôle de la machine électrique MADASB en la représentant uniquement par une équation dynamique de la vitesse (Eq 2.16). De cette manière, on va isoler les performances du régulateur de vitesse des équations électromagnétiques de la machine.

Les paramètres du régulateur ont été ajustés de manière alternative, en maintenant l'un des paramètres constants et en modifiant les valeurs de l'autre, puis en inversant cette configuration.

Les résultats de la simulation sont les suivants :

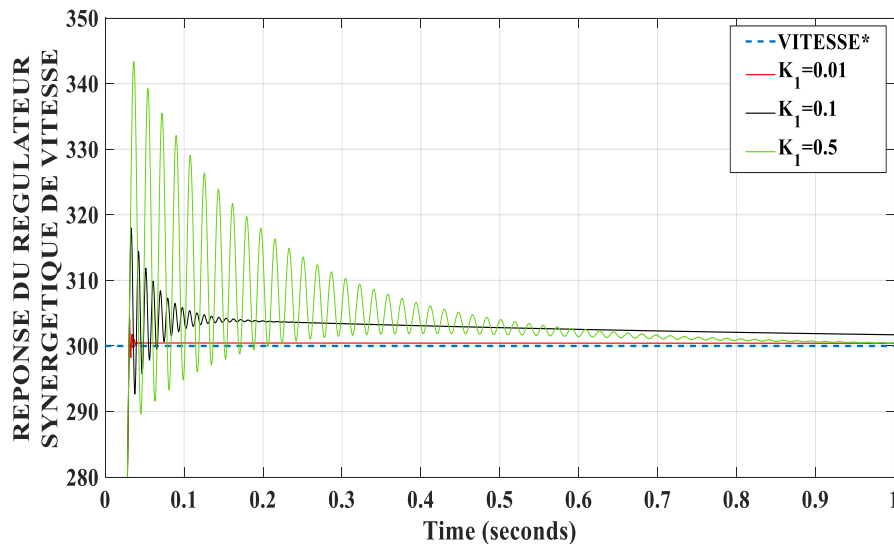


Figure 3.25 Réglage de paramètre K_1 du régulateur synergétique de vitesse ' $K_2=7$ '.

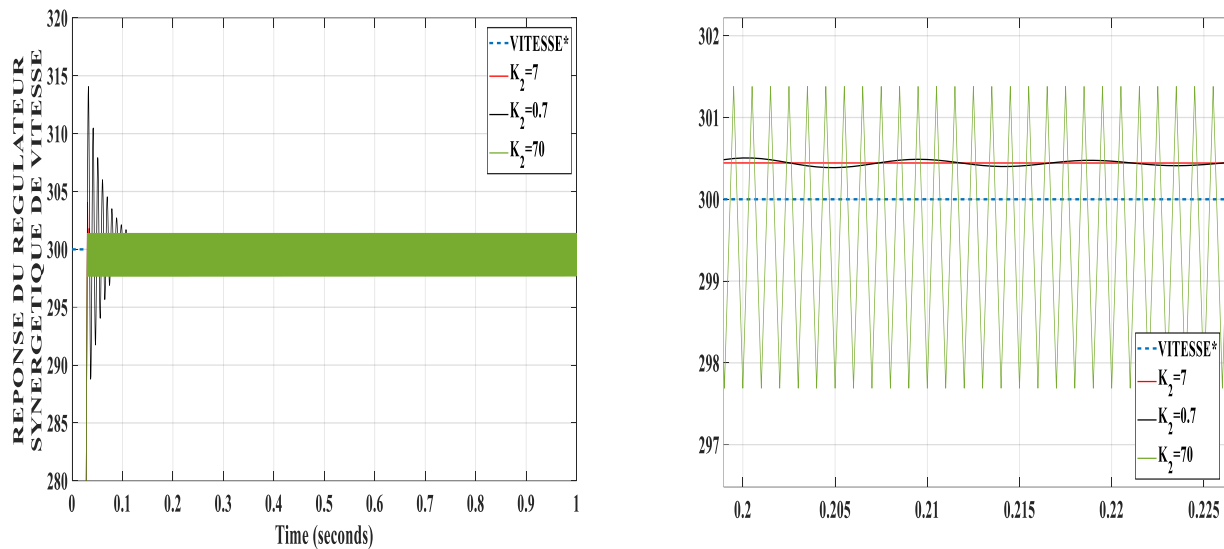


Figure 3.26 Réglage de paramètre K_2 du régulateur synergétique de vitesse, zoom ($0.195s < t < 0.23s$) ' $K_1=0.01$ '.

À partir des données graphiques, il est clairement observé que la modification d'un paramètre a un impact significatif sur les performances du régulateur synergétique de vitesse, mais avec une distinction fondamentale. En effet, K_1 a un effet prédominant sur la précision, la rapidité et le dépassement du régulateur, tandis que K_2 influe principalement sur l'apparition d'oscillations dans la réponse du régulateur.

Pour K_1 , il est remarquable que la valeur $K_1 = 0.01$ offre les meilleures performances dynamiques du régulateur. À cette valeur, le temps de montée est extrêmement court (< 0.02 s), le dépassement est très limité ($< 0.66\%$), et la précision est exceptionnelle, avec une erreur statique relative inférieure à 0.17% . En augmentant la valeur de K_1 , le dépassement et le temps de montée augmentent, tandis que la précision diminue.

Quant à K_2 , il influence principalement l'apparition d'oscillations dans la réponse du régulateur. Chaque modification de cette valeur entraîne un changement dans le comportement oscillatoire. Par exemple, lorsque K_2 est égal à 7, les oscillations sont pratiquement inexistantes, tandis qu'à une valeur de 70, elles deviennent excessivement prononcées et inacceptables. Cependant, pour $K_2 = 0.7$, on observe initialement d'importantes oscillations qui diminuent ensuite jusqu'à devenir presque négligeables.

En considération de ces observations, les valeurs des paramètres $K_1 = 0.01$ et $K_2 = 7$ seront adoptées comme référence pour le régulateur synergétique de vitesse de la MADASB à partir de maintenant.

3.5.3 Les effets de la variation des paramètres du régulateur synergétique du courant

I_{dc}

Pour obtenir un aperçu plus complet et déterminer si les mêmes tendances se manifestent également dans le régulateur de courant, On a suivi les mêmes étapes que précédemment, en modifiant uniquement un paramètre, à savoir K_3 , pour le régulateur de courant. Voici les résultats obtenus :

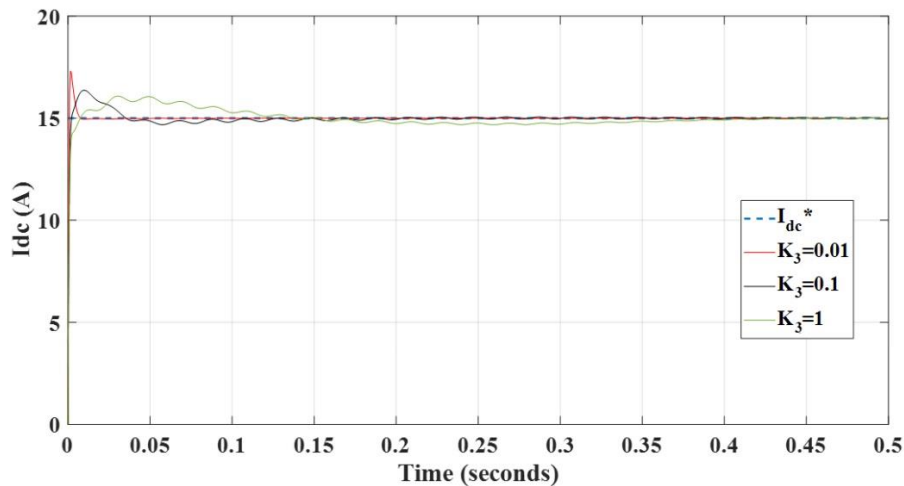


Figure 3.27 Réglage de paramètre K_3 du régulateur synergétique du courant I_{dc} ' $K_4=50$ '.

Les mêmes observations qui étaient valables pour le régulateur de vitesse s'appliquent désormais également au régulateur de courant, car la modification du paramètre K_3 affecte la rapidité, le dépassement et la précision du régulateur.

Cependant, il est important de noter que la valeur $K_3 = 0.01$, qui permet d'obtenir la réponse la plus rapide avec un temps de montée inférieur à 0.02 s, présente également le dépassement le plus élevé, atteignant 13.34 %. Dans ce contexte, le choix de la valeur du paramètre dépendra des exigences du cahier des charges, et il faudra choisir entre un dépassement élevé et la rapidité de la réponse du régulateur.

Dans les simulations futures, la valeur de K_3 sera sélectionnée de manière à fournir la réponse la plus rapide tout en maintenant un niveau raisonnable de dépassement. Cela est particulièrement important lorsque les valeurs de référence évoluent rapidement. Ainsi, la

préférence sera donnée à la vitesse de réponse du régulateur plutôt qu'au dépassement. Par conséquent, les valeurs $K_3 = 0.01$ et $K_4 = 50$ seront désormais adoptées comme référence pour le régulateur de courant.

3.5.4 Comparaison de la performance de régulateurs synergétiques et régulateurs PI conventionnels

Pour démontrer l'efficacité de la commande synergétique et mettre en évidence sa supériorité, ainsi que la supériorité des méthodes non linéaires en général par rapport aux méthodes linéaires, on va effectuer une comparaison entre les régulateurs synergétiques et les régulateurs PI classiques.

Afin de rendre la comparaison concise et éviter des répétitions inutiles, on sélectionnera uniquement deux régulateurs synergétiques à comparer directement avec les régulateurs PI. Les régulateurs que on a examinés précédemment, c'est-à-dire le régulateur de vitesse de la MADASB et le régulateur de courant I_c , seront choisis à cette fin.

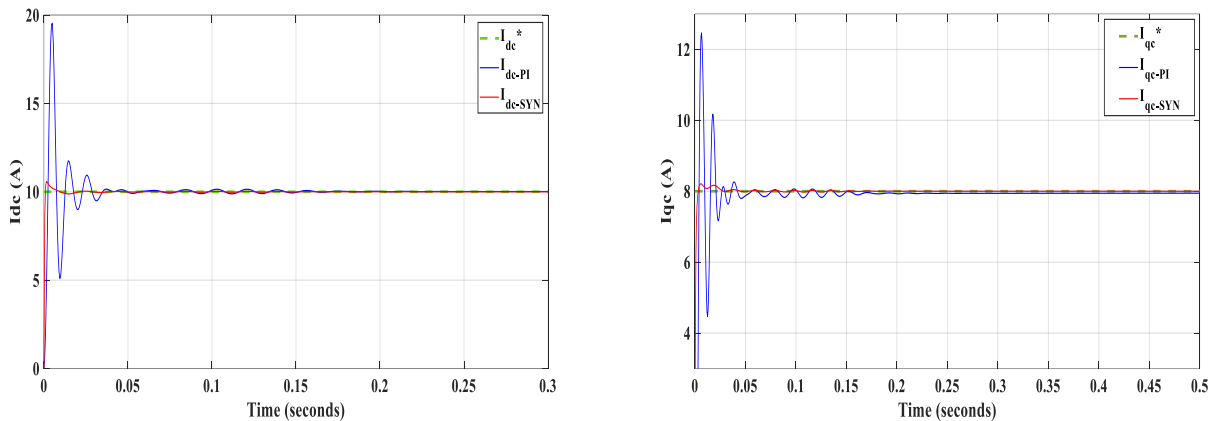


Figure 3.28 Comparaison entre régulateurs synergétiques et régulateurs PI conventionnels de courants I_{dc} et I_{qc} 'P=4 et I=2000'.

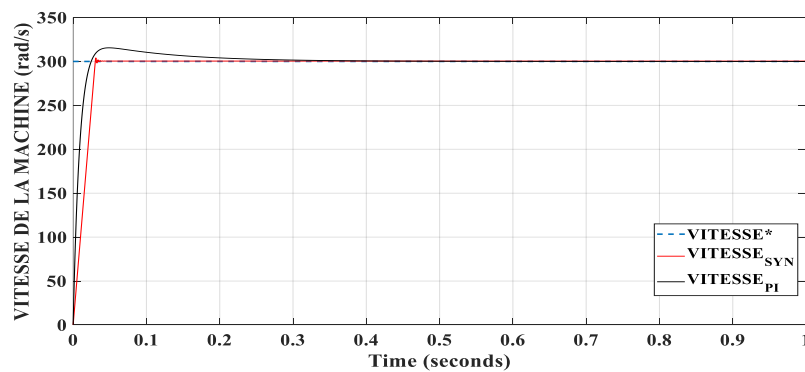


Figure 3.29 Comparaison entre régulateur synergétique et régulateur PI conventionnel de vitesse 'P=12 et I=105'.

D'après la première figure, il est possible d'observer les performances des régulateurs PI et des régulateurs synergétiques. Le régulateur PI présente un dépassement relativement important, atteignant 80 % pour l' I_{dc} et 56.25 % pour l' I_{qc} . Le temps de montée de ce régulateur est inférieur à 0.2 s pour les deux courants, et l'erreur statique relative est quasiment nulle pour l' I_{dc} et atteint 1.25 % pour l' I_{qc} . Initialement, des oscillations significatives sont présentes dans la réponse du régulateur, mais elles diminuent progressivement jusqu'à disparaître complètement.

En revanche, pour le régulateur synergétique de courant, le dépassement est de seulement 8 % pour l' I_{dc} et 2.5 % pour l' I_{qc} . Le temps de montée est inférieur à 0.05 s, et l'erreur statique relative est presque nulle pour les deux courants. Il n'y a aucune oscillation dans la réponse de ce régulateur.

Il est donc clair que le régulateur synergétique de courant affiche les meilleures performances dans l'ensemble. Il est le plus rapide, le plus précis, présente le dépassement le plus faible et ne montre aucune oscillation. Ainsi, ses performances sont nettement supérieures à celles du régulateur PI.

Cette tendance se confirme également pour le régulateur de vitesse, où le régulateur synergétique présente une dynamique supérieure. Il est le plus rapide, avec un temps de montée de 0.04 s, comparé à 0.2 s pour le régulateur PI. De plus, il est plus précis, avec un dépassement de seulement 0.66 %, par rapport au dépassement de 6.66 % du régulateur PI.

3.5.5 Simulation de la commande synergétique de puissances, couple et vitesse de la MADASB

3.5.5.1 La commande de puissances active et réactive P_p et Q_p

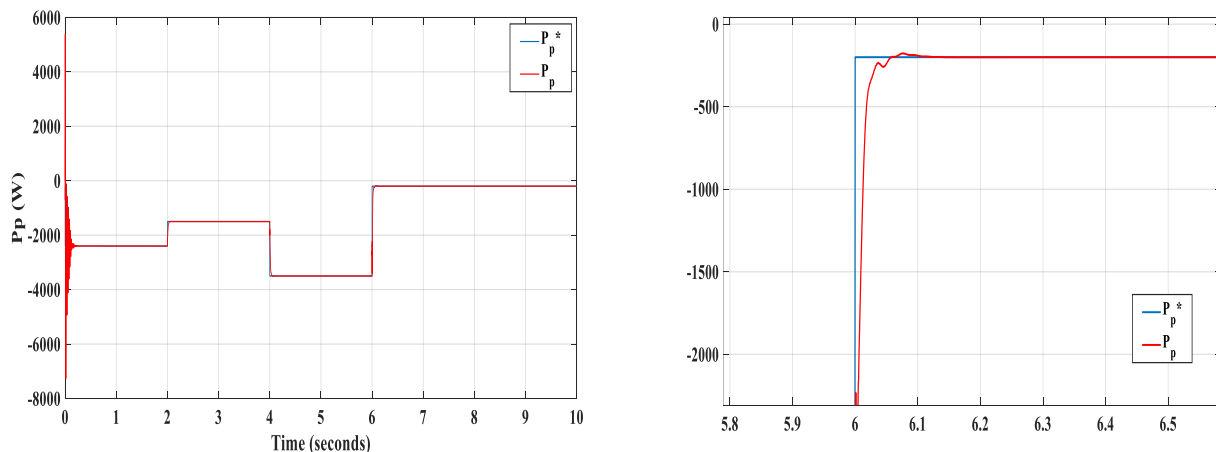


Figure 3.30 La puissance active du EP, zoom ($5.7s < t < 6.6s$).

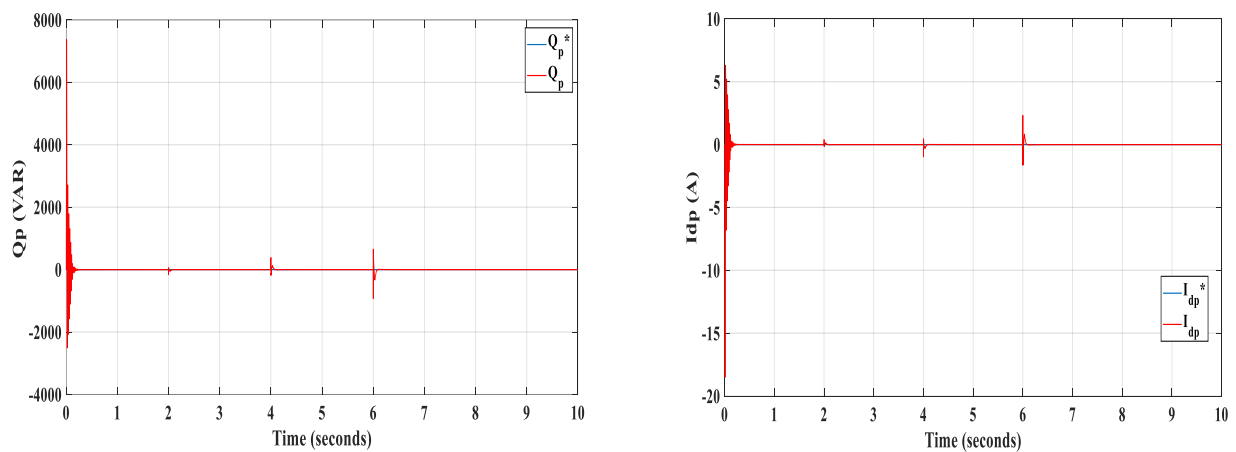
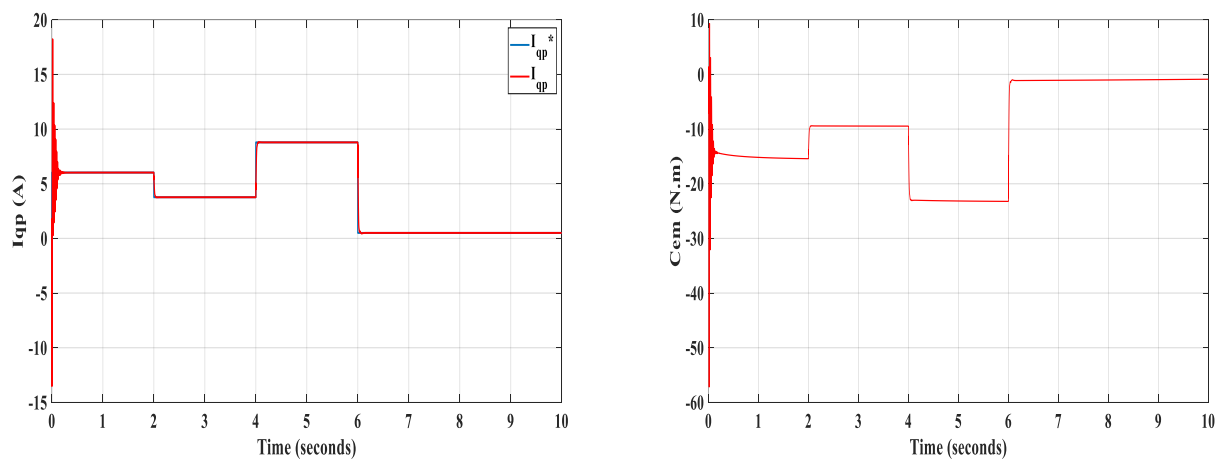
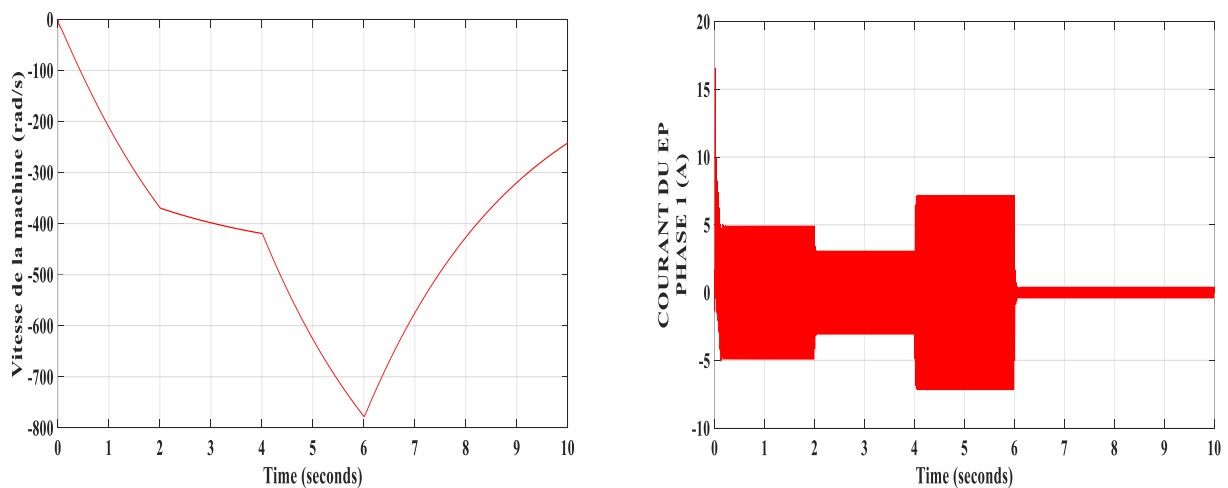
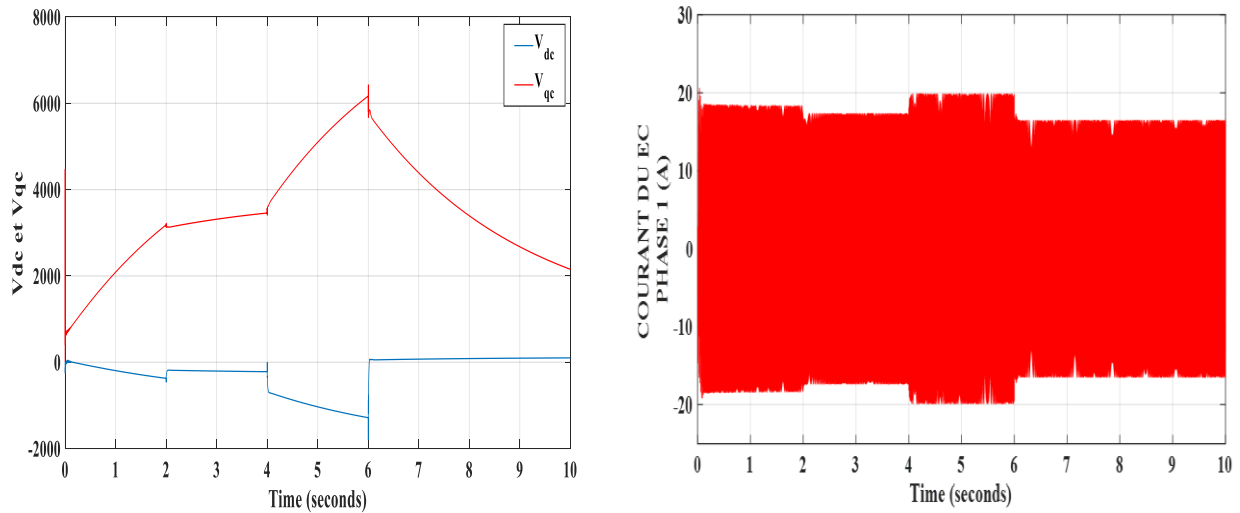
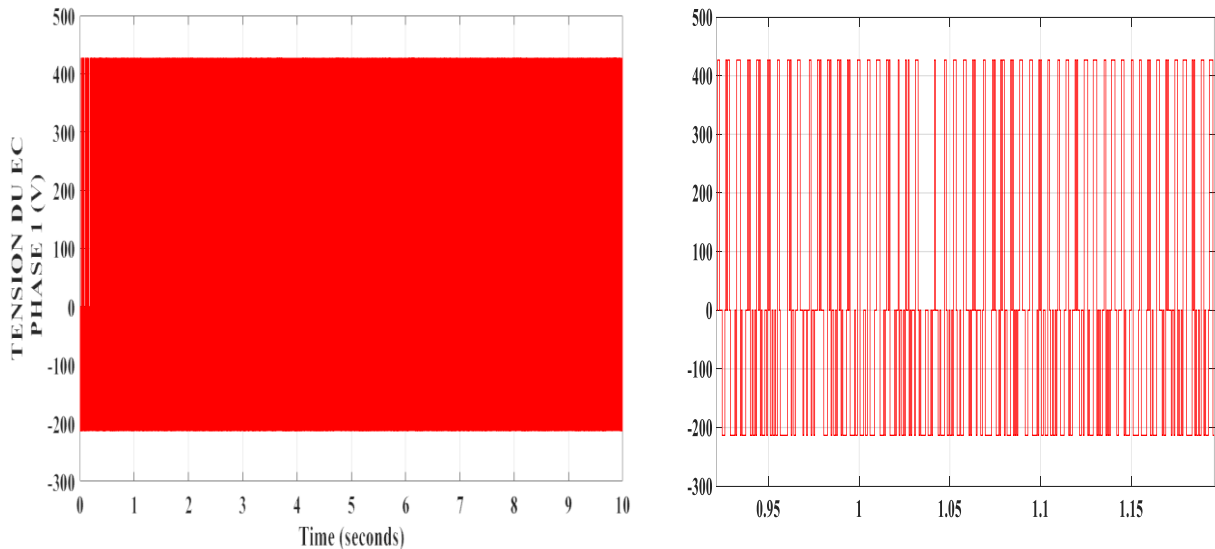
Figure 3.31 La puissance réactive du EP, le courant I_{dp} .Figure 3.32 Le courant I_{qp} , le couple électromagnétique de la machine.

Figure 3.33 La vitesse de machine, le courant du EP phase 1.

Figure 3.34 Les dq-composants de la tension V_c , le courant du EC phase 1.Figure 3.35 La tension du EC ' V_c ' phase 1, zoom ($0.9s < t < 1.2s$).

À partir des données précédentes, on peut déduire les points suivants :

- La référence de la puissance active (P_p) est négative, ce qui indique l'intention que la MADASB agisse comme un générateur.
- La puissance active (P_p) suit de manière très efficace et rapide sa valeur de référence, avec un temps de montée de seulement 0.05 seconde. De plus, elle présente un faible dépassement et une erreur statique négligeable.
- La situation est similaire pour la puissance réactive (Q_p), mais avec une légère différence due à des impulsions très rapides lorsque la référence de P_p est modifiée.

- La vitesse électrique et le couple de la machine sont négatifs, ce qui est conforme à l'attente, étant donné que la machine fonctionne en mode générateur.

3.5.5.2 La commande du couple de la MADASB

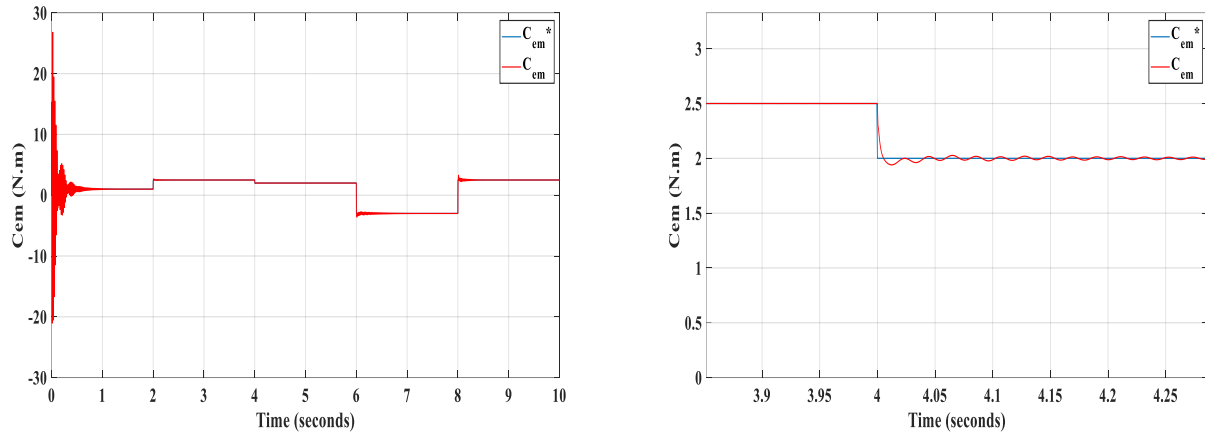


Figure 3.36 Le couple électromagnétique de la machine, zoom ($0.85s < t < 4.3s$).

Le comportement du couple de la MADASB est similaire à celui des puissances, car il réagit de manière rapide et efficace pour suivre sa valeur de référence. Bien qu'il puisse y avoir quelques oscillations lors du changement de la valeur de référence, ces fluctuations s'atténuent rapidement, et le couple converge finalement vers sa valeur de référence, présentant ainsi un dépassement minimal avant de se stabiliser.

3.5.5.3 La commande de la vitesse de la MADASB

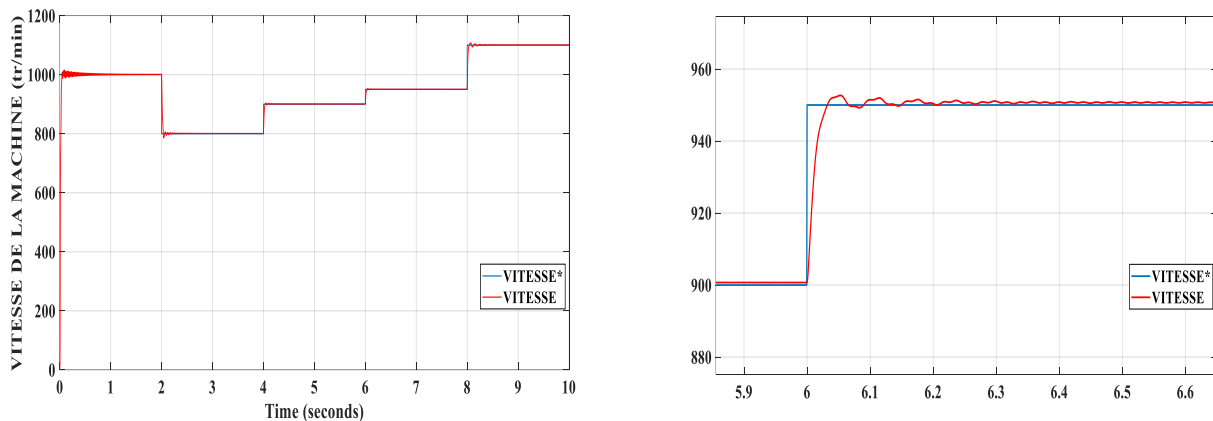


Figure 3.37 La vitesse de la machine, zoom ($5.8s < t < 6.7s$).

La machine réagit de manière efficace et rapide pour atteindre la valeur de référence de vitesse. Bien qu'il puisse y avoir quelques oscillations lorsqu'elle passe d'une vitesse de référence à une autre, ces fluctuations s'atténuent rapidement jusqu'à disparaître complètement.

3.5.6 Evaluation de robustesse de la commande synergétique

L'évaluation de la méthode de commande revêt une grande importance, notamment à travers des tests de robustesse. Cette étape est cruciale car les paramètres de la machine électrique ou du système global peuvent évoluer en réponse à diverses circonstances, telles que des pannes électriques ou mécaniques. Ces dysfonctionnements peuvent altérer les paramètres du système en les augmentant ou en les réduisant. Par exemple, un court-circuit peut survenir dans un enroulement, réduisant le nombre de spires par lesquelles le courant circule, ce qui diminue la résistance et l'inductance de cette bobine.

Dans la simulation à venir, on procèdera à des changements soudains et significatifs dans certains paramètres de la machine électrique, simulant ainsi un court-circuit au niveau de l'enroulement de puissance EP. Cela entraînera une réduction de la résistance et de l'inductance de cet enroulement, les ramenant à un dixième de leurs valeurs initiales avant la panne.

Par ailleurs, pour évaluer la robustesse du régulateur synergétique de vitesse, on envisage de modifier les paramètres mécaniques de la machine électrique. À un moment donné, on augmentera l'inertie de la machine, la portant à cinq fois sa valeur d'origine. On compare ensuite les performances de ce régulateur synergétique à celles d'un régulateur classique de type PI dans des conditions identiques, afin de déterminer l'efficacité de la commande synergétique et son avantage par rapport à la commande classique.

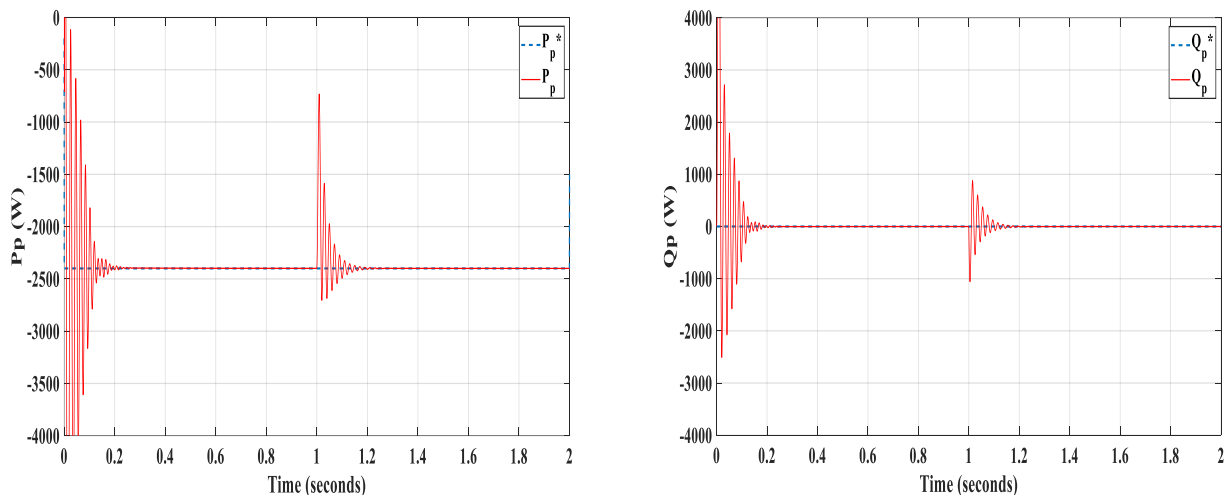


Figure 3.38 L'effet de variation de R_s et L_s sur la commande synergétique de puissances active et réactives.

