

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources
Energétiques Sahariennes (LEVRES)

Thèse de Doctorat

Présentée par :

ZINE Mahmoud

En vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD en :

Option : Machines Electriques

Contribution à la Modélisation Dynamique et au
Contrôle des Génératrices à Réductance Variable en Vue
de l'Amélioration de leurs Performances Energétiques

Soutenue le 11/ 12/ 2024 devant le jury composé de :

ZELLOUMA Laid	Professeur	Université d'El Oued	Président
SRAIRI Kamel	Professeur	Université de Biskra	Directeur de thèse
LABIOD Chouaib	MCA	Université d'El Oued	Co-Directeur de thèse
BENCHOUIA Mohamed Toufik	Professeur	Université de Biskra	Examineur
GUERGAZI Aicha	MCA	Université de Biskra	Examineur
BEKAKRA youcef	Professeur	Université d'El Oued	Examineur
IKHLEF Malika	MCA	Université de Batna 2	Invitée

Année Universitaire: 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je remercie en premier lieu dieu le tout puissant pour m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

J'adresse toute ma gratitude et mes sincères remerciements

*au Professeur **SRAIRI Kamel**, mon directeur de thèse, pour sa très grande disponibilité, ses orientations ponctuelles, ses encouragements illimités et aussi pour ses conseils précieux durant l'élaboration de ce travail*

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance

*au Docteur **LABIOD Chouaib** pour ses encouragements illimités et pour ses conseils précieux pendant la réalisation de ce travail.*

Je tiens particulièrement à remercier

*Monsieur le Professeur **ZELLOUMA Laid**, Maître de Conférences à l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.*

Je suis très reconnaissant aux membres du jury :

*Monsieur le Professeur **BENCHOUIA Mohamed Toufik**, Maître de Conférences à l'Université de Biskra, Madame **GUERGAZI Aicha**, Maître de Conférences à l'Université de Biskra*

*et Monsieur le Professeur **BEKAKRA Youcef**, Maître de Conférences à l'Université de Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued*

*Madame **IKHLEF Malika**, Maître de Conférences à l'Université de Batna II, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer*

ce travail.

Je tiens également à exprimer ma vive gratitude à tous les enseignants du département d'Electrotechnique et aux membres du laboratoire de recherche

LEVRES.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer et à réaliser

cette thèse.

إهداء

الحمد لله ربي العالمين على الإنجاز هذا البحث والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

اهدي ثمرة هذا العمل المتواضع:

إلى من علمني النجاح والصبر

إلى من افتقده في مواجهة الصعاب ولم تمهله الدنيا لأرتوي من حنانه والذي عمار ومربي بعد وفاة الوالد محمد عموري رحمة الله عليهما.

إلى من وضع المولى - سبحانه وتعالى - الجنة تحت قدميها، ووقَّرها في كتابه العزيز أُمِّي غالية حفظها الله.

إلى الوالدة حليلة التي أفنت عمرها في نصيحي وإرشادي، ومن أعتد عليه في كل كبيرة وصغيرة أخي المُحترم.

إلى زوجتي وابني محمد حفظهم الله وزوجة أخي وكافت الأهل والأحباب.

إلى كل أساتذتي المحترمين وخص بالذكر المؤطرين:

الأستاذ كمال سرايري والأستاذ شعيب لبيض أتمنى لهم دوام الصحة والعافية والمزيد من النجاحات.

إلى كل أساتذة وعمال كلية التكنولوجيا وعلى رأسهم عميد كلية.

إلى أصدقائي الأعزاء وجميع من وقفوا بمجاورتي وساعدوني بكل ما
يملكون إلى كل زملاء العمل

اللهم اجعل هذا العمل ثمرة طيبة يستتفع بها الباحثين

اللهم لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت العليم الحكيم اللهم علمنا ما ينفعنا
وانفعنا بما علمتنا وزدنا علما إلى علمنا.

Résumé

Les objectifs de notre travail sont les suivants : Modéliser dynamiquement et non linéairement les générateurs à reluctances variables (GRV) en déterminant des propriétés statiques à l'aide d'éléments finis.

Appliquer des stratégies de contrôle pour améliorer les performances et optimiser la qualité de l'alimentation des GRV.

Adapter des techniques d'intelligence artificielle aux stratégies de contrôle afin d'obtenir des paramètres optimaux pour maximiser les performances dans la production d'énergie électrique.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons modélisé et simulé une éolienne utilisant la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ensuite, nous avons détaillé la stratégie de contrôle HCC (Hysteresis Current Control) pour les GRV, en illustrant les stratégies de commutation possibles via le taux d'hystérésis, le convertisseur électronique (pont asymétrique) et l'algorithme permettant de contrôler le couple par la technique HCC. Enfin, nous avons associé la technologie HCC à celle de l'éolienne MPPT pour augmenter l'efficacité du coefficient de performance (C_p).

Dans le dernier chapitre, nous avons comparé cette nouvelle technologie aux algorithmes GSA (Gravitational Search Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) et MEPT, en recherchant les solutions optimales pour les paramètres (θ_{on} , θ_{off}) sans garantir qu'elles soient les meilleurs possibles ou qu'il n'existe pas de meilleures alternatives. Bien que ces techniques fournissent de bonnes solutions, leur incapacité à explorer toutes les configurations possibles peut limiter leur capacité à découvrir la solution optimale absolue. Cette limitation peut restreindre leur potentiel à rechercher de meilleures solutions au-delà de ce stade spécifique.

Les résultats obtenus confirment fortement l'efficacité de la technique MPPT proposée pour améliorer les performances globales des GRV. En considérant un ensemble complet de données et en explorant un large éventail de possibilités, la technique proposée surpasse les algorithmes GSA, PSO, MEPT et les techniques conventionnelles, améliorant ainsi les performances opérationnelles et la qualité de l'énergie produite par les GRV.

Les résultats obtenus approuvent et valident l'efficacité du système de contrôle proposé, ils ont également présenté l'importance de l'effet de variation des angles de

commutation (θ_{on} , θ_{off}) sur les performances de fonctionnement et la qualité de l'énergie produite par le GRV.

Mots clefs

Génératrice à reluctance variable (GRV), Méthode des éléments finis (FEM), Intelligence artificielle, Production de l'énergie électrique, Régulateur à Hystérésis (HCC), Turbine éolienne, Méthode de point de puissance maximale (MPPT).

Abstract

The objectives of our work are as follows: Dynamically and non-linearly model switched reluctance generator (SRG) by determining static properties using finite elements.

Apply control strategies to improve performance and optimize the power quality of SRG.

Adapt artificial intelligence techniques to control strategies in order to obtain optimal parameters to maximize performance in the production of electrical energy.

To achieve these objectives, we modeled and simulated a wind turbine using MPPT (Maximum Power Point Tracking) technology. Then, we detailed the HCC (Hysteresis Current Control) control strategy for SRG, illustrating the possible switching strategies via the hysteresis rate, the electronic converter (asymmetrical bridge) and the algorithm allowing torque to be controlled by the HCC technique. Finally, we combined HCC technology with that of the MPPT wind turbine to increase the efficiency of the coefficient of performance (C_p).

In the last chapter, we compared this new technology to the GSA (Gravitational Search Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) and MEPT algorithms, looking for optimal solutions for the parameters (θ_{on} , θ_{off}) without guaranteeing that they are the best possible or that there are no better alternatives. Although these techniques provide good solutions, their inability to explore all possible configurations may limit their ability to discover the absolute optimal solution. This limitation may restrict their potential to seek better solutions beyond this specific stage.

The obtained results strongly confirm the effectiveness of the proposed MPPT technique to improve the overall performance of SRG. By considering a comprehensive data set and exploring a wide range of possibilities, the proposed technique outperforms

GSA, PSO, MEPT algorithms and conventional techniques, thereby improving operational performance and quality of power produced by SRG.

The results obtained approve and validate the effectiveness of the proposed control system, they also presented the importance of the effect of variation of the switching angles (θ_{on} , θ_{off}) on the operating performance and the quality of the energy produced by the SRG.

Keywords

Switched Reluctance Generator (SRG), finite element method (FEM), Artificial intelligence, Production of electrical energy, Hysteresis regulator (HCC), Wind turbine, Maximum Power Point Method (MPPT).

ملخص

أهداف عملنا هي: مولدات دوارة ملفوفة نموذجية ديناميكياً وغير خطية (SRG) من خلال تحديد الخصائص الثابتة باستخدام عناصر محدودة - تطبيق استراتيجيات التحكم لتحسين الأداء وتحسين جودة إمدادات الطاقة للحاويات الوسيطة. - تكييف تقنيات الذكاء الاصطناعي استراتيجيات التحكم من أجل الحصول على المعلمات المثلى لتحقيق أقصى قدر من الأداء في إنتاج الطاقة الكهربائية.

ولتحقيق هذه الأهداف، قمنا بتصميم ومحاكاة توربينات الرياح باستخدام تقنية MPPT (تتبع أقصى نقطة للطاقة). بعد ذلك، قمنا بتفصيل استراتيجية التحكم في HCC (التحكم في تيار التباطؤ) للحاويات الوسيطة، موضحين استراتيجيات التبديل الممكنة عبر معدل التباطؤ، والمحور الإلكتروني (الجسر غير المتماثل) والخوارزمية التي تسمح بالتحكم في عزم الدوران بواسطة تقنية HCC. وأخيراً، قمنا بدمج تقنية HCC مع تقنية توربينات الرياح MPPT لزيادة كفاءة معامل الأداء (C_p).

في الفصل الأخير، قمنا بمقارنة هذه التقنية الجديدة بخوارزميات GSA (خوارزمية بحث الجاذبية) و PSO (تحسين سرب الجسيمات) وخوارزميات MEPT، بحثاً عن الحلول المثلى للمعلمات (θ_{off} , θ_{on}) دون ضمان أنها أفضل ما يمكن أو أنه لا توجد بدائل أفضل. وعلى الرغم من أن هذه التقنيات توفر حلولاً جيدة، إلا أن عدم قدرتها على استكشاف جميع التكوينات الممكنة قد يحد من قدرتها على اكتشاف الحل الأمثل المطلق. وقد يحد هذا القيد من قدرتهم على البحث عن حلول أفضل بعد هذه المرحلة المحددة.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها بقوة فعالية تقنية MPPT المقترحة لتحسين الأداء العام للحاويات الوسيطة. من خلال النظر في مجموعة بيانات شاملة واستكشاف مجموعة واسعة من الاحتمالات، تتفوق التقنية المقترحة على خوارزميات GSA و PSO و MEPT والتقنيات التقليدية، وبالتالي تحسين الأداء التشغيلي وجودة الطاقة التي تنتجها. GRV.

النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد وتثبت فعالية نظام التحكم المقترح، كما أنها أظهرت أهمية تأثير اختلاف زوايا التبديل (θ_{on} , θ_{off}) على الأداء التشغيلي وجودة الطاقة المنتجة بواسطة GRV.

الكلمات المفتاحية

مولد التردد المتغير (GRV)؛ طريقة العناصر المحدودة (FEM)؛ ذكاء إصطناعي؛ إنتاج الطاقة الكهربائية، منظم التباطؤ (HCC)؛ توربينات الرياح ; طريقة تتبع أقصى الطاقة (MPPT).

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Resume

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction Générale 1

Chapitre I

Etude générale sur les Machines à Réluctance Variable (MRV)

I.1 Introduction	4
I.2 Types de configurations des MRV	5
I.2.1 MRV Pures	5
I.2.2 MRV à effet Vernier	6
I.2.3 MRV hybrides	7
I.3 Concepts de base de la MRV	8
I.3.1 Explication de l'angle électrique	8
I.3.2 Diverses configurations MRV	8
I.4 Principe de fonctionnement	11
I.4.1 Analyse de circuits électriques	13

I.4.2 Conversion d'énergie et calcul de couple	14
I.4.3 Interrelations entre l'inductance et la position du rotor	17
I.5 Avantages et inconvénients du MRV	19
I.6 Les applications des MRV	20
I.7 Conclusion	24

Chapitre II

Les Modèles mathématiques utilisant la MEF pour la GRV 12/8

II.1 Introduction	26
II.2 Différentes approches de modélisation d'une GRV	27
II.2.1 Les méthodes d'analyse	27
II.2.2 Techniques d'interpolation	27
II.2.3 Les approches basées sur des modèles de circuit magnétique équivalent	27
II.2.4 Les méthodes des éléments finis	28
II.3 Les équations électromagnétiques	28
II.3.1 Equations générales de MAXWELL	28
II.3.2 Modèle magnétostatique	30
II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire	30
II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle	30
II.3.3 Modèle magnétodynamique	31
II.4 La solution numérique utilisant la MEF	33
II.5 Modélisation électromagnétique de la machine à réluctance variable	35

II.5.1 Les caractéristiques statiques	39
II.5.2 Résultats de l'analyse graphique	40
II.5.2.1 Modèle linéaire	41
II.5.2.2 Modèle non linéaire	44
II.5.3 Analyse de résultats de courbes	46
II.5.3.1 Modèle linéaire	47
II.5.3.2 Modèle non linéaire	49
II.6 Réalisation et mise en œuvre expérimentale du GRV	51
II.7 Calcul de l'inductance de phase fixe	53
II.8 Conclusion	55

Chapitre III

l'association de la commande HCC de la GRV avec la technique MPPT pour une turbine éolienne

III.1 Introduction	57
III.2 Généralités sur les éoliennes	58
III.2.1 Définition d'énergie éolienne	58
III.2.2 Définition d'un système éolien	59
III.2.3 Types des éoliennes	59
III.2.3.1 Eoliennes à axe vertical	59
III.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal	60
III.2.4 Composants de la Turbine Eolienne	61

III.2.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable	63
III.2.5.1 Eolienne à vitesse fixe	63
III.2.5.2 Eolienne à vitesse variable	63
III.3 Modélisation de la turbine à étudier	64
III.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	64
III.3.2 Modélisation de la turbine	64
III.3.3 Modèle du multiplicateur de vitesse	67
III.3.4 Modèle de l'arbre	67
III.3.5 Schéma bloc du modèle de la turbine	67
III.4 Fonctionnement de la Turbine Eolienne	68
III.4.1 Extraction du maximum de la puissance d'une turbine éolienne	68
III.4.2 Points de MPPT d'une éolienne	69
III.5 Modèle dynamique des trois phases du 12/8 GRV basé sur la MEF	72
III.6 Stratégie de commande HCC de la GRV	74
III.6.1 Convertisseur électronique de puissance	74
III.6.2 Stratégies de commutation	76
III.6.3 Contrôle du couple par contrôle HCC	78
III.7 Association et simulation de la commande HCC avec MPPT de la turbine et la GRV	79
III.8 Résultats de simulation associés au contrôle HCC de la GRV par la technique MPPT	81
III.9 Conclusion	85

Chapitre IV

Nouvelle techniques pour MPPT dans le contrôle GRV

IV.1 Introduction	87
IV.2 Techniques d'optimisation pour atteindre θ_{on} et θ_{off}	88
IV.2.1 Optimisation par l'algorithme génétique (Gravitational Search Algorithm (GSA))	88
IV.2.3 Optimisation des essaims de particules (Particle swarm optimization (PSO))	92
IV.2.3 Développement d'une technique de suivi à efficacité maximale (Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)) associée au contrôleur PID	95
IV.3 Dépendance de la puissance de sortie GRV sur les variables de commande	97
IV.4 Extraction des données des caractéristiques GRV	100
IV.5 Efficacité énergétique GRV	103
IV.6 MPPT pour la GRV	104
IV.7 Conclusion	111
Conclusion Générale	113
Annexes	116
Références	

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : MRV pur à grosses dents.	5
Figure I.2 : MRV pur à grosses dents à plusieurs dents par phase.	6
Figure I.3 : MRV excitée à effet vernier.	7
Figure I.4 : MRV hybride.	7
Figure I.5 : configuration connue sous le nom de structure MRV 8/6.	9
Figure I.6 : Différents types de modèles de MRV.	10
Figure I.7 : Plage de valeurs possible des supports de dents de stator et de rotor.	11
Figure I.8 : Conception de la MRV monophasé 2/2.	13
Figure I.9 : Les différentes positions du rotor par rapport aux deux réluctances extrêmes de conductivité magnétique:(a) position d'opposition; (b) position de conjonction.	13
Figure I.10 : Circuit équivalent d'une phase de la MRV .	13
Figure I.11 : Variation du flux d'une phase en fonction de la position et du courant.	15
Figure I.12 : Énergie magnétique et co-énergie dans un système comportant une non-linéarité.	15
Figure I.13 : Zones où les angles de commutation varient: (a) Moteurs réluctance variable(MRV);(b) Génératrice à réluctance variable (GRV).	19
Figure I.14 : MRV est employée dans les trains à grande vitesse pour le système	

de climatisation de «l'air cycle ».	21
Figure I.15: MRV Véhicules électriques et hybrides.	22
Figure I.16: Moteur « in Wheel » pour véhicule électrique.	22
Figure I.17: Fauteuils roulants électriques	23
Figure I.18: Dispositif d'administration de médicaments par pression.	23
Figure I.19: Instrument de laboratoire	23
Figure I.20: Schéma GRV et convertisseur associé pour une application éolienne.	24

Chapitre II

Figure II.1: Spécification des dimensions du prototype MRV.	37
Figure II.2: La caractéristique d'aimantation B (H) .	37
Figure II.3: Explication de la disposition des éléments triangulaires le long de la ligne de glissement dans l'entrefer.	38
Figure II.4: La distribution du maillage sur l'ensemble de la machine.	38
Figure II.5: Intensité du courant électrique.	40
Figure II.6: Disposition des lignes de champ magnétique dans les deux positions extrêmes:(a) <i>alignée</i> ;(b) <i>Non alignée</i> .	41
Figure II.7: <i>La distribution de la densité de flux magnétique pour les deux positions alignées et non</i>	41
Figure II.8: Les vecteurs d'induction magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) <i>alignée</i> ;(b) <i>Non alignée</i> .	42
Figure II.10: Carte Aire des zones chaudes du champ magnétique pour les sites entrés en collision et non serrés dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:	

(a) alignée;(b) Non alignée.	42
Figure II.9: La distribution de la densité du champ magnétique pour les positions alignées et non alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a)alignée; (b) Non alignée.	42
Figure II.11: Le vecteur magnétique potentiel AZ dans les positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) alignée;(b) Non alignée.	43
Figure II.12 : La distribution de la densité de flux magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$:(a)alignée;(b) Non alignée.	44
Figure II.13: Les vecteurs d'induction magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) alignée;(b) Non alignée.	44
Figure II.14: La distribution de la densité du champ magnétique pour les positions alignées et non alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) alignée;(b) Non alignée.	45
Figure II.15: Carte des vecteurs d'intensité du champ magnétique pour les positions alignées et non alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) alignée;(b) Non alignée.	45
Figure II.16: Le vecteur magnétique potentiel AZ dans les positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) alignée;(b) non alignée.	46
Figure II.17: Caractéristique du flux (φ) en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs du courant de sortie pour le cas linéaire de perméabilité $\mu_r = 1351,42$.	48
Figure II.18: Forme d'inductance pour différentes positions dans le cas linéaire.	48
Figure II.19: Evolution du couple en fonction de l'angle de rotation et de la perméabilité pour le cas linéaire.	49

Figure II.20: Courbe du flux en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs du courant.	49
Figure II.21: Forme d'inductance pour différentes positions dans le cas non linéaire.	50
Figure II.22: Développement du couple en fonction de l'angle de rotation à différentes valeurs de courant dans des cas non linéaires..	50
Figure II.23: Étape de la conception et du processus de découpe du MRV.	52
Figure II.24: Étape d'assemblage des coulisses en fer pour moules en fer dans la partie mobile du stator.	52
Figure II.25: Étape du processus de bobinage de la machine.	53
Figure II.26: Banc d'essai expérimental réalisé localement en laboratoire.	53
Figure II.27: Comparaison des caractéristiques d'inductance expérimentales et calculées à l'aide d'ANSYS avec des valeurs variables des courants de phase et de rotor.	54

Chapitre III

Figure III.1: Technologies des éoliennes à axe vertical.	60
Figure III.2 : Éolienne à axe vertical.	61
Figure III.3: Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.	62
Figure III.4: Tube de courant d'air autour d'une éolienne.	64
Figure III.5: Coefficient de puissance en fonction de λ et β .	66
Figure III.6 : Schéma bloc du modèle de turbine.	68
Figure III.7: Caractéristique puissance d'une éolienne.	69
Figure III.8 : Variation du coefficient de puissance C_p par rapport au rapport de vitesse de pointe λ pour $\beta = 2$ [deg].	70

Figure III.9: Schéma fonctionnel de la maximisation de la puissance MPPT de l'éolienne.	71
Figure III.10: Diagramme d'un modèle non-linéaire pour une phase de la GRV.	73
Figure III.11: Modèle dynamique des trois phases du GRV 12/8.	74
Figure III.12 : États possibles de la tension d'alimentation pour une phase du GRV : (a) tension en position non alignée positive $+ V_{dc}$: deux interrupteurs sont fermés ; (b) Tension zéro « 0 » : un interrupteur est ouvert et l'autre est fermé ; (c) Tension négative $- V_{dc}$: deux interrupteurs sont fermés.	75
Figure III.13: Schéma synoptique du GRV 12/8 associé à un convertisseur en pont asymétrique.	76
Figure III.14 : Contrôle des systèmes de conversion de puissance (courant d'hystérésis) par méthodes dures et souple et hybrides:(a) une commutation dure;(b) une commutation souple;(c) un commutation hybride.	77
Figure III.15: Comparateur de courant avec hystérésis haut du formulaire.	78
Figure III.16: Courant de contrôle d'hystérésis proposé avec boucle de contrôle de couple.	79
Figure III.17 : Organigramme global de la technique d'association proposée.	79
Figure III.18: Commande Association et simulation de la commande HCC avec MPPT de la turbine et la GRV.	80
Figure III.19 : Vitesse du vent adoptée à des fins de simulation.	81
Figure III.20 : Vitesse mécanique GRV.	82
Figure III.21: Tension d'alimentation et courant électrique du générateur à	

réductance commuté :(a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.	82
Figure III.22 : Couple de référence optimal du MPPT et du générateur de réductance commuté: (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.	83
Figure III.23 : Rendement énergétique MPPT de l'éolienne associée au GRV: (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.	84
Figure III.24 : Courant contrôlé par le comparateur d'hystérésis pour les trois phases du GRV12/8 :(a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.	85
Figure III.25 : Puissances GRV 12/8 et turbine utilisant le contrôle HCC et MPPT : (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.	85

Chapitre IV

Figure IV.1 : Croquis de la méthode de l'algorithme de recherche gravitationnelle (GSA) pour un problème à deux variables.	89
Figure IV.2 : Organigrammes des techniques d'optimisation des algorithmes génétiques (GA).	90
Figure IV.3 : Nuée de particules de : (a) Oiseaux; (b) Poisons.	92
Figure IV.4 : Organigrammes pour les techniques d'optimisation d'essaim de particules (PSO).	94

Figure IV.5: Algorithme de suivi des points d'efficacité maximale (MEPT).	96
Figure IV.6: Développement de la puissance dans le GRV de la forme d'onde du courant, de l'inductance et de la tension via l'effet d'angle (θ_{on} , θ_{off}) : (a) Commutation facile ; (b) Commutation dure.	98
Figure IV.7: Données GRV pour différents modes d'alimentation.	101
Figure IV.8: Représentation graphique des performances de puissance des GRV, en fonction de θ_{on} et θ_{off} .	103
Figure IV.9: Exploration de la relation entre le rendement (%) du GRV, la puissance mécanique d'entrée et la puissance électrique de sortie via les angles de fonctionnement θ [deg].	104
Figure IV.10: Description de la technique MPPT proposée pour GRV. Où e_E est la différence entre deux valeurs de rendement de puissance électrique maximale et de référence ; et e_p est la différence entre deux valeurs maximales et de référence d'efficacité.	105
Figure IV.11: En utilisant la technique MPPT proposée pour GRV, la relation entre les angles de commutation θ_{on} et θ_{off} dans les conditions de puissance mécanique de référence, $P_m = -26\ 350$ W.	107
Figure IV.12: L'utilité de la technique MPPT pour obtenir la puissance électrique et l'efficacité maximales du GRV et la relation entre les angles de commutation θ_{on} et θ_{off} avec la modification de chaque valeur de la puissance mécanique de référence.	108
Figure IV.13: Relation entre les angles de commutation, θ_{on} et θ_{off} , et la puissance mécanique de référence pour obtenir à la fois l'efficacité et la puissance électrique maximale pour le GRV.	109
Figure IV.14: Comparaison de l'efficacité des méthodes MPPT, GSA, PSO,	

MEPT et des angles de fonctionnement standard dans GRV.	110
Figure A.1: L'interface graphique d'ANSYS	116
Figure A.2: Editeur session d'ANSYS	117
Figure B.1: Schéma bloc de la GRV instantané sous Matlab/Simulink	118

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Configuration MRV type.	9
---	---

Chapitre II

Tableau II.1 : Principales dimensions du prototype	36
---	----

Tableau II.2: Inductances mesurées et positions du rotor.	54
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Stratégie de commutation basée sur la position du rotor.	78
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant GSA.	92
--	----

Tableau IV.2: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant PSO.	93
--	----

Tableau IV.3: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant MEPT	97
--	----

Tableau IV.4 : Échantillons de données GRV collectés à $\theta_{on} = 22$ [deg] et à $\theta_{off} = 36$ [deg], dans différentes conditions.	102
---	-----

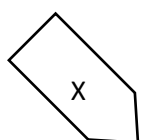
Tableau IV.5: Efficacité optimale pour différentes entrées de conditions de puissance mécanique à une vitesse de 125,6 (rad/s)[82].	104
--	-----

Tableau IV.6: L'efficacité optimale avec l'énergie électrique dans des conditions d'énergie mécanique. $P_m = -26\ 350$ W.	107
---	-----

Tableau IV.7: Angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}) obtenus à l'aide de la technique MPPT proposée pour différents niveaux de puissance mécanique d'entrée.	108
Tableau IV.8: Comparaison des méthodes MPPT, GSA, PSO, MEPT proposées et des angles de fonctionnement standard.	110
Tableau C.1: Paramètres de la génératrice à réluctance variable (GRV).	119
Tableau C.2: Paramètres de la turbine	119

Liste des Symboles

N	Nombre des pôles
N_s	Nombre de dents au niveau de l'armature statorique
N_r	Nombre de dents au niveau de l'armature rotorique
N_{ph}	Nombre de phases électriques
P	Nombre de paires de pôles
β_s	Arc polaire statorique
β_r	Arc polaire rotorique
τ_{sp}	Arc interpolaire statorique
τ_{rp}	Arc interpolaire rotorique
θ_m	Angle mécanique
θ_e	Angle électrique
θ_{on}	Angle de commutation de la mise sous tension [deg]
θ_{off}	Angle de commutation de la mise hors tension [deg]
θ	Position rotorique
i	Courant instantané [A]
V	Tension de la source [V]
L	Inductance [H]
R_s	la résistance de phase [ohm]
φ	Flux magnétique [Wb]
Φ	Flux magnétique total [Wb]
ω	Vitesse angulaire [rd/s]
W_{mag}	Energie magnétique
W_{mec}	Energie mécanique
W_{elec}	Energie électrique
W'_{mag}	Co-énergie
C_e	Couple électromagnétique [N.m]
\vec{A}	Potentiel vecteur magnétique



\vec{E}	Vecteur champ électrique
\vec{B}	Vecteur induction magnétique
\vec{H}	Vecteur Champ magnétique
\vec{D}	Vecteur induction électrique
\vec{n}	Vecteur normal à S
ρ	Densité volumique de charge électrique
\vec{J}_c	Vecteur densité du courant électrique de conduction
ϵ	Permittivité électrique [F/m]
μ	Perméabilité magnétique [H/m]
σ	Conductivité électrique
ν	Réductivité magnétique
\vec{u}	Vecteur vitesse des pièces conductrices susceptible de se déplacer
σ	Conductivité électrique
\vec{J}_{ex}	Densité du courant d'excitation (source)
S_1, S_2	Section d'air respectivement en amont et en aval dans un cylindre[m ²]
S	Surface balayée par l'éolienne [m ²]
Ω_t	La vitesse angulaire de la turbine [rad/s]
Ω_{mec}	La vitesse mécanique de la turbine [rad/s]
v	Vitesse moyenne du vent [m/s]
v_2	Vitesse d'aérodynamique [m/s]
v_1	Vitesse du vent [m/s]
R_t	Le rayon des pales de l'éolienne[mm]
V_t	Vitesse du vent [m/s]
G	Gain du multiplicateur
λ	Rapport de vitesse
β	Angle d'orientation des pales[°]
C_{em}	Couple aérodynamique de la turbine [Nm]
C_g	Le couple multiplicateur [Nm]

P_v	Puissance du vent[W]
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine[W]
J_{tot}	Inertie totale[kg.m ²]
F	Coefficient de frottement visqueux.
C_p	Coefficient de performance
C_{ref}	Couple électromagnétique référence de la turbine [Nm]
P_e	Puissance électrique
P_m	Puissance mécanique
Eff	Rendement [%]
W_m	Vitesse de reference [rad/s]

Liste des Abréviations

MRV	Machine à Réductance Variable
RV	Réductance Variable
GRV	Génitrice à Réductance Variable
MEF	Méthode des Eléments Finis
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ANSYS	Analysis of Systems
HCC	Hysteresis Current Control
ssGA	Steady State Genetic Algorithm
MEPT	Maximum Efficiency Point Tracking
MPPT	Maximum Power Point Tracking
ITC	Indirect Torque Control
PI	Régulateur Proportionnel-Intégral
MRVDS	Machine à Réductance Variable à Double Saillance
RSVX	Résistivité Electrique
MUX	Perméabilité Relative Magnétique
GA	Algorithmes Génétiques
ITR	Interference Torque Ripples
PSO	Particle Swarming Optimization

Introduction Générale

Introduction Générale

Ces dernières années, le monde a été témoin d'une demande accrue des énergies propres pour la protection de l'environnement contre la pollution et le réchauffement climatique, qui sont conséquence de la consommation élevée de combustibles fossiles et des émissions de dioxyde de carbone. Ce qui a poussé les organisations environnementales à lancer des appels pour l'exploitation des sources d'énergie renouvelables respectueuses de l'environnement [1], [2].

Les systèmes de production de l'énergie éolienne sont l'une des technologies de production de l'énergie naturelle les plus utilisées. Dans ces systèmes on utilise les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG), les générateurs à induction à double alimentation (DFIG) ainsi que les générateurs à induction. Malgré que le générateur à induction possède une faible efficacité par rapport aux autres types de machines, mais il est durable et nécessite moins d'entretien [3].

Avec le développement technologique et les percées industrielles, le générateur à réluctance variable (GRV) peut être présenté comme un candidat important pour les applications d'énergie éolienne [3], [5]. Il peut être utilisé dans les voitures électriques hybrides et les systèmes spatiaux, pour produire de l'électricité et la stocker dans des batteries [6], etc. Les générateurs à réluctance variable présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux machines synchrones et à induction classiques, notamment : vitesse et couple élevés, structure simple et robuste, faibles coûts de fabrication et de maintenance [7], [9], ainsi que leur capacité de résister aux changements des conditions climatique et environnementale telles que l'augmentation de la température et/ou leurs installations dans les régions montagneuses [1], [10]. En revanche, le générateur à réluctance variable présente certains inconvénients, tels que la présence d'une ondulation élevée du couple, des vitesses supérieures, et un niveau de bruit acoustique important en raison des caractéristiques physiques non linéaires du générateur GRV. Pour une meilleure analyse de tous ces problèmes, on a utilisé la méthode des éléments finis, qui est une technique efficace qui permet la résolution des problèmes électromagnétiques, particulièrement dans le cas des géométrie complexe et qui présentent de non-linéarité physique

élevée. Le logiciel utilisé dans la présente étude est ANSYS (Parametric Design Language (APDL)) [12], [13].

Cependant, pour valider les résultats de simulation obtenus sur les propriétés magnétiques du générateur RV 12/8, ceux-ci doivent être obligatoirement comparés aux résultats réels. Dans ce cadre et en raison de la non disponibilité de ce type de machine, on était amené à fabriquer un prototype et qu'on a mis en œuvre localement au niveau de notre laboratoire (LSPE). Ce prototype nous a permis d'explorer ses différentes propriétés et comportements en faisant une comparaison entre les propriétés magnétiques linéaires et non linéaires.

Il est à noter que pour mesurer les propriétés magnétiques linéaires et non linéaires de la position de spin et du courant, une nouvelle procédure expérimentale a été réalisée par notre équipe.

Actuellement, plusieurs stratégies de contrôle des systèmes d'énergie éolienne ont été proposées notamment pour l'amélioration, des performances des générateurs de véhicules récréatifs et de la vitesse des turbines. La méthode d'optimisation de la puissance de la turbine est utilisée pour suivre le point de puissance maximale du MPPT afin d'obtenir le couple optimal et d'améliorer la qualité des performances du générateur à RV en déterminant les paramètres de fonctionnement optimaux (angles de commutation).

La technique de combinaison du contrôle indirect du couple de GRV 12/8, par HCC avec le MPPT IPC et qui est basé sur le couple optimal, a été utilisée comme référence dans le contrôle du couple indirect (indirect torque control (ITC)) afin de donner les performances optimales du coefficient de puissance de l'éolienne.

Des simulations approfondies ont été réalisées simultanément en considérant la technique MPPT et différentes conditions physiques, telles que la vitesse du vent et les variations des angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}). Plusieurs travaux de recherches ont été publiés sur ce sujet, où différents algorithmes ont été appliqués dans le but d'améliorer l'efficacité du générateur en faisant alterner les angles θ_{on} et θ_{off} . L'optimisation par essaim de particules (PSO) et un algorithme de recherche gravitationnelle (GSA) [14], il permet de suivre le point d'efficacité maximale (MEPT) [15].

Dans notre étude, un nouvel algorithme a été proposé. Par la suite, une analyse comparative complète a été effectuée entre les techniques existantes et l'approche proposée pour évaluer son efficacité et sa contribution à l'amélioration de l'efficacité de la machine. En conséquence, l'algorithme proposé, qui peut maximiser l'efficacité de la machine grâce au

MPPT, devient une forte incitation pour les chercheurs à l'appliquer à d'autres machines et à développer un algorithme pour améliorer l'efficacité du GRV et maximiser la production d'énergie.

Le travail réalisé dans la présente thèse sera subdivisé en quatre parties comme suit :

En premier lieu, on donnera une introduction générale sur le thème d'étude, poursuivie par le chapitre un qui sera principalement dédié à la description générale des MRV en se basant sur la littérature existante. On examinera également les différentes structures et topologies du MRV, ainsi que le principe de fonctionnement et le mécanisme de sélection des angles de commutation en fonction de la position du rotor. Cette partie est suivie de la représentation de la conversion d'énergie pour les types de ces machines avec la mise en évidence de leurs avantages et inconvénients et des applications importantes des MRV.

Le deuxième chapitre, sera consacré à l'analyse de la méthode des éléments finis qui est la technique la plus appropriée pour les problèmes non linéaires. Notre étude s'appuiera sur le couplage de la méthode des éléments finis avec les circuits électriques adoptée dans le programme ANSYS pour la machine à impédance variable. Avec la prise en compte de tous les comportements dans les états linéaires et non linéaires présents dans le GRV, et que le circuit magnétique soit saturé et l'entrefer soit modifié. Nous définirons les mailles de la courbe de flux double $\phi(\theta, i)$, l'inductance $L(\theta, i)$ et le couple constant $C_e(\theta, i)$. Le modèle magnétique pour les cas linéaires et non linéaires sera analysé pour différentes positions du rotor et différentes valeurs de courant du GRV afin de trouver les propriétés électromagnétiques statiques, ainsi que le modèle magnétique dynamique pour étudier le comportement dynamique, notamment en ce qui concerne les ondulations de couple.

Ainsi, on décrira le prototype de machine GRV de type 12/8 réalisé, et qui va nous permettre d'effectuer des essais expérimentaux nécessaires au niveau de laboratoire (LSPE).

A partir du prototype réalisé, Nous on déterminera expérimentalement les propriétés magnétiques du GRV. Les propriétés de l'inductance qui seront obtenues expérimentalement seront comparées avec celles obtenues par simulation en appliquant le logiciel ANSYS.

Dans le troisième chapitre, on va présenter la modélisation et la simulation de la turbine éolienne avec une génératrice à réluctance variable. Ensuite, on développera la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) de la turbine qui sera associée à la commande HCC (Hysteresis Current Control) de la GRV HCC en présence de la boucle de contrôle du couple, après, on vérifiera la possibilité d'améliorer la qualité de performance du moteur à RV en

examinant l'importance des variations des paramètres de contrôle (Les angles de commutation). Cette partie est une étude préliminaire qui ouvrera des perspectives pour le dernier chapitre.

Le quatrième chapitre, sera consacré à la présentation de notre contribution à l'amélioration des techniques de contrôle de la GRV en utilisant des algorithmes intelligents cela, en s'inspirant des phénomènes observés dans la nature. En deuxième lieu dans ce chapitre, on présentera les techniques et les algorithmes majeurs proposés récemment par la communauté scientifique pour les machines à réluctance variable. Pour comparer ces algorithmes, on utilisera la technique de l'essaim de particules (PSO), l'algorithme génétique statique (ssGA) et l'algorithme de suivi des points d'efficacité maximale (MEPT). Ces méta-algorithmes se sont avérés efficaces pour améliorer l'efficacité du GRV. Toutefois, pour vérifier le véritable potentiel et la supériorité de ces techniques, il est nécessaire de mener un processus d'exploration de données, en tenant compte des différentes situations et conditions du GRV.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et on donnera les perspectives à envisager comme suite à ce travail de recherche.

Chapitre I

Etude générale sur les

Machines à Réductance

Variable (MRV)

I.1 Introduction

La machine à réductance variable est une des premières solutions techniques dans le domaine de l'alimentation électrique et de la conversion électromécanique des machines tournantes. Elle repose exclusivement sur la variation de la réductance magnétique. Bien que ce principe ne puisse rivaliser avec les machines qui utilisent la force de Lorentz pour produire un couple, le MRV a gagné en popularité et en intérêt parmi les chercheurs. Il est considéré comme un candidat sérieux pour la production et les applications d'énergie propre grâce à ses nombreux avantages, tels qu'une structure solide capable de résister à des températures et à des couples élevés. Cependant, il présente certains inconvénients, notamment une ondulation de couple élevée et un niveau de bruit acoustique élevé, dus aux propriétés physiques non linéaires du rotor et à l'absence simultanée d'enroulements ou d'aimants dans celui-ci. Les machines à fréquence variable ont une conception très robuste. Grâce aux avantages mentionnés et aux récentes avancées technologiques, le MRV a attiré l'attention de nombreux chercheurs qui cherchent à réduire ces inconvénients pour une exploitation plus large [14], [15].

Il est clair qu'entreprendre une telle recherche nécessite une compréhension approfondie et une discussion sur le principe de fonctionnement des machines à réductance variable, qui sont principalement connues pour leur utilisation en tant que moteurs. Leur réversibilité est souvent peu mentionnée, bien qu'elles puissent également fonctionner en tant que génératrices, notamment dans des environnements difficiles, comme les générateurs à réductance variable (GRV) utilisés dans les éoliennes. Leur absence de balais constitue un avantage considérable, étant donné la difficulté de les remplacer régulièrement à des hauteurs importantes, nécessitant une main-d'œuvre qualifiée.

Dans ce contexte, ce chapitre présentera une étude générale de la machine à réductance variable (MRV) en abordant sa structure, son principe de fonctionnement, ses applications et ses différents types. L'objectif est de fournir une vue d'ensemble sur le mécanisme de cette machine, ses régimes de fonctionnement et les topologies de convertisseurs statiques adaptés à son alimentation et à sa commande.

I.2 Types de configurations des MRV

I.2.1 MRV Pures

Ce MRV est principalement utilisé dans l'industrie pour les systèmes de démarrage à alternateur dans les véhicules hybrides ou les avions, mais il est également utilisé dans les systèmes de production d'énergie aérospatiaux [16].

Une structure MRV "pure" se compose d'un stator et d'un rotor, qui ont tous deux des pôles saillants, le stator contenant les enroulements actifs qui génèrent le champ électromagnétique principal, et le rotor négatif (sans bobines ni aimants) contenant un matériau ferromagnétique. Une autre caractéristique est que le champ "pulse" plutôt qu'il ne tourne. Ce type de moteur à réluctance est alimenté par des courants rectangulaires unidirectionnels, ce qui contribue à leur unicité. Les structures à impédance pure sont classées en plusieurs types [17], [18], [19] :

La figure (I.1) représente une structure à dents grossières avec deux dents par phase.

La figure (I.2) représente une structure à dents grossières avec plus de deux dents par phase.

Structures à plusieurs dents de stator excitées par un bobinage global en même temps.



Figure I.1: MRV pur à grosses dents.



Figure I.2: MRV pur à grosses dents à plusieurs dents par phase.

I.2.2 MRV à effet vernier

Les machines vernier sont des machines électriques qui ont une structure similaire aux machines à RV à réductance pure, avec une différence d'un grand nombre de dents et sont entraînées par une tension alternative sinusoïdale [20], [23]. Les dents du stator et du rotor sont réparties symétriquement avec les parties saillantes, comme le montre la figure (I.3). Cette configuration permet d'obtenir une perméabilité variable sous une forme sinusoïdale. En fait, vous résumez très bien les caractéristiques des machines vernier à grandes dents.

Il existe également des machines vernier à grandes dents où chaque arbre fixe forme la même dent. Leurs performances en termes de couple et de vitesse sont comparables à celles des synchrones à aimants permanents et machines asynchrones de taille similaire.

Nous allons présenter une classification des différentes structures des MRV de type vernier. Ces structures sont divisées en deux groupes en fonction de la configuration de l'entrefer, et elles se présentent sous deux formes : simples ou doubles dents. De plus, ces structures peuvent être équipées d'un bobinage d'excitation. Dans ce cas, le bobinage d'excitation peut être logé soit au stator, en même temps que le bobinage de l'induit [24], soit seul au rotor [25].

Dans le cas où la machine est excitée, c'est-à-dire qu'elle possède un bobinage d'excitation, le courant d'excitation peut être de nature alternative ou continue.



Figure I.3: MRV excitée à effet vernier.

I.2.3 MRV hybrides

Les machines à réductance variable (MRV) hybrides possèdent une structure similaire aux deux types précédents. Leur particularité réside uniquement dans l'ajout d'aimants permanents pour améliorer leurs performances. En intégrant des aimants permanents dans les structures à double saillance, on peut compenser un entrefer trop volumineux.

Les machines à aimants à double saillance sont classées en deux types, basés sur les machines à réductance variable à double saillance (MRVDS) [19], [22], [23].

Le premier type utilise des aimants placés sur le rotor [26], ce qui fait que la machine ressemble aux machines synchrones à aimants enterrés (aimants permanents internes). Le deuxième type utilise des aimants placés dans le stator [27], ce qui permet d'obtenir une machine à pôles saillants multiples et à aimant permanent statorique (DSPMM) appelée « MRV polarisant » (voir figure I.4).

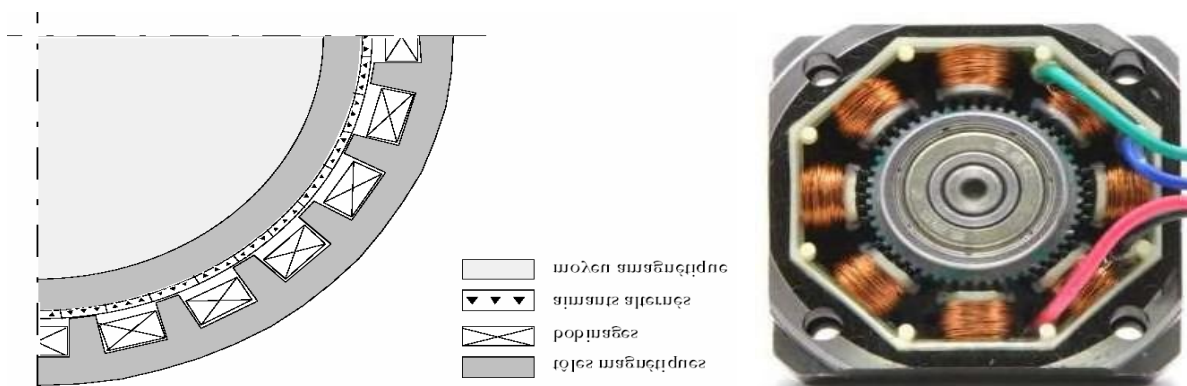


Figure I.4: MRV hybride.

I.3 Concepts de base de la MRV

La figure (I.5) décrit la configuration MRV typique pour différentes positions de rotor par rapport aux deux impédances extrêmes. La structure 8/6 est utilisée dans l'exemple d'une machine triphasée ($N_{ph} = 4$), qui comporte six dents fixes $N_s = 8$ et quatre dents rotatives $N_r = 6$. Les bobinages sont typiquement placés autour de chaque arbre fixe; Cet agencement d'enroulement est destiné à permettre un écoulement efficace du flux le long du chemin le plus court. Comme les bobines sont complètement opposées et connectées en parallèle ou en série, chaque phase de la machine 8/6 a deux pôles magnétiques pour chaque phase, soit une paire de pôles ($h = 1$). Par exemple, la phase A est constituée des bobines sur la dent A et A'. Lorsque cette phase est excitée, la machine se déplace en raison de la tendance du rotor à s'aligner sur l'axe magnétique de la phase du stator (Figure I.5) [28,29].

