



République populaire démocratique d'Algérie
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université d'Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de technologie
Département de Génie Mécanique
Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADÉMIQUE
Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Électromécanique
Spécialité : Électromécanique

Présenté par :

1. LAHLOUH Amir
2. BEKAKRA Dhia Elhak
3. MEGDOUD Lakhdar

Thème:

**Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à cage
(GAS) autonome connecter aux DC micro-réseaux.**

Soutenu le: 13/06 /2026

Devant le jury composé de :

Dr. DJOGHRAB Alaeddine

Président

Dr. CHABANI Mohammed Saci

Encadreur

Dr. MANSOURI Khaled

Co-Encadreur

Dr. LARGOT Soulef

Examineur

Année Universitaire : 2025/2026

Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur l'étude, la modélisation et la commande d'une machine asynchrone à cage fonctionnant en génératrice autonome (GAS) pour l'électrification de sites isolés via des micro-réseaux DC. La première partie de ce mémoire est consacrée aux généralités sur les systèmes auto-excités et aux avantages des architectures de micro-réseaux DC pour la gestion de l'énergie en site isolé. Ensuite, les outils de modélisation mathématique basés sur la transformation de Park et intégrant la non-linéarité de la saturation magnétique sont développés afin d'analyser les performances de la machine connectée à un banc de capacités et des charges variables. Face à l'instabilité naturelle de la tension face aux fluctuations de charge et de vitesse, la dernière partie du mémoire est dédiée à l'implémentation d'une technique de commande vectorielle. Cette stratégie, appliquée à un redresseur commandé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), permet de réguler et de maintenir une tension rigoureusement constante à la sortie du redresseur (bus DC) malgré les perturbations du système électromécanique. Enfin, cette tension continue est ondulée à la bonne amplitude et fréquence afin de garantir une qualité de l'énergie optimale pour les utilisateurs finaux du site isolé.

Mots-clés: Machine asynchrone à cage, Génératrice asynchrone autonome, Sites isolés, Micro-réseaux DC, Modélisation mathématique, Saturation magnétique, Banc de condensateurs, Charges variables, Redresseur à MLI, Commande vectorielle (FOC), Régulation de tension, Qualité de l'énergie, Conversion d'énergie, Systèmes électromécaniques.

الملخص

تتناول أعمال هذه الأطروحة دراسة ونمذجة وتحكم محرك غير متزامن بقفص يعمل كمولد مستقل (GAS) من أجل تزويد المواقع المعزولة بالكهرباء عبر شبكات التيار المستمر الصغيرة. يُخصص الجزء الأول من هذه الأطروحة لمعلومات عامة عن الأنظمة ذاتية الإثارة ومزايا هياكل شبكات التيار المستمر الصغيرة لإدارة الطاقة في المواقع المعزولة. بعد ذلك، تم تطوير أدوات النمذجة الرياضية القائمة على تحويل بارك والتي تدمج عدم خطية التشبع المغناطيسي من أجل تحليل أداء المحرك المتصل بمجموعة من السعات والأحمال المتغيرة. في مواجهة عدم الاستقرار الطبيعي للجهد في ظل تقلبات الحمل والسرعة، تم تخصيص الجزء الأخير من الأطروحة لتنفيذ تقنية التحكم المتجهي. تسمح هذه الاستراتيجية، عند تطبيقها على مقوم يتم التحكم فيه بتعديل عرض النبضة (PWM)، بتنظيم والحفاظ على جهد ثابت تمامًا عند خرج المقوم (ناقل التيار المستمر) على الرغم من اضطرابات النظام الكهروميكانيكي. وأخيرًا، يتم تعديل هذا الجهد المستمر بالسعة والتردد المناسبين لضمان جودة طاقة مثالية للمستخدمين النهائيين في الموقع المعزول.

الكلمات المفتاحية: محرك غير متزامن بقفص، مولد غير متزامن مستقل، المواقع المعزولة، شبكات التيار المستمر الصغيرة، النمذجة الرياضية، التشبع المغناطيسي، مجموعة المكثفات، الأحمال المتغيرة، المقوم.

Abstract

This thesis focuses on the study, modeling, and control of a squirrel-cage induction motor operating as a stand-alone generator (SAG) for the electrification of off-grid sites via DC microgrids. The first part of this thesis is devoted to an overview of self-excited systems and the advantages of DC microgrid architectures for energy management in isolated sites. Next, mathematical modeling tools based on the park transformation and incorporating the nonlinearity of magnetic saturation are developed to analyze the performance of the machine connected to a bank of capacitors and variable loads. Given the inherent voltage instability caused by load and speed fluctuations, the final part of the thesis is dedicated to the implementation of a vector control technique. This strategy, applied to a Pulse Width Modulation (PWM)-controlled rectifier, allows for the regulation and maintenance of a strictly constant voltage at the rectifier output (DC bus) despite disturbances in the electromechanical system. Finally, this DC voltage is modulated to the correct amplitude and frequency to ensure optimal power quality for end users in the isolated site.

Keywords: Squirrel-cage induction motor, Stand-alone asynchronous generator, Isolated sites, DC microgrids, Mathematical modeling, Magnetic saturation, Capacitor bank, Variable loads, Rectifier.

Dédicace

إلى نفسي أولاً... إلى تلك الروح التي قاومت، وصبرت، وتخطت الصعاب وعشرات الطرق لتصل إلى هذا اليوم. إلى الشغف الذي لم ينطفئ،

والإصرار الذي قادني لتحقيق هذا الطموح العلمي، أهدي هذا النجاح اعترافاً بالجهد وثبات الخطى.

إلى منبع العطاء والدعم المطلق... عائلتي الغالية:

إلى والدي العزيز؛ سند العمر وقدوتي، من حصدت اليوم ثمار غرسه الطيب ودعوته الصامته.

إلى والدتي الحبيبة؛ نبع الحنان وملأذي الآمن، من كانت دعواتها في جوف الليل تذلل لي كل عسير، وتضيء لي عتمة السهر.

إلى إخوتي وأخواتي؛ الذين كانوا لي طوال مسيرتي نعم العون، ومصدر الفرح والتشجيع المستمر.

إلى رفقاء الدرب والخطى... أصدقائي الأوفياء: إلى كل من شاركني لحظات التعب والبهجة، وإلى أولئك الذين آمنوا بي في أوقات الشك،

ودفعوا بي دائماً نحو الأمام. إلى كل صديقٍ مخلص ترك أثراً طيباً في هذه الرحلة الجامعية.

إلى كل هؤلاء... أهدي ثمرة جهدي ونجاحي في مذكرة الماجستير.

أمير الحلوج.

Dédicace

إلى الروح التي سكنت بين جوانحي...

إلى نفسي التي صبرت على سهر الليالي، وتحملت مشاق ومكابدة البحث العلمي، وتحدثت كل العقبات لتصل إلى هذه اللحظة الحاسمة من التتويج. أهدي هذا

النجاح اعتزازاً بالمسير وثباتاً على الهدف.

إلى منبع الطمأنينة والأثر الطيب في حياتي... عائلتي الكريمة:

إلى أبي الغالي؛ مأمني وسندي، من غرس في طموح المعالي وكان ظلي الظليل في كل خطوة. أهديك ثمرة كفاحك في.

إلى أمي الحبيبة؛ جنتي على الأرض، من صاغت من دعواتها الصادقة طوق نجاة لي في الساعات العجاف، وسمة أمل عند كل تعب.

إلى إخوتي وأخواتي؛ نبض الفؤاد وسرور الأيام، الذين أستمَد من وجودهم الدفء والقوة لمواصلة الطريق.

إلى شركاء الرحلة ورفقاء المذكرة:

إلى زميلي العزيزين اللذين اقتسمت معهما غناء الإنجاز، وضغط التحليل، وشغف التميز. كما معاً في هذا الكفاح العلمي كلبنيان المرصوص، يشد بعضنا أزر

بعض، حتى عبرنا بالبحث إلى بر الأمان. مباركاً لنا هذا التخرج المشترك.

إلى الأوفياء الصادقين... أصدقائي:

إلى كل من وهبني تشجيعاً صادقاً، أو كلمة طيبة تركت أثراً في قلبي طوال سنوات الدراسة والتحصيل.

إليكم جميعاً، أهدي هذا العطاء المتواضع.

ضياء الحق بذاكرة.

Dédicace

لم تكن الرحلة سهلة أبداً . . .

بل كانت مليئةً بالمحطات الشاقة، واللحظات التي شارفنا فيها على التعب، وسهر الليالي الطوال التي اختبرت صبرنا وإصرارنا . لكننا اليوم،

بفضل الله وتوفيقه، نقف على عتبة الوصول .

إلى من كانوا وقوداً لي في هذه الرحلة الصعبة . . . عائلتي الأبية:

إلى أبي العزيز؛ الذي لم يترك يدي يوماً، وكان يدفعني نحو القمة بإيمانه الكبير بي وقدراتي . إليك يا من حصدتُ اليوم ثمار صبرك

ودعمك .

إلى أمي الحنونة؛ التي كانت تمسح عن كاهلي وعناء الطريق بدعاءٍ دافئٍ يُشعرنِي بالأمان ويهون عليّ كل عسير . نجاحي هذا هو غرس

يديك طوال السنين .

إلى إخوتي وأخواتي؛ الذين كانوا لي طاقة إيجابية متجددة، وسنداً حقيقياً أتكأ عليه كلما زاد ضغط الدراسة .

إلى زميلتي ورفيقي السلاح العلمي في هذه المذكرة:

إلى من خضت معهما هذه التجربة مجلوها ومرها، وعشنا معاً تفاصيل الضغط، والتحضير، والمحاولة تلوا المحاولة . لقد كانت شراكتنا وتلاحمنا الصخرة التي تكسرت عليها كل الصعاب، فكنا نعم العون لبعضنا البعض حتى أتمنا هذا العمل بتميز . هنئاً لنا فوزنا المشترك بعد

هذا التعب .

إلى القلوب النقية . . . أصدقائي:

إلى كل من سأل، واهتم، ودعا لي بظهور الغيب، أو مدّ لي يد العون بكلمة طيبة في طريق التخرج .

لخضر مقدود .

Remerciements

الحمد لله الذي وفقنا لطلب العلم، وأنار عقولنا بنور المعرفة، ويسّر لنا سبل الرشاد، والصلاة والسلام على معلم البشرية وهادي الأمة، وعلى آله وصحبه أجمعين.

أما بعد،

فإن اعترافاً بالجميل، ووفاءً لأهل الفضل، يطيب لي وأنا أخطّ الكلمات الأخيرة من مسيرتي في طور الماستر، أن أتقدم بأسمى عبارات الشكر، وأجزل آيات التقدير والامتنان، إلى الدكتور

الفاضل والمشرف القدير:

"محمد الساسي شعباني"

الذي غمرني بفيض علمه، وتوجيهاته الأكاديمية السديدة، ونصائحه القيمة التي كانت بمثابة البوصلة التي وجهت مسار هذا البحث. لقد كان لرحابة صدره، وتشجيعه المستمر، ودقته العلمية الأثر البالغ والعميق في إثراء هذا العمل وإخراجه على الوجه الأكمل، فجزاه الله عني وعن العلم خير الجزاء، وأدام عليه الصحة والعافية.

كما ويمتد ثنائي، ويطرسخ شكري، لينجاوز هذا البحث وينحني إجلالاً وتقديراً إلى كافة الأساتذة الأفاضل الذين تعاقبوا على تدريسنا وتأطيرنا طوال هذه المرحلة الجامعية؛ أولئك الذين لم يخلوا علينا يوماً بعبائهم، وغرسوا فينا مبادئ البحث العلمي المعمق، وكانوا لنا طوال سنوات الدراسة خير منارات تُستضاء بها الدروب. لكم منا كل الاحترام والتقدير، وجعل الله كل حرفٍ علمتمونا إياه في ميزان حسناتكم.

وفي الختام، أتوجه بالشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة المناقشة الأفاضل الذين سيفضلون بقراءة هذه المذكرة وتقويمها،

سائلاً المولى عز وجل أن يوفقنا جميعاً لما يحبه ويرضاه، وأن يكون هذا العمل لبنة صالحة في صرح العلم والمعرفة

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

Résumé	
Abstract	
Dédicace	
Remerciements	
TABLES DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
Glossaire	
Introduction générale	1
Chapitre 1: Généralités sur la génératrice asynchrone auto_excitée et les micro-réseaux DC	
1.1 Introduction	3
1.2 Générateur asynchrone	3
1.2.1 Constitution de la machine asynchrone	4
1.2.2 Génératrice à rotor bobiné	5
1.2.3 Génératrice à cage d'écureuil	7
1.2.4 Principe de fonctionnement de la génératrice auto_excitée	9
1.3 Auto-excitation de la machine asynchrone	10
1.4 Étude Comparative de la Machine Asynchrone	12
1.4.1 Atouts de la Technologie	12
1.4.2 Limites et Contraintes	12
1.5 Les micro-réseaux	13
1.5.1 Définition	13
1.5.2 Constitution d'un micro-réseau	13
1.5.3 Les types de micro-réseau	18
1.5.4 Fonctionnement d'un micro-réseau	20
1.5.5 Architectures d'un micro-réseau	21
1.6 Pourquoi les micro-réseaux	24
1.6.1 Les avantages et les inconvénients d'un micro-réseau	25
1.7 Conclusion	26

Chapitre 2: Modélisation de la machine asynchrone

2.1 Introduction	28
2.2 Modélisation de la machine asynchrone	28
2.2.1 Equations générales de la machine asynchrone	30
2.2.2 Equation de tension	31
2.3 Modèle de Park de la machine asynchrone	33
2.3.1 Transformation de Park	34
2.3.2 Transformation de Concordia	35
2.3.3 Passage entre les repères Park (d,q) et Concordia (α,β)	36
2.3.4 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone	38
2.3.5 Choix de référentiel	40
2.3.6 Expression du couple électromagnétique	41
2.4 Conclusion	43
Chapitre 3: Commande vectorielle de la génératrice asynchrone autonome	
3.1 Introduction	45
3.2 Principe de la commande vectorielle	45
3.3 Description de la commande vectorielle	46
3.4 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique	47
3.5 Détermination des paramètres nécessaires à la commande	48
3.6 Définition de l'algorithme de commande	48
3.7 Résultat de simulation	49
3.7.1 Influence de la variation de la vitesse	50
3.7.2 Influence de la variation de la charge	52
3.8 Conclusion	54
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	58
Annexe	62

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure.1.1 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	4
Figure.1.2 Constituants de la machine asynchrone.	5
Figure.1.3 Machine à induction à rotor bobiné	6
Figure.1.4 Système éolienne connectés avec génératrice à rotor bobiné	7
Figure.1.5 Machine asynchrone à cage d'écureuil	7
Figure.1.6 Génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe	8
Figure.1.7 Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable	9
Figure.1.8 Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles	10
Figure.1.9 Machine asynchrone connectée au réseau _banc de capacité_	12
Figure 1.10 Énergie solaire.	14
Figure 1.11 Eolienne à Axe Vertical.	14
Figure 1.12 Eolienne à Axe Horizontal.	14
Figure 1.13 Générateur diesel.	15
Figure 1.14 Batterie au lithium.	15
Figure 1.15 Une batterie plomb ouverte.	16
Figure 1.16 Supercondensateur.	16
Figure 1.17 Pile à combustible	17
Figure 1.18 Architecture d'un micro-réseau	20
Figure 1.19 Schéma d'une architecture série avec un bus continu.	22
Figure 1.20 Schéma d'une architecture série avec un bus alternatif	23
Figure 1.21 Schéma d'une architecture parallèle avec un bus mixte AC et CC.	24
Figure.2.1 Représentation électrique de la machine asynchrone.	30
Figure.2.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.	34
Figure.2.3: Représentation des axes de la machine.	34
Figure.2.4: Représentation de système triphasé dans le plan de Concordia.	36
Figure 3.1 Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté	49
Figure 3.2 R-charge	51
Figure 3.3 vitesse	51
Figure 3.4 Vdc	51
Figure 3.5 Ich	51
Figure 3.6 couple	51
Figure 3.7 courant Idq	51

Figure 3.8 courant statorique	51
Figure 3.9 courant statorique	51
Figure 3.10 R-charge	53
Figure 3.11 vitesse	53
Figure 3.12 Vdc	53
Figure 3.13 Ich	53
Figure 3.14 courant Idq	53
Figure 3.15 couple	53
Figure 3.16 courant statorique	53
Figure 3.17 courant statorique	53

Glossaire

s, r	: se rapportent respectivement aux grandeurs statoriques et rotoriques.
R_s, L_s	: désignent la résistance et l'inductance propre d'un enroulement statorique.
s_m	: représente le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases du stator.
m	: correspond à la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre un enroulement du stator et un autre du rotor.
V_{sABC}	: tensions appliquées aux trois phases statoriques,
I_{sABC}	: courants qui traversent celles-ci,
Φ_{sABC}	: flux totaux à travers ces enroulements,
$[V_{s(abc)}]$	: $[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$: Vecteur tensions statoriques.
$[I_{s(abc)}]$	: $[I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]^T$: Vecteur courants statoriques.
$[V_{r(abc)}]$	: $[V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$: Vecteur tensions rotoriques.
$[I_{r(abc)}]$	: $[I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^T$: Vecteur courants rotoriques.
$[\varphi_{s(abc)}]$	: $[\varphi_{sa} \ \varphi_{sb} \ \varphi_{sc}]^T$: Vecteur flux statoriques.
$[\varphi_{r(abc)}]$	: $[\varphi_{ra} \ \varphi_{rb} \ \varphi_{rc}]^T$: Vecteur flux rotoriques.
R_s	: Résistance d'une phase statorique.
R_r	: Résistance d'une phase rotorique.
$[L_{ss}]$	: Matrice d'inductances statoriques.
$[L_{rr}]$	: Matrice d'inductances rotoriques.
$[M_{sr}]$	: Matrice des inductances mutuelles du couplage entre stator-rotor.
l_s	: Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	: Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	: Inductance mutuelle entre phases statoriques.
M_r	: Inductance mutuelle entre phases rotoriques
M_0	: Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.
J	: Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.
f	: Coefficient du frottement visqueux.