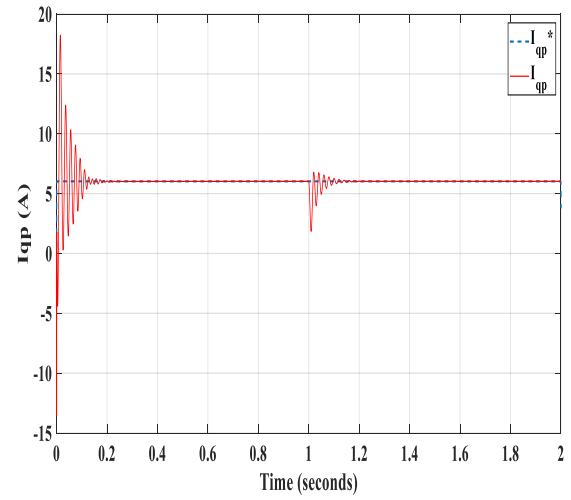
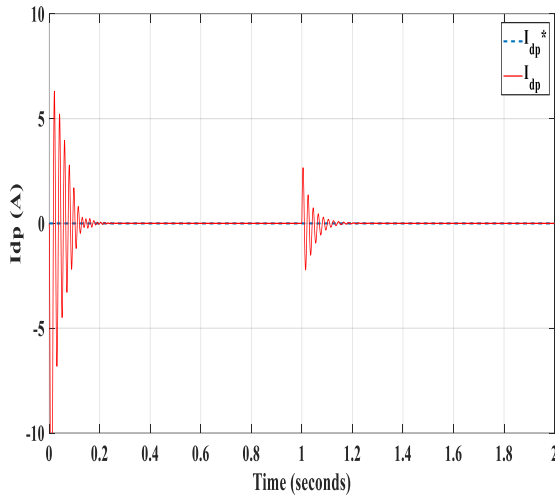


Figure 3.39 L'effet de variation de R_s et L_s sur la commande synergétique de courants I_{dp} et I_{qp} .

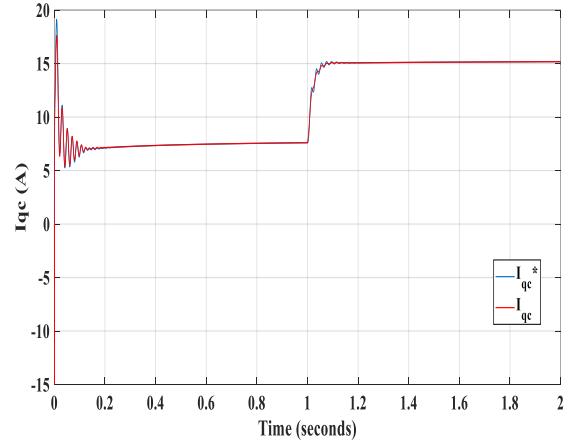
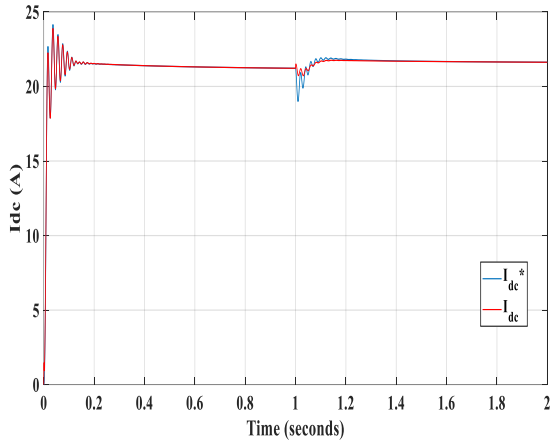


Figure 3.40 L'effet de variation de R_s et L_s sur la commande synergétique de courants I_{dc} et I_{qc} .

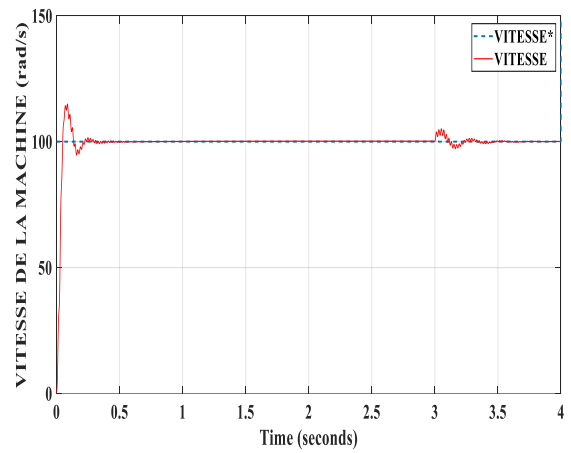
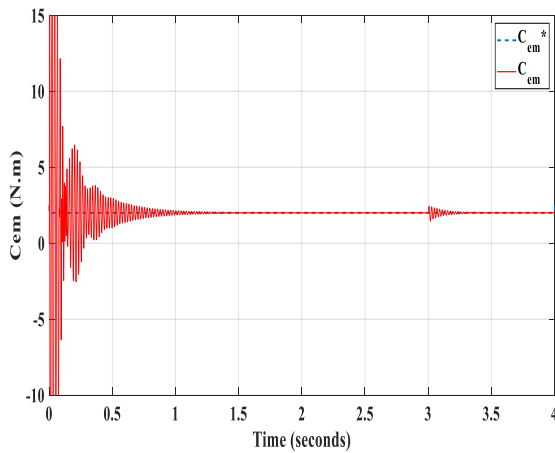


Figure 3.41 L'effet de variation de R_s et L_s sur la commande synergétique du couple et vitesse de la machine.

Toutes les grandeurs commandées, telles que les courant I_c , les courant I_p , les puissances active et réactive P_p et Q_p , ainsi que le couple ou la vitesse de la MADASB, présentent quelques oscillations et perturbations lorsqu'une panne survient et que la résistance et l'inductance du EP diminuent. Cependant, ces fluctuations se dissipent rapidement pour revenir à leurs valeurs de référence, et ce processus ne prend pas plus de 0.2 seconde, ce qui démontre une performance exceptionnelle.

L'erreur statique lorsque la panne se produit reste pratiquement inchangée par rapport à la situation précédant la panne, et elle demeure très négligeable. Ainsi, la commande synergétique conserve toutes ses caractéristiques et performances exceptionnelles même après d'importants changements dans les paramètres de la machine électrique. Cela met en évidence la supériorité claire et significative des commandes non linéaires à structure variable par rapport aux méthodes linéaires.

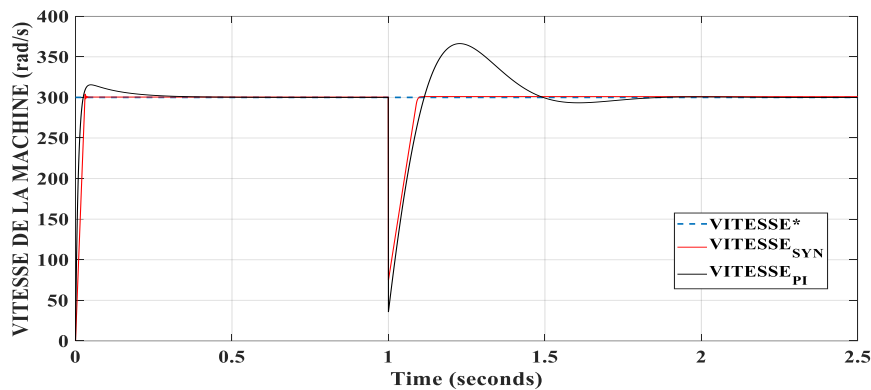


Figure 3.42 Comparaison de l'effet de variation de J sur le régulateur synergétique et régulateur PI de la vitesse de la machine.

Dans la Figure 3.42, l'évaluation de la robustesse des régulateurs s'est basée uniquement sur l'équation dynamique de changement de vitesse de la machine électrique, sans prendre en compte les conditions électromagnétiques spécifiques de la machine. Au moment de l'apparition de la panne et de l'augmentation de l'inertie de la machine, la vitesse a diminué dans les deux cas. Cependant, cette diminution a été moins prononcée avec le régulateur synergétique par rapport au régulateur PI. De plus, le retour de la vitesse à sa valeur de référence a été sensiblement différent. Le régulateur synergétique a rétabli la vitesse à sa valeur de référence beaucoup plus rapidement, en seulement 0,2 seconde, tandis qu'avec le régulateur PI, cela a pris environ deux secondes. La dynamique du rétablissement de la vitesse était également différente. Avec le régulateur synergétique, elle était linéaire, suivant une trajectoire en ligne droite, tandis

qu'avec le régulateur PI, elle présentait une courbe avec des dépassements et des oscillations avant de se stabiliser à sa valeur de référence.

Ces résultats démontrent que la commande synergétique offre une efficacité remarquable et une grande robustesse face aux variations des paramètres du système. Elle se révèle ainsi particulièrement adaptée aux situations où la réparation des pannes peut être longue et complexe, comme dans le cas des éoliennes en mer (offshore).

3.5.7 Intégration de la MADASB commandée par la commande synergétique dans un éolien avec hybrides MPPT algorithmes

On arrive à l'étape d'intégration de la commande synergétique de la MADASB dans le système éolien, tout en intégrant des algorithmes hybrides de suivi du point de puissance maximale (MPPT). La vitesse du vent présente une grande variabilité, et cette variation s'étend sur une période de 20 secondes (voir figure 3.43 à gauche). En réalité, ces 20 secondes représentent 20 heures, mais une simulation aussi longue n'est pas réalisable, c'est pourquoi on compresse cette période en 20 secondes. Cette compression crée un défi considérable, car la MADASB doit ajuster sa vitesse plusieurs fois par seconde pour suivre les fluctuations rapides de la vitesse du vent. Cela constitue un véritable test pour les contrôleurs et les algorithmes MPPT.

La simulation sera réalisée en calculant les constantes de la turbine éolienne C_p et Λ , ainsi que le couple de la turbine en fonction de la vitesse du vent et de l'angle d'orientation constant des pales (β), qui est fixé à zéro dans ce cas. Ce couple sera utilisé comme une entrée pour la MADASB, mais avec une valeur négative, la mettant ainsi en mode générateur, où elle est entraînée par le vent. La simulation du système éolien utilisera hybride TSR-synergétique MPPT, qui utilise les caractéristiques de la turbine et la vitesse du vent pour déterminer la vitesse de référence à laquelle la machine électrique doit fonctionner, en se basant sur la valeur optimale de Λ (λ_{opt}).

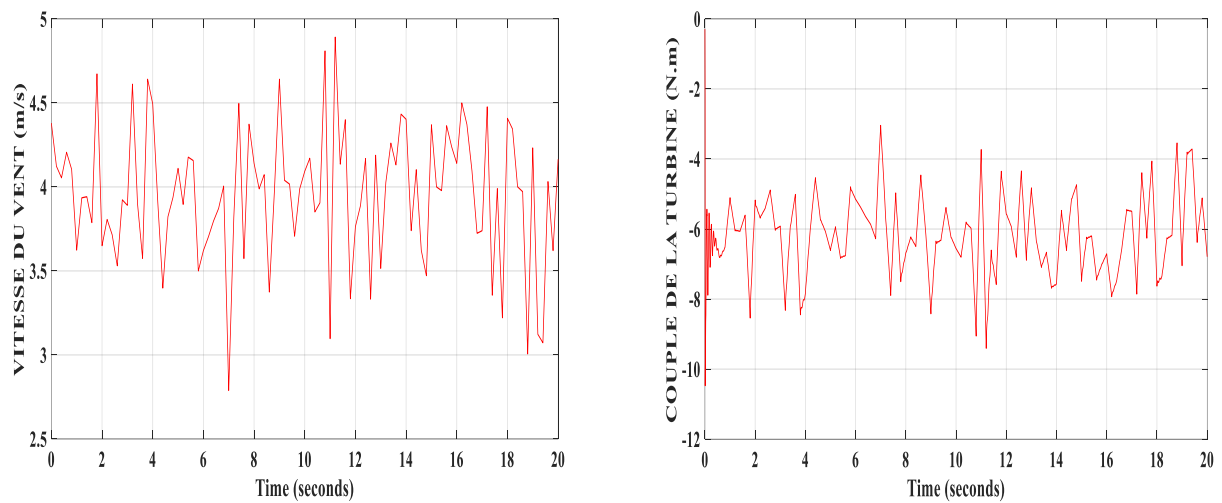


Figure 3.43 La vitesse du vent, couple de la turbine.

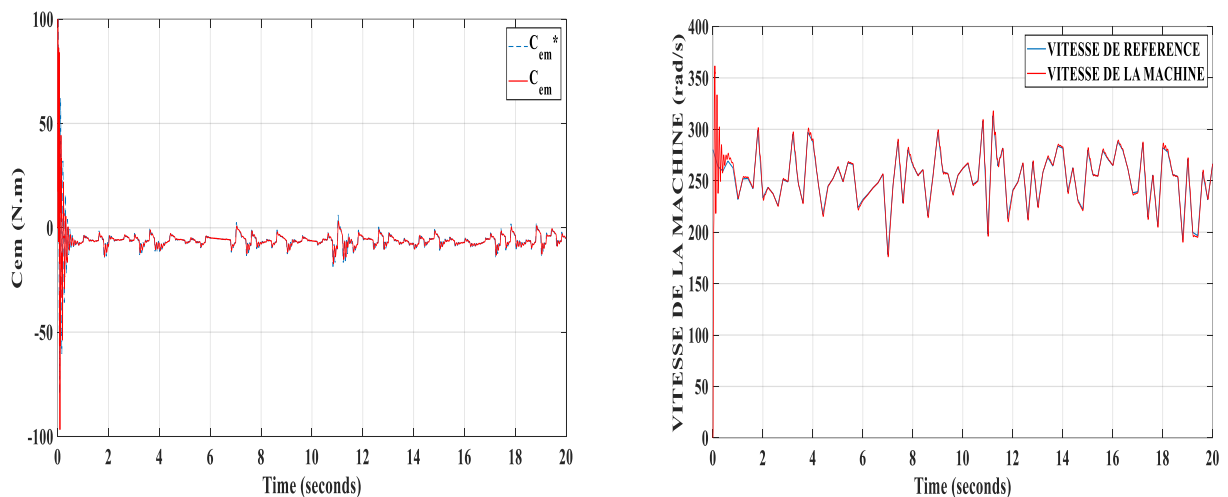
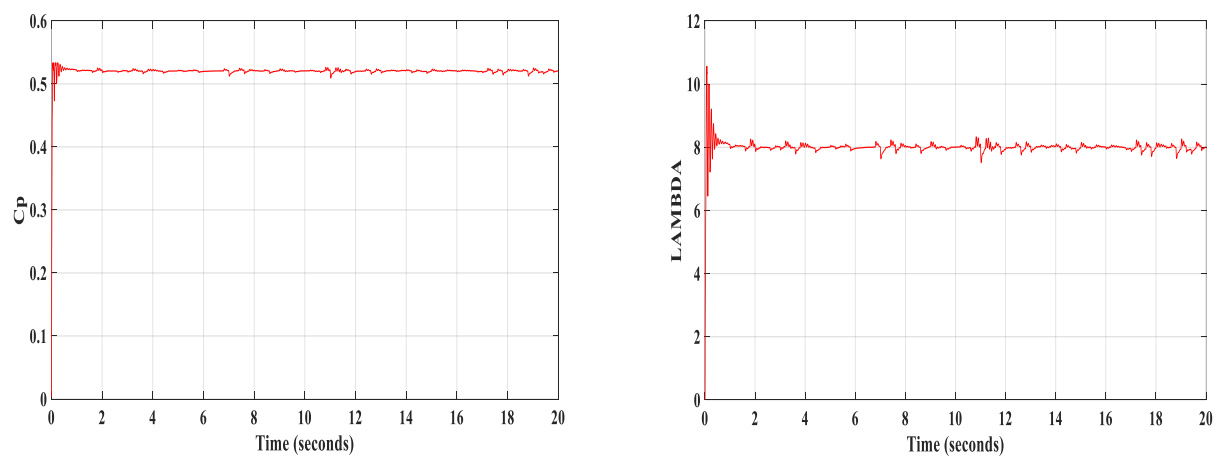


Figure 3.44 Le couple électromagnétique de la MADASB, la vitesse de la machine.

Figure 3.45 C_p et λ de la turbine.

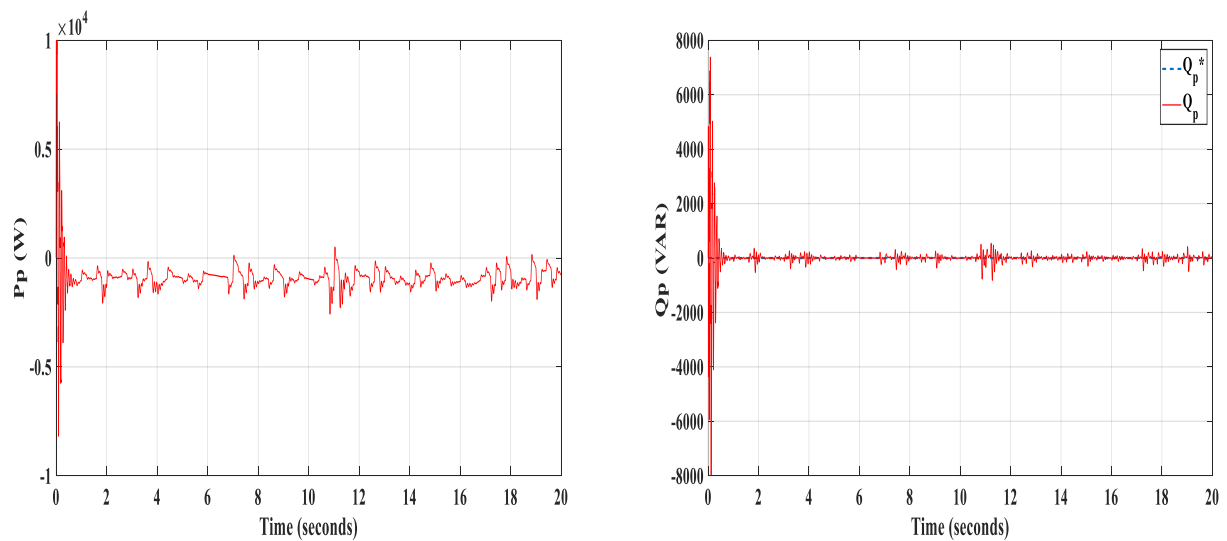
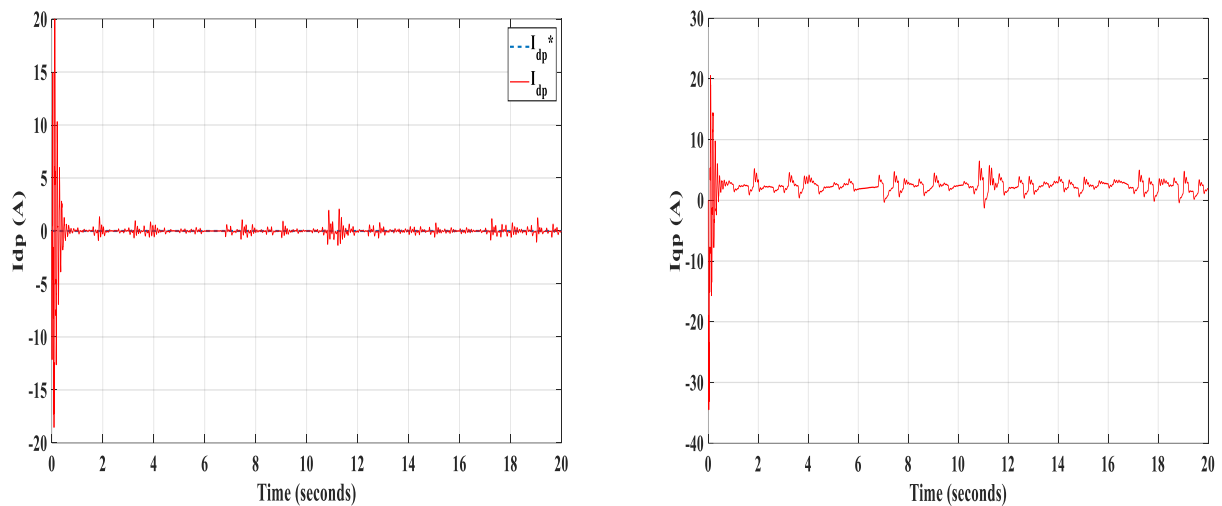
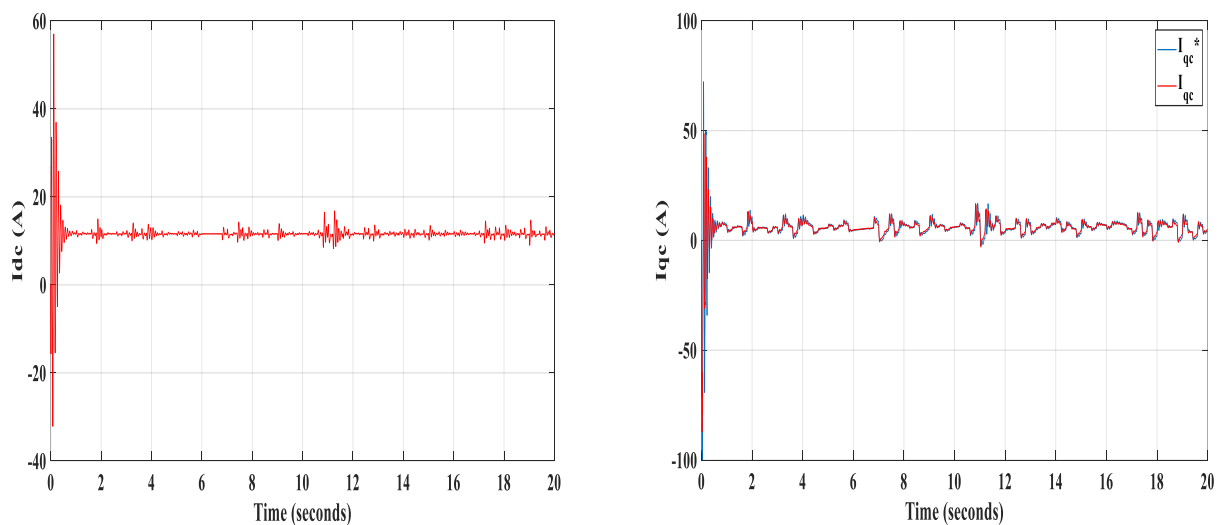
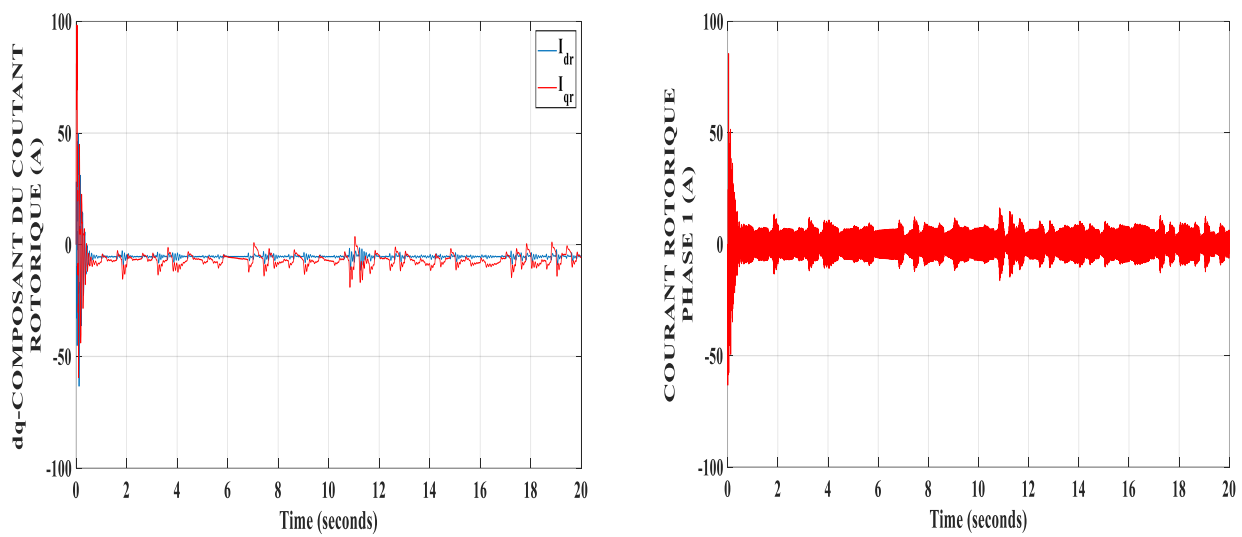
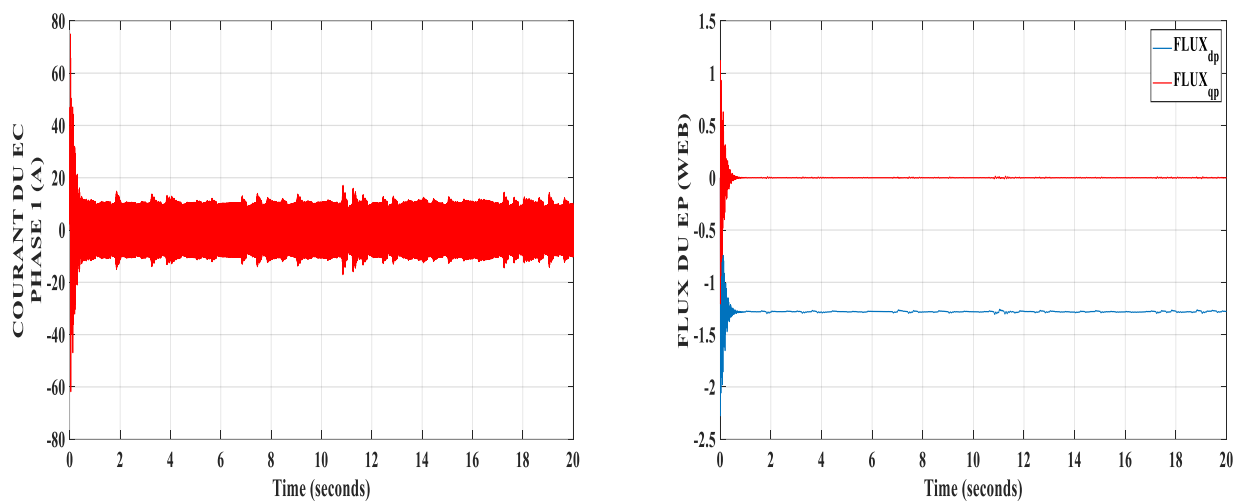
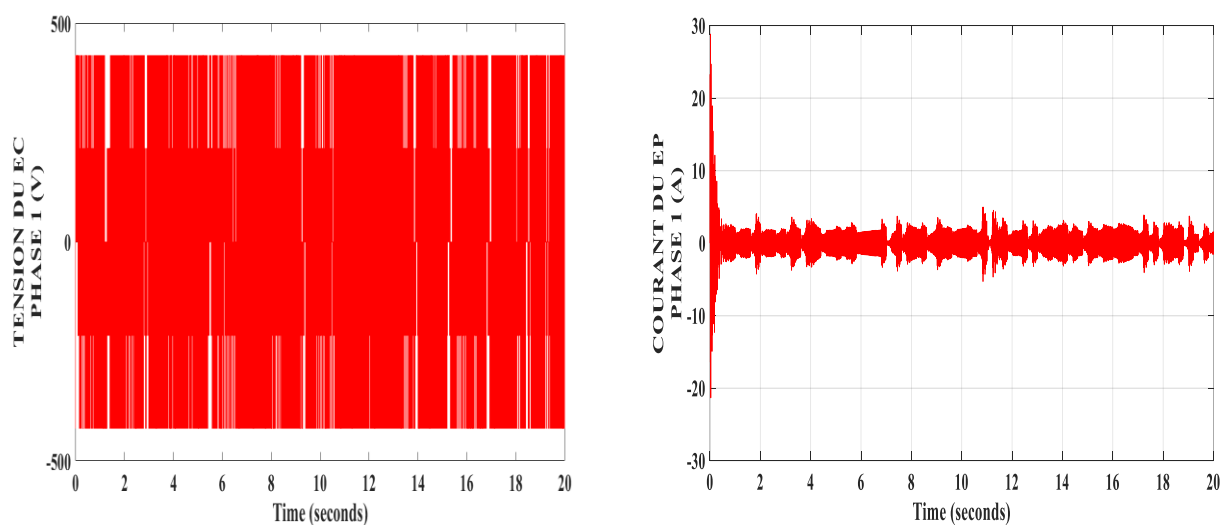


Figure 3.46 Les puissances active et réactive du EP.

Figure 3.47 Les courants I_{dp} et I_{qp} .Figure 3.48 Les courants I_{dc} et I_{qc} .

Figure 3.49 Les tension V_{dr} et V_{qr} , la tension rotorique phase 1.Figure 3.50 Le courant I_c , les dq-composants de flux magnétique du EP.Figure 3.51 La tension V_c , le courant I_p phase 1.

À partir des données des figures précédentes, on peut tirer les observations suivantes :

- Le couple de la turbine suit de manière similaire la variation de la vitesse du vent, reflétant une relation étroite entre les deux.
- Le couple de la machine et la vitesse de référence varient efficacement en réponse aux fluctuations de la vitesse du vent.
- La vitesse de la machine suit sa valeur de référence avec une grande précision, sans retard ni dépassement, démontrant une excellente dynamique et une erreur statique négligeable, voire inexistante.
- Le coefficient de puissance C_p reste quasiment statique, atteignant une valeur idéale d'environ 5,2.
- La valeur de λ reste également stable, égalant sa valeur optimale de 8.
- La puissance active P_p varie en fonction de la vitesse du vent, augmentant avec une vitesse du vent croissante et diminuant avec une vitesse du vent décroissante. Elle reste négative, donnant l'impression que la MADASB fonctionne en mode générateur.
- La puissance réactive Q_p demeure presque constante à sa valeur de référence, présentant quelques fluctuations en cas de changements brusques et importants de la vitesse du vent, mais ces fluctuations sont en moyenne relativement faibles et reviennent à la valeur de référence.
- Tous les courants de la machine évoluent en réponse aux variations de la vitesse du vent.
- Le composant q du flux magnétique d'EP (Ψ_{qp}) est nul, ce qui indique que la méthode de commande a réussi à aligner le flux magnétique d'EP sur l'axe d .
- La modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielle génère une tension d'EC (V_c) de haute qualité.

Sur la base de ces résultats, l'algorithme hybride de suivi du point de puissance maximale (MPPT) TSR-synergétique a montré des performances très satisfaisantes, le qualifiant ainsi de méthode de référence. La commande synergétique a également démontré son efficacité et ses performances exceptionnelles, tout comme la MLI vectorielle qui produit une tension de grande qualité. Par conséquent, l'objectif initial de la simulation, qui était d'évaluer les propriétés et la stabilité du coefficient de puissance et de λ , même en présence de vents très variables sur une courte période, a été atteint.

En utilisant ces résultats comme base, on peut les comparer à une méthode alternative pour une évaluation équitable et approfondie.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a examiné en détail la gestion globale du système. On a commencé par la commande de la turbine, en mettant en œuvre l'algorithme hybride TSR-synergétique. Ensuite, on a abordé la commande synergétique, qu'on a intégrée comme générateur dans le système de production d'électricité alimenté par l'énergie éolienne. Par la suite, on a exploré la commande du convertisseur de puissance en utilisant la méthode de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielle. Enfin, on a étudié les méthodes de commande du système de stockage d'énergie inertiel, également à l'aide de la commande synergétique.

La commande synergétique présente de nombreux avantages, notamment la robustesse, une grande stabilité et une réponse rapide sans chattering ni dépassement significatif. Cela met en évidence la supériorité des systèmes de commande non linéaires par rapport à leurs homologues linéaires. De plus, la commande synergétique se distingue par sa supériorité par rapport à la méthode de commande par mode glissant, en particulier en ce qui concerne le phénomène de chattering.