L'angle entre les pôles du rotor et du stator est désigné par les symboles s et r . Les arcs polaires du rotor et du stator τ_{sp} et τ_{rp} représentent l'angle entre deux dents adjacentes ou dents fixes, comme illustré à la (Figure I.5), et peuvent être calculés comme suit :

$$\tau_{sp} = \frac{360^\circ \text{Méc}}{N_s} \quad (\text{I. 1})$$

$$\tau_{rp} = \frac{360^\circ \text{Méc}}{N_r} \quad (\text{I. 2})$$

I.3.1 Explication de l'angle électrique

La position du rotor présente une corrélation directe avec l'angle mécanique θ_m . Parallèlement, l'angle électrique est établi en fonction de la périodicité de la machine. À titre d'exemple, dans la figure (I.5), Le rotor effectue un tour tous les 90 degrés d'angle mécanique (τ_{rp}). Cela correspond donc à une période électrique angulaire de 360[deg]. La relation entre l'angle mécanique et l'angle électrique est formulée de la manière suivante [26]:

$$\theta_e = N_r \theta_m \quad (\text{I. 3})$$

I.3.2 Diverses configurations MRV

La connexion entre le nombre de dents du stator N_s , N_{ph} est le nombre de phases électriques et le nombre de paires de pôles magnétiques p , les machines à réductance variable à double saillance (MRV) peut être formulée de la manière suivante [27]:

$$N_s = 2pN_{ph} \tag{I. 4}$$

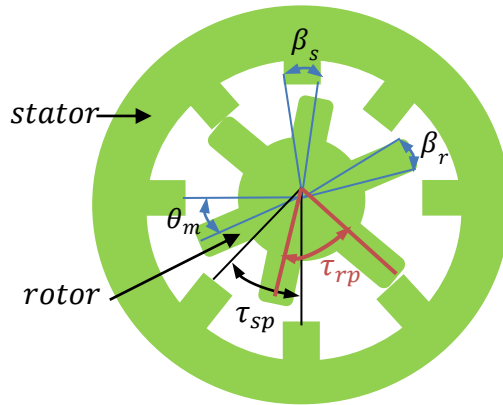


Figure I.5: configuration connue sous le nom de structure MRV 8/6.

En observant la période de variation de la réductance vue d'une phase, on constate qu'elle correspond au passage de la conjonction d'une dent à la conjonction de la dent suivante [19], [22].

Afin d'éviter les situations d'équilibre où la machine à réductance variable (MRV) ne peut pas générer de couple, il est impératif que le nombre de dents du rotor N_r diffère de N_s , le nombre de dents du stator. En règle générale, N_r est calculé à l'aide des équations suivantes:

$$N_r = 2p(N_{ph} - 1), \quad N_r < N_s, \quad \text{pour } N_{ph} > 1 \tag{I. 5}$$

$$N_r = 2p(N_{ph} + 1), \quad N_r > N_s, \quad \text{pour } N_{ph} > 1 \tag{I. 6}$$

$$N_r = 2p, \quad \text{pour } N_{ph} = 1 \tag{I. 7}$$

Le tableau (I.1) présente une référence des configurations de la machine conformément aux équations (I.5), (I.6) et (I.7).

Tableau I.1: Configuration MRV type.

$N_{ph}=1$			$N_{ph}=2$			$N_{ph}=3$			$N_{ph}=4$		
N_s	N_r	P	N_s	N_r	P	N_s	N_r	P	N_s	N_r	P
2	2	1	2	4	1	4	6	1	6	8	1
4	4	2	4	8	2	8	12	2	12	16	2
						12	18	3			

La figure (I.6) illustre différentes configurations de structures à double saillance. La première configuration présente 2 pôles au niveau du stator et 2 pôles au niveau du rotor. Dans la deuxième configuration, on observe 6 pôles au stator et 4 pôles au rotor, tandis que la troisième configuration présente 6 pôles au rotor et 8 pôles au stator [26].

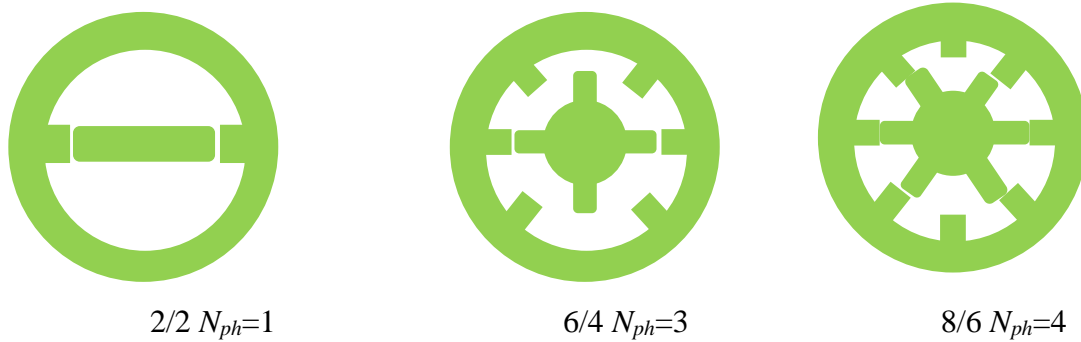


Figure I.6: Différents types de modèles de MRV.

Le choix du nombre de dents et de phases doit être fait en considérant l'application envisagée ainsi que les performances recherchées. Plusieurs critères peuvent influencer la sélection d'une topologie particulière, tels que:

- La caractéristique de fonctionnement, notamment la valeur du couple et sa qualité (niveaux d'ondulation et de bruit), les exigences mécaniques au démarrage et les performances énergétiques lors du freinage régénératif.
- Le type d'alimentation électrique (monophasé, triphasé, etc.) ainsi que les caractéristiques de l'onduleur utilisé.
- Les trajectoires du flux magnétique et les pertes dues au matériau ferromagnétique.

Une particularité à souligner est que ce type de moteur ne fonctionne pas en champ tournant, mais plutôt en champ "pulsé". Les moteurs à réductance de cette catégorie fonctionnent efficacement avec des courants unidirectionnels de forme rectangulaire, ce qui définit leur mode d'alimentation de manière spécifique.

Tandis que les dimensions des dents respectent également les contraintes géométriques liées à la zone de production effective du couple.

$$\begin{cases} \min(\beta_s, \beta_r) > \frac{2\pi}{qN_r} \\ \beta_s \leq \frac{2\pi}{N_r} - \beta_r \end{cases} \quad (\text{I. 8})$$

(I. 9)

L'étendue des écarts possibles entre les deux angles doit être complétée par la relation suivante:

$$\beta_{max} - \beta_{min} = \frac{2\pi}{N_r} \left(1 - \frac{2}{q}\right) \quad (\text{I. 10})$$

Ces restrictions concernant les dimensions des dents sont illustrées dans la figure (I.7). Ainsi, la limite inférieure du triangle des solutions $(\beta_{smin} ; \beta_{rmin})$ est déterminée par le pas rotorique divisé par le nombre de phases q . Le point $(\beta_{smin} ; \beta_{rmax})$ correspond à une configuration de machine avec des encoches de taille équivalente au pas polaire, tandis que le point $(\beta_{smax} ; \beta_{rmin})$ concerne une machine sans encoches.

Il est préférable pendant la période d'induction constante d'être en position alignée en gardant les valeurs d'angle d'arc égales. En revanche, du côté rotorique, il est préférable de maintenir la valeur d'angle d'arc de la dent aussi petite que possible (tout en prenant en compte les limitations précédemment évoquées). Cette approche réduit les effets des bords des dents, et donc une diminution de la valeur de l'inductance dans la position mal alignée du rotor [26].

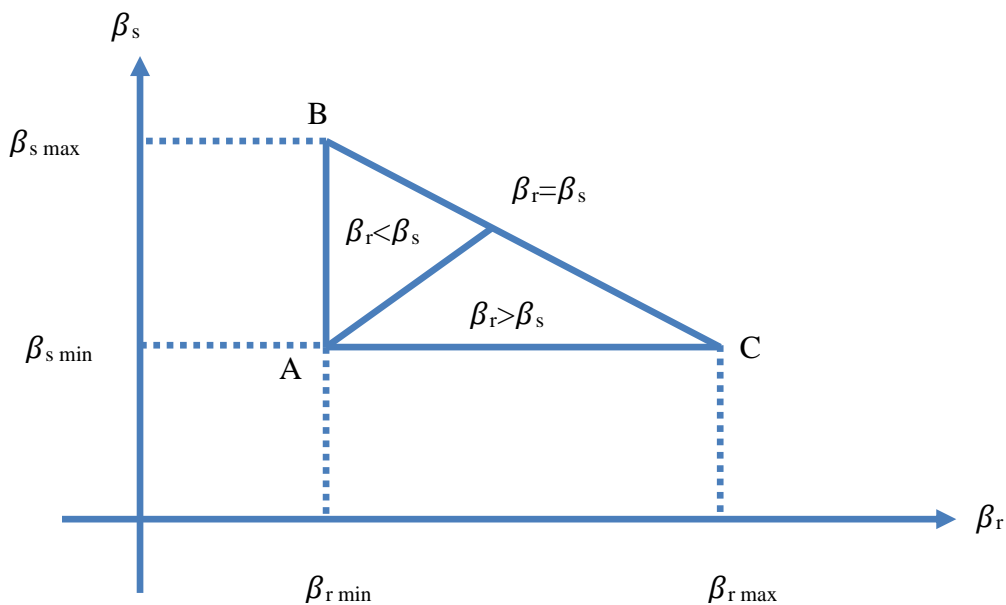


Figure I.7: Plage de valeurs possible des supports de dents de stator et de rotor.

I.4 Principe de fonctionnement

Les principes de fonctionnement de base de la machine à réductance variable (MRV) seront discutés en se basant sur une MRV monophasée l'utilisation d'un modèle monophasé

est suffisante car elle permet de négliger le couplage mutuel entre phases électriques dans les machines multi phases. Par conséquent, des modèles de machines à un étage peuvent être développés pour appliquer des modèles généraux à des concepts à plusieurs étages.

La machine à réductance variable (MRV) fonctionne comme un moteur à réductance variable (MRV) efficace ou un générateur à réductance variable (GRV). Les pôles du stator sont formés de plusieurs enroulements N_s traversés par un courant i , créant ainsi un électroaimant, tandis que les dents du rotor représentent la structure ferromagnétique. En pratique, cette attirance conduit à une réticence à modifier le circuit magnétique de la machine. Ce circuit magnétique est constitué de la structure, des dents du stator et du rotor, ainsi que de l'entrefer.

Deux emplacements de référence [21] ont été déterminés à clarifier le fonctionnement du système de formation RV de la figure (I.8):

Lorsque le système se trouve dans un état intermédiaire entre l'opposition et le couplage, et qu'un courant i est appliqué à la bobine d'excitation, le rotor va tourner autour d'un axe fixe. Supposons que m représente l'angle formé entre l'axe longitudinal du rotor et l'axe entre les pôles. Le système évolue pour afficher la fréquence la plus basse (ou le flux maximum), ce qui entraîne le déplacement du rotor vers une position de couplage constante. Ainsi, on peut distinguer deux sites distincts [30], [31].

Ainsi, la partie magnétique tournante commence à se déplacer depuis la position d'opposition(non-alignée) ($\theta_m = 0$), comme illustré dans la figure (I.9.a). Pour atteindre la position de conjonction(alignée). ($\theta_m = \pi/2$), représentée dans la figure (I.9.b), il est nécessaire de faire fonctionner l'électro-aimant du stator. Cela peut être accompli en suivant la règle du débit maximum ou celle de la fréquence minimale.

Ainsi, en fonction de la position du rotor par rapport au stator, on peut distinguer ces deux sites distincts qui influencent le flux et le comportement de la machine.

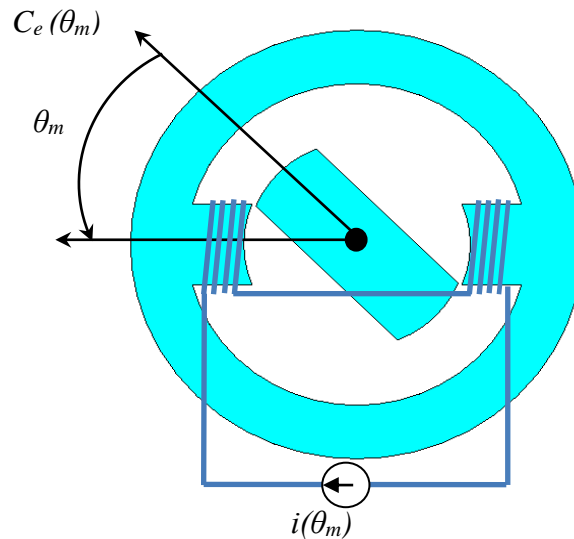


Figure I.8: Conception de la MRV monophasé 2/2.

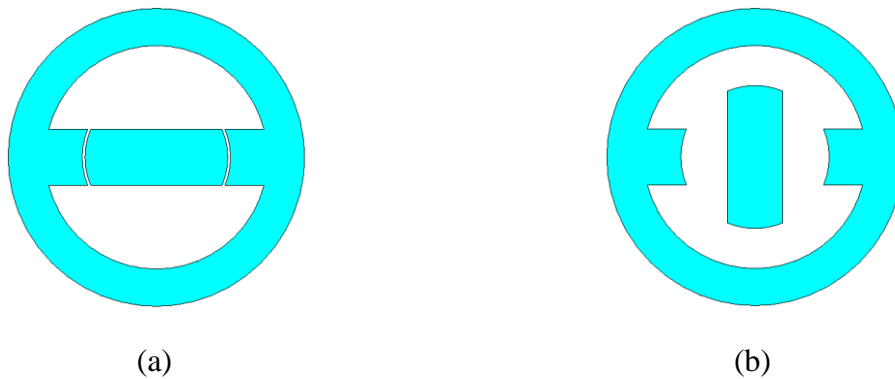


Figure I.9: Les différentes positions du rotor par rapport aux deux réductances extrêmes de conductivité magnétique: (a) Position d'opposition; (b) Position de conjonction.

I.4.1 Analyse de circuits électriques

Le modèle analytique de la machine à réductance variable (MRV), représenté dans la figure (I.10), peut être décrit par son circuit équivalent. Ce circuit équivalent comprend la tension de phase V , la résistance de phase R_s , l'inductance de phase L (en fonction de la position du rotor et du courant de phase), et la force de fermeture. Ce modèle ne prend pas en compte l'inductance mutuelle de flux et l'interphase statorique [32].

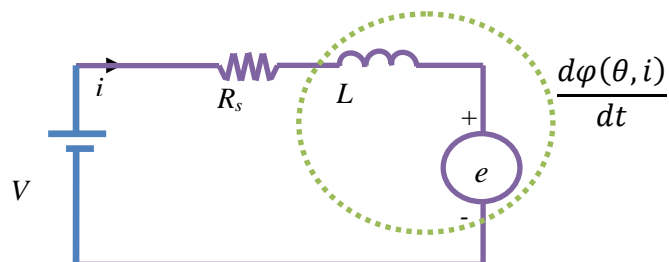


Figure I.10: Circuit équivalent d'une phase de la MRV .

La tension d'alimentation électrique des enroulements du stator d'un MRV, appliquée à une phase, peut être exprimée comme la somme de la tension de résistance et de la dérivée totale du flux [33], [34]. Cette relation peut être formulée de la manière suivante :

$$V = R_s i + \frac{d\varphi(\theta, i)}{dt} \quad (\text{I. 11})$$

L'inductance et le flux total est défini par:

$$L(\theta, i) = \frac{\varphi(\theta, i)}{i} \quad (\text{I. 12})$$

Par les équations (I.11) et (I.12), il vient

$$V = R_s i + \frac{d(L(\theta, i)i)}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (\text{I. 13})$$

$$V = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega i \quad (\text{I. 14})$$

Dans cette expression, les trois termes du côté droit de l'équation représentent, dans l'ordre, la perte de tension due à la résistance, la perte de tension due à l'inductance et la force électromotrice (f.é.m). Cette équation est comparable à l'équation de tension dans un circuit magnétiquement couplé avec une excitation en série.

Ainsi, en se basant sur l'équation (1.14), l'expression de la force électromotrice (f.é.m) est formulée comme suit :

$$e = \omega i \frac{dL}{d\theta} \quad (\text{I. 15})$$

I.4.2 Conversion d'énergie et calcul de couple

Afin de déterminer l'équation de couple de la machine à réductance variable (MRV), nous examinons une configuration élémentaire de MRV telle qu'illustrée dans la figure (I.8). Cette machine fonctionne en mode monophasé, ce qui signifie qu'elle possède un seul enroulement sur le stator. L'enroulement excité est enroulé autour du stator, tandis que le rotor est libre de tourner. Dans ce système électromagnétique, une variation incrémentielle de l'énergie appliquée entraîne une variation de l'énergie magnétique stockée w_{mag} et de l'énergie mécanique utilisée pour le mouvement w_{mec} . La relation entre ces trois formes d'énergie est décrite dans les références [23], [26].

Nous définissons les concepts de puissance et d'électricité à partir de la figure (I.10), où la variation périodique du flux $\varphi(\theta, i)$ est représentée en fonction de la position θ du rotor et du courant d'alimentation i . Une forme idéalisée de transformation de phase est présentée dans les figures (I.11) et (I.12). L'influence de la saturation se manifeste lors de l'évolution du flux de phase, particulièrement lorsque la position est alignée.

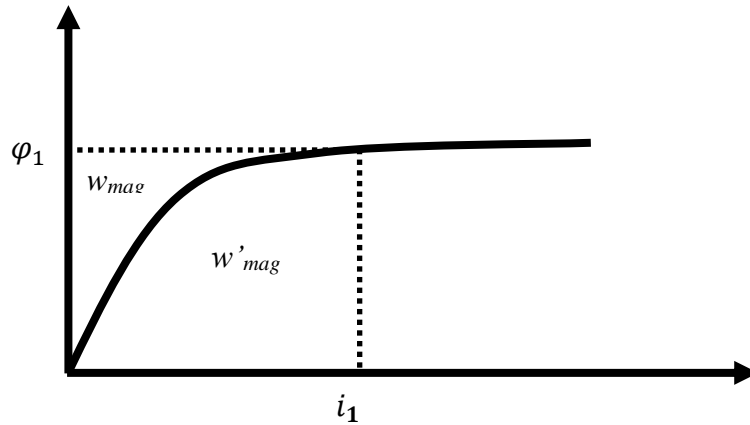


Figure I.11: Variation du flux d'une phase en fonction de la position et du courant.

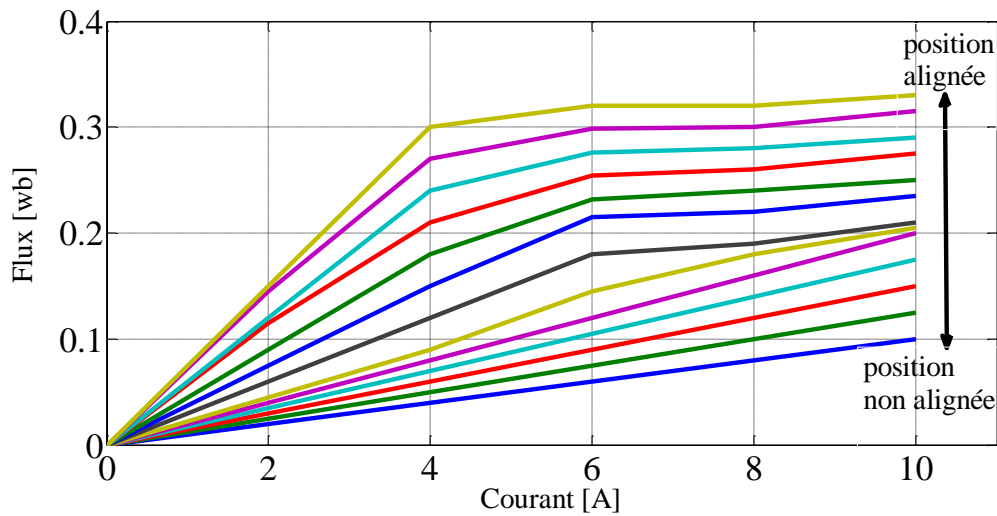


Figure I.12: Énergie magnétique et co-énergie dans un système comportant une non-linéarité.

$$dw_{ele} = dw_{mag} + dw_{méc} \quad (I. 16)$$

$$dw'_{mag} = d(i, \varphi) + dw_{mag} \quad (I. 17)$$

Les notions d'énergie et de co-énergie magnétique sont importantes pour décrire un système électromagnétique à q phases (q circuits électriques) avec un degré de liberté mécanique supplémentaire, tel que l'angle rotorique θ par exemple [35].

L'énergie magnétique représente l'énergie stockée dans le champ magnétique, et elle est influencée non seulement par les flux totalisés dans les circuits électriques, mais aussi par la position de la pièce mobile.

$$w_{em} = \int_0^{\varphi_0} i. d\varphi \quad (I. 18)$$

La co-énergie w'_{em} , est une grandeur dénuée de tout sens physique elle est définie comme la quantité qui complète l'énergie stockée dans un circuit magnétique.

$$w'_{em} = \int_0^{i_0} \varphi. di \quad (I. 19)$$

La variation de la co-énergie w'_{em} est influencée à la fois par le courant i et la position θ du rotor.

D'autre part, le couple électromagnétique basé sur l'énergie mécanique du changement de position du rotor est défini comme suit :

$$dw_{méc} = C_e d\theta \quad (I. 20)$$

Remplaçant (I.16) dans (I.20) on aura :

$$C_e d\theta = dw_{ele} - dw_{mag} \quad (I. 21)$$

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour calculer le couple instantané de n'importe quelle machine électromagnétique, mais la méthode généralement préférée est celle des travaux virtuels, également connue sous le nom de méthode de variation des énergies. Cette approche se base sur le calcul de l'énergie ou de la co-énergie magnétique (Consultez les équations (I.18) et (I.19)). Ensuite, le couple instantané peut être calculé en dérivant l'une ou l'autre des relations suivantes, selon votre préférence :

$$C_{ej}(\theta) = -\frac{\partial w_{em}(\varphi, i)}{\partial \theta_m} = -Nr. \frac{\partial w_{em}}{\partial \theta} \quad \text{à } \varphi = C^{te} \quad (\text{Flux constant}) \quad (I. 22)$$

$$C_{ej}(\theta) = \frac{\partial W'_{em}(i,\theta)}{\partial \theta_m} = Nr \cdot \frac{\partial W'_{em}}{\partial \theta} \quad \text{à } i=C^{te} \text{ (Courant constant)} \quad (1.23)$$

Quand le système opère dans une région où le circuit magnétique n'est pas saturé ($\mu=c^{te}$), les équations (I.12), (I.22) et (I.23) nous donnent les résultats suivants :

$$dw'_{mag} = dw_{mag} = \frac{1}{2} i \cdot \varphi(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta_m} \quad (1.24)$$

$$C_e(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1.25)$$

En se référant à l'expression (1.25), les caractéristiques suivantes définissent un système réductance [23]:

- Le couple est proportionnel au carré du courant, ce qui signifie que le couple du moteur ne dépend pas de la polarité du courant de phase. Contrairement aux machines à courant alternatif, cet avantage permet d'utiliser un seul interrupteur par phase lors de l'utilisation du convertisseur.
- En raison de la proportionnalité du couple au carré du courant, la MRV possède un bon couple de démarrage, similaire à celui d'un moteur série à courant continu.
- Généralement, la machine à réductance variable (MRV) opère dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse. Il peut fonctionner comme un moteur avec une rampe d'inductance positive ($\frac{dL(\theta)}{d\theta} > 0$; $C_e(i, \theta) > 0$), ou comme un générateur avec une rampe d'inductance négative ($\frac{dL(\theta)}{d\theta} < 0$; $C_e(i, \theta) < 0$). Par conséquent, le sens de rotation peut être inversé en modifiant la séquence d'excitation.
- La constante du couple est généralement établie en se basant sur la pente de la caractéristique d'inductance en fonction de la position du rotor. Cependant, il est important de noter que l'inductance dépend à la fois du courant et de la position du rotor, introduisant ainsi une non-linéarité dans la caractéristique. Cette non-linéarité complique le développement d'un circuit équivalent simple pour la MRV.
- Le contrôle du couple et de la vitesse s'effectue à l'aide d'un capteur de position.
- L'ouverture ou le court-circuitage d'une phase a peu d'influence sur les autres phases.

I.4.3 Interrelations entre l'inductance et la position du rotor

La forme idéalisée de l'inductance (figure I.13), est liée à la position rotorique θ ou encore elle est liée aux β_s et β_r respectivement angles de denture statoriques et rotoriques.

Les différents angles sont déterminés comme suit:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{(\beta_s + \beta_r)}{2} \quad (\text{I. 26})$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (\text{I. 27})$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (\text{I. 28})$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s = \theta_2 + \beta_r \quad (\text{I. 29})$$

$$\theta_5 = \theta_4 + \theta_1 = \frac{2\pi}{N_r} \quad (\text{I. 30})$$

Dans les relations précédentes, β_s et β_r sont respectivement les angles de denture statoriques et rotoriques, N_r est le nombre de dents rotorique.

- ($0 - \theta_1$) et ($\theta_4 - \theta_5$) Pendant cette période, les cavités du rotor entrent en collision avec les dents du stator (le stator et les dents du rotor sont en opposition), l'inductance L atteint sa valeur fixe minimale, notée L_{min} . Pendant ces périodes, aucun couple ne peut être produit entre le rotor et le stator.
- ($\theta_1 - \theta_2$) Lorsque nous entrons dans la partie croissante de l'inductance, les dents du rotor commencent à s'aligner avec celles du stator, ce qui fait que l'inductance augmente de manière linéaire. Lorsque le rotor atteint la position θ_2 (position de conjonction), l'inductance L atteint sa valeur maximale, notée L_{max} . À ce stade, le couple produit est positif, ce qui signifie qu'il y a production d'un couple de rotation entre le rotor et le stator.
- ($\theta_2 - \theta_3$) C'est la période durant laquelle la surface en regard des dents reste maximale (les dents rotorique restent en conjonction avec les dents statorique), Alors que la zone d'intersection reste constante, il n'y a pas de changement dans l'inductance, ce qui signifie qu'aucun couple n'est produit même en présence d'un courant. Cette période de transition peut être utilisée en annulant le courant avant le début de la pente négative de l'inductance afin d'éviter la génération d'un couple négatif.
- ($\theta_3 - \theta_4$) La période de désalignement, les dents du rotor s'éloignent progressivement des dents du stator jusqu'à être en opposition, ce qui entraîne une diminution linéaire de l'inductance L de sa valeur maximale L_{max} à sa valeur minimale L_{min} . Si la phase de la machine est alimentée pendant cette période, un couple négatif sera produit, c'est-à-dire que la machine agira comme un frein ou un générateur de force opposée à la rotation.

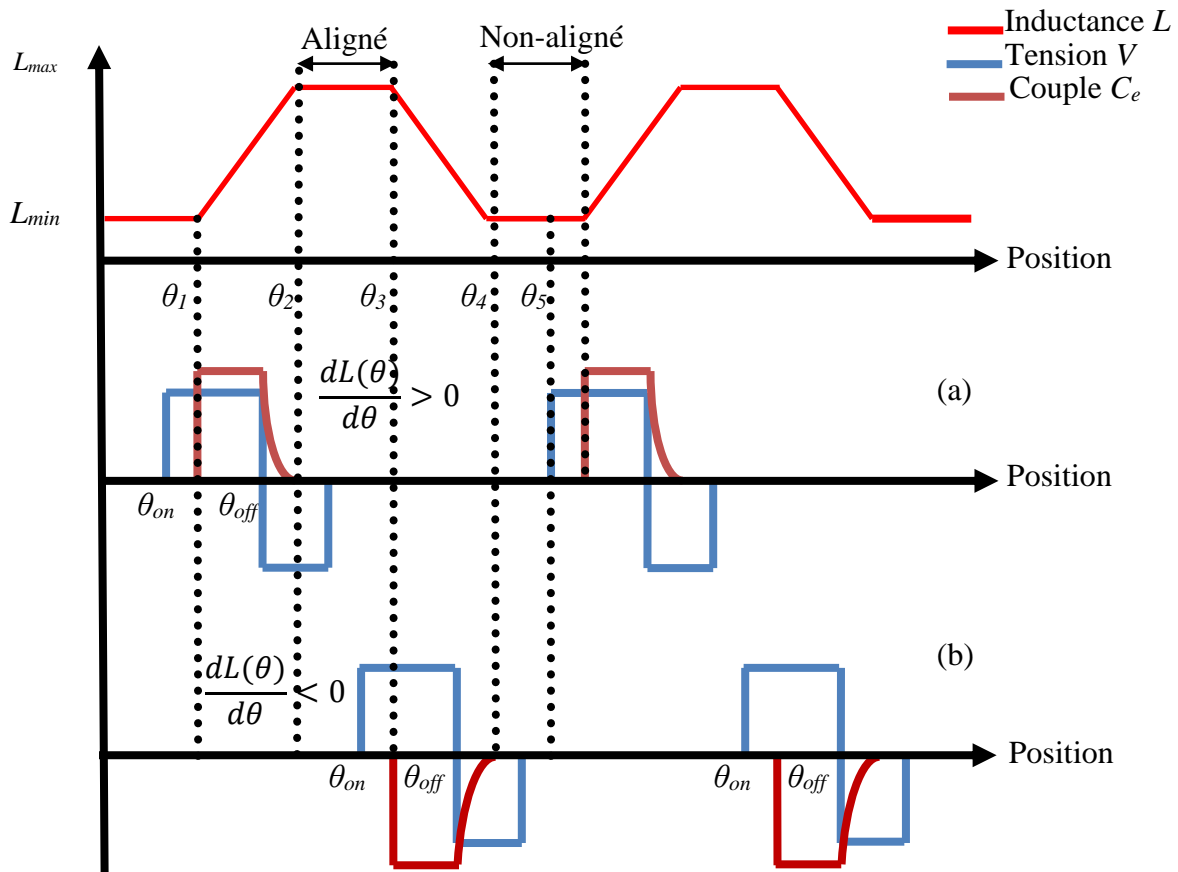


Figure I.13: Zones où les angles de commutation varient: (a) Moteurs réductance variable (MRV); (b) Génératrice à réductance variable (GRV).

I.5 Avantages et inconvénients du MRV

Les références [36], [37], [38], [39] donnent des détails sur les caractéristiques des MRV " Pures". Voici un résumé succinct de ces caractéristiques :

- La structure des MRV est simple et robuste, ne comportant ni bobinages ni aimants permanents sur le rotor. Du point de vue mécanique, elles ont un moment d'inertie réduit, environ la moitié de celui d'une machine asynchrone de même taille de rotor externe. Cela leur permet d'atteindre une accélération élevée. Sur le plan thermique, les pertes dans le rotor sont faibles, ce qui simplifie le système de refroidissement.
- Les MRV présentent d'excellentes performances, même dans des environnements extrêmes. Elles sont particulièrement adaptées aux applications nécessitant une résistance élevée à la chaleur et des vitesses élevées
- Comparé à d'autres types de machines électriques, les MRV ont un coût de fabrication et de maintenance réduit.

- Les MRV sont capables de fonctionner dans une large plage de puissance constante. Leur efficacité peut être maintenue au-delà de la vitesse de base, Cela les rend appropriées pour des utilisations telles que les véhicules électriques ou hybrides.
- Chaque phase de la MRV est alimentée indépendamment des autres, ce qui confère à la machine une fiabilité élevée. En cas de défaillance d'une phase, la machine continue de fonctionner avec une légère influence sur les autres phases.
- La MRV bénéficie d'une durée de vie exceptionnellement longue.
- Étant donné qu'il n'existe pas d'aimants permanents fabriqués à partir de terres rares, ces moteurs sont disponibles à un prix abordable.

Voici une liste des inconvénients couramment associés au moteur à réductance variable :

- Les ondulations de couple génèrent du bruit et des vibrations plus forts que les machines asynchrones. Cependant, des solutions ont été développées pour pallier ces problèmes, à la fois par des méthodes de compensation active telles que celles décrites dans les références [40, [41], et par des méthodes passives telles que celles décrites dans les références [36], [39]. Ces méthodes réduisent efficacement les vibrations et le bruit acoustique, ce qui améliore les performances globales des moteurs à aimants permanents.
- Un capteur de position de rotor externe est requis.
- À grande vitesse, le moteur produit des harmoniques.

I.6 Les applications des MRV

En général, la MRV offre de nombreux avantages qui en font un variateur de vitesse efficace dans divers niveaux de puissance, ou en tant que génératrice à réductance variable (GRV). Les domaines d'application potentiels ou déjà adoptés pour les MRV incluent les systèmes de mesure et de notification, les appareils électroménagers, les accessoires automobiles (éventuellement moteur de traction pour véhicules électriques), l'aviation, les machines-outils, l'aérospatiale, et bien d'autres encore.

Parmi ces applications on peut citer :

- La MRV est utilisée à haute vitesse dans diverses applications. Par exemple, le premier train à grande vitesse équipé de la MRV est le train allemand ICE3 (voir figure I.14). Dans ce train, la MRV est utilisée pour la climatisation de l'air, avec une puissance nominale de 40 kW et une vitesse nominale de 3,0104 tr/min. Une autre MRV à vitesse ultra élevée a été conçue par Morel et al [38]. Cette conception inclut une nouvelle

structure de rotor pour augmenter la rigidité mécanique du rotor. Grâce à cette amélioration, une vitesse maximale de $2,0 \times 10^5$ tr/min a été atteinte.



Figure I.14: MRV est employée dans les trains à grande vitesse pour le système de climatisation de «l'air cycle »[21].

- Dans les systèmes de véhicules électriques (VE) et de véhicules électriques hybrides (HEV), plusieurs systèmes d'entraînement principaux sont utilisés, notamment le système de modulation de largeur d'impulsion pour les moteurs à courant continu, le système d'entraînement à fréquence variable pour les moteurs à induction, le système d'entraînement pour les moteurs à aimants permanents, ainsi que le système d'entraînement à réductance variable, entre autres. Parmi ces options, le variateur de fréquence (RV) offre un certain nombre d'avantages tels que la réduction de la pollution environnementale, l'analyse des performances et le contrôle de la densité de puissance, une large plage de contrôle de vitesse, une faible demande de courant de fonctionnement et un contrôle d'ondulation de couple élevé, un contrôle des vibrations, un bruit et une efficacité. Et une belle production. Toutes ces caractéristiques sont particulièrement adaptées aux besoins de fonctionnement des véhicules électriques [42], [43]. Cependant, les moteurs à réductance variable souffrent d'un inconvénient majeur, à savoir le problème des vibrations et du bruit.

Les illustrations de la figure (1.15) montrent des exemples de véhicules électriques propulsés par MRV, tandis que la figure (1.16) représente un exemple de MRV intégré à l'essieu de traction, également appelé « moteur dans la roue ».

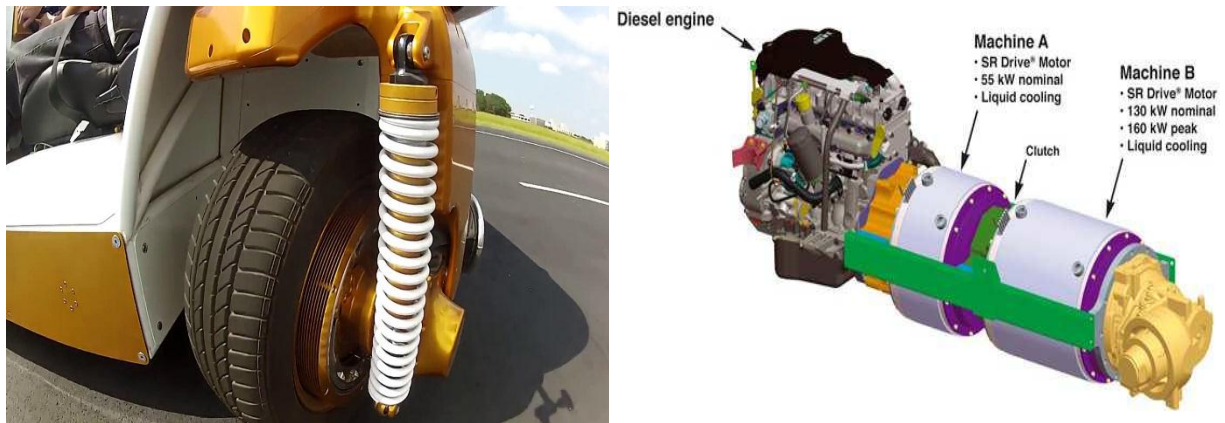


Figure I.15: MRV véhicules électriques et hybrides.

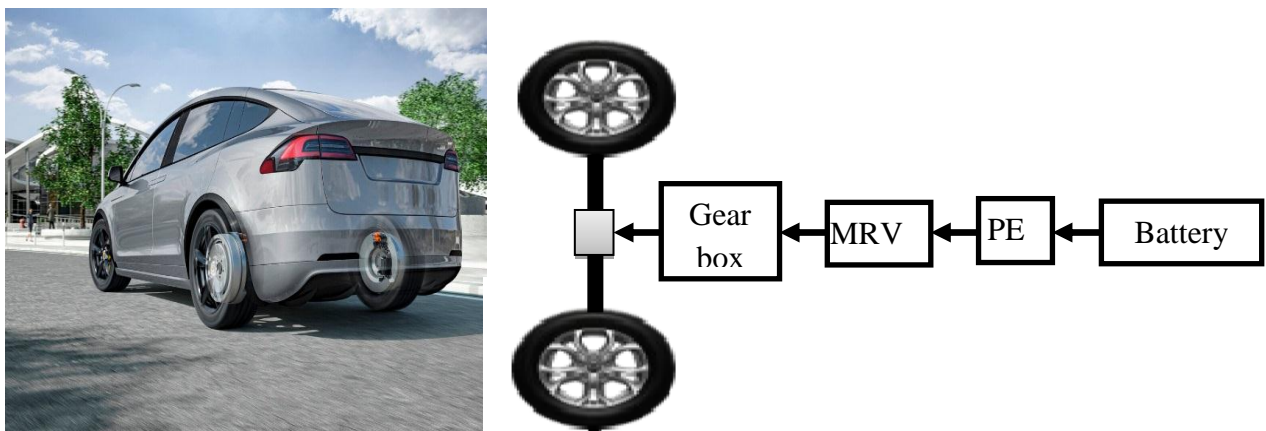


Figure I.16: Moteur « in Wheel » pour véhicule électrique [42].

- Applications d'équipements médicaux et de laboratoire, grâce aux développements des variateurs de réalité virtuelle de Nidec SR drives Ltd au développement d'un fauteuil roulant électrique manuel, apportant une solution innovante dans les domaines médicaux et de laboratoire (voir Figure I.17). Les utilisations des moteurs RV dans le contexte d'une pompe à seringue se retrouvent principalement dans certains systèmes biomédicaux. Ces systèmes sont généralement employés pour la perfusion et la continuité du traitement médical [44]. Ces applications consistent en un dispositif de lecture de réalité virtuelle linéaire qui est connecté à un piston de seringue (voir Figure I.18). De plus, il existe des applications dans lesquelles un système centrifuge est utilisé pour assister les techniciens de laboratoire à accomplir davantage de tâches en moins de temps (voir Figure I.19).



Figure I.17: Fauteuils roulants électriques.



Figure I.18: Dispositif d'administration de médicaments par pression.



Figure I.19: Instrument de laboratoire.

- En utilisant un MRV comme génératrice GRV avec une éolienne, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à sa capacité à travailler à différentes vitesses. Comme sur la figure (I.20). Grâce à ces avantages, le système peut constituer un générateur puissant pour les petits systèmes de production d'éoliennes et est de plus en plus populaire pour une utilisation dans des zones isolées et éloignées, telles que les montagnes, les îles ou les gratte-ciel [45].

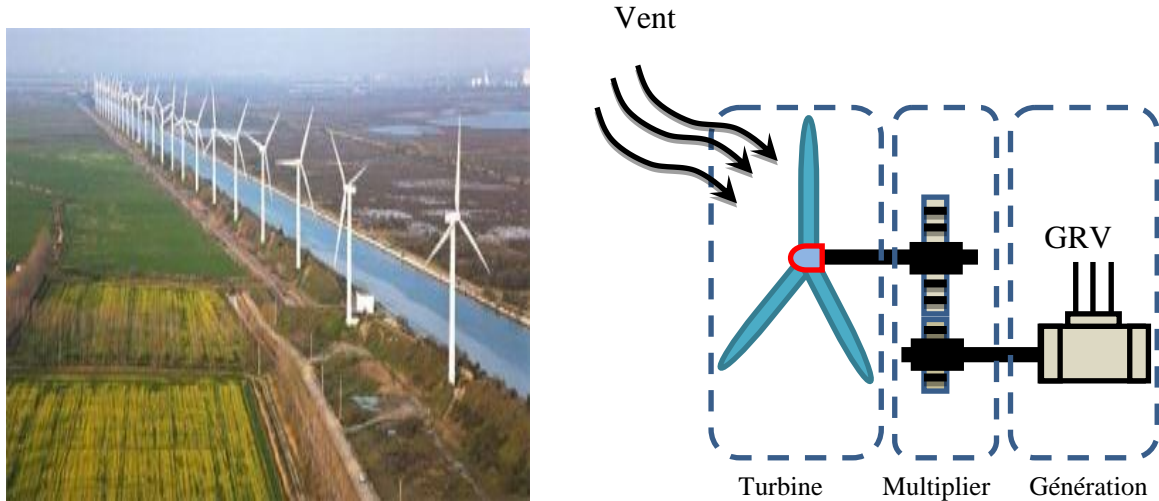


Figure I.20: Schéma GRV et convertisseur associé pour une application éolienne.

➤ Applications diverses

- Machines stationnaires : pompes, ventilateurs, compresseurs ;
- Machines-outils : tours verticaux, raboteuses, fraiseuse, perceuses ;
- Machines de mélange d'aliments ;
- Équipement de production d'électricité : contrôle des pales de rotor d'éolienne;
- Machines de levage : convoyeurs, ascenseurs, treuils ;
- Fabrication de plastique : machines d'extrusion et de moulage par injection ;
- Laminoir à métaux ;
- Machines de papeterie ;

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de machines à réductance variable (MRV) en fonction de leur structure, en identifiant et représentant trois types principaux pour offrir une vue d'ensemble des principales topologies de ce dispositif. De plus, les MRV à double saillie ont été décrites pour souligner l'importance de la surface effective dans la production de couple, laquelle dépend des dimensions des dents du rotor et du stator. Le principe de fonctionnement a été expliqué à partir d'un MRV monophasé élémentaire, rendant ainsi la machine plus facile à comprendre. Pour approfondir la compréhension du fonctionnement de la machine au stade où se trouve la fonction du générateur, la conversion

d'énergie dans le système électromagnétique pour calculer le couple électromagnétique est détaillée et la relation entre l'inductance et la position du rotor est introduite.

Après avoir étudié et expliqué la plupart des fondements théoriques du MRV, nous avons mis en évidence son comportement non linéaire. C'est pourquoi, dans la partie suivante, nous présenterons les différents aspects liés à la modélisation de cette machine, en détaillant numériquement les méthodes de résolution de ces modèles. Pour cela, nous nous intéresserons particulièrement à la méthode des éléments finis (MEF) comme outil puissant pour obtenir un modèle plus proche de la réalité.

Chapitre II

Les Modèles

mathématiques utilisant

la MEF pour la GRV

12/8

II.1 Introduction

La coque à double travée du GRV offre de nombreux avantages, notamment une construction extrêmement simple, une fiabilité élevée, un prix de revient extrêmement bas et des performances exceptionnelles même dans des conditions environnementales difficiles. Cependant, un inconvénient de la génératrice est le bruit important résultant d'un comportement non linéaire important, principalement dû aux différences d'entrefer et à la saturation du circuit magnétique. Par conséquent, la modélisation de la génératrice et le développement de sa stratégie de puissance et de contrôle deviennent des tâches complexes. Pour comprendre le fonctionnement des GRV en prenant en compte ces non-linéarités, que ce soit dans l'espace ou dans le circuit magnétique, ou leur combinaison, il est nécessaire de prendre en compte les effets électromagnétiques inhérents à ces dispositifs. Ces considérations sont étayées par des références telles que [23], [45].

La modélisation du GRV nécessite une analyse de l'appareil à différentes positions et différentes valeurs de courant. Pour obtenir les propriétés électromagnétiques du GRV, la méthode la plus couramment utilisée et la mieux adaptée aux problèmes électromagnétiques rencontrés en génie électrique est la méthode des éléments finis (FEM).

Dans ce chapitre, nous présenterons l'outil de modélisation FEM pour un prototype GRV 12/8. Pour déterminer les caractéristiques statiques, nous analyserons le modèle magnétique statique en modifiant les valeurs du courant du circuit externe et les positions angulaires du rotor, passant de la position alignée à la position désalignée (opposition, conjonction). Pour étudier le comportement dynamique, nous utiliserons le modèle magnétodynamique en incluant le couplage avec les circuits externes.

Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel ANSYS, car il offre la possibilité de développer diverses techniques. Parmi celles-ci, on trouve la technique de conjonction entre le circuit magnétique de la génératrice et le circuit d'alimentation externe, ainsi que les techniques de couplage électromécanique, permettant d'intégrer un curseur de ligne dans le trou d'air. Cependant, en raison de la rareté du GRV 12/8 sur le marché local, nous l'avons fabriqué nous-mêmes. Nous avons ensuite extrait ses propriétés magnétiques de manière expérimentale et comparé les propriétés d'induction obtenues expérimentalement avec celles calculées à l'aide d'ANSYS, en utilisant les valeurs des variables de courant de phase et de rotor.

II.2 Différentes approches de modélisation d'une GRV

Il existe plusieurs modèles ou méthodes disponibles aujourd'hui pour modéliser une génératrice à réluctance variable. En général, ces techniques sont systématisées en [31], [46]:

- Les méthodes analytiques.
- Techniques d'interpolation.
- Les approches basées sur des modèles de circuit magnétique équivalent.
- Les méthodes des éléments finis.

