الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° ……./2025

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

SPECIALITE : Machine Electrique

Thème

Amélioration des performances d'une machine à réluctance variable par optimisation des angles de commutation θ_{on} et θ_{off}

Présenté Par : Kimouche Mohamed Amine
Lemouari khalil

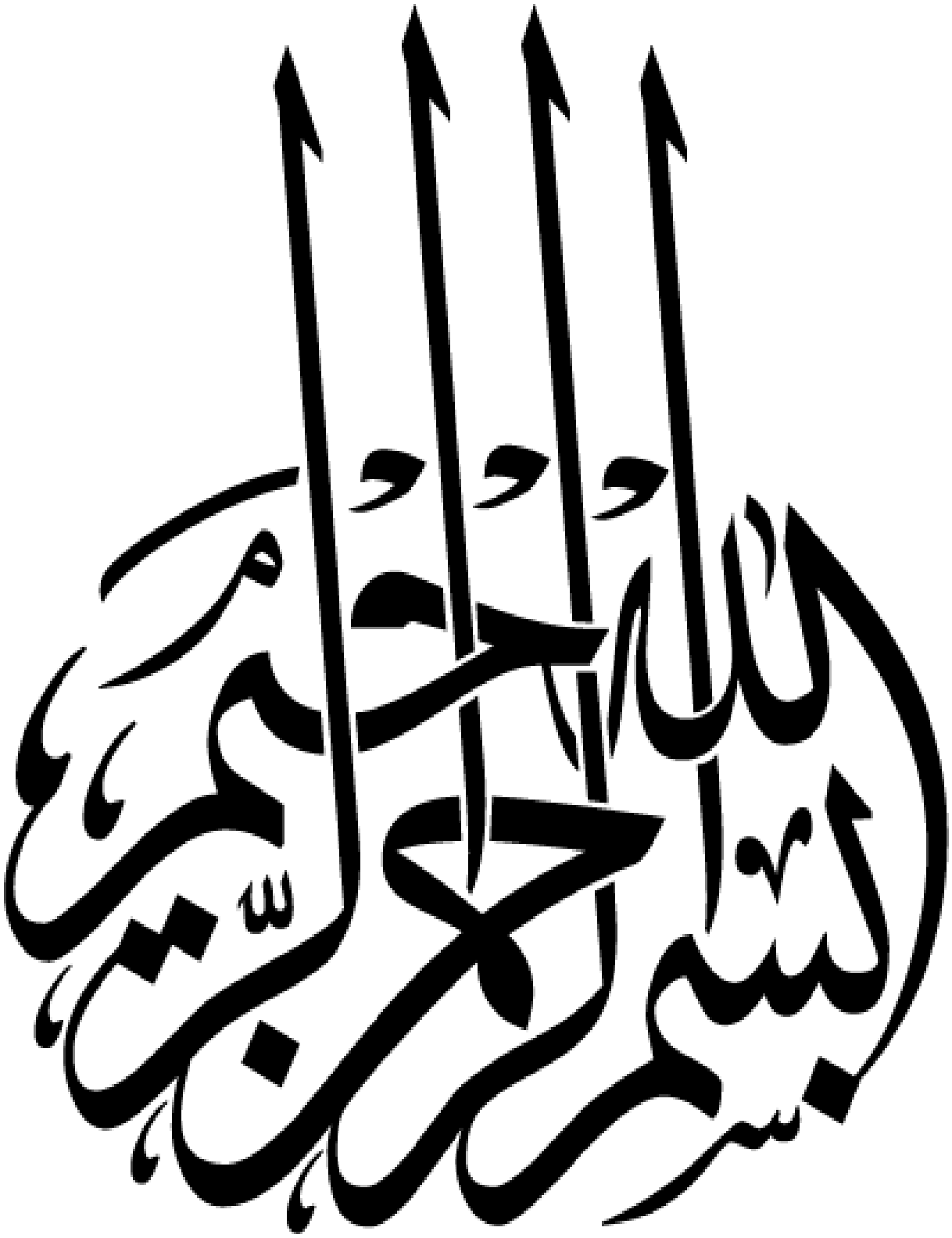
Encadré Par : Nadjib. Kemache

Date de soutenance : 01/07/2026

Jury de Soutenance

Président : Bourahla Kheireddine	**Grade MCB**	**Univ MSB jijel**
Encadreur : Nadjib. Kemache	**Grade MCB**	**Univ MSB jijel**
Examinateur : Chelabi Mohamed	**Grade MCB**	**Univ MSB jijel**