Références

- [Abderrezek et al., 2016] Abderrezek, H., Aissa, A., & Harmas, M. N. (2016). Adaptive non-singular Terminal Synergetic Power System Control using PSO. *2016 8th International Conference On Modelling, Identification And Control (ICMIC)*, 449-454. <https://doi.org/10.1109/icmic.2016.7804154>
- [Beghdadi & Kouzi, 2022] M. Beghdadi, K. Kouzi. (2022). Novel fully sensorless synergetic control of brushless doubly fed induction machine integrated in wind energy conversion system driven by fuzzy-based HCS MPPT algorithm. *Wind Engineering*, 47(2), 385-407. <https://doi.org/10.1177/0309524x221130723>
- [Benaskeur, 2000] Benaskeur, A. R. (2000). *Aspects de l'application du backstepping adaptatif à la commande décentralisée des systèmes non linéaires* [Thèse de doctorat]. Université de Laval.
- [Chaouch & Naït-Saïd, 2006] Chaouch, S., & Naït-Saïd, M. S. (2006). Backstepping control design for position and speed tracking of DC motors. *Asian Journal Of Information Technology, Medwell Journals*, 5, 1367-1372.
- [Fan & Yu, 2011] Fan, L., & Yu, Y. (2011). Adaptive Non-singular Terminal Sliding Mode Control for DC-DC Converters. *Advances In Electrical And Computer Engineering*, 11(2), 119-122. <https://doi.org/10.4316/aece.2011.02019>
- [Hahn, 1967] Hahn, W. (1967). Stability of Motion. Dans *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50085-5>
- [Kazmierkowski & Sobczuk, 2002] Kazmierkowski, M., & Sobczuk, D. (2002). Sliding mode feedback linearized control of PWM inverter fed induction motor. *IEEE IECON, 22nd International Conference On Industrial Electronics, Control And Instrumentation*, 1, 244-249. <https://doi.org/10.1109/iecon.1996.570960>
- [Kolesnikov & Veselov, 2000] Kolesnikov, A., & Veselov, G. (2000). *Modern Applied Control Theory : Synergetic Approach. Control Theory*. TRTU.
- [Kolesnikov et al., 2000] Kolesnikov, A., Veselov, G., Popov, A., Kolesnikov, A., Kuzmenko, A., Dougal, R., & Kondratiev, I. (2000). A synergetic approach to the modeling of power electronic systems. *COMPEL 2000, 7th Workshop On Computers In Power Electronics. Proceedings*, 259-262. <https://doi.org/10.1109/cipe.2000.904726>
- [Komurcugil, 2012] Komurcugil, H. (2012). Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC Buck converters. *ISA Transactions*, 51, 673-681.
- [Laribi et al., 2023] Laribi, M., Cheikh, M. S. A., Larbes, C., & Barazane, L. (2023). Application de la commande synergétique au contrôle de vitesse d'une machine asynchrone. *Revue des Énergies Renouvelables*, 13(3). <https://doi.org/10.54966/jreen.v13i3.215>
- [Neila & Tarak, 2011] Neila, M. B. R., & Tarak, D. (2011). Adaptive terminal sliding mode control for rigid robotic manipulators. *International Journal Of Automation And Computing*, 8(2), 215-220. <https://doi.org/10.1007/s11633-011-0576-2>

- [Ni et al., 2014] Ni, J., Liu, C., Liu, K., & Pang, X. (2014). Variable speed synergetic control for chaotic oscillation in power system. *Nonlinear Dynamics*, 78(1), 681-690. <https://doi.org/10.1007/s11071-014-1468-0>
- [Pao & Johnson, 2009] Pao, L. Y., & Johnson, K. E. (2009). A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. *American Control Conference*, 2076-2089. <https://doi.org/10.1109/acc.2009.5160195>
- [Poza, 2003] Poza, F. (2003). *Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble]. <https://theses.hal.science/tel-00385804/document>
- [Poza et al., 2009] Poza, J., Oyarbide, E., Sarasola, I., & Rodriguez, M. (2009). Vector control design and experimental evaluation for the brushless doubly fed machine. *IET Electric Power Applications*, 3(4), 247. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2008.0090>
- [Pukdeboon, 2011] Pukdeboon, C. (2011). A review of fundamentals of Lyapunov Theory. *Journal Of Applied Sciences*, 10(2), 55-61. https://www.researchgate.net/publication/267976343_A_Review_of_Fundamentals_of_Lyapunov_Theory/citations
- [Richalet et al., 1978] Richalet, J., Rault, A., Testud, J., & Papon, J. (1978). Model predictive heuristic control. *Automatica*, 14(5), 413-428. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(78\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(78)90001-8)
- [Slotine & Li, 1991] Slotine, J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA11352433>
- [Utkin, 1992] Utkin, V. I. (1992). Sliding Modes in Control and Optimization. Dans *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84379-2>

**CHAPITRE IV: LA
COMMANDE DU
SYSTEME DE
CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE
SANS CAPTEUR**

Table des matières

Introduction	120
4.1 La commande de la turbine par l'hybride floue-Synergétique P&O MPPT algorithm sans capteur mécanique	120
4.1.1 La conception de régulateur flou pour la P&O MPPT	123
4.1.2 La conception et la simulation de régulateur synergétique de la vitesse pour hybride floue-synergétique P&O MPPT	124
4.2 Estimation de la vitesse du générateur 'MADASB'	126
4.2.1 Estimation de la vitesse de MADASB par un estimateur de type MRAS	127
4.2.1.1 Adaptation de MRAS au MADASB	128
4.4.2 Estimation de la vitesse de MADASB par EKF	130
4.4.3 Estimation de Ψ_{dp} et Ψ_{qp}	135
4.4.3.1 Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB par EKF	136
4.4.4 Simulation d'estimation des flux magnétiques de l'EP Ψ_{dp} et Ψ_{qp}	138
4.4.5 Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB (variable de façon considérable) par filtre de Kalman étendu EKF	139
4.5 Simulation d'intégration de machine avec une hybride floue P&O-synergétique MPPT	141
4.6 Comparaison entre hybride TSR-synergétique MPPT et hybride floue P&O-synergétique MPPT	145
Conclusion	147

Introduction

Les méthodes de suivi du point de puissance maximale, qu'on a discutées dans le chapitre précédent, telles que le TSR MPPT, incluent des algorithmes très efficaces et rapides. Cependant, le principal défi réside dans la nécessité de mesurer la vitesse du vent, ce qui peut être une tâche complexe. Pour mesurer la vitesse du vent, un anémomètre spécialisé est nécessaire. Cependant, cet appareil présente quelques limitations. Tout d'abord, il mesure la vitesse du vent en un seul point, à l'emplacement de l'anémomètre, ce qui ne représente pas la véritable vitesse moyenne du vent le long des pales de la turbine [Pao & Johnson, 2009]. De plus, l'anémomètre est généralement placé au sommet de la turbine, derrière les pales, ce qui signifie que la vitesse du vent qu'il mesure est inférieure à la vitesse réelle, car la vitesse du vent diminue lorsqu'elle traverse les pales de la turbine.

L'objectif principal de ce chapitre est de développer une méthode de commande de turbine qui appartient à la première catégorie qu'on a mentionnée, c'est-à-dire le MPPT sans capteur mécanique. Dans cette approche, la vitesse de la turbine est commandée sans recourir à des capteurs mécaniques pour mesurer la vitesse du vent et la vitesse du générateur. Cette approche présente plusieurs avantages. Elle préserve la rapidité et l'efficacité de l'algorithme tout en évitant le principal inconvénient lié à la présence de capteurs mécaniques.

4.1 La commande de la turbine par l'hybride floue-Synergétique P&O MPPT algorithme sans capteur mécanique

En ce qui concerne la deuxième partie de l'algorithme, qui consiste à obtenir le couple de référence, cette méthode est exactement la même que la méthode précédente, et la différence ne subsiste que dans la méthode d'obtention de la vitesse de référence.

Le P&O MPPT compte sur les informations de retour (feedback), à propos de la valeur mesurée ou estimée de la vitesse du générateur et de la puissance active générée. Puis, en ajoutant un pas à la vitesse mesurée précédente pour devenir la nouvelle vitesse de référence de la machine avec en observant le signe de la variation de la puissance active générée ΔP . Pour cette raison, il est connu sous le nom P&O (perturber et observer). Elle est connue sous un autre nom HCS (en anglais Hills Climb Search) [Mousa et al., 2019] [Singh & Ouhrouche, 2011].

Donc, l'algorithme P&O MPPT fonctionne en perturbant légèrement la vitesse du générateur éolien et en observant comment cela affecte la puissance de sortie. En se basant sur cette

observation, l'algorithme ajuste la charge connectée au générateur pour maximiser la puissance produite. Cela se fait en recherchant le point de fonctionnement optimal du générateur éolien, où la puissance produite est maximale compte tenu des conditions de vent [Beghdadi et al., 2019] [Beghdadi & Kouzi, 2022].

L'objectif principal de cette technique est d'atteindre au sommet de courbe puissance générée = f (vitesse du générateur), et ce point qui remplit le condition $dP/d\Omega=0$ est connu sous le nom MPP (en anglais Maximum Power Point). Donc si $\Delta P > 0$, cela signifie qu'on est sur la bonne voie et on doit continuer à ajouter le pas à la vitesse jusqu'à la variation de signe de ΔP devenir négatif là où on doit changer de signe de pas (Figure 4.1 et 4.2).

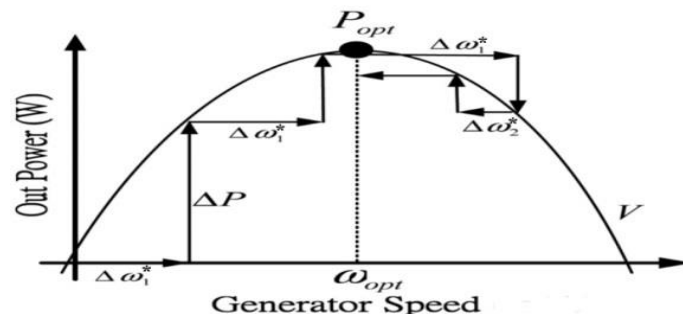


Figure 4.1 Le principe de P&O MPPT.

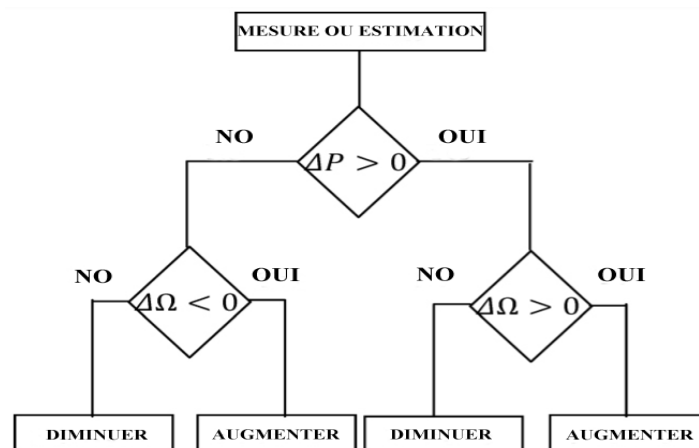


Figure 4.2 Algorithme de P&O MPPT.

L'algorithme P&O (Perturber et Observer) repose sur le principe de la technique de recherche-mémorisation-réutilisation [Singh & Ouhrouche, 2011] et a la particularité de bien fonctionner même sans une connaissance préalable du système, ce qui en fait une option d'intégration très flexible avec différentes éoliennes.

L'algorithme P&O MPPT est largement utilisé dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, en particulier dans les onduleurs utilisés pour connecter les générateurs éoliens au réseau électrique. En maximisant la production d'énergie éolienne, cet algorithme contribue à optimiser l'efficacité et les performances globales du système éolien.

Cependant, un problème se pose lors de l'utilisation de la version conventionnelle de l'algorithme P&O avec un pas fixe, à savoir le choix de la valeur du pas. Si un petit pas est choisi, l'algorithme devient très lent pour atteindre le point de puissance maximale (MPP). À l'inverse, en choisissant un pas trop grand, d'importantes oscillations de puissance active et réactive peuvent se produire en raison des variations rapides du signe du pas. Les deux cas ne sont pas acceptables, en particulier lors de l'alimentation d'un réseau isolé à partir d'une éolienne [Beghdadi & Kouzi, 2022].

Pour résoudre ce problème, deux options se présentent : abandonner complètement cet algorithme ou le modifier pour rendre le pas adaptatif [Beghdadi et al., 2019]. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour rendre le pas variable et adaptatif en fonction de la distance entre le point de puissance actuel et le point de puissance maximum. Cependant, la méthode la plus connue et couramment utilisée est l'utilisation de la logique floue (Fuzzy). En utilisant la logique floue, de nouveaux paramètres peuvent être ajoutés pour estimer cette distance, au lieu de simplement déterminer si le point de puissance actuel se situe à droite ou à gauche du point de puissance maximum.

La logique floue est une technique de commande et de régulation des systèmes techniques qui ne nécessite pas de modélisation mathématique précise. Elle permet de définir des stratégies de commande en utilisant un langage naturel. Les variables d'entrée physiques (par exemple, la température) sont rendues floues, c'est-à-dire qu'elles sont converties en valeurs floues à l'aide de fonctions d'appartenance. Ensuite, ces variables sont traitées en fonction de règles linguistiques. Toutefois, pour obtenir des valeurs de sortie nettes à partir du module flou, une étape finale de défuzzification est nécessaire.

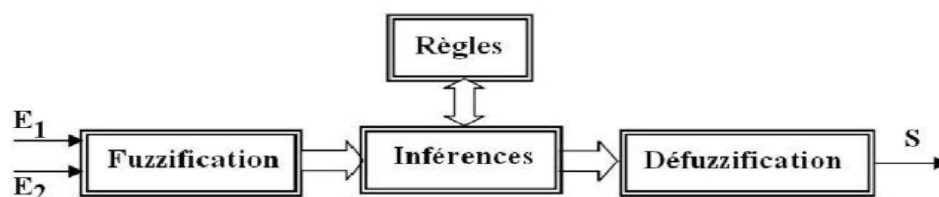


Figure 4.3 Schéma synoptique d'un régulateur flou.

4.1.1 La conception de régulateur flou pour la P&O MPPT

Il est envisageable de se référer à une version étendue ou améliorée de l'algorithme MPPT qui tire parti des techniques de logique floue (fuzzy logic) pour améliorer ses performances. La logique floue est une branche de l'intelligence artificielle qui permet de prendre des décisions en utilisant des variables linguistiques plutôt que des valeurs binaires.

Dans le contexte de l'énergie éolienne, l'utilisation de la logique floue dans l'algorithme MPPT pourrait permettre une meilleure adaptation aux conditions variables du vent. Par exemple, des paramètres tels que la vitesse du vent, la direction du vent, et d'autres facteurs pourraient être évalués de manière floue afin d'ajuster plus précisément la charge du générateur.

En utilisant la théorie floue, l'algorithme fonctionne avec un pas variable et adaptatif. Le pas est plus grand lorsque le point de puissance réel est loin du point de puissance maximale (MPP) et devient plus petit à mesure qu'il se rapproche du MPP.

La méthode proposée repose sur l'estimation de l'erreur (e) ainsi que de la dérivée de cette erreur (ce).

Les étapes de conception de la commande floue sont les suivantes [Beghdadi et al., 2019] :

1. La mesure de ΔP et $\Delta \Omega$, qui servent d'entrées au régulateur flou.
2. La fuzzification des entrées, c'est-à-dire la transformation des valeurs numériques en termes linguistiques tels que N (négatif), P (positif), S (petit), M (moyen), B (grand), et Z (égal à 0).
3. L'utilisation d'une table de règles, généralement sous forme de tableau, qui détermine les actions à prendre en fonction des valeurs floues des entrées.
4. La défuzzification de la sortie pour obtenir une valeur numérique appropriée pour le pas.
5. La mise à jour de la vitesse de référence Ω^* , où $\Omega_{\text{nouveau}} = \Omega_{\text{ancienne}} + \text{le pas}$.
6. Répéter le processus depuis l'étape 1.
7. Ces étapes permettent à l'algorithme d'ajuster dynamiquement le pas en fonction des conditions actuelles, ce qui contribue à améliorer son efficacité dans la recherche du point de puissance maximale.

$dP \backslash d\Omega$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	Z	Z	NB	NB	NB	NB
NM	Z	Z	Z	NM	NM	NM	NM

NS	NS	Z	Z	NS	NS	NS	NS
Z	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
PS	PM	PS	PS	PS	Z	Z	Z
PM	PM	PM	PM	Z	Z	Z	Z
PB	PB	PB	PB	Z	Z	Z	Z

Tableau 4.1 Table des règles du régulateur flou.

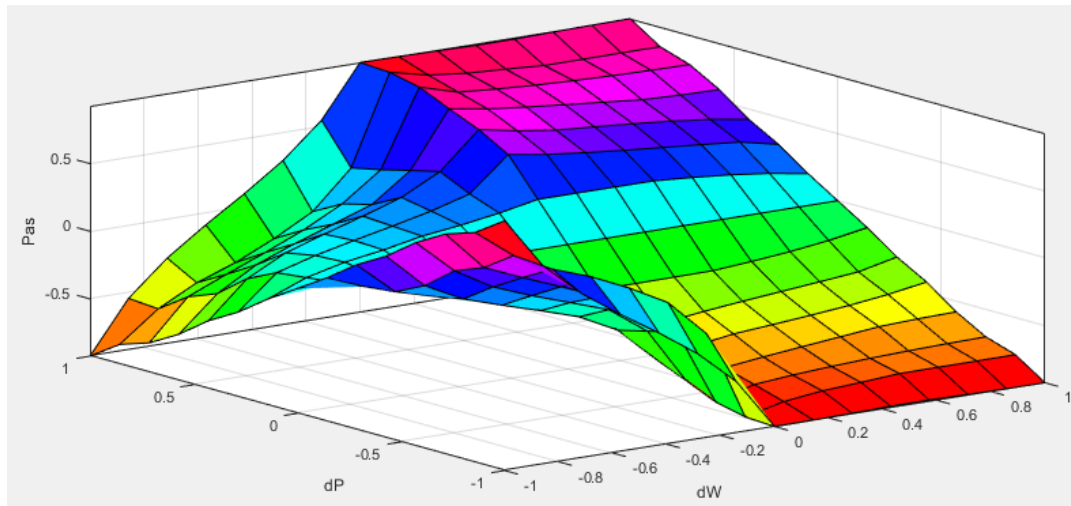


Figure 4.4 Surface des règles du régulateur flou.

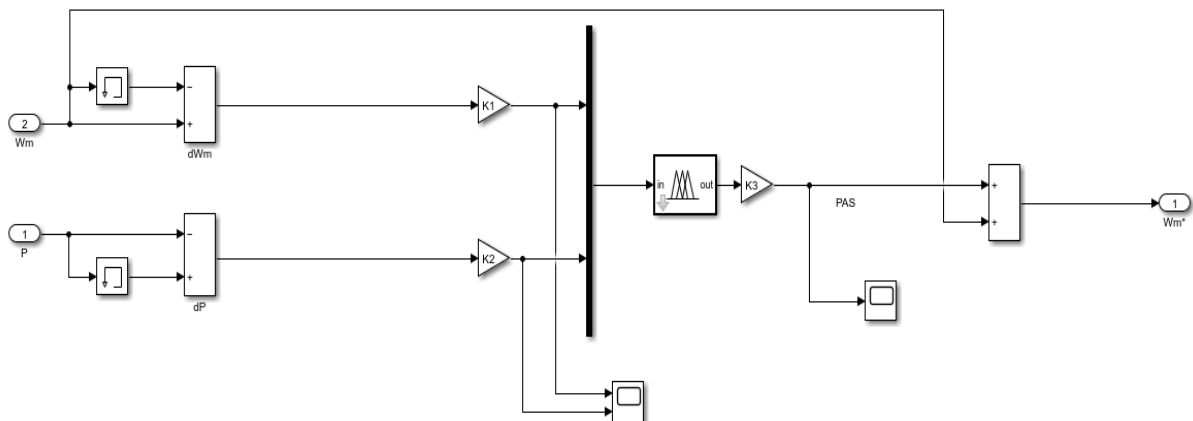


Figure 4.5 Modèle de Simulink® du régulateur flou.

4.1.2 La conception et la simulation de régulateur synergétique de la vitesse pour hybride floue-synergétique P&O MPPT

Aucun changement fondamental ne surviendra dans le régulateur, peu importe l'algorithme que on utilise. Les étapes resteront essentiellement les mêmes, et on parviendra au même résultat, quel que soit l'algorithme. En conséquence, on constate que :

$$C_{em_{P\&O}}^* = C_{em_{TSR}}^* \quad 4.1$$

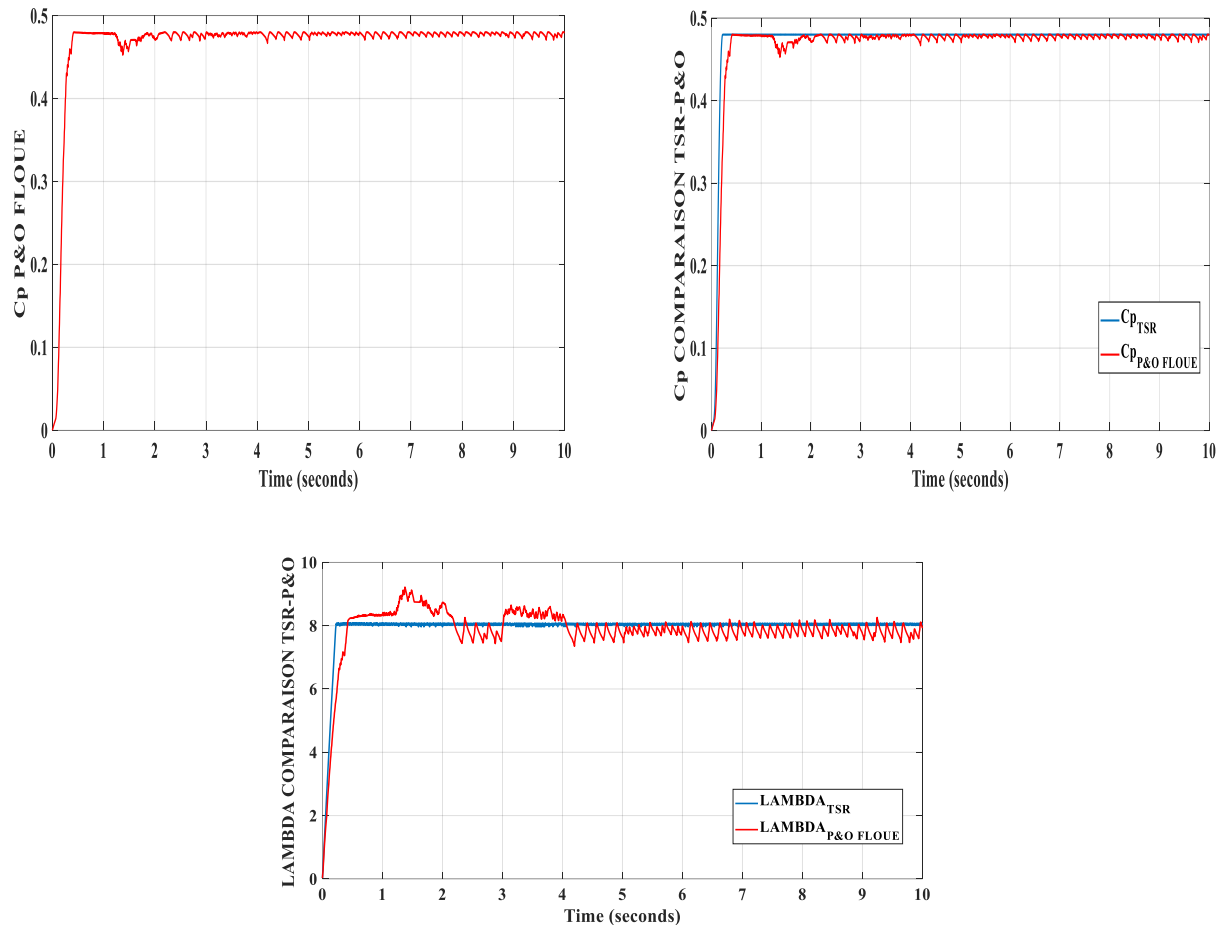


Figure 4.6 C_p de l'hybride floue-synergétique MPPT, Comparaison de C_p et λ de l'hybride TSR-synergétique MPPT et de l'hybride floue-synergétique MPPT.

Les performances de cet algorithme sont comparables à celles de l'algorithme précédent 'TSR', car le coefficient de puissance C_p ainsi que λ restent relativement constants. Il peut y avoir des fluctuations dans les paramètres de performance de la turbine, tels que C_p et λ , lors de l'utilisation de l'algorithme hybride floue-synergétique MPPT. Cela est tout à fait normal, en particulier en cas de variations brusques et importantes de la vitesse du vent sur une courte période ($dv/dt \gg \gg$). L'algorithme peut être affecté et reprendre le processus de recherche de la vitesse de référence, ce qui peut entraîner certaines fluctuations. Cependant, ces fluctuations sont acceptables, surtout lorsque l'on considère les avantages de cet algorithme, notamment le fait qu'il ne nécessite pas de connaître les dimensions de l'éolienne ni l'utilisation d'un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent.

L'énergie produite par l'utilisation de l'algorithme hybride floue-synergétique MPPT est égale à $E_{\text{aer floue-P\&O}} = 826$ Joules, ce qui est très proche de la valeur obtenue en utilisant l'algorithme hybride TSR-synergétique MPPT. Par conséquent, on obtient presque la même quantité d'énergie produite en utilisant cet algorithme, tout en éliminant le besoin d'un anémomètre.

4.2 Estimation de la vitesse du générateur 'MADASB'

Après avoir trouvé une solution au problème de l'utilisation d'un capteur mécanique pour mesurer la vitesse du vent, on va maintenant aborder la résolution du problème lié à l'utilisation d'un capteur mécanique pour mesurer la vitesse du générateur.

La détermination de la vitesse d'une n'importe machine électrique peut être réalisée à l'aide de différentes techniques comme :

- ❖ **Capteur de vitesse** : La méthode la plus courante consiste à utiliser un capteur de vitesse dédié, tel qu'un codeur incrémental ou un capteur à effet Hall, directement monté sur l'arbre de la machine électrique. Le capteur fournit des informations en temps réel sur la vitesse de rotation.
- ❖ **Observateur de vitesse** : Certains types de machines électriques, comme les moteurs synchrones ou les machines à courant continu, peuvent utiliser des observateurs de vitesse basés sur des modèles mathématiques pour estimer la vitesse. Ces observateurs utilisent des équations électriques et mécaniques pour estimer la vitesse en analysant les courants et tensions mesurés.
- ❖ **Analyse du courant** : Dans certaines applications, il est possible d'estimer la vitesse en analysant les caractéristiques du courant électrique absorbé par la machine. Des techniques telles que l'analyse de la fréquence du spectre du courant ou l'utilisation de transformées de Fourier peuvent être utilisées pour extraire des informations sur la vitesse de rotation.
- ❖ **Estimation de vitesse par modèle** : Des techniques d'estimation de vitesse basées sur des modèles mathématiques peuvent être utilisées pour estimer la vitesse d'une machine électrique. Ces modèles utilisent des équations électromagnétiques et mécaniques pour représenter le comportement de la machine et estimer la vitesse en fonction des entrées mesurées.

Il est important de noter que le choix de la méthode d'estimation de vitesse dépend du type de machine électrique, des contraintes de coût, de la précision requise et des conditions spécifiques d'application. Il peut être nécessaire d'utiliser une combinaison de plusieurs techniques pour obtenir une estimation précise de la vitesse dans certaines situations.

À partir des sections précédentes, on a appris que l'algorithme MPPT nécessite la mesure de la vitesse de la machine pour fonctionner correctement. Historiquement, cette vitesse était mesurée à l'aide d'un capteur mécanique, un tachymètre, qui était couplé au générateur. Cependant, en raison de considérations économiques liées au coût et de contraintes techniques, notamment la fiabilité et les limitations d'espace dans le mât éolien, on se tourne de plus en plus vers l'estimation de cette vitesse sans recourir à un capteur.

Il existe divers estimateurs de vitesse, tels que le Model Reference Adaptive System (MRAS), mais leurs performances ne sont pas toujours suffisantes pour être utilisées efficacement et avec une grande précision, en particulier dans le domaine des éoliennes. Pour améliorer les performances des estimateurs de vitesse, l'utilisation du filtre de Kalman étendu est courante. Ce filtre peut fournir des estimations de vitesse très fiables, même en présence de bruit [Serhoud & Benattous, 2013].

4.2.1 Estimation de la vitesse de MADASB par un estimateur de type MRAS

En plus du filtre de Kalman étendu, le MRAS est le filtre le plus couramment utilisé pour estimer la vitesse mécanique des machines électriques, il est donc nécessaire de fournir quelques détails concernant ce filtre ainsi que sa construction et son adaptation au MADASB.

Un estimateur MRAS est utilisé dans les systèmes de commande avancée pour estimer les paramètres d'un modèle de référence. Le but principal de cet estimateur est d'ajuster les paramètres du modèle afin de les faire correspondre le mieux possible aux caractéristiques d'un système réel. Cette correspondance permet ensuite de concevoir un régulateur adaptatif capable de suivre les variations et les perturbations du système réel.

L'estimateur MRAS fonctionne en utilisant un modèle de référence qui estime le comportement du système réel. Les paramètres du modèle de référence sont ajustés à l'aide d'un algorithme d'adaptation qui compare les sorties estimées du modèle avec les sorties réelles du système. L'algorithme d'adaptation utilise cette différence pour mettre à jour les paramètres du modèle de référence, de sorte qu'il se rapproche progressivement des caractéristiques du système réel.

L'estimateur MRAS peut être utilisé dans différents domaines, tels que la commande de machines électriques, les systèmes de commande de processus et les systèmes de commande de véhicules. Il permet d'obtenir une meilleure précision et une meilleure robustesse en adaptant les paramètres du modèle de référence aux variations et aux perturbations du système réel.

4.2.1.1 Adaptation de MRAS au MADASB

Le MRAS est un système d'identification de modèle qui est couramment utilisé pour estimer les paramètres électriques d'une machine électrique. Dans le cas des machines MADASB, où il n'y a pas de capteur de position directement disponible, le MRAS peut être utilisé pour estimer la position du rotor en utilisant les mesures disponibles, telles que le courant et la tension.

L'adaptation de MRAS pour une MADASB implique généralement les étapes suivantes :

- **Estimation du flux statorique :** Le MRAS est utilisé pour estimer le flux statorique de la machine en se basant sur les mesures de courant et de tension. Le flux statorique est essentiel pour la commande vectorielle de la machine asynchrone.
- **Estimation de la position du rotor :** À partir de l'estimation du flux statorique, la position du rotor peut être déduite. Cela peut être réalisé en utilisant des modèles mathématiques ou des techniques de traitement du signal.

L'estimateur MRAS a été adapté pour la MADASB à travers plusieurs articles publiés antérieurement, mais le plus célèbre de ces articles est celui de [Zhu et al., 2011], puisque les auteurs de cet article ont traité cet estimateur de manière très détaillée et avec toutes les équations mathématiques nécessaires, donc pour plus d'information consulter cet article.

Le modèle d'estimateur lorsqu'il est adapté pour être utilisé avec cette machine électrique est illustré dans l'image ci-dessous

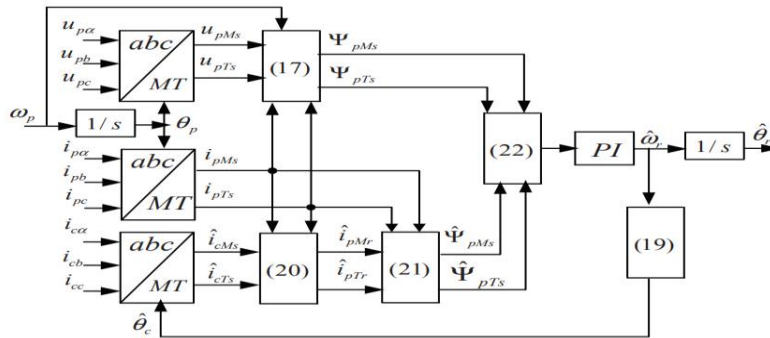


Figure 4.7 Modèle de MRAS pour la MADASB.

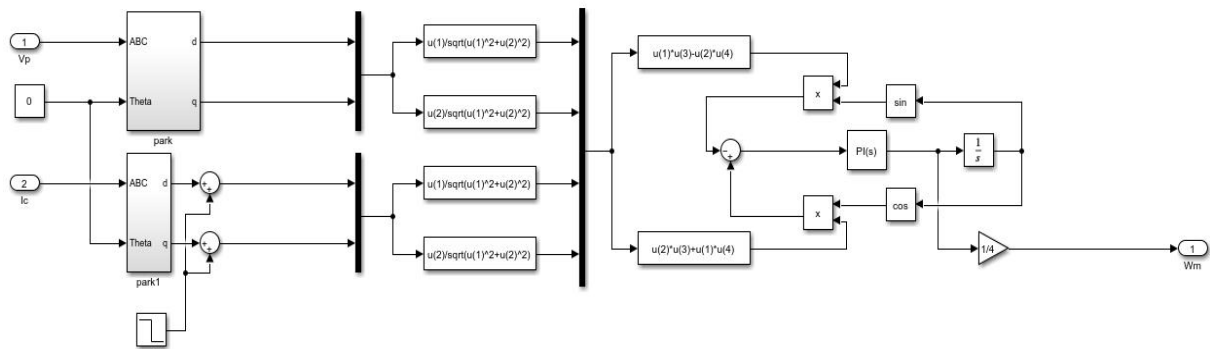


Figure 4.8 Bloc de MRAS sous SIMULINK®.