II.2.1 Les méthodes d'analyse

Dans les régions à faible perméabilité, ces méthodes impliquent la résolution des équations de MAXWELL. Par rapport aux méthodes numériques, elles réduisent le temps de calcul. Ils ne peuvent cependant s'appliquer qu'à des géométries relativement simples [21].

II.2.2 Techniques d'interpolation

Des méthodes intelligentes récentes ont été appliquées avec succès dans des étapes de modélisation MRVCE très spécifiques. Les méthodes de réseaux de neurones artificiels ("Artificial Neural Network - ANN) [47] et les systèmes adaptatifs d'inférence neuronale floue ("ANFIS") [48] sont les plus connus dans cette catégorie. Ces méthodes de courbes ont été les premières à être développées, et elles reposent sur des hypothèses simplifiées. [28], [46].

II.2.3 Les approches basées sur des modèles de circuit magnétique équivalent

Ce sont les méthodes les plus couramment utilisées pour calculer les caractéristiques du GRV. Une de ces méthodes est l'analyse du réseau de perméabilité. Le circuit magnétique de la génératrice, dérivé de sa géométrie et de ses propriétés électriques et magnétiques, est résolu à l'aide de méthodes de circuit électrique. L'entrefer et les perméabilités ferromagnétiques sont des composants passifs du circuit, tandis que les sources magnétomotrices sont des composants actifs. Le circuit magnétique peut être résolu linéairement ou non linéairement, Les approches utilisant des circuits magnétiques équivalents peuvent être réalisées avec des phases indépendantes ou magnétiquement couplées. La complexité de ces méthodes réside dans le calcul précis des perméabilités du rotor pour différentes positions, ainsi que dans la résolution matricielle des systèmes d'équations non linéaires. Les méthodes basées sur l'équivalence de circuit magnétique combinent la rapidité des méthodes analytiques avec la précision des méthodes élémentaires, prenant ainsi en compte une grande partie des phénomènes physiques locaux [31], [49].

II.2.4 Les méthodes des éléments finis

L'application de la conception de la structure électromagnétique, des modèles numériques et de la méthode des éléments finis est devenue un outil populaire pour obtenir une solution approximative à partir de l'estimation du domaine d'étude dans lequel les équations de Maxwell sont résolues. Cette méthode permet la définition d'un champ standard, vectoriel ou même tenseur qui vérifie un ensemble d'équations différentielles partielles et ordinaires à tout moment dans le domaine d'étude à tout moment [28], [50], [51].

II.3 Les équations électromagnétiques

II.3.1 Equations générales de maxwell

Les équations de Maxwell englobent la formulation mathématique fondamentale qui régit l'ensemble des phénomènes électromagnétiques et physiques. Une observation pertinente révèle que ces équations sont mutuellement liées, reposant sur un modèle à base de dérivées partielles, reliant les phénomènes magnétiques et électriques [21], [28], [46]. Ceci est principalement dû au couplage électromagnétique inhérent [46].

Ces équations comprennent:

- Equation de Maxwell-Faraday

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 1})$$

- Equation de Maxwell-Ampère

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 2})$$

- Equation de conservation du flux magnétique

$$\text{Div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II. 3})$$

- Equation de Maxwell-Gauss

$$\text{Div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II. 4})$$

Lois constitutives des milieux $\vec{B} = \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H}$ ou $\vec{H} = \nu(\vec{B}) \cdot \vec{B}$ et $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

\vec{E} : Vecteur champ électrique [v/m]

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{H} : Vecteur Champ magnétique [A/m].

\vec{J}_c : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²].

ε : Permittivité électrique [F/m].

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m³].

ν : Réductivité magnétique [m/H].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique [C/m²].

σ : Conductivité électrique [S / m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

À ces équations doit être associé la loi d'ohm généralisée

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

σ : Conductivité électrique [s/m].

\vec{u} : Le vecteur vitesse des pièces conductrices pouvant se déplacer [m /s].

$\sigma \vec{E}$: Densité des courants induits du champ électrique E [A/m²].

\vec{J}_{ex} : Densité du courant d'excitation (source) [A/m²].

$\sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$: Densité des courants induits par mouvement [A/m²].

La relation (II.5) est constituée de trois termes qui n'apparaissent pas simultanément pour un point spécifique de la région étudiée. Le vecteur J_{ex} représente la densité de courant engendrée par les enroulements d'alimentation, où la distribution de J_{ex} peut être considérée comme homogène. Cette densité peut être fournie en tant que donnée connue ou déterminée en fonction du circuit d'alimentation externe. Lorsque la magnitude de J_{ex} n'est pas spécifiée, la tension d'alimentation doit être connue impérativement. La détermination de J_{ex} peut être entreprise en prenant en considération l'interaction des enroulements avec le circuit d'alimentation externe [25].

En utilisant les équations de Maxwell, nous allons élaborer des modèles simplifiés pour décrire le couplage électromagnétique entre les phénomènes magnétiques et électriques. Les modèles nécessaires à la représentation de la GRV sont exposés dans les cadres des modèles magnétostatiques et magnétodynamiques.

II.3.2 Modèle magnétostatique

Le modèle magnétostatique offre un aperçu des caractéristiques du GRV en mode statique. Nous aborderons ici les deux types de modèles, à savoir le modèle scalaire et le modèle vectoriel.

II.3.2.1 Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, les courants électriques sont négligés (considérés comme égaux à zéro). Dans cette situation, les champs sont générés par des sources de force magnétomotrice externes qui ne sont pas reliées aux composants en question. Une autre approche pourrait impliquer l'utilisation d'aimants permanents.

Ce modèle se focalise sur l'analyse de dispositifs magnétiques caractérisés par des paramètres stationnaires et indépendants du temps. De telles conditions conduisent aux équations suivantes:

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 6})$$

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} = 0 \quad (\text{II. 7})$$

Dans un matériau ferromagnétique, et dans un milieu polarisable anisotrope supposé linéaire. L'induction magnétique B est reliée au champ magnétique H par l'équation suivante:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II. 8})$$

Avec \vec{B}_r : Vecteur induction magnétique rémanente.

La relation (II.7), Cela implique qu'il existe une fonction φ , appelé potentiel scalaire magnétique tel que :

$$\vec{H} = \overrightarrow{\text{Grad}} \varphi \quad (\text{II. 9})$$

L'équation générale de ce modèle est la suivante :

$$\text{Div}(\mu \overrightarrow{\text{Grad}} \varphi) = \text{Div}(\vec{B}_r) \quad (\text{II. 10})$$

II.3.2.2 Modèle magnétostatique vectorielle

De manière similaire au modèle précédent, on considère que le champ magnétique provient de sources indépendantes du temps (donc le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$) et que le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} sont découplés. Cependant, dans ce cas, en présence de courants

non nuls traversant le dispositif électromagnétique, les équations de Maxwell sont modifiées en conséquence :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II. 11})$$

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 12})$$

Généralement, dans un matériau ferromagnétique et dans un milieu polarisable anisotrope linéaire, l'induction magnétique B est reliée au champ magnétique H par l'équation :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II. 13})$$

L'équation (II. 12) permet de définir une autre variable magnétique \vec{A} appelée le potentiel vecteur, qui est nécessaire dans l'analyse des équations de Maxwell. Il peut être exprimé en fonction de l'induction B comme suit :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}}\vec{A} \quad (\text{II. 14})$$

Pour que le vecteur potentiel magnétique soit complètement déterminé, sa divergence doit être contrainte en utilisant la jauge de coulomb :

$$\text{Div } \vec{A} = 0 \quad (\text{II. 15})$$

En se basant sur les équations (II.11), (II.13) et (II.14), on peut déduire [52]:

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{A}\right) = \vec{J} + \overrightarrow{\text{Rot}}\left(\frac{1}{\mu}\vec{B}_r\right) \quad (\text{II. 16})$$

II.3.3 Modèle magnétodynamique

le modèle magnétodynamique est utilisé pour anticiper le comportement électromagnétique de la GRV en mode dynamique. [53-54]. Cela signifie qu'il tient compte des variations temporelles des sources de courant ou de tension. En d'autres termes, la présence de courants induits crée un couplage entre les champs électriques et magnétiques, comme exprimé par le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq 0$.

Ecrivons les deux équations (II.1) et (II.3) de Maxwell qui se présentent sans terme source :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II. 17})$$

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{H} = \vec{J}_{\text{ex}} \quad (\text{II. 18})$$

$$\text{Div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II. 19})$$

L'équation (II.19) met en évidence la présence d'un vecteur \vec{A} . Le potentiel vecteur \vec{A} joue un rôle fondamental dans la détermination de diverses grandeurs physiques [24][54]:

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \quad (\text{II. 20})$$

Aux équations susmentionnées, nous incorporons les caractéristiques propres au milieu.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II. 21})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II. 22})$$

On remplaçant l'équation (II.17) dans (II.19), on obtient:

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = -\frac{\partial(\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A})}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (\text{II. 23})$$

Donc:

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II. 24})$$

Ceci implique $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est un champ conservatif, il derive donc d'un potentiel scalaire électrique V Tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{\text{Grad}} V \quad (\text{II. 25})$$

Donc:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{Grad}} V \right) \quad (\text{II. 26})$$

A partir de l'équation (II.18) et de l'équation (II.21) nous avons :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{B} \right) = \vec{J}_{\text{ex}} \quad (\text{II. 27})$$

Et à partir des équations (II.27) et (II.20) nous avons :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \right) = \vec{J}_{\text{ex}} + \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II. 28})$$

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \right) = \vec{J}_{\text{ex}} - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{Grad}} V \right) + \sigma (\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II. 29})$$

$$\overrightarrow{\text{Rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{A}\right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \overrightarrow{\text{Grad}} V - \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) = \vec{J}_{ex} \quad (\text{II. 30})$$

Dans les équations précédentes, les termes $-\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ et $\sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$ représentent les densités de courant induit, reflétant la dynamique temporelle et spatiale des phénomènes électromagnétiques. Lorsque les courants induits par mouvement sont négligeables et La réécriture de l'équation (II.30) du système avec le fait que le $\overrightarrow{\text{Grad}} V$ en axisymétrie est nul serait :

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{\text{Rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{Rot}}\vec{A}\right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ex} \\ \text{Div } \vec{B} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II. 31})$$

L'équation en termes scalaires, de l'expression (II.31) s'écrit en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = J_{zex} \quad (\text{II. 33})$$

Les conditions limites requises pour résoudre cette équation différentielle (II.33) peuvent être formulées comme suit [41]:

- **Condition de Newman:** La condition aux limites homogène, équivalente à zéro, $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}|_S = 0$ sur le contour du domaine d'étude est exprimée comme suit :

S : Représente la surface pour laquelle la condition est définie.

\vec{n} : Vecteur normal à S .

- **Condition de Dirichlet:** Cette condition impose la valeur du potentiel vecteur sur une partie spécifique de la frontière du domaine d'étude. Dans ce contexte, pour des considérations d'infini, la valeur du potentiel vecteur \vec{A} est nulle $=\vec{0}$.
- **Conditions de symétrie:** Ces conditions sont déterminées en fonction de la parité de la partie du système étudié et peuvent être des conditions de symétrie, de périodicité ou d'anti-périodicité, en accord avec la configuration spécifique du système.

II.4 La solution numérique utilisant la MEF

Dans le domaine de la conception des génératrices électriques, les équations aux dérivées partielles ont souvent été traitées de manière simplifiée et parfois empirique. Avec l'émergence des ordinateurs et les avancées en analyse numérique, il est devenu tentant de résoudre ces équations de manière numérique. Les premières tentatives de résolution

numérique des équations de Maxwell dans le domaine de l'ingénierie électrique ont été menées par une équipe de chercheurs de l'université du Colorado, dirigée par [55].

Dans cette optique, des mathématiciens ont élaboré des formules pour l'ingénierie civile et la mécanique appliquée, visant à calculer la répartition des ventilateurs à induction dans les machines électriques. Plus récemment, des chercheurs tels que Sylvester de l'Université McGill [56] et Ravengad de l'Université de Grenoble [57] ont exploré l'adaptation des problèmes elliptiques en génie électrique à la méthode des éléments finis [58].

Par ailleurs, Foggia et Sabonnadière ont présenté une méthode des éléments finis qui prend en compte les courants de Foucault dans les matériaux conducteurs et magnétiques.

Par la suite, nous présenterons un aperçu des différentes méthodes employées pour résoudre un système d'équations aux dérivées partielles :

- **Méthode des différences finis (MDF) :** C'est la méthode la plus ancienne, remontant à Gauss. Son principe fondamental consiste à diviser le domaine d'étude en une série de nœuds interconnectés, avec un maillage qui permet d'approximer les contours du domaine. En utilisant le développement en série de Taylor pour la fonction à résoudre à chaque nœud du maillage, il devient possible de générer un ensemble d'équations algébriques équivalent au nombre d'inconnues des grandeurs en question.
- **Méthode des volumes finis (MVF):** La méthode des volumes finis est dérivée de la méthode des différences finies. Dans cette approche, le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires de sorte que chaque volume englobe un nœud de maillage similaire à celui utilisé dans les différences finies. Cette méthode a fait d'importants progrès, non seulement dans le domaine de la modélisation en mécanique des fluides [58], mais également dans d'autres branches de l'ingénierie scientifique.
- **Méthode des éléments finis (MEF):** La méthode des éléments finis (MEF) a été initialement développée et appliquée dans les domaines du génie civil et de la mécanique. Elle n'a trouvé son application en électricité qu'à partir des années 1970 [56], [59]. Cette méthode est utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles (EDP) dans divers domaines des sciences de l'ingénieur. Elle se révèle particulièrement puissante pour la résolution des EDP de Maxwell, surtout dans des domaines complexes. La méthode des éléments finis n'est pas directement appliquée aux équations aux dérivées partielles, mais plutôt à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre. Ceci est réalisé en utilisant l'une des deux approches suivantes [60], [61]:

- La méthode des résidus pondérés, également appelée méthode projective, vise à minimiser le résidu résultant de l'approximation de la fonction inconnue.
- La méthode une variable cherche à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié

La méthode des éléments finis offre l'avantage de s'adapter efficacement aux domaines complexes des génératrices électriques. Cela se traduit en pratique par des gains significatifs en termes de temps de calcul et de consommation de mémoire [62].

II.5 Modélisation électromagnétique de la génératrice à réluctance variable

Dans cette section, nous aborderons la modélisation d'un prototype réel de génératrice à réluctance variable (GRV) en utilisant la méthode des éléments finis dans les modèles magnétostatique et magnétodynamique. La modélisation du modèle magnétostatique sera présentée en deux phases distinctes. La première phase se concentre sur l'étude du comportement électromagnétique dans les positions extrêmes, c'est-à-dire les positions alignées et non alignées (oppose et conjoint). La deuxième phase se penche sur les variations de courant dans le circuit externe en fonction des différentes positions angulaires du rotor, allant de la position alignée à la position non alignée. L'objectif ici est d'analyser les caractéristiques statiques dans la position non alignée.

Dans le cadre de cette modélisation, nous mettrons en évidence les phénomènes dynamiques et calculerons le couple total pour mieux comprendre ces aspects. Pour ce faire, la méthode des éléments finis (FEM) sera utilisée pour créer une modélisation dynamique qui prend en compte le couplage entre le circuit externe et la saturation du circuit magnétique. Pour inclure le mouvement du rotor, Nous utiliserons la méthode de la ligne de glissement et établirons un lien entre le circuit magnétique de la génératrice et le circuit d'alimentation externe en utilisant le logiciel ANSYS.

De plus, afin d'obtenir une estimation calculer le couple dynamique en fonction des résultats du courant électrique et du couple statique, nous mettrons en œuvre la technique de la table de correspondance. Cette approche sera mise en œuvre dans l'environnement Matlab-Simulink.

L'objectif global de cette section est donc de fournir une analyse complète des performances électromagnétiques et dynamiques de la génératrice à réluctance variable, en combinant des méthodes numériques avancées et des outils de simulation robustes.

Tableau II.1 : Principales dimensions du prototype

Paramètres dimensionnels	Notation	Dimensions	
Longueur de la culasse	L	110mm	
Rayon stator externe	R_{so}	69.5mm	
Rayon de culasse stator intérieur	R_{sy}	57.5mm	
Rayon de stator intérieur	R_{si}	37.5mm	
Rayon de rotor extérieur	R_{ro}	37 mm	
Rayon de culasse rotor extérieur	R_{ry}	24.5mm	
Rayon de l'arbre	R_{ri}	1.25mm	
Arc polaire du stator	β_s	15.28°	10mm
Arc polaire du rotor	β_r	15.48°	10mm
Epaisseur d'entrefer	E	0.5mm	
Nombre de spires pour pair de pôle	N_s	50	
Encoche	L	12 mm	
Section coil	S	381.07 mm ²	
Mean radius of coil		55 mm	

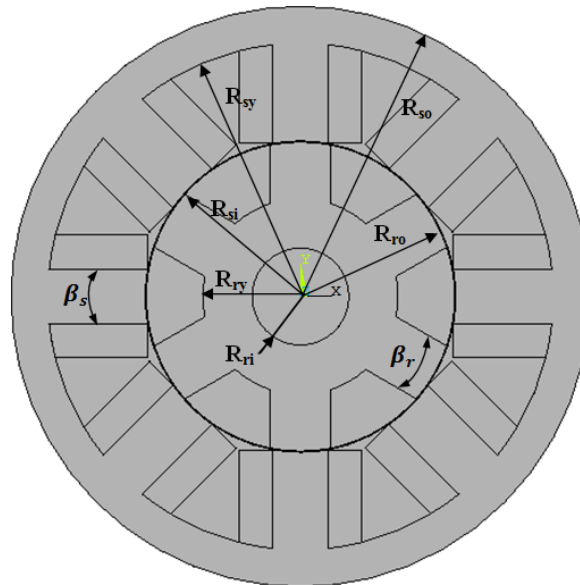


Figure II.1: Spécification des dimensions du prototype GRV.

➤ Propriétés des matériaux

On a trois régions :

- L'air est représenté par un matériau caractérisé par une perméabilité relative magnétique $\mu_r=1$.
- Les encoches statoriques sont représentées par un matériau caractérisé par une perméabilité magnétique $\mu_r=1$, et une résistivité électrique. Dans notre cas, le matériau utilisé est le cuivre ($\rho=1.724 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$).
- La culasse est constituée d'un matériau magnétique caractérisé par une courbe d'induction magnétique $B(H)$.

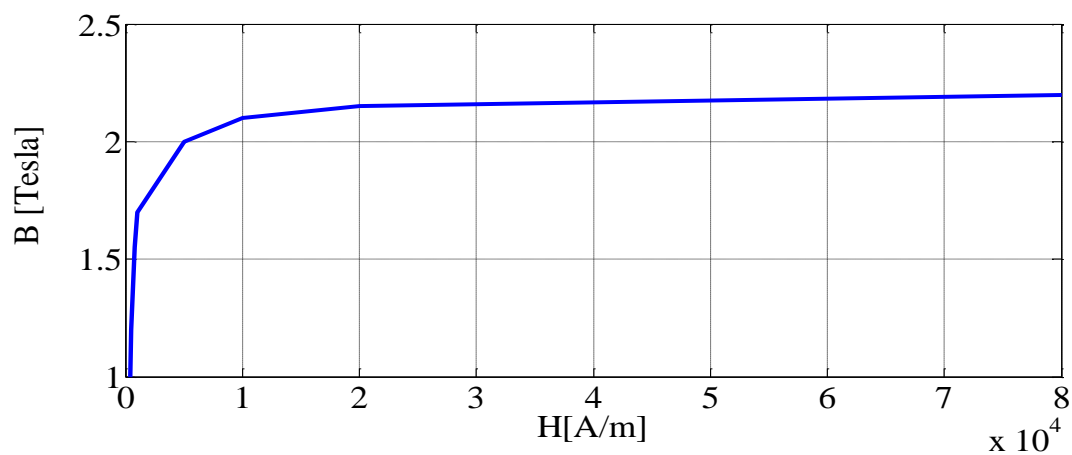


Figure II.2: La caractéristique d'aimantation $B(H)$.

Pour résoudre ce problème, une approche consiste à introduire une ligne de contour fermée dans l'entrefer, positionnée sur un cercle le long duquel le rotor se déplace : c'est ce qu'on appelle la "ligne de glissement" [63]. Ensuite, les mailles du stator et du rotor sont reliées par cette ligne. L'objectif est de faire coïncider les deux maillages lors du déplacement du rotor. Cette méthode suppose que le maillage de l'entrefer doit être régulier avec des segments de même longueur. La figure (II.3) illustre le concept de cette méthode [64].

Cette technique requiert la création d'un seul maillage pour la structure étudiée, et le rotor effectue des déplacements par incréments angulaires équivalents à la longueur des segments de l'entrefer. Grâce à cette approche, le temps de simulation est considérablement réduit par rapport aux méthodes de remaillage.

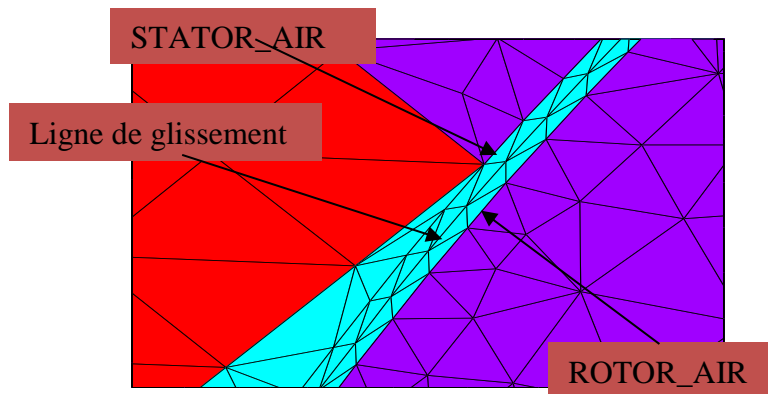


Figure II.3: Explication de la disposition des éléments triangulaires le long de la ligne de glissement dans l'entrefer.

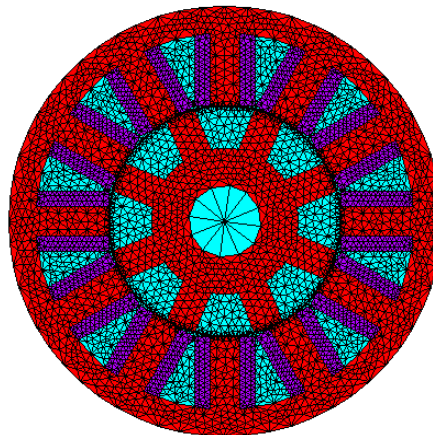


Figure II.4: La distribution du maillage sur l'ensemble de la GRV.

Nous avons configuré la distribution du maillage en utilisant l'outil logiciel ANSYS (voir figure II.4) pour la modélisation numérique du GRV 12/8. Dans cette représentation, nous observons que les éléments sont de taille considérable dans les zones limites de la GRV,

tandis qu'ils deviennent progressivement plus petits au niveau de l'entrefer, où la ligne de glissement est centrée dans le GRV, comme illustré dans la figure (II.4). La dimension des éléments est un aspect critique dans l'évaluation des grandeurs globales. En effet, les éléments de taille plus réduite fournissent des résultats plus précis, bien que cela nécessite davantage de temps de calcul, tandis que les éléments de taille plus grande permettent des calculs plus rapides, mais avec une précision moindre. Par conséquent, pour optimiser à la fois le temps de calcul et la précision des résultats, nous utilisons des éléments plus petits dans les régions où des variations significatives des valeurs de résultat sont attendues, tandis que des éléments de taille plus grande sont employés dans les régions où ces variations ne sont pas significatives. Ce schéma de distribution sera appliqué à toutes les modélisations statiques et dynamiques de notre étude.

II.5.1 Les caractéristiques statiques

Afin de déterminer les caractéristiques de performance du GRV, il est essentiel de développer des relations entre le flux total et la position du rotor en fonction des courants de phase de la génératrice. Cette section décrit en détail la méthode de calcul des caractéristiques de la génératrice en utilisant la méthode des éléments finis tout en prenant en compte les dimensions du moteur, les conditions d'excitation et le nombre de tours par phase. Pour obtenir une caractérisation précise du GRV, les propriétés non linéaires du matériau stratifié sont conservées dans cette méthode.

La première étape consiste à spécifier la géométrie de la génératrice à modéliser, ce qui englobe la construction du modèle. Le modèle géométrique de la génératrice est illustré dans la figure (II.1) et ses dimensions sont détaillées dans le tableau (II.1) [54], [65]. La répartition du maillage sur la génératrice est exposée dans la figure (II.4).

La deuxième étape implique la modélisation par éléments finis en utilisant la méthode des circuits couplés. Dans cette approche, la bobine est alimentée par une source de courant continu pour évaluer le comportement du GRV à différentes valeurs de courant. La source de courant continu représente le circuit électrique externe qui doit être lié au circuit magnétique. Parallèlement, la position angulaire du rotor est ajustée selon les besoins. La position alignée correspond à l'intersection des pôles du stator et du rotor, tandis que la position non alignée est située au point médian de la déviation du rotor interpoles par rapport au pôle du stator.

Les résultats de densité de flux calculés par la méthode des éléments finis (MEF) permettent de déterminer le flux total pour les positions alignées et non alignées. Bien qu'il

existe des approches analytiques pour déterminer le flux total, celles-ci reposent souvent sur En supposant que les flux de fuite sont négligeables [34]. Il est difficile de réaliser un calcul analytique précis du flux total en position non alignée, car les voies de fuite ne sont pas préalablement connues. C'est là qu'intervient l'avantage de la MEF par rapport aux méthodes analytiques : elle tient compte des conditions réelles présentes dans la génératrice, incluant les comportements non linéaires et les flux de fuite, entre autres. Fondamentalement, notre modélisation repose sur la résolution d'une équation électrique, d'une équation magnétique et d'une relation $B(H)$. Cette approche computationnelle nous permet de déterminer les propriétés statiques dans des situations non linéaires.

II.5.2 Résultats de l'analyse graphique

Nous présenterons les résultats graphiques pour les deux positions extrêmes (alignée et non-alignée) et analyserons les caractéristiques afin de mieux comprendre la plupart des phénomènes statiques du prototype proposé.

Pour les résultats graphiques dans ces deux positions extrêmes, nous avons appliqué un courant continu de 4 A, ce qui correspond à une densité de courant électrique constante. Il est important de noter que cette valeur n'a pas dépassé la limite autorisée pour le matériau en cuivre, qui est de $(5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2)$.

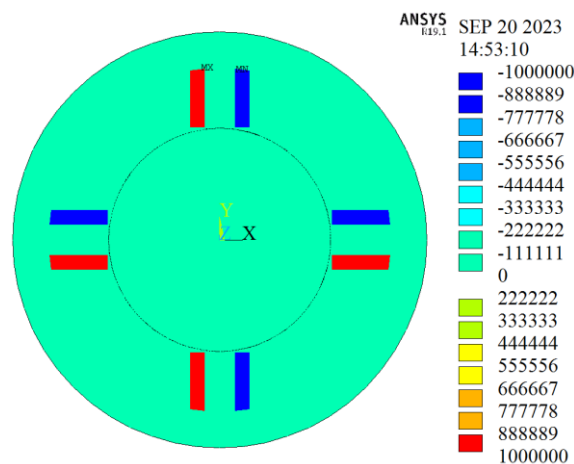


Figure II.5: Intensité du courant électrique.

La figure (II.5) affiche la densité du courant électrique résultant de l'alimentation de la bobine avec un courant de 2A. La densité du courant atteint jusqu'à $1 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ pour toutes les positions du rotor, car cette valeur est directement proportionnelle à la surface d'encoche.

Le calcul de l'inductance est beaucoup plus simple pour les positions alignées des pôles stator et rotor que pour les positions non alignées. Environ 90 à 98 % des lignes de flux traversent l'entrefer entre le stator et le rotor, avec une faible fuite de flux entre les pôles adjacents. Bien que la déviation du flux ne soit pas très significative, elle est prise en compte par la méthode des éléments finis. La répartition des lignes de flux est illustrée dans la figure (II.6), où les lignes de flux sont guidées par le matériau ferreux. Nous pouvons observer que la fuite et la déviation du flux sont plus importantes dans la position non alignée que dans la position alignée, en raison de l'opposition entre les pôles du rotor et du stator.

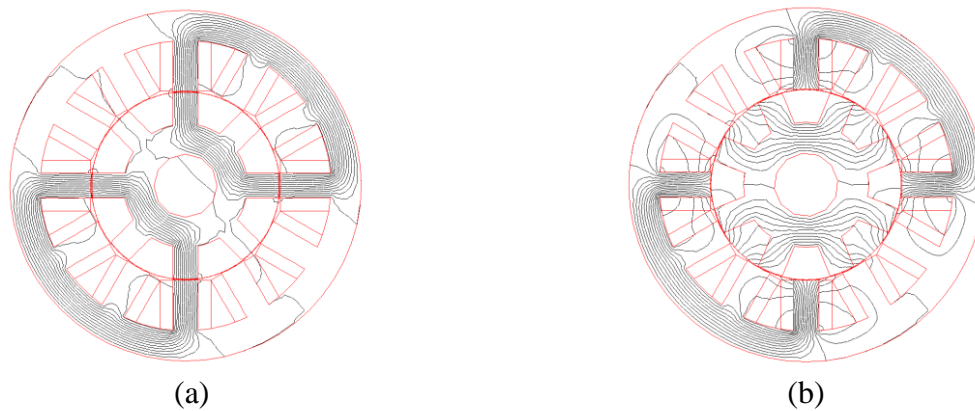


Figure II.6: Disposition des lignes de champ magnétique dans les deux positions extrêmes:(a) Alignée;(b) Non alignée.

II.5.2.1 Modèle linéaire

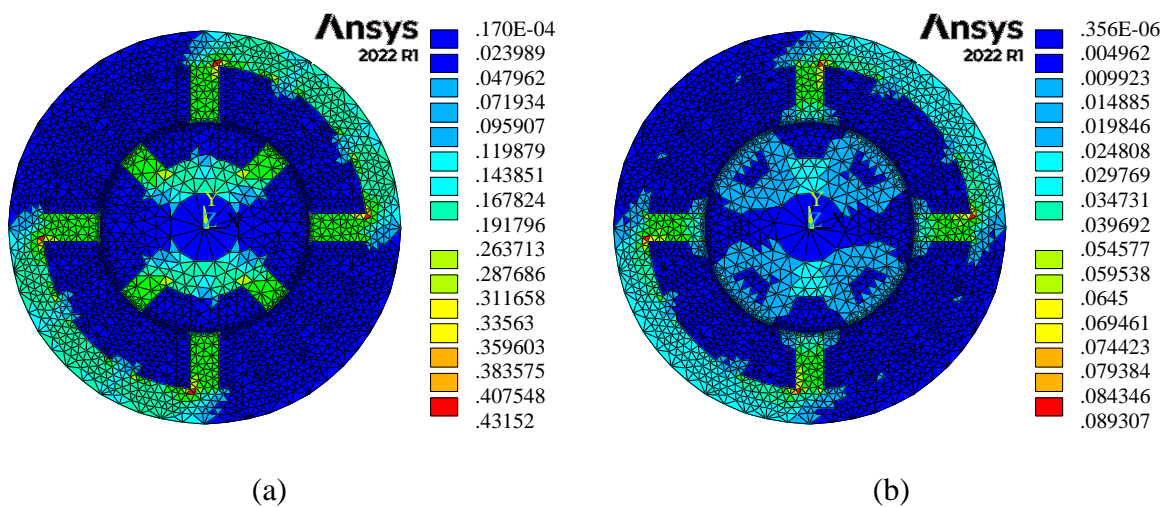


Figure II.7: La distribution de la densité de flux magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) Alignée;(b) Non alignée.

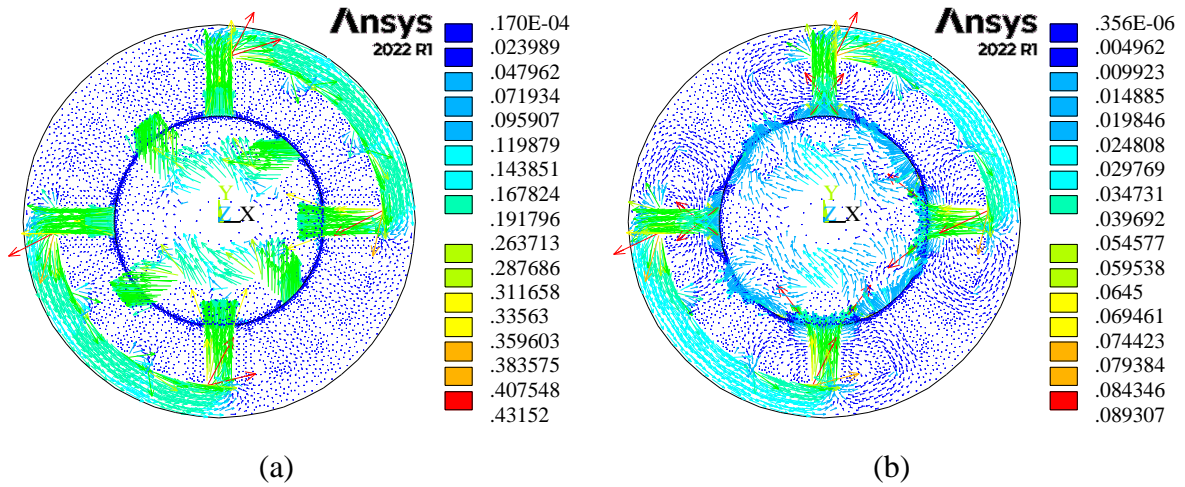


Figure II.8: Les vecteurs d'induction magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) alignée; (b) Non alignée.

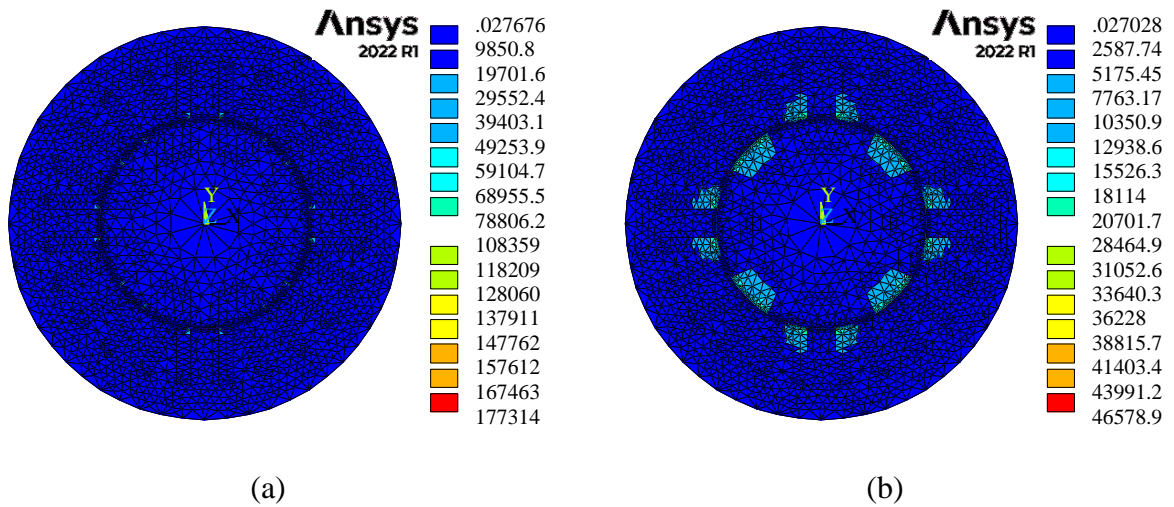


Figure II.9: La distribution de la densité du champ magnétique pour les positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a)Alignée;(b)Non alignée.

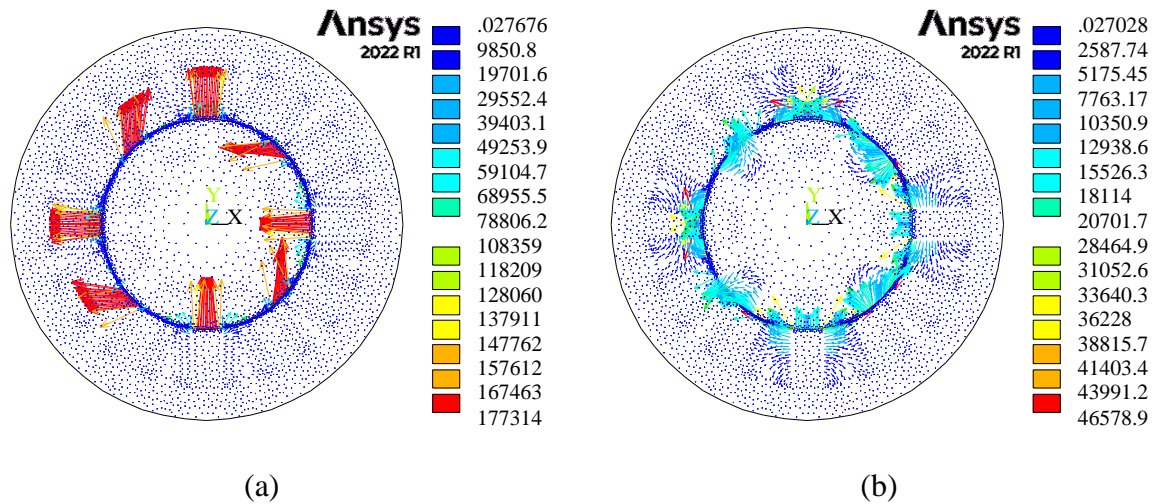


Figure II.10: Carte des vecteurs d'intensité du champ magnétique pour les sites entrés en collision et non serrés dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) Alignée;(b) Non alignée.

Les figures (II.7) et (II.8) illustrent respectivement la distribution de la densité de flux magnétique issue des positions alignées et non alignées de GRV.

On analyse la variation de la densité de flux en fonction de la perméabilité dans le cas linéaire. La symétrie de la distribution du magnétisme conduit à une augmentation de la densité de flux suivant la courbe $B = f(H)$ (voir Figure II.2). Les valeurs de perméabilité de la zone de pré-saturation, de la zone de saturation, du déplacement de l'entrefer, et du circuit magnétique sont déterminées.

Pour la position alignée, les valeurs moyennes de la densité de flux varient de 0,287 à 0,191 Tesla, avec des valeurs maximales atteignant 0,431 Tesla sous différents angles du circuit magnétique. En revanche, pour la position non alignée, ces valeurs oscillent entre 0,039 et 0,059 Tesla, avec des valeurs maximales allant jusqu'à 0,089 Tesla pour une perméabilité de $\mu_r=1352,4$.

La distribution et les vecteurs d'intensité du champ magnétique dans le circuit magnétique du dispositif GRV sont présentés dans les figures (II.9) et (II.10). On observe une augmentation linéaire de l'intensité du champ magnétique jusqu'à une valeur maximale de 177314 A/m en position alignée, et une valeur de 465789 A/m en position désalignée, avec une transmission $\mu_r=1352,4$.

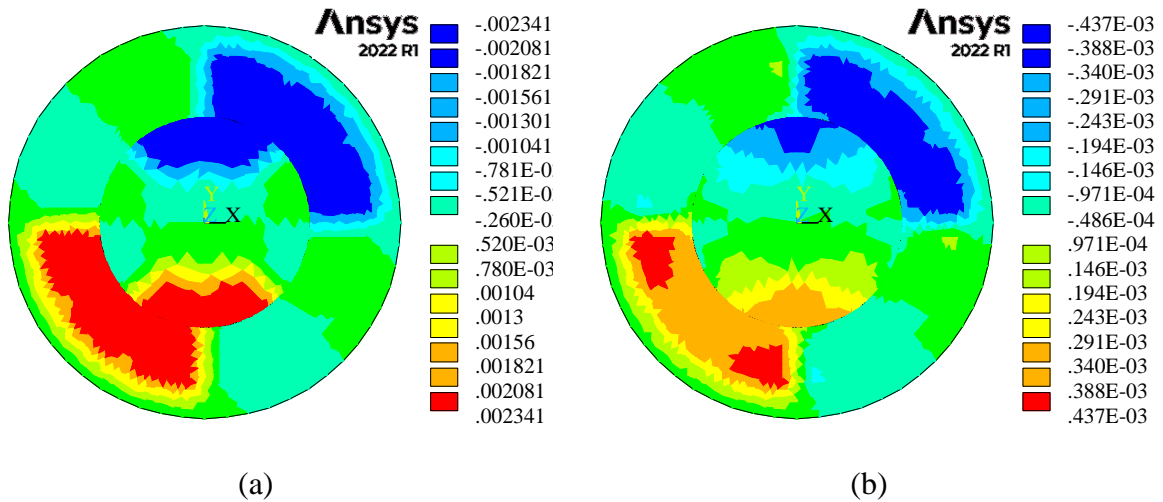


Figure II.11: Le vecteur magnétique potentiel AZ dans les positions alignées et non-alignées dans le cas linéaire $\mu_r=1352.42$:(a) Alignée;(b) Non alignée.

La figure (II.11) montre la répartition du potentiel vecteur AZ, avec une symétrie d'autre part, il représente la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique en fonction du changement de courant dans l'état linéaire. Il est à noter que la distribution de la densité de flux magnétique et de l'intensité du champ magnétique augmente en valeur avec l'augmentation de la perméabilité, et que la distribution de la densité de flux magnétique et de l'intensité du champ magnétique est plus grande dans l'emplacement aligné que dans l'emplacement non aligné.

II.5.2.2 Modèle non linéaire

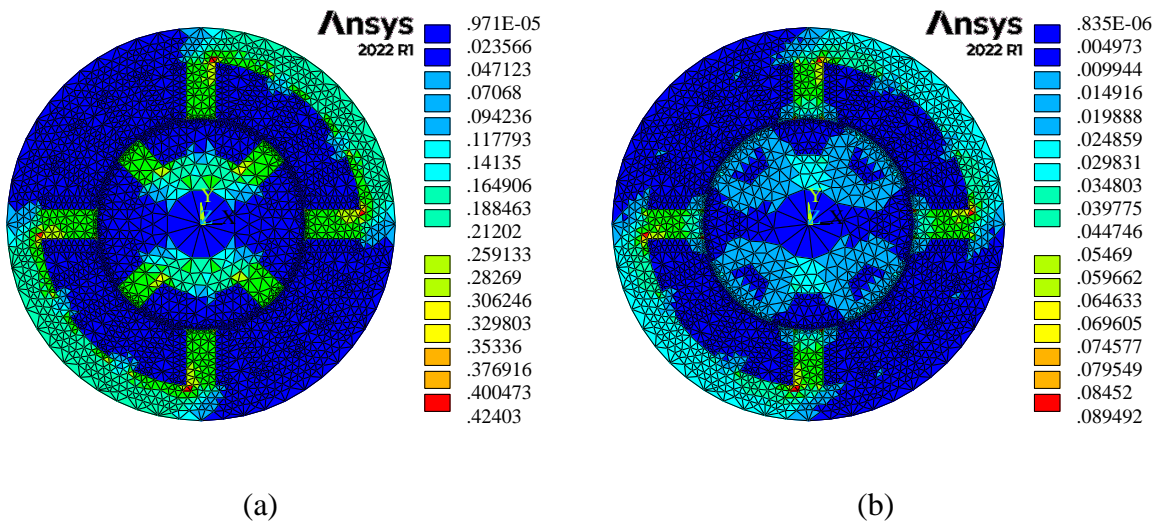


Figure II.12: La distribution de la densité de flux magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$:(a)Alignée;(b)Non alignée.

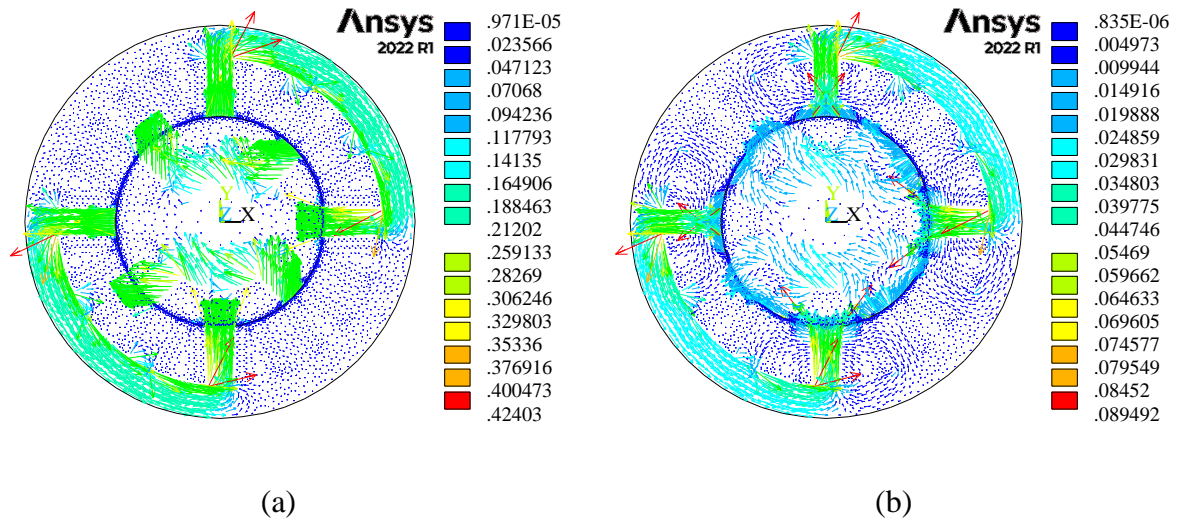


Figure II.13: Les vecteurs d'induction magnétique pour les deux positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) Alignée; (b) Non alignée.

Les figures (II.12) et (II.13) illustrent respectivement la distribution de la densité de flux magnétique résultant des positions alignées et non alignées du GRV. Une analyse de la variation de la densité de flux en fonction de la perméabilité dans le cas non linéaire a été réalisée.

En position alignée, les valeurs moyennes de densité de flux varient de 0,212 à 0,282 Tesla, avec des valeurs maximales atteignant 0,424 Tesla à différents angles du circuit magnétique. En revanche, pour la position non alignée, ces valeurs oscillent entre 0,044 et 0,059 Tesla, avec des valeurs maximales atteignant 0,089 Tesla pour un courant de $I=2 A$.