Promotion : 2025 /2026


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Allah euzujal subhanah wataealaa ealaa nieamih wa fadlah ealayna kama nusaliy wa nuslim ealaa nabiina wa rasulina muhamad salaa Allah ealayh wa salam.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur ***Dr Nadjib.Kemache*** *pour ses conseils, son suivi continu, ses encouragements et sa précieuse contribution à la préparation de ce mémoire de fin d'étude.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à nos professeurs de la Faculté des Sciences et Technologies en général, et aux professeurs d'électrotechnique en particulier, ainsi qu'à toute l'équipe universitaire, et en particulier au chef de département ***Pr M. Lefouili*** *et le doyen de la Faculté* ***Pr M. R. Mekideche****.*

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements aussi à tous nos proches et amis qui nous ont soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes très chers parents.

Source de vie.

À mon père.

Pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

À ma mère.

Pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.

À mes chers, mon frère Youcef et mes sœurs K S M.

Source de joie et de bonheur.

À tous ma famille.

Source d'espoir et de motivation.

À tous mes amis : wail anis chamsso moumen amine tarek idris baha hicham bari et tous ceux qui m'aiment.

A mon cher binôme Khalil

Amine.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de mes années d'études. Ils n'ont jamais cessé de croire en moi, de me soutenir et de m'encourager.

Leur amour, leur patience et leur confiance ont toujours été ma plus grande source de motivation. Ils ont été, après Dieu, la principale raison de ma réussite. Je prie Dieu de leur accorder santé, bonheur et longue vie.

À mes très chères sœurs,

Pour tous les efforts et les sacrifices qu'elles ont consentis pour moi durant toutes ces années, pour mon éducation et ma formation.

À Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire et mes collègues de la promotion électrotechnique

À mon cher binôme ***Amine***

À Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Khalil

Résumé

Ce mémoire présente l'étude, la modélisation, la simulation et l'optimisation d'une machine à réluctance variable à double saillance de configuration 6/4 (MRVDS 6/4). Une modélisation électromagnétique a été réalisée sous FEMM par la méthode des éléments finis afin d'obtenir les caractéristiques du flux, de l'inductance et du couple électromagnétique. Un modèle dynamique a ensuite été développé sous MATLAB/Simulink pour analyser le fonctionnement de la machine. Enfin, les angles de commutation ont été optimisés à l'aide des algorithmes AG et TLBO afin de réduire les ondulations du couple. Les résultats montrent que les deux méthodes améliorent les performances de la machine, avec un léger avantage de l'algorithme génétique.

Mots-clés : Machine à réluctance variable, MRVDS 6/4, FEMM, MATLAB/Simulink, optimisation, AG, TLBO, couple électromagnétique, angle de commutation.

Abstract

This master's thesis presents the modeling, simulation, and optimization of a 6/4 Switched Reluctance Machine (SRM). An electromagnetic model was developed using FEMM and the Finite Element Method, while a dynamic model was implemented in MATLAB/Simulink. The switching angles were optimized using the Genetic Algorithm (GA) and Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) to reduce electromagnetic torque ripple. The results show that both methods improve the machine performance, with a slight advantage for the Genetic Algorithm.

Keywords : Switched Reluctance Machine, 6/4 SRM, FEMM, Finite Element Method, MATLAB/Simulink, optimization, Genetic Algorithm, TLBO, electromagnetic torque.

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة نمذجة ومحاكاة وتحسين أداء **آلة الممانعة المتغيرة ذات البروز المزدوج 4/6** .تم إنجاز نمذجة كهرومغناطيسية باستخدام برنامج **FEMM**وطريقة العناصر المحدودة، ثم تطوير نموذج ديناميكي باستعمال **MATLAB/Simulink**.كما تم تحسين زوايا التبديل باستخدام **الخوارزمية الجينية (GA)** وخوارزمية **TLBO**بهدف تقليل تموجات العزم الكهرومغناطيسي. أظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا في أداء الآلة، مع تفوق طفيف للخوارزمية الجينية.