C_e : Couple électromagnétique. C_r : Couple de charge.

Ω : Vitesse rotorique.

θ_s : angle électrique stator/référentiel (d, q).

Sigles utilisés :

PI : Régulateur proportionnel-intégral.

MAS : Machine Asynchrone.

CV : Commande Vectorielle

FOC : Field Oriented Control

Introduction générale

Face à la croissance continue de la demande mondiale en énergie électrique et aux enjeux environnementaux liés à l'utilisation des énergies fossiles, le recours aux sources d'énergie renouvelables est devenu une nécessité. Parmi ces sources, l'énergie éolienne occupe une place importante grâce à son caractère propre, renouvelable et largement disponible. Toutefois, son intégration dans les systèmes électriques nécessite des techniques de commande performantes afin de garantir une production d'énergie stable et de qualité malgré les variations des conditions de fonctionnement.

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil constitue une solution particulièrement intéressante pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne en raison de sa robustesse, de sa simplicité de construction, de son faible coût de maintenance et de sa grande fiabilité. Lorsqu'elle fonctionne en mode autonome, notamment dans les micro-réseaux à courant continu (DC), cette génératrice requiert des stratégies de commande avancées capables d'assurer la stabilité de la tension, l'optimisation des échanges de puissance et le maintien des performances dynamiques du système.

Les micro-réseaux DC représentent aujourd'hui une alternative prometteuse aux réseaux conventionnels grâce à leur capacité à intégrer efficacement les sources d'énergie renouvelables, les systèmes de stockage et les charges électroniques modernes. Leur architecture offre une meilleure efficacité énergétique, réduit les pertes de conversion et facilite la gestion des flux d'énergie, ce qui en fait une solution adaptée aux sites isolés ainsi qu'aux réseaux intelligents.

Dans ce contexte, cette étude porte sur la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à cage autonome connectée à un micro-réseau DC. L'objectif principal est d'étudier le comportement dynamique de la génératrice, d'établir son modèle mathématique, puis de mettre en œuvre une stratégie de commande vectorielle permettant d'améliorer la stabilité, la précision de régulation et les performances globales du système.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur la génératrice asynchrone auto-excitée ainsi que les micro-réseaux DC et leurs principales caractéristiques. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique de la machine asynchrone et aux transformations utilisées pour son analyse. Enfin, le troisième chapitre traite de la commande vectorielle de la génératrice, de sa mise en œuvre sous environnement de simulation et de l'analyse des résultats obtenus afin d'évaluer les performances de la stratégie de commande proposée.

Chapitre 1

Généralités sur la génératrice asynchrone auto-excitée et les micro- réseaux DC

1.1 Introduction

L'évolution rapide des systèmes énergétiques, portée par l'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables, impose le développement de solutions de production plus fiables, plus flexibles et plus performantes. Dans ce contexte, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil s'est imposée comme une solution de référence grâce à sa robustesse, sa simplicité de conception, son faible coût de maintenance et sa capacité à fonctionner dans des environnements variés, notamment au sein des systèmes éoliens et des installations de production décentralisée.

Parallèlement, les micro-réseaux à courant continu (DC) connaissent un essor considérable en raison de leur aptitude à intégrer efficacement les sources renouvelables, les dispositifs de stockage d'énergie et les charges électroniques modernes. Leur architecture permet de réduire les pertes liées aux conversions d'énergie, d'améliorer le rendement global du système et d'assurer une gestion plus souple des flux de puissance, particulièrement dans les applications autonomes ou les sites isolés.

L'association d'une génératrice asynchrone autonome avec un micro-réseau DC constitue ainsi une solution prometteuse, mais elle soulève plusieurs défis liés à la stabilité de la tension, à l'auto excitation de la machine et à la gestion des échanges énergétiques. La compréhension des caractéristiques de ces systèmes représente donc une étape essentielle avant l'étude de leur modélisation et de leur stratégie de commande.

Dans cette perspective, ce premier chapitre présente les notions fondamentales relatives à la génératrice asynchrone auto-excitée et aux micro-réseaux DC. Il expose le principe de fonctionnement de la machine, ses principales caractéristiques, ainsi que les concepts essentiels des micro-réseaux, leur architecture, leurs modes de fonctionnement, leurs avantages et leurs domaines d'application. Ces éléments constituent la base théorique indispensable pour les développements consacrés à la modélisation et à la commande vectorielle dans les chapitres suivants.

1.2 Générateur asynchrone

La Génératrice Asynchrone Auto-excitée suscite un intérêt supérieur à celui de la génératrice synchrone pour plusieurs raisons techniques. Elle se distingue notamment par sa robustesse face aux variations de la vitesse du vent, son fonctionnement sans balais (réduisant ainsi l'entretien), sa grande fiabilité et sa disponibilité opérationnelle. Ces caractéristiques,

couplées à un coût de maintenance réduit, en font le système le plus fréquemment couplé aux turbines éoliennes et l'un des dispositifs énergétiques les plus répandus en pratique [1].

Domination des Machines à Cage et Variantes Technologiques Dans le secteur de l'énergie éolienne, les machines asynchrones à cage d'écureuil demeurent dominantes. Elles offrent des performances attractives en termes de coûts d'investissement, particulièrement pour les configurations standards où elles sont directement raccordées au réseau. Cependant, lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre un entraînement à vitesse variable, le choix se porte préférentiellement sur les machines à rotor bobiné doublement alimentées (MADA). Ces dernières représentent un excellent compromis entre la performance, la simplicité de commande et l'optimisation des coûts [2].

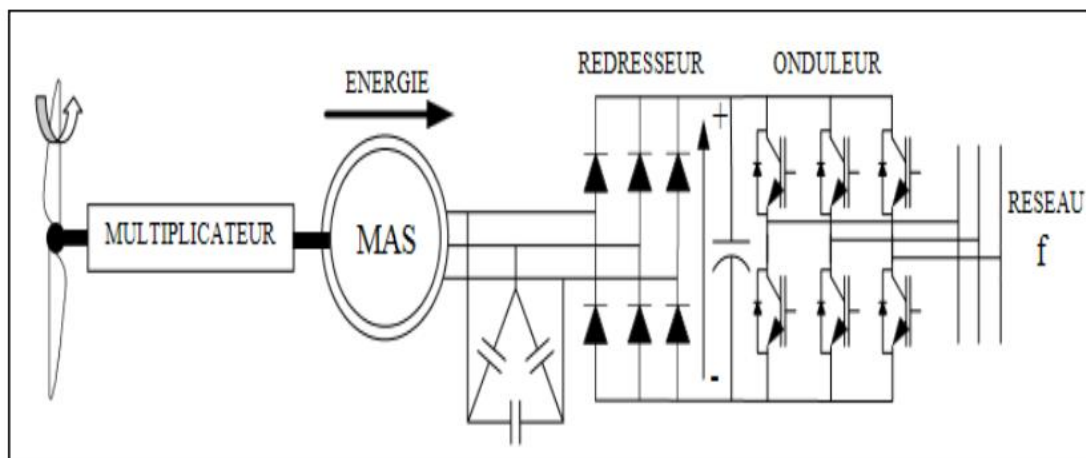


Figure.1.1 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur [3]

Les machines à induction (ou asynchrones) se caractérisent par leur réversibilité : tout moteur à induction peut fonctionner comme un générateur d'énergie. Ce processus commence dès que l'élément rotatif est mis en rotation mécaniquement ; le champ magnétique rémanent présent dans le fer de la machine induit une force électromotrice (f.é.m.) initiale faible dans les bobines de l'élément fixe.

Cette force motrice entraîne à son tour un flux de courant qui crée un champ magnétique tournant à l'intérieur de l'entrefer, ce qui renforce de manière cumulative l'aimantation de l'élément rotatif. Grâce à cette rétroaction, la tension statorique continue d'augmenter progressivement jusqu'à atteindre un point de stabilité (déterminé par l'état de saturation magnétique de la machine). Cette séquence dynamique de démarrage de la génération de tension est appelée processus d'auto excitation.

1.2.1 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments Suivants [4] :

Le stator : il s'agit de la partie fixe de la machine, constituée d'un empilement de tôles magnétiques pressées en forme de disques. À l'intérieur de ces tôles sont fixés des bobines à plusieurs phases (généralement triphasées) constituées de fils de cuivre isolés, dont la fonction principale est de créer le champ magnétique nécessaire à la magnétisation de l'entrefer.

Le rotor : c'est la partie responsable du mouvement rotatif ; il est constitué de barres métalliques (généralement en cuivre ou en aluminium) disposées en forme de « cage d'écureuil ». Cette partie se caractérise par le fait qu'elle n'est pas connectée électriquement à une source externe, ses bobines étant en court-circuit.

Les organes mécaniques : ils comprennent le châssis, les couvercles et les roulements qui assurent la rotation fluide du rotor et servent à fixer et à relier les différentes parties internes de la machine afin de garantir sa cohésion structurelle.

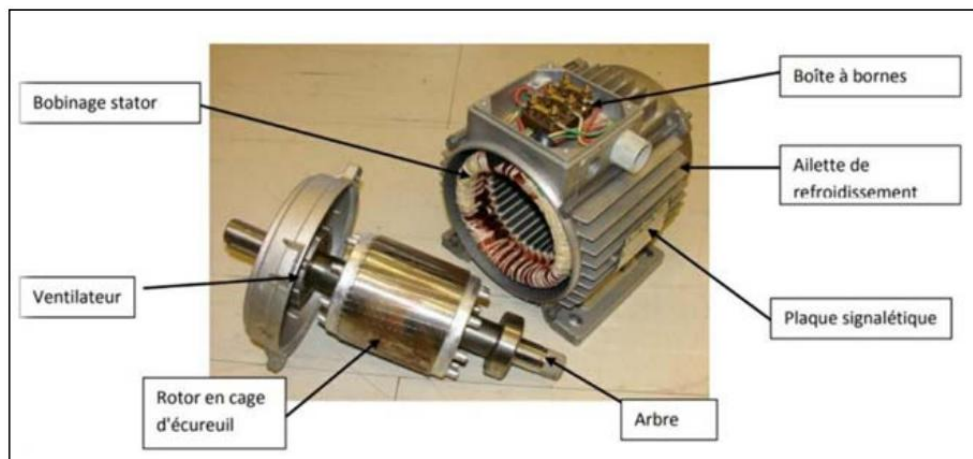


Figure.1.2 Constituants de la machine asynchrone.

1.2.2 Génératrice à rotor bobiné

Sur le plan constructif, la machine asynchrone à rotor bobiné se compose d'un stator triphasé dont la conception est analogue à celle des machines asynchrones à cage conventionnelles. Sa spécificité réside dans l'architecture de son rotor, lequel intègre un enroulement triphasé inséré dans des encoches. L'accès électrique aux circuits rotoriques est assuré par un dispositif mécanique constitué de trois bagues collectrices et de balais, généralement à base de carbone, solidaires du châssis de la machine (Figure. 1.3).

Cette configuration est particulièrement répandue dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne [3], car elle permet de collecter ou d'injecter des courants au niveau du rotor via ces anneaux de glissement, offrant ainsi une plus grande souplesse de commande.

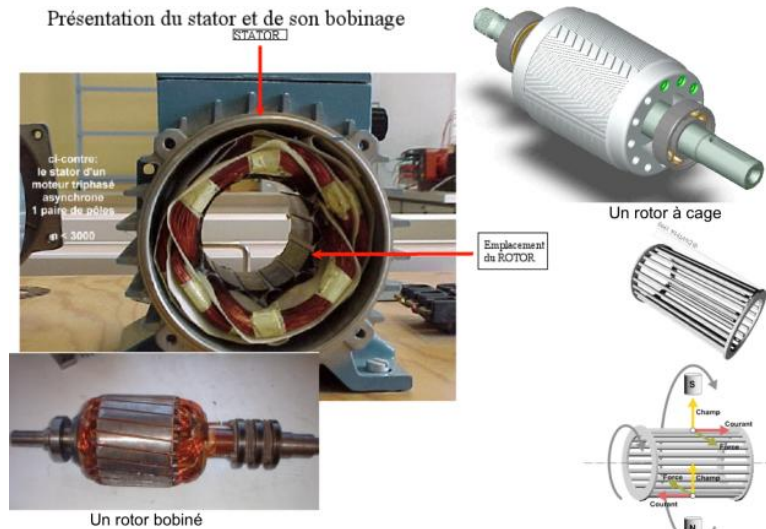


Figure.1.3 Machine à induction à rotor bobiné

L'architecture de cette machine se distingue par l'intégration de trois bagues collectrices au niveau du rotor, constituant un système de contacts tournants. Ce dispositif offre un accès direct aux enroulements rotoriques, permettant ainsi à l'opérateur d'intervenir sur les paramètres internes de la machine, tels que l'ajustement de la résistance rotorique ou la modulation de la fréquence des courants induits.

Une application majeure de cette technologie réside dans la mise en œuvre de la cascade hypo synchrone. Ce procédé de commande est particulièrement prisé pour la variation de vitesse, car il permet de réguler la puissance de glissement tout en garantissant une efficacité énergétique supérieure (rendement élevé).

L'utilisation de génératrices asynchrones à rotor bobiné au sein des chaînes de conversion éoliennes comporte des limites structurelles, notamment la présence du multiplicateur de vitesse et du dispositif bagues-balais. Ces composants augmentent considérablement les charges d'exploitation et de maintenance, un facteur d'autant plus critique pour les installations offshore soumises à un environnement salin corrosif.

Pour pallier ces inconvénients, une architecture alternative consiste à employer des génératrices à aimants permanents. Cette solution permet de s'affranchir du système de contacts glissants. Bien que cette structure (illustrée en Figure. 1.3) impose l'usage de convertisseurs statiques dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine — ce qui représente une contrainte matérielle — elle offre en contrepartie une souplesse et une précision accrues dans le pilotage de l'éolienne [5].

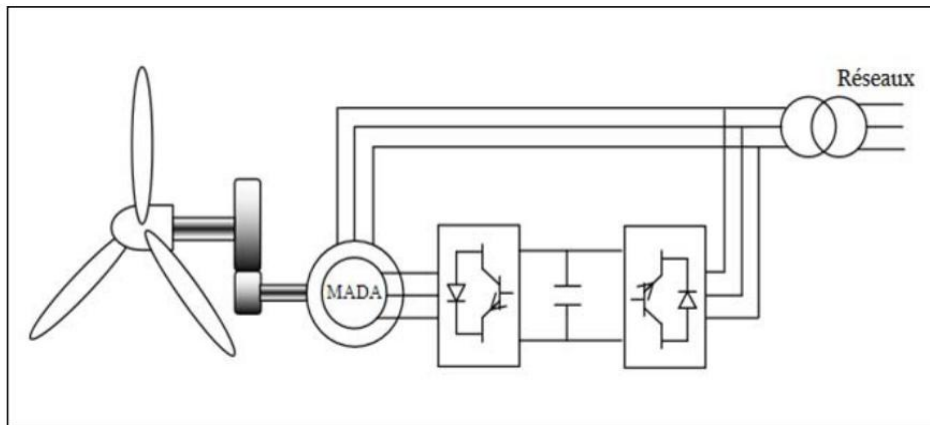


Figure.1.4 Système éolien connecté avec génératrice à rotor bobiné

1.2.3 Génératrice à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone auto-excitée repose sur l'exploitation d'un moteur à induction conventionnel fonctionnant en mode génératrice. Cette technologie s'est imposée comme la solution prédominante dans le secteur de l'énergie éolienne, principalement en raison de sa simplicité de conception et de son coût de production réduit. Bénéficiant d'une standardisation industrielle poussée, ces machines sont disponibles sur une vaste plage de puissances.

Sur le plan mécanique, la robustesse de la machine asynchrone est assurée par un rotor constitué de barres conductrices en court-circuit (rotor à cage), ce qui minimise les besoins en maintenance et garantit un taux de défaillance extrêmement faible. Il est à noter que ces machines représentent environ 90 % du parc moteur industriel mondial. Enfin, l'application d'une stratégie de commande vectorielle de flux permet d'atteindre des performances de couple comparables à celles des machines à courant continu (MCC), consolidant ainsi leur attractivité pour la production d'énergie [6].