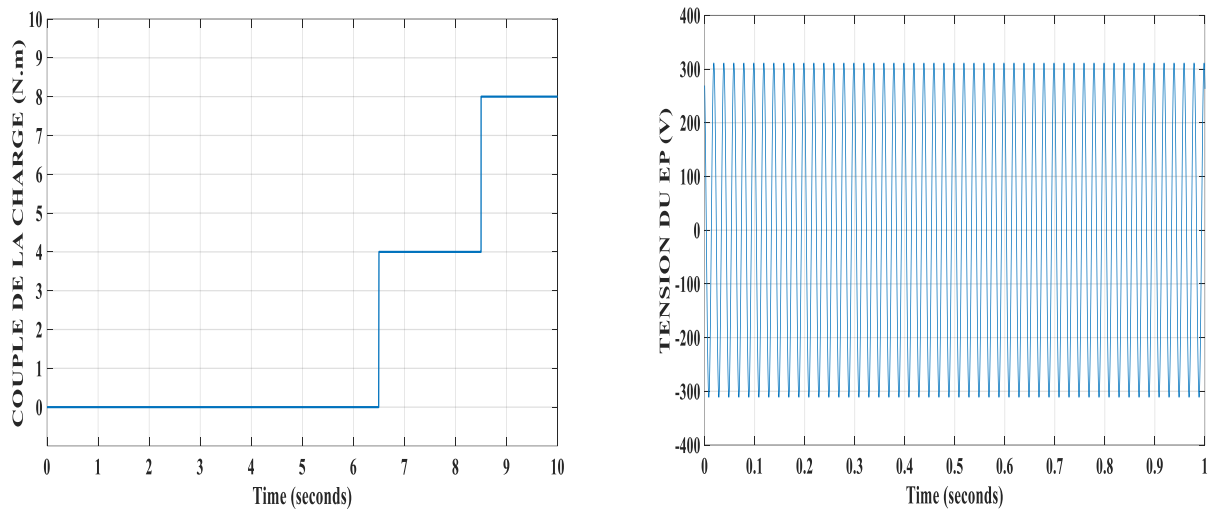
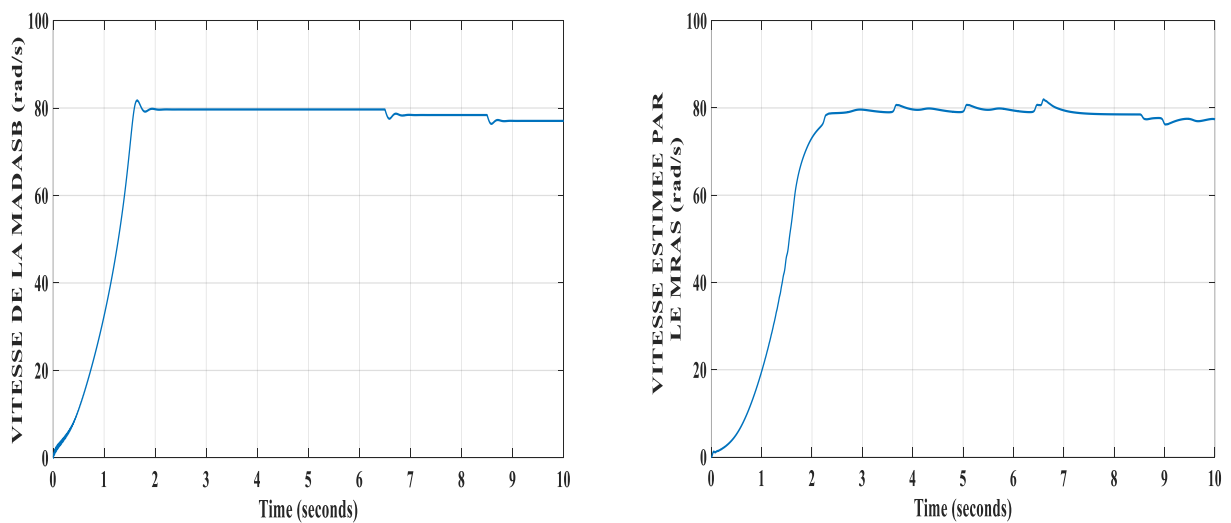
Figure 4.9 Couple de charge et la tension V_p .

Figure 4.10 Vitesse réelle de la machine, la vitesse estimée par le MRAS.

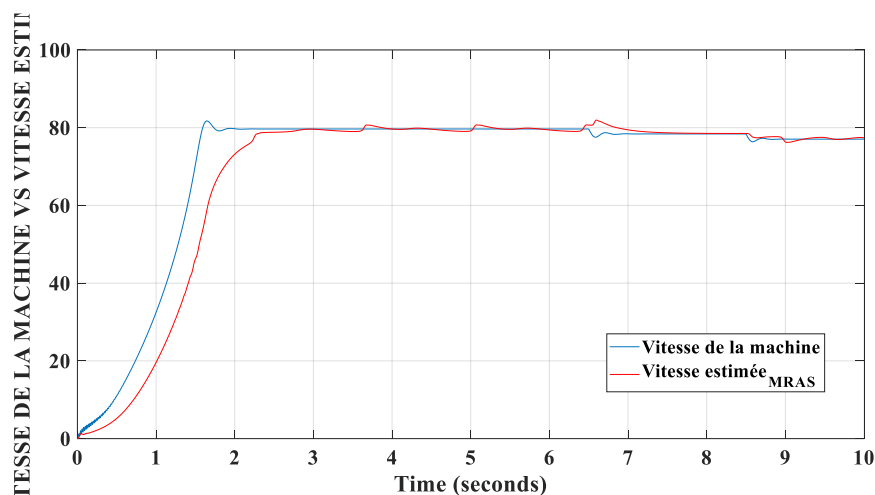


Figure 4.11 vitesse estimée par le MRAS par rapport à vitesse réelle de la MADASB.

4.4.2 Estimation de la vitesse de MADASB par EKF

Lorsqu'on applique un filtre de Kalman pour estimer les paramètres d'un système, la première étape consiste à modéliser le problème. Cependant, il arrive que les équations nécessaires pour modéliser le problème ne soient pas linéaires. Dans de tels cas, l'application directe du filtre de Kalman classique n'est plus possible. Heureusement, il existe une extension du filtre de Kalman, appelée le filtre de Kalman étendu (EKF), qui permet de traiter les systèmes non linéaires.

Le filtre de Kalman étendu est une adaptation du filtre de Kalman classique, conçue spécifiquement pour estimer l'état d'un système dynamique non linéaire. Alors que le filtre de Kalman classique excelle dans la modélisation des systèmes linéaires, il montre ses limites lorsque des non-linéarités sont présentes.

L'EKF résout ce problème en utilisant une approximation linéaire du système non linéaire. Il suit le même concept de base que le filtre de Kalman classique, en effectuant une prédiction de l'état futur basée sur le modèle dynamique du système et en mettant à jour cette prédiction en fonction des mesures. Au départ le filtre de Kalman servait à estimer le vecteur des variables d'état des systèmes linéaires. Plus tard, il est étendu par la NASA dans [McElhoe, 1966] pour être utilisé également pour les systèmes non linéaires.

La principale différence réside dans la manière dont l'état est propagé à travers les équations non linéaires. Au lieu d'utiliser directement ces équations non linéaires, l'EKF les approxime généralement par une expansion de Taylor au premier ordre (linéarisation). Cela permet

d'obtenir des équations linéaires, qui peuvent être traitées à l'aide du formalisme du filtre de Kalman classique.

Dans le contexte du modèle dynamique des machines électriques, l'ajout de la vitesse de la machine en tant qu'état variable du vecteur d'état transforme le système en un système non linéaire, car la vitesse devient une variable influente [Kim et al., 1994].

Le processus de l'algorithme EKF peut être résumé en cinq étapes [Serhoud & Benattous, 2013] [Gunabalan et al., 2009] (voir figure 4.12) :

1. Sélectionner le modèle d'état continu du système et le discrétiser pour travailler en temps discret.
2. Initialiser la procédure d'estimation avec le vecteur d'état $\hat{X}_k$, puis prédire le prochain état estimé et les vecteurs de sortie à l'aide du modèle EKF $\hat{X}_{k+1}$, $\hat{Y}_{k+1}$.
3. Définir les matrices de bruit Q et R , ainsi que la matrice de covariance de prédiction P .
4. Calculer le gain de Kalman K et l'utiliser pour mettre à jour le vecteur d'état estimé $\hat{Y}_{k+1}$ en fonction de l'erreur entre le vecteur mesuré et le vecteur estimé par l'EKF Y_e .
5. Ajouter l'erreur d'estimation au vecteur d'état courant EKF_e dans le modèle EKF, puis mettre à jour la matrice P . Ensuite, revenir à l'étape 2 pour itérer le processus.

Ces étapes permettent au filtre de Kalman étendu de gérer efficacement les systèmes non linéaires en utilisant une linéarisation locale pour les modèles.

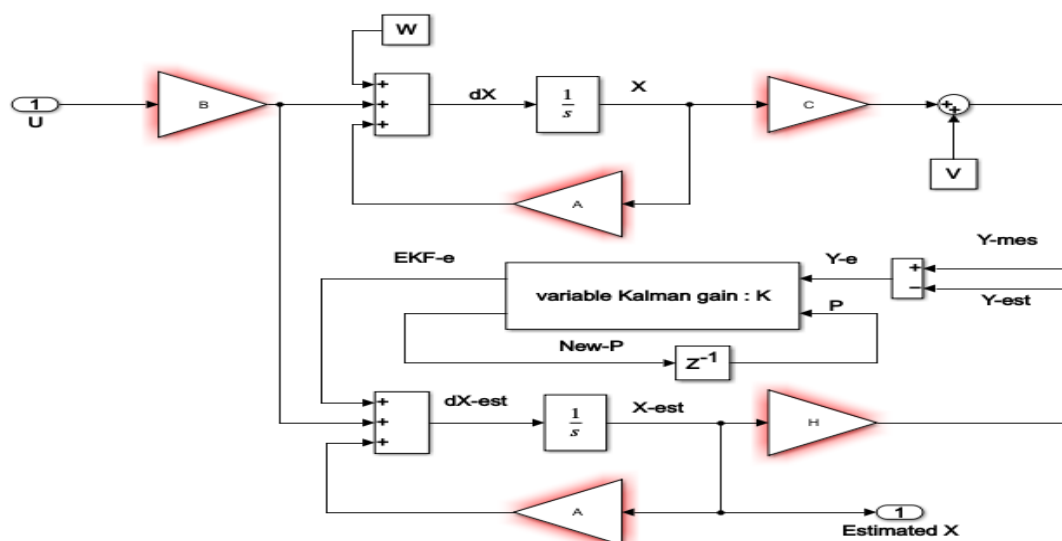


Figure 4.12 Structure de filtre de Kalman étendu EKF.

1. Le choix du modèle d'état de la MADASB

Dans cette phase, les flux magnétiques et la vitesse de la machine sont considérés comme des vecteurs d'état. Pour effectuer cette estimation, il est nécessaire de mesurer les composantes dq du flux magnétique d'EP (Ψ_{dp} et Ψ_{qp}). Bien que ces composantes ne soient directement mesurables que par un capteur à effet Hall, elles peuvent être estimées de manière fiable à l'aide d'un estimateur.

Afin de prendre en compte les imperfections et les variations de la machine réelle, un bruit est ajouté au modèle de la machine. En intégrant la vitesse de la machine en tant que variable d'état, les équations d'état sont reformulées comme suit :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + W \\ Y = CX + V \end{cases} \quad 5.15$$

Avec:

- W : représente les bruits du système, utilisés pour rendre le modèle plus proche de la réalité.
- V : désigne les bruits de mesure, reflétant l'incertitude associée aux mesures ou aux estimations. Les deux types de bruits sont modélisés comme des bruits gaussiens avec une moyenne nulle.
- X : est le vecteur des variables d'état, où :

$$X = \begin{pmatrix} \Psi_{dp} \\ \Psi_{qp} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \\ \Psi_{dc} \\ \Psi_{qc} \\ \Omega \end{pmatrix};$$

- U : est le vecteur des entrées, où :

$$U = \begin{Bmatrix} V_{dp} \\ V_{qp} \\ 0 \\ 0 \\ V_{dc} \\ V_{qc} \\ C_r \end{Bmatrix};$$

- B : est la matrice de la commande, où :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix};$$

- C : est la matrice des sorties, où :

$$C = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix};$$

- A : est la matrice d'état, c'est la même matrice A mentionné dans la représentation d'état de la MADASB mais elle s'ajoute à une ligne et une colonne pour devenir :

$$A = \begin{Bmatrix} \frac{-R_p \sigma_c}{A_p} & \omega_p & \frac{R_p M_p}{A_p L_r} & 0 & \frac{R_p A_1}{A_p} & 0 & 0 \\ -\omega_p & \frac{-R_p \sigma_c}{A_p} & 0 & \frac{R_p M_p}{A_p L_r} & 0 & \frac{R_p A_1}{A_p} & 0 \\ \frac{R_r M_p}{A_r L_p} & 0 & \frac{-R_r}{A_r} & \omega_r & \frac{R_r M_c}{A_r L_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r M_p}{A_r L_p} & -\omega_r & \frac{-R_r}{A_r} & 0 & \frac{R_r M_c}{A_r L_c} & 0 \\ \frac{-R_r A_2}{A_c} & 0 & \frac{R_c M_c}{A_c L_r} & 0 & \frac{-R_c \sigma_p}{A_c} & \omega_c & 0 \\ 0 & \frac{-R_r A_2}{A_c} & 0 & \frac{R_c M_c}{A_c L_r} & -\omega_c & \frac{-R_c \sigma_p}{A_c} & 0 \\ -\frac{PA_3 \Psi_{qc}}{J} & \frac{PA_3 \Psi_{dc}}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{f}{J} \end{Bmatrix}, A_3 = \frac{M_p M_c}{L_p L_c L_r - M_p^2 L_c - M_c^2 L_p}.$$

2. Discrétisation du modèle EKF

Pour obtenir une estimation plus précise, on utilise l'EKF à temps discret. Les équations d'état du modèle EKF en temps discret sont reformulées comme suit :

$$\begin{cases} \hat{X}_{k+1} = A_d \hat{X}_k + B_d U \\ \hat{Y}_{k+1} = C_d \hat{X}_k \end{cases} \quad 5.16$$

Où :

- $A_d = I + T_s A$, $B_d = T_s B$, $C_d = C$, I : est la matrice d'identité et T_s : est le temps d'échantillonnage.

3. Définissez la matrice de bruit Q , R et la matrice de prédiction de covariance P

Les matrices Q , R et P sont formées comme suit :

$$Q = \alpha \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \beta \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{k+1} = J_d P_k (J_d)^T + Q$$

Avec:

- α et β : sont des paramètres d'EKF ;
- J_d est la matrice jacobienne du système discret qu'est la même qu' A_d mais la dernière colonne sera :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_1 T_s \hat{\Psi}_{qr} \\ P_1 T_s \hat{\Psi}_{dr} \\ -P_1 T_s \hat{\Psi}_{qc} \\ P_1 T_s \hat{\Psi}_{dc} \\ 1 - \frac{1}{J} \end{bmatrix}.$$

4. Calculez le gain de Kalman K et le vecteur d'erreur d'estimation EKF_e

Le gain de Kalman est la clé des performances de l'EKF où il permet à l'estimateur de converger efficacement et ce gain est donné par :

$$\begin{cases} K_{k+1} = P_{k+1} (C_d)^T [C_d P_{k+1} (C_d)^T + R]^{-1} \\ EKF_e = K_{k+1} (Y_{mes} - \hat{Y}_{k+1}) \end{cases} \quad 5.17$$

5. Mis à jour de P_{k+1} et $\hat{X}_k$

$$\begin{cases} (P_{k+1})_{nouveau} = (I - K_{k+1} C_d) P_{k+1} \\ (\hat{X}_k)_{nouveau} = \hat{X}_k + EKF_e \end{cases} \quad 5.18$$

4.4.3 Estimation de Ψ_{dp} et Ψ_{qp}

Les flux Ψ_{dp} et Ψ_{qp} doivent être mesurés à l'aide d'un capteur tel qu'un capteur à effet Hall, ce qui peut être difficile dans la plupart des cas. Cependant, il existe des méthodes d'estimation des flux qui permettent de les utiliser dans le vecteur des sorties mesurées Y_{mes} de l'EKF.

Il existe plusieurs structures d'estimateurs de flux, notamment le modèle basé sur la tension avec ou sans correction de la composante continue, l'estimateur d'état dynamique et l'estimateur d'état stable. Dans notre cas, l'estimateur de flux en régime permanent est le choix optimal, car il produit de bons résultats, en particulier après la phase de démarrage, et en raison de la fréquence d'alimentation fixe de l'EP, ce qui simplifie le processus d'estimation en utilisant un repère unique.

Les équations de l'estimateur de flux en régime permanent sont formulées comme suit :

$$\begin{cases} \hat{\Psi}_{dp} = \frac{V_{qp} - R_p I_{qp}}{\omega_p} \\ \hat{\Psi}_{qp} = \frac{R_p I_{dp} - V_{dp}}{\omega_p} \end{cases} \quad 5.19$$

4.4.3.1 Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB par EKF

On utilisera les mêmes conditions de simulation que précédemment, où on a estimé la vitesse de la machine électrique à l'aide de MRAS. Cependant, cette fois, on estimera cette vitesse à l'aide d'un filtre de Kalman étendu.

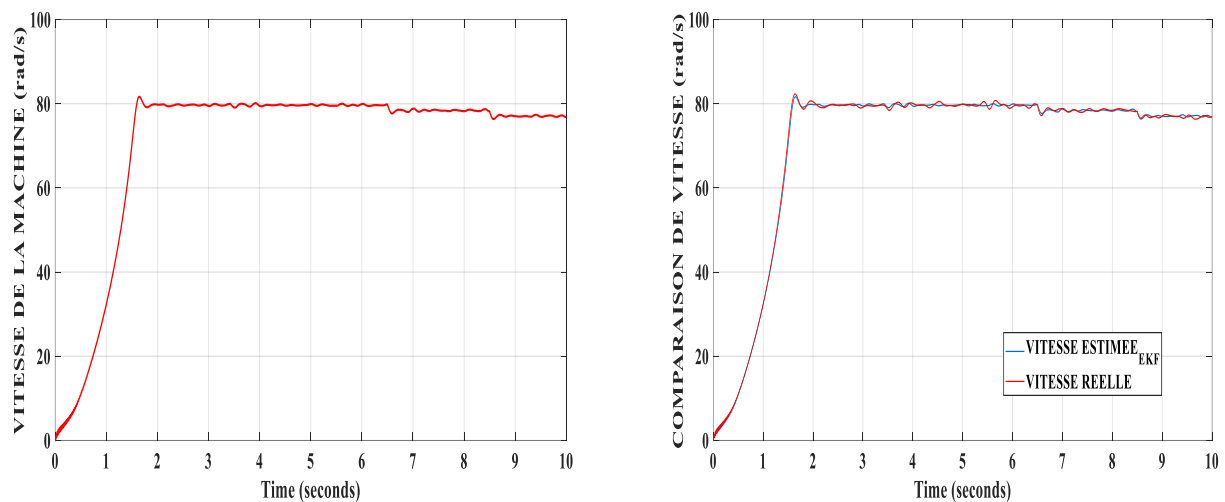


Figure 4.13 Vitesse réelle de la machine, comparaison entre la valeur réelle et la valeur estimée par l'EKF.

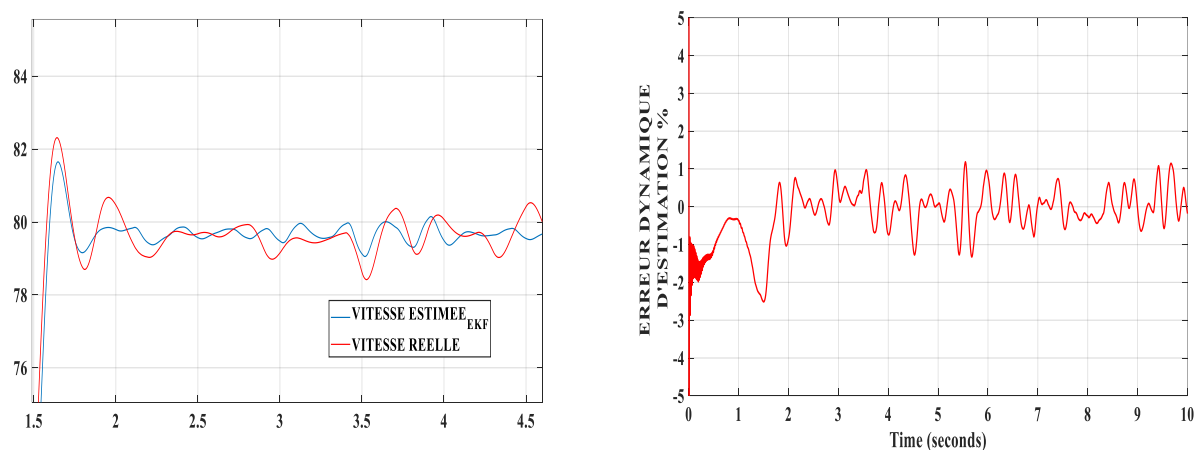


Figure 4.14 Zoom sur la figure de comparaison de vitesses ($1.5s < t < 4.6s$), l'erreur dynamique de l'estimation en %.

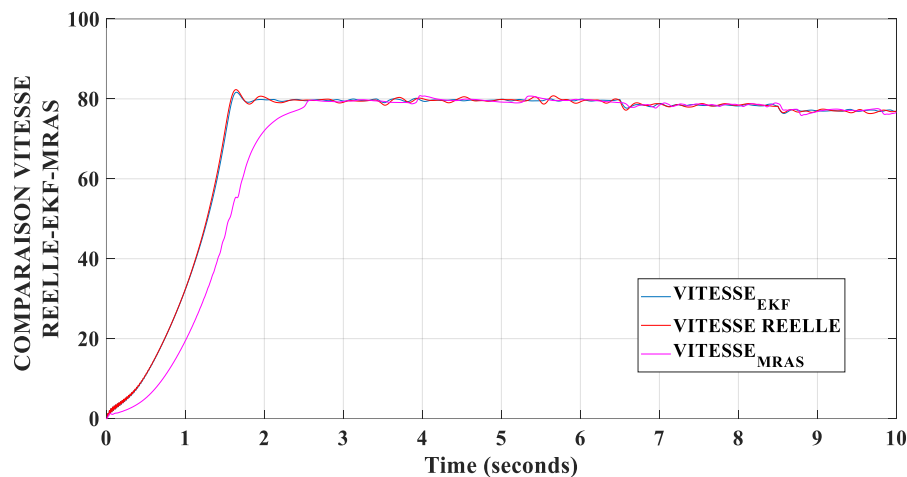


Figure 4.15 comparaison de vitesse estimée par l'EKF, MRAS et la vitesse réelle.

Comme l'illustrent les figures précédentes, l'utilisation du filtre de Kalman permet de mesurer la vitesse de la machine de manière stable et avec des performances exceptionnelles, sans nécessiter l'utilisation d'un capteur mécanique à haut rendement.

L'estimation de la vitesse de la machine est réalisée en un temps très court, avec un délai presque inexistant entre la vitesse réelle et la vitesse estimée par le filtre. De plus, le filtre suit la vitesse avec une grande efficacité et une précision extrême. Les fluctuations observées tant dans la vitesse réelle de la machine électrique que dans la vitesse estimée par le filtre sont principalement dues à la présence d'un bruit dans le modèle mathématique de la machine et dans les mesures des variables d'état. Cela permet de rendre les estimations plus proches de la réalité, en particulier pour une machine comportant deux enroulements au stator.

L'erreur dynamique d'estimation de l'EKF reste très faible, même dans des conditions exigeantes. Par exemple, la plus grande valeur d'erreur, qui ne s'est produite qu'une fois en dix secondes, était inférieure à 3 %, ce qui est excellent et indique une précision élevée. Par conséquent, il est tout à fait raisonnable de compter sur ce filtre pour estimer efficacement et avec une grande précision la vitesse de la MADASB.

Lorsque l'on compare les résultats obtenus avec ce filtre à ceux obtenus avec le MRAS, l'EKF se distingue à tous égards, en particulier dans les situations de transition de la machine, où il se révèle le plus précis et le plus rapide pour estimer la vitesse de la machine.

Ce point est particulièrement crucial lorsque la machine est utilisée dans des éoliennes pour la production d'énergie électrique, car la vitesse du vent peut varier considérablement. Par

conséquent, lorsque cette vitesse change, la machine doit également adapter sa vitesse de manière significative. En conséquence, la machine passe fréquemment par des phases de transition.

4.4.4 Simulation d'estimation des flux magnétiques de l'EP Ψ_{dp} et Ψ_{qp}

Lorsqu'il est nécessaire de mesurer les composants dq du flux magnétique de l'enroulement de puissance EP, on a utilisé un estimateur basé sur le régime permanent de la machine pour évaluer cette estimation. Les résultats obtenus étaient les suivants :

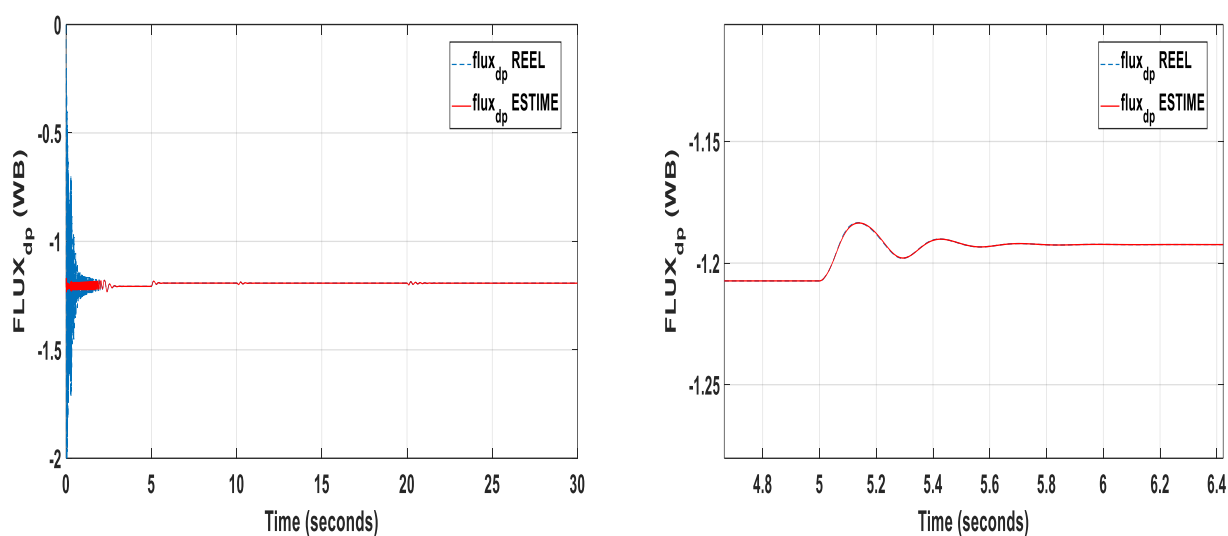


Figure 4.16 Estimation de Ψ_{dp} , et le zoom ($4.9s < t < 6.45s$).

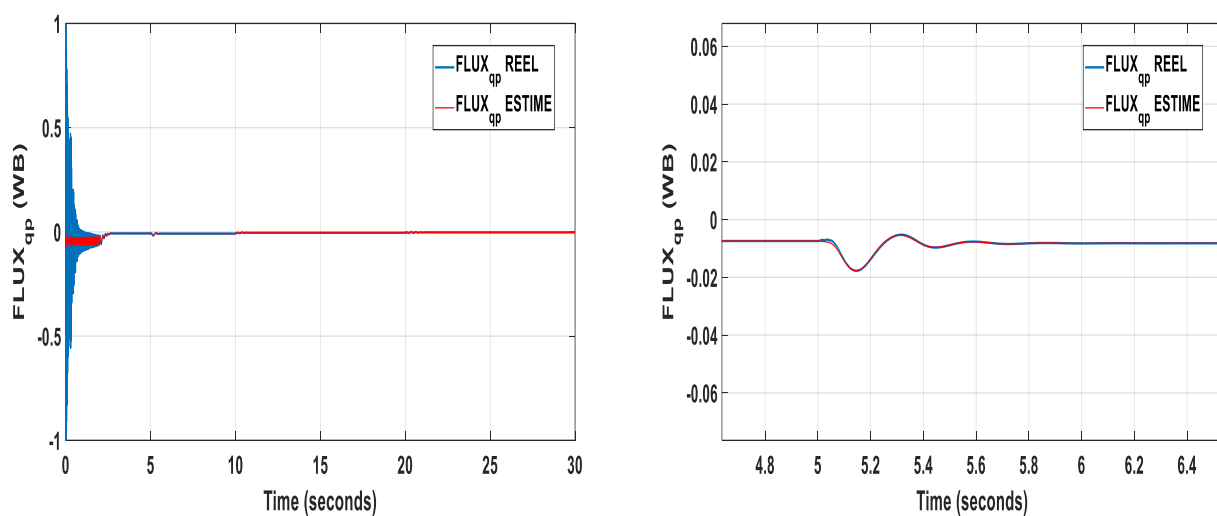


Figure 4.17 Estimation de Ψ_{qp} , et le zoom ($4.9s < t < 6.5s$).

Cet estimateur a donné des résultats très satisfaisants, en particulier dans le régime permanent de la MADASB, où il a réussi à estimer de manière persistante et précise le flux magnétique de l'EP. Malgré sa simplicité, la simulation a montré qu'il produisait de bons résultats de haute qualité. Par conséquent, on peut avoir confiance en cet estimateur pour fournir une estimation précise du flux magnétique de l'EP, ce qui permet à l'EKF de fournir à son tour une estimation précise de la vitesse de la MADASB pour la MPPT et le reste de la commande.

4.4.5 Simulation d'estimation de la vitesse de la MADASB (variable de façon considérable) par filtre de Kalman étendu EKF

À présent, on va intégrer le filtre de Kalman étendu à la MADASB pour estimer sa vitesse sans avoir besoin de capteurs mécaniques, même en présence de bruits significatifs à la fois dans le modèle de la machine et dans le vecteur de mesures (voir la figure 4.18).

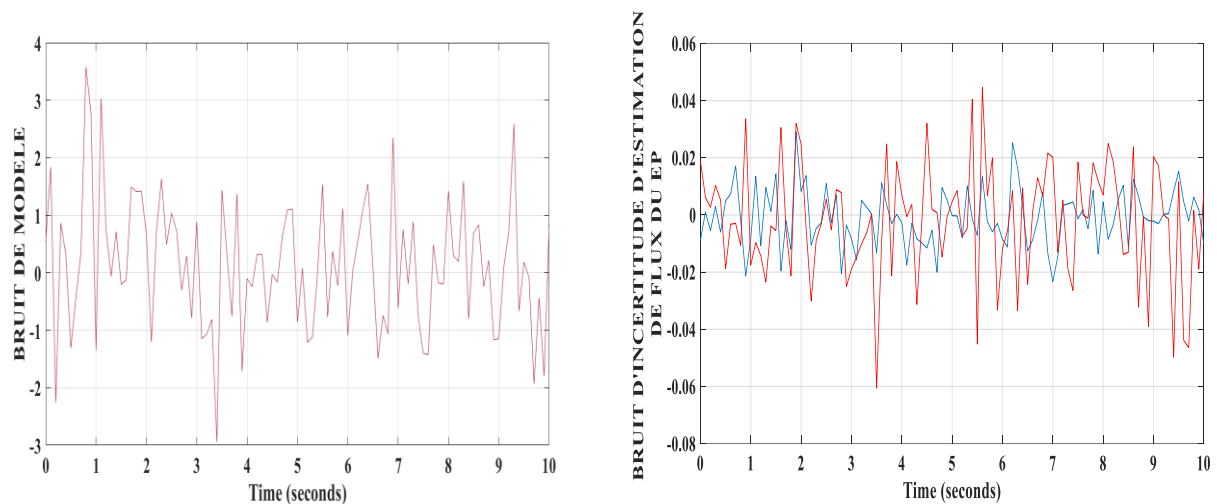


Figure 4.18 Les bruits du modèle de la MADASB et l'incertitude d'estimation de vecteur de mesure.

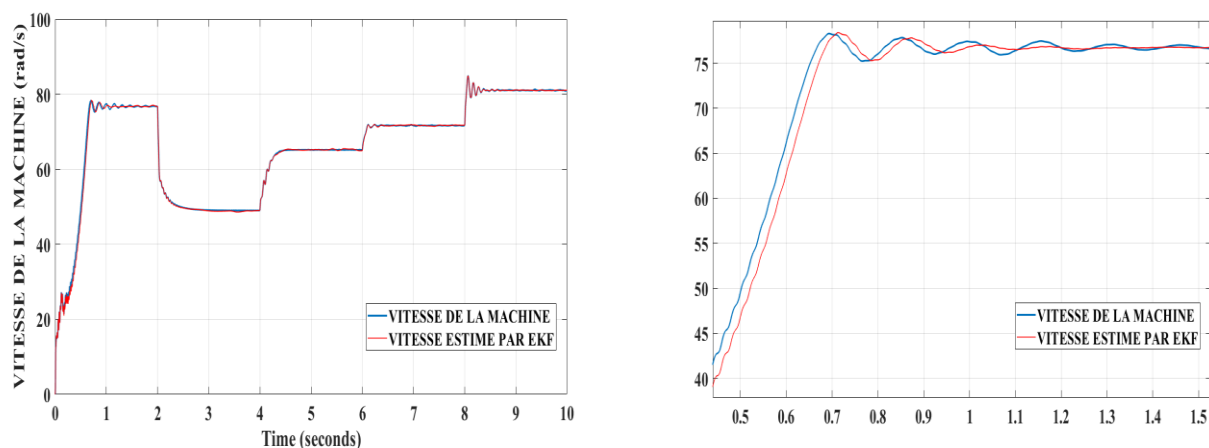


Figure 4.19 Estimation de la vitesse de la MADASB par EKF, zoom ($0.4s < t < 1.6s$).

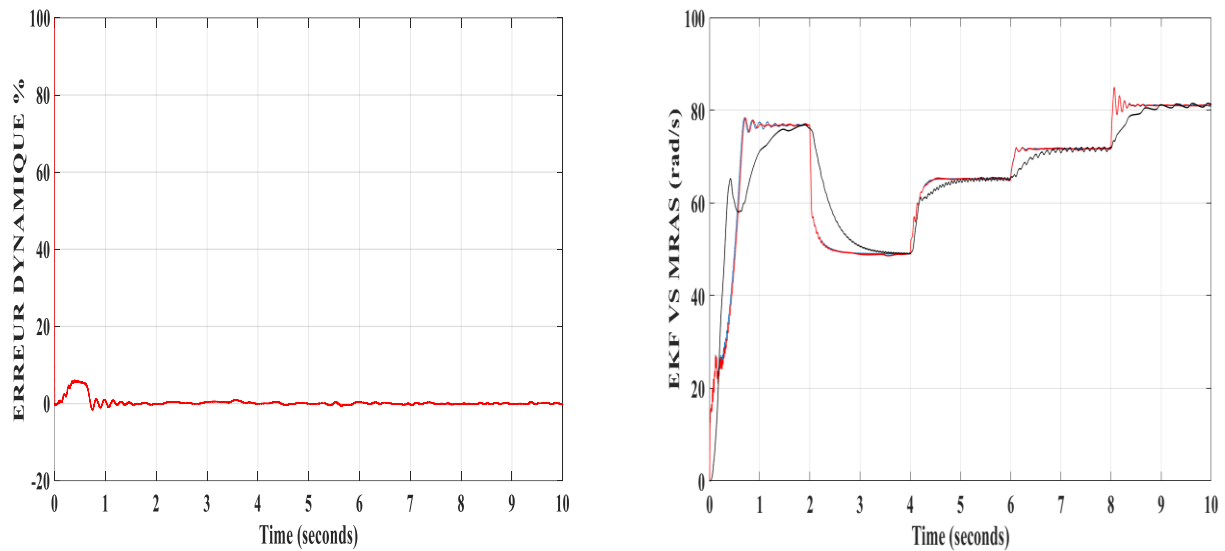


Figure 4.20 Erreur dynamique d'estimation de la vitesse par EKF, comparaison de la vitesse de la MADASB par EKF et MRAS (la courbe en noir).