الكلمات المفتاحية :آلة الممانعة المتغيرة، آلة 4/6، FEMM، طريقة العناصر المحدودة، MATLAB/Simulink، التحسين، الخوارزمية الجينية، TLBO، العزم الكهرومغناطيسي.

Sommaire

List des figures I
List des tableaux III
List des symboles IV
Acronymes VI
Introduction générale 1

Chapitre I : Étude générale sur les machines à reluctance variable

Introduction 3
I.1 Constitution d'une MRV 3
I.2 Types de MRV 4
I.2.1 Machines à réluctance variable pures 4
I.2.2 Machines à réluctance variable vernier 5
I.2.3 Machines à réluctance variable hybrides 6
I.4 Applications des MRVDS 9
I.5 Avantages et inconvénients d'une MRV 9
I.5.1 Les avantages 9
I.5.2 Les inconvénients 10
Conclusion 11
Références 12

Chapitre II : Modélisation de la machine à réluctance variable

Introduction 13
II.1 équations de maxwell et lois de comportement des milieux 13
II.1.1 Équations de Maxwell 13
II.1.2 Équations constitutives 14
II.2 Logiciel FEMM 14
II.2.1 Présentation du logiciel FEMM 14
II.2.2 Les composants du logiciel FEMM 15
II.3 Modélisation électromagnétique sous FEMM 16
II.3.1 Structure de MRV étudiée 16
II.3.2 Caractéristiques des matériaux magnétiques 17
II.3.3 La géométrie de la machine sous FEMM 17
II.3.4 Maillage de la machine étudiée sous FEMM 18
II.3.5 Lignes de champ pour les deux positions extrêmes 18

II.4 Caractéristiques électromagnétiques 19
II.4.1 Caractéristique flux-courant : φ (θ, I) 19
II.4.2 Caractéristique flux-position 19
II.4.3 Inductance en fonction de la position : L (θ, I) 20
II.4.4 Caractéristiques de couple 20
Conclusion 21
Références 22

Chapitre III : Commande de la machine à réluctance Variable

Introduction 23
III.1 Alimentation de la MRV 23
III.1.1 Convertisseurs en demi-pont asymétriques 23
III.1.2 Convertisseur de Miller 25
III.2 Stratégies de commande de la machine à reluctance variable 26
II.2.1 Commande en courant 26
III.2.1.1 Contrôle des courants par MLI 26
III.2.1.2 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis 27
III.2.2 Commande en tension 27
III.3 Modélisation mathématique de la MRV 28
III.3.1 Équation électrique 28
III.3.2 Équation mécanique 29
III.4 Simulation sous MATLAB-Simulink 29
III.4.1 Schéma bloc de simulation 29
III.4.1.1 Bloc de convertisseur statique 30
III.4.1.2 Bloc de la MRV 6/4 31
III.4.1.3 Capteur de position 32
III.4.2 Résultats de la simulation 33
III.4.2.1 Courants de phase 34
III.4.2.2 Couples électromagnétiques 34
III.4.2.3 Vitesse de rotation 35
Conclusion 35
Références 37

Chapitre IV : Optimisation De la machine à réluctance variable

Introduction 38
IV.1 Définition de l'optimisation 38
IV.2 Problème d'optimisation 39
IV.3 Optimisation métaheuristique 39

IV.4 Teaching-Learning Based Optimization Algorithm 40
IV.4.1 Principe de l'algorithme TLBO 40
a) Phase de l'enseignant 40
b) Phase d'apprentissage 41
IV.4.2 Organigramme de l'algorithme TLBO 42
IV.5 Algorithme génétique 42
IV.5.1 Présentation des algorithmes génétiques 43
IV.5.2 Le codage 44
IV.5.3 La sélection 44
IV.5.4 Le Croisement 45
IV.5.4.1 Le croisement en un point : 45
IV.5.4.2 Croisement en deux Points : 46
IV.5.5 La mutation 46
IV.5.6 Organigramme d'un algorithme génétique : 47
IV.6 Effet des angles de commutation $\boldsymbol{\theta on}$ et $\boldsymbol{\theta off}$ 47
IV.7 Optimisation des angles de commutation $\boldsymbol{\theta on}$ et $\boldsymbol{\theta off}$ 48
IV.7.1 Formulation Mathématique du Problème d'Optimisation 49
IV.7.1.1 Variables d'optimisation 49
IV.7.1.2 Limites de l'espace de recherche 49
IV.7.1.3 Fonction objectif 49
IV.7.2 Optimisation par Algorithme Génétique 50
IV.7.3 Optimisation par Algorithme TLBO 52
IV.7.4 Comparaison entre les résultats des les algorithmes génétiques et TLBO 54
Conclusion 54
Références 55
Conclusion générale 57
Perspective 58