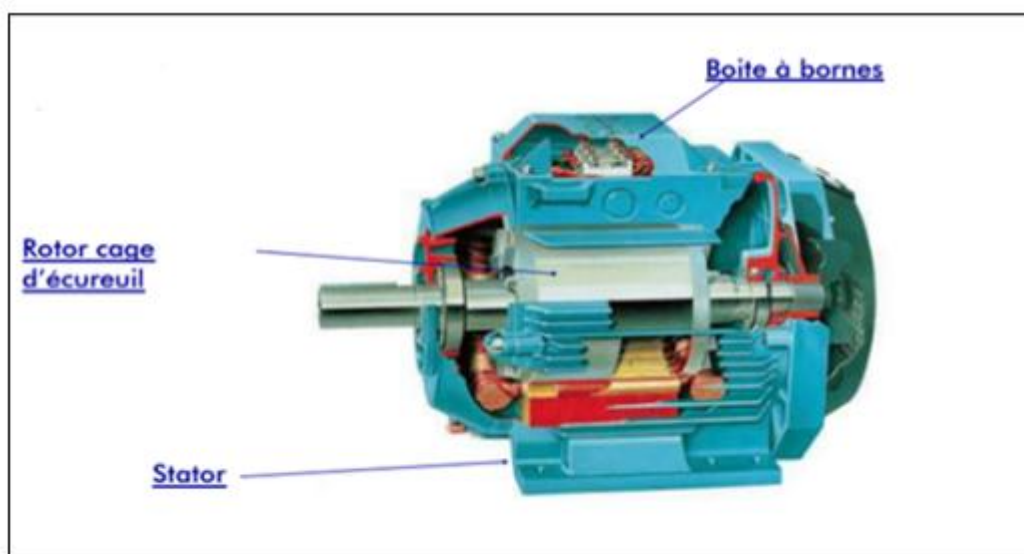


Figure.1.5 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Une première configuration consiste à raccorder directement une machine asynchrone (MAS) à cage d'écureuil au réseau électrique. Dans ce schéma, la machine est couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse, tandis qu'une batterie de condensateurs est indispensable pour fournir la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation.

Cette architecture impose une vitesse de rotation quasi constante, la variation étant restreinte à la faible plage de glissement de la MAS. Les limites majeures de cette approche résident dans l'incapacité à opérer sur une large plage de vitesses, ce qui restreint l'optimisation de l'extraction de l'énergie éolienne. De plus, ce système est sujet à des contraintes techniques lors des phases de connexion et de déconnexion (accrochage/décrochage) au réseau [7].

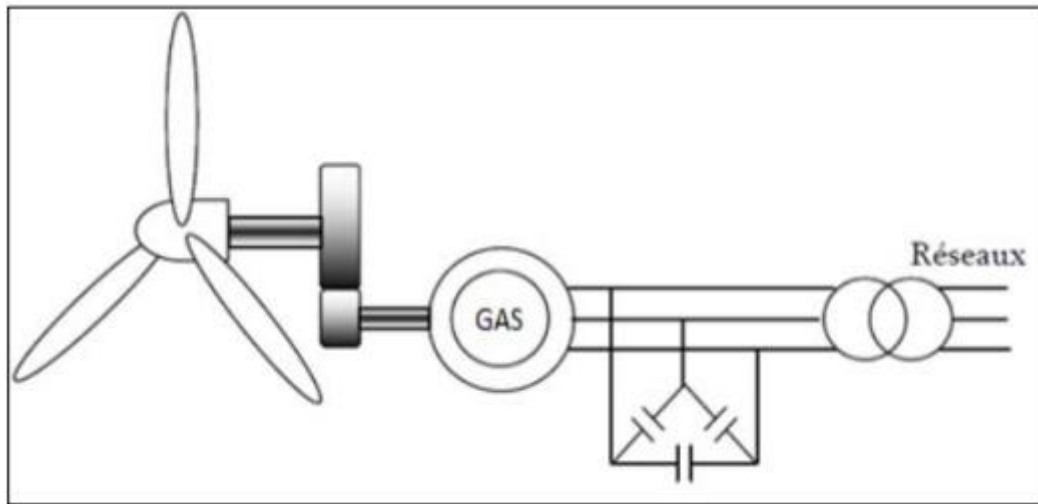


Figure.1.6 Génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe

Incorporation d'interfaces d'électronique de puissance permet de lever les limitations intrinsèques de la génératrice asynchrone à cage, autorisant ainsi un fonctionnement à vitesse variable. Cette architecture technologique garantit une extraction d'énergie électrique stable et continue sur une plage étendue de vitesses de vent (Figure. 2.6). Ce mode de pilotage, rendu possible par les convertisseurs statiques, optimise le rendement global du système de conversion en s'adaptant dynamiquement aux fluctuations de la ressource éolienne.

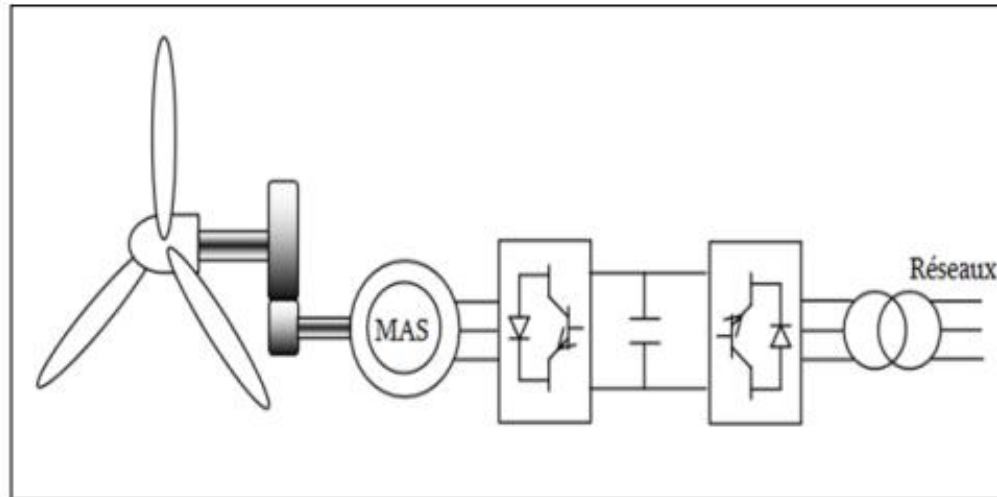


Figure.1.7 Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable

1.2.4 Principe de fonctionnement de la génératrice auto-excitée

La structure d'une génératrice asynchrone triphasée repose sur un stator fixe, hébergeant trois enroulements identiques répartis symétriquement, et un rotor mobile suivant l'axe de la machine. Pour assurer la conversion d'énergie, cette machine nécessite un processus de magnétisation et une régulation stricte de sa tension et de sa fréquence de sortie. Le mode générateur est activé lorsque le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse dépassant la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypersynchrone). Lorsqu'elle est raccordée directement au réseau, la machine opère à vitesse fixe, puisque la fréquence électrique est imposée par le réseau et le nombre de paires de pôles du moteur. Dans tous ses régimes de fonctionnement, la GAS demeure consommatrice d'énergie réactive pour le maintien de son flux magnétique [6][8].

- **Mécanisme d'Auto-amorçage et Excitation**

En mode autonome, l'amorçage de la génératrice est conditionné par la connexion d'une batterie de condensateurs judicieusement dimensionnée aux bornes du stator. Ce processus repose impérativement sur l'existence d'un flux magnétique rémanent au sein du circuit magnétique du rotor [6].

L'échange énergétique s'établit alors de manière cyclique : les condensateurs fournissent le courant de magnétisation nécessaire à la machine, tandis que celle-ci, en tournant, accroît la tension aux bornes des capacités. Cette interaction cumulative se stabilise lorsque la machine atteint un régime permanent, généralement situé dans sa zone de saturation magnétique [3]. Les performances dynamiques de cette machine, notamment pour une configuration à deux paires de pôles, sont illustrées par la caractéristique couple-vitesse présentée en Fig. I.8.

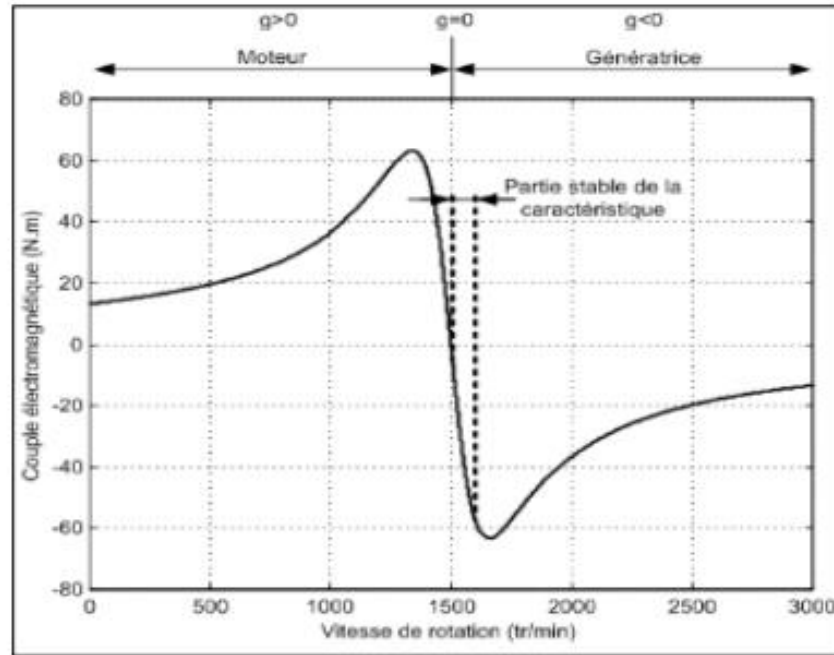


Figure.1.8 Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Afin de garantir la stabilité opérationnelle du système, la génératrice asynchrone doit impérativement évoluer dans une plage de vitesse proche de la vitesse de synchronisme (autour du glissement $g=0$). Selon les spécificités de la caractéristique mentionnée, la vitesse de rotation doit être maintenue dans un intervalle restreint, typiquement compris entre 1500 et 1600 tr/min.

La topologie la plus répandue, en raison de sa simplicité, repose sur un couplage mécanique direct entre le rotor de la machine et l'arbre de l'aérogénérateur via un multiplicateur de vitesse. Dans ce montage, le stator est raccordé sans interface au réseau électrique. La machine, possédant un nombre de paires de pôles invariant, est ainsi contrainte de fonctionner sur une plage de vitesse extrêmement étroite, avec un glissement généralement inférieur à 2%.

Étant donné que la fréquence est dictée par le réseau, tout écart de glissement excessif entraîne une augmentation critique des courants statoriques, risquant d'endommager irrémédiablement les enroulements. Toutefois, l'absence d'organes de conversion entre le stator et le réseau, ainsi que l'élimination des contacts glissants (système sans bagues ni balais), confèrent à cette configuration un avantage majeur en termes de réduction des coûts et de la périodicité de maintenance.

1.3 Auto excitation de la machine asynchrone

L'exploitation de la machine asynchrone en mode génératrice autonome nécessite impérativement une source externe de puissance réactive, généralement fournie par un banc

de condensateurs. Dans cette configuration, le processus d'auto excitation est régi par les équations de tension aux bornes des capacités de magnétisation [6].

Le comportement du système peut être synthétisé sous la forme matricielle suivante, liant les courants et les tensions statoriques :

$$[i_{sabc}] = C \frac{d}{dt} [V_{sabc}] + \frac{1}{R} [V_{sabc}] \quad (1.1)$$

L'auto excitation est assurée par un banc de trois condensateurs fixes, montés soit en étoile, soit en triangle aux bornes de la génératrice. Cette architecture renforce la sûreté de fonctionnement de la chaîne de conversion éolienne. En effet, le système présente une certaine tolérance aux pannes : en cas de défaillance d'une phase ou d'un condensateur, la production d'énergie est maintenue, bien qu'une chute de tension survienne suite à l'affaiblissement du flux de magnétisation.

Toutefois, il convient de noter que cette configuration peut engendrer des déséquilibres au niveau des courants statoriques, notamment lors de l'alimentation de charges monophasées ou en présence de défauts capacitifs [10].

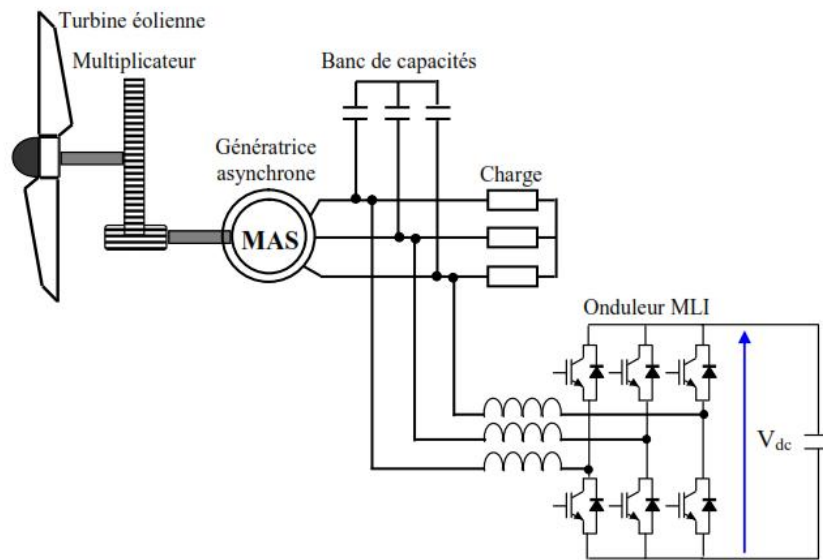


Figure.1.9 Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge

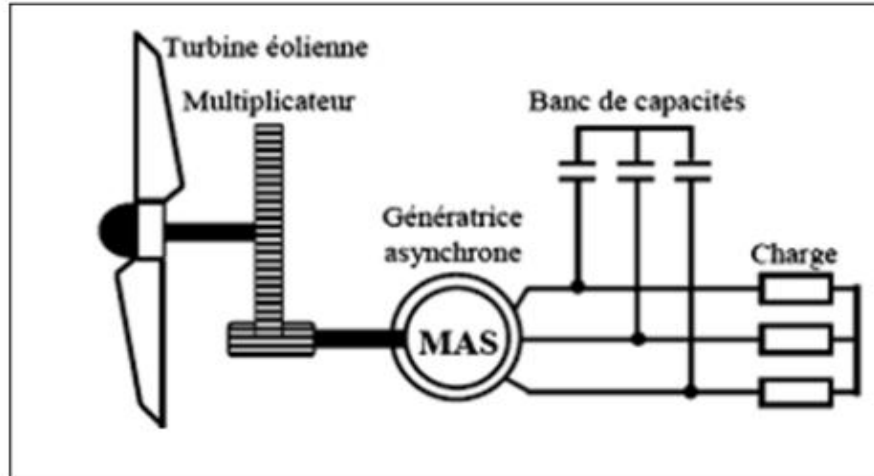


Figure.1.10 Machine asynchrone connectée au réseau _banc de capacité_

L'adoption d'une configuration reposant sur une génératrice asynchrone (GAS) auto-excitée par un banc de condensateurs permet d'établir un système de production d'énergie totalement autonome, idéal pour l'alimentation de sites isolés. Dans ce schéma, le dimensionnement rigoureux de la batterie de capacités est primordial pour satisfaire les conditions nécessaires à l'auto-amorçage du système. Ce processus dépend intrinsèquement de l'existence d'un flux magnétique rémanent au sein du circuit magnétique rotorique [7][8].

Sur le plan opérationnel, la fourniture d'énergie électrique par la génératrice asynchrone requiert un entraînement mécanique à une vitesse supérieure à celle de synchronisme, correspondant à un régime de fonctionnement hypersynchrone [7].

1.4 Étude Comparative de la Machine Asynchrone

1.4.1 Atouts de la Technologie

La machine asynchrone s'est imposée dans l'industrie grâce à plusieurs facteurs déterminants :

- 1) **Fiabilité et Maturité** : Il s'agit d'un système éprouvé, bénéficiant d'un retour d'expérience technologique de longue date.
- 2) **Aspect Économique** : Elle représente une solution particulièrement compétitive en raison de ses faibles coûts de fabrication et de sa standardisation à grande échelle.

1.4.2 Limites et Contraintes

Malgré ses avantages, l'exploitation de ce type de machine comporte certains points faibles notables :

- 1) **Complexité Mécanique** : L'une des principales critiques concerne la présence de composants mobiles plus nombreux par rapport aux génératrices asynchrones à aimants permanents, ce qui peut accroître les besoins en maintenance.
- 2) **Risques Opérationnels** : On note une exposition plus marquée aux risques d'incendie, souvent liés aux échauffements ou aux défaillances d'isolation.
- 3) **Nuisances Dynamiques** : Le fonctionnement peut être source de pollutions sonores (bruit) et de sollicitations mécaniques (vibrations) plus intenses, pouvant impacter la durée de vie du châssis ou des roulements.

1.5 Les micro-réseaux

1.5.1 Définition

Les micro-réseaux sont définis comme des systèmes énergétiques locaux à portée limitée, dont l'objectif principal est d'alimenter un groupe spécifique d'abonnés en électricité d'une grande fiabilité. Ces réseaux reposent sur le regroupement et l'intégration de diverses sources de production sur un même site, incluant de multiples technologies telles que les micro turbines, les piles à combustible et les moteurs diesel, ainsi que des sources d'énergie renouvelables comme les panneaux solaires, les petites éoliennes et l'hydroélectricité à petite échelle.