Comme observé dans le chapitre précédent, le filtre de Kalman étendu a produit des résultats remarquables dans l'estimation de la vitesse de la machine, même en l'absence de capteurs mécaniques. Ce filtre parvient à estimer la vitesse de la machine de manière complète et presque idéale, même pendant la phase de démarrage, malgré la présence de bruit dans le modèle et les mesures.

Initialement, il peut y avoir un léger décalage entre la vitesse estimée par le filtre et la vitesse réelle de la MADASB, ce qui est tout à fait normal, car le filtre travaille pour réduire progressivement cette erreur. Cependant, après une brève période, le filtre élimine complètement cette erreur, et les deux vitesses deviennent pratiquement identiques.

Le filtre de Kalman étendu présente une nette supériorité par rapport à l'estimateur MRAS, car il est capable d'estimer efficacement la vitesse même pendant les transitions de la machine, contrairement au MRAS, qui repose sur le modèle permanent de la machine électrique et fournit donc des estimations éloignées de la réalité lors des transitions de vitesse. En conséquence, l'EKF s'est avéré être une solution de choix, offrant des estimations fiables de la vitesse de la MADASB, même en présence de changements importants de la vitesse de la machine, ce qui en fait une option solide pour l'intégration dans un système éolien, même en cas de vents variables.

4.5 Simulation d'intégration de machine avec une hybride floue P&O-synergétique MPPT

On utilisera le même profil de vent ainsi que les mêmes conditions pour simuler l'intégration de MADASB, commandée par la commande synergétique, dans un système éolien équipé d'un MPPT hybride TSR-synergétique.

Contrairement à la simulation TSR-synergétique précédente, où on a présenté les résultats de toutes les grandeurs, qu'elles soient d'ordre électromagnétique ou mécanique, cette fois-ci, on concentrera uniquement sur les grandeurs les plus pertinentes. Ces grandeurs comprennent les courants, les puissances, les couples, la vitesse de référence, la vitesse de la machine, le coefficient de puissance et le coefficient de vitesse λ (voir figure 4.21).

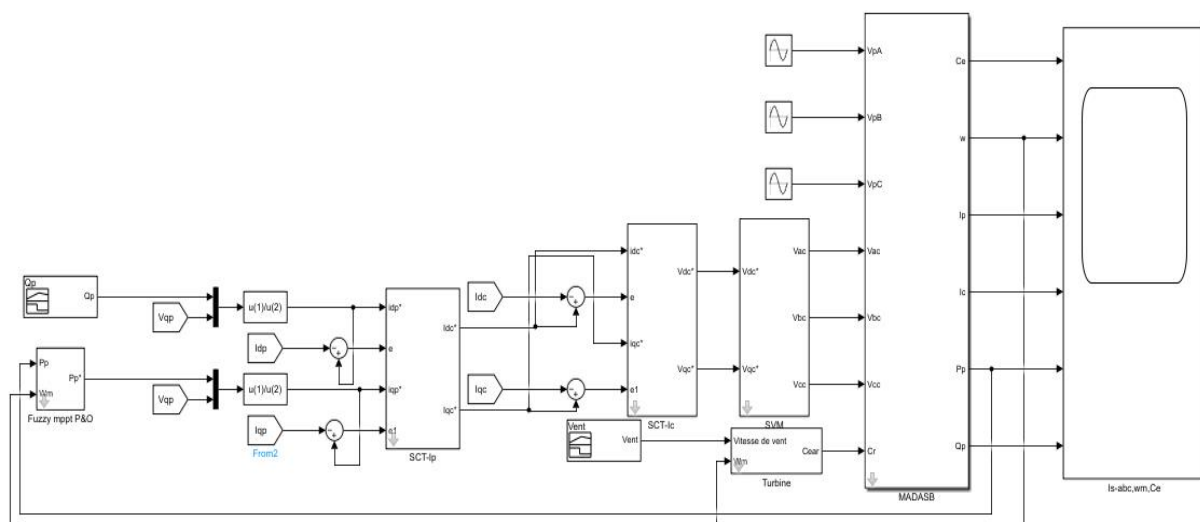


Figure 4.21 Schéma bloc de simulation.

Voici les résultats obtenus à l'issue de la simulation :

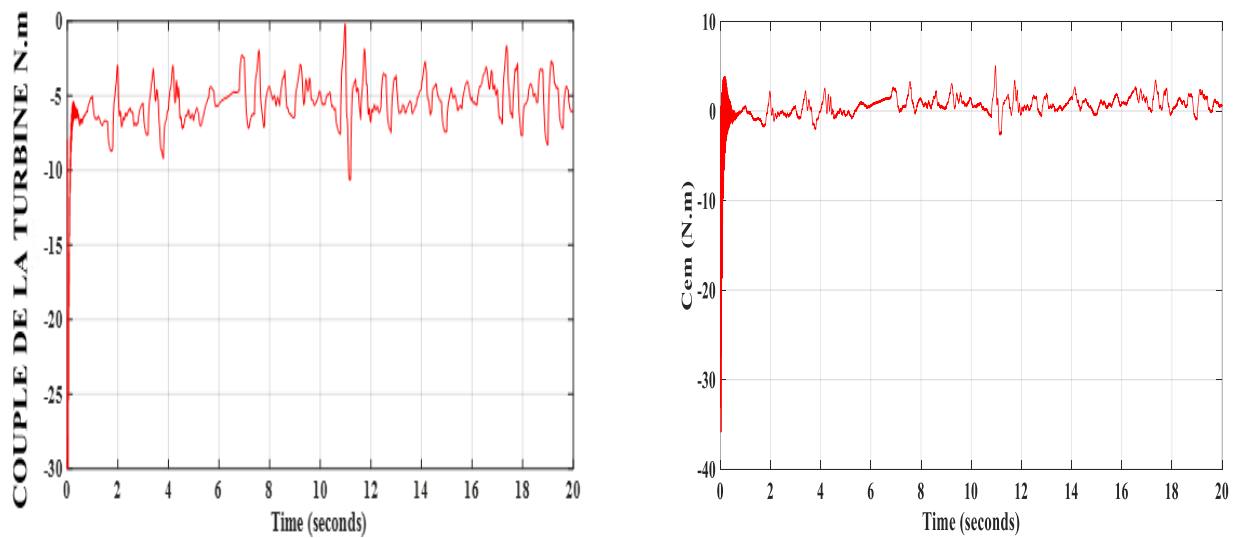
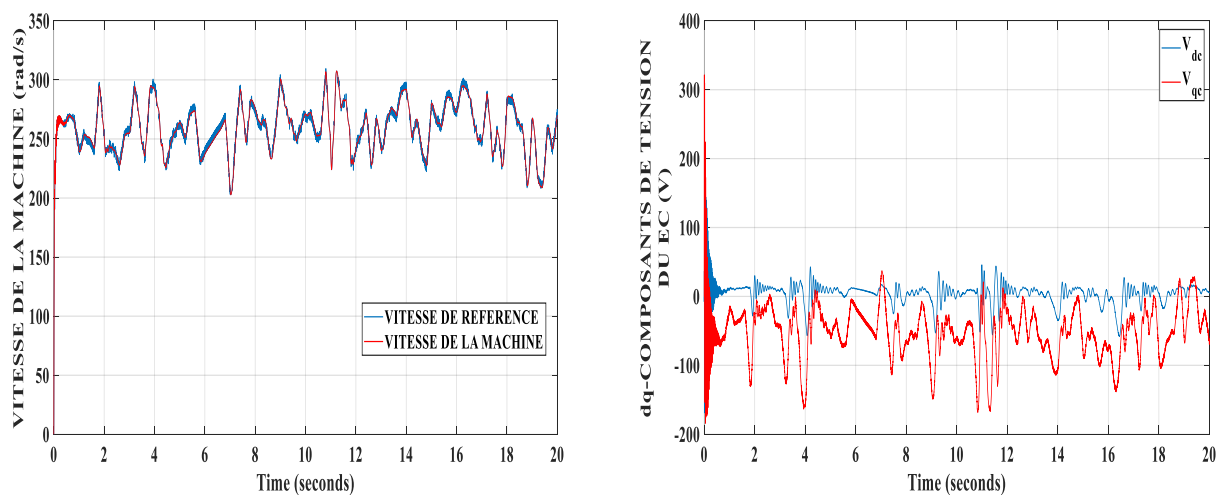
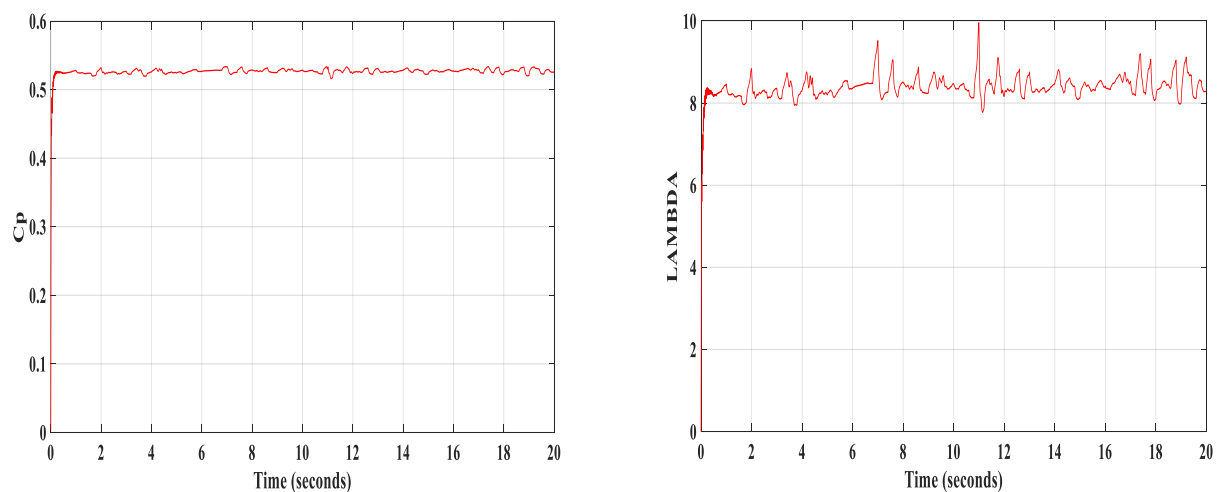


Figure 4.22 Le couple de la turbine, le couple électromagnétique de la MADASB.

Figure 4.23 La vitesse de la machine, les tensions V_{dc} et V_{qc} .Figure 4.24 C_p et λ de la turbine.

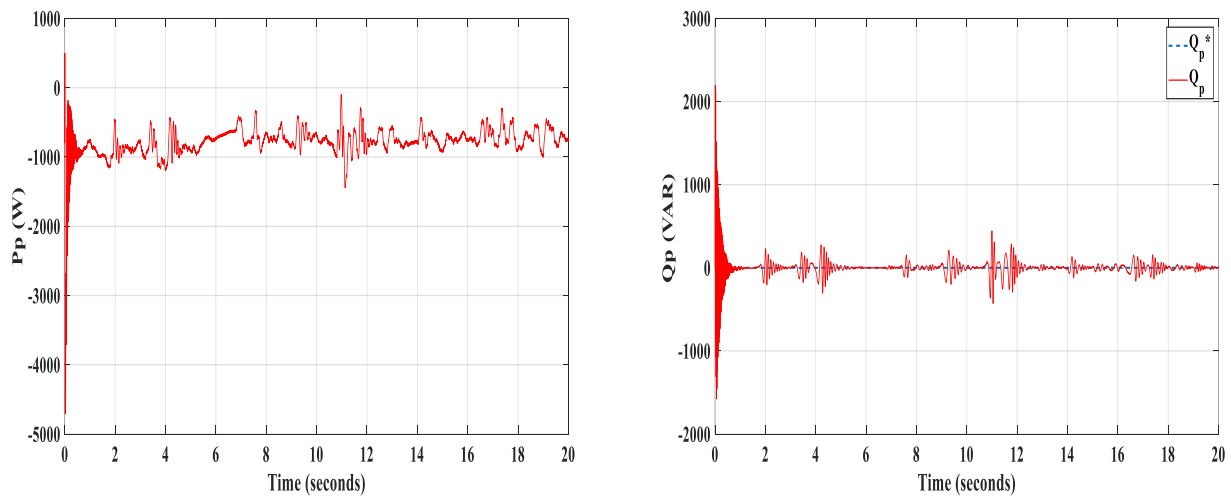
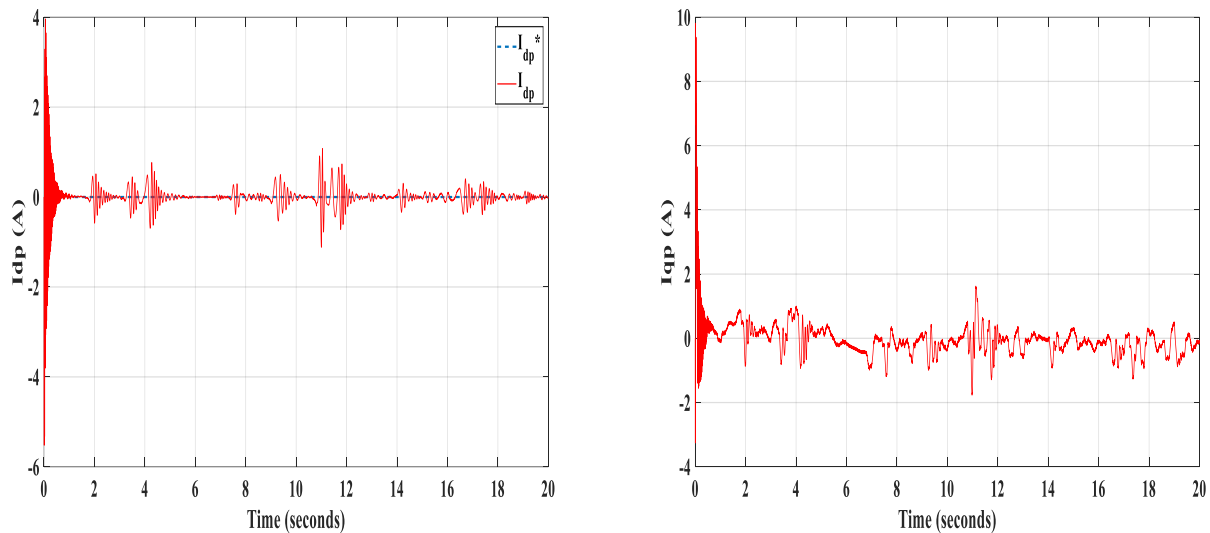
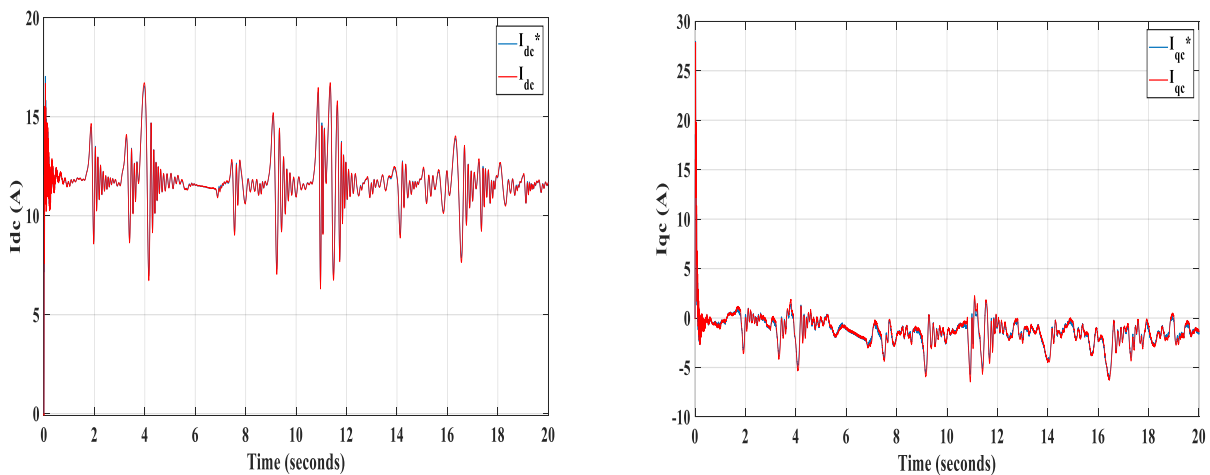


Figure 4.25 Les puissances active et réactive du EP.

Figure 4.26 Les courants I_{dp} et I_{qp} .Figure 4.27 Les courants I_{dc} et I_{qc} .

À partir des résultats obtenus, on peut observer que de nombreux points communs et similitudes existent entre cette simulation et la précédente, car elles fournissent des résultats presque identiques. Voici un résumé des principaux points concernant l'algorithme actuel :

- ❖ Toutes les grandeurs électromagnétiques et mécaniques varient en fonction de la vitesse du vent.
- ❖ La puissance active P_p est négative, indiquant que la MADASB fonctionne comme une génératrice.
- ❖ La puissance réactive Q_p reste stable autour de sa valeur de référence, bien qu'elle présente certaines perturbations, ce qui était également observé dans la simulation précédente.
- ❖ La vitesse de référence varie en fonction de la vitesse du vent, avec de légères oscillations, ce qui est normal car un pas variable est ajouté à la vitesse de référence précédente à chaque calcul.
- ❖ Des oscillations sont présentes dans presque toutes les grandeurs, principalement en raison des variations dans les valeurs de référence, en particulier la vitesse de référence.
- ❖ La vitesse de la MADASB suit efficacement sa valeur de référence, même en présence d'oscillations au niveau de la vitesse de référence.
- ❖ Le coefficient de puissance C_p est généralement stable, à l'exception de la première phase où il monte rapidement, régulièrement, en douceur et sans oscillations notables.
- ❖ Le coefficient de vitesse λ présente des variations autour de sa valeur, augmentant et diminuant légèrement, mais dans des limites étroites.

Dans l'ensemble, cet algorithme s'avère très efficace et adapté à l'intégration dans les éoliennes, offrant des performances très proches de l'algorithme de référence (TSR) sans les inconvénients associés, tels que la nécessité d'un capteur mécanique (anémomètre). La comparaison des résultats des deux algorithmes sera présentée ci-dessous pour mettre en évidence leurs performances respectives.

4.6 Comparaison entre hybride TSR-synergétique MPPT et hybride floue P&O-synergétique MPPT

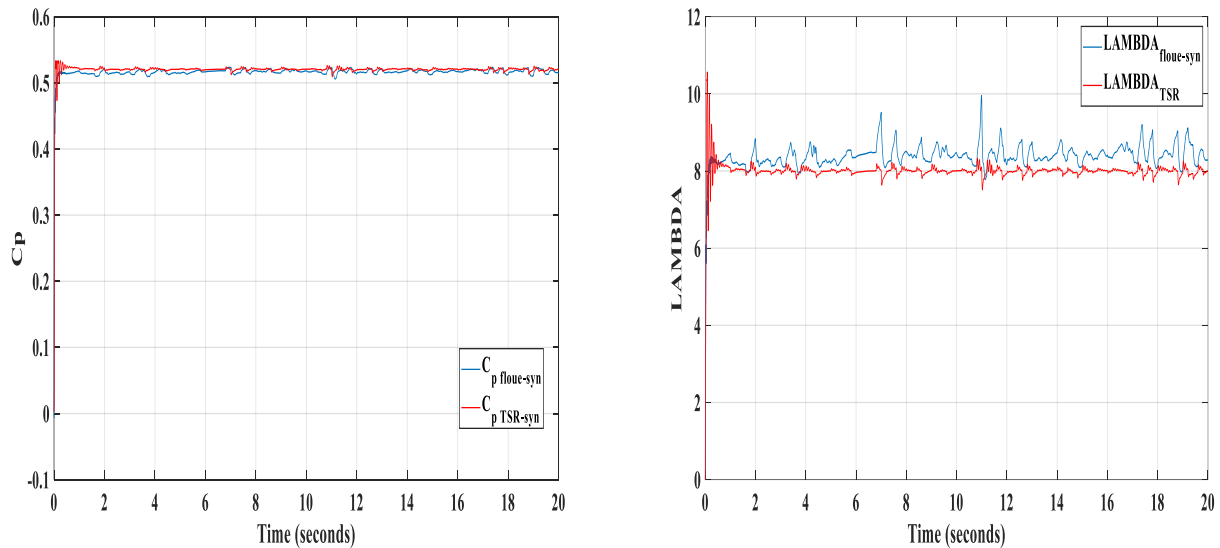


Figure 4.28 Comparaison de C_p et λ entre l'hybride TSR-synergétique MPPT et hybride floue P&O- synergétique MPPT.

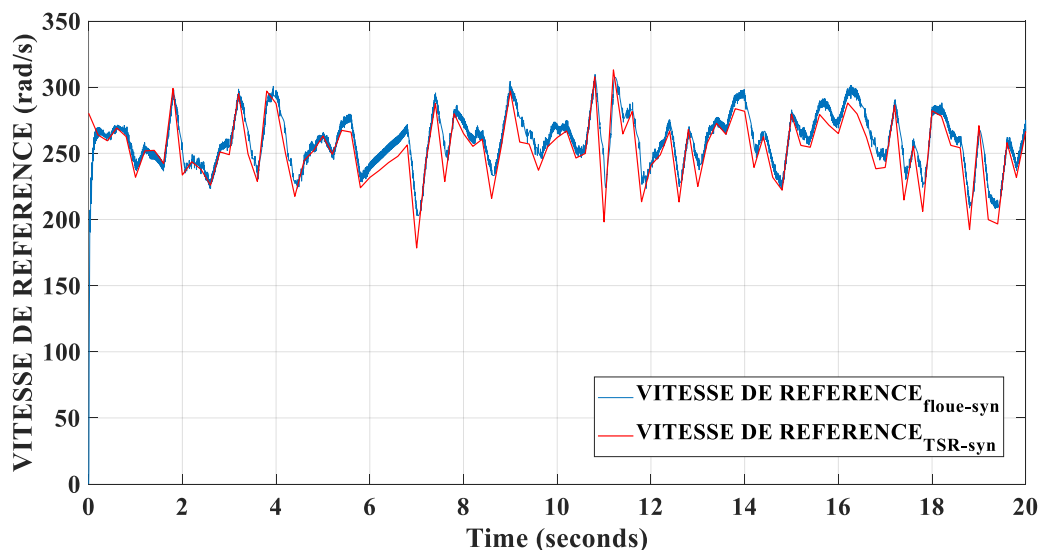


Figure 4.29 Comparaison de vitesse de référence entre l'hybride TSR-synergétique MPPT et hybride floue P&O- synergétique MPPT.

Comme illustré dans les figures ci-dessus, les deux algorithmes présentent des similitudes dans plusieurs aspects, en particulier en ce qui concerne les coefficients de puissance et la vitesse de référence. Leurs valeurs sont très proches et pratiquement identiques. Cependant, on maintenant

on concentre sur les différences entre les deux méthodes après avoir examiné les similitudes dans les paragraphes précédents.

Les deux méthodes se distinguent par plusieurs aspects, notamment leur dynamique au démarrage. L'algorithme TSR démarre avec une valeur de vitesse de référence non nulle, ce qui signifie qu'il fournit une référence de vitesse dès le début de la simulation, obligeant ainsi la machine à suivre cette référence. Cela se traduit par des oscillations et une instabilité initiale dans cette méthode. En revanche, l'algorithme flou P&O démarre avec une mémoire vide, commençant ainsi avec une vitesse de référence nulle, ce qui rend sa montée en vitesse plus stable et douce au démarrage.

Cette différence de dynamique au démarrage s'applique également à toutes les autres grandeurs commandées, telles que les puissances active et réactive, le couple et la vitesse de la machine. Dans toutes les figures, la dynamique de la deuxième méthode est généralement meilleure au démarrage que celle de la première méthode.

Une autre différence notable réside dans la vitesse de référence des deux algorithmes. La vitesse de référence de l'algorithme flou P&O est généralement légèrement supérieure à celle de l'algorithme TSR, ce qui se traduit par une valeur de λ légèrement supérieure dans la méthode floue P&O par rapport à la méthode TSR. Cette différence entraîne également une valeur de C_p légèrement plus élevée pour la méthode TSR.

Ces différences sont principalement dues à la durée des calculs dans les deux méthodes. La méthode floue P&O MPPT nécessite des calculs plus longs en raison de la longueur et du nombre de calculs comparés à la première méthode. Par conséquent, lors du calcul de la vitesse de référence et pendant ce calcul, la vitesse du vent peut déjà avoir changé en raison de la nature très variable de la vitesse du vent. En conséquence, la méthode floue P&O MPPT effectue un nouveau calcul, mais pendant ce temps, la vitesse du vent a déjà évolué, ce qui entraîne des retards dans la mise à jour de la référence. Cela conduit à une vitesse de référence légèrement supérieure dans la méthode floue P&O par rapport à la méthode TSR.

Cependant, malgré ces différences, les performances de la méthode floue P&O restent très acceptables dans ces conditions, malgré les variations importantes de la vitesse du vent. Ainsi, elle peut être comparée à la méthode de référence (TSR) avec confiance, même si les valeurs diffèrent, elles restent dans une plage raisonnable.

Conclusion

L'association du filtre de Kalman étendu avec un estimateur de flux pour estimer la vitesse de MADASB donne des résultats très satisfaisants. De même, l'intégration de la logique floue dans l'algorithme de MPPT, permettant d'éviter l'utilisation de l'anémomètre, offre des performances similaires à celles obtenues par la méthode de référence TSR, sans nécessiter de connaissances préalables sur les caractéristiques de l'éolienne ou la vitesse du vent.

La logique floue permet une approche plus flexible et adaptative du MPPT par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur des algorithmes déterministes. Au lieu de se baser sur des modèles mathématiques complexes et des calculs précis, la logique floue prend en compte des informations incertaines ou vagues, telles que les variations de vent et les fluctuations de charge, et prend des décisions en fonction de règles linguistiques plutôt que de règles strictes.

Références

- [Beghdadi & Kouzi, 2022] M. Beghdadi, K. Kouzi. (2022). Novel fully sensorless synergetic control of brushless doubly fed induction machine integrated in wind energy conversion system driven by fuzzy-based HCS MPPT algorithm. *Wind Engineering*, 47(2), 385-407. <https://doi.org/10.1177/0309524x221130723>
- [Beghdadi et al., 2019] Beghdadi, M., Kouzi, K., & Ameer, A. (2019). New Design of an Optimized Synergetic Control by Hybrid BFO-PSO for PMSG Integrated in Wind Energy Conversion System Using Variable Step HCS Fuzzy MPPT. Dans *Lecture notes in networks and systems* (p. 30-40). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37207-1_4
- [Gunabalan et al., 2009] Gunabalan, R., Subbiah, V., & Rami Reddy, B. (2009). Sensorless control of induction motor with extended Kalman filter on TMS320F2812 processor. *International Journal Of Recent Trends In Engineering*, 2(5), 14-19. https://www.researchgate.net/publication/229020805_Sensorless_
- [Kim et al., 1994] Kim, N. Y., Sul, S., & Park, N. M. (1994). Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 30(5), 1225-1233. <https://doi.org/10.1109/28.315233>
- [McElhoe, 1966] McElhoe, B. A. (1966). An Assessment of the Navigation and Course Corrections for a Manned Flyby of Mars or Venus. *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, AES-2(4), 613-623. <https://doi.org/10.1109/taes.1966.4501892>
- [Mousa et al., 2019] Mousa, H. H., Youssef, A., & Mohamed, E. E. (2019). Adaptive P&O MPPT algorithm based wind generation system using realistic wind fluctuations. *International Journal Of Electrical Power & Energy Systems*, 112, 294-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.038>
- [Pao & Johnson, 2009] Pao, L. Y., & Johnson, K. E. (2009). A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. *American Control Conference*, 2076-2089. <https://doi.org/10.1109/acc.2009.5160195>
- [Serhoud & Benattous, 2013] Serhoud, H., & Benattous, D. (2013). Sensorless optimal power control of brushless doubly-fed machine in wind power generator based on extended kalman filter. *International Journal Of System Assurance Engineering And Management*, 4(1), 57-66. <https://doi.org/10.1007/s13198-012-0141-6>
- [Singh & Ouhrouche, 2011] Singh, J., & Ouhrouche, M. (2011). MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems. Dans *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/21657>
- [Zhu et al., 2011] Zhu, Y., Zhang, X., & Liu, S. (2011). Study on Speed Sensorless Vector Control of Brushless Doubly-Fed Machine. *International Conference On Consumer Electronics, Communications And Networks (CECNet)*, 780-783. <https://doi.org/10.1109/cecnet.2011.5768887>

**CHAPITRE V: LE
SYSTEME
INERTIEL DE
STOCKAGE
D'ENERGIE**

Table des matières

Introduction	150
5.1 L'importance et le principe de fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie SSE	150
5.2 Les avantages liés à l'utilisation des SSE.....	151
5.3 Les différents types de SSE selon la durée de stockage	152
5.3.1 SSE à longue terme	153
5.3.2 SSE à courte terme	155
5.4 Le système inertiel de stockage d'énergie SISE.....	158
5.4.1 Les différents composants de SISE	158
5.4.1.1 Le volant d'inertie	158
5.4.1.2 Les avantages et les inconvénients de SISE	166
5.4.2 Intégration de SISE dans les éoliennes.....	167
5.4.3 Modélisation du système inertiel de stockage d'énergie	167
5.4.3.1 Modèle de la machine électrique MSAP	167
5.4.3.2 Validation de modèle de MSAP par simulation	170
5.4.3.3 Modèle de volant d'inertie.....	171
5.4.3.4 Validation du modèle du volant d'inertie par simulation	174
5.5 La commande synergétique de système inertiel de stockage d'énergie	175
5.5.1 La commande de la MSAP	175
5.5.2 L'obtention de vitesse de référence	177
5.5.3 Résultats de simulation.....	178
5.6 Intégration du SISE avec le système éolien.....	180
Conclusion.....	183

Introduction

Malgré l'importance cruciale des énergies renouvelables dans la production d'énergie électrique et la tendance croissante à les adopter comme alternative aux énergies fossiles, on est confronté à un défi majeur : leur intermittence. Ces sources d'énergie ne sont pas toujours disponibles, ce qui se traduit par des interruptions potentielles dans l'approvisionnement. Par exemple, le vent peut être insuffisant en raison de périodes de calme ou le rayonnement solaire peut diminuer en raison de nuages ou de la nuit.

De plus, la demande d'électricité varie au fil du temps, avec des pics pendant les heures de pointe et des creux de demande à d'autres moments. En l'absence de systèmes de stockage d'énergie (SSE), cela peut entraîner un excès d'électricité pendant les périodes de faible demande et un manque d'énergie disponible pour répondre à la demande pendant les périodes de pointe.

Par conséquent, les SSE jouent un rôle essentiel dans les systèmes de production d'énergie électrique, en particulier lorsqu'il s'agit d'énergies renouvelables. Ils permettent de stocker l'énergie excédentaire pendant les périodes de surplus pour la réutiliser lors des heures de pointe. Ces systèmes de stockage varient en fonction des objectifs et de la durée de stockage souhaités, et ils existent sous plusieurs formes, que l'on examinera en détail plus tard. Avant d'aborder en détail le sujet principal de cette thèse, le système inertielle de stockage d'énergie (SISE).

5.1 L'importance et le principe de fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie SSE

Le stockage d'énergie joue un rôle polyvalent et adaptable au sein du réseau d'alimentation électrique, contribuant à une gestion plus efficace des ressources disponibles. En association avec les systèmes de production d'énergie électrique basés sur la conversion d'énergies renouvelables, les systèmes de stockage d'énergie ont la capacité d'accroître la valeur de l'énergie électrique produite par les centrales éoliennes ou solaires. Ils le font en fournissant de l'énergie lors des pics de demande et en emmagasinant de l'énergie pendant les périodes de faible demande.

En outre, les SSE facilitent l'intégration harmonieuse des sources d'énergie renouvelable telles que les éoliennes et les panneaux photovoltaïques dans le système énergétique [Cimuca, 2005].

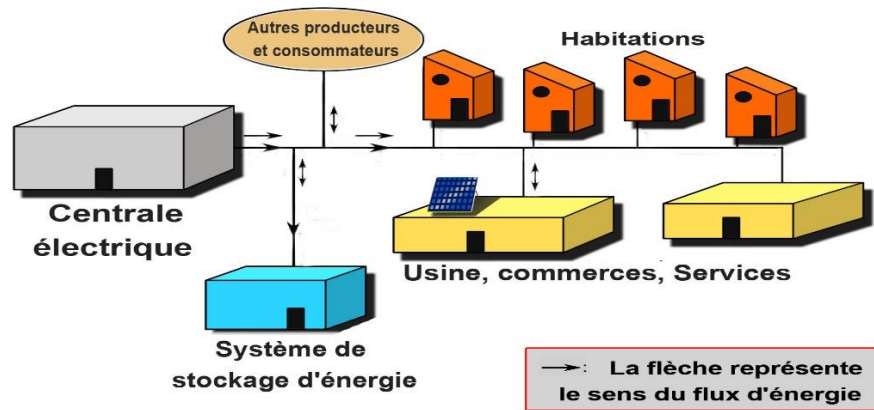


Figure 5.1 Stockage d'énergie dans un réseau électrique.