LIST DES FIGURES

Chapitre I : Étude générale sur les machines à reluctance variable

Figure I.1 Constitution d'une MRV 3
Figure I.2 MRV à 2 dents par phase..... 4
Figure I.3 MRV à 4 dents par phase..... 4
Figure I.4 MRV à pôles statoriques dentés 5
Figure I.5 Machine à reluctance variable excitée à effet vernier 5
Figure I.6 Utilisation d'aiment dans les machines à double saillance 6
Figure I.7 Machine à réluctance variable ; structure élémentaire 6
Figure I.8 Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes 7
Figure I.9 Mode de fonctionnement d'une MRV..... 8
Figure I.10 Séquences d'alimentation des phases 8

Chapitre II : Modélisation de la machine à réluctance variable

Figure II.1 Schéma de fonctionnement du logiciel FEMM 16
Figure II.2 Structure de Machine à Reluctance Variable étudiée 16
Figure II.3 Caractéristique magnétique des Tôles NO20..... 17
Figure II.4 Dessin de la géométrie de la machine sous FEMM 18
Figure II.5 Maillage de la machine étudiée sous FEMM : (a) position d'opposition, (b) position de conjonction 18
Figure II.6 Distribution des lignes de flux magnétique..... 18
Figure II.7 Flux en fonction de la position du rotor..... 19
Figure II.8 Flux en fonction de la position du rotor..... 20
Figure II.9 Induction d'une phase en fonction de la position mécanique du rotor 20
Figure II.10 Le couple en fonction de la position mécanique du rotor 21

Chapitre III : Commande de la machine à réluctance Variable

Figure III.1 Convertisseur en demi-pont asymétrique m phases 24
Figure III.2 Séquences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique..... 24
Figure III.3 Schéma du convertisseur de Miller..... 25
Figure III.4 Stratégies d'alimentation selon la vitesse de rotation..... 26
Figure III.5 Formes des courants pour une alimentation MLI 27
Figure III.6 Commande en créneaux de tension 28

Figure III.7 Circuit équivalent d'une phase de la MRV 28
Figure III.8 Modèle global de la MRV sous MATLAB/Simulink 29
Figure III.9 Convertisseur de puissance 30
Figure III.10 Bloc Simulink d'un seul bras du convertisseur 30
Figure III.11 Schéma bloc de la MRV 6/4 31
Figure III.12 Schéma bloc de la phase A de la MRV 6/4 32
Figure III.13 Capteur de position. 32
Figure III.14 Position angulaire du rotor. 33
Figure III.15 Signaux d'impulsion 33
Figure III.16 Variation des courants de la MRV : (a) phases A, B et C ; (b) phase A 34
Figure III.17 Variation du couple électromagnétique : (a) Phases A, B et C ; (b) Phase A 34
Figure III.18 Variation du couple électromagnétique total 35
Figure III.19 Variation de la vitesse de rotation 35

Chapitre IV : Optimisation De la machine à réluctance variable

Figure IV.1 Structure globale du problème d'optimisation 38
Figure IV.2 Organigramme de l'algorithme TLBO 42
Figure IV.3 Représentation schématique du fonctionnement de notre algorithme 45
FigureIV.4 Représentation schématique du croisement en un point 45
Figure IV.5 Représentation schématique du croisement en deux point 46
Figure IV.6 Principe de la mutation 46
Figure IV.7 Organigramme de l'algorithme génétique 47
Figure IV.8.a Variation du couple électromagnétique total et dans les A, B, C pour θ_{off}=25° 48
Figure IV.8.bVariation du couple électromagnétique total et dans les A, B, C pour θ_{off}=43° 48
Figure IV.9 Évolution du taux d'ondulation du couple Tr par algorithme génétique en fonction des générations. 50
Figure IV.10 Couple électromagnétique total après optimisation par AG. 51
Figure IV.11 Évolution des angles de commutation au cours des générations par GA 52
Figure IV.12 Évolution du taux d'ondulation du couple Tr par TLBO en fonction des générations 52
Figure IV.13 Couple électromagnétique total après optimisation par TLBO. 53
Figure IV.14 Évolution des angles de commutation au cours des générations par TLBO 53
Figure IV.15 Comparaison de l'évolution du taux d'ondulation du couple en fonction des générations pour les algorithmes TLBO et AG 54