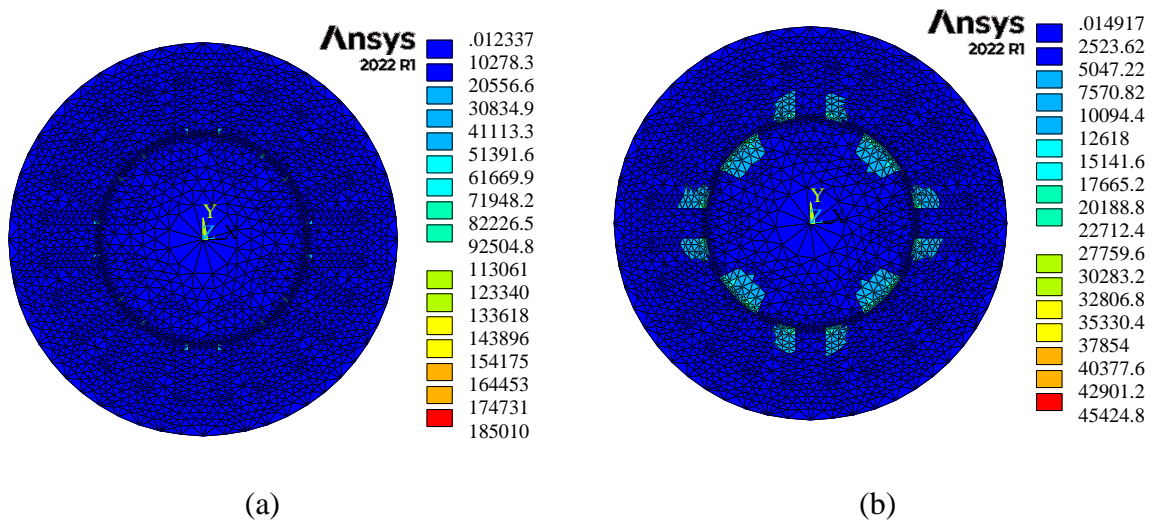


Figure II.14: La distribution de la densité du champ magnétique pour les positions alignées et non alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) Alignée; (b) Non alignée.

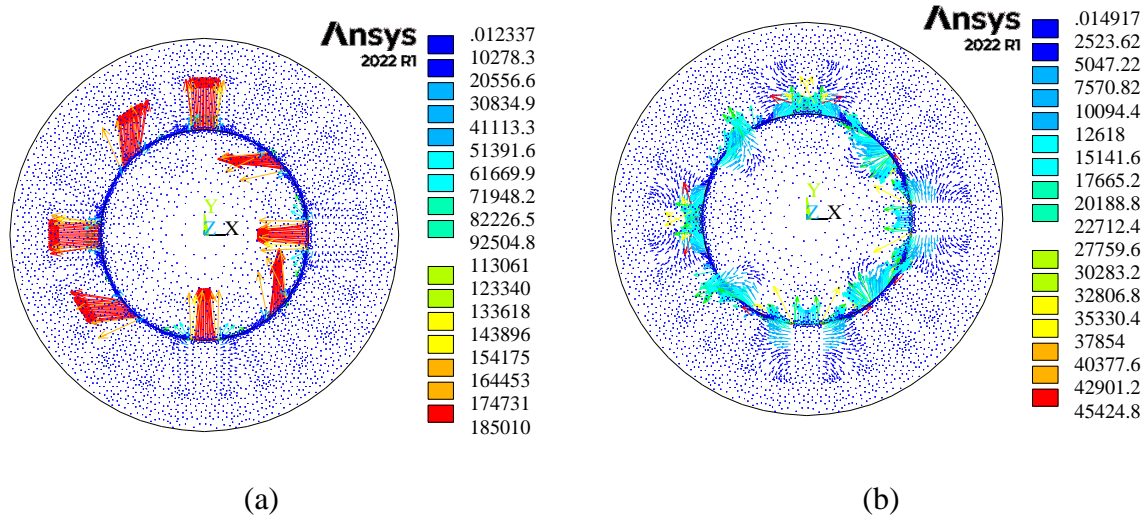


Figure II.15: Carte des vecteurs d'intensité du champ magnétique pour les positions alignées et non alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) Alignée; (b) Non alignée.

Graphiques (II.14) et (II.15). On remarque une augmentation linéaire de l'intensité du champ magnétique, atteignant une valeur maximale de 185010 A/m en position alignée, et une valeur de 45424,8 A/m en position désalignée, pour un courant $i=2A$.

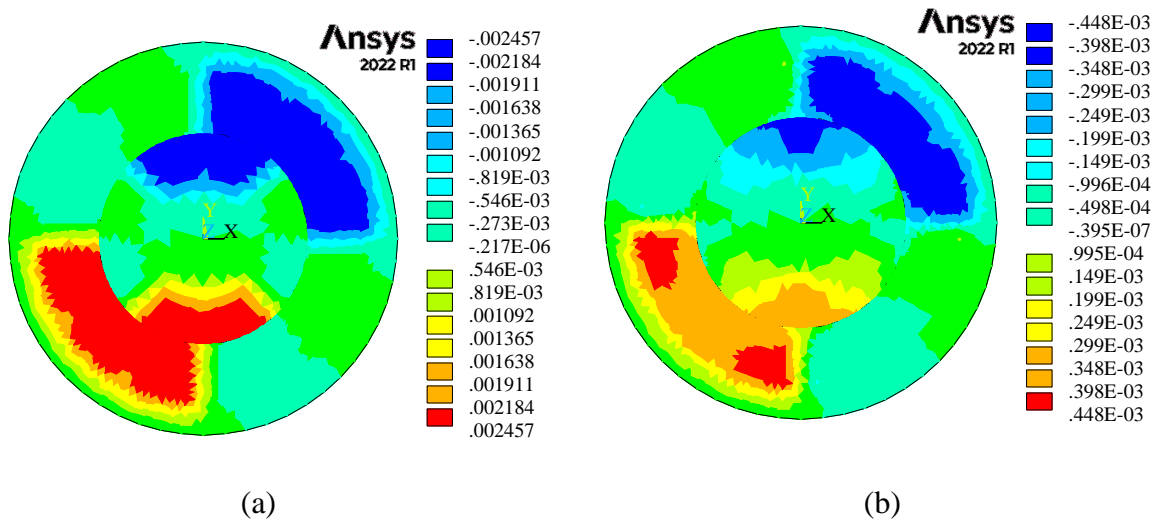


Figure II.16: Le vecteur magnétique potentiel AZ dans les positions alignées et non-alignées dans le cas non linéaire $i=2A$: (a) Alignée; (b) Non alignée.

La figure (II.16) affiche la distribution des potentiels des vecteurs magnétiques AZ dans les positions alignées et désalignées pour le cas non linéaire.

D'autre part, il représente la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique en fonction du changement de courant dans le cas non linéaire. Il est à noter que la distribution de la densité de flux magnétique et de l'intensité du champ magnétique

augmente en valeur avec l'augmentation du courant, et que la distribution de la densité de flux magnétique et de l'intensité du champ magnétique est plus grande dans la position alignée que dans la position non alignée.

L'analyse des cas linéaires et non linéaires montre que la densité de flux reste la même pour les cas linéaires et non linéaires. Plus précisément, pour le cas linéaire, la perméabilité est $\mu_r = 1352,42$ lorsque le courant $i = 2A$.

II.5.3 Analyse de résultats de courbes

En utilisant les équations précédentes (équations de corrélation de flux, d'inductance et de co-énergie magnétique), nous pouvons calculer de nombreuses propriétés importantes du GRV, telles que l'intensité du champ magnétique, l'inductance, la densité de flux magnétique, la constante de couple et la corrélation de flux. Résoudre l'équation co-énergie magnétique permet de déterminer la tension du vecteur magnétique.

Ces relations jouent un rôle crucial dans la modélisation précise du GRV. Les résultats FEM fournissent des informations sur la fixation du flux, l'inductance et le couple statique, qui sont calculés et présentés en fonction de la position du rotor, du courant et de la perméabilité. D'après l'analyse graphique précédente, les caractéristiques d'un GRV 12/8 tout au long du cycle électrique, y compris l'inductance, le contact de flux et le couple statique.

Dans notre étude, nous avons considéré deux cas : les propriétés magnétiques linéaires et non linéaires représentées par la relation $B=f(H)$. Dans les scénarios linéaires, la large gamme d'amplitudes de courant n'est pas applicable. Cependant, dans les cas non linéaires, l'utilisation de la perméabilité extraite de la relation $B=f(H)$ est nécessaire pour déterminer les véritables caractéristiques de l'unité et combler le fossé entre les cas non linéaires et linéaires [66].

II.5.3.1 Modèle linéaire

Les réseaux de courbes d'inductance sont influencés par la corrélation entre le courant et le débit, comme décrit dans l'équation de flux. La modélisation FEM du GRV 12/8 révèle que deux facteurs clés ayant un impact sur la variation de l'inductance sont la position spécifique du rotor et la saturation magnétique.

La figure (II.17) illustre le flux (φ) en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs de courant, montrant une augmentation linéaire du flux en fonction de la valeur du courant [66].

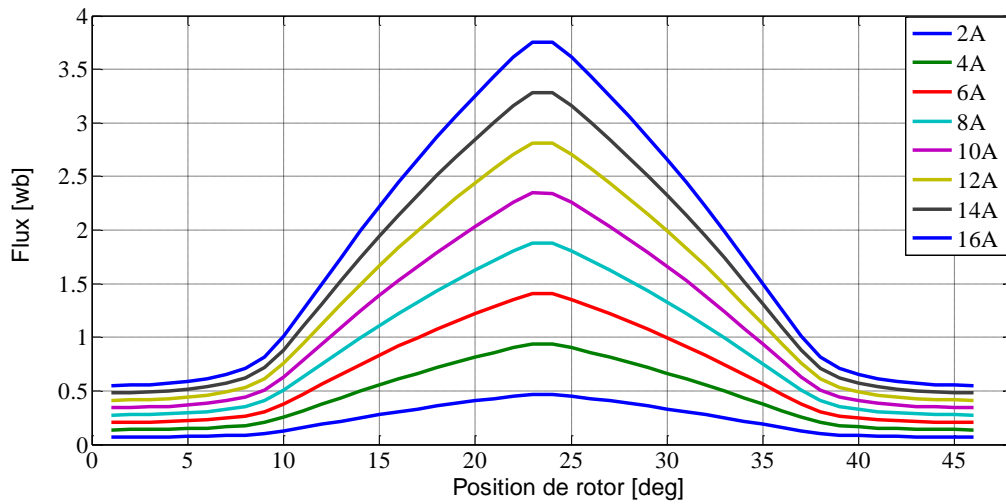


Figure II.17: Caractéristique du flux (φ) en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs du courant de sortie pour le cas linéaire de perméabilité $\mu_r = 1351,42$.

Les figures (II.18) et (II.19) montrent les changements d'inductance et de couple constant en fonction de la position de rotation et de la perméabilité de l'état linéaire, avec des valeurs de perméabilité allant de 1352,42 à 1988,86. Comme le montre les figures (II.23) et (II.24), la variation de l'inductance dépend uniquement de la position du rotor, l'activité d'inductance la plus élevée se produisant à des positions spécifiques du rotor où les valeurs de perméabilité augmentent.

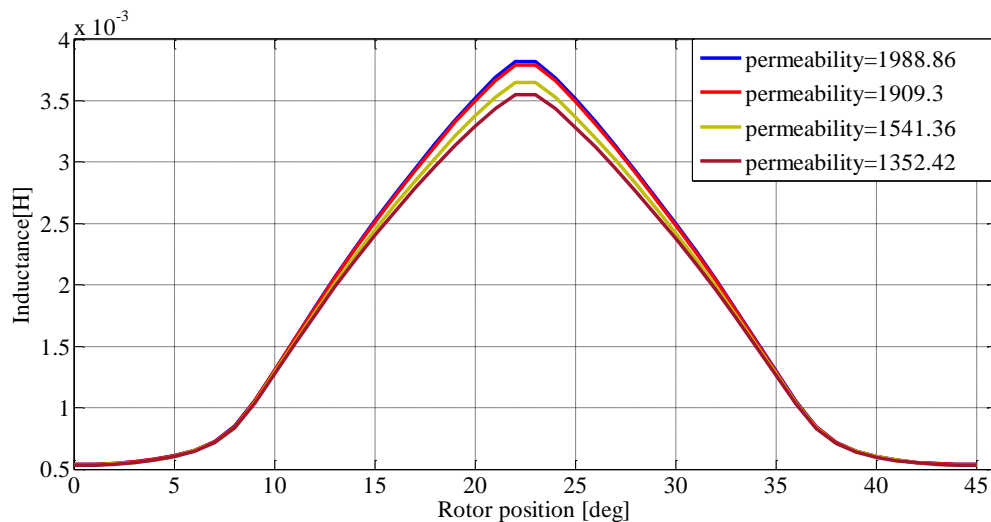


Figure II.18: Forme d'inductance pour différentes positions dans le cas linéaire.

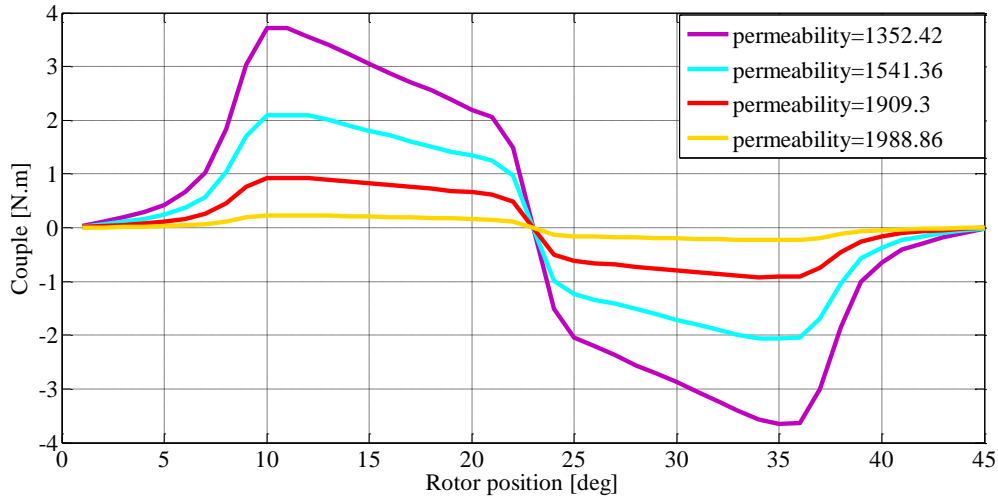


Figure II.19: Evolution du couple en fonction de l'angle de rotation et de la perméabilité pour le cas linéaire.

II.5.3.2 Modèle non linéaire

Les figures (II.20), (II.21) et (II.22) présentent respectivement les caractéristiques statiques de la GRV, à savoir le flux total $\varphi(\theta, i)$, l'inductance $L(\theta, i)$ et le couple statique $C_{em}(\theta, i)$. Dans les résultats graphiques précédents, nous avons capturé des images uniquement pour des cas spécifiques. Cependant, pour comprendre le comportement dans toutes les situations, la modélisation doit être réalisée pour toutes les positions possibles et les différentes valeurs de courant qui peuvent être utilisées. Après avoir effectué cette modélisation, Nous avons généré toutes les représentations graphiques ainsi que toutes les caractéristiques. Nous avons ensuite utilisé ces courbes caractéristiques pour faciliter l'analyse et la présentation des résultats.

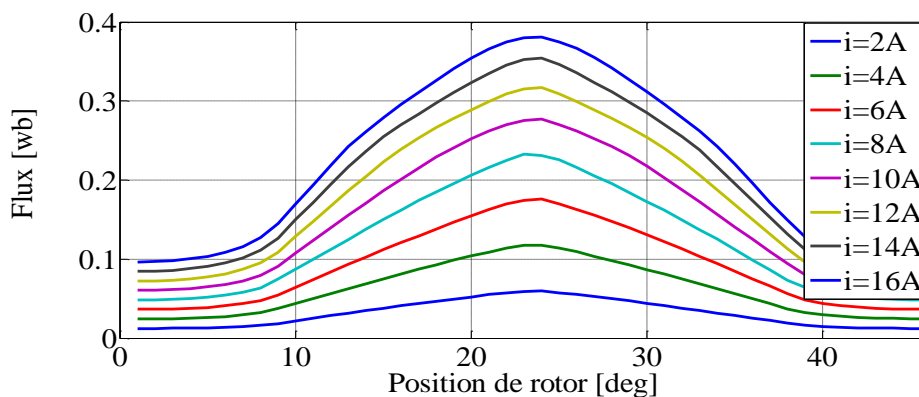


Figure II.20: Courbe du flux en fonction de l'angle de rotation pour différentes valeurs du courant.

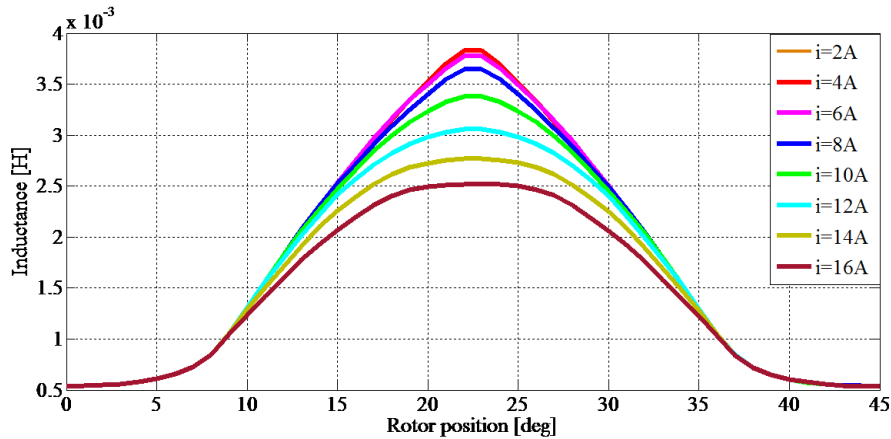


Figure II.21: Forme d'inductance pour différentes positions dans le cas non linéaire.

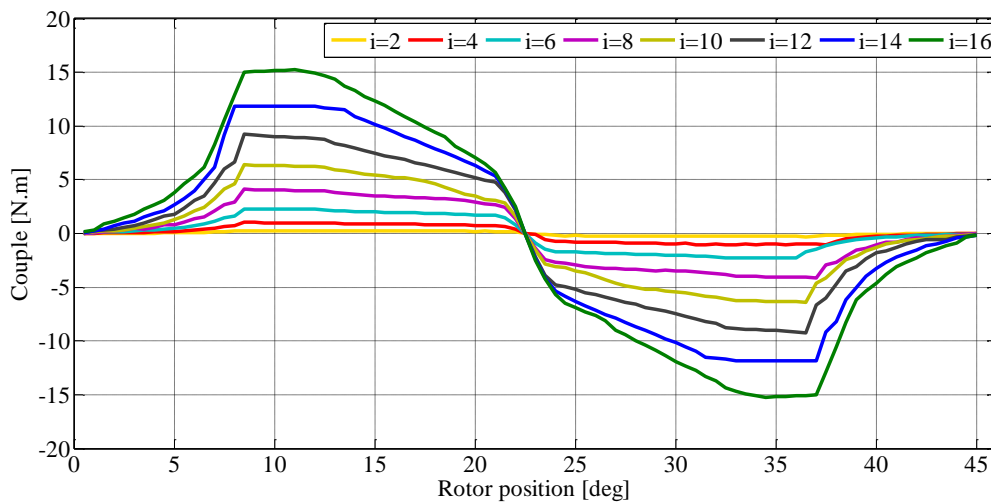


Figure II.22: Développement du couple en fonction de l'angle de rotation à différentes valeurs de courant dans des cas non linéaires.

Les figures (II.21) et (II.22) illustrent la variation de l'inductance et du couple constant par rapport à la position de rotation et au cas de courant non linéaire, en considérant des valeurs de perméabilité allant de 2A à 6A. Sur la figure (II.21), la variation de l'inductance est uniquement influencée par la position du rotor, une plus grande activité d'inductance étant observée à la position linéaire du rotor à mesure que les valeurs de courant diminuent.

L'évolution du couple statique, comme illustré dans les figures (II.18) et (II.21), présente une quasi-symétrie par rapport à la position de 22.5[deg], c'est-à-dire la position d'alignement. On peut discerner deux parties essentielles dans les régimes de fonctionnement de la génératrice à reluctance variable.

La partie positive du couple est exploitée pendant la période où la génératrice fonctionne +-en tant que moteur, tandis que la partie négative est exploitée lorsque la génératrice opère

en tant que génératrice. En d'autres termes, les valeurs des angles de commutation pour la mise sous tension (θ_{on}) et la mise hors tension (θ_{off}) d'une phase peuvent être déterminées en fonction des besoins du régime d'exploitation afin d'assurer une performance optimale.

Lors de l'analyse des figures (II.18), (II.19), (II.21) et (II.22), il est évident que les résultats correspondent à la fois aux états linéaires et non linéaires, avec les valeurs suivantes d'inductance et de couple observées :

- La perméabilité relative $\mu_r = 1352,42$ dans le cas linéaire, tandis que dans le cas non linéaire, elle est liée à un courant $i = 2A$.
- La perméabilité relative $\mu_r = 1541,36$ dans le cas linéaire, tandis que dans le cas non linéaire, elle est liée à un courant $i = 4A$.
- La perméabilité relative $\mu_r = 1909,3$ dans le cas linéaire, tandis que dans le cas non linéaire, elle est liée à un courant $i = 6A$.
- La perméabilité relative $\mu_r = 1988,86$ dans le cas linéaire, tandis que dans le cas non linéaire, elle est liée à un courant $i = 8A$.

Les données présentées mettent en évidence l'impact de la position du rotor (entrefer) et de la saturation magnétique sur l'inductance et le couple statique. Dans la condition linéaire, comme le montre les figures (II.18) et (II.19), les résultats d'inductance et de couple statique sont influencés par la différence de position et de perméabilité du rotor. De même, dans la condition non linéaire, représentée sur les figures (II.21) et (II.22), les résultats d'inductance et de couple statique sont influencés par la différence de position du rotor et de courant électrique. Notamment, les résultats dans les deux cas peuvent être rendus comparables en utilisant la courbe de perméabilité $B = f(H)$ (voir figure II.2) pour calculer l'inductance et le couple statique pour le cas linéaire.

De plus, il convient de mentionner que le couple constant est directement proportionnel à la pente de la courbe d'inductance, ce qui équivaut à la dérivée de l'inductance [66].

II.6 Réalisation et mise en œuvre expérimentale du GRV

Pour fabriquer la génératrice, nous avons utilisé une feuille de fer d'un diamètre de 1 mm. Il a été traité dans une génératrice de découpe à rayons ; on obtient des tranches de deux formes : le stator et la partie mobile, comme représenté sur la figure (II.23). Ensuite, nous avons assemblé ces tranches en les collant entre elles avec un matériau adhésif et isolant. Pour la partie mobile, nous avons pris des tranches façonnées pour s'adapter à l'axe de rotation. Les tranches de stator ont été empilées les unes sur les autres et pressées à l'aide d'une presse. Ce

procédé a donné naissance à des moules en fer pour la partie mobile et le stator. La surface extérieure de la partie mobile présente huit électrodes saillantes (Dents) avec présence de canaux entre les dents et la partie fixe. La partie fixe, sur sa surface interne, contient douze électrodes proéminentes (Dents) avec présence de canaux entre les dents. Ces rainures accueillent des bobinages placés sous forme de bobines comme le montre la figure (II.24). Le processus d'enroulement implique l'utilisation d'une génératrice ajustée en fonction de la hauteur du poteau. Nous enroulons un fil de cuivre de 50 cycles pour créer douze bobines. Chaque bobine est placée dans les rainures du stator, chargée de générer le champ magnétique. Les extrémités d'entrée et de sortie de chaque bobine sont reliées à une boîte à bornes sur la surface externe, comme illustré sur la figure (II.25). Enfin, nous installons les deux couvercles latéraux, qui servent d'anneaux de connexion, entre le stator et le rotor. Ces couvercles garantissent que le rotor reste dans une position spécifique alignée avec le stator [67].



Figure II.23: Étape de la conception et du processus de découpe du GRV.



Figure II.24: Étape d'assemblage des coulisses en fer pour moules en fer dans la partie mobile du stator.



Figure II.25: Étape du processus de bobinage de la GRV.

II.7 Calcul de l'inductance de phase fixe

Sur la base des données de conception dynamique du modèle dynamique GRV 12/8 et des relations (I.11) et (I.12), il est possible d'obtenir les caractéristiques d'inductance de segment statique du GRV 12/8 triphasé grâce au calcul analytique d'une phase. La relation d'inductance résultante est donnée comme suit :

$$L = \frac{1}{w} \sqrt{\left(\frac{V}{i}\right)^2 - R_s} \quad (\text{II. 34})$$

Grâce à des mesures sur le prototype fabriqué, nous avons utilisé un modèle empirique approximatif pour calculer l'inductance de phase stationnaire du GRV 12/8 triphasé étudié, comme le montre la figure (II.26). La résistance électrique du stator a été quantifiée en Ohms lorsqu'une phase du stator était alimenté par une tension sinusoïdale d'une fréquence égale à 50 Hz. Les valeurs d'inductance ont été déterminées à l'aide des données de mesure et de l'équation (II. 34), tout en faisant varier l'angle de la position du rotor et le courant électrique, comme présenté dans le tableau (II.2) [67].

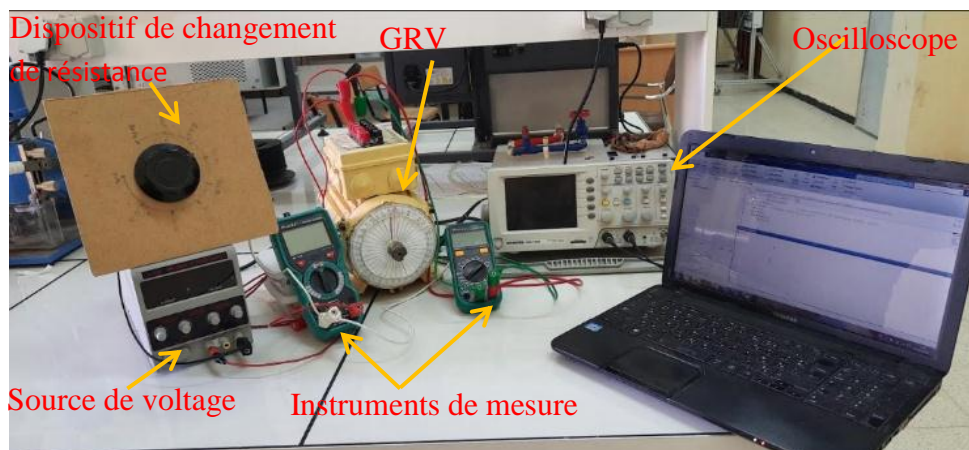
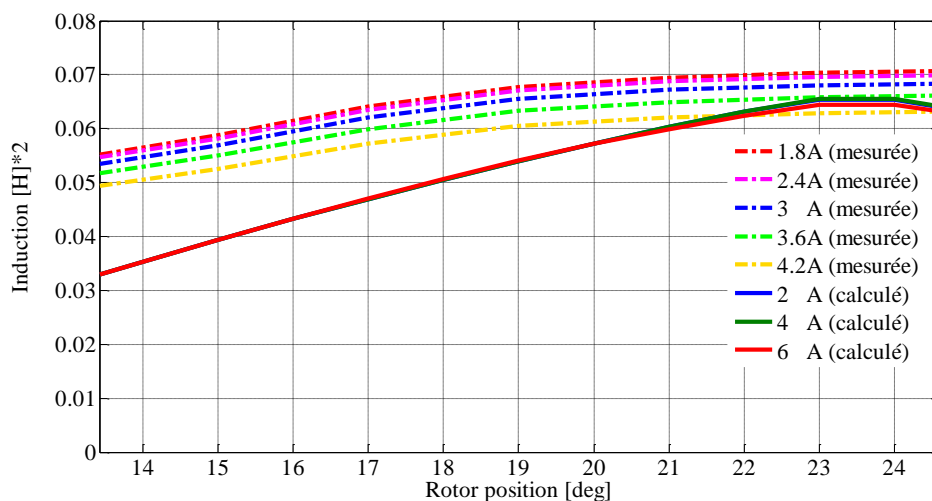


Figure II.26: Banc d'essai expérimental réalisé localement en laboratoire.

Tableau II.2: Inductances mesurées et positions du rotor.

θ [deg]	$L \times 10^{-3}$ ($i = 1.8A$)	$L \times 10^{-3}$ ($i = 2.1A$)	$L \times 10^{-3}$ ($i = 2.4A$)	$L \times 10^{-3}$ ($i = 3A$)	$L \times 10^{-3}$ ($i = 3.6 A$)	$L \times 10^{-3}$ ($i = 4.2A$)
0	5,981	5,864	5,742	5,383	5,221	4,812
2	6,516	6,388	6,256	5,865	5,689	5,243
4	7,032	6,894	6,751	6,329	6,139	5,658
6	7,777	7,625	7,466	6,999	6,789	6,257
8	9,185	9,005	8,817	8,266	8,018	7,390
10	0,1078	0,1057	0,1035	9,702	9,411	8,673
12	0,1208	0,1184	0,1160	0,1087	0,1055	9,719
14	0,1357	0,1331	0,1303	0,1221	0,1185	0,1092
16	0,1566	0,153	0,150	0,141	0,137	0,126
18	0,1627	0,159	0,156	0,146	0,142	0,131
20	0,1654	0,162	0,159	0,149	0,144	0,133
22	0,1658	0,162	0,159	0,149	0,145	0,133
24	0,1648	0,162	0,158	0,148	0,144	0,133
26	0,163	0,159	0,156	0,146	0,142	0,131
28	0,158	0,155	0,152	0,143	0,138	0,127
30	0,150	0,147	0,144	0,135	0,131	0,121
32	0,138	0,135	0,132	0,124	0,120	0,111
34	0,127	0,125	0,122	0,114	0,111	0,102
36	0,111	0,108	0,106	9,955	9,656	8,899
38	9,594	9,405	9,210	8,634	8,375	7,719
40	8,115	7,956	7,790	7,304	7,084	6,529
42	7,133	6,993	6,847	6,419	6,227	5,739
44	6,438	6,311	6,180	5,794	5,620	5,180
46	5,704	5,592	5,476	5,134	4,980	4,589

**Figure II.27:** Comparaison des caractéristiques d'inductance expérimentales et calculées à l'aide d'ANSYS avec des valeurs variables des courants de phase et de rotor.

A partir de ces résultats, on peut observer que les valeurs d'inductance varient en fonction de la position du rotor et des valeurs de courant. La valeur d'inductance maximale est atteinte en position linéaire, tandis que la valeur d'inductance minimale est observée en position non linéaire.

La figure (II.27) montre les résultats de simulation et expérimentaux réalisés localement en laboratoire. Ces résultats sont comparés et mutuellement validés. Il est évident que les valeurs d'inductance changent avec les variations de la position du rotor et des valeurs de courant. La valeur maximale de l'inductance correspond à la position linéaire, tandis que la valeur minimale de l'inductance correspond à la position non linéaire. De plus, il convient de noter que les résultats de simulation se rapprochent dans une large mesure des résultats expérimentaux [67].

II.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les formulations ainsi que les différents modèles mathématiques et leurs diverses méthodes numériques utilisés pour résoudre ce problème électromagnétique. Nous avons également abordé la méthode des éléments finis (FEM) avec le couplage des équations de circuit. Comme on le sait, les outils de calcul par éléments finis actuels, combinés à une automatisation performante qui permet l'application de méthodes de calcul auto-adaptatives, fournissent des stratégies efficaces pour obtenir une prédétermination précise des propriétés électromagnétiques des génératrices électriques. C'est pourquoi nous avons choisi cette méthode (FEM) pour modéliser les phénomènes électromagnétiques du GRV.

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis dans les outils logiciels ANSYS APDL s'appuie sur les exigences du modèle GRV 12/8. À l'aide de ce modèle, les caractéristiques d'induction et les statistiques de couple sont déterminées. Des images graphiques de la distribution de force magnétique sur le dispositif aux deux positions sont affichées, et des paramètres correspondants dans les cas linéaires et non linéaires sont définis pour être utilisés comme données de paramètres dans des simulations en mode moteur ou générateur.

Afin de comparer les propriétés magnétiques de la GRV 12/8 entre les résultats obtenus dans le programme ANSYS et les résultats expérimentaux, le processus de fabrication de la génératrice ainsi que l'extraction des caractéristiques d'induction de la GRV 12/8 ont été

expliqués. De plus, il convient de noter que les résultats de simulation se rapprochent dans une large mesure des résultats expérimentaux.

Dans le chapitre suivant, la simulation et les résultats du générateur de réluctance variable GRV 12/8 seront présentés. De plus, la modélisation et la simulation des éoliennes et le contrôle GRV sont présents et se combinent pour atteindre l'objectif de performance de ce travail.

Chapitre III

l'association de la

commande HCC de la

GRV avec la technique

MPTI pour une turbine

éolienne

III.1 Introduction

Récemment, des problèmes tels que la pollution de l'air et le réchauffement climatique sont devenus plus graves en raison de la consommation accrue de combustibles fossiles. En conséquence, de nombreuses recherches ont été menées sur l'efficacité des systèmes de production d'énergie naturelle pour résoudre ces problèmes. Les petits systèmes de production d'énergie éolienne sont l'une des technologies de production d'énergie naturelle les plus utiles. Les systèmes de production d'énergie éolienne utilisent des générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG), des générateurs à induction à double alimentation (DFIG) et des générateurs à induction. Cependant, le générateur à induction a un faible rendement mais est durable et nécessite moins d'entretien. Avec le récent développement technologique et les percées industrielles, le générateur à réluctance variable (GRV) peut être présenté comme un candidat important pour l'application d'éoliennes avec des systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) [67], [69].

La GRV a gagné en popularité, en importance et en intérêt parmi les chercheurs. Il s'agit d'une machine candidate sérieuse pour la production d'énergie propre et ses applications en raison des nombreux avantages que présente ce type de système, et l'indépendance magnétique entre les phases du moteur est due à la disposition des pôles proéminents. D'une autre manière, elle est également responsable des ondulations de couple, en particulier à grande vitesse et lors des déphasages. Néanmoins, si une méthode de contrôle appropriée est utilisée, un fonctionnement fluide peut être obtenu. Afin de réduire l'ondulation du couple, plusieurs articles de recherche ont été présentés dans le but d'améliorer les performances du GRV grâce à des solutions de contrôle améliorées [70], [73].

La machine à réluctance variable possède deux modes fonctionnels : le mode moteur - le mode générateur. Pour les performances, le GRV s'appuie sur des actionneurs linéaires ferromagnétiques qui optimisent le couple et la génération de puissance. Parmi ces techniques d'amélioration des performances GRV, certaines sont basées sur le contrôle direct du couple (DTC), qui est un processus indépendant de contrôle du couple pour chaque phase, sauf qu'il s'agit d'un mécanisme complexe. Cependant, l'approche de contrôle instantané direct du couple (DITC) est efficace et dispose d'un algorithme simple qui utilise un contrôleur d'hystérésis pour traiter le couple instantané requis. Plusieurs auteurs ont collaboré au développement de ce type de technique [53], [74]. Ces chercheurs proposent un processus DITC à quatre quarts et le comparent au courant de contrôle d'hystérésis conventionnel (HCC) actuel. Le contrôle indirect du couple (indirect torque control (ITC)), tel que décrit

dans les références [23], [53], est considéré comme le sujet de recherches récentes. La version avancée de l'ITC utilise la fonction d'engagement actuel pour obtenir le couple nécessaire.

L'utilisation du GRV avec les éoliennes, via un arbre commun, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique grâce à sa capacité à travailler à différentes vitesses. Grâce à ces avantages, le système peut constituer un générateur puissant pour les petits systèmes de production d'éoliennes et est de plus en plus populaire pour une utilisation dans des zones isolées et éloignées, telles que les montagnes, les îles ou les gratte-ciel [69].

Plusieurs stratégies de contrôle, visant à améliorer les performances du GRV dans les applications d'éoliennes, ont été proposées, notamment diverses vitesses et forces du vent. L'optimisation de la puissance de la turbine MPPT a été utilisée pour obtenir un couple optimal [74], et l'algorithme de réduction des ondulations du couple a été traité dans de nombreux travaux [53], [76], [81]. L'importance de ce travail se concentre sur l'association du contrôle ITC de la GRV avec le MPPT de l'éolienne en considérant les différents effets du système. Le système proposé se distingue par de nombreux détails, qui ont été pris en compte, que ce soit dans le contrôle ou dans le modèle utilisé, qui est présenté en appliquant la stratégie sur un modèle non linéaire de GRV 12/8 pour obtenir des résultats plus proches de la réalité.

Dans ce chapitre, une modélisation de machine et une simulation d'éolienne, utilisant les variables interdites du générateur, sont proposées. Ensuite, la technologie du diagramme de suivi du point de puissance maximale de la turbine associée au contrôle GRV est traitée ; en présence de la boucle de contrôle de couple et par l'utilisation de la technique ITC. Enfin, nous présenterons les résultats de simulation pour vérifier les performances du contrôle GRV couplé à la technique MPPT, ainsi que l'effet de la modification des angles de commutation θ_{on} et θ_{off} .

III.2 Généralités sur les éoliennes

III.2.1 Définition d'énergie éolienne

L'énergie éolienne se définit comme l'énergie générée par le vent, plus précisément, l'énergie extraite directement du vent à l'aide d'un dispositif aérogénérateur tel qu'une éolienne ou un moulin à vent. Il s'agit également d'une forme d'énergie cinétique engendrée par le déplacement de l'air [82], [83]. Cette source énergétique fait partie des énergies renouvelables.

III.2.2 Définition d'un système éolien

Un système éolien, également appelé aérogénérateur ou éolienne, peut être décrit comme un ensemble d'éléments conçus pour convertir une portion de l'énergie cinétique du vent (un fluide en mouvement) en énergie mécanique, puis en énergie électrique [84].

La plupart des éoliennes utilisées à des fins commerciales, notamment les plus grandes d'entre elles, adoptent une configuration à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical, quant à elles, occupent une part de marché relativement modeste. Les éoliennes de grande envergure peuvent être soit construites de manière individuelle, soit regroupées en ensembles, tels que des parcs éoliens, composés de dix unités ou plus, parfois même de centaines [85].

Les divers composants constitutifs d'une éolienne sont soigneusement conçus afin de maximiser le rendement de conversion de l'énergie éolienne. C'est pourquoi il est impératif d'assurer une correspondance appropriée entre les caractéristiques de couple et de vitesse de la turbine et du générateur électrique [86].

III.2.3 Types des éoliennes

Il existe deux types de systèmes éoliens différents, et une distinction est établie entre ces deux catégories en fonction de l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent [87].

III.2.3.1 Eoliennes à axe vertical

Après les exploits des anciens moulins à vent perses, plusieurs familles de technologies éoliennes à axe vertical ont été conçues et mises en œuvre. Cependant, de nos jours, ces technologies sont largement reléguées au second plan. La figure (III.3) illustre les principales technologies présentes sur le marché : le Savonius, le Darrieus à 2 ou 3 pales et en forme de rotor en H, le Darrieus Québec de 110 m de hauteur et 4 MW, le rotor AG Wind de quelques kW, ainsi que l'Ecotools de 100 W à quelques kW. Ces technologies présentent des avantages tels que leur installation au sol, leur absence de nécessité d'orientation précise par rapport au vent, un couple de démarrage significatif, et une construction simple, comme c'est le cas pour la turbine savonius qui tourne à faible vitesse et émet peu de bruit [88], [89].



Rotor Darrieus

Rotor Darrieus
Hélicoidale

Rotor Darrieus H



Savonius

Figure III.1: Technologies des éoliennes à axe vertical.

Leurs désavantages incluent le guidage mécanique, en particulier le palier bas qui doit supporter le poids total de la turbine. De plus, la technologie Darrieus nécessite une mise en rotation lors du démarrage, bien que ce problème soit de moins en moins préoccupant grâce aux progrès de l'électronique de puissance déjà associée aux systèmes à vitesses variables.

Le rendement aérodynamique de ces turbines est inférieur à celui des turbines à axe horizontal. La courbe de puissance dépend de la vitesse spécifique et présente une forme en cloche, nécessitant une optimisation de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent. Un système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est presque indispensable. Ceci est également valable pour la société Ecotools, une entreprise basée en Suisse et présente en France, qui propose des petites turbines de 60W à 4.2kW à axe vertical (voir figure III.1).

III.2.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, également appelées éoliennes à rotor horizontal, s'inspirent de la technologie ancienne des moulins à vent. Elles se composent de plusieurs pales profilées de manière aérodynamique, similaire aux ailes d'un avion. Contrairement à l'utilisation de la portance pour maintenir un avion en vol, dans le cas des éoliennes à axe horizontal, la portance est exploitée pour générer un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor. Le nombre de pales utilisé dans ces éoliennes pour la production d'électricité varie généralement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus répandu en raison de son compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris l'avantage sur les éoliennes à axe vertical en raison de leur coût moindre, d'une exposition moindre aux contraintes mécaniques et de l'efficacité favorisée par la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol. Il est à noter cependant que des

recherches ont été entreprises pour soutenir la viabilité des éoliennes à axe vertical, incluant des études multicritères visant à explorer leurs avantages potentiels. Néanmoins, les concepts abordés dans la suite de cette étude se concentreront exclusivement sur le cas des éoliennes à axe horizontal (voir figure III.3) [90], [91].



Figure III.2: Éolienne à axe vertical.

Les éoliennes à rotation lente sont équipées d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de l'augmentation de la vitesse, mais il diminue également rapidement par la suite. En ce qui concerne les éoliennes à rotation rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et diminue lentement avec l'augmentation de la vitesse. Ces dernières sont largement répandues et presque exclusivement dédiées à la production d'énergie électrique [74], [92].

III.2.4 Composants de la Turbine Eolienne

Plusieurs configurations d'aérogénérateurs sont envisageables, chacune pouvant présenter des distinctions notables. Cependant, une éolienne de type "classique" se compose généralement de trois éléments principaux [93] :

- **Rotor** : Egalement désigné sous le terme d'hélice, constitue la partie rotative essentielle d'une éolienne. L'autre composant essentiel est le collecteur/moyeu, qui soutient les pales sur l'arbre. Le rotor tripale est le plus répandu en raison de son équilibre avantageux entre coût, comportement vibratoire, impact visuel et sonore. Il transforme efficacement l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Les pales actuelles sont fabriquées à partir de matériaux composites légers, assurant une combinaison optimale de rigidité et de résistance. Ces matériaux incluent notamment le polyester renforcé de fibre de verre ou la fibre de carbone. La longueur des pales varie actuellement entre 30 et 55 mètres, tandis que le diamètre du rotor se situe entre 60 et 110

mètres. Il est important de noter que la puissance d'une éolienne est proportionnelle au carré du diamètre du rotor, comme indiqué dans [94].

- **Nacelle** : Positionnée en tête du mât, la nacelle regroupe tous les éléments mécaniques, pneumatiques, ainsi que certains composants électriques et électroniques indispensables au fonctionnement de la machine [94]. Elle constitue un ensemble intégré englobant divers actionneurs de commande, des roulements, et un multiplicateur. Le frein à disque, distinct du frein aérodynamique, revêt une importance cruciale au sein de la nacelle pour maintenir la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent [93].
- **Tour** : La tour représente l'un des composants fondamentaux d'une éolienne, étant chargée de supporter le poids total de l'ensemble. Généralement constituée d'un tube en acier, la tour est conçue pour atteindre une hauteur maximale. En général, un compromis est souvent trouvé en optant pour un mât dont la hauteur est légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

Un exemple d'éolienne à axe horizontal, comprenant tous ses éléments, est illustré sur la figure (III.3).

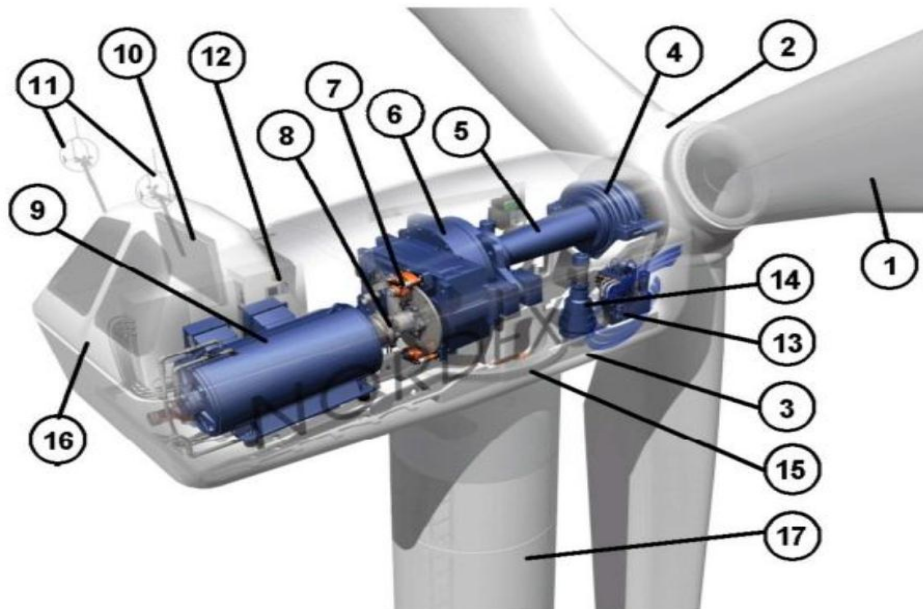


Figure III.3: Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.