Ces réseaux ne se limitent pas aux seules unités de production et de consommation, mais s'étendent pour inclure des systèmes avancés de stockage d'énergie et des mécanismes intelligents de contrôle des charges et de gestion de la demande. Ces systèmes se caractérisent par une grande flexibilité opérationnelle ; ils peuvent fonctionner en parallèle avec le réseau de distribution principal ou s'en déconnecter pour fonctionner de manière totalement autonome. L'importance de cette caractéristique apparaît en cas de perturbations sur le réseau public, le micro-réseau pouvant alors passer en « mode îlot » (Island mode) pour assurer la continuité de l'alimentation de manière autonome et temporaire [11].

1.5.2 Constitution d'un micro-réseau

a) Sources de Production d'énergie

Les sources de production d'énergie désignent les moyens et les technologies utilisés pour produire de l'électricité ou d'autres formes d'énergie, et les ressources renouvelables constituent la pierre angulaire de ces systèmes. Les micro-réseaux s'appuient fortement sur l'intégration de sources d'énergie durables, notamment l'énergie solaire et éolienne, afin d'assurer une production d'énergie respectueuse de l'environnement.

- **Énergie solaire (Solar Energy)**

L'énergie solaire est définie comme l'énergie tirée directement du rayonnement solaire, qui est captée et convertie en formes d'énergie utiles, telles que le courant électrique ou l'énergie thermique. Cette conversion s'effectue grâce à des technologies spécialisées, notamment les panneaux photovoltaïques (Photovoltaic) ou les capteurs solaires thermiques.



Figure 1.11 Énergie solaire [12].

- **Énergie éolienne (Wind Energy)**

L'énergie éolienne provient de l'exploitation du mouvement du vent à l'aide de turbines conçues pour le convertir en électricité. Ce mécanisme repose sur la rotation des pales de la turbine sous l'effet du vent, ce qui actionne un générateur électrique pour produire de l'énergie. Bien qu'il s'agisse d'une source renouvelable qui contribue efficacement à la diversification du mix énergétique et à la réduction des émissions de carbone, son efficacité reste liée aux variations météorologiques et climatiques.



Figure 1.12 Eolienne à Axe Vertical [12].



Figure 1.13 Eolienne à Axe Horizontal [13].

- **Les générateurs conventionnels (Conventional Generators)**

Un générateur conventionnel est une unité électrique qui transforme l'énergie mécanique produite par des moteurs à combustion (tels que les moteurs diesel) en énergie électrique. Ces générateurs sont intégrés à certains micro-réseaux afin d'assurer la stabilité de l'alimentation électrique, notamment lorsque la production des sources renouvelables est fluctuante, ce qui garantit la continuité du courant et permet de faire face aux coupures éventuelles.



Figure 1.14 Générateur diesel [14].

b) Dispositifs de Stockage d'Énergie

Les batteries constituent un élément central pour assurer l'équilibre du réseau, car elles contribuent à lisser les fluctuations de production et à répondre instantanément aux variations de la demande en énergie. Elles se divisent en plusieurs types, dont les principaux sont :

- **Les batteries lithium-ion** : elles se caractérisent par le fait qu'il s'agit d'unités rechargeables, et sont connues pour leur haute densité énergétique et leur légèreté, ainsi que pour leur longue durée de vie, ce qui les rend idéales pour les applications électroniques et les réseaux modernes.



Figure 1.15 Batterie au lithium [15].

- **Batteries au plomb (Lead-Acid) :** elles reposent sur la réaction entre des plaques de plomb et de l'acide sulfurique. Bien que leur technologie soit ancienne, elles sont toujours utilisées dans les systèmes d'urgence et de démarrage des véhicules en raison de leur fiabilité, de leur faible coût et de leur capacité à fournir un courant de forte intensité.



Figure 1.16 Une batterie plomb ouverte [16].

- **Les supercondensateurs (Supercapacitors)**

Ces dispositifs constituent une génération avancée de dispositifs de stockage qui surpassent les condensateurs traditionnels par leur capacité à stocker de plus grandes quantités d'énergie. Leur fonctionnement repose sur des phénomènes électrohydrauliques permettant une charge et une décharge ultra-rapides, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant des pics d'énergie instantanés.

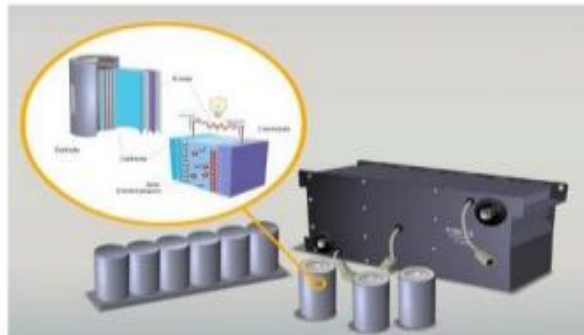


Figure 1.17 Supercondensateur [17].

- **Les piles à combustible (Fuel Cells)**

Elles sont classées parmi les dispositifs électrochimiques qui transforment directement l'énergie chimique contenue dans le combustible en énergie électrique sans nécessiter de combustion. Cela se fait par une réaction entre le combustible et un agent oxydant ; ce processus produit de l'électricité et de la chaleur, ainsi que de l'eau comme sous-produit respectueux de l'environnement.



Figure 1.18 Pile à combustible [18].

Dans certains cas, on a recours au stockage de l'énergie sous forme de chaleur dans des matériaux spécifiques, afin de reconvertir ultérieurement cette énergie thermique stockée en électricité lorsque la demande augmente.

c) Systèmes de Gestion de l'Énergie

L'efficacité opérationnelle des réseaux intelligents repose sur un système intégré de gestion intelligente qui garantit l'équilibre entre l'offre et la demande. Ses principaux piliers sont les suivants :

Systèmes de contrôle en temps réel (Real-Time Control)

Des systèmes de contrôle avancés fonctionnant en temps réel sont utilisés pour optimiser les processus de production et de distribution d'énergie. Ces systèmes analysent et traitent un ensemble de variables dynamiques, telles que les prévisions météorologiques (qui influencent les sources renouvelables), les niveaux de consommation instantanés et d'autres facteurs déterminants, afin de garantir la stabilité du réseau et d'éviter toute perturbation de l'alimentation.

- **Stratégies de gestion de la demande (Demand Side Management)**

Les réseaux intelligents intègrent des technologies de pointe visant à orienter et à adapter les modes de consommation d'énergie en fonction des capacités disponibles. Cette gestion contribue à rationaliser l'utilisation des ressources et à réduire la pression sur le système pendant les périodes de pointe, ce qui renforce l'efficacité globale de l'utilisation de l'énergie.

d) Unités de conversion d'énergie (onduleurs et chargeurs)

Les onduleurs et les chargeurs sont des éléments essentiels pour l'adaptation du courant, car ils assurent la conversion de l'énergie produite en courant continu (CC) en courant alternatif (CA), forme compatible avec les exigences de fonctionnement des appareils et équipements électriques traditionnels.

e) Infrastructure de distribution (Distribution Network)

Elle se compose d'un réseau intégré de câbles et d'équipements de distribution qui fonctionnent comme des artères pour le transport de l'énergie, acheminant l'électricité depuis les centres de production vers les différents points de consommation (charges) au sein du réseau local.

f) Système de communication et de coordination (Communication Components)

La gestion centralisée du réseau s'appuie sur des technologies de communication avancées permettant l'échange de données entre les différents composants. L'importance de ces technologies réside dans la facilitation de la coordination opérationnelle et la réalisation d'ajustements en temps réel pour garantir la stabilité du système.

g) Équipements de mesure et de détection (Metering Equipment)

Des capteurs et des appareils de mesure de précision sont intégrés pour surveiller le système ; ils collectent des données relatives au volume de production et aux taux de consommation, fournissant ainsi la base de données nécessaire à une gestion précise et efficace.

h) Systèmes de protection et de sécurité (Protection Systems)

Afin de protéger les personnes et les équipements, le réseau est doté de mécanismes de sécurité avancés comprenant des disjoncteurs et des dispositifs de coupure automatiques qui se déclenchent dès la détection d'un dysfonctionnement technique ou d'un dépassement des normes de sécurité opérationnelles, garantissant ainsi l'isolation de la panne et empêchant son aggravation.

i) Interconnexion avec le réseau public (Grid Connection)

Certains micro-réseaux sont conçus pour pouvoir interagir avec le réseau électrique principal ; cette interconnexion permet l'échange d'énergie (exportation de l'excédent ou importation du déficit) conformément aux exigences d'équilibre énergétique et aux modèles d'exploitation approuvés [19].

1.5.3 Les types de micro-réseau

La particularité fondamentale qui a fait des micro-réseaux un axe central des études et de la recherche énergétique contemporaines réside dans leur grande flexibilité ; ils ont en effet la capacité de se déconnecter du réseau électrique principal et de fonctionner de manière autonome et indépendante. Ce mode de fonctionnement (l'autonomie) est motivé par plusieurs facteurs, notamment économiques (réduction des coûts) ou techniques (pour faire face aux coupures totales de courant et aux perturbations soudaines pouvant affecter le réseau public).

Sur la base de ce concept, les micro-réseaux peuvent être classés en deux grandes catégories, qui diffèrent l'une de l'autre par leur mode de gestion et leurs objectifs :

Les micro-réseaux isolés (Off-grid/Isolated Microgrids) :

qui fonctionnent de manière permanente et autonome.

Les micro-réseaux connectés (Grid-tied Microgrids):

Qui sont reliés au réseau principal et échangent de l'énergie avec celui-ci selon les besoins.

Cette distinction entre les deux types implique une grande divergence dans les mécanismes de fonctionnement et les objectifs stratégiques de chaque catégorie [20].

1.5.3.1 Micro-réseau Connectés au Réseau (Grid-Tied)

Les micro-réseaux se caractérisent par leur capacité à interagir et à s'intégrer de manière organique au réseau électrique général, ce qui leur permet de fonctionner dans un cadre coordonné et intégré d'une grande efficacité. Cette intégration offre un ensemble d'avantages techniques, notamment le renforcement de la stabilité du système, la mise à disposition d'une source de secours en cas de crise, ainsi que la possibilité de tirer parti de capacités énergétiques supplémentaires.

La force opérationnelle de ces réseaux réside dans leur capacité à adapter leur volume de production aux besoins du réseau principal, ce qui se traduit par :

- **Une meilleure gestion des charges :** grâce à un équilibrage intelligent de la charge totale du système électrique.
- **Un soutien à l'énergie durable :** en facilitant l'intégration des sources d'énergie renouvelables et en coordonnant leur flux de manière plus efficace.
- **Renforcement de l'efficacité du système :** contribution effective aux initiatives de gestion de la demande (Demand Management), ce qui se répercute positivement sur la performance globale du réseau électrique.

1.5.3.2 Micro-réseau îlotés

Les micro-réseaux isolés constituent des systèmes de distribution d'énergie locaux et structurellement autonomes, conçus pour fonctionner efficacement sans avoir besoin d'être raccordés au réseau électrique public. La valeur stratégique de ces systèmes réside dans leur grande capacité à se « déconnecter » instantanément en cas de perturbations ou de coupures sur le réseau principal, garantissant ainsi aux abonnés un approvisionnement en électricité continu et fiable, ce qui est d'une importance capitale en cas d'urgence.

Ces systèmes autonomes s'appuient sur l'exploitation des ressources énergétiques disponibles localement, telles que les technologies solaires, l'énergie éolienne ou les

générateurs sur site. Afin de garantir la stabilité de l'alimentation et de pallier l'absence de réseau central, des unités de stockage d'énergie sophistiquées sont intégrées pour équilibrer en permanence l'offre et la demande. En résumé, les micro-réseaux isolés constituent une solution technique flexible qui garantit la durabilité de l'énergie et son adaptation totale aux besoins locaux, indépendamment de toute influence extérieure [21].

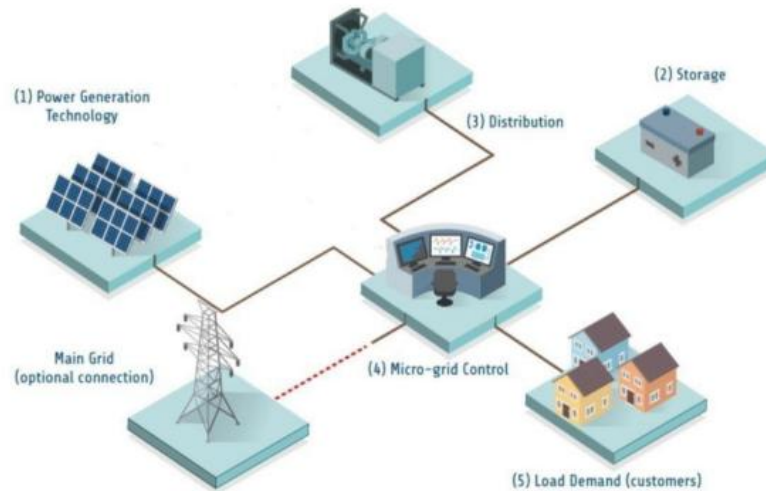


Figure 1.19 Architecture d'un micro-réseau [17]

1.5.4 Fonctionnement d'un micro-réseau

Le fonctionnement des micro-réseaux repose sur une séquence fonctionnelle intégrée qui garantit la durabilité énergétique. Les principales étapes de ce processus sont les suivantes :

- **Production d'énergie (Energy Generation)** : le processus commence au niveau des unités de production locales, où les ressources naturelles (telles que l'énergie solaire et éolienne) sont converties en courant électrique prêt à l'emploi.
- **Contrôle et gestion intelligente (Intelligent Management)** : des systèmes de gestion énergétique avancés surveillent en temps réel les flux de production, les niveaux de demande et l'état des stocks, garantissant ainsi une répartition optimale et équilibrée des ressources disponibles.
- **Distribution d'énergie (Energy Distribution)** : le réseau de distribution interne achemine l'électricité produite via des voies techniques jusqu'aux consommateurs finaux au sein de la zone locale du réseau.
- **Stockage de l'excédent (Energy Storage)** : lorsque les taux de production dépassent la demande instantanée, l'énergie excédentaire est acheminée vers des unités de stockage (batteries) afin d'être réutilisée pendant les périodes où le niveau de production diminue.

- **Interaction avec le réseau central (Grid Interaction)** : certaines conceptions intègrent une fonctionnalité de connexion au réseau public, permettant l'échange d'énergie (importation ou exportation) afin d'atteindre l'équilibre énergétique requis.

- **Redondance et résilience (Redundancy & Resilience)** : l'ingénierie de ces réseaux vise à renforcer leur résilience, de sorte qu'ils restent capables de fonctionner de manière autonome et indépendante pour garantir la sécurité énergétique en cas de défaillance du réseau électrique principal [22].

1.5.5 Architectures d'un micro-réseau

Afin d'analyser et d'étudier les diverses configurations structurelles des micro-réseaux, l'accent est mis sur un modèle systémique intégré qui combine des unités de production photovoltaïque (Photovoltaic Generator), des systèmes de stockage chimique (Batteries), ainsi qu'un point de raccordement au réseau électrique public. En examinant l'interaction entre ces composants, ces structures peuvent être classées en deux grandes catégories qui diffèrent par leur mode de raccordement et la gestion des flux d'énergie.

1.5.5.1 Architecture série

- **Configuration du bus à courant continu**

L'architecture en série repose sur le raccordement de toutes les sources d'énergie à un bus continu commun (Bus CC), comme l'illustre la Figure (1.19). Dans ce modèle structurel, les tensions électriques produites par les sources fonctionnant en courant alternatif (telles que les éoliennes ou le réseau public) sont soumises à un processus de redressement (Rectification) afin de les convertir en courant continu, à l'aide de convertisseurs de type (AC/CC).

Une fois l'énergie accumulée dans le bus CC, les charges électriques sont alimentées par un onduleur qui reconvertit le courant continu en courant alternatif (CC/AC) conforme aux exigences des appareils consommateurs.

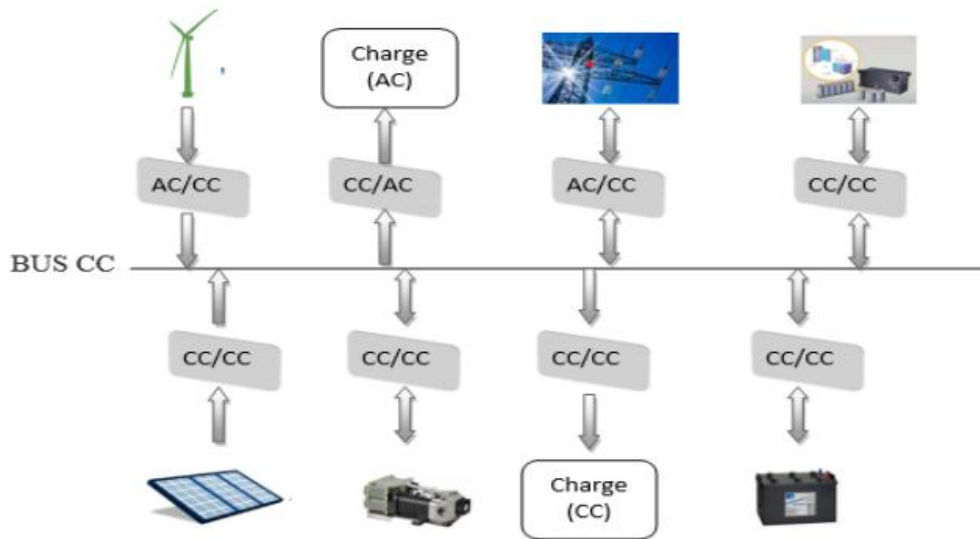


Figure 1.20 Schéma d'une architecture série avec un bus continu.