Le fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie repose sur la détermination d'un seuil d'énergie de référence. Ce seuil permet de décider quand il est approprié de stocker de l'énergie et quand il est opportun de la réutiliser. En d'autres termes, lorsque la production d'énergie électrique dépasse ce seuil de référence, le système de stockage d'énergie emmagasine cette énergie sous une autre forme pour une utilisation ultérieure. En revanche, lorsque la production d'énergie est inférieure à ce seuil, le SSE libère l'énergie stockée.

Ainsi, le fonctionnement de ce système se déroule en deux phases distinctes. La première phase est la phase de charge, où l'énergie électrique est stockée pendant les périodes de faible demande. La deuxième phase est la phase de décharge, où l'énergie stockée est convertie en énergie électrique et injectée dans le réseau pendant les heures de pointe (voir Figure 5.2).

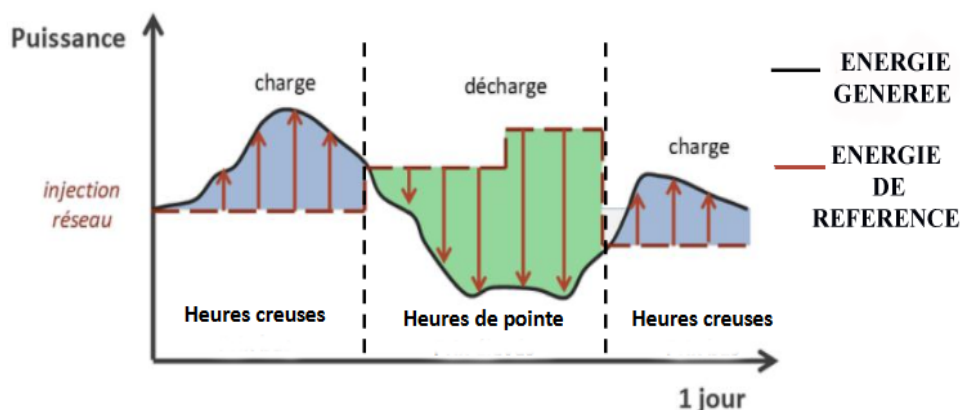


Figure 5.2 Principe de fonctionnement de SSE.

5.2 Les avantages liés à l'utilisation des SSE

- Le stockage d'énergie présente de multiples avantages économiques, tant pour les opérateurs du réseau électrique que pour les consommateurs qui adoptent cette

technologie dans leurs foyers et leurs entreprises. Il permet de réduire les coûts opérationnels liés à la production d'électricité en stockant de l'énergie à moindre coût pendant les périodes de faible demande, puis en l'utilisant pendant les pics de demande. Cela se traduit par des économies significatives pour les utilisateurs finaux.

- En réduisant la nécessité de recourir aux centrales électriques uniquement pendant les heures de pointe, le stockage d'énergie contribue à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques et à réduire les coûts liés à la fourniture de services de régulation de la fréquence et de la tension.
- Le stockage d'énergie apporte une grande flexibilité au réseau électrique, garantissant une alimentation continue et fiable aux consommateurs, quelle que soit la demande. Cette flexibilité est cruciale pour maintenir la fiabilité et la résilience du réseau, notamment en réduisant les coûts associés aux pannes et aux interruptions de service.
- En ce qui concerne les sources d'énergie renouvelable intermittentes telles que l'éolien et le solaire, le stockage d'énergie joue un rôle essentiel. Il permet de lisser la fourniture d'énergie en stockant les excédents lorsque ces sources produisent davantage d'électricité que nécessaire, puis en libérant cette énergie lorsque la production est insuffisante. De plus, le stockage peut aider à répondre rapidement aux fluctuations de la demande, en injectant ou en extrayant de l'électricité selon les besoins.

En résumé, le stockage d'énergie offre la possibilité d'économiser de l'électricité pour une utilisation ultérieure, là où et quand elle est le plus nécessaire. Cela améliore l'efficacité et la capacité du réseau électrique, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En introduisant davantage de flexibilité dans le réseau, le stockage d'énergie favorise l'intégration de sources d'énergie propres comme le solaire, l'éolien et les sources distribuées.

Il augmente également l'efficacité globale du réseau en optimisant l'utilisation des ressources existantes, tout en limitant la nécessité de construire de nouvelles centrales électriques émettrices de polluants. Cette technologie est donc un élément clé pour la transition vers un approvisionnement énergétique plus propre et plus fiable.

5.3 Les différents types de SSE selon la durée de stockage

Il existe diverses classifications des systèmes de stockage d'énergie, qui peuvent être catégorisés en fonction de leur capacité (grande ou petite), de leur principe de conversion de l'énergie électrique (chimique, mécanique, potentielle, etc.), ou de la durée pendant laquelle ils sont

capables de stocker de l'énergie. Pour cette thèse, on concentrera sur la durée de stockage comme critère fondamental pour classer ces systèmes.

Les systèmes de stockage d'énergie peuvent être caractérisés par leur capacité à stocker de l'énergie sur une période donnée, et ils sont généralement divisés en deux catégories principales : les systèmes de stockage d'énergie à courte durée et ceux à longue durée. Chacun de ces types présente des objectifs, des applications, des avantages et des inconvénients spécifiques, ce qui permet de déterminer le type le mieux adapté à chaque situation.

Ainsi, la classification basée sur la durée de stockage offre une compréhension plus approfondie des différents types de systèmes de stockage d'énergie et de leur adéquation à des besoins spécifiques.

5.3.1 SSE à longue terme

Ces systèmes se caractérisent par leur capacité à stocker de l'énergie électrique sur une période significativement étendue, pouvant aller de plusieurs minutes à plusieurs heures, voire même plusieurs jours.

A. SEE sous forme d'énergie chimique (batteries)

Le stockage de l'énergie électrique sous forme électrochimique, en la transformant en énergie chimique grâce à l'utilisation de batteries, représente le système de stockage le plus répandu à l'échelle mondiale. Ces batteries sont omniprésentes, que ce soit dans les voitures, les ordinateurs portables, les téléphones mobiles, ou encore dans des applications plus spécifiques comme les systèmes solaires utilisés dans des zones isolées telles que les exploitations agricoles.

Ces systèmes reposent sur des réactions chimiques réversibles, permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique et vice-versa, selon les besoins. Il existe plusieurs types de batteries électrochimiques, chacune ayant son propre réacteur pour le processus de conversion d'énergie, mais les batteries au plomb et les batteries au lithium sont parmi les plus couramment utilisées. Ces batteries couvrent une large plage de capacités, allant de quelques watts à plusieurs mégawatts. Par exemple, en 1994, un système de batteries chimiques a été installé à Puerto Rico, capable de fournir 20 MW d'énergie pendant 40 minutes, contribuant ainsi à améliorer la régulation de la fréquence et de la tension du réseau électrique [Butler, 1994] [Cimuca, 2005].

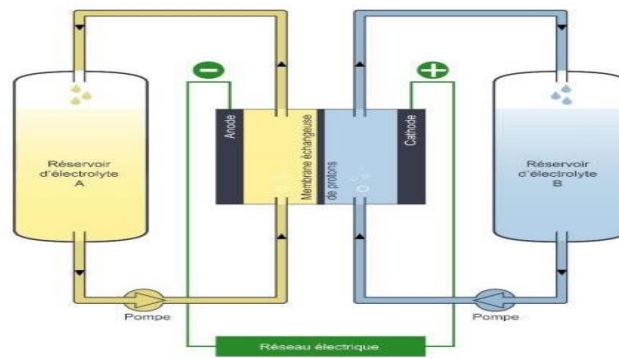


Figure 5.3 Structure de batterie.

B. SSE à l'aide de l'air comprimé

Un autre type de système de stockage d'énergie à long terme repose sur le principe de stockage électromécanique en utilisant de l'air comprimé. Le premier système de stockage d'énergie à air comprimé a été développé en Allemagne à Hundorf en 1978, avec une capacité de 290 MW [Cimuca, 2005].

Le fonctionnement de ce système consiste à stocker l'excédent d'énergie électrique en comprimant de l'air dans une chambre hermétiquement close. Lorsqu'il est nécessaire d'utiliser cette énergie stockée, l'air comprimé est relâché dans une turbine à gaz, qui fait tourner le rotor d'un générateur électrique, convertissant ainsi l'énergie potentielle de l'air comprimé en énergie électrique.

Ce système est à la fois relativement simple et compact, principalement situé en sous-sol. Cependant, son efficacité dépend de la disponibilité d'une cavité suffisamment grande, solide, étanche et profonde pour résister aux pressions élevées sans subir de déformations significatives, ce qui pourrait entraîner des problèmes pour l'installation et son environnement.

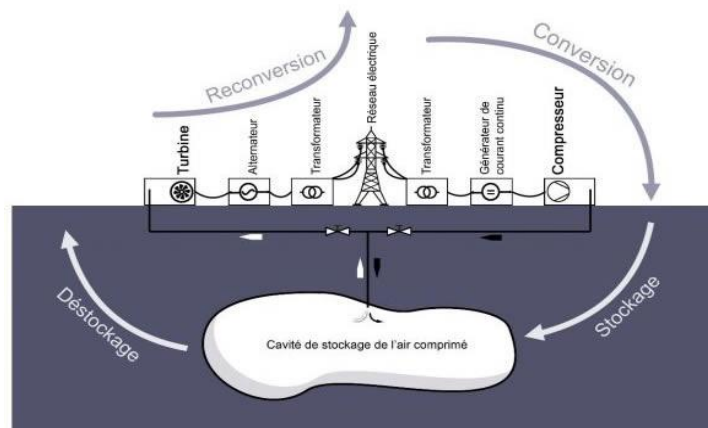


Figure 5.4 Stockage à l'aide de l'air comprimé.

C. SSE par pompage hydraulique

Il s'agit du système de stockage d'énergie le plus ancien, qui était en fait le seul disponible jusqu'à la fin des années 70. Ce système repose sur l'utilisation de deux réservoirs d'eau, l'un en amont et l'autre en aval. Lorsque l'énergie électrique doit être stockée, de l'eau est pompée du réservoir en aval vers le réservoir en amont. En revanche, pendant les périodes de forte demande, l'eau est autorisée à s'écouler naturellement du réservoir en amont vers le réservoir en aval. En cours de cette descente, l'eau fait tourner des turbines hydrauliques, qui à leur tour font fonctionner des générateurs électriques pour réutiliser cette énergie stockée.

Ce système, souvent désigné comme une centrale hydroélectrique à accumulation par pompage, a été le pionnier dans le domaine du stockage d'énergie électrique.

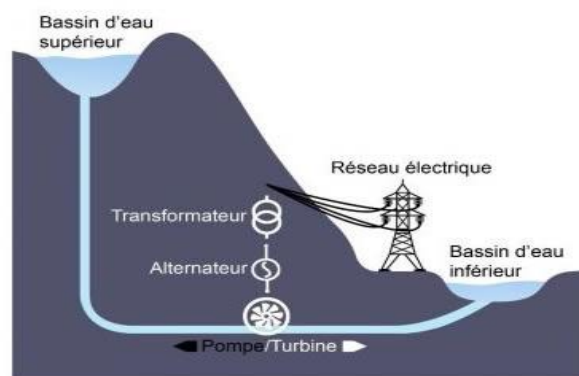


Figure 5.5 Stockage par pompage hydraulique.

5.3.2 SSE à courte terme

Cette catégorie contient les systèmes de stockage d'énergie dont la durée de stockage est généralement inférieure à 10 minutes.

A. SSE par des supercondensateurs

Un supercondensateur est un type particulier de condensateur qui se distingue par sa capacité à offrir une densité de puissance et une densité d'énergie se situant entre celles des batteries et des condensateurs électrolytiques classiques. Il est constitué de plusieurs cellules assemblées en série et en parallèle, ce qui lui permet de fournir des niveaux élevés de tension et de courant en sortie, avec une densité de puissance pouvant atteindre plusieurs kW/kg. De plus, les supercondensateurs stockent une quantité d'énergie intermédiaire par rapport aux deux modes de stockage mentionnés précédemment, avec une densité d'énergie d'environ quelques Wh/kg.

De plus, ils sont capables de restituer cette énergie de manière beaucoup plus rapide qu'une batterie [Gualous, 2004].



Figure 5.6 Stockage par des supercondensateurs.

B. SSE par des bobines supraconductrices

Les supraconducteurs sont des matériaux spéciaux qui sont utilisés dans des environnements cryogéniques, généralement refroidis à des températures très basses à l'aide d'hélium liquide. Cette forte réfrigération permet de réduire considérablement, voire d'éliminer, leur résistance électrique dans certaines conditions.

Grâce à leur résistance électrique pratiquement nulle, les supraconducteurs permettent une transmission extrêmement efficace de l'électricité, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes de stockage d'énergie exploitent la capacité des supraconducteurs à stocker de l'énergie sous forme de champ magnétique dans une bobine supraconductrice. Ce champ magnétique peut ensuite être converti en courant électrique au moment opportun.

Cependant, le principal obstacle à la généralisation de ces systèmes réside dans leur coût élevé, ce qui limite leur disponibilité à grande échelle. Les chercheurs s'efforcent donc de développer des systèmes de stockage de ce type avec des capacités allant de dix à cent mégawatts, car les systèmes de stockage actuels utilisant des bobines supraconductrices ne dépassent généralement pas une capacité de 10 mégawatts [Cimuca, 2005].

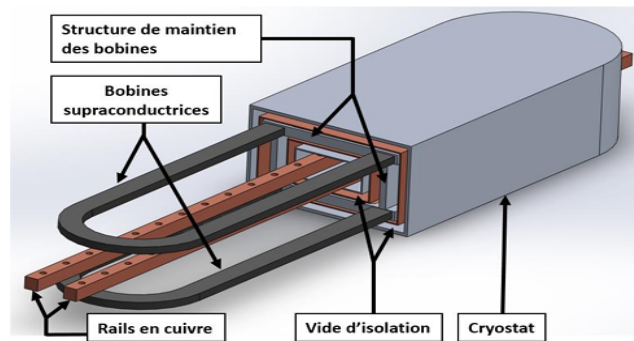


Figure 5.7 Structure de bobine supraconductrice.

C. SEE avec volant d'inertie

Le système inertiel de stockage d'énergie (SISE) repose sur la conversion de l'énergie électrique en énergie cinétique en utilisant une masse en rotation, communément appelée volant d'inertie ou accumulateur électromécanique.

Au cours de la dernière décennie, l'industrie a redécouvert l'intérêt du système de stockage d'énergie à volant d'inertie en raison de ses avantages par rapport à d'autres systèmes de stockage d'énergie (ESS).

Plus précisément, les systèmes de stockage d'énergie par volant d'inertie ont trouvé une application spécifique dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, notamment en ce qui concerne le maintien de la tension et de la fréquence dans des limites prédéterminées. Grâce à leur réactivité élevée, leur durabilité à long terme et leur efficacité, ces systèmes de stockage sont particulièrement adaptés aux besoins de stockage à court terme, généralement suffisants pour améliorer la qualité de l'énergie électrique [Cimuca et al., 2010] [Lawrence et al., 2003] [Cimuca et al., 2006]. C'est précisément ce dernier type de système qui sera au cœur de cette thèse.

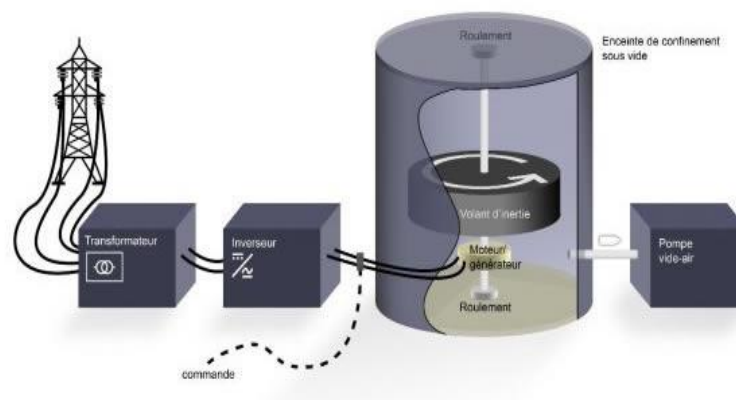


Figure 5.8 Stockage par volant d'inertie.

5.4 Le système inertiel de stockage d'énergie SISE

Comme tous les systèmes de stockage d'énergie, le système inertiel de stockage d'énergie repose sur le principe de transformation réversible de l'énergie. Pendant la phase de stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique à l'aide d'un moteur électrique, puis cette énergie mécanique est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le volant d'inertie. Lors de la phase de décharge, l'énergie mécanique stockée dans le volant est à nouveau convertie en énergie électrique grâce à un générateur électrique. La vitesse de fonctionnement de ce processus est déterminée par le convertisseur de puissance, qui contrôle la direction du transfert d'énergie à travers la machine électrique [Nemsi et al., 2016].

Ce système est couramment utilisé dans des applications spécifiques telles que les véhicules électriques, les systèmes d'alimentation sans interruption (UPS), mais récemment, il a été largement intégré dans les éoliennes en raison de ses nombreux avantages, notamment sa longévité, qui est généralement similaire à celle des éoliennes elles-mêmes.

5.4.1 Les différents composants de SISE

Ce système contient deux composants principaux, le premier composant, qui est la partie mécanique, et le second est la partie électrique.

La partie mécanique est principalement représentée par le volant d'inertie qui est l'élément pivot dans le stockage d'énergie par conversion de l'énergie électrique en énergie cinétique.

La partie électrique comprend le convertisseur bidirectionnel de puissance et la machine électrique qui joue le rôle du moteur dans le cas du stockage de l'énergie électrique, puisqu'il convertit cette énergie en énergie cinétique dans le volant d'inertie. Dans le cas inverse, il se transforme en générateur électrique, où il reconvertit l'énergie cinétique stockée dans le volant d'inertie à l'énergie électrique.

5.4.1.1 Le volant d'inertie

Un volant d'inertie est une masse mobile, qui peut être de forme circulaire ou non, et qui tourne autour d'un axe passant par son centre de gravité. Ces volants d'inertie peuvent varier en fonction de leur vitesse de rotation, ce qui conduit à deux catégories principales : les volants lents, qui tournent à une vitesse inférieure à 6000 tr/min, et les volants rapides, qui atteignent des vitesses de 10000 tr/min ou même de 14000 tr/min [EUR 19978 Brochure, 2001] [Lawrence et al., 2003]. Il existe des SISE avec des volants en métal et d'autres avec des volants fabriqués

à partir de matériaux composites. Généralement, les volants lents sont fabriqués en métal, tandis que les volants rapides sont constitués de matériaux composites.

Le rôle fondamental du volant d'inertie réside dans sa capacité à effectuer une conversion réversible entre l'énergie électrique et l'énergie cinétique. Il peut tourner dans les deux directions et agir comme source d'énergie ou comme récepteur d'énergie en fonction de la phase de fonctionnement, que ce soit en mode de charge ou de décharge.

A. Différentes structures de volant d'inertie

Les frottements représentent la principale source de pertes au sein des systèmes inerts de stockage d'énergie (SISE). C'est pourquoi les volants lents sont placés à l'intérieur d'enceintes remplies d'hélium, tandis que les volants rapides sont logés dans des enceintes sous vide pour minimiser les frottements. Néanmoins, les pertes dues à l'autodécharge demeurent significatives, bien que le rendement instantané soit très élevé.

La durée de vie des SISEs dépend largement des paliers utilisés. En ce qui concerne les volants lents, les roulements disponibles sur le marché offrent des durées de vie dépassant souvent les 10 ans, voire davantage. En revanche, les volants rapides requièrent l'utilisation de paliers magnétiques, ce qui engendre une augmentation des coûts et de la complexité des systèmes. C'est pourquoi les SISEs équipés de volants rapides sont principalement utilisés dans des applications embarquées, car ils présentent peu d'avantages dans les applications stationnaires [Cimuca, 2005].

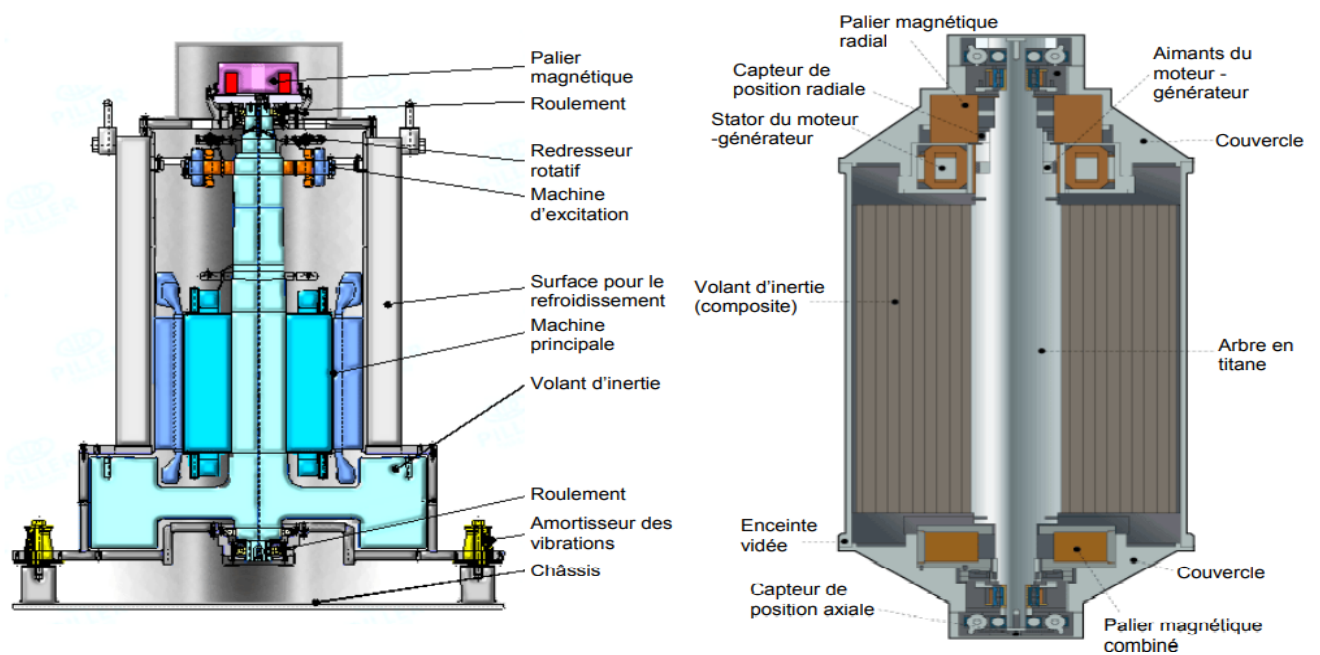


Figure 5.9 Structure des volants d'inertie, à gauche : volant lent et à droite : volant rapide.

B. Les paliers utilisés en volant d'inertie

Comme tous les éléments rotatifs, les volants d'inertie sont équipés de paliers, qu'ils soient magnétiques ou conventionnels, afin de permettre leur rotation tout en minimisant les frottements. Cependant, lors du choix des paliers, plusieurs considérations et contraintes doivent être prises en compte.

Dans le cas des roulements conventionnels, le frottement est significatif, ce qui entraîne une réduction de l'efficacité et du rendement du système, tout en augmentant l'autodécharge du volant. De plus, la durée de vie de ces systèmes équipés de roulements conventionnels est relativement courte. En fin de compte, les vibrations générées par la rotation autour de l'axe imposé par les roulements à billes peuvent provoquer des instabilités, entraînant des pertes de contrôle et réduisant considérablement la durée de vie du système [Taraft, 2008].

En utilisant des paliers magnétiques, le frottement est totalement éliminé, car il n'y a aucun contact entre les pièces mobiles et fixes. Les suspensions magnétiques sont utilisées lorsque les systèmes mécaniques atteignent leurs limites. En effet, la vitesse de rotation des roulements à billes est limitée par des contraintes mécaniques et thermiques. En outre, la suspension mécanique pose des problèmes d'équilibrage à haute vitesse, car il est impossible de rendre l'axe de rotation du roulement synchrone avec l'axe d'inertie de la pièce tournante. L'utilisation de paliers magnétiques s'avère être une solution efficace pour aligner l'axe d'inertie avec l'axe de rotation [Taraft, 2008] [Bernard, 2001] [Faure, 2003].

C. Les types de paliers magnétiques

Il existe plusieurs catégories de paliers magnétiques :

- **Paliers magnétiques passifs** : Ces paliers ne nécessitent pas de source d'énergie externe pour leur fonctionnement. Ils se divisent en deux principaux types : les paliers magnétiques à réluctance variable (voir figure 5.10) et les paliers magnétiques à aimant permanent (voir figure 5.11) [Taraft, 2008].
- **Paliers magnétiques actifs** : Ces paliers exigent une source d'alimentation externe et sont principalement composés d'électroaimants qui maintiennent une distance constante entre le rotor et le stator. Ils sont généralement plus coûteux (voir figure 5.12).
- Il existe un type de palier magnétique très prometteur qui repose sur l'utilisation des supraconducteurs, appelé simplement **palier supraconducteur**. Le fonctionnement de ces paliers repose sur la propriété de diamagnétisme parfait induite par l'effet Meissner,

caractéristique des supraconducteurs. Lorsque l'aimant s'approche du supraconducteur, l'énergie fournie par une source externe est stockée sous forme de champ magnétique induit, sans dissipation d'énergie due à l'effet Joule. Les fortes forces de répulsion magnétiques générées permettent de maintenir l'équilibre de position du volant par rapport à son enceinte [Hamouche, 2010].

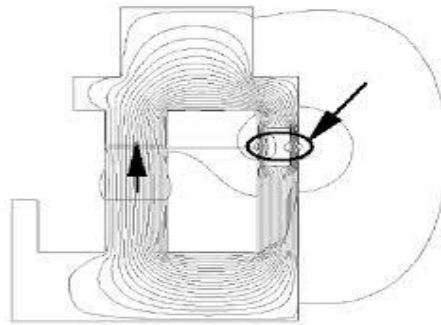


Figure 3.10 Principe de réluctance variable.

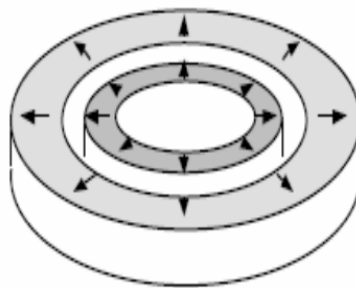


Figure 3.11 Suspension magnétique a aimant permanent.

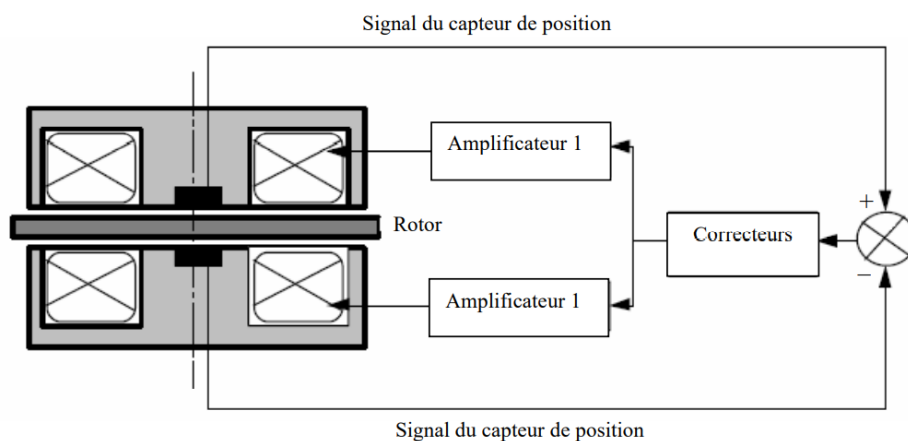


Figure 3.12 Suspension magnétique actif.

D. La machine électrique

Dans le système inertielle de stockage d'énergie, plusieurs types de machines électriques peuvent être employés, mais les plus notables sont les suivantes : la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS), la machine à réluctance variable (MRV), la machine asynchrone à double alimentation (MADA), et la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Le choix de la machine électrique dans le SISE est une étape cruciale, car elle détermine les performances du système, telles que l'efficacité, le rendement, et même les dimensions du système. Toutefois, lors de la sélection de la machine électrique, plusieurs considérations doivent être prises en compte :

- ✚ Le budget alloué au système, car le coût de la machine varie en fonction du type choisi.
- ✚ La plage de vitesse requise.
- ✚ L'environnement dans lequel le système sera utilisé, car certaines machines électriques ne conviennent pas à des environnements hostiles. Par exemple, les machines à courant continu ne sont pas recommandées dans de telles conditions.
- ✚ Les performances et le rendement spécifiques définis dans le cahier des charges.
- ✚ L'application du système, qu'il s'agisse d'une source d'alimentation pour une charge, d'un système d'alimentation sans interruption (UPS) ou d'une autre utilisation.
- ✚ La mobilité ou l'immobilité du système dans lequel le SISE sera installé, car les exigences varieront entre un système mobile tel qu'un véhicule électrique et un système statique comme une éolienne.

Il n'y a pas de relation directe entre les dimensions du volant d'inertie et la puissance nominale de la machine électrique. Les dimensions du volant indiquent la capacité du SISE, tandis que la puissance nominale de la machine électrique détermine la puissance maximale de charge ou de décharge. Par conséquent, le choix de la puissance nominale de la machine électrique dépend uniquement de la puissance nominale du SISE [Cimuca, 2005].

Ainsi, les machines les plus couramment utilisées dans ce système sont les suivantes :

1. La machine à réluctance variable MRV :

Cette machine électrique appartient à la même famille que celles discutées dans le deuxième chapitre (MADARV), car elle représente essentiellement une modification structurale du stator de la machine mère (MRV).

La machine MRV est considérée comme l'une des plus anciennes machines électriques fabriquées par l'homme, ayant plus d'un siècle d'existence. Elle présente un intérêt particulier en raison de sa structure simple, ne nécessitant ni aimant ni système collecteur-balais, ce qui se traduit par un coût inférieur par rapport à d'autres types de machines électriques. Malgré de nombreuses études ayant affirmé la supériorité de cette machine par rapport aux machines traditionnelles, en particulier par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS), son utilisation est restée limitée et relativement peu répandue. Cela est en partie dû à la nécessité de mettre en place un système de commande quelque peu complexe, en particulier à une époque où les dispositifs de commutation de puissance, tels que les thyristors, étaient les seules options disponibles.

Un autre avantage notable de cette machine électrique est sa capacité à atteindre des vitesses que presque aucune autre machine électrique ne peut atteindre. Cette caractéristique est très bénéfique dans le contexte des SISEs, en particulier pour les volants d'inertie rapides. L'utilisation de la machine MRV dans les SISEs à volant d'inertie rapide a été envisagée pour la première fois en 1996 par l'équipe de recherche de l'Université de Californie à Berkeley [Gao et al., 2005] [Hofmann & Sanders, 2002] [Hofmann et al., 2004].

2. La machine asynchrone

Ces machines sont généralement utilisées dans les SISEs équipés de volants d'inertie à rotation lente, en raison de leur vitesse de rotation relativement basse par rapport aux MRV.

Les machines asynchrones se répartissent en deux principales catégories en fonction de la nature du rotor : les machines asynchrones à cage d'écureuil (MAS) et les machines asynchrones à rotor bobiné (MASRB).

A. La machine asynchrone à cage d'écureuil MAS

Il s'agit de la machine électrique la plus couramment utilisée dans l'industrie, souvent désignée simplement par le terme "moteur électrique". Elle présente de nombreux avantages, notamment son coût raisonnable et sa configuration simple. De plus, elle bénéficie de nombreuses méthodes de commande, parmi lesquelles des approches linéaires telles que la commande scalaire, DTC (Direct Torque Control) et vectorielle, ainsi que des méthodes de commande non linéaires avancées telles que le mode glissant, la commande prédictive, le backstepping et la commande synergétique.

Actuellement, elle est la machine électrique la plus largement utilisée et répandue dans les SISEs [Cimuca, 2005]. Un exemple de SISE a été conçu pour équiper des locomotives avec une machine asynchrone à cage ayant une puissance nominale de 2 MW à une vitesse de 12 000 tr/min. Ce système de refroidissement a été spécialement conçu pour permettre un fonctionnement continu à la puissance nominale sur une plage de vitesses allant de 7 500 tr/min à 15 000 tr/min. Le volant d'inertie associé est fabriqué en matériau composite, mesure 1,6 m de diamètre, 1,9 m de longueur et a une masse de 8 600 kg. Sa capacité est de 360 MJ ou 100 kWh, et il peut fournir 2 MW pendant 3 minutes [Thelen et al., 2003].

B. La machine asynchrone à rotor bobiné MASRB

Il s'agit de la même machine électrique précédemment évoquée dans le précédent, connue sous le nom de "machine à double alimentation" (MADA). Elle fonctionne sur le même principe que la machine asynchrone à cage d'écureuil, partageant la plupart de ses caractéristiques. Cependant, la MADA présente à la fois des avantages et des inconvénients par rapport au MAS.

Parmi ses avantages figurent une relative facilité de commande par rapport au MAS, car il est possible de réguler directement les courants du rotor par la source d'alimentation. Cela constitue un avantage significatif par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cependant, deux inconvénients sont à noter : la fragilité du rotor et la présence d'un système collecteur-balais.

En 1996, un SISE équipé d'une MADA de 20 MW et d'un volant d'inertie de 74 000 kg, mesurant 4 mètres de diamètre, a été installé au Japon dans le but de réguler la fréquence sur une ligne électrique de 132 kV [Akagi & Sato, 2003] [Akagi & Sato, 2002].