1	Les pales	10	Radiateur de refroidissement
2	Moyeu rotor	11	Central de mesures
3	Nacelle	12	Équipement de contrôle

4	Cardan	13	Central hydraulique
5	L'arbre	14	Mechanism d'orientation
6	Multiplicateur de vitesse	15	Paliers du systeme d'orientation
7	Frein à disque	16	Un capot en acier
8	Accouplement flexible	17	Tour
9	Génératrice		

III.2.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable

III.2.5.1 Eolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent être classifiées en turbines à vitesse fixe et turbines à vitesse variable. Comme leur nom l'indique, les turbines à vitesse fixe fonctionnent à une vitesse relativement constante, déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice [94]. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximal uniquement pour une vitesse de vent donnée, et leur efficacité diminue lorsque la vitesse du vent change. Bien que la turbine à vitesse fixe soit protégée par un contrôle aérodynamique des rafales de vent potentielles, elle génère une puissance électrique très variable par rapport à d'autres sources d'énergie qui fournissent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

III.2.5.2 Eolienne à vitesse variable

D'autre part, les turbines à vitesse variable peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une large plage de vitesses de vent. La turbine ajuste constamment sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance générée. Dans ce contexte, la vitesse spécifique (λ), représentant la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, est maintenue à des valeurs optimales afin d'assurer une extraction maximale de la puissance électrique. Pour permettre cette modification de la vitesse de la turbine, celle-ci est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

Comme indiqué dans le tableau ci-dessous, les turbines à vitesse variable présentent plusieurs avantages, tels qu'un rendement de conversion d'énergie élevé, une production d'énergie électrique de qualité et sans impact négatif sur le réseau électrique, ainsi qu'une réduction du stress mécanique sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Cependant, leurs principaux inconvénients résident dans le coût de construction et les pertes énergétiques associées à l'utilisation de convertisseurs de puissance [94]. Néanmoins, ces coûts supplémentaires et pertes sont compensés par la production significative d'énergie électrique.

III.3 Modélisation de la turbine à étudier

Afin d'étudier le processus énergétique éolien en fonction de la variation de la vitesse du vent, il est nécessaire de décrire le système étudié lors du test de l'algorithme de contrôle MPPT. Ce système est constitué d'une éolienne qui produit le couple optimal du GRV [45].

III.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Pour modéliser la turbine, nous utiliserons plusieurs hypothèses simplificatrices, qui sont généralement les plus couramment acceptées.

Par conséquent, nous présumerons que [95] :

- On suppose que la vitesse du vent est uniformément répartie sur toutes les pales, ce qui nous permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Les coefficients de frottement entre les pales et l'air, ainsi qu'entre les pales et le support, sont minimes et peuvent être négligés.
- Les pales sont toutes conçues de manière identique, avec des paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement identiques.

III.3.2 Modélisation de la turbine

Prenons en considération le système illustré dans la figure (III.4), qui représente un flux d'air circulant autour d'une éolienne à axe horizontal. La surface S_1 représente la zone balayée par le flux d'air en amont de l'éolienne, tandis que la surface S_2 représente la zone balayée en aval.

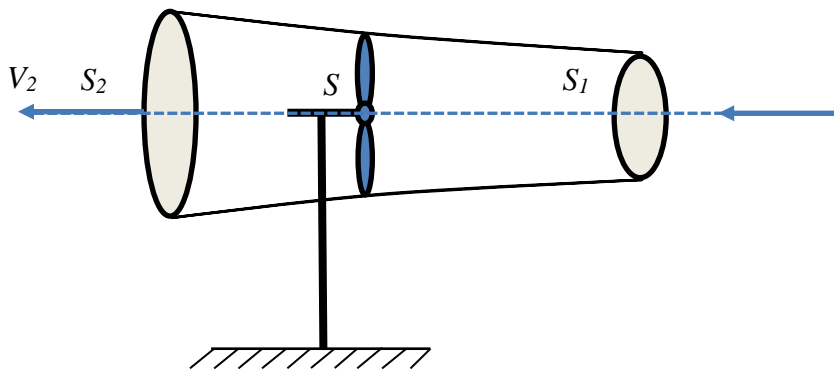


Figure III.4: Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Dans la figure (III.4), il est possible d'exprimer le principe de l'incompressibilité de l'air ainsi que la conservation de la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (\text{III.1})$$

➤ **La puissance aérodynamique**

$$P_v = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V^3 (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.2})$$

Avec

S : Surface balayée par l'éolienne $S = \pi \cdot R^2 (m^2)$

ρ : Masse volumique de l'air (1.225 kg/m^3)

V_1 : Vitesse du vent (m/s).

V_2 : Vitesse d'aérodynamique (m/s).

V : Vitesse moyenne du vent (m/s).

➤ **la puissance du vent :**

L'équation mathématique de l'énergie éolienne est la suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (\text{III.3})$$

➤ **Le rapport de vitesse λ :**

La vitesse spécifique ou normale λ est définie comme le rapport de la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de la turbine et de la vitesse instantanée du vent V [96] :

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V} \quad (\text{III.4})$$

Avec

R_t : Le rayon des pales de l'éolienne,

Ω_t : La vitesse de rotation de l'éolienne

➤ **Le couple aérodynamique**

Le couple aérodynamique est défini comme suite :

$$C_T = C_{aere} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} = P_t / \Omega_t \quad (\text{III.5})$$

➤ **Le coefficient de puissance C_p**

Le coefficient de puissance peut être défini comme le quotient entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [68], [96].

$$C_p = P_{aero}/P_V \quad (III.6)$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom de limite de Betz, est de $16/27$, ce qui équivaut à 0.593 [68], [96] (Figure III.5).

L'analyse d'une éolienne spécifique a conduit à l'élaboration de la formule empirique suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left[\left(\left(\frac{A_2}{\lambda_i} \right) - A_3\beta - A_4 \right) e^{\frac{A_5}{\lambda_i}} + A_6\lambda \right] \quad (III.7)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 - 1} \quad (III.8)$$

$$A_1 = 22 \quad A_2 = 116 \quad A_3 = 0.4 \quad A_4 = 5 \quad A_5 = -21 \quad A_6 = 0.0068$$

Avec

β : L'angle de l'orientation de la pale.

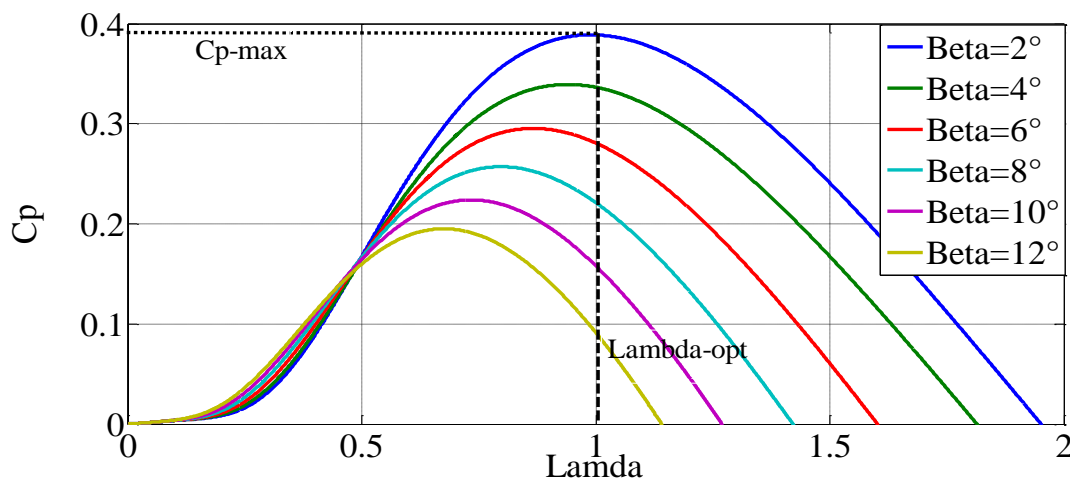


Figure III.5: Coefficient de puissance en fonction de λ et β .

III.3.3 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur ajuste la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Mathématiquement, ce multiplicateur est représenté par un gain de vitesse G , défini comme suit :

$$G = \Omega_{mec}/\Omega_t \quad (III.9)$$

$$C_g = C_t/G \quad (III.10)$$

III.3.4 Modèle de l'arbre

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \frac{1}{J_{total} \cdot S + F} \quad (III.11)$$

Avec

C_g : Le couple multiplicateur

C_{em} : Le couple électromagnétique

J_{total} : L'inertie totale

F : est le Coefficient de frottement visqueux.

III.3.5 Schéma bloc du modèle de la turbine

Le schéma bloc illustré dans la figure (III.6) représente la modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. La turbine produit un couple aérodynamique qui est transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine, en prenant en compte le rendement de la turbine C_p . Le multiplicateur convertit la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur. La turbine peut ainsi être commandée par l'action du couple électromagnétique C_{em} du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation [97].

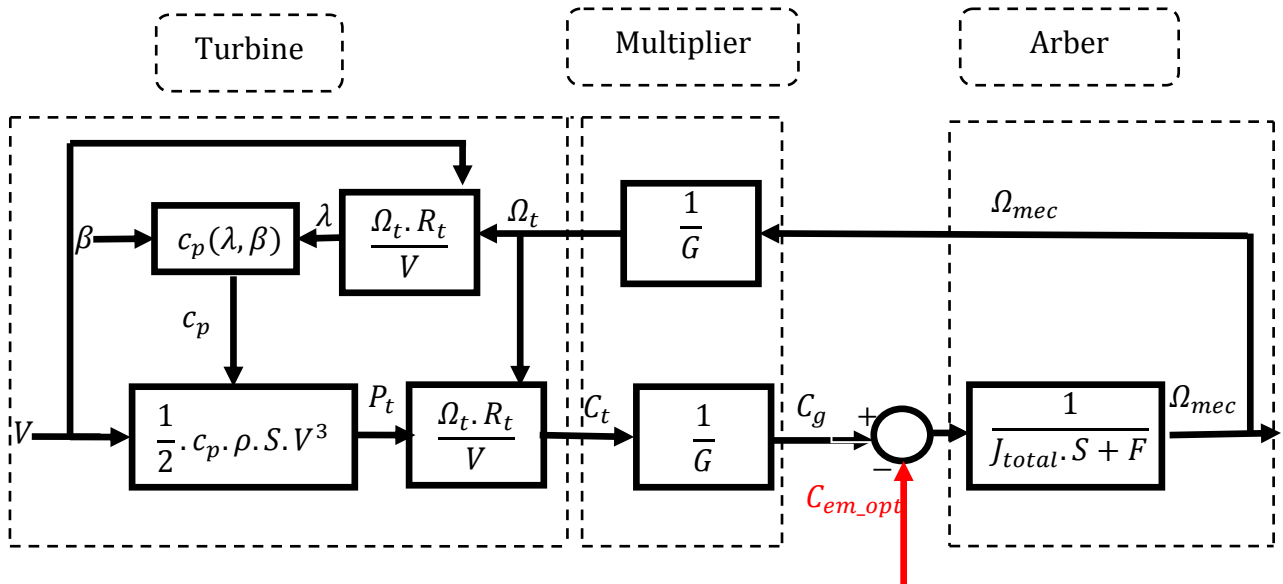


Figure III.6: Schéma bloc du modèle de la turbine.

III.4 Fonctionnement de la Turbine Eolienne

III.4.1 Extraction du maximum de la puissance d'une turbine éolienne

Les vitesses V_D , V_n et V_M délimitent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [95]:

- Zone I, caractérisée par le démarrage de la turbine.
- Zone II, où l'objectif est d'extraire la puissance maximale du vent en utilisant des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT, pour Max Power Point Tracking).
- Zone III, caractérisée par le maintien de la vitesse de rotation constante et une puissance fournie égale à P_n (puissance nominale).
- Zone IV, où le système de sécurité interrompt le transfert de l'énergie.

Toutefois, dans le cadre de cette étude, nous proposons de nous concentrer sur l'efficacité énergétique des systèmes éoliens de petite puissance équipés de dispositifs MPPT (suivi du point de puissance maximale).

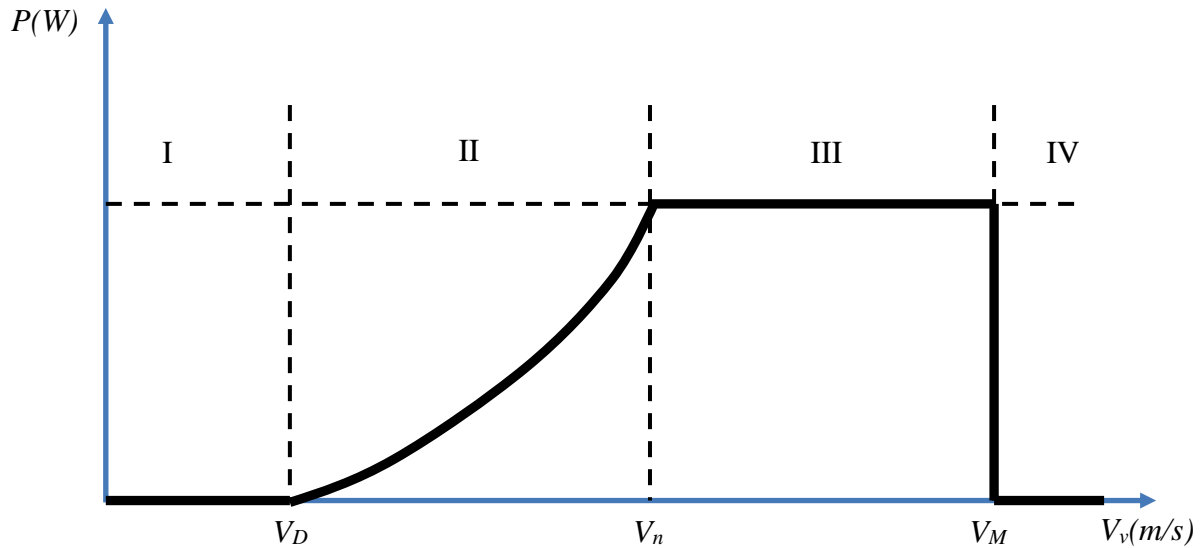


Figure III.7: Caractéristique puissance d'une éolienne.

III.4.2 Points de MPPT d'une éolienne

Le concept de recherche du point de puissance maximale fait référence à l'optimisation de la vitesse du générateur par rapport à la vitesse du vent, permettant ainsi d'obtenir la puissance mécanique maximale. De nombreux chercheurs ont écrit sur ce sujet et ont proposé des algorithmes pour décrire la stratégie correspondante.

De nombreuses stratégies MPPT pour les éoliennes ont été proposées dans la littérature [98]. Les stratégies MPPT conçues dans des travaux antérieurs utilisent des paramètres tels que le rapport de vitesse de pointe, le couple optimal pour une efficacité optimale ou la relation entre la vitesse de rotation de la turbine et la puissance.

Les principales formes de stratégies MPPT incluent le contrôle de puissance direct (DPC) et le contrôle de puissance indirect (IPC) [75], ainsi que des techniques plus sophistiquées utilisant des réseaux de neurones (NN) et des contrôleurs à logique floue (FLC) [99].

Les techniques MPPT basées sur le contrôle indirect de la puissance (indirect power control (IPC)) peuvent être classées en rapport de vitesse de pointe, retour de signal de puissance et couple optimal [81], [100], [101].

La méthode du rapport de vitesse de pointe pour la turbine consiste à générer le plus de puissance [102]. La vitesse souhaitée pour le rotor et l'éolienne est obtenue par estimation. L'approche de la méthode du rapport de vitesse de pointe estime l'extraction de puissance optimale en prenant en compte les paramètres du système. Il existe deux méthodes, selon la

vitesse du vent obtenue. La première méthode s'appuie sur le capteur mécanique utilisé, tandis que la seconde s'appuie sur une estimation de la vitesse du vent [103].

La méthode de retour de signal de puissance de l'éolienne est basée sur l'extraction des données de puissance optimales ou caractéristiques $C_p = f(\lambda)$ par test expérimental ou par simulation. Ensuite, l'utilisation des tables de consultation peut générer une puissance optimale dans cette stratégie [98]. L'utilisation de la caractéristique $C_p = f(\lambda)$, comme le montre la figure (III.8), suffit à suivre la courbe de puissance optimale C_{pmax} . Ainsi, l'éolienne est dans les conditions optimales où $\lambda = \lambda_{opt}$ et $C_{em} = C_{em-opt}$.

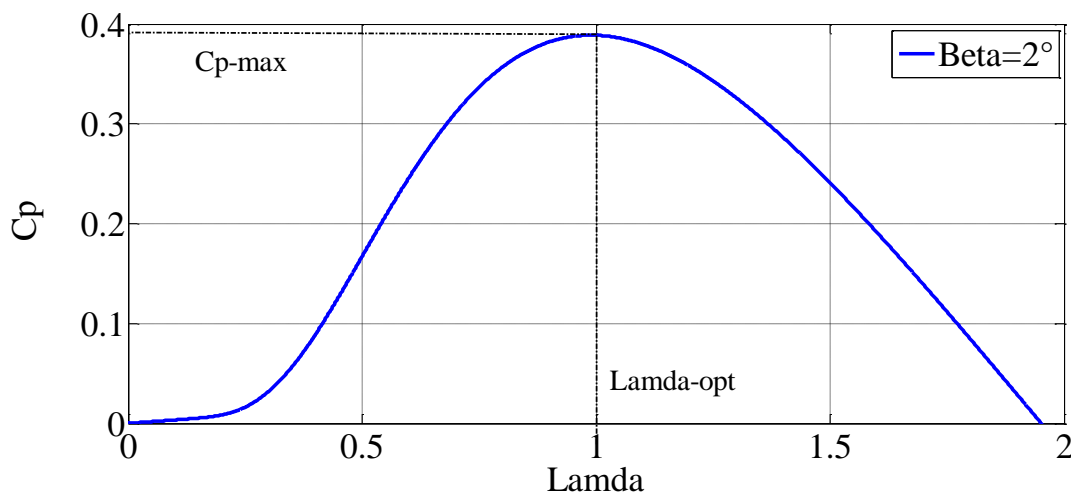


Figure III.8 : Variation du coefficient de puissance C_p par rapport au rapport de vitesse de pointe λ pour $\beta = 2$ [deg].

Dans ce travail, le MPPT optimal basé sur le couple a été utilisé car il convient au couplage avec la stratégie de contrôle de couple du GRV. Les moins conventionnels considèrent que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est inconnue. Dans ce cas, le MPPT estime le couple optimal à partir du modèle inverse de l'éolienne.

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue pour $\lambda_{opt} = 1$ et $C_p = 0,39$.

Comme le montre la figure (III.9), le système de contrôle MPPT doit extraire la puissance maximale P_{max} de la turbine ; ce qui équivaut à trouver la vitesse de rotation optimale V_{opt} pour la vitesse du vent ; basé sur λ_{opt} et P_{max} et pour un rendement maximum C_{pmax} . Au final, le couple optimal trouvé doit être appliqué à la turbine pour avoir le point MPPT [96].

On constate que la valeur optimale du coefficient de puissance est obtenue pour λ_{opt} et C_p , égales respectivement à 1 et 0,39.

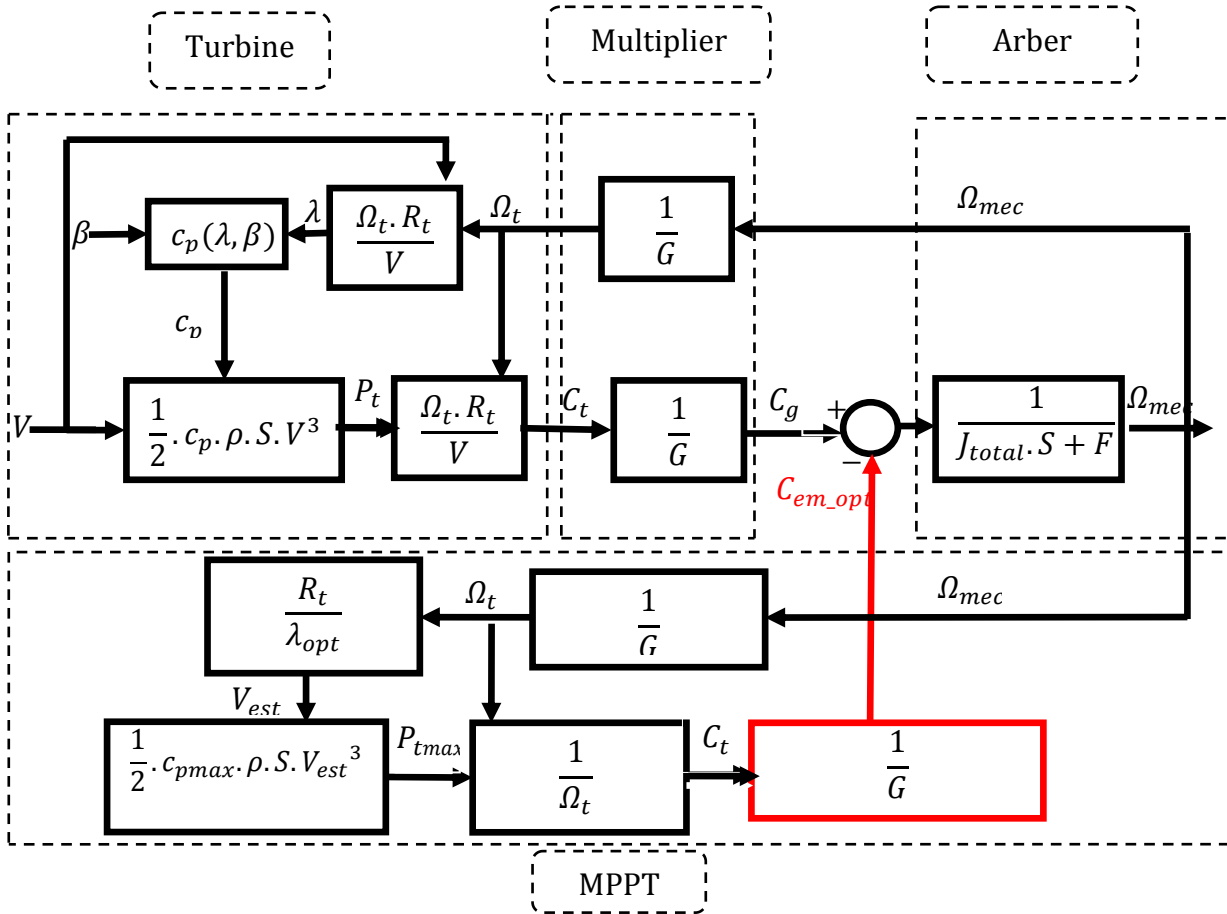


Figure III.9: Schéma fonctionnel de la maximisation de la puissance MPPT de l'éolienne.

La figure (III.9) illustre la manière d'utiliser le système de contrôle MPPT afin d'obtenir la valeur de couple maximale, en commençant par les équations (III.2) et (III.7) pour déterminer la vitesse optimale du vent :

$$V_{est} = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{\lambda_{opt}} \tag{III.12}$$

Après avoir déterminé la valeur optimale du facteur de puissance C_p en conjonction avec la vitesse optimale du vent V_{est} , on obtient la puissance maximale pour la turbine P_{tmax} et le couple aérodynamique :

$$P_{tmax} = \frac{1}{2} \cdot C_{pmax} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{est}^3 \tag{III.13}$$

$$C_t = \frac{P_{tmax}}{\Omega_t} \tag{III.14}$$

Après avoir obtenu le couple de la turbine à l'aide de l'équation (III.16), le couple optimal C_g peut être calculé et comparé au couple de référence de la turbine ; pour obtenir la vitesse mécanique optimale :

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{(\beta_s + \beta_r)}{2} \quad (\text{III.15})$$

$$C_g = \frac{1}{\Omega_t} C_t \quad (\text{III.16})$$

III.5 Modèle dynamique des trois phases du GRV 12/8 basé sur la MEF

Le modèle GRV 12/8 est une représentation mathématique d'un système d'alimentation électrique, permettant la simulation et l'analyse du comportement du système dans différentes conditions. Les modèles en régime permanent sont utilisés pour analyser le comportement du système dans des conditions constantes, tandis que les modèles dynamiques prennent en compte la nature variable dans le temps des conditions du système, ce qui est particulièrement utile pour étudier le comportement transitoire et prédire les réponses du système aux perturbations [23], [45].

Un type intéressant de générateur se caractérise par une structure simple sans enroulement sur le rotor. Le stator et le rotor ont des pôles proéminents, et chacune des phases et/ou les trois enroulements peuvent être modélisés à l'aide de l'équation électrique simple suivante :

$$V_j = R_s i_j + \frac{d\phi_j(\theta, i)}{dt} : j = 1, 2, 3. \quad (\text{III.17})$$

où R_s et ϕ sont respectivement la résistance et le flux par phase ; j indique l'ordre des trois phases.

Ainsi, le flux total peut être calculé en utilisant l'intégrale suivante:

$$\phi_j = \int (V_j - R_s i_j) dt : j = 1, 2, 3. \quad (\text{III.18})$$

Pour déterminer le courant électrique, il est nécessaire d'estimer la valeur de l'inductance $L(\theta, i)$ afin d'utiliser l'équation du flux et de l'inductance (Equation I.12) comme suit :

$$i_j = \frac{\phi_j}{L(\theta, i)} : j = 1, 2, 3. \quad (\text{III.19})$$

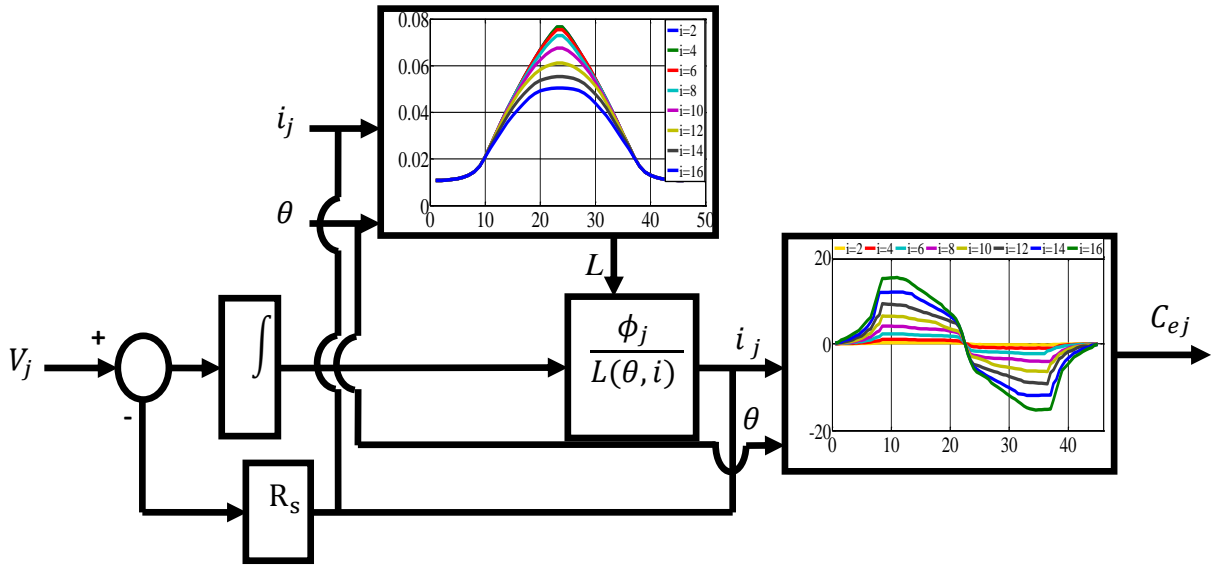


Figure III.10: Diagramme d'un modèle non-linéaire pour une phase de la GRV.

La figure (III.10) illustre un modèle non-linéaire pour une phase de la GRV [53]. Ce diagramme n'est qu'une des nombreuses représentations possibles. Il existe d'autres approches pour accéder au modèle non-linéaire de la GRV, comme l'utilisation des caractéristiques du flux total $d\phi_j(\theta, i)$ ou des caractéristiques du couple $C_{e_j}(i, \phi)$...ect [23].

De plus, l'aspect mécanique est un composant critique dans les machines électromécaniques, comme le montre le GRV étudié [80], [81]. Le modèle mécanique peut s'exprimer de la manière suivante :

$$C_e(\theta, i) = C_m(\theta, i) + f \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{d\theta} \tag{III.20}$$

où le paramètre J représente le moment d'inertie ; ω est la vitesse du rotor ; f est le coefficient de frottement ; et C_m est la charge de couple.

Le couple électromagnétique $C_{ej}(\theta, i)$ est le couple généré par chaque phase, et $C_e(\theta, i)$ est le couple électromagnétique total obtenu à partir de l'équation :

$$C_{ej}(\theta, i) = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} : j = 1, 2, 3. \tag{III.21}$$

$$C_e(\theta, i) = \sum_{j=1}^n C_{ej}(\theta, i) \tag{III.22}$$

La figure (III.11) illustre un modèle GRV dynamique triphasé basé sur le modèle intégré précédent [82]. Le modèle dynamique proposé permet d'estimer le couple instantané au niveau du composant mécanique en utilisant le courant de phase mesuré et les caractéristiques statiques. Le couple global est calculé comme la somme des couples de sortie de chaque phase.

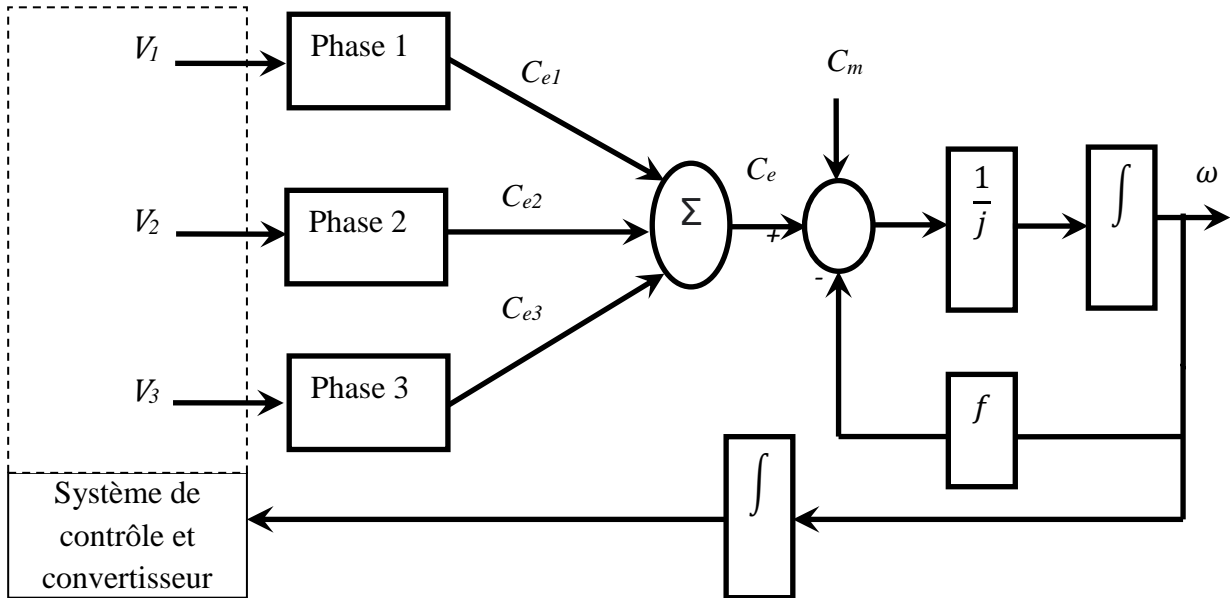


Figure III.11: Modèle dynamique des trois phases du GRV 12/8.

III.6 Stratégie de commande HCC de la GRV

III.6.1 Convertisseur électronique de puissance

La plupart des applications utilisent un pont déséquilibré pour contrôler le courant dans la plage d'hystérésis. Le pont asymétrique autorise trois états de tension : $+V_{dc}$, 0 et $-V_{dc}$. Ainsi, selon la méthode de contrôle, tous ces états sont utilisés pour contrôler le générateur de réluctance variable [31], [74], [103]. Chaque état est contrôlé indépendamment à l'aide d'une hystérésis ou d'un contrôleur PWM.

Lorsque les interrupteurs T_1 et T_2 sont fermés, correspondant à la magnétisation du GRV (Figure III.12.a), la tension appliquée à la phase 1 est celle du bus DC ($V = +V_{dc}$). Lorsque ces interrupteurs sont ouverts et que les diodes D_1 et D_2 sont conductrices, la tension appliquée s'inverse et devient $V = -V_{dc}$, ce qui correspond à la génération GRV (Figure III.12.c). Il existe une séquence intermédiaire supposée roue libre où les interrupteurs T_1 et la diode D_1 (ou les interrupteurs T_2 et la diode D_2) sont fermés, conduisant à un court-circuit de la phase 1 ($V = 0$, figure III.12.b).

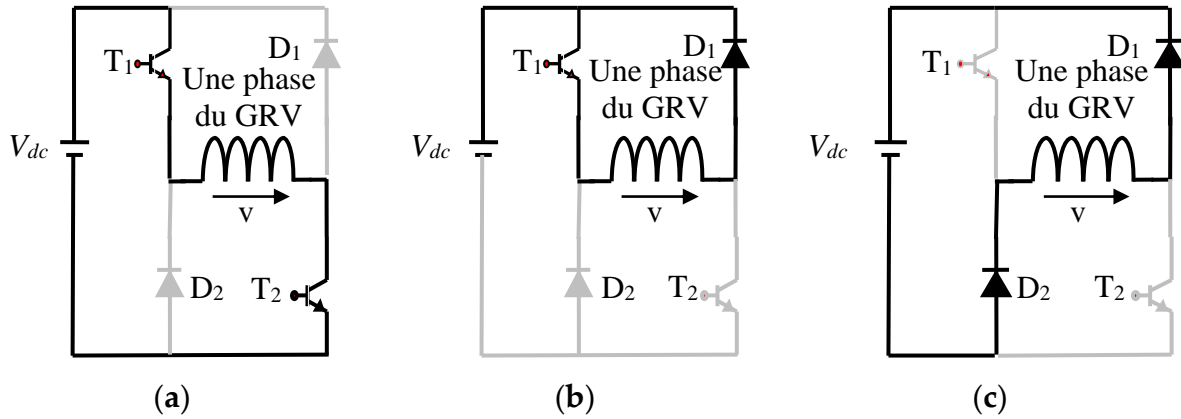


Figure III.12 : États possibles de la tension d'alimentation pour une phase du GRV: (a) Tension en position non alignée positive $+V_{dc}$: deux interrupteurs sont fermés ; (b) Tension zéro « 0 » : un interrupteur est ouvert et l'autre est fermé ; (c) Tension négative $-V_{dc}$: deux interrupteurs sont fermés.

La figure (III.13) représente le schéma synoptique du convertisseur en pont asymétrique associé et de notre machine étudiée afin d'expliquer les étapes de modélisation GRV 12/8.

Le mode générateur introduit un problème qui n'existe pas dans le fonctionnement du moteur en raison de la force contre-électromotrice ($L < 0$). En effet, si la force contre-électromotrice est supérieure à la tension du bus DC (V_{dc}) alors, le courant augmente lorsque les diodes D1 et D2 sont conductrices et il n'y a plus de configuration où le courant diminue. En conséquence, le courant augmente sans aucun contrôle du convertisseur.

Afin de générer du courant avec un GRV, il est nécessaire d'alimenter ses phases lorsque l'inductance diminue. En effet, c'est dans cette région que FEM est négatif et permettra la production d'énergie électrique. L'augmentation de la vitesse ω joue également en faveur des possibilités d'écoulement, puis qu'elle se produit dans l'expression précédente de e (Equation I.15).

Cependant, si nous imposons une tension carrée aux bornes de chaque phase, sans découpage, nous ne pouvons pas contrôler la forme d'onde du courant. La seule façon d'agir sur cette dernière est donc de passer par les deux angles de contrôle : θ_{on} et θ_{off} .

La figure (III.13) montre le principe de fonctionnement en mode générateur qui est assez simple ; sa complexité réside dans le contrôle du convertisseur associé. En effet, les séquences d'allumage (θ_{on}) et d'extinction (θ_{off}) doivent être bien synchronisées avec les positions relatives des dents rotor-stator (nécessité d'un capteur de position) lors des phases d'excitation et de génération [104], [105].

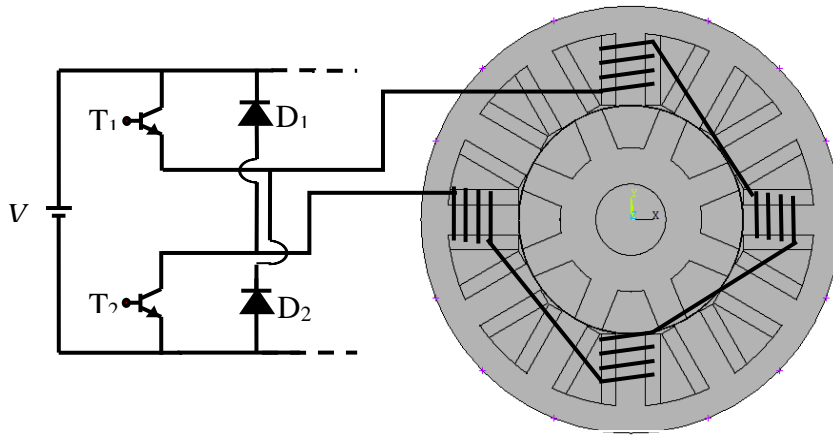


Figure III.13: Schéma synoptique du GRV 12/8 associé à un convertisseur en pont asymétrique.

Les diverses méthodes de contrôle des machines à reluctance variable à double salience, qui se concentrent principalement sur l'alimentation du moteur, comprennent :

- Le contrôle en pleine tension (pour les hautes vitesses).
- La modulation de la largeur d'impulsion de la tension d'alimentation (MLI).
- Le réglage des courants par hystérésis.

Dans le paragraphe suivant, seule la stratégie de contrôle des courants par hystérésis sera abordée, car elle est la plus couramment utilisée [23].

III.6.2 Stratégies de commutation

La gestion des machines à reluctance variable (RV) représente un défi technique nécessitant l'intervention de spécialistes hautement qualifiés. Chaque phase est régulée de manière autonome, soit par le biais d'un contrôleur d'hystérésis, soit via la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ce pont asymétrique permet trois états de tension : $+V_{dc}$, 0 et $-V_{dc}$. Ainsi, en fonction de la méthode de contrôle, soit les deux, soit les trois états sont utilisés.

Lorsqu'un contrôle simple par hystérésis ou un contrôle de couple moyen est réalisé, une valeur spécifique de courant est maintenue entre les angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}). Ce courant doit être maintenu dans les limites de la bande d'hystérésis en utilisant une stratégie de commutation dure, souple ou hybride [23], [31], [74], [106], comme illustré dans la figure (III.14).

- **La commutation dure :** Lorsque les deux transistors sont activés, la valeur du courant augmente et une tension positive équivalente à la tension du bus continu V_{dc} est appliquée

à la phase. En revanche, lorsque la limite supérieure de la bande d'hystérésis est atteinte et que le courant doit diminuer, les deux transistors sont désactivés. Le courant circule alors à travers les diodes, et une tension négative $-V_{dc}$ est appliquée à la phase.

- **La commutation souple:** Si lorsqu'une pente négative du courant est définie comme référence, l'application d'une tension nulle à la phase peut ne pas toujours suffire à maintenir le courant de phase dans les limites requises. Dans de tels cas, il est nécessaire d'avoir recours à une commutation dure.
- **Un commutation hybride :** Cette approche permet l'utilisation des trois états de tension autorisés par le pont asymétrique. Dans cette stratégie, la bande d'hystérésis comporte une valeur seuil supérieure dépassant la valeur maximale de la bande définie. Lorsque le courant atteint la limite supérieure de la bande, un transistor est désactivé et aucun voltage n'est appliqué à la phase. Si le courant continue d'augmenter, le deuxième transistor est activé et une tension négative $-V_{dc}$ est appliquée à la phase. Cette méthode réduit considérablement la fréquence de commutation et les pertes qui y sont associées, mais elle crée une bande plus large que l'autre.

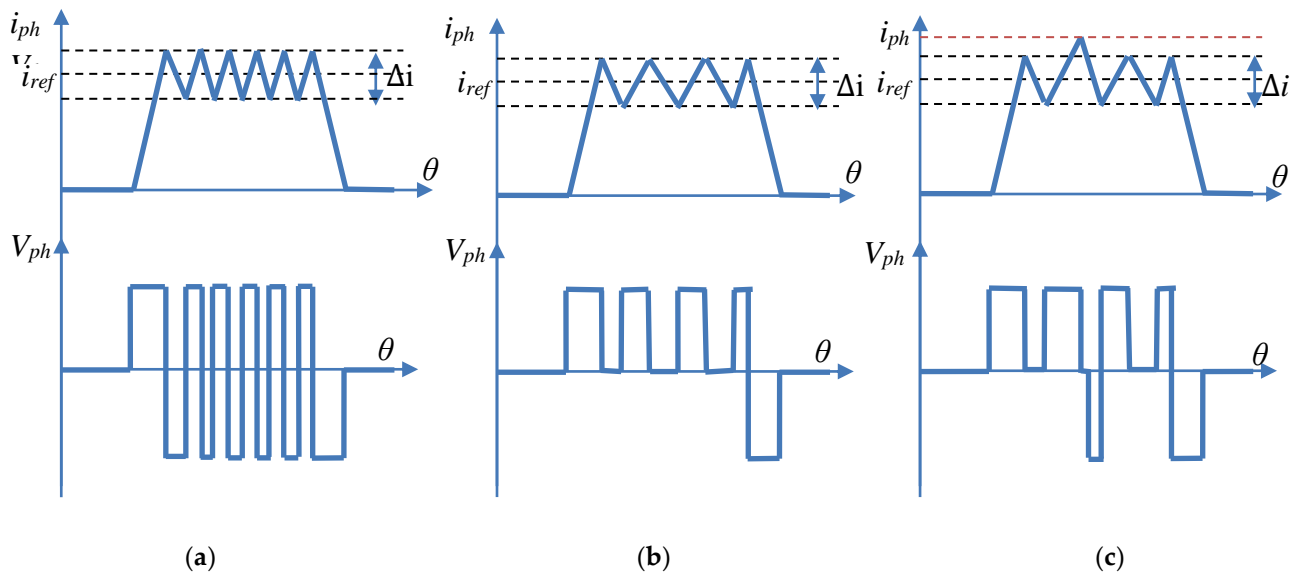


Figure III.14: Contrôle des systèmes de conversion de puissance (courant d'hystérésis) par méthodes dures et souple et hybrides:(a) une commutation dure;(b) une commutation souple;(c) un commutation hybride.

La stratégie de commutation adoptée dans notre étude est la commutation dure en utilisant un simple comparateur d'hystérésis. Son objectif est de maintenir le courant électrique de chaque phase dans une courbe circulaire, comme illustré dans la figure (III.15). D'autre part, l'activation du courant de chaque phase dépend de la position du rotor.

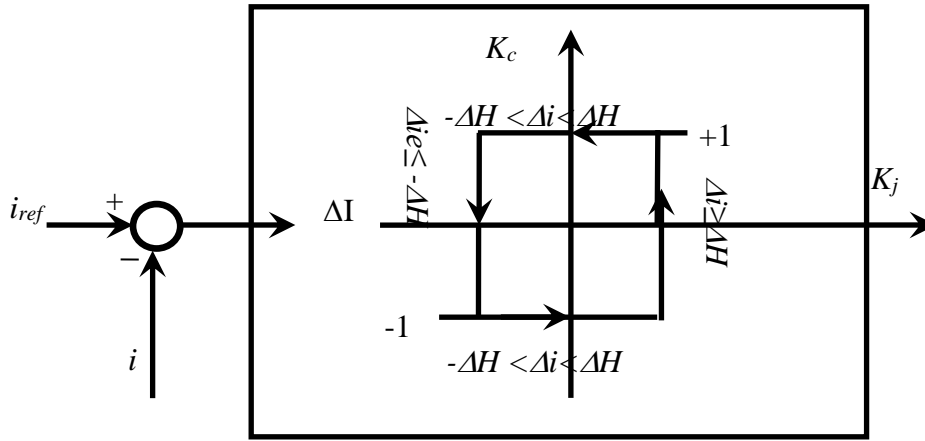


Figure III.15: Comparateur de courant avec hystérésis haut du formulaire.

Tableau III.1: Stratégie de commutation basée sur la position du rotor.

Position de rotor θ	ΔI	K_j
$\theta_{on} \leq \theta < \theta_{off}$	$\Delta I \geq \Delta H$	+1
	$-\Delta H < \Delta I < \Delta H$	+1/-1
	$\Delta I \leq -\Delta H$	-1/0
$\theta_{off} \leq \theta < \theta_t$	$\forall \Delta I$	-1
$\theta_t \leq \theta$	$\forall \Delta I$	0

Le tableau (III.1) présente les états des interrupteurs d'un pont asymétrique en fonction des angles de commutation pour la mise sous tension, la mise hors tension d'une phase et la démagnétisation (θ_{on} , θ_{off} , θ_t), ainsi que la position du courant par rapport à la bande ΔH , afin de contrôler les signaux de commutation envoyés vers le convertisseur électronique et d'assurer une commutation dure, comme illustré dans la figure (III.14.a).

III.6.3 Contrôle du couple par contrôle HCC

Chaque phase est contrôlée indépendamment par un contrôle d'hystérésis. La comparaison entre le couple souhaité et celui mesuré fournit la valeur du courant de référence grâce à un contrôleur PI classique. Le courant de contrôle d'hystérésis HCC génère des signaux via le comparateur d'hystérésis pour avoir le courant mesuré comme courant de référence. Le courant doit être contrôlé entre les limites de la bande d'hystérésis en utilisant une stratégie de commutation dure, douce ou hybride et entre les limites des angles de commutation : θ_{on} et θ_{off} . Dans le contrôle proposé illustré à la figure (III.16), la commutation dure a été adoptée.