- **Configuration du bus à courant alternatif**

La structure du bus alternatif a connu une évolution remarquable grâce aux progrès spectaculaires réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et à l'apparition de nouvelles générations d'onduleurs à haut rendement. Cette architecture repose sur la présence d'un bus CA (Bus AC), qui constitue le point de connexion central de toutes les unités et composants du réseau micro-réseau, comme illustré à la Figure (1.20).

Le choix de cette conception constitue un choix technique stratégique pour plusieurs raisons, dont la plus importante est la capacité du système à fournir une tension alternative directe et régulière pour alimenter les charges électriques sans interruption. De plus, ce système se caractérise par un mécanisme de réponse flexible, dans lequel la connexion au réseau électrique public s'effectue automatiquement pour combler tout déficit d'énergie pouvant survenir au niveau du bus, ce qui garantit la stabilité de l'équilibre énergétique du système.

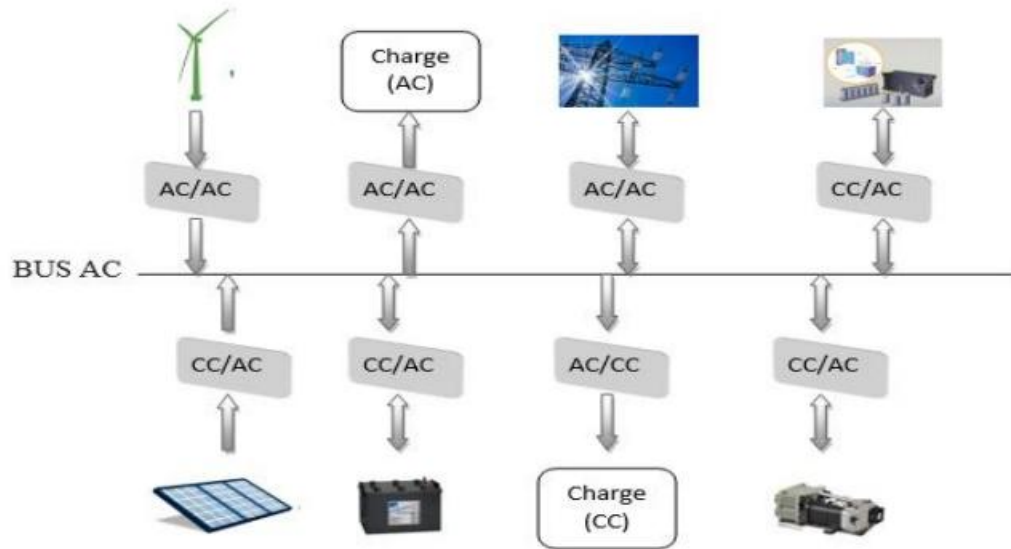


Figure 1.21 Schéma d'une architecture série avec un bus alternatif

1.5.5.2 Architecture parallèle

Les configurations parallèles reposent sur l'utilisation d'un système à double bus combinant deux technologies : un bus CC (courant continu) est dédié à la connexion des sources produisant de l'énergie en courant continu, tandis qu'un bus CA (courant alternatif) sert à intégrer les sources et les équipements fonctionnant à l'énergie renouvelable.

L'innovation de cette architecture réside dans l'interconnexion étroite entre les deux bus grâce à l'utilisation d'un onduleur bidirectionnel. Cette unité centrale permet le flux d'énergie dans les deux sens entre les systèmes à courant continu et à courant alternatif, garantissant ainsi une grande flexibilité dans la gestion des différentes sources et leur distribution optimale pour répondre aux besoins du réseau.

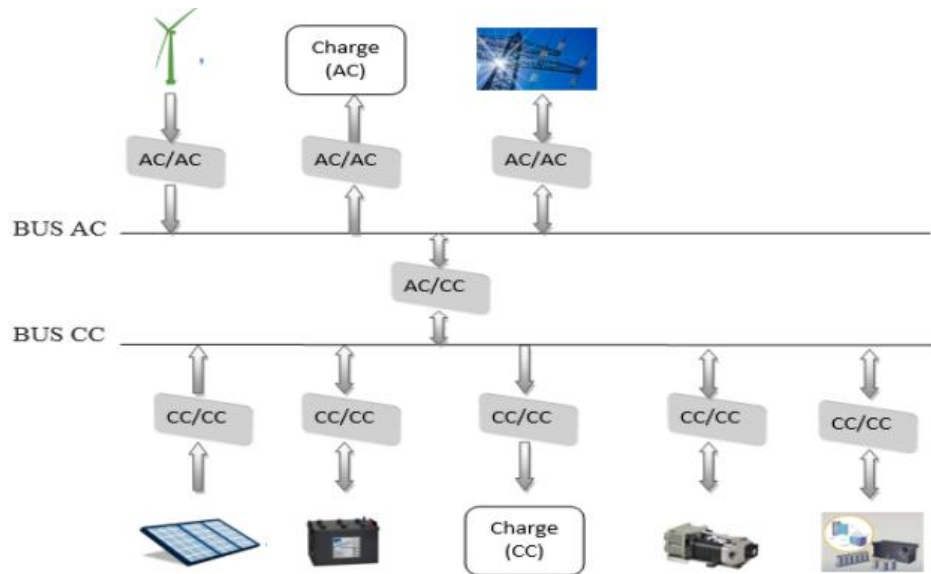


Figure 1.22 Schéma d'une architecture parallèle avec un bus mixte AC et CC.

1.6 Pourquoi les micro-réseaux

Le développement des micro-réseaux dans les régions dotées d'une infrastructure électrique existante est influencé par trois facteurs clés qui contribuent à façonner leur avenir technique et économique : Renforcement de la sécurité énergétique (Energy Security) : les micro-réseaux jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la résilience et de la fiabilité des installations sensibles.

Ils fournissent une source d'électricité stable et durable, en particulier dans les régions exposées à des perturbations climatiques extrêmes, garantissant ainsi la continuité du service dans les conditions les plus difficiles. Avantages économiques (Economic Benefits) : ces systèmes contribuent à améliorer la viabilité financière en réduisant les coûts d'exploitation et en fournissant des « services auxiliaires » (Auxiliary Services) au réseau principal. Cet avantage économique renforce leur compétitivité et leur attractivité en tant qu'option d'investissement dans le secteur de l'énergie.

Soutien à la transition vers les énergies propres (Clean Energy Integration) : les micro-réseaux constituent une plateforme idéale pour intégrer les ressources renouvelables au sein du système électrique.

Ils soutiennent ainsi les efforts mondiaux de lutte contre le changement climatique en réduisant les émissions de CO₂ et en facilitant le déploiement à grande échelle de centrales électriques décentralisées [23].

1.6.1 Les avantages et les inconvénients d'un micro-réseau

1) Premièrement : Avantages et bénéfices opérationnels

Les micro-réseaux présentent un ensemble d'avantages qui en font un choix stratégique dans les systèmes énergétiques modernes, notamment :

- Amélioration de l'efficacité énergétique
- Renforcement de la fiabilité
- Réalisation d'un équilibre dynamique
- Réduction des pertes techniques
- Soutien à la transition énergétique
- Durabilité environnementale

2) Deuxièmement : les défis et les obstacles (inconvénients)

Malgré leurs nombreux avantages, ces systèmes se heurtent à certains obstacles qui freinent leur généralisation :

- Coûts économiques élevés
- Dépendance vis-à-vis des sources traditionnelles
- Capacité d'accueil limitée
- Fiabilité dépendant de la maintenance
- Intermittence des sources d'énergie renouvelable, ce qui signifie que la production d'électricité peut varier en fonction des conditions météorologiques [24].

1.7 Conclusion

Au terme de ce premier chapitre, nous avons présenté les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de la génératrice asynchrone à cage auto-excitée et de son intégration au sein des micro-réseaux à courant continu (DC). L'étude a permis de mettre en évidence les caractéristiques de cette machine, son principe de fonctionnement, les mécanismes de l'auto excitation ainsi que les principaux avantages et limites liés à son exploitation dans les systèmes de production d'énergie.

Par ailleurs, les concepts fondamentaux des micro-réseaux DC ont été développés en présentant leur architecture, leurs composants, leurs modes de fonctionnement ainsi que les bénéfices qu'ils offrent en matière d'intégration des sources d'énergie renouvelables, de stockage et de gestion intelligente des flux énergétiques. Cette analyse montre que les micro-réseaux DC constituent une solution adaptée aux exigences actuelles des systèmes énergétiques décentralisés, notamment en termes d'efficacité, de flexibilité et de fiabilité.

Les connaissances acquises dans ce chapitre constituent une base indispensable pour la suite de cette étude. Elles permettront, dans le chapitre suivant, d'aborder la modélisation mathématique de la génératrice asynchrone, étape essentielle pour l'élaboration et l'évaluation d'une stratégie de commande vectorielle performante adaptée à son fonctionnement au sein d'un micro-réseau DC.

Chapitre 2

Modélisation de la machine asynchrone

2.1 Introduction

Les générateurs à induction triphasés constituent l'option la plus courante dans les technologies de conversion de l'énergie éolienne. Cette large diffusion s'explique par la robustesse structurelle de ces machines, leurs faibles coûts d'investissement, ainsi que par la simplicité de leur conception mécanique qui réduit les besoins en maintenance périodique.

Malgré ces avantages, un obstacle technique se pose : le générateur a besoin en permanence de puissance réactive pour assurer le processus de magnétisation. Ce besoin est satisfait soit directement par le réseau électrique, soit par l'intégration d'un banc de condensateurs (Batterie de condensateurs) qui compense cette puissance, ce qui ouvre la voie à un fonctionnement autonome (Mode autonome) hors du réseau public.

Les machines asynchrones se divisent, en termes de conception, en deux grandes catégories :

- La machine à cage d'écureuil
- La machine à rotor bobiné

Ce chapitre se concentrera essentiellement sur l'étude du générateur à cage d'écureuil, compte tenu de son utilisation intensive dans les éoliennes fonctionnant à vitesse de rotation constante. Nous développerons le modèle mathématique de cette machine en nous appuyant sur un ensemble d'hypothèses de simplification nécessaires au processus de modélisation, dans le but d'obtenir une simulation précise du comportement du système éolien intégré.

2.2 Modélisation de la machine asynchrone

L'étude de tout système physique nécessite, souvent, une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face aux différentes excitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Plus le nombre d'hypothèse est grand, plus le modèle sera simple. Dans ce but, le modèle de la machine asynchrone est élaboré sur la base d'un certain nombre d'hypothèse simplificatrices qui supposent, en générale [27].

Dans le paragraphe qui suit, nous établissons le modèle mathématique triphasé de la machine asynchrone qui sera adopté dans la suite ainsi que ses différentes transformations dans les repères biphasés de Concordia et de Park.

Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [28] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encochage est négligé.
- Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

En tenant compte de ces hypothèses la machine asynchrone peut être représentée schématiquement par la Figure (2.1). Elle est munie de six enroulements.

- Le stator de la machine est formé de trois enroulements (S_a , S_b et S_c) fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements (R_a , R_b et R_c) identiques décalés dans l'espace de 120° . Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.
- θ : l'angle fait par une phase rotorique par rapport à la phase statorique correspondante.

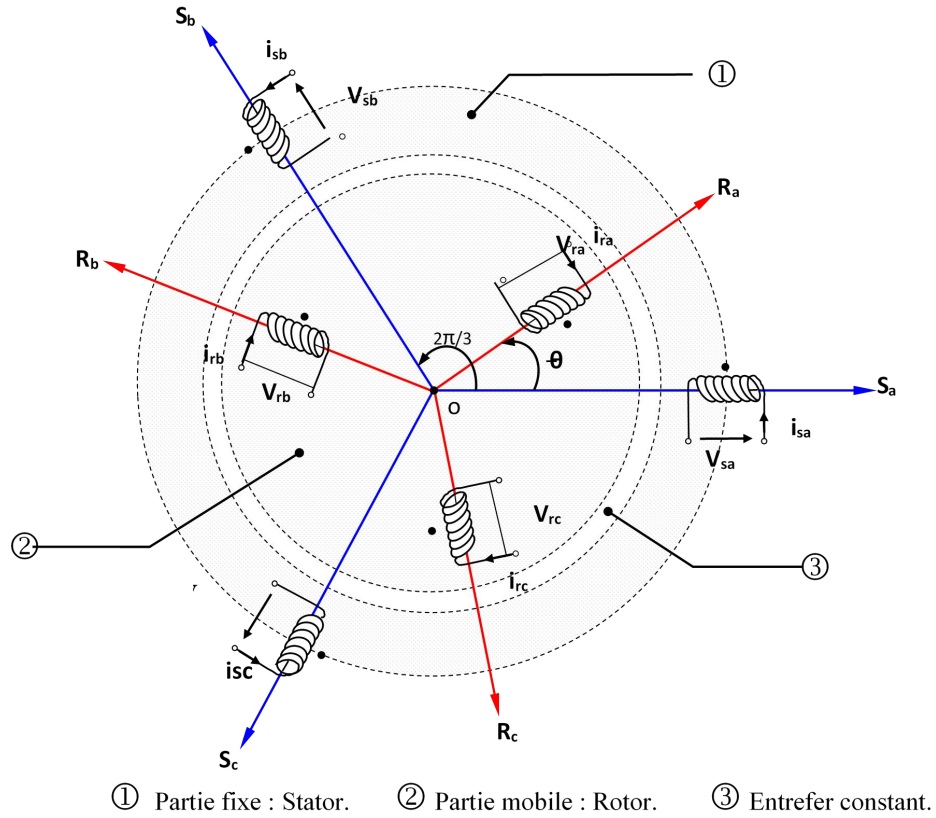


Figure.2.1 Représentation électrique de la machine asynchrone.

Pour la modélisation de la machine, les notations suivantes sont adoptées:

- S, r : se rapportent respectivement aux grandeurs statoriques et rotoriques.
- R_s, L_s : désignent la résistance et l'inductance propre d'un enroulement statorique.
- s_m : représente le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases du stator.
- M : correspond à la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre un enroulement du stator et un autre du rotor.

- V_{sABC} : tensions appliquées aux trois phases statoriques,
- I_{sABC} : Courants qui traversent celles-ci,
- Φ_{sABC} : flux totaux à travers ces enroulements,

2.2.1 Equations générales de la machine asynchrone

La configuration de la machine est illustrée par la Figure. 2.1, qui met en évidence la disposition des six enroulements au sein de l'espace électrique. Dans ce formalisme, la position instantanée du rotor est définie par l'angle géométrique θ . Cet angle permet de repérer l'axe magnétique de la phase rotorique de référence (RA) par rapport à l'axe fixe associé à la phase statorique de référence (SA).

Cette définition de l'angle électrique est fondamentale pour établir les matrices d'inductances mutuelles dépendantes de la position, indispensables à la mise en œuvre de la transformation de Park.

2.2.2 Equation de tension

On déduit pour l'ensemble des phases les équations suivants :

Statorique :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Où :

$$[V_{s(abc)}] = [R_s][I_{s(abc)}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s(abc)}] \quad (2.2)$$

Rotoriques :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} = 0 \\ V_{br} = 0 \\ V_{cr} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Où :

$$[V_{r(abc)}] = [0] = [R_r][I_{r(abc)}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{r(abc)}] \quad (2.4)$$

Avec :

$$[V_{s(abc)}] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T : \text{Vecteur tensions statoriques.}$$

$$[I_{s(abc)}] = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]^T : \text{Vecteur courants statoriques.}$$

$$[V_{r(abc)}] = [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T : \text{Vecteur tensions rotoriques.}$$

$$[I_{r(abc)}] = [I_{ra} \ I_{rb} \ I_{rc}]^T : \text{Vecteur courants rotoriques.}$$

$$[\varphi_{s(abc)}] = [\varphi_{sa} \ \varphi_{sb} \ \varphi_{sc}]^T : \text{Vecteur flux statoriques.}$$

$$[\varphi_{r(abc)}] = [\varphi_{ra} \ \varphi_{rb} \ \varphi_{rc}]^T : \text{Vecteur flux rotoriques.}$$

R_s : Résistance d'une phase statorique.

R_r : Résistance d'une phase rotorique.

2.2.3 Equation de flux

Le système est caractérisé par une matrice d'inductance globale intégrant 36 coefficients non nuls. La particularité de cette matrice réside dans sa dépendance temporelle : la moitié de ces paramètres évolue en fonction du temps par l'intermédiaire de la position angulaire du rotor, notée θ .

Cette configuration reflète le couplage magnétique variable entre les enroulements statoriques fixes et les enroulements rotoriques en mouvement, ce qui rend les équations différentielles du modèle triphasé fortement non linéaires.