3. La machine synchrone à aimants permanents MSAP

Une machine électrique de référence, notamment lorsqu'il s'agit de l'utiliser comme générateur électrique. De plus, il possède les systèmes de commande les plus efficaces parmi toutes les machines électriques. Bien qu'il soit difficile à utiliser dans le SISE car c'est la machine la plus contraignante en termes de puissance constante sur une plage de vitesse qu'est relativement étroite et le coût élevé qu'eut égard à MAS.

Mais même avec ces inconvénients, cette machine est largement utilisée dans les SISEs. Cela est principalement dû à sa puissance massique élevée et le rendement spectaculaire ce qui permet d'exploiter au mieux ces systèmes.

Ainsi, plusieurs sociétés, dont Beacon Power[®], ont déjà mis sur le marché des SISEs équipés avec des MSAPs [Cimuca, 2005].

Dans cette thèse, le système SISE équipé d'une machine MSAP sera adopté. Car il s'agit d'étudier un autre type de machines, qui sont des machines synchrones. Où étudiera les machines asynchrones (MADASB) comme des générateurs dans les éoliennes.

E. Matériaux couramment utilisés dans le SISE

Les matériaux utilisés dans la fabrication de volants d'inertie varient en fonction de leur type, qu'ils soient conçus pour une inertie lente ou rapide, ainsi que de leur utilisation spécifique et de leur puissance nominale.

Pour caractériser les volants d'inertie, les mêmes dimensions ont été prises en considération, avec des différences notables dues aux matériaux à partir desquels ils ont été fabriqués. Il a été observé que les volants d'inertie fabriqués à partir de matériaux présentant une résistance spécifique plus élevée (c'est-à-dire le rapport entre la résistance à la rupture et la densité) affichent des propriétés supérieures [Cimuca, 2005].

	Kevlar	Fibres de charbon + résine	Fibres de verre + résine	Alliage de titan	Aciers de grande résistance	Alloy (alliage d'aluminium)
Masse volumique ρ [kg/m ³]	1800	1500	2000	4500	7800	2700
Masse du volant [kg]	50,9	42,4	56,5	127,2	220,5	76,3
Résistance à rupture σ [MN/m ²]	4800	2400	1600	1215	1300 – 2100	594
Résistance spécifique [MNm/kg]	2,66	1,6	0,8	0,27	0,16 – 0,27	0,22
Moment d'inertie J [kg·m ²]	2,6082	2,1735	2,898	6,5205	11,3022	3,9123
Vitesse périphérique maximale $v_{\max}$ [m/s]	1632,99	1264,91	894,42	519,61	400 – 519,61	469
Vitesse maximale $n_{\max}$ [T/min]	62375	48316	34164	19847	15278 – 19847	17914
Vitesse angulaire maximale Ω [rad/s]	6531,96	5059,64	3577,68	2078,44	1600 – 2078,44	1876

Energie cinétique à 70% de la vitesse maximale	27,26 [MJ] 7,57 [kWh]	13,63 [MJ] 3,79 [kWh]	9,08 [MJ] 2,52 [kWh]	6,9 [MJ] 1,92 [kWh]	7,08 – 11,96 [MJ] 1,96 – 3,32 [KWh]	3,37 [MJ] 0,93 [kWh]
Densité d'énergie [Wh/kg]	148,7	89,3	44,6	15,1	8,9 – 15,1	12,2

Tableau 5.1 Caractéristiques de matériau utilisé pour les volants d'inerties [Cimuca, 2005].

5.4.1.2 Les avantages et les inconvénients de SISE

L'utilisation du SISE comporte plusieurs avantages, mais comme tout dans ce monde, il présente également des inconvénients. Ces aspects doivent être pris en considération lors de notre décision d'opter pour ce système ou non.

1. Les avantages

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie présentent de nombreux avantages par rapport à d'autres technologies de stockage d'énergie, notamment :

- **Longévité exceptionnelle** : Ces systèmes ont une durée de vie de plus de 20 ans, avec des cycles de charge/décharge quasi illimités.
- **Efficacité élevée** : Les systèmes inertiels de stockage d'énergie offrent des rendements élevés, généralement supérieurs à 90 %, grâce à leur faible perte d'énergie due à la friction.
- **Réactivité rapide** : Ils peuvent être chargés et déchargés rapidement, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant des réponses rapides.
- **Coûts d'exploitation et d'entretien réduits** : Comparés à d'autres technologies de stockage d'énergie, ils ont des coûts opérationnels et d'entretien relativement bas.
- **Facilité de surveillance de l'énergie stockée** : Ils permettent de suivre facilement la quantité d'énergie stockée à tout moment.
- **Puissance massique exceptionnelle** : Ces systèmes offrent une capacité de stockage d'énergie élevée par unité de masse.
- **Absence de besoins de refroidissement significatifs** : Ils ne nécessitent généralement pas de systèmes de refroidissement complexes en raison de restrictions thermiques minimales.

Ces caractéristiques font des systèmes inertiels de stockage d'énergie une option attrayante pour de nombreuses applications.

2. Les inconvénients

- Le principal inconvénient des SISEs réside dans leur relativement courte durée de stockage.
- La potentialité de bruit mécanique.
- Il est recommandé d'éviter une décharge totale.
- Il existe un risque de rupture ou d'éclatement du volant.

5.4.2 Intégration de SISE dans les éoliennes

Récemment, l'utilisation de Systèmes Inertiels de Stockage d'Énergie dans les éoliennes est devenue une pratique courante, principalement en raison de leur longue durée de vie, qui est similaire à celle des éoliennes elles-mêmes. De plus, leur rendement élevé permet de fournir une grande quantité d'énergie en peu de temps.

Ces systèmes peuvent servir à alimenter des réseaux isolés en cas de besoin, ou ils peuvent être utilisés comme une source de secours en cas de panne électrique imprévue. Ils sont également utilisés pour réguler la fréquence du courant électrique dans les réseaux hybrides.

La configuration de base pour l'intégration de ce système dans les éoliennes est illustrée dans la figure ci-dessous.

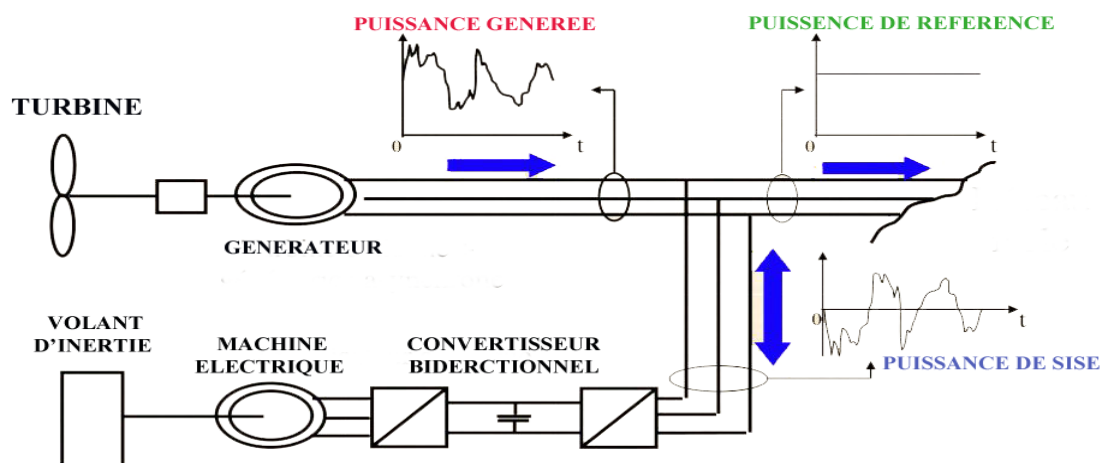


Figure 5.13 SISE intégré dans une éolienne.

5.4.3 Modélisation du système inertiel de stockage d'énergie

5.4.3.1 Modèle de la machine électrique MSAP

La modélisation mathématique directe de la machine sera réalisée en utilisant le modèle biphasé équivalent dq, en utilisant la transformée de Park-Concordia, conformément aux mêmes

conditions et hypothèses simplificatrices que celles décrites dans le deuxième chapitre de la MADASB.

Comme toute machine électrique triphasée, la machine synchrone à aimants permanents possède un enroulement triphasé au stator, représenté par les axes abc, déphasés les uns par rapport aux autres de 120° électriques (voir figure 5.14). Au niveau du rotor, l'excitation est assurée par des aimants permanents.

Selon la manière dont les aimants sont positionnés, on peut distinguer deux types de rotors :

Le premier type, appelé "rotor lisse", comporte des aimants montés à la surface du rotor (aimants surfaciques), créant un entrefer uniforme, et les inductances ne varient pas en fonction de la rotation du rotor.

En revanche, dans le deuxième cas, le "rotor à pôles saillants", les aimants sont incorporés à l'intérieur de la masse rotorique, ce qui entraîne une variation de l'entrefer en raison de l'effet de la saillance. Dans ce cas, les inductances sont fortement influencées par la position du rotor.

Pour cette thèse, le premier type, c'est-à-dire le "MSAP avec rotor lisse", a été choisi.

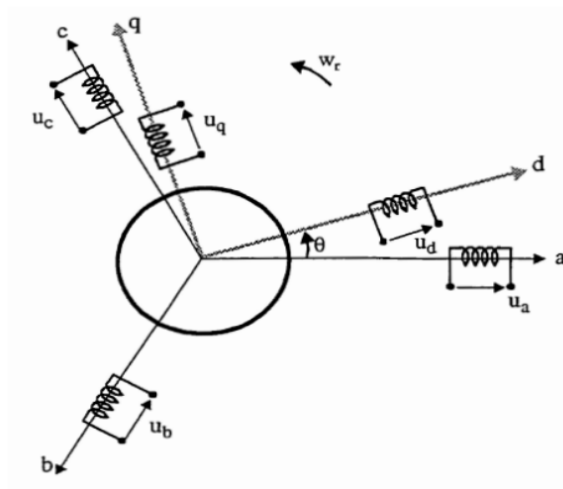


Figure 5.14 Référentiel abc et référentiel dq de MSAP.

A. Les équations électromagnétiques

Étant donné que le choix s'est porté sur le type de rotor lisse, où il n'y a pas de variation des inductances en fonction de la position du rotor, on peut établir que L_d , L_q et L_s sont équivalents. De plus, le flux magnétique généré par l'aimant est supposé constant et bien réparti sous forme sinusoïdale dans l'entrefer.

En tenant compte de ces considérations, les deux composantes de la tension statorique sont formulées comme suit [Beghdadi et al., 2023] :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_s \dot{I}_d - p \Omega_{msap} L_s I_q \\ V_q = R_s I_q + L_s \dot{I}_q + p \Omega_{msap} L_s I_d + p \Omega_{msap} \Psi_0 \end{cases} \quad 5.1$$

Avec :

- V_d et V_q : sont les dq-composants de tension statorique ;
- I_d et I_q : sont les dq-composants de courant statorique ;
- R_s : est la résistance statorique ;
- L_s : est l'inductance statorique ;
- p : est le nombre de pôles ;
- Ω_{msap} : est la vitesse mécanique de machine ;
- Ψ_0 : est le flux magnétique d'aimant permanent.

B. Les équations magnétiques

- L'équation dynamique de la machine :

$$\frac{d\Omega_{msap}}{dt} = \frac{C_{msap} - C_{r-v} - f_{msap} \Omega_{msap}}{J_{msap}} \quad 5.2$$

- L'équation de couple électromagnétique de machine est :

$$C_{msap} = p \Psi_0 I_q \quad 5.3$$

Où:

- C_{r-v} c'est le couple résistant de la charge ;
- f_{msap} c'est le coefficient de frottement et viscosité ;
- J_{msap} c'est l'inertie de la machine.

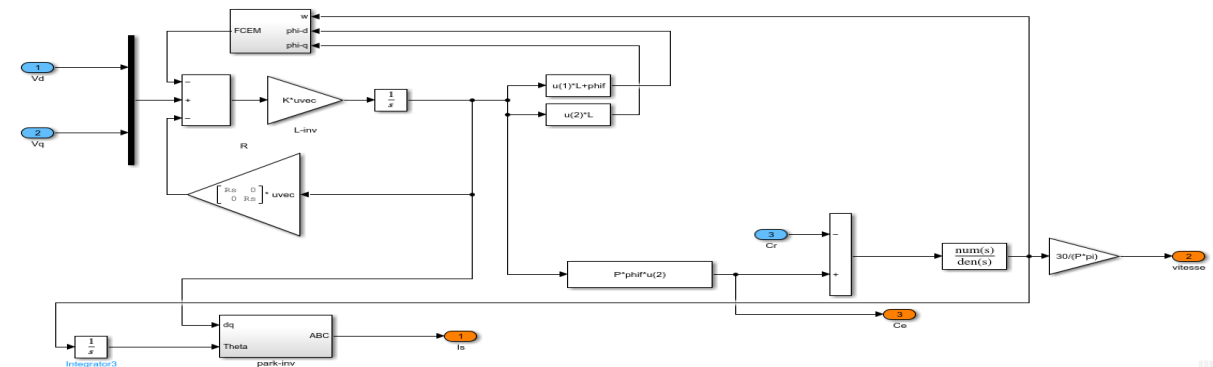


Figure 5.15 Modèle SIMULINK® de MSAP.

5.4.3.2 Validation de modèle de MSAP par simulation

Étant donné que ce type de machine électrique a déjà été exploré en détail dans des travaux et thèses antérieurs, et que son modèle mathématique est bien établi et accepté, on va procéder à une simulation et à des tests dans des conditions parfaitement courantes. Cette démarche vise simplement à obtenir un aperçu des caractéristiques de cette machine électrique.

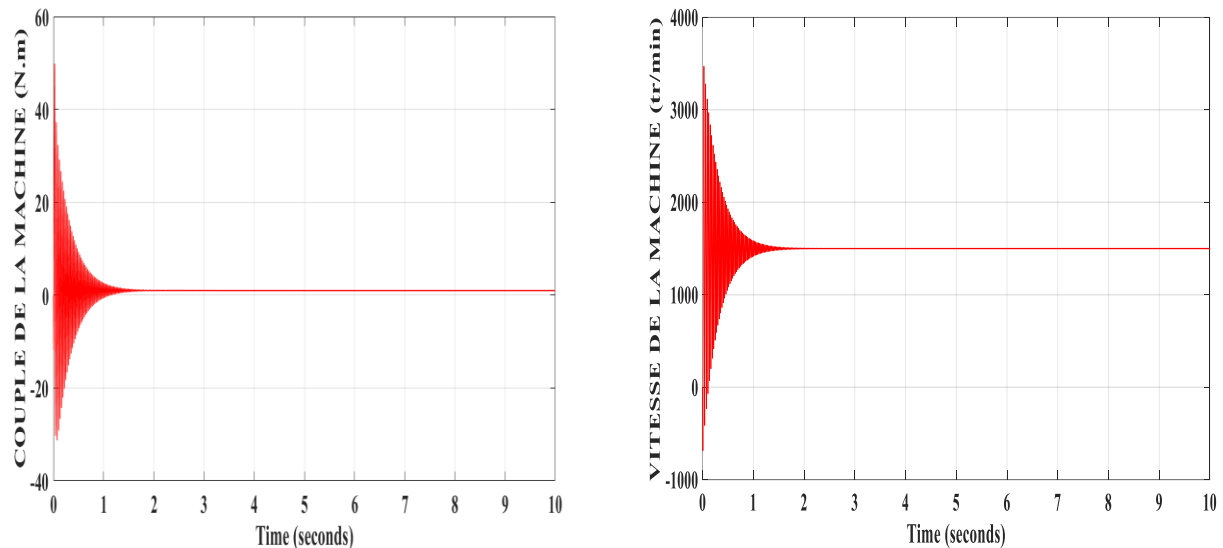


Figure 5.16 Le couple et la vitesse de MSAP.

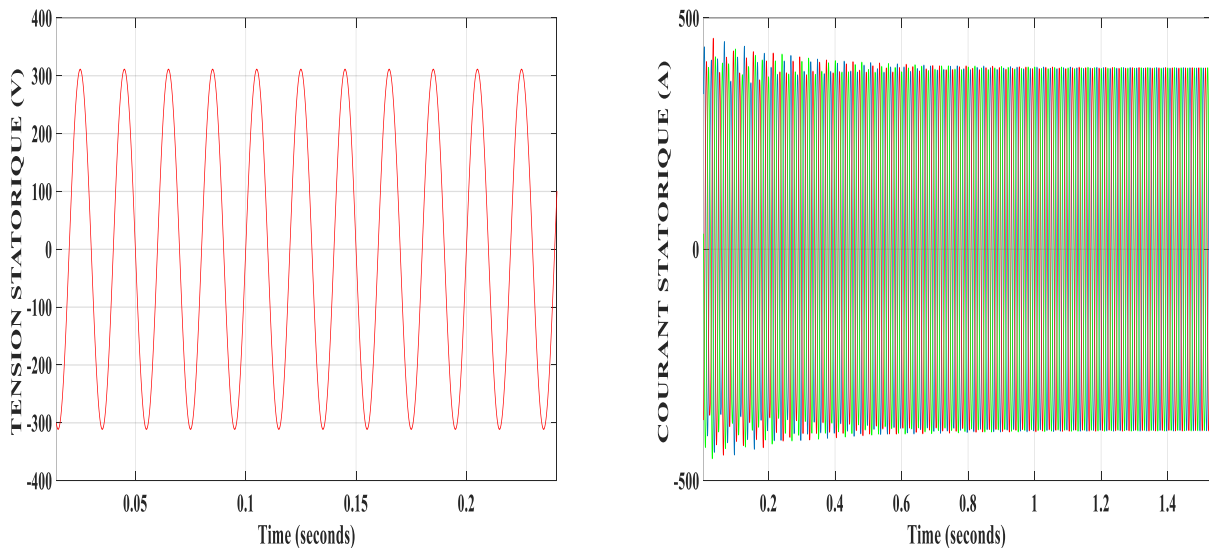


Figure 5.17 La tension et courant statoriques de MSAP.

Comme anticipé, la Machine Synchrone à Aimants Permanents présente des caractéristiques remarquables et une stabilité exceptionnelle. De plus, elle est parfaitement adaptée à fonctionner à la fois en tant que générateur et moteur électrique. En conséquence, cette machine

électrique se révèle être une option idéale pour son intégration au sein d'un système inertiels de stockage d'énergie électrique.

5.4.3.3 Modèle de volant d'inertie

L'équation fondamentale qui régit le fonctionnement du volant d'inertie est celle de l'énergie cinétique. Le principe essentiel de son fonctionnement repose entièrement sur la conversion de cette énergie cinétique en énergie électrique, ou inversement.

L'énergie cinétique du volant d'inertie, comme celle de toutes les masses en rotation autour de son axe, peut être exprimée de la manière suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} J_v \Omega_v^2 \quad 5.4$$

Avec:

- J_v : est le moment d'inertie du volant ;
- Ω_v : est la vitesse du volant.

D'autre part, l'équation du moment d'inertie pour toute masse pleine en rotation est égale à :

$$J_v = k.M_v.R_v^2 \quad 5.5$$

Où:

- k : est un coefficient qui dépend de la géométrie du volant d'inertie égale :
 - $k = 1$, pour un anneau mince;
 - $k = 0.5$, pour un disque à épaisseur uniforme;
 - $k = 0.4$, pour un bille;
 - $k = 2/3$, pour une sphère.
- M_v : est la masse du volant ;
- R_v : est le rayon du volant.

La quantité d'énergie stockée dans un volant d'inertie est limitée par la résistance du matériau à partir duquel il est fabriqué. La vitesse à laquelle le volant peut tourner ne peut pas être augmentée indéfiniment, car cela entraînerait une force centrifuge qui pourrait provoquer la désintégration du volant si la vitesse dépasse les limites tolérées par le matériau de fabrication [Cimuca, 2005].

La résistance à la rupture et la masse volumique du matériau utilisé pour fabriquer le volant d'inertie jouent un rôle essentiel dans la détermination de sa capacité de stockage d'énergie. Les matériaux idéaux devraient avoir une résistance à la rupture maximale et une masse volumique minimale [Cimuca, 2005].

Actuellement, des volants d'inertie très performants sont conçus en utilisant du Kevlar comme matériau. Ce matériau présente une résistance à la rupture d'environ 4,8 GPa et une masse volumique d'environ 1800 kg/m³. En utilisant ce matériau, il est possible de construire des volants d'inertie capables de stocker de l'énergie à une densité d'environ 181 Wh/kg, une valeur nettement supérieure à celle des batteries électrochimiques [Dinkins et al., s. d.].

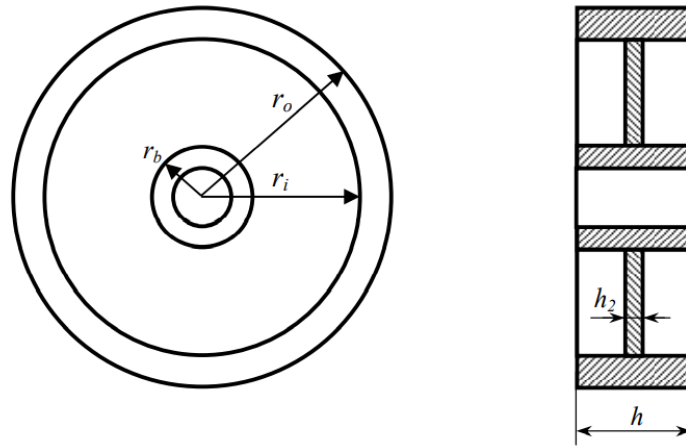


Figure 5.18 Paramètres géométriques du volant d'inertie [Cimuca].

Un volant d'inertie ne peut pas atteindre sa vitesse maximale, où la force centrifuge équivaut à la résistance du matériau dont il est fabriqué. Par souci de sécurité, il est recommandé de maintenir la vitesse du volant d'inertie en dessous de 70 % de sa vitesse maximale [Dinkins et al., s. d.]. Étant donné que l'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse, cela signifie que l'énergie stockée dans le volant d'inertie ne dépassera pas 50 % de l'énergie maximale disponible [Cimuca, 2005].

Pour augmenter le moment d'inertie, il est préférable que la majeure partie de la masse du volant soit répartie vers l'extérieur de celui-ci. L'inertie du volant est calculée selon la relation suivante [Cimuca, 2005] :

$$J_v = \frac{1}{2} \left[m_1 (r_i^2 + r_o^2) + m_2 (r_i^2 + r_b^2) + m_3 r_b^2 \right] \quad 5.6$$

Où :

- r_i : est le rayon interne ;
- r_o : est le rayon externe ;
- r_b : est le rayon d'axe de rotation du volant ;
- m_1 : est la masse du cylindre extérieur ;
- m_2 : est la masse du disque faisant la liaison entre le cylindre extérieur et le moyeu du volant ;
- m_3 : est la masse du moyeu du volant et de la partie de l'arbre qui se trouve dedans.

Les trois masses sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} m_1 = \rho_1 V_1 = \rho_1 h \pi (r_i^2 + r_o^2) \\ m_2 = \rho_2 V_2 = \rho_2 h_1 \pi (r_i^2 + r_b^2) \\ m_3 = \rho_3 V_3 = \rho_3 h \pi r_b^2 \end{cases} \quad 5.7$$

Où :

- ρ_1, ρ_2, ρ_3 : sont les masses volumiques dont les différentes parties du volant sont fabriquées.

Si le volant est fabriqué d'un seul matériau (cas des volants en acier), le moment d'inertie peut s'exprimer par :

$$J_v = \frac{1}{2} \rho \pi \left[h (r_o^4 - r_i^4 + r_b^4) + h_2 (r_i^4 - r_b^4) \right] \quad 5.8$$

Par substitution d'Eq 5.8 dans l'Eq 5.4, l'énergie cinétique de volant peut réécrire comme :

$$E_c = \frac{1}{4} \rho \pi \left[h (r_o^4 - r_i^4 + r_b^4) + h_2 (r_i^4 - r_b^4) \right] \Omega_v^2 \quad 5.9$$

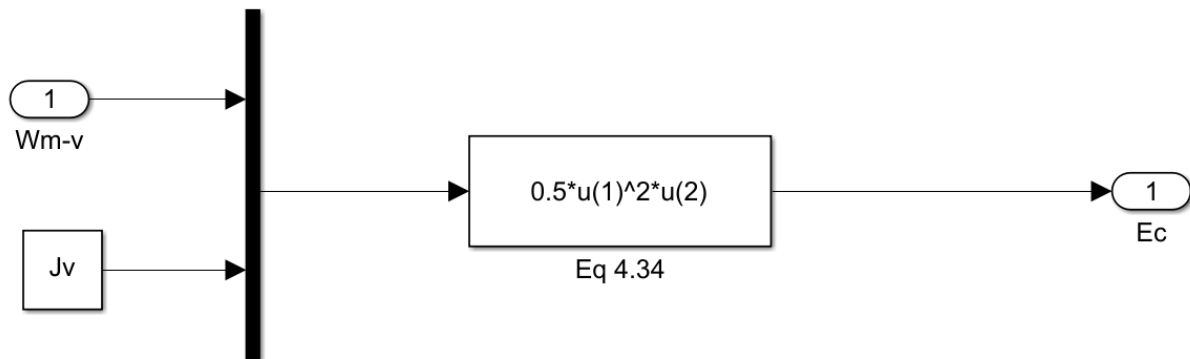


Figure 5.19 Schéma bloc SIMULINK® du volant d'inertie.

5.4.3.4 Validation du modèle du volant d'inertie par simulation

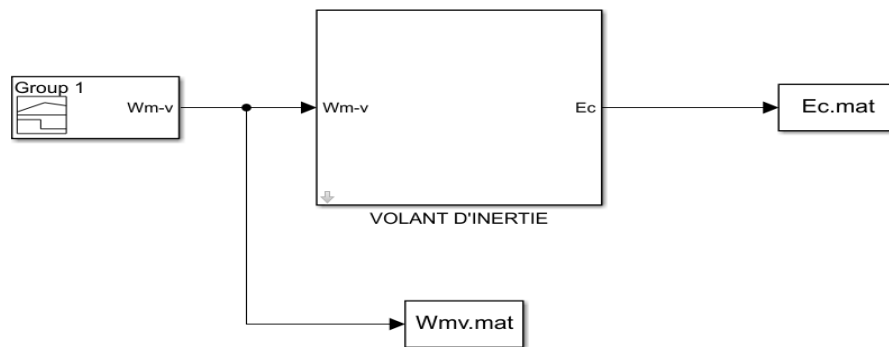


Figure 5.20 Modèle SIMULINK® du volant d'inertie.

À présent, on a effectué des tests et validé le dernier modèle mathématique, qui est le modèle du volant d'inertie. Ce modèle mathématique a été soumis à des essais à différentes vitesses (comme illustré dans la figure 5.21 à gauche), en permettant ainsi d'évaluer l'ampleur des variations de l'énergie cinétique de ce volant.

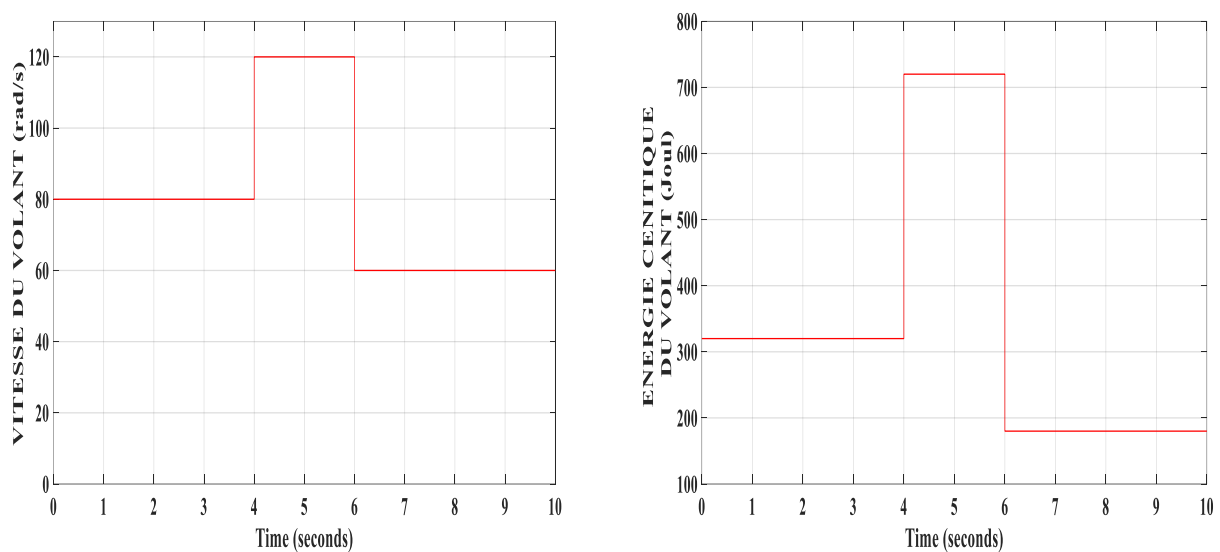


Figure 5.21 La vitesse et l'énergie cinétique du volant d'inertie.

En se basant sur ces graphiques, on peut aborder les points suivants :

- L'énergie cinétique du volant est directement proportionnelle à sa vitesse de rotation, ce qui signifie qu'elle augmente avec l'augmentation de sa vitesse et diminue avec sa diminution.

- L'énergie cinétique stockée dans ce volant peut être efficacement et facilement commandée en modulant sa vitesse de rotation.
- La commande de la vitesse du volant d'inertie repose sur la régulation de la vitesse de la machine électrique qui l'entraîne.

5.5 La commande synergétique de système inertiel de stockage d'énergie

Le Système Inertiel de Stockage d'Énergie est régulé de manière à stocker ou générer de l'énergie par étapes. Ce processus dépend de la vitesse de rotation du volant d'inertie, qui est commandée à travers la machine électrique à laquelle il est connecté. Ainsi, la commande de la vitesse du volant d'inertie est réalisée en ajustant la vitesse de la machine électrique.

Lors de la phase de stockage d'énergie, l'électricité est convertie pour emmagasiner l'énergie cinétique, et la machine électrique agit comme un moteur pour faire tourner le volant d'inertie. En revanche, lorsque l'énergie cinétique stockée dans le volant doit être reconvertie en énergie électrique, le volant d'inertie devient le moteur qui fait tourner la machine électrique, laquelle fonctionne alors comme une génératrice électrique.

La transition entre les phases de stockage et de production dépend des besoins en puissance de la charge connectée au système. La vitesse de référence est calculée en conséquence, puis transmise à un régulateur de vitesse synergétique. Ce régulateur de vitesse génère ensuite un couple de référence, à partir duquel on peut déterminer le courant de référence. Enfin, ce courant de référence est géré par un régulateur synergétique qui produit la tension de référence nécessaire au bon fonctionnement du système.

5.5.1 La commande de la MSAP

Le système de commande de la machine électrique est divisé en deux canaux distincts. Le premier canal est spécialement dédié à la commande du courant I_d , tandis que le deuxième canal est consacré à la régulation de la vitesse en commandant le couple de la machine à l'aide du courant I_q , comme illustré dans la figure ci-dessous.

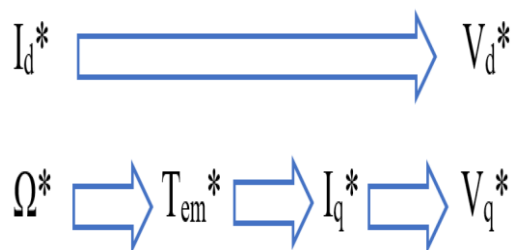


Figure 5.22 Hiérarchie de commande de MSAP.

A. La boucle d' I_d

Dans le contexte de la Machine Synchrone à Aimants Permanents, le rotor génère un flux magnétique permanent qui reste constant. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de réguler le courant I_d . Cependant, dans la plupart des situations, il est recommandé de commander le courant I_d pour qu'il soit égal à zéro. Cette approche vise à réduire les pertes Joule, ce qui contribue à améliorer l'efficacité et le rendement global du système [Retif, 2008].

1. La macro-variable

$$\begin{cases} \Psi_{s-d} = K_7(I_d^* - I_d) + K_8 \int (I_d^* - I_d).dt \\ \dot{\Psi}_{s-d} = K_7(\dot{I}_d^* - \dot{I}_d) + K_8(I_d^* - I_d) \end{cases} \quad 5.10$$

Avec:

- k_7 et k_8 : sont des paramètres de la commande ;

2. L'équation dynamique

$$T_4 \dot{\Psi}_{s-d} + \Psi_{s-d} = 0 \quad 5.11$$

Où:

- T_4 : est un paramètre de la commande.

3. Calcul de V_d^*

A partir d'Eq 5.1, on a :

$$\begin{cases} \dot{I}_d = V_d - R_s I_d + p\Omega_{msap} L_s I_q \\ \dot{I}_d^* = V_d^* - R_s I_d^* + p\Omega_{msap} L_s I_q \end{cases} \quad 5.12$$

Par la substitution d'Eq 5.12 dans l'Eq 5.11, on trouve :

$$T_4(K_7(V_d^* - R_s I_d^* + p\Omega_{msap} L_s I_q - \dot{I}_d) + K_8(I_d^* - I_d)) + K_7(I_d^* - I_d) + K_8 \int (I_d^* - I_d).dt = 0 \quad 5.13$$

Donc :

$$V_d^* = -\frac{K_8}{K_7}(I_d^* - I_d) + \frac{1}{T_4}(I_d^* - I_d) - \frac{K_8}{T_4 K_7} \int (I_d^* - I_d).dt + R_s I_d^* - p\Omega_{msap} L_s I_q + \dot{I}_d \quad 5.14$$

B. La boucle d'I_q**1. La macro-variable**

$$\begin{cases} \Psi_{s-q} = k_7 (I_q^* - I_q) + k_8 \int (I_q^* - I_q) dt \\ \dot{\Psi}_{s-q} = k_7 (\dot{I}_q^* - \dot{I}_q) + k_8 (I_q^* - I_q) \end{cases} \quad 5.15$$

2. L'équation dynamique

$$T_4 \dot{\Psi}_{s-q} + \Psi_{s-q} = 0 \quad 5.16$$

3. Calcul de V_q^{*}

$$\begin{cases} \dot{I}_q = V_q - R_s I_q - p\Omega_{msap} L_s I_d - p\Omega_{msap} \Psi_0 \\ \dot{I}_q^* = V_q^* - R_s I_q^* - p\Omega_{msap} L_s I_d - p\Omega_{msap} \Psi_0 \end{cases} \quad 5.17$$

$$\begin{aligned} T_4 (K_7 (V_q^* - R_s I_q^* - p\Omega_{msap} L_s I_d - p\Omega_{msap} \Psi_0 - \dot{I}_q) + K_8 (I_q^* - I_q)) \\ + K_7 (I_q^* - I_q) + K_8 \int (I_q^* - I_q) . dt = 0 \end{aligned} \quad 5.18$$

$$V_q^* = -\frac{K_8}{K_7} (I_q^* - I_q) + \frac{1}{T_4} (I_q^* - I_q) - \frac{K_8}{T_4 K_7} \int (I_q^* - I_q) . dt + R_s I_q^* - p\Omega_{msap} L_s I_d + \dot{I}_q + p\Omega_{msap} \Psi_0 \quad 5.19$$

C. La régulation du couple de machine

Avec une relation linéaire entre le couple et le courant I_q, il n'y a aucun problème à connaître le du courant de référence I_q^{*} basé sur le couple de référence.