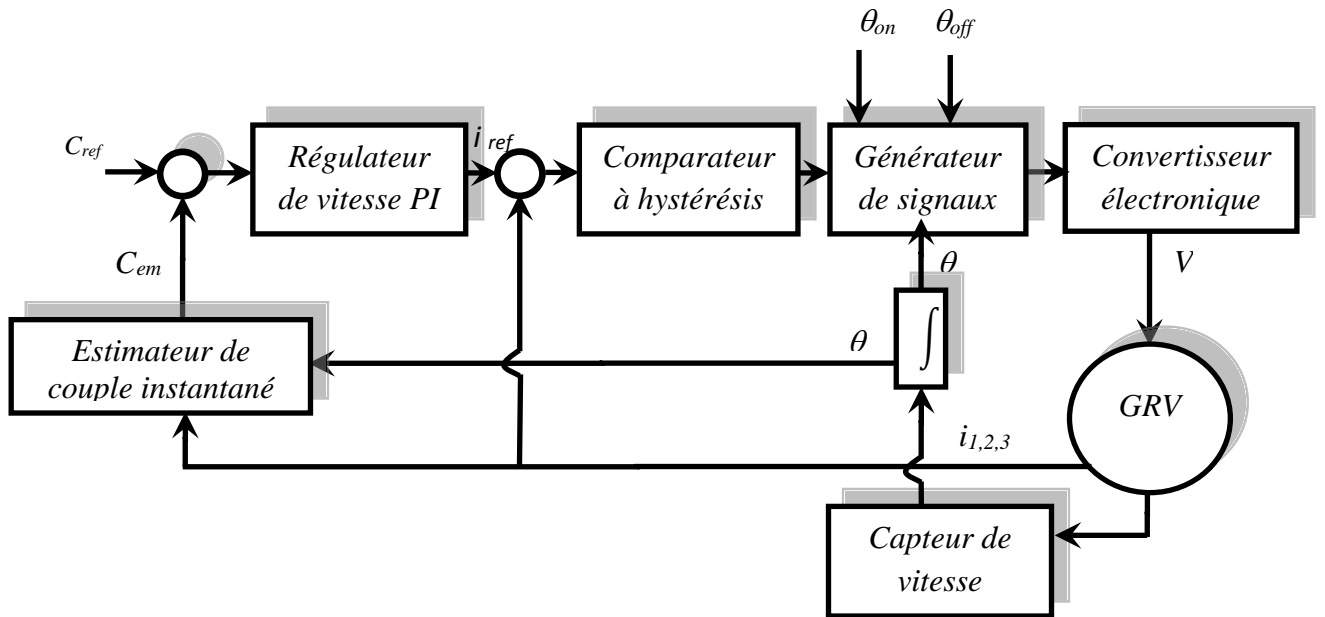


Figure III.16: Courant de contrôle d'hystérésis proposé avec boucle de contrôle de couple.

III.7 Association et simulation de la commande HCC avec MPPT de la turbine et la GRV

Nous avons présenté le modèle de la turbine dans ce chapitre. Ensuite, nous aborderons le développement des associations entre le MPPT de la turbine et la GRV (étudiée dans le chapitre précédent). Il est important de noter que ce dernier n'exige pas des vitesses de vent élevées, contrairement à d'autres systèmes qui requièrent une vitesse élevée.

La figure (III.17) montre un organigramme illustrant comment réaliser la combinaison d'un contrôle de couple indirect basé sur HCC avec un contrôle indirect de la puissance (indirect power control (IPC)) de couple optimal MPPT [45].

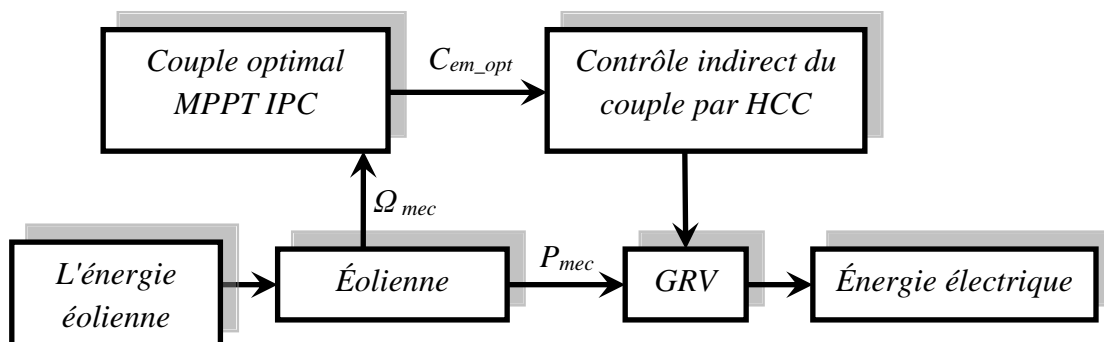


Figure III.17: Organigramme global de la technique d'association proposée.

À partir de l'organigramme précédent, le contrôle de couple en boucle fermée du HCC tout en développant son association avec la turbine MPPT et avec le GRV a été construit comme le montre la figure (III.18).

Dans cette méthode de contrôle, le MPPT génère un signal de couple de référence qui représente le couple optimal pour une puissance maximale. Le signal de couple estimé est comparé au couple de référence de traitement à l'aide d'un contrôleur PI.

Le contrôleur de vitesse génère la valeur actuelle nécessaire pour assurer l'égalité entre le couple mesuré et celui de référence. La vitesse ne sera donc pas contrôlée.

Le courant requis est pris comme référence pour la boucle de contrôle HCC. Dans cette boucle, la quantité de courant dans la bobine de phase du générateur est directement mesurée et comparée au courant de référence afin de déterminer le défaut. L'erreur de courant est compensée par la stratégie de commutation utilisée par la comparaison d'hystérésis. En conséquence, le comparateur de courant à hystérésis génère des signaux d'état pour toutes les phases d'activation en fonction de l'erreur de courant. Le générateur de signaux est combiné avec des boîtiers de commutation de phase qui dépendent des angles de commutation pour la phase d'activation, de désactivation et de démagnétisation.

Pour contrôler les signaux de commutation : $(\theta_{on}, \theta_{off})$, ceux-ci sont acheminés vers le transformateur électronique [45].

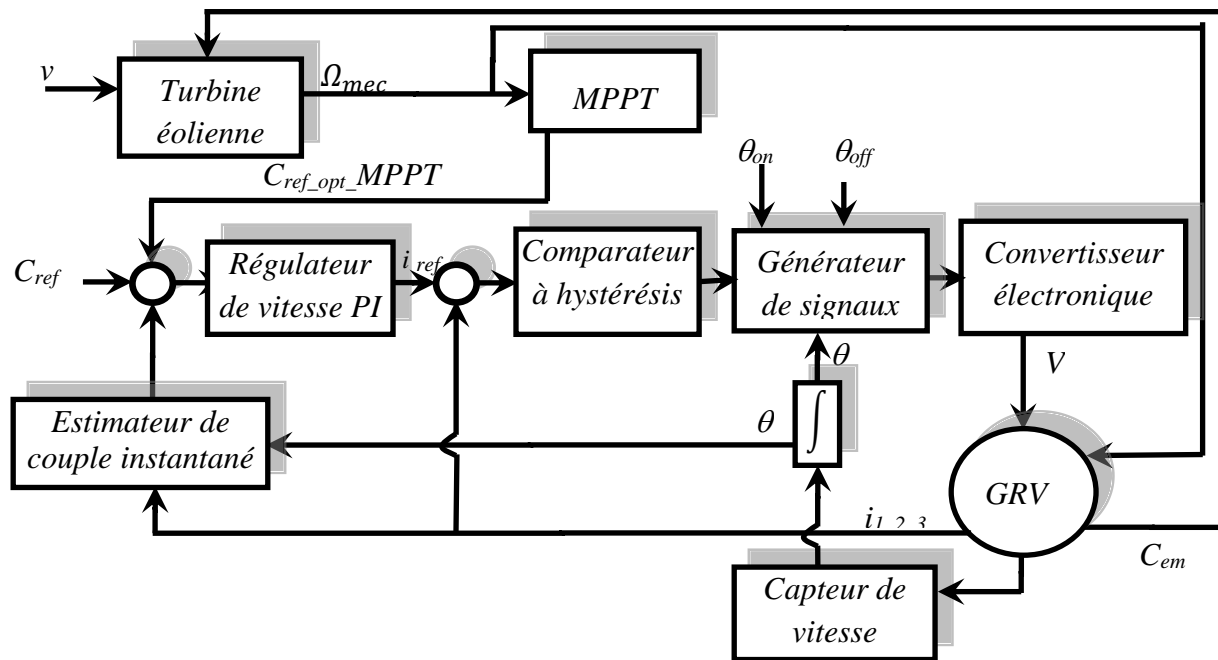


Figure III.18: Commande Association et simulation de la commande HCC avec MPPT de turbine et la GRV.

Le mécanisme du système de contrôle HCC donne des étapes logiques pour avoir un couple de référence en contrôlant le courant électrique. Notamment sans contrôle de vitesse, cela est dû au fait que l'importance dans cette opération est le couple électromagnétique pour la puissance maximale, alors que ; la vitesse sera générée automatiquement selon l'équation mécanique.

III.8 Résultats de simulation associés au contrôle HCC de la GRV par la technique MPPT

Le contrôle du courant de contrôle par hystérésis est l'une des techniques efficaces pour réduire le couple souhaité dans le GRV. Les techniques de contrôle HCC sont mises en œuvre pour GRV 12/8 dans différentes conditions de fonctionnement. Elle est réalisée en tenant compte de l'importance des paramètres de contrôle que sont les angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}) pour une vitesse correspondant à 1000 tr/min.

Pour la simulation d'éolienne basée sur GRV, la vitesse de la turbine a été considérée comme variant selon trois niveaux, comme illustré dans la figure (III.19). Dans ce contexte, une simulation non contrôlée de l'éolienne est réalisée pour étudier la réponse dynamique du système en utilisant une vitesse de vent variable. . Dans ce test, le générateur de vitesse du vent fournit une vitesse du vent de 12 m/s pendant une période de 0 à 3 s, 10 m/s pour la période de 3 à 6 s et une vitesse du vent de 14 m/s pour la période de 6 à 9 s (Figure III.19).

La figure (III.20) montre la vitesse mécanique du GRV, où l'augmentation de la vitesse est évidemment liée à l'augmentation de la vitesse du vent, entraînant une augmentation de la puissance générée[45].

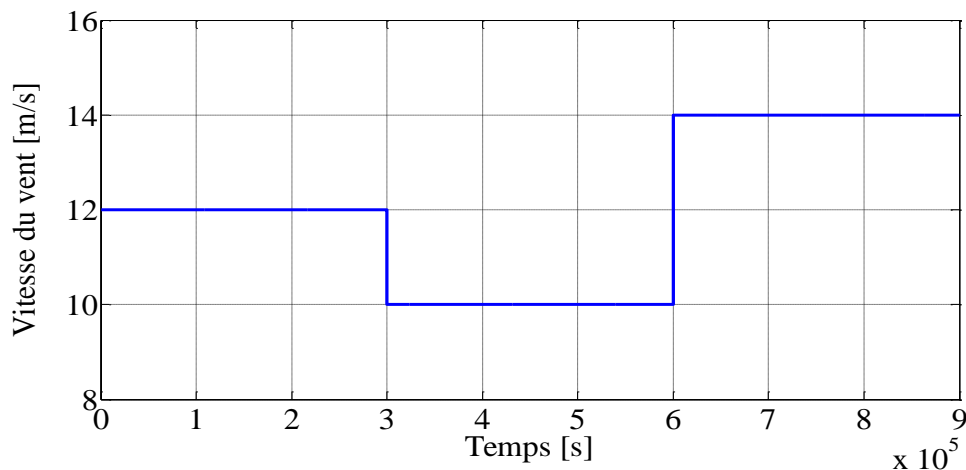


Figure III.19 : Vitesse du vent adoptée à des fins de simulation.

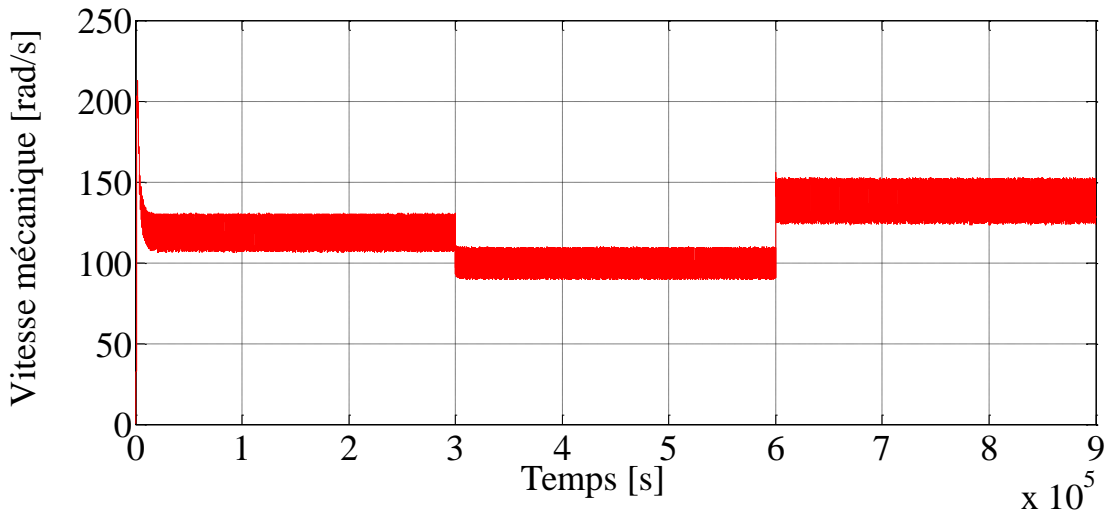


Figure III.20 : Vitesse mécanique GRV.

Dans ce qui suit, les résultats seront traités avec la variation des angles de commutation : ($\theta_{on}=19[\text{deg}]$, $\theta_{off}=38[\text{deg}]$) et ($\theta_{on}=22[\text{deg}]$, $\theta_{off}=35[\text{deg}]$).

Sur la figure (III.21) et la figure (III.22), la tension d'alimentation est obtenue à partir de la batterie d'excitation et du convertisseur électronique (le pont asymétrique). Ici, il faut réaliser un ajustement de tension en fonction de la variation de la vitesse afin de s'assurer que le courant de référence correspond au couple de référence optimal afin de générer la puissance maximale de la turbine.

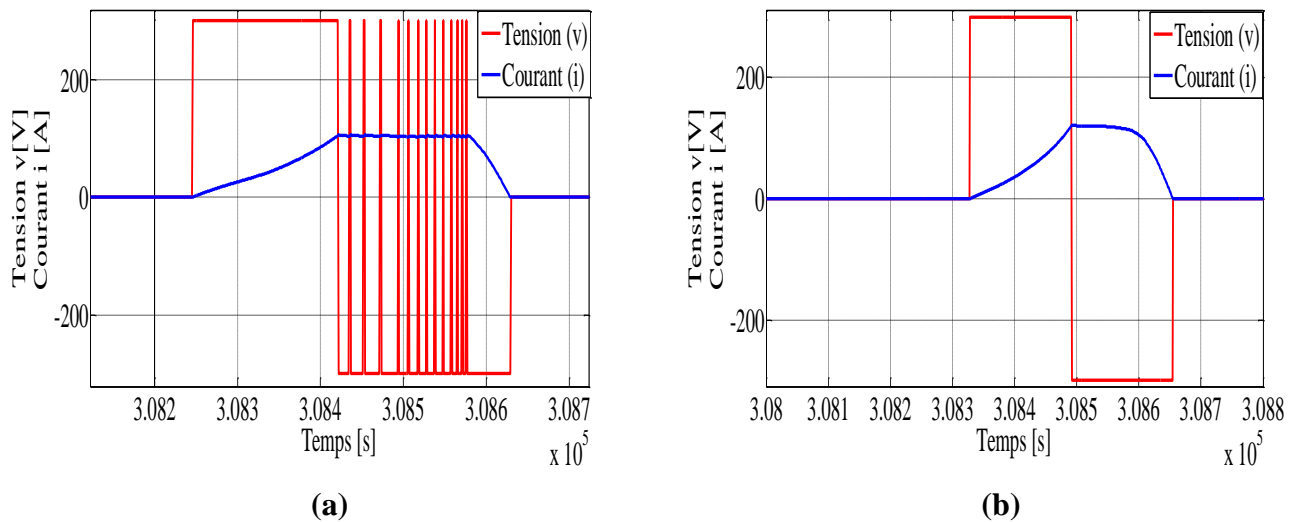


Figure III.21: Tension d'alimentation et courant électrique du générateur à réluctance variable : (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.

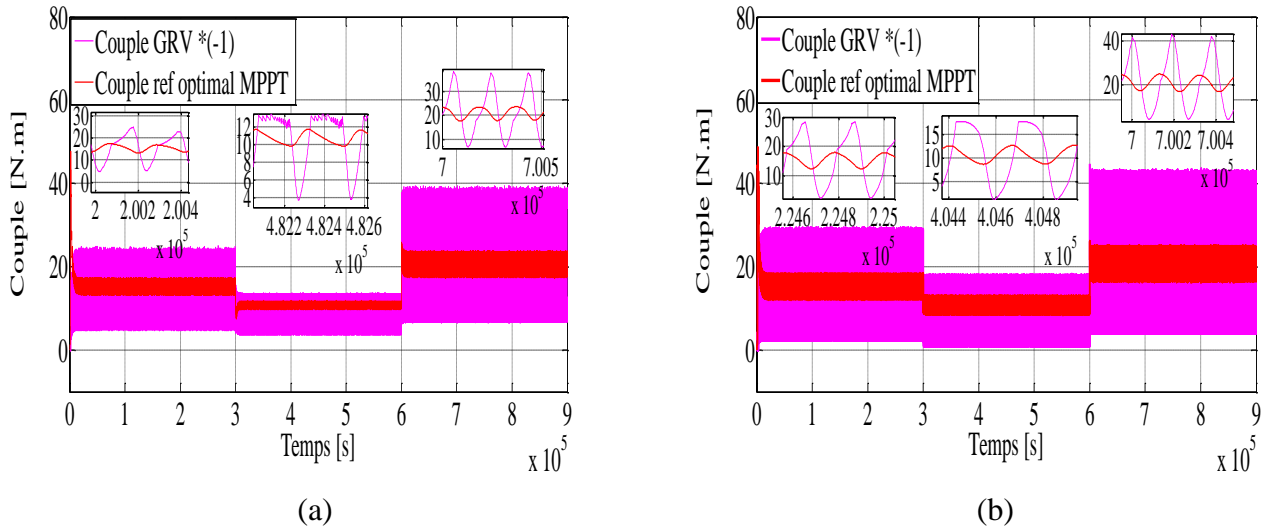


Figure III.22: Couple de référence optimal du MPPT et du générateur de réluctance variable: (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.

La figure (III.22) présente la réponse instantanée du couple GRV ; selon le couple de référence optimal MPPT pour deux cas d'angles de commutation. Les ondulations de couple présentes sur la figure (III.22.b) sont inférieures à celles illustrées sur la figure (III.22.a). Il apparaît clairement qu'il est important de choisir les angles de commutation appropriés afin d'obtenir de meilleures performances. De plus, la réduction des ondulations offre des avantages en termes d'amélioration des performances en matière de bruit et de vibration et augmente la durée de vie utile du générateur.

La figure (III.23) présente les courbes des coefficients de puissance des éoliennes. Bien que le rendement moyen d'une telle éolienne se situe normalement entre 20 % et 40 %, il varie fortement en fonction de la vitesse du vent. Le rendement mécanique de l'éolienne est le plus élevé (39% dans ce cas) selon le profil donné dans la figure (III.19). Ici, le système de contrôle que nous proposons est réalisé dans le but de maximiser l'efficacité du système éolien indépendamment de la vitesse du vent.

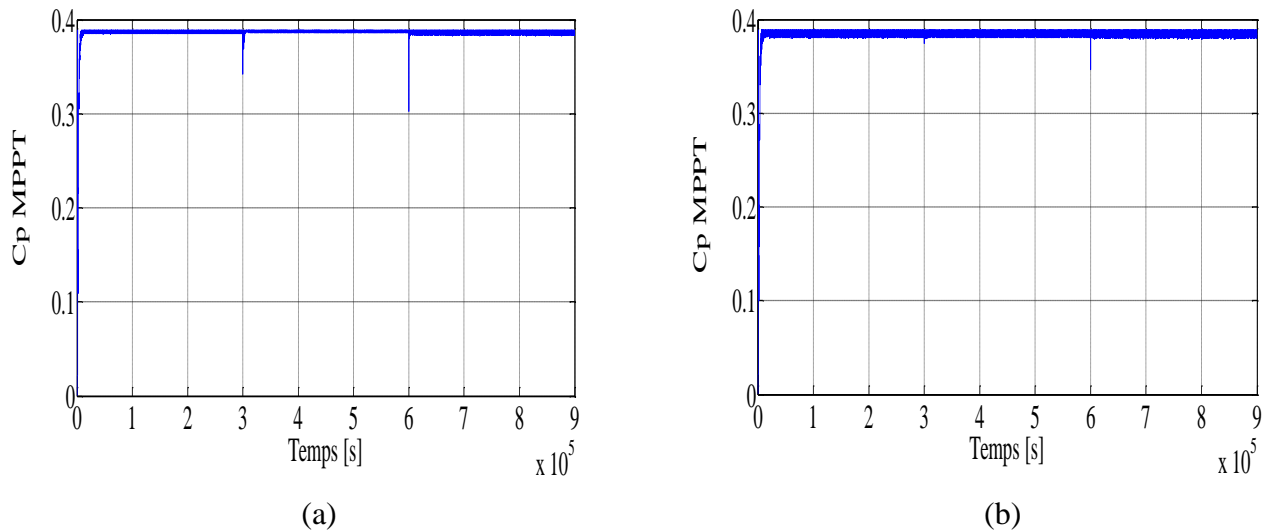


Figure III.23 : Rendement énergétique MPPT de l'éolienne associée au GRV: (a) Pour $\theta_{on}=19[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=38[\text{deg}]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[\text{deg}]$ et $\theta_{off}=35[\text{deg}]$.

Les figures (III.24) et (III.25) montrent respectivement le courant contrôlé par hystérésis et les différentes courbes de puissances de sortie pour différentes vitesses de vent et angles de commutation : $(\theta_{on}= 19[\text{deg}], \theta_{off}= 38[\text{deg}])$ et $(\theta_{on}= 22[\text{deg}], \theta_{off}= 35[\text{deg}])$. L'impact de la modification des angles de commutation sur les performances de couple, le courant, l'efficacité énergétique et la qualité de l'énergie a été clairement démontré. De plus, l'importance du MPPT a également été soulignée. En effet, en comparant les cas d'angles de commutation $(\theta_{on}= 19[\text{deg}], \theta_{off}= 38[\text{deg}])$ et $(\theta_{on}= 22[\text{deg}], \theta_{off}= 35[\text{deg}])$, comme le montrent les figures (III.18) et figure (III.19), on peut observer que les oscillations du coefficient de puissance C_p ou les ondulations de couple sont nettement diminuées dans le cas où $(\theta_{on} = 19[\text{deg}], \theta_{off}= 38[\text{deg}])$ par rapport au cas où $(\theta_{on} = 22[\text{deg}], \theta_{off}= 35[\text{deg}])$. En conséquence, il devient nécessaire de rechercher des algorithmes appropriés pour déterminer les paramètres de contrôle corrects en temps réel pour des performances optimales [45].

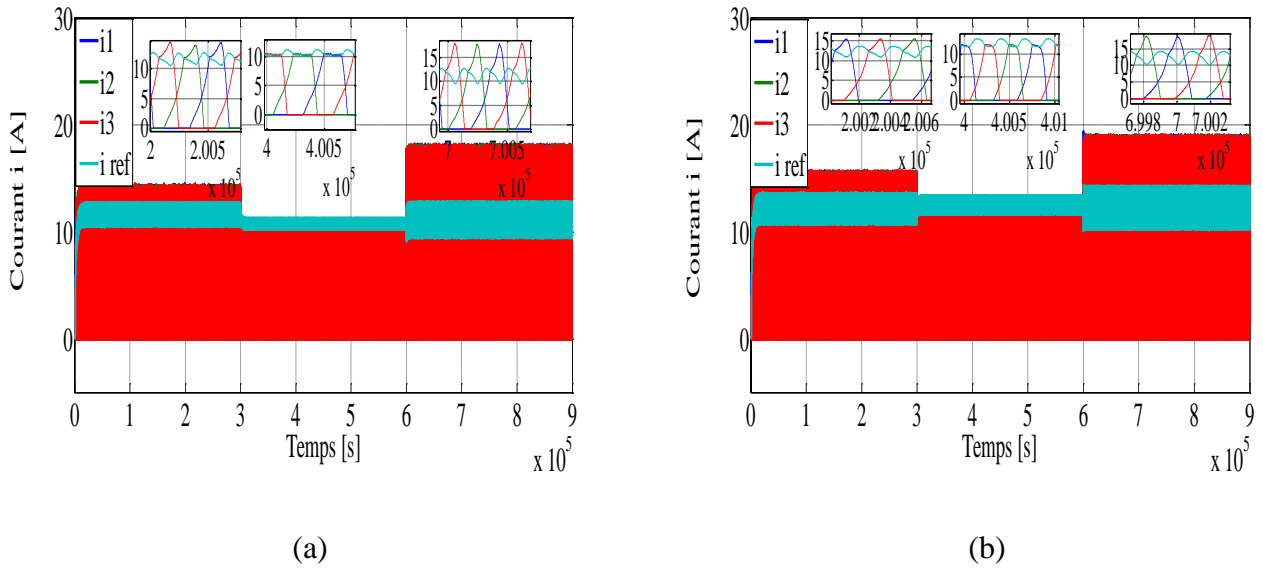


Figure III.24 : Courant contrôlé par le comparateur d'hystérésis pour les trois phases du GRV12/8 :(a) Pour $\theta_{on}=19[deg]$ et $\theta_{off}=38[deg]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[deg]$ et $\theta_{off}=35[deg]$.

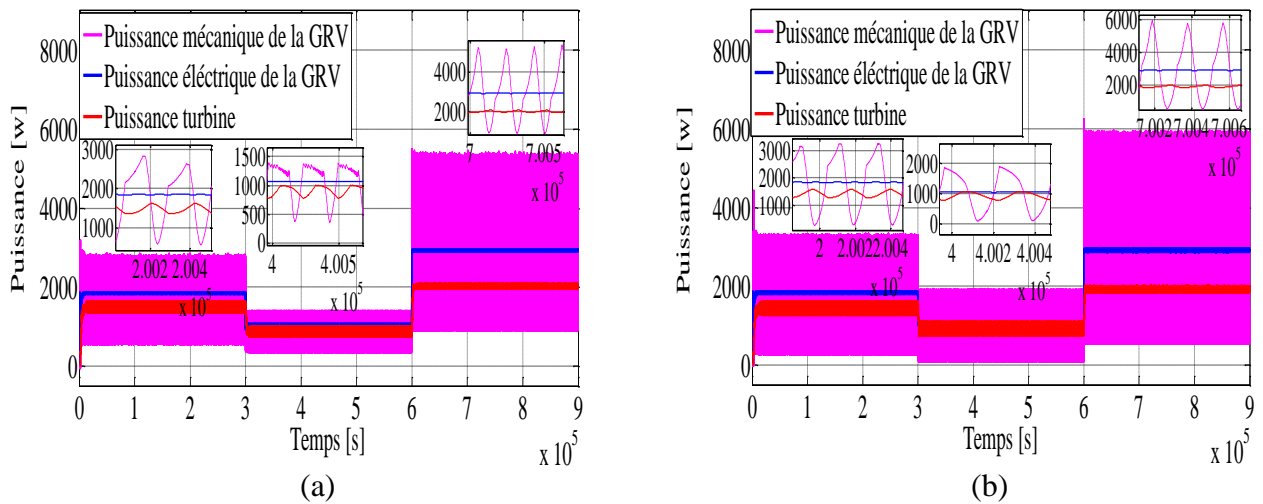


Figure III.25 : Puissances GRV 12/8 et turbine utilisant le contrôle HCC et MPPT : (a) Pour $\theta_{on}=19[deg]$ et $\theta_{off}=38[deg]$; (b) Pour $\theta_{on}=22[deg]$ et $\theta_{off}=35[deg]$.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord procédé à la modélisation dynamique de la génératrice à RV en nous basant sur les caractéristiques statiques obtenues par la méthode des éléments finis (MEF). Ce modèle nous a permis de trouver une solution pour gérer et contrôler le générateur en prenant en compte tous les détails des caractéristiques non-linéaires. Le chapitre aborde également la technologie de contrôle indirect du couple et une technique de suivi du point de puissance maximale pour une éolienne basée sur un générateur à réluctance variable GRV 12/8 afin d'optimiser les performances globales. Le

MPPT IPC, basé sur le couple optimal utilisant les modèles d'éoliennes, a été utilisé pour sa capacité à être combiné avec le contrôle de couple GRV. Le modèle GRV est basé sur la méthode des éléments finis. La stratégie de courant de contrôle par hystérésis du générateur à réluctance variable a été utilisée pour contrôler indirectement le couple instantané à l'aide d'un convertisseur en pont asymétrique. La technique consistant à combiner le contrôle indirect du couple du GRV 12/8 par HCC avec le MPPT IPC, basée sur le couple optimal, a été utilisée comme référence dans l'ITC afin de donner la performance optimale du coefficient de puissance de l'éolienne.

Des simulations approfondies ont été réalisées simultanément en tenant compte de la technique MPPT et de différentes conditions physiques, telles que la vitesse du vent et les variations des angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}). Les résultats obtenus mettent clairement en évidence les performances de contrôle des éoliennes basées sur GRV tout en illustrant l'impact important des angles de commutation sur les performances opérationnelles et la qualité de l'énergie produite par le générateur à réluctance variable.

En termes de perspectives, les recherches futures devraient être orientées vers le développement d'algorithmes appropriés pour déterminer les bons paramètres de contrôle en temps réel pour des performances optimales. À des fins de validation expérimentale, un banc d'essai à l'échelle du laboratoire est en cours de développement.

Chapitre IV

Nouvelles techniques pour

MPPPT dans le contrôle

GRV

IV.1 Introduction

De nombreuses études de recherche ont utilisé des techniques modernes avancées pour améliorer les performances des GRV grâce à l'optimisation algorithmique et des paramètres. Dans une de ces études [107], introduit une stratégie optimale de contrôle direct du couple (DTC) avec flux variable (VF-DTC) pour un GRV. Les performances du système sont encore améliorées grâce à l'utilisation d'un contrôle de rejet actif linéaire des perturbations (LADRC) amélioré et d'un algorithme d'optimisation hybride (HOA). Le VF-DTC réduit l'ondulation du couple en ajustant l'amplitude du flux, tandis que le LADRC remplace le contrôle PI conventionnel dans le contrôleur de vitesse, ce qui améliore la vitesse et la robustesse de l'observateur. Un HOA optimise les paramètres de contrôle, ce qui donne lieu à des performances dynamiques satisfaisantes. La validation expérimentale sur un GRV 12/8 démontre la supériorité du VF-DTC sur le DTC conventionnel, le VF-DTC avec LADRC et le VF-DTC avec PI utilisant HOA, en termes de réponse en vitesse, de capacité anti-perturbation et de réduction des ondulations de couple. Dans une autre étude, [108] propose une méthode de contrôle optimale de la fonction de partage de couple (TSF) pour les GRV, qui combine le LADRC et un algorithme d'optimisation du coyote modifié (MCOA). Le TSF par morceaux réduit efficacement l'ondulation du couple sans affecter les caractéristiques du courant, et l'observateur d'état étendu linéaire amélioré améliore la capacité anti-perturbation et la réduction de l'ondulation du couple. L'automatisation du réglage des paramètres via MCOA contribue à une amélioration globale des performances.

Dans les sections précédentes, ce chapitre a présenté des technologies et algorithmes importants proposés par la communauté scientifique dans des recherches récentes sur les génératrices à réluctance variable (GRV). Ce qui distingue l'algorithme décrit dans la référence [82] et décrit au chapitre (IV) des autres est sa perspective unique sur le générateur à réluctance variable (GRV), offrant de nouvelles perspectives en dévoilant des caractéristiques spécifiques qui ont un impact direct sur l'efficacité du générateur ; en outre, alors que les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) ont traditionnellement trouvé des applications dans des systèmes tels que les turbines.

Et panneaux solaires en raison de leurs caractéristiques de performance distinctes [70], [109], [110], Cet algorithme expliqué au chapitre (IV) est considéré comme un pionnier dans la reconnaissance de l'importance de prendre en compte les performances de la GRV et de la nécessité d'appliquer des techniques MPPT pour atteindre un rendement élevé. Comprendre

les caractéristiques révélées du GRV, notamment les puissances électriques et mécaniques, la vitesse, le couple et les angles d'activation et de désactivation (θ_{on} , θ_{off}), est essentiel pour comprendre ses performances globales.

Plusieurs articles remarquables et de pointe ont été publiés sur ce sujet, chacun utilisant différentes techniques pour optimiser l'efficacité des GRV. Un article [111] utilise l'optimisation de l'essaimage de particules (PSO) et un algorithme de recherche gravitationnelle (GSA), tandis qu'un autre article [112] introduit l'algorithme de suivi de points à efficacité maximale (MEPT). Ces algorithmes métaheuristiques ont démontré leur efficacité dans l'optimisation des solutions pour l'efficacité de la GRV ; cependant, pour vérifier le véritable potentiel et la supériorité de ces technologies, il est impératif de terminer le processus d'extraction des données, en tenant compte de divers cas et conditions GRV.

IV.2 Techniques d'optimisation pour atteindre θ_{ON} et θ_{OFF}

Résoudre un problème d'optimisation dans un espace multidimensionnel est une tâche complexe. Chaque méthode d'optimisation est spécifique à un problème particulier, et ce qui fonctionne pour un problème peut ne pas fonctionner pour un autre.

Au cours de la dernière décennie, de nombreux chercheurs ont utilisé des algorithmes inspirés de phénomènes naturels pour résoudre divers problèmes industriels complexes. Pour le problème spécifique de l'optimisation de la puissance de sortie du GRV en ajustant de manière appropriée les paramètres θ_{on} et θ_{off} , deux types d'algorithmes d'optimisation ont été étudiés : GSA, PSO, MEPT.

IV.2.1 Optimisation par l'algorithme génétique (*Gravitational Search Algorithm (GSA)*)

L'algorithme GSA s'inspire de la loi de la gravitation universelle de Newton, selon laquelle les particules de l'univers s'attirent mutuellement avec une force proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Cette force engendre un mouvement global des objets vers ceux ayant des masses plus importantes. Ainsi, les masses interagissent directement via la force de gravité et les blocs les plus lourds qui représentent les bonnes solutions se déplacent plus lentement que les blocs plus légers, assurant ainsi la phase d'exploitation de l'algorithme comme sur la figure (IV.1). Vous trouverez ci-dessous les étapes de l'algorithme appliqué au problème actuel et illustrées dans un schéma de la figure (IV.2) [111], [113]:

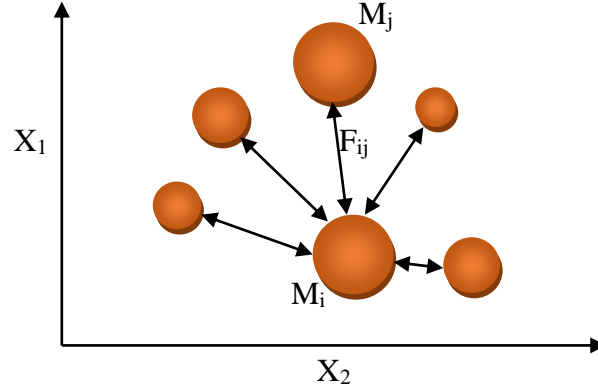


Figure IV.1: Croquis de la méthode de l'algorithme de recherche gravitationnelle (GSA) pour un problème à deux variables.

Étape 1 : Un système a été considéré avec $N = 50$ agents (masses), soit le nombre de lignes de la matrice.

$$x_i = [(x_i)^1, \dots, (x_i)^d, \dots, (x_i)^n] \quad (IV.1)$$

$$10^\circ \leq \theta_{on} \leq 22^\circ \quad (IV.2)$$

$$22^\circ \leq \theta_{off} \leq 38^\circ \quad (IV.3)$$

pour $i = 1, 2, \dots, N$, où x_i est la position du i th agent dans la d th dimension. Le nombre de colonnes dans la matrice est le nombre des variables à considérer. Dans ce cas, la dimension est 2. La matrice de population initiale est générée de manière aléatoire. Supérieure et la limite inférieure des variables sont définies comme suit :

Étape 2 : À chaque itération, la fonction de fitness est évaluée en utilisant l'équation (IV. 4). Deux variables sont sélectionnées aléatoirement dans la matrice pour chaque fonction de fitness. Le nombre maximum d'itérations est fixé à 100.

$$p_{out} = \frac{1}{\theta_{tot}} \left[\int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} V_{ph} \cdot i_{ph} \cdot d\theta - \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} V_{ph} \cdot i_{ph} \cdot d\theta \right] \quad (IV.4)$$

Étape 3 : Après l'évaluation des valeurs de la fonction de fitness pour les 50 agents, la masse est calculée à chaque itération. Cette évaluation est réalisée pour chacun des 50 cas en utilisant les équations (IV. 7) et (IV. 8).

$$best(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (IV.5)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (IV. 6)$$

où $fit_i(t)$ représente l'aptitude du i th agent au temps « t » et

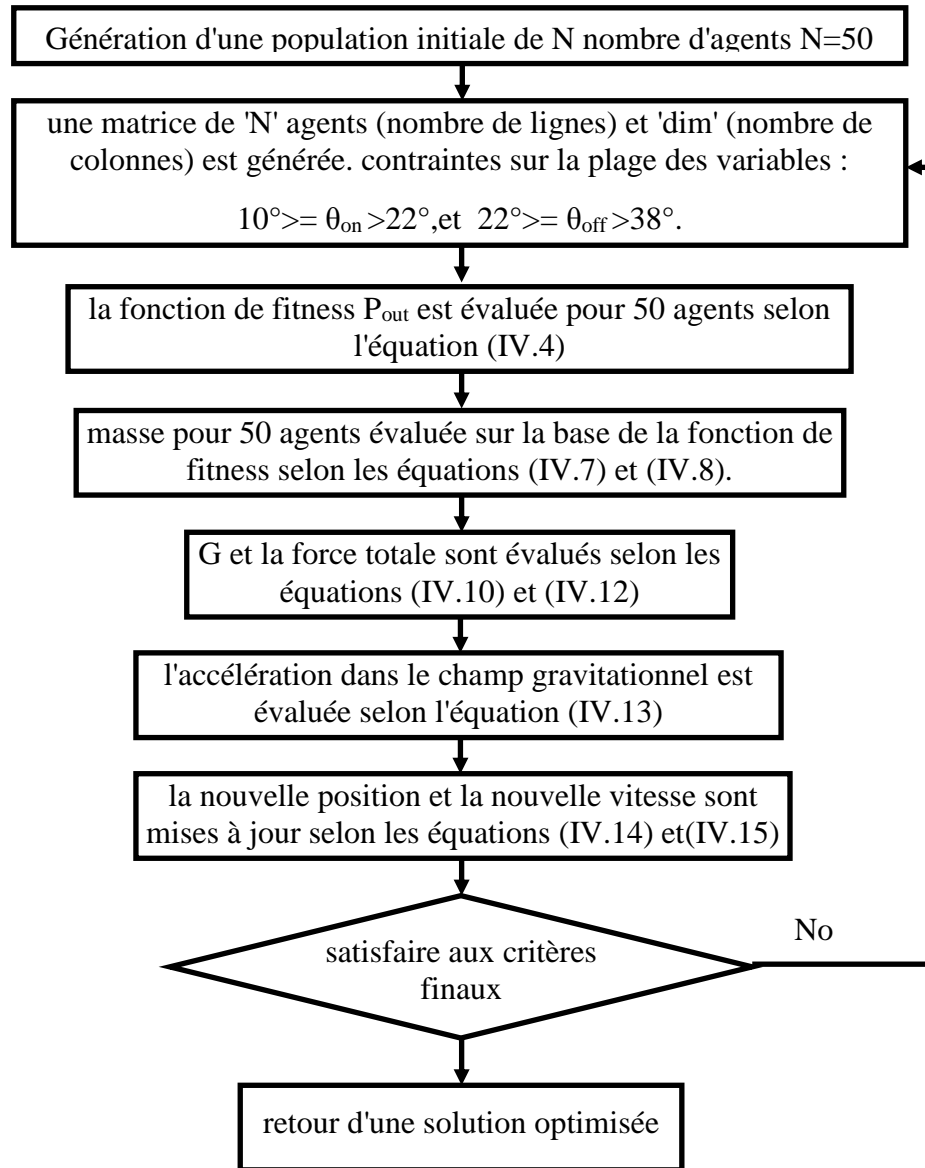


Figure IV.2: Organigrammes des techniques d'optimisation des algorithmes génétiques (GA).

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (IV. 7)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (IV. 8)$$

Étape 4 : La force est calculée en fonction de la masse :

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t).M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)+\epsilon} (X_j^d(t) - X_i^d(t)) \quad (IV.9)$$

où M_{aj} est la masse gravitationnelle active de l'agent j et M_{pi} est la masse gravitationnelle passive de l'agent i . $G(t)$ est la constante gravitationnelle au temps « t ».

$$G(t) = G_0 \exp^{\frac{-\alpha * iteration}{maxiteration}} \quad (IV.10)$$

où α est une constante (qui est considérée comme égale à 100 dans ce cas). La constante G_0 est prise égale à 100 selon la référence [113].

$$R_{ij}(t) = |X_i(t), X_j(t)| \quad (IV.11)$$

où $R_{ij}(t)$ est la distance euclidienne entre deux agents i et j au temps « t ». ϵ est une petite constante. Ainsi la force totale agissant sur l'agent « i » au temps « t » est évaluée comme:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (IV.12)$$

où $rand_j$ est le nombre de l'intervalle $[0, 1]$.

Étape 5 : L'accélération de l'agent « i » au temps « t » est donnée par :

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (IV.13)$$

où M_{ii} est la masse inertielle du i th agent.

Étape 6 : Les nouvelles position et vitesse sont mises à jour selon l'équation :

$$v_i^d(t+1) = rand_i * v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (IV.14)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (IV.15)$$

Une masse plus grande possède une plus grande attraction et une moindre accélération et attire donc d'autres agents vers elle.

Étape 7 : L'algorithme sera suivi à nouveau, à partir de l'étape 2 jusqu'à ce que le nombre d'itérations requis soit terminé ou que la solution converge (selon la première éventualité). La solution optimale obtenue est sous la forme θ_{on} et θ_{off} . Les solutions obtenues pour différentes vitesses de vent ont été regroupées dans le tableau 3.

Tableau IV.1: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant GSA.

$(\theta_{on}, \theta_{off})$	(17.0, 26.0)	(16.0, 27.7)	(16.0, 29.0)	(18.0, 30.0)	(17.0, 34.0)	(19.0, 34.6)
E_{ff} [%]	73.05	60.55	52.88	51.66	49.07	55.71
P_e [kW]	-1.03	-2.84	-4.76	-5.59	-11.43	-14.68
P_m [kW]	-1.41	-4.69	-9.00	-10.82	-23.29	-26.35

IV.2.2 Optimisation des essaims de particules (Particle swarm optimization (PSO))

PSO est un algorithme inspiré du comportement en essaim, similaire au vol d'oiseaux ou au banc de poissons (Figure IV.3). Son organigramme est représenté à la figure (IV.4), et les étapes impliquées sont expliquées comme suit [23], [111]:



(a)



(b)

Figure IV.3: Nuée de particules de : (a) Oiseaux; (b) Poissons.

Étape 1 : Génération aléatoire d'une matrice de dimension $(N \times 2)$, où N est le nombre d'agents et 2 représente les deux variables à optimiser, à savoir θ_{on} et θ_{off} .

Étape 2 : Définition des limites supérieure et inférieure des variables de la même manière que pour GSA.

Étape 3 : Évaluation de la fonction de fitness pour tous les N agents selon l'équation (IV.4).

Étape 4 : Vérification si la condition physique actuelle est meilleure que la précédente. Si c'est le cas, la valeur actuelle est enregistrée comme "pBest"; sinon, la valeur précédente est conservée comme "pBest".

Étape 5 : Parmi tous les "pBest", la meilleure position est identifiée comme "gBest", représentant l'optimum global. Ce la reflète le comportement des oiseaux qui communiquent entre eux, où chaque oiseau est capable de mémoriser la meilleure position de l'essaim total jusqu'à présent.

$$gbest_i = [gbest_i^1, gbest_i^2, \dots, gbest_i^n] \quad (IV.16)$$

Étape 6 : Les vitesses et les positions de chaque particule sont mises à jour en utilisant les équations (IV.17) et (IV.18).

$$v_i^d(t+1) = w(t) * v_i^d(t) + c1.r_i(1) (pbest_i^d(t) - xi^d(t)) + c2.r_i(2) (gbest_i^d(t) - xi^d(t)) \quad (IV.17)$$

$$pbes_i = [pbest_i^1, pbest_i^2, \dots, pbest_i^n] \quad (IV.18)$$

Tableau IV.2: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant PSO.

$(\theta_{on}, \theta_{off})$	(17.0, 26.0)	(16.0, 27.7)	(16.0, 29.0)	(18.0, 30.0)	(17.0, 34.0)	(19.0, 34.6)
E_{ff} [%]	73.05	60.55	52.88	51.66	49.07	55.71
P_e [kW]	-1.03	-2.84	-4.76	-5.59	-11.43	-14.68
P_m [kW]	-1.41	-4.69	-9.00	-10.82	-23.29	-26.35

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (IV.19)$$

où

$$X_i = [(X_i)^1, \dots, (X_i)^d, \dots, (X_i)^n] \quad (IV.20)$$

représente la position de la i th particule.