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous matrices d'inductances :

$$\text{Pour le stator : } [\varphi_{s(abc)}] = [L_{ss}][I_{s(abc)}] + [M_{sr}][I_{r(abc)}] \quad (2.5)$$

$$\text{Pour le rotor : } [\varphi_{r(abc)}] = [L_{rr}][I_{r(abc)}] + [M_{sr}]^T[I_{s(abc)}] \quad (2.6)$$

Où :

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles du couplage entre stator-rotor.

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\text{Où : } \begin{cases} M_1 = M_0 \cos(\theta) \\ M_2 = M_0 \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_3 = M_0 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.9)$$

Où :

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

L'écriture matricielle ci-dessous résume les trois équations du flux statoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

De façon similaire, on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous matrices d'inductances

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s(abc)} \\ \varphi_{r(abc)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s(abc)} \\ I_{r(abc)} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Finalement:

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [I_r] \} \\ [0] &= [R_r] [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}] [I_s] \} \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.2.4 Equations mécaniques

Le couple électromagnétique développé s'écrit :

$$C_e = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] [I_r] \quad (2.14)$$

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (2.15)$$

Avec :

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f : Coefficient du frottement visqueux.

C_e : Couple électromagnétique. C_r : Couple de charge.

Ω : Vitesse rotorique.

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan (ABC) . Elles peuvent être implantées dans un ordinateur, par contre, vu la complexité de ces équations non linéaires et multi variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande.

2.3 Modèle de Park de la machine asynchrone

La transformation de Park est ancienne (1929), si elle redevient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel.

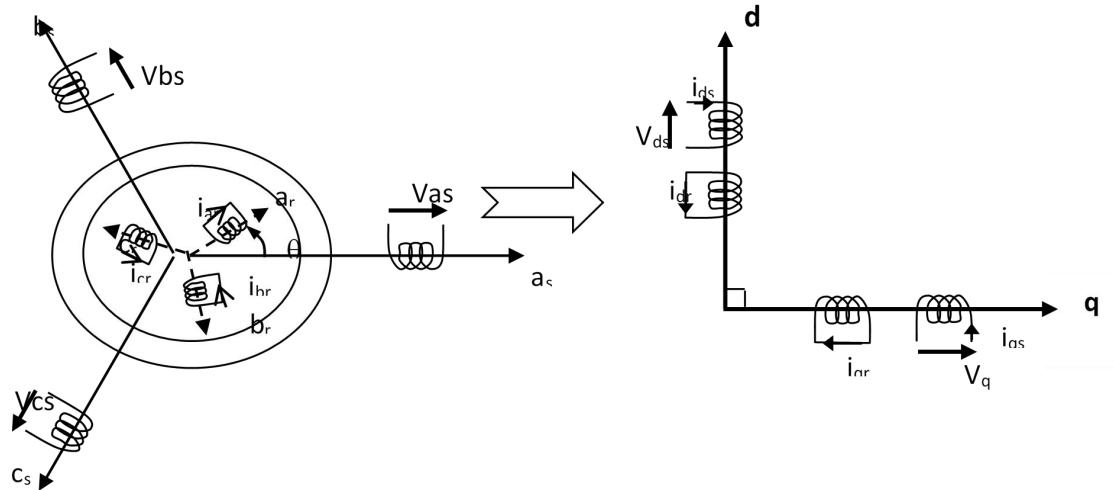


Figure.2.2 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.

2.3.1 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère mobile dq. Pour chaque ensemble de grandeurs (statorique et rotorique), on applique la transformation de park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle. Les repères de la transformation de park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. En effet, si l'on note par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotorique) voir la Figure (2.3) ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation [8] :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (2.16)$$

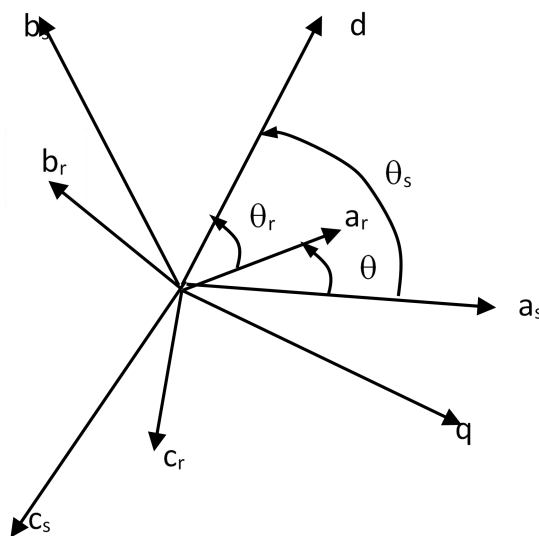


Figure.2.3 : Représentation des axes de la machine.

θ_s : angle électrique stator/référentiel (d, q).

$$\theta_R = \theta_s - \theta.$$

$$\omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

Les amplitudes directes d et en quadrature q des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Où (c) est une constante qui peut prendre soit les valeurs

- $c = \frac{2}{3}$ Pour la transformation directe

$$[x_{dqo}] = c [P(\theta_s)] [x_{abc}]$$

Et 1 pour a transformation inverse

$$[x_{abc}] = c [P(\theta_s)^{-1}] [x_{dqo}]$$

Cette transformation conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple.

- Soit la valeur $\sqrt{\frac{2}{3}}$ pour une conservation de puissance, c'est cette valeur qui sera

retenu dans le cadre de ce travail.

2.3.2 Transformation de Concordia

La transformation de Concordia est constituée également d'une transformation triphasée-biphasée mais dans un repère fixe sans rotation. Elle transforme le système d'équation de repère abc vers le repère $\alpha\beta$. Mathématiquement parlant, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse.

Par conséquent, si on considère un champ magnétique tournant triphasé il sera réduit à deux phases. En effet, la transformation de Concordia, illustrée sur la Figure (2.4) ; permet d'obtenir un système de trois enroulements. Deux situées dans le même plan (α, β) et une

troisième perpendiculaire à ce plan, c'est le composant homopolaire, elle caractérise l'équilibre du système, dont l'expression s'écrit :

$$x_o = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_a + x_b + x_c) \quad (2.19)$$

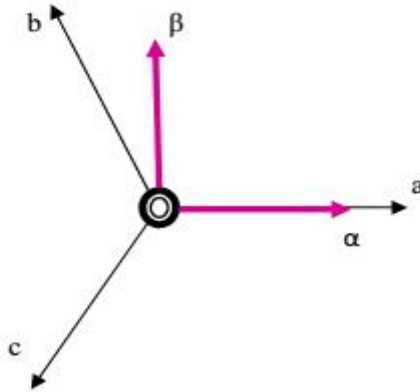


Figure.2.4 : Représentation de système triphasé dans le plan de Concordia.

La composante homopolaire est nulle lorsque le système est équilibré. Le passage de système triphasé abc au biphasé $\alpha\beta$ est défini par :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Avec la matrice de passage $[C]$ égale :

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Et la matrice de passage inverse égale à la transposée de la matrice $[C]$, on peut écrire donc :

$$[C]^T = [C]^{-1}$$

Et ce passage inverse de système, de biphasé $\alpha\beta$ au triphasé abc est défini :

$$[x_{\alpha\beta o}] = \sqrt{\frac{2}{3}} [C]^T [x_{abc}] \quad (2.22)$$

2.3.3 Passage entre les repères Park (d, q) et Concordia (α, β)

Le passage direct de la transformation de Concordia fixe à la transformation de Park dans le repère tournant se fait à l'aide de l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = [P(-\theta)] \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Et inversement :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = [P(-\theta)]^T \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Avec :

$$[P(-\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

2.3.4 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone

2.3.4.1 Application aux équations des tensions

Appliquons la transformation de Park (2.17) (2.18) à l'expression (2.2) :

$$[P^{-1}(\theta_s)][V_{sdq}] = [R_s][P^{-1}(\theta_s)][I_{sdq}] + \frac{d}{dt}\{[P^{-1}(\theta_s)][\varphi_{sdq}]\} \quad (2.26)$$

En multipliant les deux membres de l'égalité par $P(\theta_s)$ et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s][I_{sdq}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sdq}] + [P(\theta_s)]\frac{d}{dt}[P^{-1}(\theta_s)][\varphi_{sdq}] \quad (2.27)$$

Or :

$$\frac{d}{dt}[P^{-1}(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} \sin(\theta_s) & -\cos \theta_s & 0 \\ \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos \theta_s - \frac{2\pi}{3} & 0 \\ \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\cos \theta_s + \frac{2\pi}{3} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Donc après un calcul direct, nous trouvons :

$$[P(\theta_s)]\frac{d}{dt}[P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Et l'expression (2.27) devient alors :

$$[V_{sdq}] = [R_s][I_{sdq}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sdq}] + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} [\varphi_{sdq}] \quad (2.30)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

2.3.4.2 Application aux équations des flux

Application la transformation de Park (2.17) et (2.18) à l'expression (2.5) :

$$[P^{-1}(\theta_r)][\varphi_{sdq}] = [L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)][I_{sdq}] + [M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)][I_{rdq}] \quad (2.33)$$

Soit :

$$[\varphi_{sdq}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)][I_{sdq}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)][I_{rdq}] \quad (2.34)$$

Un calcul simple nous donne :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Et

$$[P(\theta_s)][M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)] = \frac{3}{2}M_o \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & \sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Or, d'après l'égalité (2.16), nous pouvons écrire :

$$[P(\theta_s)][M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)] = \frac{3}{2}M_o \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ M = \frac{3}{2}M_{sr} \end{cases} \quad (2.38)$$

L'expression (2.34) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'introduisant l'inductance cyclique :

$$L_r = l_r - M_r \quad (2.40)$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.3.5 Choix de référentiel

De manière générale, les équations des tensions et des flux de la Machine Asynchrone, écrites dans le plan dq, d'après (2.27), (2.28), (2.34) et (2.35), sont les suivantes [29] :

Equations des tensions

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.42)$$

Equation de flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.43)$$

Cependant, nous pouvons simplifier ces équations encore en choisissant un référentiel particulier pour dq. En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir [29] :

2.3.5.1. Référentiel lié au stator

Caractérisé par $\theta_s = 0$, et par conséquence $\theta_r = -\theta$ le système d'équation (2.36) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.44)$$

Où $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ est la pulsation mécanique

2.3.5.2. Référentiel lié au rotor

Caractérisé par $\theta_r = 0$, et par conséquence $\theta_s = \theta$ le système d'équation (2.42) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.45)$$

2.3.5.3. Référentiel lié au champ tournant

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ C'est la pulsation statorique,}$$

$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$ C'est la pulsation rotorique, et $\omega + \omega_r = \omega_s$ avec $\omega = p\Omega$ c'est la pulsation mécanique.

Le système d'équation (2.42) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.46)$$

C'est dans ce référentiel que nous allons travailler par la suite. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

2.3.6 Expression du couple électromagnétique

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée P_e fournie aux enroulements statorique et rotoriques s'exprime en fonction des grandeurs d'axes d, q [30] :

$$p_T(t) = v_{ds}(t) i_{ds}(t) + v_{qs}(t) i_{qs}(t) + v_{dr}(t) i_{dr}(t) + v_{qr}(t) i_{qr}(t) \quad (2.47)$$

En développant cette expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_T = P_j + P_e + P_{mec} \quad (2.48)$$

Où

$$P_j = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (2.49)$$

$$P_e = I_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + I_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + I_{dr} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + I_{qr} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \quad (2.50)$$

$$P_{mec} = \omega (I_{dr} \varphi_{qr} - I_{qr} \varphi_{dr}) \quad (2.51)$$

L'équation mécanique décrivant le couple en fonction de la vitesse est décrite comme suit :

$$C_e(t) = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega(t) + C_r \quad (2.52)$$

Avec la vitesse mécanique $\Omega = \frac{\omega}{p}$ rad/s. Et p le nombre de paire de pôle rotorique.

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivant :

$$\begin{aligned} C_e &= \frac{P_e}{\Omega} \\ &= p \frac{P_e}{\omega} \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$C_e(t) = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr}(t)i_{qs}(t) - \varphi_{qr}(t)i_{ds}(t)) \quad (2.54)$$

Sans oublier de convertir la vitesse mécanique N (tr/mn) = Ω (rad/s) $60 / (2\pi)$ au cours des simulations.

On constate que l'équation de couple électromagnétique n'est pas linéaire, à cause de produit croisé des composantes du courant et du flux (couplage). Chose qui complique la commande de la machine asynchrone. Le recours à la commande vectorielle permet de résoudre ce problème.

2.4 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons développé la modélisation mathématique de la génératrice asynchrone à cage en nous appuyant sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices permettant de décrire son comportement électromécanique avec une précision suffisante tout en conservant un modèle exploitable pour l'analyse et la simulation. Les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques de la machine ont été établies, puis exprimées dans des repères adaptés grâce aux transformations de Concordia et de Park, facilitant ainsi l'étude dynamique du système.

Cette modélisation met en évidence les interactions entre les grandeurs électriques et mécaniques de la génératrice et constitue un outil essentiel pour comprendre son fonctionnement dans différentes conditions d'exploitation. Elle représente également une étape indispensable pour la conception de lois de commande performantes capables d'assurer une régulation précise des flux et des puissances.

Ainsi, le modèle obtenu servira de base à la mise en œuvre de la stratégie de commande vectorielle développée dans le chapitre suivant. Cette approche permettra d'améliorer les performances dynamiques de la génératrice asynchrone, de garantir une meilleure maîtrise de son fonctionnement et d'assurer son intégration efficace au sein d'un micro-réseau à courant continu (DC)

Chapitre 3

Commande vectorielle de la génératrice asynchrone autonome

3.1 Introduction

L'objectif fondamental de la production d'énergie électrique à partir de systèmes éoliens consiste à garantir une production d'énergie dont la valeur effective et la fréquence sont parfaitement stables, indépendamment des fluctuations de la vitesse du vent ou des variations de la nature des charges électriques associées.

Afin d'atteindre cet objectif, qui consiste à stabiliser le niveau de tension à la sortie du convertisseur, il existe un ensemble de stratégies et de techniques de contrôle conçues pour résoudre ces problèmes techniques. Ce chapitre se concentrera en détail sur l'étude de l'approche de contrôle classique, qui vise essentiellement à transformer les caractéristiques de fonctionnement du générateur asynchrone à cage d'écureuil pour les rendre similaires à celles d'un moteur à courant continu, compte tenu de la flexibilité et de la simplicité de pilotage et de contrôle reconnues de ce dernier.

Dans ce contexte, nous présenterons une analyse précise et méthodique de la technique de commande vectorielle (Vector Control), tout en proposant un aperçu des principes traditionnels de la commande. Ce chapitre abordera également les principes avancés utilisés dans la commande des machines asynchrones à cage d'écureuil, et proposera une étude comparative mettant en évidence les forces et les faiblesses de chaque technique, ce qui permettra une compréhension plus approfondie des options de commande disponibles.

3.2 Principe de la commande vectorielle

Le principal obstacle au contrôle des moteurs asynchrones à cage d'écureuil réside dans le phénomène de « couplage » entre le flux magnétique et le couple électromagnétique ; toute modification de l'une de ces deux valeurs entraîne en effet un effet direct et indésirable sur l'autre. Pour surmonter cette complexité technique, on recourt à la stratégie de « commande vectorielle » (Vector Control), une technique visant à dissocier les deux variables afin de les contrôler de manière totalement indépendante.

Grâce à cette séparation, la machine asynchrone est traitée comme un moteur à courant continu à excitation indépendante (DC machine with Independent excitation), ce qui facilite le pilotage. Dans ce modèle, le système de régulation calcule la valeur de consigne pour le flux et le couple en fonction des valeurs de référence (consignes), puis déduit les valeurs des courants à appliquer pour y parvenir. Plus précisément, la stratégie de contrôle vectoriel ajuste et régule le courant pour garantir qu'il reste aux niveaux spécifiés avec une grande précision.

3.3 Description de la commande vectorielle

Afin d'opérer le découplage effectif entre le flux et le couple, il est impératif de s'appuyer sur le formalisme mathématique dans le référentiel (d-q) exposé précédemment au chapitre (2). La flexibilité de ce système de coordonnées réside dans la capacité à orienter son axe selon les exigences spécifiques de la stratégie de commande.

Dans cette étude, nous privilégions la technique de commande vectorielle par orientation du flux rotorique (FOC - Field Oriented Control). Ce choix se justifie par sa large adoption industrielle et sa supériorité en termes de performances par rapport aux approches basées sur l'orientation du flux statorique ou du flux d'entrefer [30]. Pratiquement, cette stratégie consiste à caler le référentiel tournant de telle sorte que la composante transversale du flux soit nulle $\varphi_{rq} = 0$ tandis que la composante longitudinale représente la totalité du flux $\varphi_{rd} = \varphi_r$. Par conséquent, le vecteur flux rotorique φ_r se retrouve maintenu en alignement permanent avec l'axe d.