Donc, A partir l'Eq 5.3, on a :

$$I_q^* = \frac{C_{msap}^*}{p\Psi_0} \quad 5.20$$

D. La régulation de la vitesse de machine

Tout comme pour la MADASB, cette considération s'applique de manière similaire à cette machine électrique. En effet, le régulateur synergétique de vitesse est identique, et la seule différence réside dans les symboles utilisés.

5.5.2 L'obtention de vitesse de référence

Premièrement, on a la puissance de référence P_{ref} du volant d'inertie, qu'est la puissance qui doit être stocker ou générer par le volant selon le signe de cette puissance (négative : génération d'énergie et positive : stockage d'énergie) :

$$P_{ref} = P_{éol} - P_{reg} \quad 5.21$$

Avec:

- $P_{éol}$: est la puissance générée par l'éolien ;
- P_{reg} : est la puissance demandée par la charge.

En se basant sur cette puissance de référence, il est possible de calculer l'énergie de référence stockée ou générée par le SISE à l'aide de la relation suivante :

$$E_{c-ref} = E_{c0} + \int_{t_1}^{t_2} P_{reg} dt \quad 5.22$$

Où :

- E_{c0} : l'énergie cinétique initiale du volant d'inertie.

Et en utilisant cette énergie de référence et la relation Eq 5.4, on peut déterminer la vitesse de référence du volant d'inertie par la formule :

$$\Omega_{msap}^* = \sqrt{\frac{2E_{c-ref}}{J_v}} \quad 5.23$$

5.5.3 Résultats de simulation

Maintenant, on va évaluer la commande synergétique du système inertiel de stockage d'énergie en utilisant une puissance de forme aléatoire, qui provient de l'éolienne. On prend une valeur constante de 1000 W pour la puissance de régulation.

Les résultats de simulation étaient les suivants :

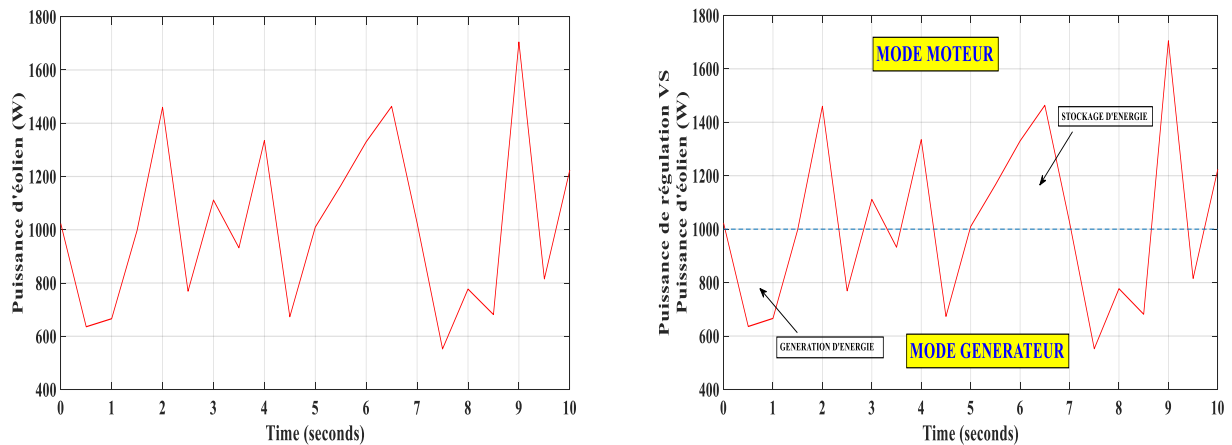


Figure 5.23 Puissance d'éolien, comparaison de $P_{éol}$ et P_{reg} .

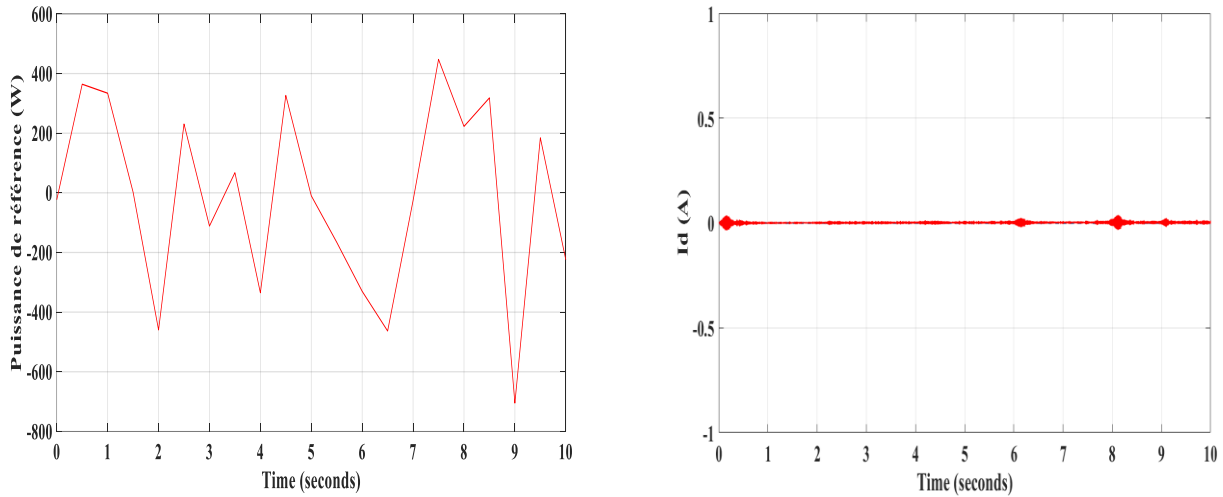
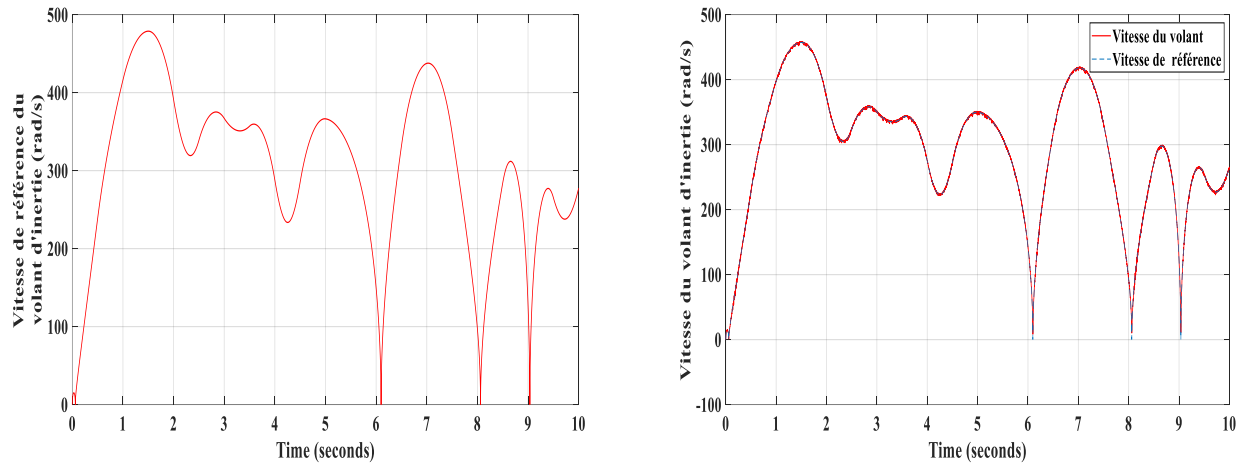
Figure 5.24 Puissance de référence, le courant I_d .

Figure 5.25 La vitesse de référence, la vitesse de la machine.

La puissance de régulation P_{reg} est maintenue constante à 1000 watts. De plus, cette valeur de puissance est comparée à la puissance générée par l'éolienne $P_{éol}$ pour obtenir la puissance de référence du Système Inertiel de Stockage d'Énergie. À partir de cette puissance de référence, le calculateur de vitesse détermine la vitesse de référence du SISE, qui est ensuite utilisée par le régulateur synergétique de vitesse pour calculer la tension de référence V_q^* .

Comme observé dans les simulations précédentes, les régulateurs synergétiques offrent des performances exceptionnelles avec une grande précision, une absence d'oscillations significatives, sans chattering, et une réponse très stable. La puissance active de référence de la machine démontre que la machine peut fonctionner de manière interchangeable dans les deux modes. Elle agit comme un moteur pendant la phase de charge où elle entraîne le volant

d'inertie. Dans la phase de décharge, la machine devient un générateur, entraînée par le volant d'inertie pour convertir l'énergie cinétique stockée en énergie électrique grâce à la MSAP.

En résumé, les résultats des simulations confirment la réussite de la mise en œuvre de la commande synergétique du SISE. Tous les objectifs de simulation sont atteints, avec une vitesse qui suit presque parfaitement sa référence, et la machine électrique fonctionne en tant que moteur lors de la phase de charge et en tant que générateur lors de la phase de décharge.

5.6 Intégration du SISE avec le système éolien

On a maintenant achevé la dernière phase de simulation de cette thèse, qui consiste en l'intégration du système inertiel de stockage d'énergie dans le système global. Le système global comprend une éolienne, une MADASB avec son système de commande basé sur la commande synergétique, des convertisseurs de puissance et leurs commandes à modulation de largeur d'impulsion (MLI) vectorielles.

La simulation a été effectuée sous les mêmes conditions préalables de vitesse du vent et de durée de chapitre précédent. Pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans le système éolien, une approche hybride floue P&O-synergétique a été choisie comme algorithme.

Les résultats de la simulation sont les suivants :

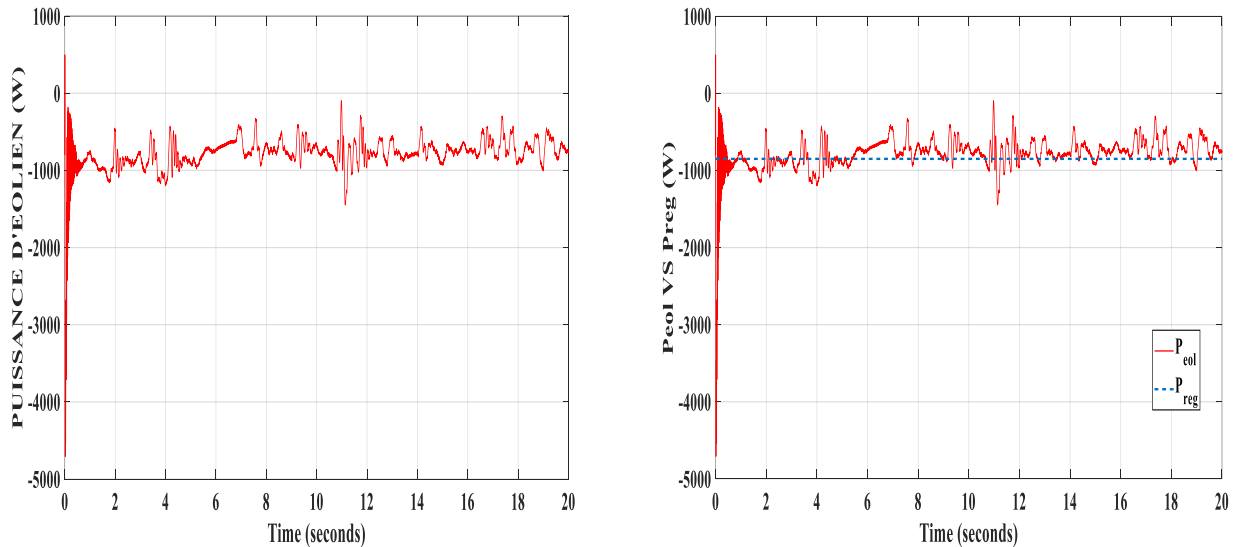


Figure 5.26 La puissance générée par l'éolien, comparaison de puissances générée et de régulation.

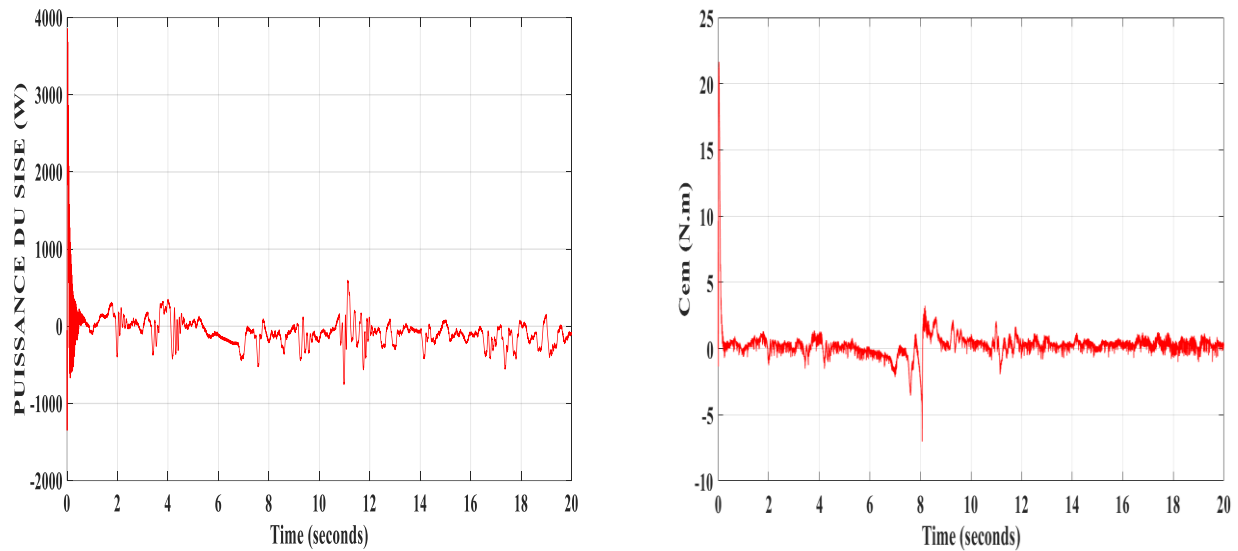


Figure 5.27 La puissance du SISE, le couple électromagnétique de MSAP.

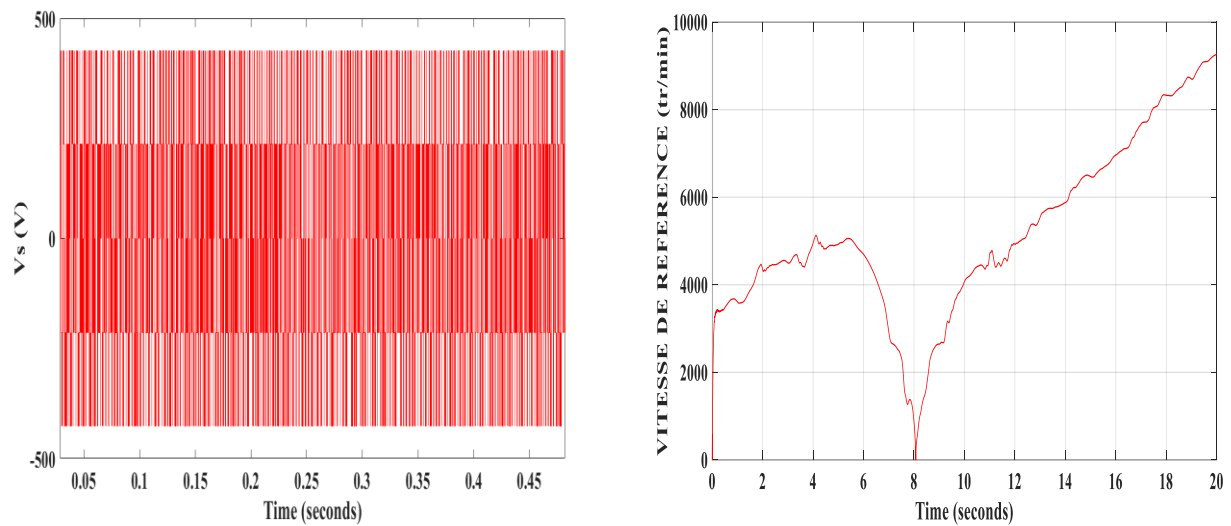


Figure 5.28 La tension statorique et la vitesse de MSAP.

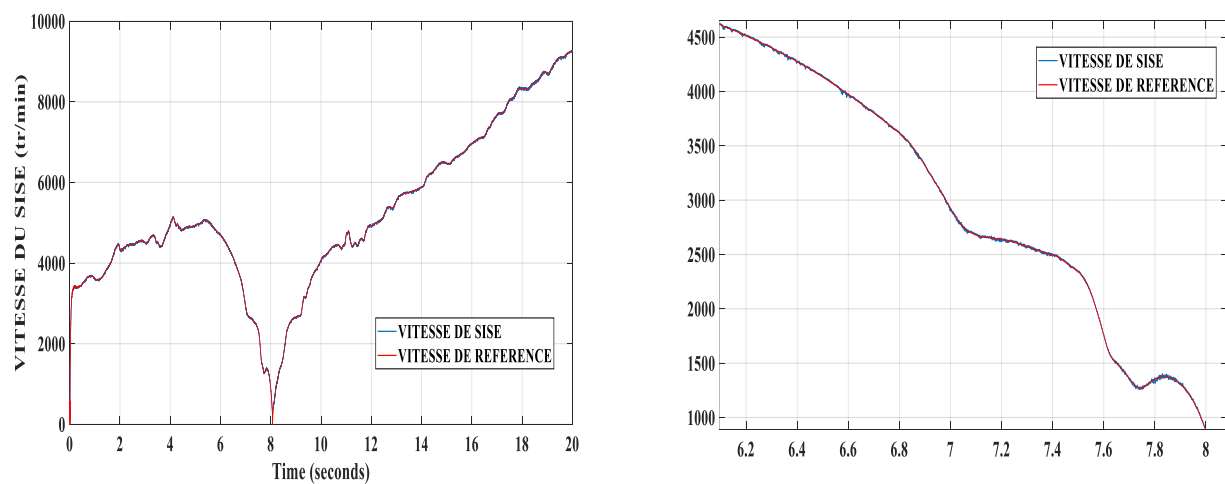


Figure 5.29 La vitesse de la MSAP, zoom (6.1s < t < 8.1s).

À travers les données présentées dans les graphiques précédents, on peut déduire les observations suivantes :

- ✓ Étant donné que la simulation a été réalisée dans des conditions de vent identiques, la puissance extraite par le système éolien P_{eol} est la même que celle générée dans la simulation précédente utilisant l'algorithme hybride P&O-synergétique MPPT (Figure 5.26 à gauche).
- ✓ La courbe de puissance de régulation coupe la courbe de puissance de l'éolienne en plusieurs points, indiquant que le système de stockage SISE doit stocker de l'énergie lorsque la puissance se situe sous la courbe de P_{reg} et la régénérer lorsque la puissance dépasse cette courbe (Figure 5.26 à droite).
- ✓ La puissance de référence du SISE varie, passant de positive à négative en fonction des besoins du système. Elle est positive lorsque le système est sollicité pour générer de l'énergie électrique et négative lorsqu'il est sollicité pour stocker de l'énergie (Figure 5.27 à gauche).
- ✓ La tension statorique de la MSAP est générée à partir du convertisseur de puissance en utilisant une MLI vectorielle, assurant ainsi une tension de haute qualité avec un faible taux d'harmoniques (Figure 5.28 à gauche).
- ✓ La vitesse de référence du volant d'inertie varie en fonction de la puissance de référence. Un moment d'inertie du volant J_v a été choisi de manière à obtenir un volant d'inertie de type rapide, mais à une vitesse moyenne élevée. Cette sélection est en adéquation avec les capacités de la machine électrique utilisée, qui peut atteindre ces vitesses, ce qui constitue l'un de ses avantages majeurs.
- ✓ La vitesse du système suit efficacement et précisément la vitesse de référence, avec une grande précision, sans dépassement significatif et avec des oscillations minimales.

En conclusion, le Système Inertiel de Stockage d'Énergie s'avère être hautement efficace pour stocker de l'énergie électrique en la convertissant en énergie potentielle au moyen du volant d'inertie. Ce système permet de stocker de l'énergie pour une utilisation ultérieure lors de pics de demande ou lorsque la vitesse du vent est insuffisante pour générer suffisamment d'énergie électrique pour alimenter la charge, le tout en un laps de temps très court.

La Machine Synchrone à Aimants Permanents fonctionne comme un générateur lorsqu'il faut régénérer de l'énergie électrique et comme un moteur lorsque de l'énergie électrique est stockée. L'utilisation de la MLI vectorielle pour commander le convertisseur de puissance côté machine

2 permet de générer une tension de haute qualité avec une réduction significative des oscillations de vitesse et de couple de la machine, contribuant ainsi à réduire les vibrations mécaniques et le bruit acoustique.

Comme dans toutes les simulations précédentes, l'utilisation de la commande synergétique offre un avantage notable, en offrant une commande de qualité supérieure avec des performances élevées. Elle assure une régulation sans dépassement significatif ni oscillations notables, avec une grande précision, quelle que soit la vitesse à laquelle les valeurs de référence évoluent. Cette caractéristique est particulièrement cruciale lors de l'utilisation de ce type de commande dans le SISE, surtout lorsque la vitesse du vent varie considérablement en peu de temps.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a exploré en détail les aspects des systèmes de stockage d'énergie. On a débuté en comprenant les principes fondamentaux de leur fonctionnement, suivi de leur classification. Ensuite, on a examiné de près le système de stockage d'énergie inertiel SISE, qui constitue le pilier central de cette thèse.

Les systèmes de stockage d'énergie jouent un rôle crucial, notamment dans le domaine des énergies renouvelables. Ils interviennent lorsque ces sources d'énergie ne sont pas disponibles en quantité suffisante, en assurant la réserve énergétique nécessaire pendant ces périodes.

Le SISE se distingue par ses avantages notables, tels qu'un rendement exceptionnel et une longue durée de vie, ce qui en fait une solution idéale pour les applications exigeant une grande capacité énergétique sur une période limitée, comme c'est le cas pour les éoliennes.

REFERENCES

- [Akagi & Sato, 2002] Akagi, H., & Sato, H. (2002). Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 17(1), 109-116. <https://doi.org/10.1109/63.988676>
- [Akagi & Sato, 2003] Akagi, H., & Sato, H. (2003). Control and performance of a flywheel energy storage system based on a doubly-fed induction generator-motor for power conditioning. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC 99*, 1, 32-39. <https://doi.org/10.1109/pesc.1999.788977>
- [Beghdadi et al., 2023] Beghdadi, M., Kouzi, K., & Ameer, A. (2023). Robust fully synergetic control of PMSM-Flywheel Energy Storage System FESS integrated in standalone hybrid PV-wind system. *Revista Română de Informatică Şi Automatică*, 33(1), 67-80. <https://doi.org/10.33436/v33i1y202306>
- [Bernard, 2001] Bernard, N. (2001). *Conception, dimensionnement et commande d'un moteur/générateur synchrone à excitation homopolaire et à bobinages dans l'entrefer pour accumulateur électromécanique d'énergie* [Thèse de doctorat]. Antenne de Bretagne de l'école Normale supérieure de Cachan.
- [Butler, 1994] Butler, P. (1994). *Battery energy storage for utility applications : Phase I - opportunities analysis*. <https://doi.org/10.2172/10196262>
- [Cimuca, 2005] Cimuca, G. (2005). *Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens* [Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille]. <http://www.theses.fr/2005ENAM0027>
- [Cimuca et al., 2006] Cimuca, G., Saudemont, C., Robyns, B., & Radulescu, M. (2006). Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 53(4), 1074-1085. <https://doi.org/10.1109/tie.2006.878326>
- [Cimuca et al., 2010] Cimuca, G., Breban, S., Radulescu, M. M., Saudemont, C., & Robyns, B. (2010). Design and Control Strategies of an Induction-Machine-Based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 25(2), 526-534. <https://doi.org/10.1109/tec.2010.2045925>
- [Dinkins et al., s. d.] Dinkins, J., Kerry, L., Mahserjian, S., & Pinkoski, B. (s. d.). Ground-Based Energy Storage, Texas Space Grant Consortium, http://www.tsgc.utexas.edu/archive/design/sps_storage/
- [EUR 19978 Brochure, 2001] EUR 19978 Brochure. (2001). *Energy storage - a key technology for decentralized power, power quality and clean transport*. Office For Official Publications Of The European Communities. https://www.cordis.lu/eesd/src/lib_misc.htm
- [Faure, 2003] Faure, F. (2003). *Suspension magnétique pour volant d'inertie* [Thèse de doctorat]. Institut national, polytechnique de Grenoble.

- [Gao et al., 2005] Gao, Y., Gay, S. E., Ehsani, M., Thelen, R. F., & Hebner, R. E. (2005). Flywheel Electric Drive characterization for hybrid vehicles. *International Journal Of Electrical Engineering In Transportation*, 1.
- [Gualous, 2004] Gualous, H. (2004). Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport. *Revue de L'électricité et de L'électronique/REE. Revue de L'électricité et de L'électronique*, (07), 83. <https://doi.org/10.3845/ree.2004.075>
- [Hamouche, 2010] Hamouche, H. (2010). Système inertiel de stockage d'énergie à palier supraconducteur. *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10*, 189-193. https://www.cder.dz/download/smee2010_20.pdf
- [Hofmann & Sanders, 2002] Hofmann, H., & Sanders, S. (2002). Synchronous Reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems. *Proc. IEEE Power Electronics In Transportation Workshop*, 199-206. <https://doi.org/10.1109/pet.1996.565929>
- [Hofmann et al., 2004] Hofmann, H., Sanders, S., & El-Antably, A. (2004). Stator-Flux-Oriented Vector Control of Synchronous Reluctance Machines With Maximized Efficiency. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 51(5), 1066-1072. <https://doi.org/10.1109/tie.2004.834968>
- [Lawrence et al., 2003] Lawrence, R., Craven, K., & Nichols, G. (2003). Flywheel UPS. *IEEE Industry Applications Magazine*, 9(3), 44-50. <https://doi.org/10.1109/mia.2003.1195682>
- [Nemsi et al., 2016] Nemsi, S., Belfedhal, S. A., & Barazane, L. (2016). Role of flywheel energy storage system in microgrid. *Journal Of Engineering Research And Technology*, 3. <https://iugspace.iugaza.edu.ps/handle/20.500.12358/28278>
- [Retif, 2008] Retif, J. M. (2008). Vector control of permanent magnetic Synchronous machine. *Review Of Vector Control Of Permanent Magnetic Synchronous Machine*, 19
- [Taraft, 2008] Taraft, S. (2008). *Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation* [Thèse de magister]. Université de Bejaïa.
- [Thelen et al., 2003] Thelen, R., Herbst, J., & Caprio, M. (2003). A 2 MW flywheel for hybrid locomotive power. *IEEE 58th Vehicular Technology Conference - VTC 2003*, 3231-3235. <https://doi.org/10.1109/vetecf.2003.1286244>.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable de plus en plus utilisée dans le monde entier. Elle consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à l'aide de turbines éoliennes.

Les turbines éoliennes sont devenues plus efficaces et plus grandes. Les éoliennes offshore sont maintenant en mesure de produire jusqu'à 14 MW d'énergie, ce qui représente une avancée importante par rapport aux éoliennes de 3 MW qui étaient utilisées il y a quelques années.

Les systèmes de stockage d'énergie sont essentiels pour gérer la production intermittente de l'énergie éolienne. Les technologies de stockage avancées, comme les batteries, les volants d'inertie et les supercondensateurs, sont en cours de développement pour répondre à ce besoin.

Les coûts de l'énergie éolienne ont considérablement diminué au cours des dernières années. Selon l'Agence internationale de l'énergie, les coûts de l'énergie éolienne terrestre ont diminué de plus de 40 % depuis 2010, ce qui la rend de plus en plus compétitive par rapport aux autres sources d'énergie.

L'expansion de l'énergie éolienne offshore présente encore des défis, tels que les coûts élevés de l'installation et de la maintenance, les difficultés de transmission de l'électricité et les impacts environnementaux potentiels sur les écosystèmes marins.

En résumé, l'énergie éolienne a connu une croissance rapide au cours des dernières années et continue d'évoluer rapidement grâce aux avancées technologiques et à la diminution des coûts. Les progrès dans les systèmes de stockage d'énergie et l'expansion offshore sont des domaines clés à surveiller pour l'avenir de l'énergie éolienne.

La machine asynchrone à double alimentation sans balais est une variante de MADA classique qui utilise un système sans balais pour éliminer les balais de carbone traditionnels utilisés dans la machine à double alimentation. Cette configuration améliore l'efficacité énergétique de la machine et réduit les coûts de maintenance.

Cette machine particulière est une variante avancée de la machine asynchrone classique qui offre une commande de vitesse précise, une efficacité énergétique améliorée et une maintenance réduite. Elle est souvent utilisée dans les applications industrielles où un contrôle précis de la vitesse est essentiel.

Dans un système synergétique, chaque composant est conçu pour fonctionner en harmonie avec les autres, de manière à maximiser l'efficacité et la productivité du système dans son ensemble.

Par exemple, dans un système de contrôle de processus industriels, la commande synergétique peut être utilisée pour coordonner les différentes machines, capteurs et actionneurs pour produire une production optimale.

La commande synergétique d'un système peut être optimisée en utilisant des algorithmes de commande avancés, tels que la commande prédictive, la commande robuste et la commande adaptative. Ces algorithmes sont conçus pour maximiser l'efficacité du système tout en minimisant les coûts et les risques associés à l'exploitation du système.

En fin de compte, la commande synergétique d'un système est essentielle pour assurer un fonctionnement efficace et sûr des systèmes complexes dans un large éventail de domaines, allant de la production industrielle à la sécurité informatique en passant par la navigation aérienne et la robotique.

Les algorithmes de suivi du point de puissance maximale sont des algorithmes de contrôle de la puissance utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie, tels que les systèmes solaires photovoltaïques ou éoliens. Ces algorithmes permettent de maximiser l'efficacité de conversion d'énergie en ajustant en temps réel le point de fonctionnement du système pour correspondre à la puissance maximale disponible.

L'algorithme TSR (Tip Speed Ratio) est un algorithme de commande utilisé pour optimiser l'efficacité des éoliennes. Le TSR est un rapport entre la vitesse de rotation de l'éolienne et la vitesse du vent incident. L'objectif de l'algorithme TSR est de maximiser le TSR pour maximiser l'efficacité de l'éolienne.

L'algorithme P&O (Perturb and Observe) floue est un algorithme de commande utilisé pour maximiser l'efficacité des éoliennes. L'algorithme P&O classique fonctionne en perturbant la vitesse de rotation de l'éolienne et en observant la variation de la puissance de sortie. Cependant, l'algorithme P&O classique peut entraîner des oscillations de la puissance de sortie et des surcharges de l'onduleur.

L'algorithme P&O floue résout ce problème en utilisant des techniques de logique floue pour contrôler les variations de la vitesse de rotation. L'idée est de faire varier la vitesse de référence donc la vitesse de la turbine de manière plus douce et plus progressive pour éviter les oscillations et les vibrations.

En général, l'algorithme P&O floue est utilisé en conjonction avec d'autres algorithmes de commande, tels que les algorithmes TSR (Tip Speed Ratio) et les algorithmes de commande de

pitch (angle d'attaque des pales de l'éolienne), pour maximiser l'efficacité de l'éolienne dans une large plage de vitesses de vent et de conditions environnementales.

Un système inertiel de stockage d'énergie est une technologie de stockage d'énergie mécanique qui utilise la force d'inertie d'une masse tournante pour stocker de l'énergie. Le système est composé d'un rotor qui est connecté à un moteur électrique/générateur qui peut convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, et vice versa. Lorsque de l'énergie est fournie au moteur/générateur, le rotor commence à tourner, stockant de l'énergie sous forme d'énergie cinétique. Lorsque de l'énergie est nécessaire, le moteur/générateur est inversé pour extraire de l'énergie de la rotation du rotor.

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie sont actuellement utilisés dans une variété d'applications, notamment pour stabiliser les réseaux électriques, fournir une alimentation de secours pour les systèmes critiques et pour fournir une alimentation d'appoint aux éoliennes et aux centrales solaires.

Les perspectives d'avenir de cette thèse résident principalement dans la mise en œuvre pratique des concepts développés. En effet, le travail réalisé jusqu'à présent se limite à une simulation théorique, et sa concrétisation expérimentale permettrait de valoriser pleinement les résultats obtenus. Par ailleurs, la simulation elle-même peut être enrichie et élargie à d'autres domaines d'application, tels que le diagnostic et la détection de défauts. De plus, il serait pertinent d'explorer l'hybridation de la commande synergétique avec une commande tolérante aux défauts afin d'améliorer les performances et la robustesse des systèmes.