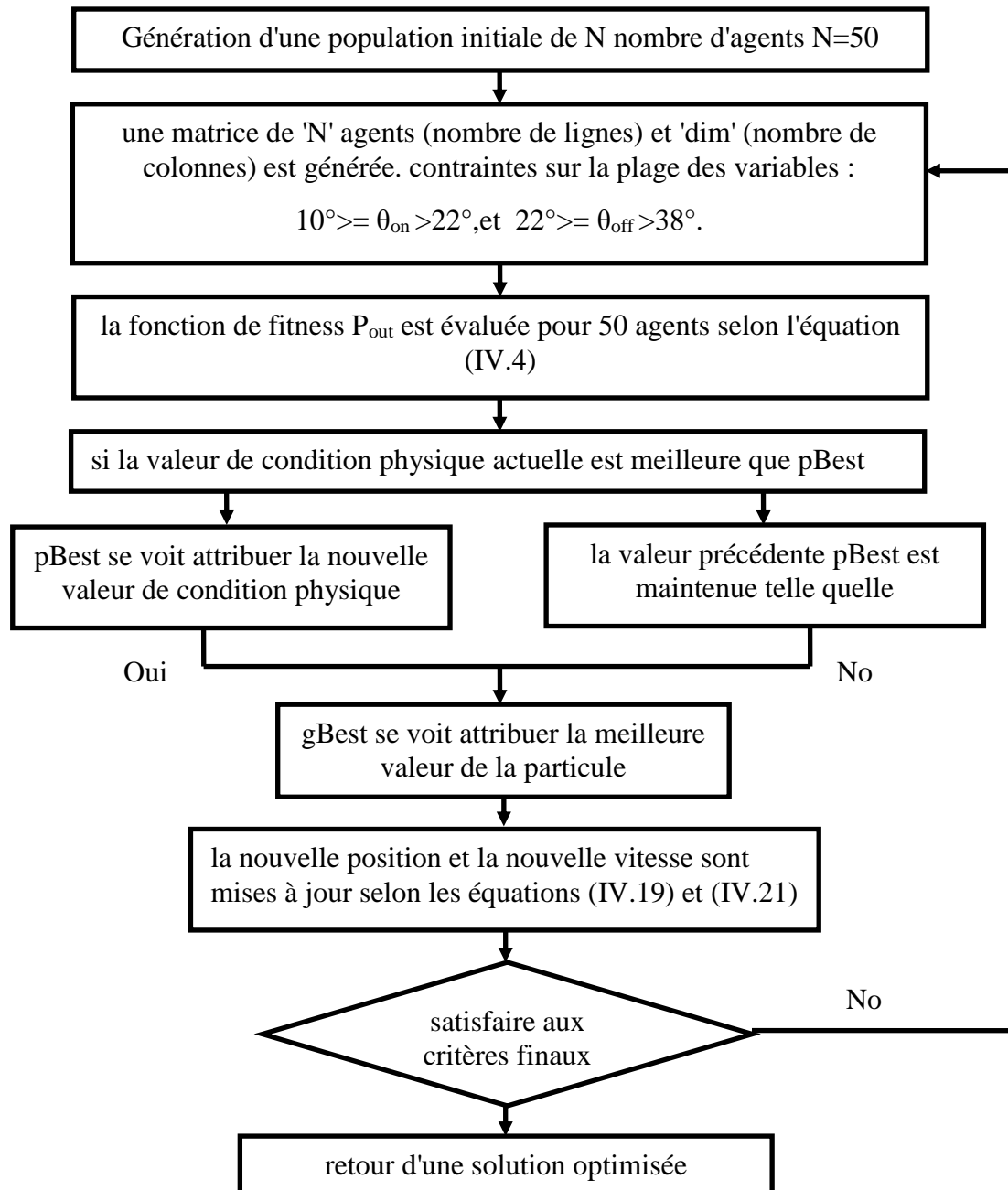


Figure IV.4: Organigrammes pour les techniques d'optimisation d'essaim de particules (PSO).

$$v_i = [(v_i)^1, \dots, (v_i)^d, \dots, (v_i)^n] \quad (\text{IV.21})$$

Représente la vitesse de la i th particule. $w(t)$ est le poids. c_1 et c_2 sont deux constantes positives.

Étape 7 : Après un certain nombre d'itérations, la même valeur de « pBest » et « gBest » sera répétée, ce qui indique que la solution a convergé. Les solutions obtenues par l'algorithme PSO pour θ_{on} et θ_{off} pour différentes vitesses de vent sont présentées dans le

tableau (IV.2). On peut observer dans les tableaux (IV.1) et (IV.2) que l'angle de conduction ($\theta_{on} - \theta_{off}$) augmente légèrement avec l'augmentation de la vitesse du vent. Cela peut s'expliquer par le fait que la durée nécessaire au courant pour atteindre une valeur particulière est une constante ; mais pendant cette durée, l'angle parcouru par le rotor est plus grand à une vitesse de rotor plus élevée.

IV.2.3 Développement d'une technique de suivi à efficacité maximale (Maximum Efficiency Point Tracking (MEPT)) associée au contrôleur PID

Comme expliqué précédemment, les machines électriques utilisées dans les systèmes de production isolés ou distribués sont des machines qui doivent, dans la mesure du possible, avoir un rendement élevé. Comme ce travail se concentre sur l'efficacité du GRV pour ces scénarios, une technique de suivi de l'efficacité a été développée. Outre les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisées dans divers systèmes énergétiques, dans ce cas, un algorithme de perturbation et d'observation est utilisé, mais en mettant l'accent sur l'efficacité du générateur plutôt que sur la puissance. Par conséquent, une technique de suivi de points à efficacité maximale (MEPT) est établie ici.

La technique MEPT développée dans ce travail agit en parallèle avec le contrôleur PID de la tension de sortie du générateur. Dans ce cas, l'avantage est la possibilité d'agir simultanément sur plus d'une variable, ce qui ne serait pas possible uniquement avec un contrôleur linéaire tel que le PID. L'algorithme (Figure IV.5) de suivi MEPT est présenté comme suit [112].

$$\eta = \frac{p_2}{p_1 + p_{mec}} = \frac{v_2 * i_2}{v_1 * i_1 + \omega * C_{mec}} \quad (IV.22)$$

Où p_2 est la puissance électrique de sortie, p_1 est la puissance d'excitation électrique et p_{mec} est la puissance d'entrée mécanique, le tout en watts [W]. La puissance mécanique est donnée comme le produit entre la vitesse du rotor, en (rad/s), et le couple, en (N.m).

$$\theta_D = \theta_{off} - \theta_{on} \quad (IV.23)$$

$$FV_2(k_p, k_i, k_d) = \frac{1}{3} \left(\int_0^\infty \left| \frac{e_{v_2}(t)}{v_{2ref}(t)} \right| dt + \left| \frac{v_2(t_M) - v_2(\infty) + e_{v_2}(\infty)}{v_{2ref}(\infty)} \right| \right) \quad (IV.24)$$

Cette fonction de fitness a été utilisée pour évaluer les performances du contrôleur pour les paramètres k_p , k_i et k_d à chaque itération du processus jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. Dans l'équation (IV.24), $V_2(t_M)$ est l'instant où la tension de sortie V_2 a une valeur maximale en t . L'expression (IV.24) évalue les résultats partiels du processus d'optimisation

en considérant trois facteurs : (i) l'intégrale de l'erreur absolue (IAE), (ii) le pourcentage de dépassement de la tension de sortie ($V_2(t_M) - V_2(\infty)$), et (iii) l'erreur en régime permanent de la tension de sortie ($e_{v_2}(\infty)$). Ces trois valeurs sont normalisées par rapport à la sortie du générateur (V_2).

Le processus d'optimisation garantit une réponse satisfaisante du système de contrôle. Dans ce processus, les paramètres k_p , k_i et k_d peuvent même être mis à jour par le processus d'optimisation, ce qui peut conduire à des contrôleurs sans l'une des actions, telles que (i) P, (ii) PI, (iii) PD ou (iv) PID. Avec les paramètres appropriés fournis par le processus d'optimisation, le PI controller est ensuite réglé sur ces valeurs. Pour valider les performances du contrôleur, des tests doivent être effectués avec variation du point de consigne et avec perturbation de la variable de sortie (V_2). La technique de suivi de l'efficacité est ensuite appliquée.

Initization;

If(($V_2 \geq 0.95.sp$) and ($v_2 \leq 1.05.sp$)) **then**

```

While ( $\theta_{on} \neq -10$ ) do
     $\theta_{on} = \theta_{on} - 1$ ;
     $\theta_{off} = \theta_{on} + 22$ ;
end
If ( $\theta_{on} = -10$ ) then
    While ( $\eta_k > \eta_{k-1}$ ) do
         $\eta_k = \eta_{k-1}$ ;
         $\theta_{off} = \theta_{off} - 1$ ;
    end
end
end

```

Figure IV.5: Algorithme de suivi des points d'efficacité maximale (MEPT)[112].

Comme on peut le voir, l'algorithme MEPT attend dans un premier temps que le contrôleur PID agisse. Cela signifie que le suivi ne démarre que lorsque la tension de sortie atteint l'état stable, en supposant la valeur indiquée dans le point de consigne avec une marge d'erreur de 10 %. Ensuite, la fenêtre de conduction définie par les valeurs des angles θ_{on} et θ_{off} (initialement fixées à 10 [deg] et 22[deg], respectivement), commence à être décalée vers la gauche pour que l'angle θ_{on} prenne, au plus, la valeur trouvée dans le premier méthodologie.

Lorsque la valeur θ_{on} atteint la valeur appropriée, selon la première phase de la méthodologie, une technique de perturbation et d'observation est mise en œuvre ; par conséquent, l'angle θ_{off} diminue en tant que perturbation et la valeur d'efficacité est observée. Le but de cette procédure est de réduire la taille de la fenêtre de conduction de l'expression (IV.23) afin que la puissance d'excitation du GRV soit réduite, contribuant ainsi positivement à l'efficacité indiquée dans l'expression (IV.22).

De cette manière, l'algorithme MEPT permet d'obtenir de meilleures valeurs d'efficacité pour le générateur parallèlement au contrôle PID de la tension de sortie, puisque le MEPT n'agit que lorsque le régime permanent est atteint. Cela signifie que l'algorithme ne permet pas à la perturbation des valeurs θ_{off} d'influencer négativement les performances du contrôleur PID (Tableau IV.3).

Tableau IV.3: Valeurs optimisées de différents paramètres du GRV tout en utilisant MEPT.

$(\theta_{on}, \theta_{off})$	(19.0, 26.4)	(18.0, 28.1)	(19.0, 29.8)	(20.0, 30.5)	(20.0, 30.5)	(21.0, 35.6)
$E_{ff}[\%]$	76.59	62.26	53.88	52.03	51.86	57.57
P_e [kW]	-1.08	-2.92	-4.85	-5.63	-12.08	-15.17
P_m [kW]	-1.41	-4.69	-9.00	-10.82	-23.29	-26.35

IV.3 Dépendance de la puissance de sortie GRV sur les variables de commande

Dans le cas du GRV, le processus de conversion de puissance repose sur un transducteur, comme illustré sur la figure (III.11). Ce transducteur a le double objectif de fonctionner comme source d'excitation et élément de stockage. Pour obtenir l'excitation, les enroulements du stator reçoivent une série d'impulsions de courant à intervalles fixes, régies par les paramètres de contrôle θ_{on} et θ_{off} , qui sont synchronisés avec la courbe d'inductance illustrée à la figure (IV.6). La puissance et le courant électrique au sein du GRV peuvent exister sous trois formes distinctes. États [82].

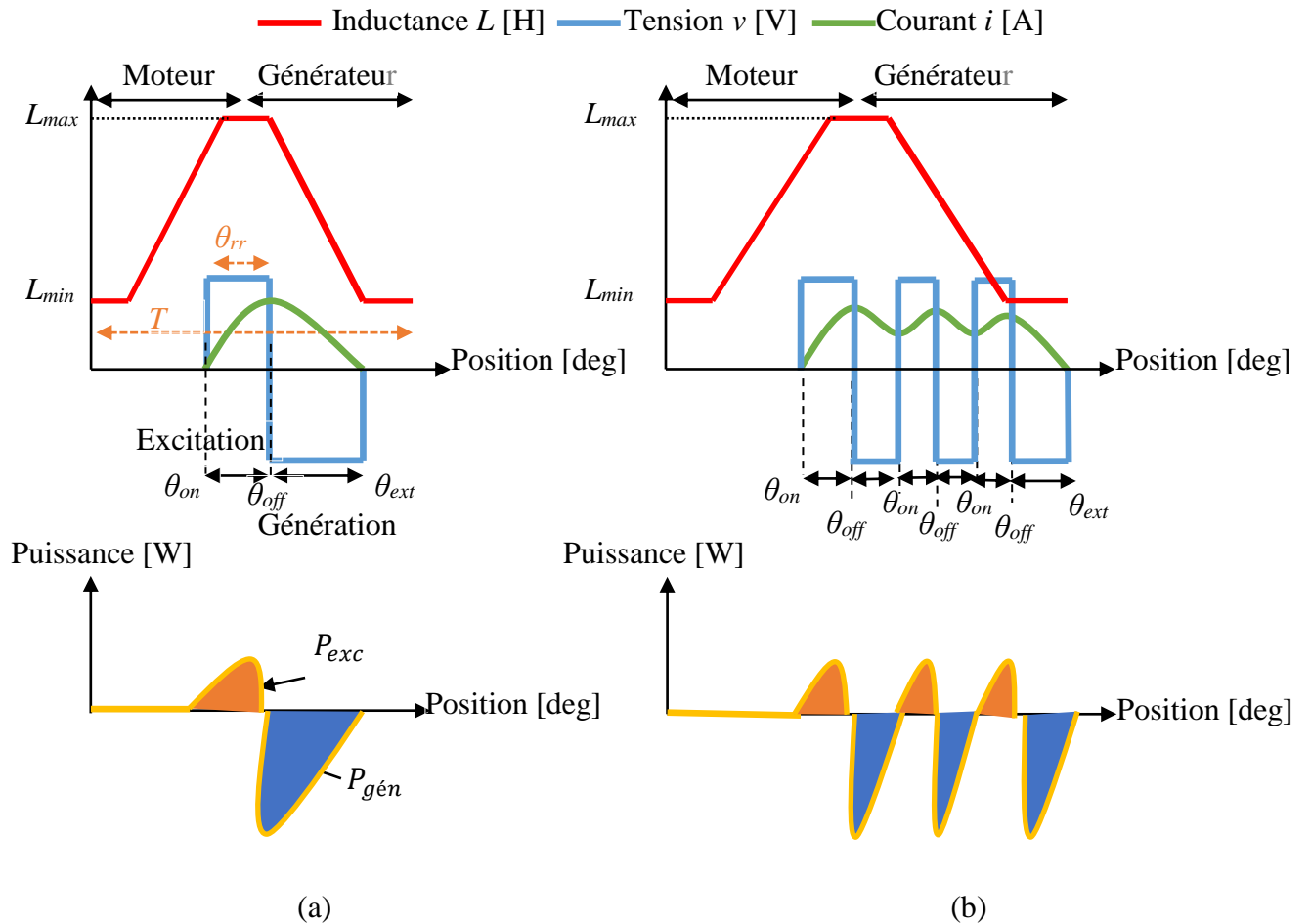


Figure IV.6: Développement de la puissance dans le GRV de la forme d'onde du courant et de l'inductance avec de la tension via l'effet d'angle (θ_{on} , θ_{off}) : (a) Commutation facile ; (b) Commutation dure.

Où P_{exc} est la puissance d'excitation ; $P_{gén}$ est la puissance générée ; θ_{rr} est l'arc polaire du rotor ; et θ_{ext} est l'angle d'extinction.

Par contre, la figure (IV.6) montre l'inversion de la machine pendant les phases d'augmentation et/ou de diminution de l'inductance, L . La conséquence donnera la vitesse de fonctionnement requise :

- Mode moteur : ($C_e > 0$) correspond au palier croissant de l'inductance ($(dL/d\theta_m) > 0$).
- Mode générateur : ($C_e < 0$) correspond à l'étage décroissant de l'inductance ($(dL/d\theta_m) < 0$).

Le couple du GRV peut être contrôlé en ajustant les angles de substitution θ_{on} et θ_{off} , comme décrit dans la figure (IV.6). Sur la figure (IV.6.a), le cas normal est représenté, où l'interrupteur est ouvert et fermé une fois, ce qui produit une seule impulsion de courant appliquée aux enroulements du stator, conduisant à une seule sortie de couple.

Sur la figure (IV.6.b), un interrupteur statique est utilisé pour ouvrir et fermer à plusieurs reprises. Cette opération produit plusieurs impulsions de courant, qui seront appliquées aux enroulements du stator, provoquant ainsi plusieurs sorties de couple. Cela permet un contrôle plus précis du couple de sortie et augmente également la complexité du système de contrôle.

Pour une phase donnée, sa puissance électrique, P_{ph} , représente la somme des puissances des étages de génération et d'excitation. En mode impulsion unique, les puissances de génération et d'excitation du GRV sont calculées comme suit :

$$P_j = \frac{1}{T} \int_0^T V \cdot i_j \cdot dt : j = 1, 2, 3. \quad (IV.25)$$

$$P_{exc} = \frac{m}{\theta_{rr}} \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} V \cdot i_{exc} \cdot d\theta \quad (IV.26)$$

$$P_{gen} = \frac{m}{\theta_{rr}} \int_{\theta_{off}}^{\theta_{ext}} V \cdot i_{gen} \cdot d\theta \quad (IV.27)$$

Où P_j est la puissance de phase ; P_{exc} et $P_{gén}$ sont successivement la puissance d'excitation et la puissance générée ; i_{exc} est le courant d'excitation ; $i_{gén}$ est le courant généré ; m représente le nombre de phases ; θ_{rr} est l'arc polaire du rotor ; et T est la durée du fonctionnement monophasé.

Pendant l'intervalle de temps entre θ_{on} et θ_{off} , le courant électrique dans le GRV augmente rapidement, tandis que la valeur de puissance augmente positivement, ce qui entraîne une force électromagnétique positive et un changement positif de l'inductance ($(dL/d\theta) > 0$), ce qui conduit à la génération de couple positif. Ce processus est représenté sur la figure (III.11.a). et représente la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Pendant une période comprise entre θ_{off} et θ_{ext} , le courant électrique diminue rapidement tandis que la valeur de puissance augmente négativement, conduisant à une force électromagnétique négative et à une variation négative de l'inductance ($(dL/d\theta) < 0$), produisant un couple négatif. Ce processus est illustré sur la figure (III.11.b)., où la puissance mécanique est convertie en électricité.

Lorsque θ est supérieur à θ_{ext} , le courant électrique et l'énergie deviennent nuls en raison des valeurs de la force électromagnétique et de la variation de l'inductance, qui correspond à zéro ($(dL/d\theta) = 0$). En conséquence, le couple devient égal à zéro.

IV.4 Extraction des données des caractéristiques GRV

L'extraction de données est importante pour l'analyse car elle permet la collecte et le traitement d'informations pertinentes, qui peuvent ensuite être utilisées pour prendre des décisions éclairées et identifier des modèles ou des tendances.

Pour évaluer la capacité de production d'énergie du système GRV, la puissance électrique de sortie P_e est utilisée comme mesure de performance. L'efficacité du GRV, qui relie la puissance électrique produite à la force d'entrée mécanique, peut être déterminée à l'aide des équations (IV.28) et (IV.29) comme suit [114] :

$$P_e = P_{exc} + P_{gen} \quad (IV.28)$$

La puissance d'entrée mécanique P_m peut être déduite de l'équation (III.5) et elle est exprimée comme suit :

$$P_m = \sum_{j=1}^3 C_{ej}(\theta, i) \cdot \omega \quad (IV.29)$$

Où C_e représente la charge de couple ; ω représente la vitesse du rotor.

La puissance électrique de sortie est notée P_e ; ainsi, l'efficacité du système peut être exprimée [115] :

$$\eta \% = \frac{P_e}{P_m} \quad (IV.30)$$

Des méthodes pour déterminer les paramètres optimaux d'un MRV ont déjà été présentées dans des travaux [77,116]. Les résultats ont donné des résultats positifs et leur efficacité peut être encore améliorée grâce à l'utilisation d'algorithmes intelligents. Dans ce travail, nous démontrons la manière de calculer simultanément la puissance mécanique d'entrée et la puissance électrique de sortie pour déterminer l'efficacité. L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation d'un modèle GRV dynamique aux propriétés magnétiques non linéaires. Un algorithme a été développé pour réduire l'ondulation du couple. L'approche proposée permet d'obtenir des résultats impressionnants en peu de temps et met en évidence le changement précieux en termes d'efficacité, de puissance mécanique et de puissance électrique pour les deux valeurs d'angle.

La méthode appliquée est représentée dans un organigramme de la figure (IV.7), réalisée en intégrant l'algorithme dans le système de contrôle.

Le GRV fonctionne à grande vitesse et à couple élevé. Son contrôle doit être optimisé pour réduire l'ondulation du couple en contrôlant les angles de démarrage et d'arrêt en fonction de la position du rotor. Les références [45], [70], [73] montrent l'importance des angles d'allumage (θ_{on}) et d'arrêt (θ_{off}) pour obtenir un rendement élevé dans les deux cas : modes moteur et générateur ; cependant, ces résultats peuvent être encore améliorés en utilisant des algorithmes intelligents pour déterminer les angles optimaux. Comme illustré dans les références [115], [117], [118], les algorithmes peuvent améliorer le calcul de l'efficacité en modifiant l'angle entre θ_{on} et θ_{off} .

Cet article présente un algorithme qui utilise les équations (IV.25) à (IV.27) séquentiellement pour déterminer l'efficacité du système. L'algorithme est développé à l'aide d'un modèle GRV dynamique avec des propriétés magnétiques non linéaires et intègre une stratégie proposée afin d'optimiser à la fois la puissance électrique et l'efficacité.

La technologie utilisée nous permet d'obtenir des résultats fiables en peu de temps, avec une augmentation significative de l'efficacité obtenue en augmentant les puissances mécaniques et électriques de deux points de vue.

La figure (IV.7) montre l'organigramme de la méthode proposée et la combinaison entre l'algorithme et le système de contrôle.

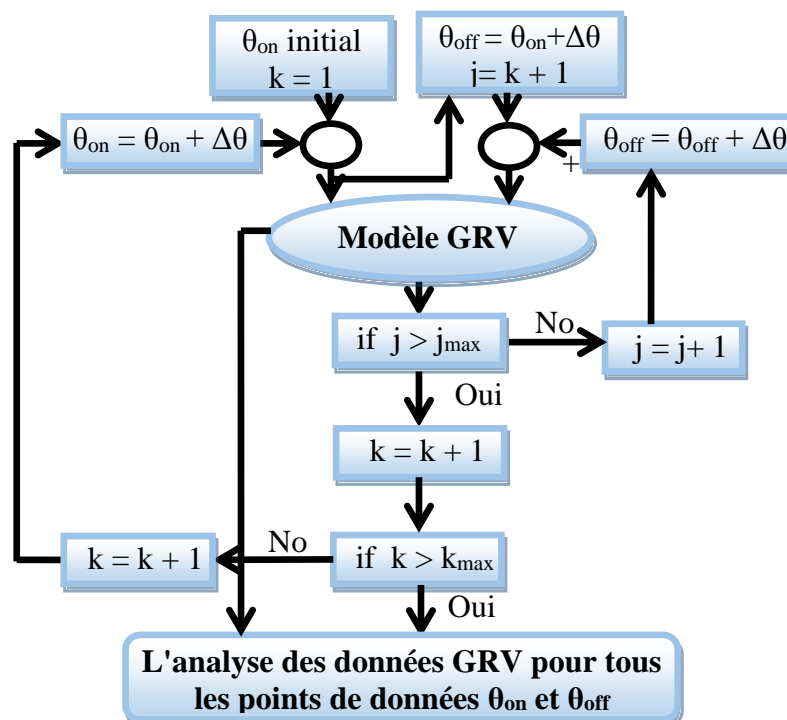


Figure IV.7: Données GRV pour différents modes d'alimentation.

Où k est le nombre de pas d'angle de fonctionnement ; j est le nombre de pas de l'angle d'arrêt.

Les courbes obtenues en simulant le modèle dynamique GRV à l'aide de l'algorithme présenté à la figure (IV.7) sont illustrées à la figure (IV.8). Le modèle dynamique GRV a été testé sous différentes vitesses de référence, variées en ajustant les angles de démarrage et/ou d'arrêt. L'objectif était d'identifier les paramètres de référence optimaux qui permettraient d'obtenir une efficacité maximale. Les données sont extraites à chaque vitesse de référence, en utilisant les angles de démarrage et d'arrêt optimaux.

Les données sont déterminées sous des angles : $\theta_{on} = 22$ [deg] et $\theta_{off} = 40$ [deg]. Les résultats obtenus permettent d'atteindre les valeurs les plus élevées, à savoir les puissances mécaniques ou électriques, avec un meilleur rendement. Ceci détermine la vitesse de référence qui produit le plus de puissance de la génération GRV. Le tableau (IV.4) résume les échantillons de données GRV collectés à $\theta_{on} = 22$ [deg] et à $\theta_{off} = 36$ [deg], dans différentes conditions.

Tableau IV.4 : Échantillons de données GRV collectés à $\theta_{on} = 22$ [deg] et à $\theta_{off} = 36$ [deg], dans différentes conditions.

Vitesse de référence W_m [rad/s]	Rendement E_{fr} [%]	Puissance mécanique P_m [W]	Puissance électrique P_e [W]	θ_{on} [deg]	θ_{off} [deg]
125.60	61.35	-26,350	-15,440	22	36
251.20	58.55	-28,430	-15,770	22	36
378.80	57.18	-28,900	-15,720	22	36

Sur la base des données présentées dans le tableau (IV.4), l'impact de la variation de la vitesse de référence et des angles de fonctionnement sur l'efficacité du GRV a été analysé. Comme on le voit, le rendement diminue à des vitesses de référence plus élevées, étant donné la valeur de 57,18 % à une vitesse de référence correspondant à 378,8 (rad/s). A une vitesse moyenne de référence correspondant à 251,2 (rad/s), le rendement atteint la valeur de 58,55 %. Le rendement le plus élevé, correspondant à 61,35 %, a été atteint à une vitesse de référence de 125,6 (rad/s).

En comparant les paramètres standard et les données relatives aux performances de puissance du GRV, ce système démontre sa capacité à améliorer l'efficacité en recherchant des paramètres d'entrée et de sortie optimaux tels que la vitesse de référence, les angles d'activation et de désactivation et la puissance mécanique. En optimisant ces paramètres, la GRV peut atteindre des niveaux plus élevés d'efficacité et de puissance électrique [82].

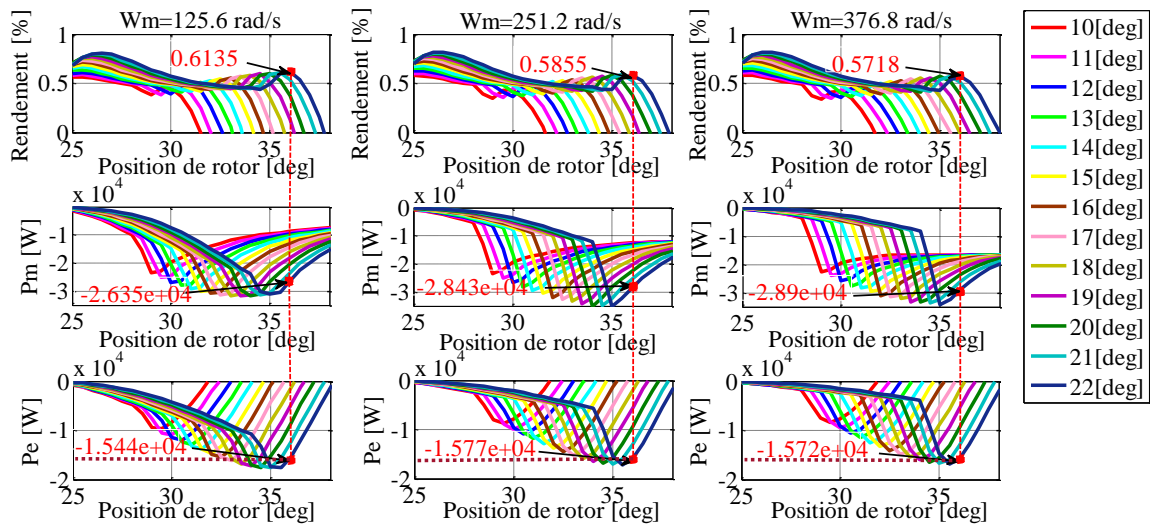


Figure IV.8: Représentation graphique des performances de puissance des GRV en fonction de θ_{on} et θ_{off} .

IV.5 Efficacité énergétique GRV

Le système est sensible aux changements d'angles de fonctionnement. Le fonctionnement efficace du GRV dépend de l'identification des angles de démarrage et d'arrêt optimaux, qui sont essentiels pour obtenir une puissance mécanique et électrique élevée ; il est donc nécessaire de déterminer ces angles pour maximiser l'efficacité du GRV.

La figure (IV.9) montre la dépendance du rendement (%), de la puissance électrique de sortie du GRV et de la puissance mécanique d'entrée avec différents modes de génération d'angles de fonctionnement θ [deg] à une vitesse de référence de 125,6 (rad/s). Le tableau (IV.5) résume les données expérimentales et les différents paramètres de fonctionnement à une vitesse de référence de 125,6 (rad/s).

Comme on peut le constater, aux angles de fonctionnement, $\theta_{on} = 22$ [deg] et $\theta_{off} = 26,5$ [deg], le rendement atteint le taux le plus élevé, ce qui correspond à 80,68 % ; la valeur de puissance est inférieure car la référence de la puissance mécanique est égale à une valeur de -1013 [W] et la valeur de la puissance électrique est égale à -817,5 [W].

Lorsque l'angle d'arrêt (θ_{off}) est augmenté à 33 [deg] et que l'angle d'allumage (θ_{on}) est activé à 22 [deg], le système atteint une efficacité maximale de 46,63 %, qui peut être attribuée à l'augmentation des puissances mécaniques et électriques. Plus précisément, la puissance mécanique P_m atteint la valeur de -19 450 [W], et la puissance électrique P_e atteint la valeur de -9071 [W].

Il est à noter que lorsque les valeurs de l'angle d'arrêt θ_{off} et de l'angle de fonctionnement θ_{on} sont égales à 36 [deg] et à 22 [deg], successivement, le taux d'efficacité maximum enregistré pour le système est de 61,35 % ; de plus, la référence de puissance mécanique atteint son maximum à $P_m = -26\,350$ [W], tandis que la puissance électrique correspondante atteint une valeur de $P_e = -15\,440$ [W].

Nous concluons que les angles de fonctionnement optimaux amènent le GRV à produire le plus de puissance lorsque $\theta_{on} = 22$ [deg] et $\theta_{off} = 36$ [deg].

Tableau IV.5: Efficacité optimale pour différentes entrées de conditions de puissance mécanique à une vitesse de 125,6 (rad/s)[82].

Rendement Eff [%]	Puissance mécanique P_m [W]	Puissance électrique P_e [W]	θ_{on} [deg]	θ_{off} [deg]
61.35	-26,350	-15,440.00	22	36.0
46.63	-19,450	-9,071.00	22	33.0
80.68	-1,013	-817.50	22	26.5

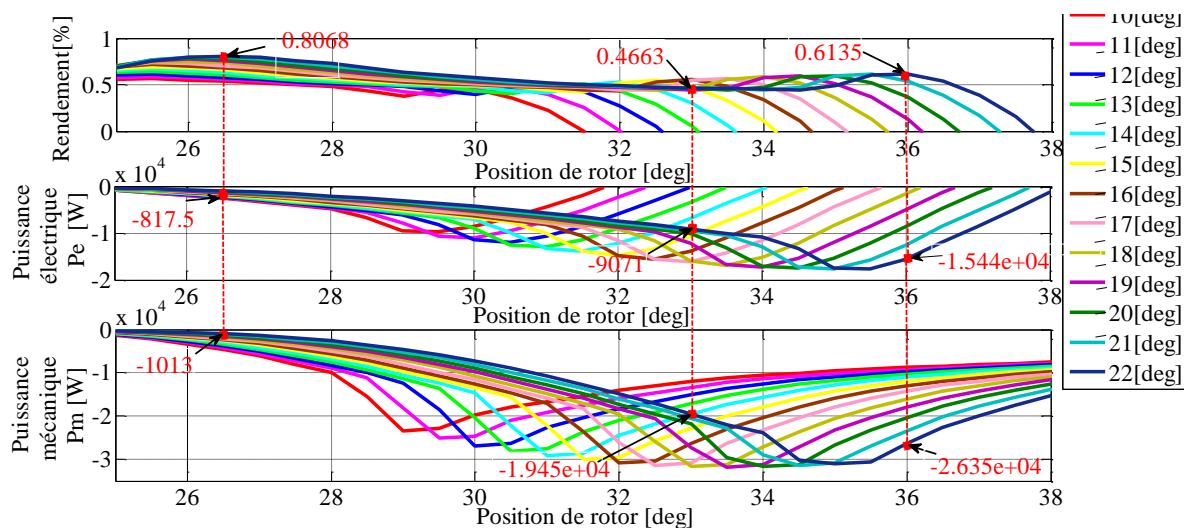


Figure IV.9: Exploration de la relation entre le rendement (%) du GRV avec la puissance mécanique d'entrée et la puissance électrique de sortie via les angles de fonctionnement θ [deg].

IV.6 MPPT pour la GRV

L'objectif est d'atteindre les valeurs de performance et d'efficacité les plus élevées dans la production d'énergie électrique de la GRV ; plusieurs études ont été réalisées dans ce sens [112], [119]. Certains chercheurs ont réussi à obtenir des valeurs optimales des paramètres

pour le fonctionnement de la GRV. Grâce à l'utilisation d'algorithmes intelligents, cette recherche vise à identifier les angles de fonctionnement optimaux ainsi que la valeur de référence de la puissance mécanique de la turbine. La stratégie proposée, illustrée à la figure (IV.10), utilise un nouvel algorithme qui fournit rapidement des résultats précis et facilite la détermination des valeurs optimales pour le fonctionnement du GRV, conduisant à une augmentation de l'efficacité et à une plus grande production d'énergie électrique [82].

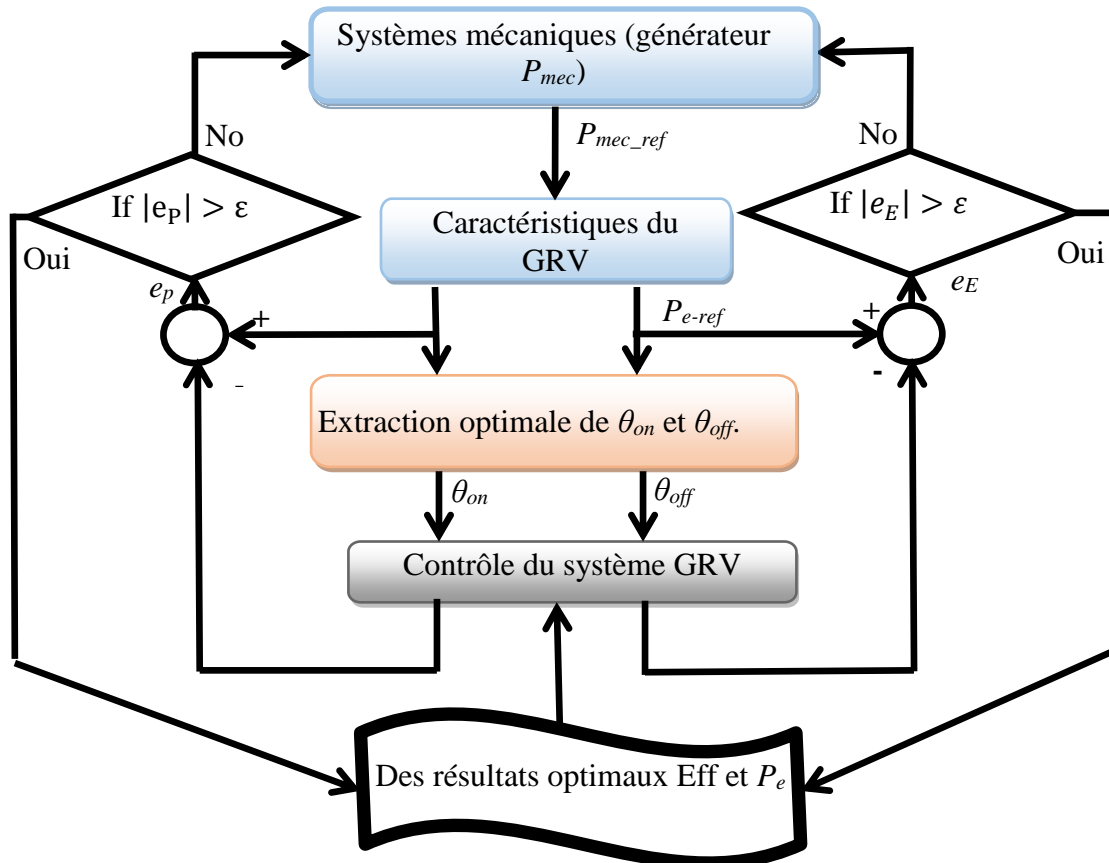


Figure IV.10: Description de la technique MPPT proposée pour GRV. Où e_E est la différence entre deux valeurs de rendement de puissance électrique maximale et de référence ; et e_p est la différence entre deux valeurs maximales et de référence d'efficacité.

Premièrement, l'algorithme utilise les caractéristiques GRV obtenues à partir d'un algorithme précédent pour saisir un ensemble de valeurs pour la puissance mécanique d'une turbine de référence. L'intersection de la puissance mécanique entre les valeurs de référence de la turbine et les caractéristiques du GRV sont utilisées pour obtenir le rendement de référence maximal, et les valeurs de référence de la puissance électrique, pour déterminer les angles de fonctionnement optimaux θ_{on} et θ_{off} . Ensuite, les angles optimaux sont saisis dans le

système d'exploitation GRV pour obtenir la plus grande puissance électrique et un rendement élevé. Les résultats sont comparés aux caractéristiques de référence optimales.

Si la différence entre les valeurs de référence et les valeurs de sortie extraites du système de commande de la GRV pour la puissance électrique et le rendement n'est pas nulle, on en conclut que les résultats obtenus du système de commande et d'exploitation ne sont pas maximaux, donc les valeurs de référence de la turbine changent et la puissance mécanique est restituée. Ce processus est répété jusqu'à ce que la différence entre les valeurs de sortie et les valeurs de référence des paramètres susmentionnés soit nulle.

Dans ce cas, on conclut que les valeurs obtenues représentent le résultat optimal recherché. Concrètement, l'algorithme réalisé permet aux chercheurs et utilisateurs des machines GRV de disposer de valeurs de référence en matière de puissance mécanique et d'angles de fonctionnement. Le résultat optimal obtenu aide au contrôle du système GRV et à la production de la plus grande valeur d'énergie électrique.

La figure (IV.11) illustre la mise en œuvre de la technique MPPT proposée pour GRV lorsque la puissance mécanique de référence reste constante. En analysant la figure, les valeurs optimales de rendement et de puissance électrique peuvent être déterminées à l'intersection de la courbe de puissance mécanique d'entrée, avec une valeur de référence de P_m à la valeur $-26\ 350$ [W]. Ces valeurs optimales ont été déduites de la figure (IV.11) puis résumées dans le tableau (IV.6) ; la figure a été tracée en appliquant la technique MPPT avec une référence de puissance mécanique imposée $P_m = -26\ 350$ [W].

D'après les résultats présentés dans le tableau 3, lorsque la puissance mécanique de référence est fixée à $P_m = -26\ 350$ [W], le rendement idéal est calculé à 61,35 %. Ce cas indique l'efficacité atteinte par le système dans des conditions de fonctionnement optimales ; de plus, la puissance électrique maximale obtenue est $P_e = -15\ 440$ [W], ce qui représente la puissance de sortie la plus élevée pouvant être obtenue par le système.

Les angles de fonctionnement optimaux θ_{on} et θ_{off} , qui donnent le rendement le plus élevé et la puissance électrique maximale, sont respectivement de 22 [deg] et 36 [deg]. Ces angles déterminent les points de départ et d'arrêt de la GRV et jouent un rôle crucial dans l'obtention de la performance souhaitée [82].

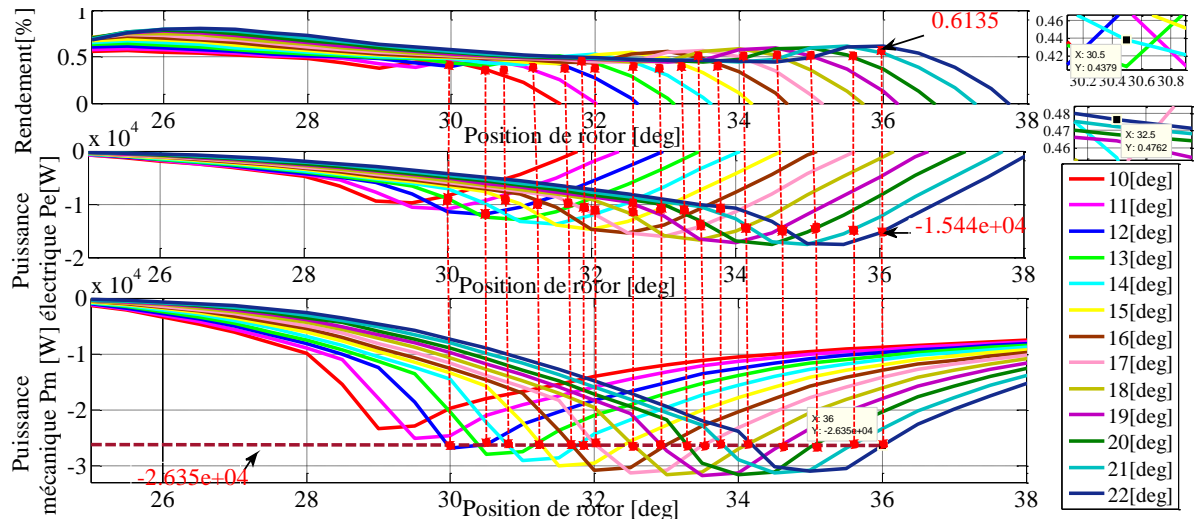


Figure IV.11: En utilisant la technique MPPT proposée pour GRV et la relation entre les angles de commutation θ_{on} et θ_{off} dans les conditions de puissance mécanique de référence $P_m = -26\ 350\ W$.

Tableau IV.6: L'efficacité optimale avec l'énergie électrique dans des conditions d'énergie mécanique. $P_m = -26\ 350\ W$.

Efficiency $E_{ff} [\%]$	Electrical Power $P_e [W]$	$\theta_{on} [deg]$	$\theta_{off} [deg]$
0.3958	-11,380	12	30.00
0.4073	-11,920	12	30.50
0.4387	-11,560	14	30.75
0.4315	-11,880	13 and 15	31.25
0.4387	-12,080	16	31.70
0.5031	-12,430	14	31.80
0.4762	-11,540	17	32.00
0.4469	-11,560	18	32.50
0.4387	-11,920	19	32.75
0.5698	-14,270	17	33.50
0.4387	-11,560	21	33.75
0.5853	-14,700	18 and 22	34.10
0.5849	-14,720	19	34.60
0.5941	-14,900	20	35.10
0.5698	-14,720	21	35.60
0.6135	-15,440	22	36.00

Le tableau (IV.7) résume les résultats obtenus en appliquant l'algorithme, qui intègre la technique MPPT proposée. Ces résultats sont extraits de la figure (IV.12) avec une vitesse de référence fixe de 125,6 rad/s. De même, il illustre comment la modification de la puissance mécanique d'entrée en fonction des angles de commutation affecte l'efficacité du GRV et la puissance électrique de sortie.

Pour vérifier les résultats du tableau 4, le système de contrôle GRV a été utilisé en utilisant les paramètres de référence, les angles de fonctionnement et la résistance mécanique de la puissance mécanique d'entrée.

En observant la figure (IV.13), il est évident que la valeur optimale de puissance électrique a été atteinte lorsque les angles de fonctionnement ont été réglés à $\theta_{on} = 22$ [deg] et $\theta_{off} = 36$ [deg] ; de plus, cette valeur optimale de puissance électrique a été atteinte avec une puissance mécanique de référence de $P_m = 26\ 350$ [W].

Tableau IV.7: Angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}) obtenus à l'aide de la technique MPPT proposée pour différents niveaux de puissance mécanique d'entrée.