Une fois cette condition d'orientation du champ rotorique établie, la dynamique de la machine asynchrone à cage d'écureuil se simplifie. En se basant sur les modèles mathématiques établis aux équations (3.43) et (3.44), le comportement de la machine est alors régi par les expressions suivantes :

$$V_{sd} = R_{si_{sd}} - \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (3.43)$$

$$V_{sq} = R_{si_{sq}} + \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \quad (3.44)$$

$$0 = R_{ri_{rd}} - \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \quad (3.45)$$

$$0 = R_{ri_{rq}} + \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \quad (3.46)$$

Nous rappelons aussi, ci-dessous, les relations entre les différents flux et les courants de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en partant de l'équation (2.43) :

$$\phi_{sd} = L_{si_{sd}} + M_{i_{rd}} \quad (3.47)$$

$$\phi_{sq} = L_{si_{sq}} + M_{i_{rq}} \quad (3.48)$$

$$\phi_{rd} = M_{i_{sd}} + L_{ri_{rd}} \quad (3.49)$$

$$\phi_{rq} = M_{i_{sq}} + L_{ri_{rq}} \quad (3.50)$$

En supposant que la commande maintien : $\varphi_{rd} = \varphi_r = \text{constante}$ et $\varphi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{d\phi_r}{dt} = 0$ et $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$. À partir de la relation (3.45), on obtient :

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r i_{rd} \quad (3.51)$$

Ce qui implique que le courant i_{rd} est également nul en régime permanent. Par ailleurs, l'équation (3.46) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\phi_r = -\frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \quad (3.52)$$

La relation (3.52) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir ϕ_r en fonction de i_{rq} (avec $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$ et

$i_{rd} = 0$) pour que le flux rotorique reste orienté. On peut, à partir des relations (3.49) et (3.50), exprimer les courants i_{rd} et i_{rq} comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\phi_r - M i_{sd}}{L_r} \quad (3.53)$$

$$i_{rq} = -\frac{M i_{sq}}{L_r} \quad (3.54)$$

Le repère orienté impose $\phi_{rq} = 0$. Connaissant le courant i_{sq} , l'expression du couple électromagnétique donné devient alors :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (3.55)$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer ϕ_r et ω_s pour l'application de la transformation de Park.

3.4 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Dans la relation (3.51), on remplace i_{rd} par sa valeur exprimée en (3.53), il devient :

$$\phi_r = \frac{M i_{sd}}{1 + \tau_r S} \quad (3.56)$$

Avec :

- τ_r : constante de temps rotorique.
- S : opérateur de dérivation

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel << dq >> doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + \mathcal{P}_\Omega$. La vitesse de rotation de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. Dans l'équation (3.52), on remplace i_{rq} par sa valeur donnée en (3.54). Ce qui donne :

$$\omega r = \frac{M_{i_{sd}}}{\tau_r \phi_r} \quad (3.57)$$

On obtient finalement :

$$\omega s = \frac{M_{i_{sd}}}{\tau_r \phi_r} + P\Omega \quad (3.58)$$

3.5 Détermination des paramètres nécessaires à la commande

La commande nécessite la connaissance de différents paramètres de la machine asynchrone à cage supposée non saturée (M , L_s , τ_s et τ_r). Le flux rotorique de référence est choisi afin de placer la machine dans un état de magnétisation proche de celui de son point de fonctionnement nominal. On choisit dans notre cas de maintenir le flux rotorique suivant l'axe d à la valeur de référence. Pour notre machine, en prenant $\phi_r - R_{ef}$ 0.7 Wb, les résultats sont :

$$M = 0.10474H$$

$$\tau_s = 0.10611s$$

$$\tau_r = 0.08462s$$

$$\sigma = 0.11949$$

3.6 Définition de l'algorithme de commande

D'après les différentes équations établies au paragraphe suivant, le flux peut être contrôlé par i_{sd} . Une fois celui-ci maintenu à sa référence, le couple est alors directement proportionnel à i_{sq} . Dans le cas du fonctionnement considéré dans nos travaux, c'est la tension « V_{dc} » à la sortie du redresseur qui doit être contrôlée et maintenue constante. Partant de la tension « V_{dc} » à contrôler et du courant i_{dc} 'mesuré' à la sortie du redresseur, on peut exprimer la puissance débitée sur la charge : $V_{dc} - R_{ef} \cdot i_{dc} = p_{ref}$. En négligeant les pertes, on peut confondre cette puissance avec la puissance électromagnétique dont l'expression est $p_{ele} = c_{em} \cdot \Omega$. On peut alors exprimer le couple électromagnétique comme étant : $C_{em} = p_{ref} / \Omega$. De ce fait, le contrôle de « V_{dc} » peut se faire par l'intermédiaire de celui du couple électromagnétique. Il est à noter que les conventions utilisées, la valeur du courant i_{dc} est donc négative [31]. Ceci implique que la puissance de référence, et par suite le couple de référence, ont également des valeurs négatives.

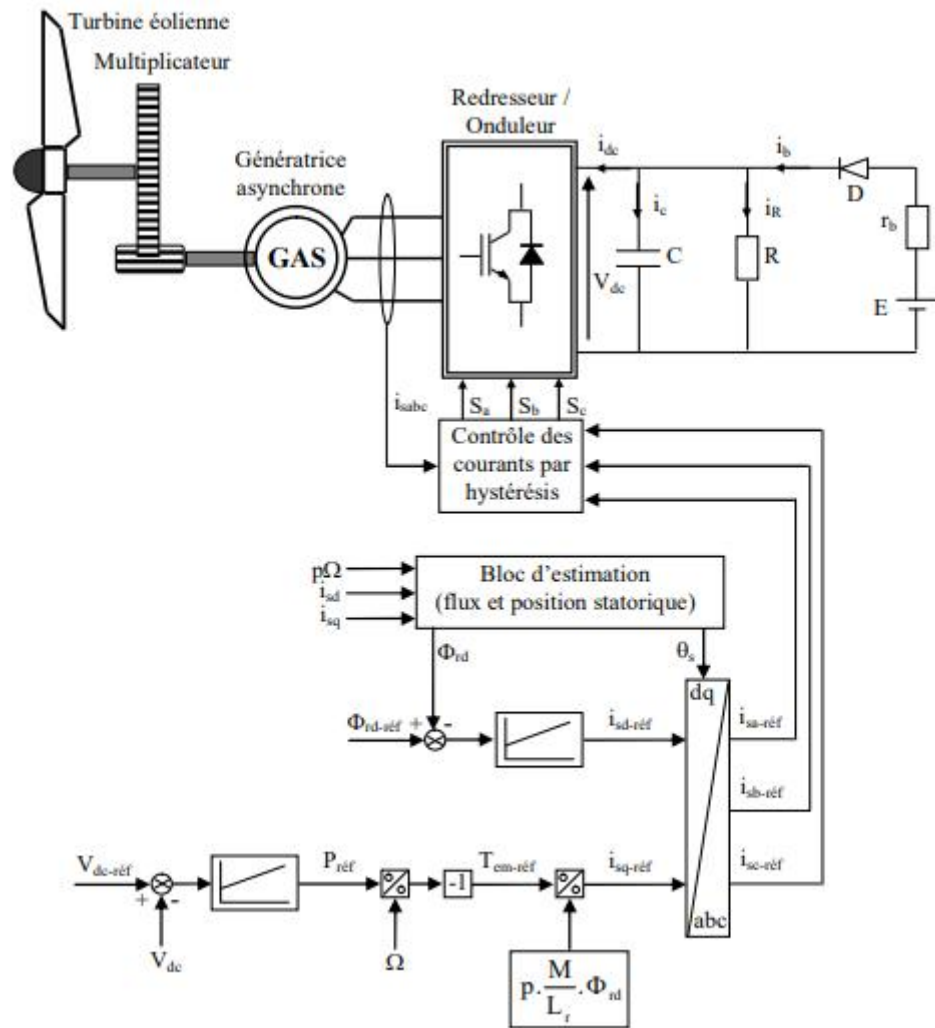


Figure 3.1 Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté

3.7 Résultat de simulation

Pour mettre en évidence l'aspect évaluatif du mécanisme de contrôle proposé, deux tests de simulation ont été menés ; le premier visait à surveiller la réponse dynamique du système sous l'influence de changements soudains de vitesse, tandis que le second test portait sur l'analyse de la stabilité de la tension de sortie de l'onduleur (ou du redresseur) en fonction des variations de la charge du feeder.

3.7.1 Influence de la variation de la vitesse

Ce paragraphe est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats de simulation obtenus sous l'effet d'une vitesse d'entraînement variable. Initialement, la génératrice est entraînée à sa vitesse de synchronisme nominale de (1500 tr/min). À l'instant $t = 6\text{s}$, la vitesse subit un échelon positif de +20%, suivie d'une décélération à l'instant $t = 10\text{s}$ pour se stabiliser à une valeur inférieure de -10% par rapport à la vitesse synchrone. Les performances dynamiques du système, suite à l'application de la commande vectorielle, sont illustrées par les figures ci-dessous.

L'examen de ces courbes révèle que la tension redressée dévie légèrement de sa valeur de consigne lors des transitions de vitesse ; néanmoins, cet écart demeure largement acceptable et inférieur à la limite tolérée de 5%.

En ce qui concerne l'évolution du flux rotorique, configuré à une valeur de référence $\varphi_{r-R_{ef}} = 0.7\text{ Wb}$, la Figure (3.3) montre un suivi de consigne rigoureux malgré les perturbations de vitesse. Ce comportement est corroboré par l'équation (3.56), qui démontre analytiquement l'indépendance du flux vis-à-vis de la vitesse d'entraînement.

Par ailleurs, la Figure (3.4) illustre l'allure temporelle des composantes du courant suivant les axes de Park d et q . On observe initialement un pic transitoire sur le courant de l'axe direct i_{sd} , dont l'évolution ultérieure s'aligne sur celle du flux. À l'inverse, la composante quadratique i_{sq} manifeste une dépendance directe vis-à-vis des variations de vitesse, ce qui est en parfaite concordance avec le modèle mathématique décrit par l'équation (3.58). Cette corrélation justifie également la dynamique du couple électromagnétique présentée sur la Figure (3.5). En effet, conformément à l'équation (3.55), le couple dépend exclusivement de i_{sq} , ce qui rend son allure rigoureusement identique à celle de ce courant.

Enfin, la Figure (3.7) fournit une vue agrandie (zoom) des profils temporels des courants statoriques, confirmant leur nature purement sinusoïdale. La Figure (3.6) expose, quant à elle, le courant d'une phase statorique où l'on constate des transitions plus douces et moins abruptes. Ce phénomène est intrinsèquement lié aux variations graduelles et simultanées des composantes i_{sd} et i_{sq} en réponse aux consignes de flux et de couple. En guise de conclusion, les Figures (3.8) et (3.9) représentent respectivement les allures du courant de charge i_{ch} et du courant redressé i_{dc} .

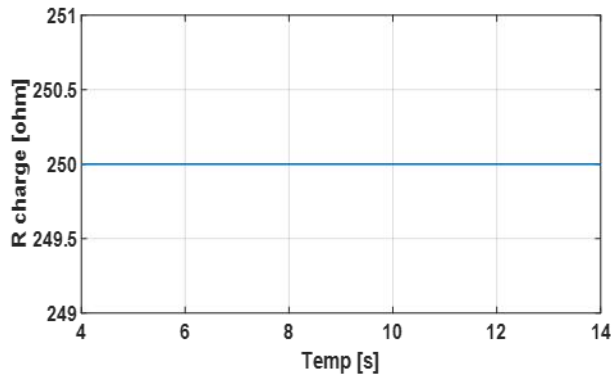


Figure 3.2 R-charge

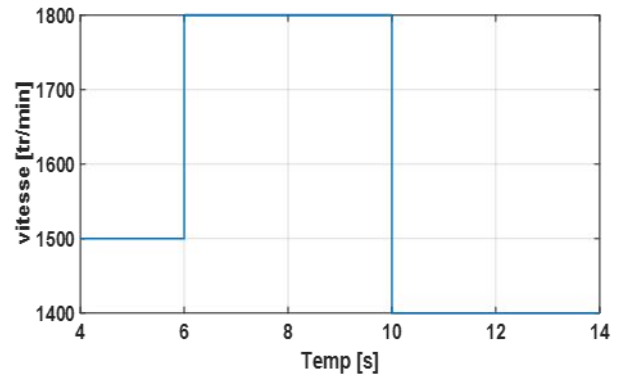


Figure 3.3 vitesse

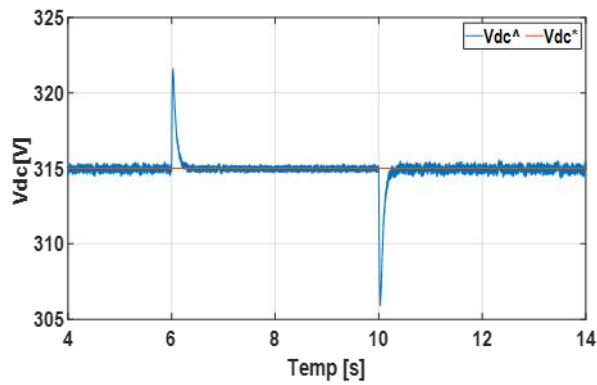


Figure 3.4 Vdc

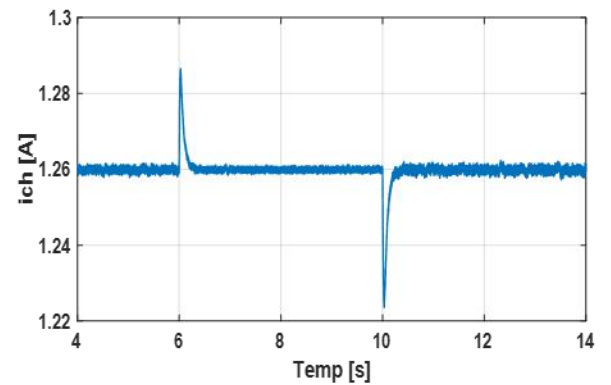


Figure 3.5 Ich

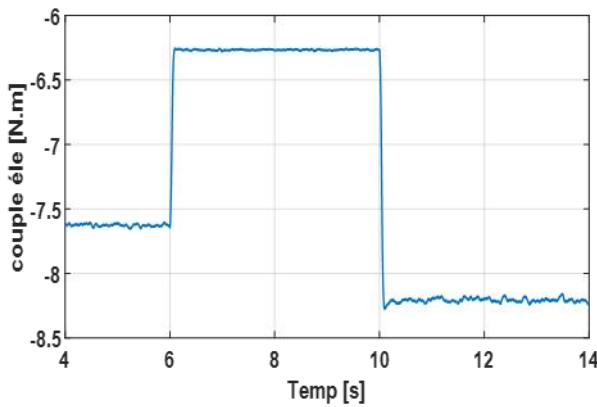


Figure 3.6 couple

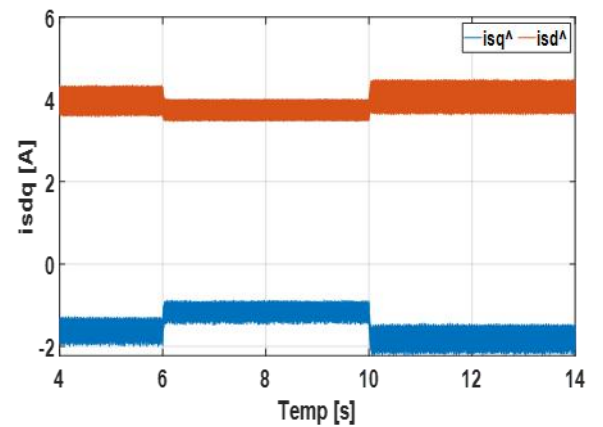


Figure 3.7 courant Idq

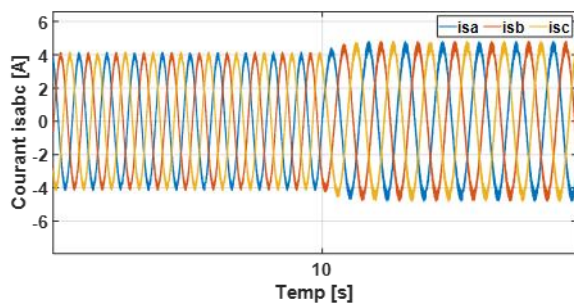


Figure 3.8 courant statorique

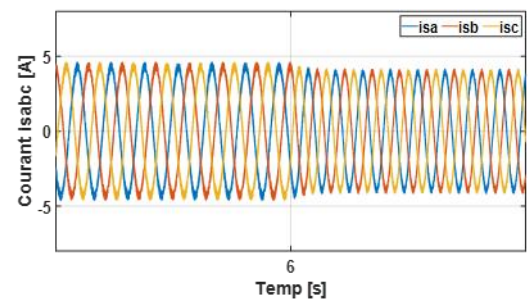


Figure 3.9 courant statorique

3.7.2 Influence de la variation de la charge

Cette section est consacrée à l'évaluation des performances et de la robustesse de la commande vectorielle face aux perturbations de charge. Les tests de simulation ont été menés en maintenant la génératrice à sa vitesse de synchronisme nominale, avec une tension redressée de consigne fixée à $V_{dc\ ref} = 315V$. Le profil de la charge s'articule autour d'une résistance initiale $R = 250\Omega$; à l'instant $t = 8s$, le système subit un délestage par une diminution de la résistance à 200Ω , à 150Ω afin d'initiale de 130Ω à l'instant $t = 13s$. Les réponses dynamiques de la machine sont illustrées par les graphiques ci-après.