Mechanical Power P_m [W]	θ_{on} [deg]	θ_{off} [deg]	Efficiency Eff [%]	Electrical Power P_e [W]
-1411	22	27.00	0.7941	-1120
-4691	22	29.00	0.6381	-2993
-9000	22	30.25	0.5442	-4897
-10,820	22	31.00	0.5213	-5641
-23,290	20	35.50	0.5237	-12,080
-26,350	22	36.00	0.6135	-15,440

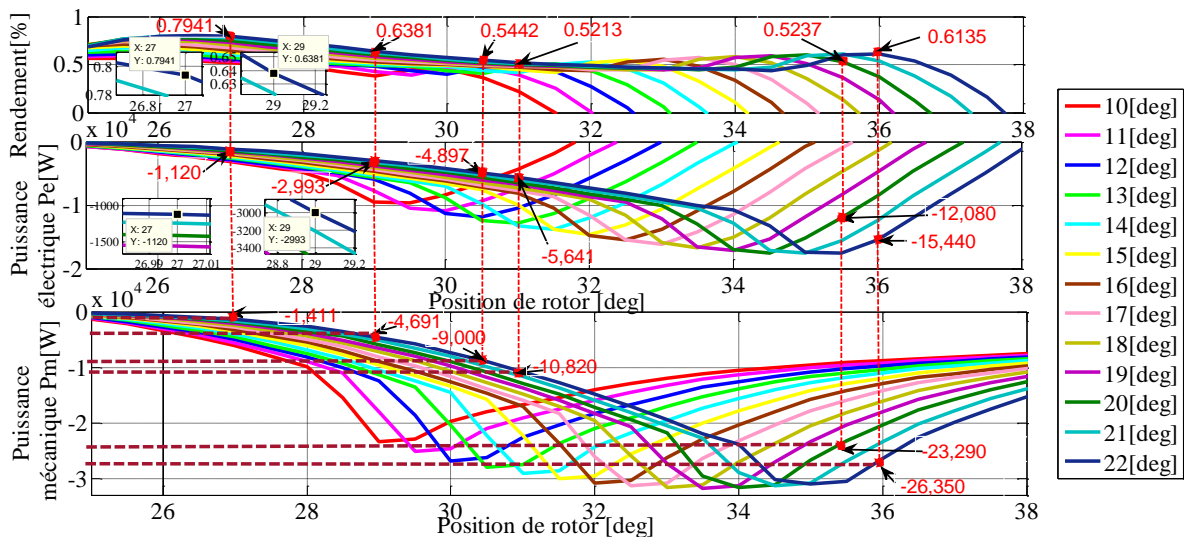


Figure IV.12: L'utilité de la technique MPPT pour obtenir la puissance électrique et l'efficacité maximales du GRV et la relation entre les angles de commutation θ_{on} et θ_{off} avec la modification de chaque valeur de la puissance mécanique de référence.

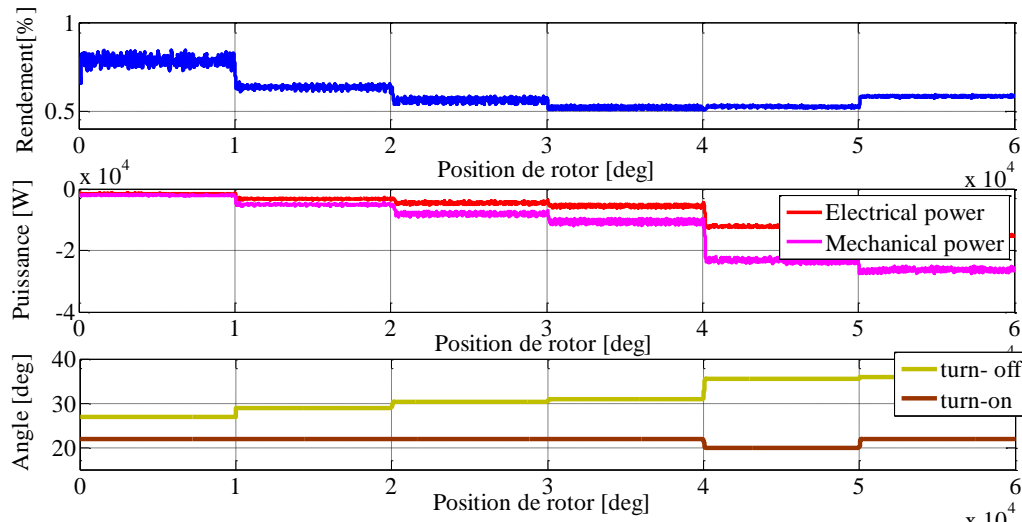


Figure IV.13: Relation entre les angles de commutation, θ_{on} et θ_{off} , et la puissance mécanique de référence pour obtenir à la fois l'efficacité et la puissance électrique maximale pour le GRV.

Dans cette étude, un algorithme a été utilisé pour extraire les paramètres de référence optimaux du GRV. Les paramètres identifiés grâce à cet algorithme sont la puissance mécanique de référence de la turbine, qui est égale à $P_m = -26\,350$ [W], ainsi que les angles de commutation optimaux θ_{on} et θ_{off} , dont les valeurs sont, successivement, 22 [deg] et 36 [deg]. Ces résultats ont permis d'avoir un rendement optimal estimé à 61,35%, et une valeur estimée de la puissance électrique de $P_e = -15\,440$ [W].

Les comparaisons de la technique MPPT proposée avec les angles de fonctionnement GSA, PSO, MEPT et standard dans le GRV sont présentées à la fois numériquement dans le tableau (IV.8) et graphiquement dans la figure (IV.14). Les résultats mettent en évidence l'efficacité et les performances de puissance électrique pour diverses entrées de mécanique. Niveaux de puissance. Chaque technique détermine les angles commutés (θ_{on} , θ_{off}) du générateur de réductance commuté (GRV), avec des détails spécifiques fournis pour les techniques GSA et PSO dans [111], et pour la technique MEPT dans [112]. L'utilisation de paramètres standards avec des angles de commutation fixes (θ_{on} , θ_{off}) sans optimisation est d'une grande importance pour démontrer l'impact lors de la comparaison des paramètres de contrôle optimisés [45], [120].

Tableau IV.8: Comparaison des méthodes MPPT, GSA, PSO, MEPT proposées et des angles de fonctionnement standard.

Pm [kW]		-1.41	-4.69	-9.00	-10.82	-23.29	-26.35
Méthode MPPT	($\theta_{on}, \theta_{off}$)	(22.0, 27.0)	(22.0, 29.0)	(22.0, 30.2)	(22.0, 31.0)	(20.0, 35.5)	(22, 36.0)
	Eff [%]	79.43	63.75	54.44	52.13	52.37	61.35
	Pe [kW]	-1.12	-2.99	-4.90	-5.64	-12.08	-15.44
GSA [111]	($\theta_{on}, \theta_{off}$)	(17.0, 26.0)	(16.0, 27.7)	(16.0, 29.0)	(18.0, 30.0)	(17.0, 34.0)	(19.0, 34.6)
	Eff [%]	73.05	60.55	52.88	51.66	49.07	55.71
	Pe [kW]	-1.03	-2.84	-4.76	-5.59	-11.43	-14.68
PSO [111]	($\theta_{on}, \theta_{off}$)	(18.0, 26.2)	(17.0, 27.9)	(17.0, 29.3)	(19.0, 30.3)	(19.0, 35.0)	(20.0, 35.0)
	Eff [%]	75.17	61.40	53.33	52	51	57.91
	Pe [kW]	-1.06	-2.88	-4.80	-5.62	-11.88	-15.26
MEPT [112]	($\theta_{on}, \theta_{off}$)	(19.0, 26.4)	(18.0, 28.1)	(19.0, 29.8)	(20.0, 30.5)	(20.0, 30.5)	(21.0, 35.6)
	Eff [%]	76.59	62.26	53.88	52.03	51.86	57.57
	Pe [kW]	-1.08	-2.92	-4.85	-5.63	-12.08	-15.17
Angles de fonctionnement standards	($\theta_{on}, \theta_{off}$)	(20.0, 30.0)	(20.0, 30.0)	(20.0, 30.0)	(20.0, 30.0)	(20.0, 30.0)	(20.0, 30.0)
	Eff [%]	74.46	52.66	49.44	52.21	51	54.15
	Pe [kW]	-1.05	-2.47	-4.45	-5.65	-11.88	-14.27

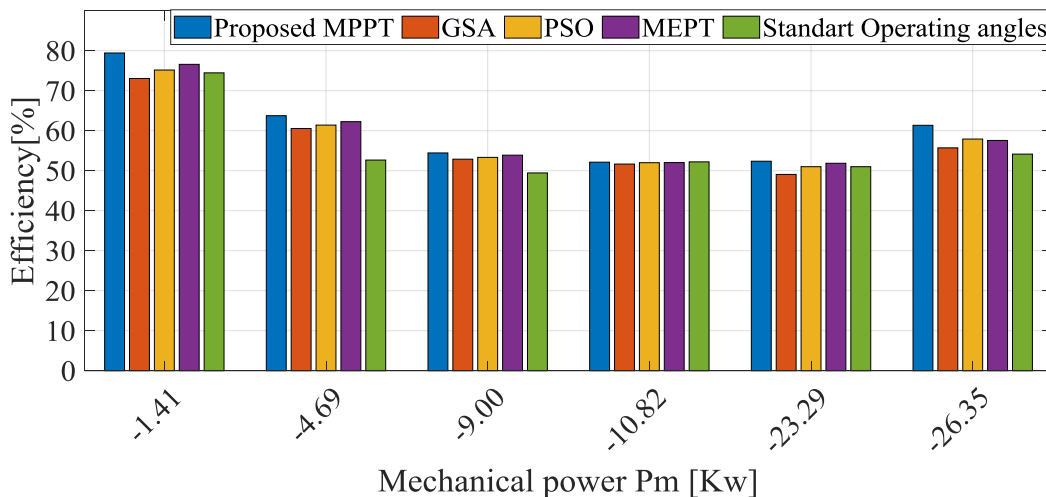


Figure IV.14: Comparaison de l'efficacité des méthodes MPPT, GSA, PSO, MEPT et des angles de fonctionnement standard dans GRV.

Les résultats présentés démontrent l'efficacité de la technique MPPT proposée, principalement en raison de sa dépendance à l'égard de toutes les données disponibles sur l'efficacité du GRV dans diverses conditions. Cette approche globale permet au MPPT

proposé d'envisager un plus large éventail de scénarios de performances, conduisant à des solutions plus optimales pour $(\theta_{on}, \theta_{off})$.

En comparaison, les algorithmes métaheuristiques (GSA et PSO) recherchent des solutions optimales pour $(\theta_{on}, \theta_{off})$ sans nécessairement déterminer si ces solutions sont les meilleures possibles ou s'il existe de meilleures alternatives. Bien que ces techniques fournissent de bonnes solutions, leur incapacité à explorer toutes les configurations potentielles peut limiter leur capacité à découvrir la meilleure solution absolue.

De même, la deuxième technique, MEPT, offre également de bonnes solutions mais présente une limite ; MEPT est limité à une plage spécifique entre les deux angles de commutation $(\theta_{on}, \theta_{off})$. Cette contrainte peut l'empêcher de rechercher des solutions encore meilleures au-delà de cette étape spécifique.

Les résultats présentés dans le tableau (IV.8) soutiennent fortement l'efficacité de la technique MPPT proposée pour améliorer les performances globales du GRV. En considérant un ensemble de données complet et en explorant un plus large éventail de possibilités, la technique proposée surpasse les algorithmes métaheuristiques et les techniques conventionnelles.

IV.7 Conclusion

Ce chapitre présente une nouvelle méthode qui contribue à niveler et à maximiser simultanément les performances de puissance et l'efficacité d'un générateur à réluctance commutée par rapport aux entrées variables de puissance mécanique en utilisant des techniques MPPT. Le modèle GRV.

L'article décrit également un algorithme de corrélation qui permet l'extraction efficace de la vitesse de référence et de l'angle de commutation optimal pour la puissance de sortie maximale du GRV.

L'algorithme à l'étude a été mis en œuvre pour déterminer les paramètres optimaux pour diverses entrées de conditions de puissance mécanique, dans le but d'atteindre les paramètres de fonctionnement optimaux pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Pour ce faire, les valeurs de puissance de référence ont été comparées aux valeurs optimales pour les caractéristiques GRV.

La technique MPPT proposée a été rigoureusement comparée à diverses techniques et méthodes d'optimisation, notamment GSA, PSO et MEPT, ainsi qu'à des angles de

fonctionnement standard. Grâce à cette comparaison, l'approche MPPT proposée a systématiquement surpassé les autres méthodes, atteignant les plus hauts niveaux de puissance électrique et d'efficacité pour le générateur à réluctance commutée. En exploitant des données complètes et des techniques de modélisation précises, l'algorithme proposé a déterminé les angles de commutation optimaux qui ont conduit à une efficacité et une puissance de sortie maximales. Cette validation renforce l'importance de la technique MPPT proposée pour améliorer les performances globales d'un GRV et son potentiel d'applications pratiques dans les systèmes de production d'électricité.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de nos travaux de recherche est de contribuer à l'amélioration des techniques qui régissent les modèles dynamiques basés sur les éléments finis afin d'optimiser leurs performances et leur comportement. Plus précisément, il s'agit de réduire les vibrations et les bruits acoustiques résultant de la forme du rotor. Notre thèse a parcouru diverses étapes qui nous ont permis de comprendre ce type de machine sous la plupart de ses aspects.

Tout d'abord, nous soulignons l'importance de la machine MRV. En termes de conception et de topologie, nous avons identifié différents types de MRV, ainsi que le principe de fonctionnement et de conversion d'énergie du système électromagnétique. Nous avons également mis en lumière l'importance du placement du rotor pour comprendre les systèmes de fonctionnement de la machine, en détaillant chaque région en ce qui concerne la production de couple, qu'elle soit positive, négative ou nulle. Cela nous a permis de comprendre la mécanisation de la machine et la manière de choisir les angles de rotation pour obtenir la forme désirée.

De plus, la formule du couple électromagnétique pour le MRV repose sur la conversion d'énergie du système électromagnétique. Après nous avons examiné la méthode aspects de la machine, nous avons examiné la méthode d'alimentation électrique et les types de convertisseurs statiques adaptés aux spécifications du MRV. À la fin de cette section, nous avons identifié les inconvénients, les avantages et l'étendue du comportement non linéaire des machines, qui doivent être pris en compte dans les modèles virtuels et leurs applications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différents modèles mathématiques basés sur les équations de Maxwell, en proposant diverses techniques de résolution des équations aux dérivées partielles. Nous avons également expliqué les étapes de la modélisation numérique basée sur la méthode des éléments finis, en intégrant le couplage électrique et les équations de circuit utilisées comme outils de modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les machines à impédance variable.

Enfin, nous avons sélectionné un prototype réel de GRV 12/8 pour illustrer la conception de ce type de machine. Nous avons appliqué et développé une modélisation en résolvant les équations électriques et magnétiques, en utilisant la technologie de couplage de circuits avec le

langage de programmation APDL dans l'outil logiciel ANSYS. Voici les résultats de notre étude approfondie de plusieurs cas, que nous présentons comme suit :

- Présentation des résultats graphiques du modèle magnétique statique pour les deux positions extrêmes du circuit magnétique, tant pour les modèles linéaires que non linéaires.
- Analyse des caractéristiques du modèle magnétique statique, incluant les réseaux de courbes de flux $\varphi(\theta, i)$, les inductances $L(\theta, i)$ et le couple statique $C(\theta, i)$ pour les modèles de circuits magnétiques linéaires et non linéaires.
- Explication du processus de fabrication et d'extraction de la machine GRV, avec comparaison des propriétés magnétiques de la machine GRV 12/8 entre les résultats obtenus avec le programme ANSYS et les résultats expérimentaux. Le processus de fabrication de la machine et l'extraction de ses propriétés inductives ont été détaillés. De plus, il convient de noter que les résultats de simulation se rapprochent étroitement des résultats expérimentaux.

Dans le troisième chapitre, le modèle dynamique non linéaire de GRV a été développé sur la base des caractéristiques statiques par la méthode des éléments finis (FEM). Cette méthode a permis de trouver des solutions de ces formules pour les équations aux dérivées partielles pour les propriétés magnétiques non linéaires afin de faciliter le contrôle du modèle GRV. Ensuite, des stratégies de contrôle indirect du couple, avec l'utilisation d'un convertisseur à pont asymétrique, et d'une technique de suivi du point de puissance maximale pour les éoliennes ; basées sur un générateur à réluctance variable GRV 12/8 ; sont appliquées pour améliorer les performances globales. Nous soulignons également l'importance de combiner le contrôle indirect du couple du GRV 12/8 par HCC avec l'MPPT IPC, basé sur le couple optimal, comme référence dans l'ITC ; pour donner les performances optimales au facteur de puissance des éoliennes.

Des simulations approfondies ont été réalisées simultanément en tenant compte de la technique MPPT et de différentes conditions physiques, telles que la vitesse du vent et les variations des angles de commutation (θ_{on} , θ_{off}). Les résultats obtenus mettent clairement en évidence les performances de contrôle des éoliennes basées sur le GRV tout en illustrant l'impact important des angles de commutation sur les performances opérationnelles et la qualité de l'énergie produite par le générateur à réluctance variable.

À partir de ce qui précède, les techniques PSO, GSA et MEPT (Intelligent Efficiency Point Tracking) sont introduites et adaptées au système de contrôle GRV afin d'obtenir de meilleures performances grâce à des paramètres optimisés par ces algorithmes. Ce chapitre

présente ces techniques et leurs applications. En utilisant ces nouveaux algorithmes, nous avons obtenu de meilleurs résultats en peu de temps, avec des paramètres optimaux pour le fonctionnement du GRV extraits.

Ces techniques offrent une meilleure stabilité en mode dynamique et réduisent les perturbations, ce qui augmente le couple et la puissance de la machine par rapport aux performances obtenues grâce aux techniques PSO, GSA et MEPT. Par ailleurs, cette technologie peut être utilisée pour réduire les effets d'ondulation ou de distorsion dans d'autres types de machines et pour diverses applications.

Les résultats de cette recherche ouvrent de nouvelles voies pour le développement d'algorithmes innovants dédiés à l'optimisation du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour la GRV. En particulier, ces travaux peuvent servir de base pour concevoir des algorithmes plus performants et adaptés aux conditions changeantes des environnements de production énergétique, tout en intégrant des techniques d'intelligence artificielle (IA).

L'exploitation des données de performance des GRV, récoltées au cours de ce travail, permettra de déterminer les paramètres de contrôle optimaux par des approches basées sur l'IA, telles que les algorithmes d'apprentissage automatique et d'optimisation. Cela ouvrira la voie à une meilleure efficacité énergétique et à une gestion plus fine des ressources renouvelables, tout en améliorant la robustesse et la réactivité des systèmes de contrôle.

Annexes

Annexe

A-1 Description d'ANSYS

Le logiciel ANSYS est une référence incontournable dans le domaine de la simulation par éléments finis de pointe. Classé parmi les principaux logiciels commerciaux d'éléments finis au niveau mondial, il s'adapte à un large éventail de domaines technologiques. Ses solutions couvrent de nombreuses disciplines, telles que la statique, la dynamique, le transfert thermique, l'écoulement des fluides, l'électromagnétisme et les problématiques de couplage de champs.

ANSYS permet à l'utilisateur de réaliser des simulations pour des problèmes aussi bien linéaires que non linéaires. Les non-linéarités structurelles peuvent découler de comportements non linéaires des matériaux, de déformations importantes ou d'interactions complexes au niveau des frontières. Les problèmes dynamiques pris en charge par ANSYS se classent généralement en deux catégories : les approches implicites et explicites.

➤ Interface graphique

1-Icon Toolbar Menu. 2- Utility Menu. 3-Input Line. 4- Raise/Hidden Icon. 5-Abbreviation Toolbar Menu. 6- Main Menu. 7-Graphics Area. 8-User Prompt Info. 9- Current Setting. 10-Output Windows.

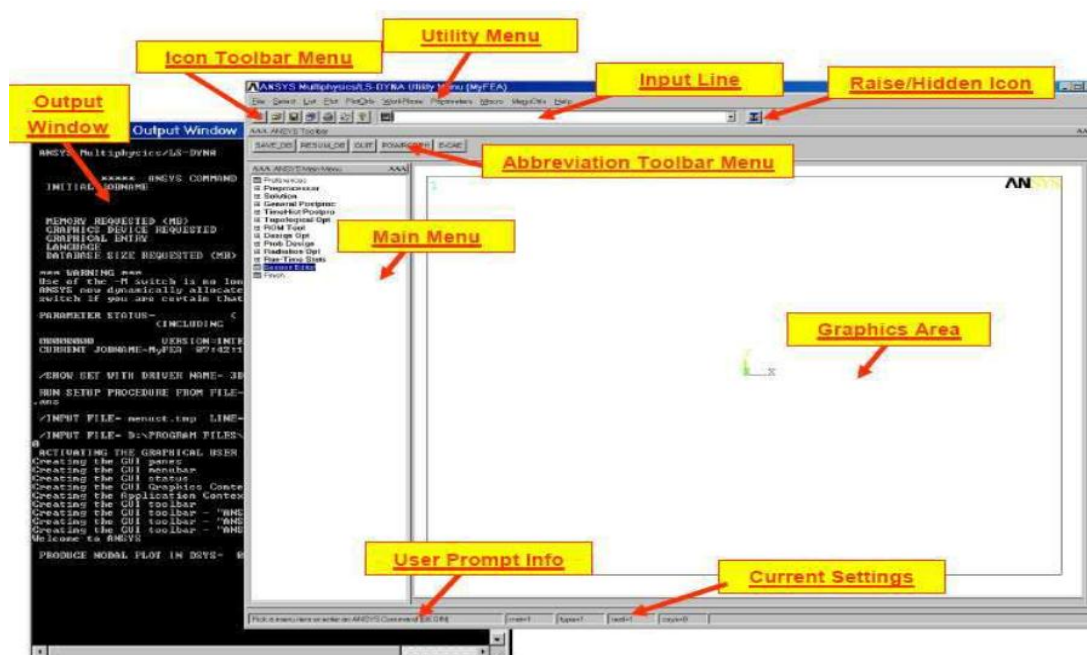


Figure A.1 : L'interface graphique d'ANSYS

Annexe B.1

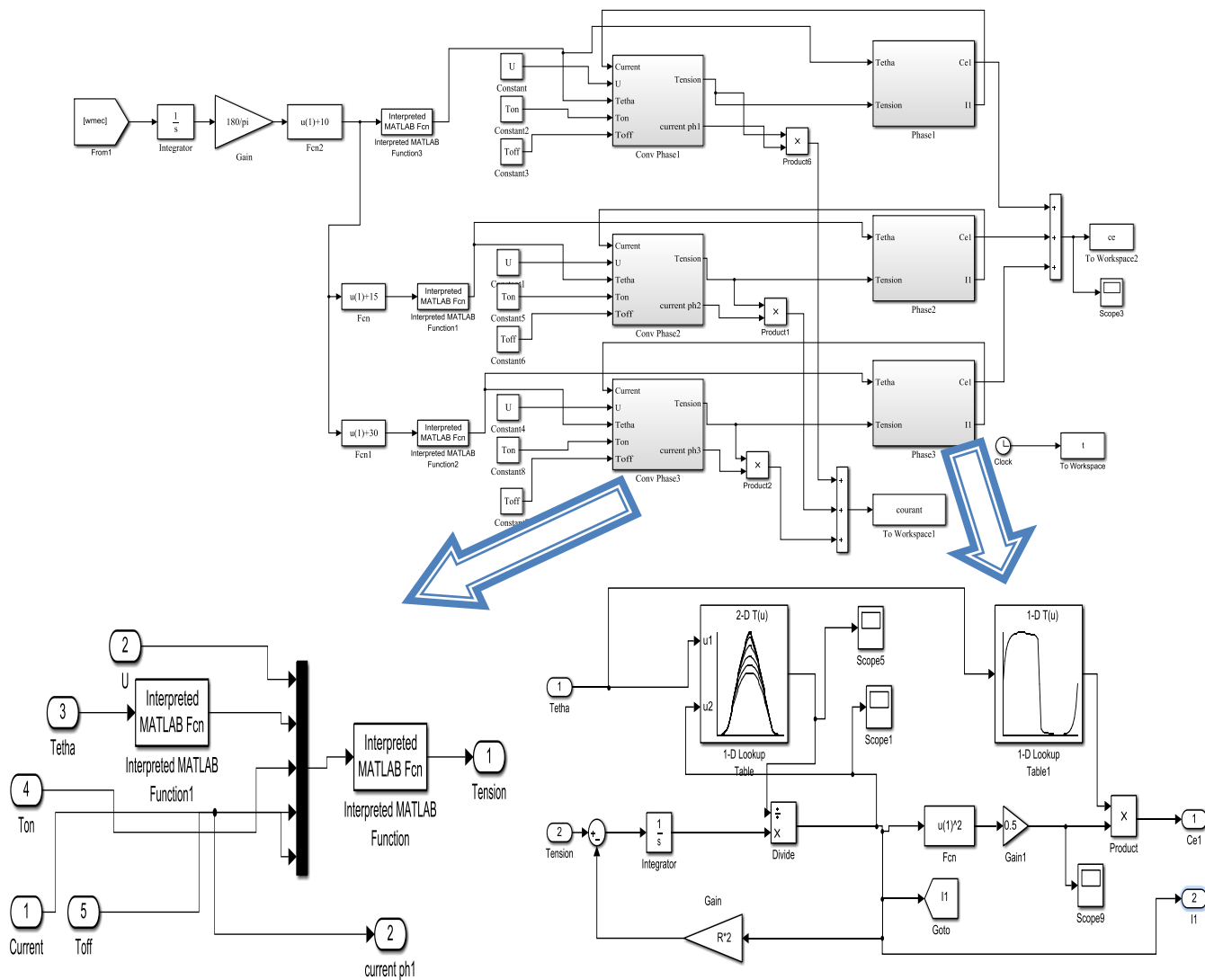


Figure B.1: Schéma bloc de la GRV instantané sous Matlab/Simulink

C.1 Paramètres de la GRV et turbine

Tableau C.1: Paramètres de la génératrice à réluctance variable (GRV).

Paramètres de la GRV	
Le moment d'inertie j	0.0040
le coefficient de frottement f	1.0000e-04
Tension $V(v)$	300
Résistance d'une phase R (Ohm)	0.1

Tableau C.2: Paramètres de la turbine.

Paramètres de la turbine	
Le moment d'inertie j	0.21
le coefficient de frottement f	0.0001
Le rayon des pales de l'éolienne R_t	3
un gain de vitesse G	6
la valeur optimale du coefficient de puissance λ_{op}	10
cpmax de puissance optimale C_{pmax}	0.39
Masse volumique de l'air ρ (1.225 kg/m^3)	1.22
Surface balayée par l'éolienne $S=\pi.R^2(m^2)$	

C.2 Gains du régulateur PI

Régulateur de courant: HCC : $k_p= 0.50$ et $k_i= 0.25$;

Références

Références

- [1] Kumar, B., K. S. Sandhu, et al. (2021). "Comparative analysis of control schemes for dfig-based wind energy system." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*: 1-20.
- [2] Sunan, E., F. Kucuk, et al. (2014). Three-phase full-bridge converter controlled permanent magnet reluctance generator for small-scale wind energy conversion systems. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE.
- [3] Mohanty, P., G. Bhuvaneswari, et al. (2014). "MATLAB based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various operating conditions." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **38**: 581-593.
- [4] Ayodele, T., A. Ogunjuyigbe, et al. (2017). "Optimal capacitance selection for a wind-driven self-excited reluctance generator under varying wind speed and load conditions." *Applied Energy* **190**: 339-353.
- [5] Viajante, G., D. Andrade, et al. (2016). "A grid connection scheme of a switched reluctance generator for active power injection using P-resonant (P-RES) controller." *Electric Power Systems Research* **141**: 572-579.
- [6] Hasanien, H. M. and S. Muyeen (2012). "Speed control of grid-connected switched reluctance generator driven by variable speed wind turbine using adaptive neural network controller." *Electric Power Systems Research* **84**(1): 206-213.
- [7] Li, S., S. Zhang, et al. (2019). "Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines—A review." *IEEE Transactions on Industry Applications* **55**(3): 2660-268.
- [8] Daldaban, F. and M. A. Buzpinar (2021). "Pulse injection-based sensorless switched reluctance motor driver model with machine learning algorithms." *Electrical Engineering* **103**(1): 705-715.
- [9] Li, Z., X. Wang, et al. (2019). "Magnetic field analysis and iron loss calculation of a special switched reluctance generator." *Journal of Electrical Engineering & Technology* **14**: 1991-2003.

-
- [10] Chirapo, K., A. Oliveira, et al. (2020). "P+ res controller applied to the direct power control of switched reluctance generator." *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **31**: 360-366.
- [11] Scalcon, F. P., G. Fang, et al. (2022). "A review on switched reluctance generators in wind power applications: Fundamentals, control and future trends." *IEEE Access* **10**: 69412-69427.
- [12] Torres, J., P. Moreno-Torres, et al. (2021). "Asymmetrical rotor skewing optimization in switched reluctance machines using differential evolutionary algorithm." *Energies* **14**(11): 3194.
- [13] Hu, Y., T. Wang, et al. (2018). "Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **66**(3): 1693-1702.
- [14] Diao, K., X. Sun, et al. (2020). "Multimode optimization of switched reluctance machines in hybrid electric vehicles." *IEEE Transactions on Energy Conversion* **36**(3): 2217-2226.
- [15] Cheng, H., L. Wang, et al. (2019). "An integrated electrified powertrain topology with SRG and SRM for plug-in hybrid electrical vehicle." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **67**(10): 8231-8241.
- [16] Dranca, M., M. Radulescu, et al. (2021). Design and control of a direct-driven three-phase switched reluctance generator for micro-wind power applications. 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), IEEE.
- [17] Abd-Erazek, G. (2003). Contribution à la conception de la machine à réluctance variable en vue de sa commande.
- [18] Mouellef, S. (2008). "Contribution A l'étude d'une machine a reluctance variable: conception, modélisation & simulation d'une MRVDS 6-4." *Mémoire de Magister del'université de Mentouri de Constantine, Algérie.*
- [19] BENRAHOU, C. (2019). Défaut de moteur à réluctance variable double saillance, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
- [20] Messai, F. (2009). "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réluctance Variable." *Mémoire magister en Electrotechnique Université Mentouri de Constantine.*

-
- [21] Naouel, K. B. (2015). Contribution a la modélisation par la méthode des réseaux reluctances (MRR) d'une machine reluctance variable, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [22] Bouiabady, M. M., A. D. Aliabad, et al. (2017). "Switched reluctance motor topologies: a comprehensive review." *Switched reluctance motor-concept, control and applications* **21**: 10.5772.
- [23] Labiod, C. (2018). Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à reluctance variable, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [24] Taïbi, S. (2002). Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation de machines à réluctance variable de type Vernier| Theses. fr, Lille 1.
- [25] HADJOU DJ, R. (2010). Contribution à la conception, l'étude des Performances et à l'optimisation d'une MRV excitée au rotor, Université de Batna 2.
- [26] Liao, Y. and T. Lipo (1994). "A new doubly salient permanent magnet motor for adjustable speed drives." *Electric Machines and Power Systems* **22**(2): 259-270.
- [27] Liao, Y., F. Liang, et al. (1995). "A novel permanent magnet motor with doubly salient structure." *IEEE Transactions on Industry Applications* **31**(5): 1069-1078.
- [28] Ilea, D. (2011). Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers, Ecole Centrale de Lille; Universitatea tehnică (Cluj-Napoca, Roumanie).
- [29] De Doncker, R. W., D. W. Pulle, et al. (2020). *Advanced electrical drives: analysis, modeling, control*, Springer Nature.
- [30] Sarr, A. (2018). Amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un actionneur électrique à réluctance variable, Université Paris Saclay (COMUE).
- [31] CHOUI TEK, M. (2017). Commande d'un moteur à reluctance variable par l'emploi de l'intelligence artificielle, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf.
- [32] Krishnan, R. (2017). *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*, CRC press.
- [33] Boukhnifer, M., A. Chaïbet, et al. (2017). "Speed robust design of switched reluctance motor for electric vehicle system." *Advances in Mechanical Engineering* **9**(11): 1687814017733440.

-
- [34] Pratapgiri, S. and P. P. V. Narsimha (2012). "Direct torque control of 4 phase 8/6 switched reluctance motor drive for constant torque load." *World Journal of Modelling and Simulation* **8**(3): 185-195.
- [35] Habani, N. (2008). *Commande optimale appliquée à un entraînement à base du moteur synchrone à réluctance variable*, Université Mouloud Mammeri.
- [36] Turner, M. (2009). *Switched reluctance drives: Technology, applications, operation & performance*. 2009 Motor, Drive & Automation Systems Conférence.
- [37] Wolff, J. and H. Späth (1997). *Switched Reluctance Motor with 16 stator poles and 12 rotor teeth*. EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, PROCEEDINGS PUBLISHED BY VARIOUS PUBLISHERS.
- [38] Morel, L., H. Fayard, et al. (2000). *Study of ultra high speed switched reluctance motor drive*. Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129), IEEE.
- [39] Zhu, Z.-Q. and D. Howe (2007). "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles." *Proceedings of the IEEE* **95**(4): 746-765.
- [40] Lin, F.-C. and S.-M. Yang (2007). "An approach to producing controlled radial force in a switched reluctance motor." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **54**(4): 2137-2146.
- [41] Mininger, X. (2005). *Réduction des vibrations des machines à réluctance variable à l'aide d'actionneurs piézoélectriques*, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [42] Pindoriya, R., B. Rajpurohit, et al. (2018). *Comparative analysis of permanent magnet motors and switched reluctance motors capabilities for electric and hybrid electric vehicles*. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), IEEE.
- [43] Chiba, A., K. Kiyota, et al. (2014). "Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles." *IEEE Transactions on Energy Conversion* **30**(1): 175-182.
- [44] Imed, M., Habib, R. E. H. A. O. U. L. I. A., & Mahfoudh, A. Y. A. D. I. (2011). *Design and modelling of a linear switched reluctance actuator for biomedical applications*. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(22), 5171-5180.

-
- [45] Zine, M., Chemsal, A., Labiod, C., Ikhlef, M., Srairi, K., & Benbouzid, M. (2022). "Coupled indirect torque control and maximum power point tracking technique for optimal performance of 12/8 switched reluctance generator-based wind turbines." *Machines* **10**(11): 1046.
- [46] Li, L. (2011). Etude et mise au point d'une nouvelle famille d'alternateur pour véhicules hybrides et électriques, Université de Grenoble.
- [47] Mese, E. and D. A. Torrey (2002). "An approach for sensorless position estimation for switched reluctance motors using artificial neural networks." *IEEE Transactions on power electronics* **17**(1): 66-75.
- [48] Ding, W. and D. Liang (2008). "Modeling of a 6/4 switched reluctance motor using adaptive neural fuzzy inference system." *IEEE Transactions on Magnetics* **44**(7): 1796-1804.
- [49] BADACHE, S. (2015). Contribution à la modélisation thermique d'une machine à reluctance variable à double saillance (MRV6/4) par éléments finis en 2D et 3D, University of sciences and technology in Oran.
- [50] Bastos, J. P. A. and N. Sadowski (2003). *Electromagnetic modeling by finite element methods*, CRC press.
- [51] Hoang, E. (1995). Étude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à reluctance variable à double saillance, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [52] Reece, A. and T. Preston (2000). *Finite element methods in electrical power engineering*, Oxford University Press.
- [53] Labiod, C., Srairi, K., Mahdad, B., Benchouia, M. T., & Benbouzid, M. E. H. (2015). "Speed control of 8/6 switched reluctance motor with torque ripple reduction taking into account magnetic saturation effects." *Energy Procedia* **74**: 112-121.
- [54] Labiod, C. (2014). Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable, Université Mohamed Khider Biskra.
- [55] Trutt, F., E. Erdelyi, et al. (1963). "The non-linear potential equation and its numerical solution for highly saturated electrical machines." *IEEE Transactions on Aerospace* **1**(2): 430-440.
- [56] Silvester, P. and M. V. Chari (1970). "Finite element solution of saturable magnetic field problems." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*(7): 1642-1651.

-
- [57] Rafinéjad, P. (1977). Adaptation de la méthode des éléments finis à la modélisation des systèmes électromécaniques de conversion d'énergie, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [58] Zienkiewicz, O. C. (1971). The finite element methods in engineering science, McGraw-Hill.
- [59] Patankar, S. V. (1982). Numerical methods in heat transfer. International Heat Transfer Conference Digital Library, Begel House Inc.
- [60] SABONNADIÈRE, J.-C. and J.-L. COULOMB (1988). "Calcul des champs électromagnétiques." *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique* **1**(D3020): D3020. 3021-D3020. 3020.
- [61] Saumabere, D. (1994). Modélisation numérique magnéto-thermique avec prise en compte du transfert radiatif dans les procédés d'élaboration des verres par induction en creuset froid, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.
- [62] Foggia, A. and J. Sabonnadière (1979). "Les équations de Maxwell en électrotechnique et leur résolution numérique par une méthode d'éléments finis." *Revue de physique appliquée* **14**(2): 439-444.
- [63] Vassent, E., G. Meunier, et al. (1991). "Simulation of induction machine operation using a step by step finite element method coupled with circuits and mechanical equations." *IEEE Transactions on Magnetics* **27**(6): 5232-5234.
- [64] Mercier, J.-C. (1993). Contribution à l'étude par éléments finis du comportement électromagnétique des machines asynchrones rapides, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [65] Faiz, J., B. Ganji, et al. (2006). Electromagnetic modeling of switched reluctance motor using finite element method. IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IEEE.
- [66] Zine, M., Labiod, C., Srairi, K., Benbouzid, M., Remha, S., & Ikhlef, M.. (2023). 12/8 Switched Reluctance Machine Modeling and Analysis Based on Finte Elements Method in the Presence of the no-Linearity effects. 2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT), IEEE.
- [67] Zine, M., Labiod, C., Srairi, K., Benbouzid, M., Remha, S., & Bougezala, M. S. (2023). Numerical and Experimental Analyzis of Nonlinear Characteristics of a 12/8

-
- Switched Reluctance Machine for Energy Conversion. 2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT), IEEE.
- [68] Rahmanian, E., H. Akbari, et al. (2017). "Maximum power point tracking in grid connected wind plant by using intelligent controller and switched reluctance generator." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8(3): 1313-1320.
- [69] Chen, H., D. Xu, et al. (2020). "Control for power converter of small-scale switched reluctance wind power generator." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68(4): 3148-3158.
- [70] dos Santos Barros, T. A., P. J. dos Santos Neto, et al. (2017). "An approach for switched reluctance generator in a wind generation system with a wide range of operation speed." *IEEE Transactions on power electronics* 32(11): 8277-8292.
- [71] Dranca, M., M. Radulescu, et al. (2021). Design and control of a direct-driven three-phase switched reluctance generator for micro-wind power applications. 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), IEEE.
- [72] Omac, Z. and C. Cevahir (2021). "Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds." *Ain Shams Engineering Journal* 12(3): 2665-2672.
- [73] Kushwaha, A. and R. Kanagaraj (2020). "Peak-current estimation using simplified current-rise model of switched reluctance generator operating in single-pulse mode." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 120: 105971.
- [74] Klein-Hessling, A., A. Hofmann, et al. (2015). Direct instantaneous torque and force control: A novel control approach for switched reluctance machines. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE.
- [75] Abdullah, M. A., A. Yatim, et al. (2012). "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(5): 3220-3227.
- [76] Labiod, C., Srairi, K., Mahdad, B., Dib, A., Benchouia, M. T., & Benbouzid, M. E. H. (2017). "Optimum performances for non-linear finite elements model of 8/6 switched reluctance motor based on intelligent routing algorithms." *Advances in Electrical and Electronic Engineering* 15(1): 1-11.

- [77] Labiod, C., Srairi, K., Mahdad, B., & Benbouzid, M. E. H. (2018). "A novel control technique for torque ripple minimization in switched reluctance motor through destructive interference." *Electrical Engineering* 100: 481-490.
- [78] Lan, Y., Y. Benomar, et al. (2021). "Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends." *Energies* 14(8): 2079.
- [79] Valencia, D. F., R. Tarvirdilu-Asl, et al. (2020). "A review of predictive control techniques for switched reluctance machine drives. Part I: Fundamentals and current control." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 36(2): 1313-1322.
- [80] Kumar, D. and K. Chatterjee (2016). "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 957-970.
- [81] Castelló, J., J. M. Espí, et al. (2016). "Development details and performance assessment of a wind turbine emulator." *Renewable energy* 86: 848-857.
- [82] Zine, M., Labiod, C., Ikhlef, M., Srairi, K., & Benbouzid, M. (2023). "Improving efficiency and power output of switched reluctance generators through optimum operating parameters." *Machines* 11(8): 816.
- [83] FRIKH, M. L. Contribution à l'étude d'un système de production d'énergie éolienne, Université de Annaba-Badji Mokhtar.
- [84] Poitiers, F. (2003). Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau, Université de Nantes.
- [85] Rogez, V. (2004). "Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire." Th: Génie Electrique: Université d'Artois, Béthune.
- [86] El Aimani, S. (2004). Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension, Ecole Centrale de Lille.
- [87] Ivan, M. (2004). "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance." Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier.

- [88] Khelifi, C. (2015). *CONTROLE NON DESTRUCTIF DES MACHINES TOURNANTES: APLICATION A UNE EOLIENNE A AXE VERTICAL*, University of sciences and technology in Oran.
- [89] Hau, E. and H. Renouard (2006). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, Springer.
- [90] Weibel, S. (2013). "Café climat petit éolien." Association Française des Professionnels du petit éolien, France, 11juin.
- [91] Brahim, M. S. (2015). *Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone*, Thèse de doctorat, université M-Mammeri Tizi-Ouzou Algérie.
- [92] RAHOUA, N. (2021). *Contribution aux Contrôles des Générateurs Synchrones à Aimants Permanents*, Université Mohamed Khider–Biskra.
- [93] Belkacem, B. (2019). *Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie d'une source de production décentralisée*, Thèse de doctorat, université d'Oran.
- [94] Riachy, L. (2017). *Contribution à la commande d'un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques*, Normandie Université.
- [95] Boudjema, Z. (2015). *Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque)*.
- [96] Sunan, E., F. Kucuk, et al. (2013). "Torque ripple minimization and maximum power point tracking of a permanent magnet reluctance generator for wind energy conversion system." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5(1).
- [97] Billel, M. (1955). *Contribution à l'amélioration des performances d'une chaine énergétique éolienne*, These Doctorat, université Badji Mokhtar Annaba 2015.
- [98] Kazmi, S. M. R., H. Goto, et al. (2010). "A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58(1): 29-36.
- [99] Zhu, Y., M. Cheng, et al. (2012). "A novel maximum power point tracking control for permanent magnet direct drive wind energy conversion systems." *Energies* 5(5): 1398-1412.

- [100] Errami, Y., M. Ouassaid, et al. (2015). "Optimal power control strategy of maximizing wind energy tracking and different operating conditions for permanent magnet synchronous generator wind farm." *Energy Procedia* 74: 477-490.
- [101] Balasundar, C., S. Sudharshanan, et al. (2015). "Design of an optimal tip speed ratio control MPPT algorithm for standalone WECS." *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol* 3(5).
- [102] Mousa, H. H., A.-R. Youssef, et al. (2019). "Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 108: 218-231.
- [103] Han, S., K. Diao, et al. (2021). "Overview of multi-phase switched reluctance motor drives for electric vehicles." *Advances in Mechanical Engineering* 13(9): 16878140211045195.
- [104] Sarr, A., I. Bahri, et al. (2020). "Switched reluctance generator for low voltage DC microgrid operation: Experimental validation." *Energies* 13(12): 3032.
- [105] Chen, H.-C., W.-A. Wang, et al. (2018). "Integrated driving/charging/discharging battery-powered four-phase switched reluctance motor drive with two current sensors." *IEEE Transactions on power electronics* 34(6): 5019-5022.
- [106] Labiod, C., Bahri, M., Srairi, K., Mahdad, B., Benchouia, M. T., & Benbouzid, M. E. H. (2017). "Static and dynamic analysis of non-linear magnetic characteristics in switched reluctance motors based on circuit-coupled time stepping finite element method." *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 8: 47-55.
- [107] Feng, L., X. Sun, et al. (2022). "Direct torque control with variable flux for an SRM based on hybrid optimization algorithm." *IEEE Transactions on power electronics* 37(6): 6688-6697.
- [108] Feng, L., X. Sun, et al. (2023). "Optimal torque sharing function control for switched reluctance motors based on active disturbance rejection controller." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 28(5): 2600-2608.
- [109] Sridharan, S., V. V. Prabhu, et al. (2021). "Efficient maximum power point tracking in grid connected switched reluctance generator in wind energy conversion system: an enhanced Mayfly Algorithm transient search optimization." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*: 1-18.

-
- [110] Eltamaly, A. M. (2021). "A novel musical chairs algorithm applied for MPPT of PV systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 146: 111135.
- [111] Mapa, S. and B. Gurumoorthy (2022). "Maximum power extraction from a switched reluctance generator based wind power generating system using optimization techniques." *Engineering Reports* 4(2): e12457.
- [112] Araujo, W. R., M. R. Reis, et al. (2021). "Efficiency enhancement of switched reluctance generator employing optimized control associated with tracking technique." *Energies* 14(24): 8388.
- [113] Rashedi, E., H. Nezamabadi-Pour, et al. (2009). "GSA: a gravitational search algorithm." *Information sciences* 179(13): 2232-2248.
- [114] Zhu, Y., H. Wu, et al. (2020). "Regenerative braking control strategy for electric vehicles based on optimization of switched reluctance generator drive system." *IEEE Access* 8: 76671-76682.
- [115] Wanthong, N. and K. Ohyama (2021). Effect of the excitation conditions on the power generation efficiency of a switched reluctance generator. 2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), IEEE.
- [116] Diko, M., P. Rafajdus, et al. (2015). "A novel concept of short-flux path switched reluctance motor for electrical vehicles." *Advances in Electrical and Electronic Engineering* 13(3): 206-211.
- [117] Sun, Q., J. Wu, et al. (2020). "Optimized direct instantaneous torque control for SRMs with efficiency improvement." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68(3): 2072-2082.
- [118] Choi, D.-W., S.-I. Byun, et al. (2013). "A study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind turbine." *IEEE Transactions on Magnetics* 50(1): 1-4.
- [119] Hajiabadi, H., M. Farshad, et al. (2021). "Multi-objective optimization and online control of switched reluctance generator for wind power application." *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization* 4(1): 33-45.
- [120] Salah Boughezala, M.; Srairi, K.; Labiod, C.; Chemsas, A.; Benbouzid, M.E.H. A (2021). "Novel Control Technique Based on Multi-Objective Intelligent Routing Algorithms for Optimum Performances of 12/8 Switched Reluctance Motor." *Int. J. Energy Convers. (IRECON)*, 10, 1–11.