L'analyse des résultats met en évidence l'insensibilité absolue du flux rotorique (Figure 3.11) vis-à-vis des fluctuations de la charge, ce qui confirme l'efficacité de la régulation assurée par la composante directe du courant statorique i_{sd} (Figure 3.12). En revanche, ces variations impactent d'une manière significative la dynamique de la tension redressée (Figure 3.10), induisant des dépassements transitoires de l'ordre de 20%. Une telle amplitude s'avère particulièrement prononcée en comparaison avec les faibles écarts enregistrés lors des variations de vitesse.

Sur le plan énergétique, cette perturbation de charge modifie directement la puissance active sollicitée, cette dernière étant intrinsèquement liée au maintien du potentiel de la boucle continue V_{dc} . Par conséquent, l'action corrective du régulateur se traduit par une variation immédiate de la composante quadratique du courant i_{sq} (Figure 3.12), entraînant par effet de couplage une reconfiguration instantanée du couple électromagnétique (Figure 3.13).

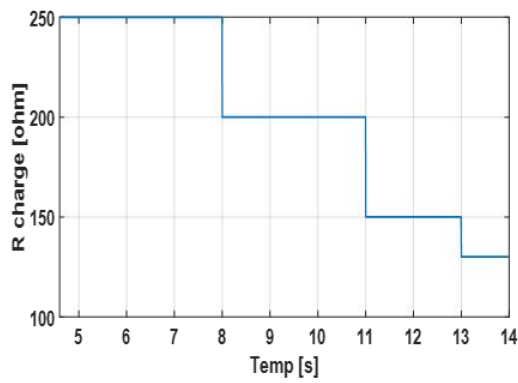


Figure 3.10 R-charge

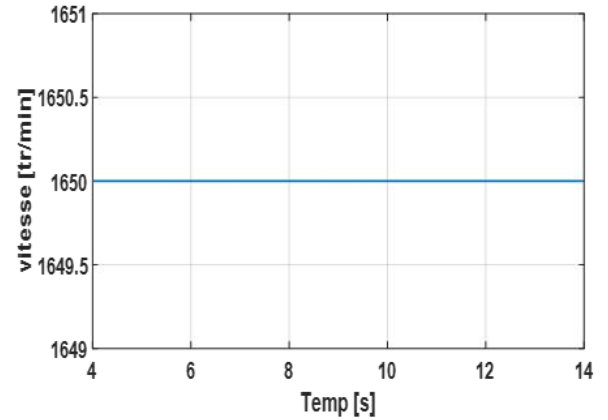


Figure 3.11 vitesse

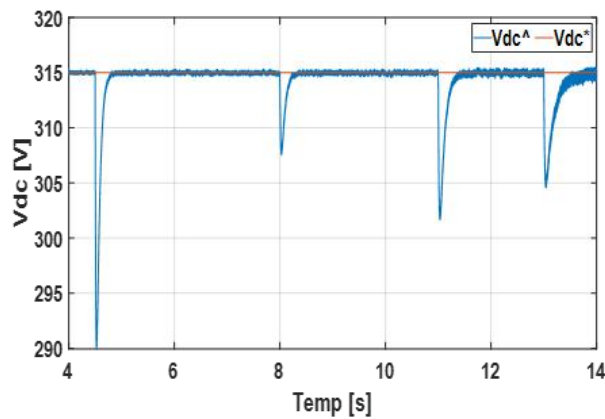


Figure 3.12 Vdc

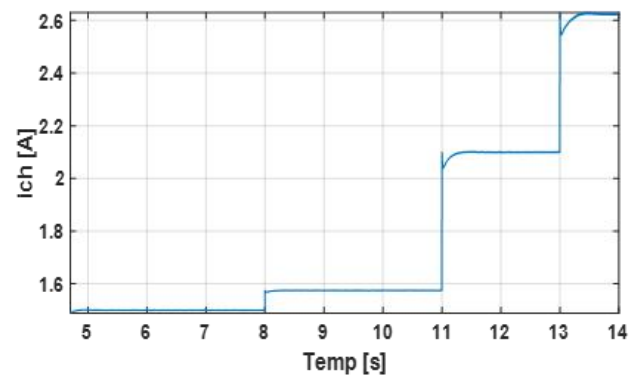


Figure 3.13 Ich

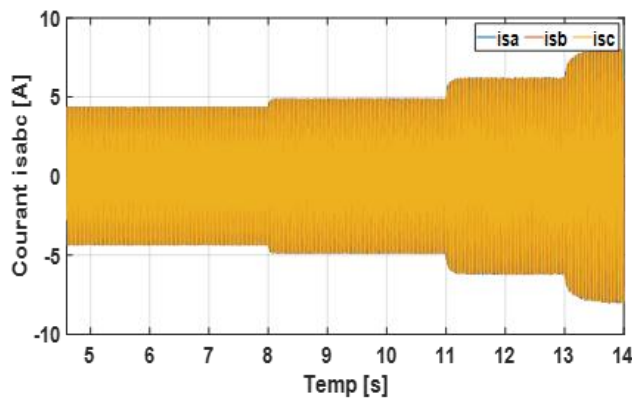


Figure 3.14 courant Idq

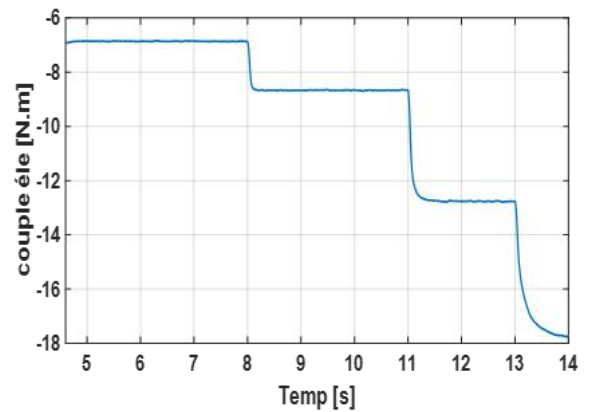


Figure 3.15 couple

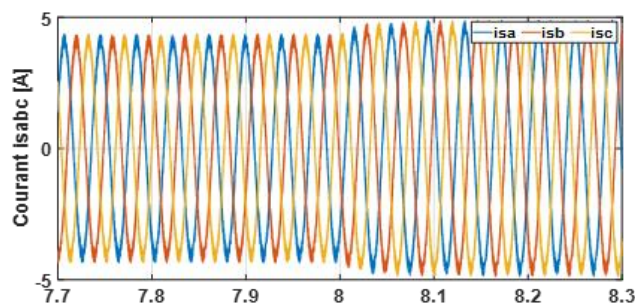


Figure 3.16 courant statorique

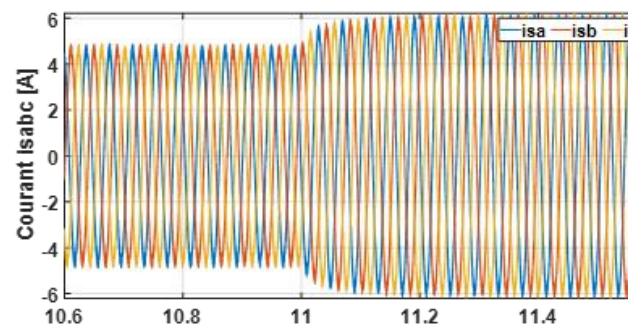


Figure 3.17 courant statorique

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, la commande vectorielle orientée selon le flux rotorique de la génératrice asynchrone autonome a été étudiée afin d'assurer une régulation efficace de la tension du bus continu. Après avoir présenté le principe de la commande vectorielle et les équations nécessaires à sa mise en œuvre, les paramètres de commande ont été déterminés et l'algorithme de contrôle a été élaboré.

Les résultats de simulation ont montré que cette stratégie permet un découplage efficace entre le flux et le couple électromagnétique, garantissant ainsi un bon suivi des consignes et une régulation satisfaisante de la tension de sortie. Les essais réalisés sous des variations de vitesse et de charge ont également mis en évidence la robustesse de la commande, malgré l'apparition de faibles dépassements transitoires lors des perturbations, qui restent compatibles avec un fonctionnement stable du système.

En conclusion, la commande vectorielle constitue une solution performante pour améliorer les performances dynamiques et la stabilité d'une génératrice asynchrone autonome alimentant un micro-réseau à bus continu, ce qui confirme son intérêt pour les applications de production d'énergie à partir des sources renouvelables.

Conclusion générale

Ce travail de recherche représente une contribution scientifique et technique dans le domaine de l'énergie éolienne et des réseaux intelligents (Smart-grids). L'objectif principal était d'analyser, de modéliser et de commander un système de génération autonome de nouvelle génération, basé sur une génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS), intégrée au sein d'un micro-réseau à courant continu (DC Micro-grid).

Les investigations menées tout au long de cette étude ont permis d'aboutir à plusieurs conclusions majeures, structurées selon les axes des différents chapitres :

Premièrement (Étude conceptuelle et contextuelle) : L'état de l'art a mis en évidence l'intérêt stratégique de la génératrice asynchrone auto-excitée pour les applications éoliennes en sites isolés. Ce choix se justifie par sa robustesse mécanique intrinsèque, son coût économique réduit et l'absence de balais, ce qui diminue considérablement les contraintes de maintenance comparativement aux machines synchrones. Par ailleurs, l'évaluation des micro-réseaux DC a démontré leur supériorité en termes de flexibilité et d'efficacité pour l'intégration des sources d'énergie renouvelables décentralisées, s'affranchissant ainsi des problèmes complexes liés à la synchronisation et à la gestion de la fréquence propres aux réseaux AC.

Deuxièmement (Modélisation mathématique) : Afin de surmonter la complexité liée à la forte non-linéarité et au couplage multivariable de la machine asynchrone, un modèle mathématique rigoureux a d'abord été établi dans le repère triphasé naturel. Par la suite, l'application de la transformation de Park a permis de transposer les équations dynamiques dans le repère diphasé (d-q). Cette approche a considérablement simplifié les équations différentielles du système, offrant ainsi un formalisme flexible et adapté à la synthèse des lois de commande.

Troisièmement (Commande et validation par simulation) : Une stratégie de commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique a été développée et implantée. Cette technique a permis de découpler efficacement le flux magnétique du couple électromagnétique, assimilant ainsi le comportement de la machine alternative à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les résultats des simulations numériques, effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink, ont confirmé les hautes performances et la robustesse de l'approche proposée. En effet, le système de commande a démontré une excellente capacité à :

- Réguler et stabiliser la tension du bus DC (V_{dc}) à sa valeur de référence, en dépit des variations brusques et aléatoires de la vitesse du vent.

- Présenter une immunité remarquable face aux perturbations de charge, avec une dynamique de rejet rapide, tout en maintenant le flux rotorique parfaitement insensible à ces fluctuations grâce au découpage effectif.

En conclusion, les résultats de cette investigation scientifique confirment que l'association d'une génératrice asynchrone à cage et d'une stratégie de commande vectorielle avancée constitue une solution technologique viable, sécurisée et économiquement avantageuse. Elle garantit la stabilité et la qualité de l'énergie électrique au sein des micro-réseaux DC autonomes, même sous des conditions opératoires et environnementales hautement fluctuantes.

Références bibliographiques

- [1]. Metin Demirtasa, Haris Calgana, Amieur Toufik, Moussa Sedraoui, « Small-signal modeling and robust multi-loop PID and H_{∞} controllers synthesis for a self-excited induction generator ». université belkicir , université larbi tebessi tebessa, université 8 mais 1945 guelma. 28 janvier 2021
- [2]. H. Ben Ahmed, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, O. Gergaud et B. Dakyo, "Aérogénérateurs électriques", Techniques de l'Ingénieur, D3960, Nov. 2004"
- [3]. M. Mohamed machmoum 2003 thèse de doctorat « etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie eolienne ». universite de nantes ecole doctorale sciences et technologies de l'information et des materiaux . 14 janvier 2006 p27,
- [4]. LOPES Carolino Manuel, DIAKANAMWA Milito Afonso, « Commande non linéaire de la machine asynchrone par logique floue. » Projet de Fin d'Étude master académique en électromécanique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbes, 2012.
- [5]. A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France 2007.
- [6]. Lamri louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto-excitée ». thèse de doctorat, université Mentouri-Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. 08/07/2010.
- [7]. Mekkaoui Naïma. « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une MiniCentrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double ». universite de batna faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. Mémoire de Magister Spécialité: Maîtrise d'Énergie et Énergies Renouvelables Alimentée 2004
- [8]. R. W. De Doncker, D. W. J. Pulle et A. Veltman, Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control. Éditions Springer, Cham, 2020.
- [10]. M. kassa idjdrene . » contribution à l'étude de la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolienne autonomes » . thèse . université abderahmane mira bejaia. faculté science et technologie . électrotechnique . soutenu 23 mai 2010
- [11]. Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Canizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., et al. (2014). Trends in microgrid control. IEEE Transactions on Smart Grid, 5, 1905-1919.
- [12]. Labouret, A., & Villos, M. (2006). Energie solaire photovoltaïque (2ème édition). Edition LE MONITEUR. [12] Bettens, F. (2011). Impact de la production électrique des

- éoliennes en Belgique sur les émissions de CO₂. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles.
- [13]. Rocher, P. Le Gourières, D (2008). L'énergie du vent: les éoliennes au service des hommes et de leur planète. Paris, France: Éditions Le Seuil, Editions du Rouergue.
- [14]. Hilgers, M. (2022). The Diesel Engine, 2nd Edition, Springer Vieweg, 2022.
- [15]. Victron Energy B.V. (2022). Battery management system overview. Almere, The Netherlands: Victron Energy B.V.
- [16]. Bateaux. (2019, 16 janvier). Batteries-plomb ouvertes. L'invité de la Rédaction.
- [17]. Coupan, F. (2017). Thèse de doctorat: Stockage pour les énergies renouvelables: Évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide. Université de Guyane
- [18]. Templier, S. (2024, 1er mai). La pile à combustible marque des points. La Presse.
- [19]. Khawaja, Y., Giaouris, D., Patsios, H., & Dahidah, M. (2017). Optimal cost-based model for sizing grid-connected PV and battery energy system. In Proceedings of the 2017 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), Aqaba, Jordan, 11–13 October 2017 (pp. 1-6).
- [20] Asmus, P. (2010). Renewable Energy Integration in Smart Grids. Journal of Renewable Energy, 23(10), 1040-6190.
- [21]. Dobrowolski, J. (2017). Modélisation, contrôle/commande et certification d'un microréseau électrique décentralisé avec entrées exogènes aléatoires et informations contraintes. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. Référence NNT: 2017GREAT111. Identifiant fftel-01825302f.
- [22]. Espina, E., Llanos, J., Burgos-Mellado, C., & Cardenas-Dobson, R. (2020). Distributed control strategies for microgrids: An overview. IEEE Access, 8, 193412-193448.
- [23]. Chai, W. S., & Zhou, L. (September 2021). A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels.
- [24]. Liouane, N. (n.d.). Micro-réseau à Courant Continu (DC Micro-grid). Adresse: Professeur Rue Ibn El Jazzar 5019, Monastir, Tunisie
- [25]. Kumar, M. A. (2016). Application of intentional islanding algorithm for distributed energy resources in disaster management. In Proceedings of the IEEE International Conference on Power System Technology (pp. 1-6). doi:10.1109/POWER.2016.7752450
- [26]. Seifi, M., Soh, A. C., Hassan, M. K., & Wahab, N. I. A. (2014). An innovative demand side management for vulnerable hybrid microgrid. In Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies (pp. 797-802). doi:10.1109/ISGT.2014.6816390

- [27]. S.Damkhi, « Commande sans capteur de vitesse d'un moteur asynchrone par la SFG (SIGNAL FLOW GRAPHS) de Holtz », Thèse de Magistère, université de Batna.2007.
- [28]. H.TAMRABET, «Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale Machine Asynchrone. » Thèse de magister, université de Batna 2006.
- [29]. L.Baghli, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Notes de cours, IUFM de Lorraine – UHP 2003 /2004.
- [30]. F. Boussekra, Commande sans Capteur de Vitesse de la Machine Synchrone, Thèse de Doctorat, Université Batna 2, Algérie, 2022.
- [31]. Y. Djemaa and F. Kernou, Commande par mode glissant d'une génératrice asynchrone, Mémoire de Master 2, Département de Génie Électrique, Faculté de Technologie, Université A. Mira de Béjaïa, Béjaïa, Algérie, Année universitaire 2014–2015.

Annexe

Paramètres de la MAS utilisée:

<i>Symboles</i>	<i>Description</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
R_s	<i>Résistance statorique</i>	4.8113	Ω
R_r	<i>Résistance Rotorique</i>	3.1541	Ω
L_s	<i>Inductance statorique</i>	0.0171	H
L_r	<i>Inductance rotorique</i>	0.0171	H
L_m	<i>Inductance Mutuelle</i>	0.4058	H
p	<i>Nombre de paires de pôles</i>	2	
P_n	<i>Puissance nominale</i>	1.5	kW
N_n	<i>Vitesse nominale</i>	1391	Rad/sec
Ω_n	<i>Couple de charge nominale</i>	10.5	N.m
C_r	<i>Courant nominale</i>	3.81	A
I_n	<i>Tension</i>	380	V
F	<i>Fréquence</i>	50	Hz