LIST DES TABLEAUX

Tableau II.1 Dimensions géométriques de la MRV 17
Tableau III.1 États des commutateurs du convertisseur à demi-pont asymétrique 25
Tableau III.2 États des commutateurs du convertisseur de Miller. 25
Tableau III.3 Paramètres de simulation de la MRVDS 33

LIST DES SYMBOLES

Ns	Nombre des dents statoriques
Nr	Nombre des dents rotoriques
Te	Couple électromagnétique [N.m]
E	Champ électrique [V/m]
H	Champ magnétique [A/m]
B	Induction magnétique [T]
D	Déplacement électrique [C/m^2]
ρ	Densité volumique de charge [C/m^3]
σ	Conductivité électrique [S/m]
μ	Perméabilité magnétique [H/m]
ε	Permittivité diélectrique [F/m]
$\mathbf{R_{ext}}$	Rayon extérieur [m]
$\mathbf{R_a}$	Rayon de l'arbre [m]
$\mathbf{R_r}$	Rayon du rotor [m]
$\mathbf{H_r}$	Hauteur du pole rotorique [m]
$\mathbf{H_s}$	Hauteur du pole statorique [m]
L	Longueur active de la machine [m]
$\mathbf{B_r}$	Ouverture des dents rotoriques [Deg °]
$\mathbf{B_s}$	Ouverture des dents statoriques [Deg °]
e	Entrefer (m)
$\boldsymbol{\theta_{on}}$	Angle d'amorçage
$\boldsymbol{\theta_{off}}$	Angle de blocage
V	Tension d'alimentation Volt
R	Résistance d'une phase Ω
J	Moment d'inertie [$kg.m^2$]
F	Coefficient du frottement [$N.m.s/rad$]

$\mathbf{T_{min}}$	Couple minimal [N.m]
$\mathbf{T_{max}}$	Couple maximal [N.m]
$\mathbf{T_{moy}}$	Couple moyen [N.m]
Tr	Torque Ripple [N.m]

ACRONYMES

MRV	Machine à réluctance variable
MAP	Machine à aimant permanent
FEMM	Finite Element Method Magnetics
MRVDS	Machine à réluctance variable à double saillance
PSO	Optimisation par Essaims de Particules
TLBO	Teaching-Learning-Based Optimization
AG	Algorithme génétique

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Face à l'évolution rapide des technologies industrielles et à la recherche de systèmes d'entraînement électriques plus performants, les machines électriques occupent une place essentielle dans de nombreux secteurs tels que l'industrie, les transports et les énergies renouvelables. Parmi les différentes technologies existantes, la machine à réluctance variable (MRV) suscite un intérêt croissant grâce à sa structure simple, sa robustesse mécanique, son faible coût de fabrication et l'absence d'aimants permanents ou d'enroulements au rotor.

Le principe de fonctionnement de cette machine repose sur la variation de la réluctance magnétique du circuit en fonction de la position du rotor. Cette particularité lui permet de produire un couple électromagnétique tout en offrant une grande fiabilité et une bonne aptitude aux environnements sévères. Cependant, malgré ses nombreux avantages, la MRV présente certaines limites, notamment les ondulations du couple électromagnétique, les vibrations et le bruit acoustique, qui peuvent affecter ses performances globales.

Afin d'améliorer le fonctionnement de cette machine, plusieurs méthodes d'optimisation ont été développées. Parmi celles-ci, l'optimisation des angles de commutation $\boldsymbol{\theta_{on}}$ et $\boldsymbol{\theta_{off}}$ joue un rôle déterminant, car ces paramètres influencent directement le couple produit, le rendement ainsi que la qualité de fonctionnement de la machine.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et d'améliorer les performances d'une machine à réluctance variable à double saillance (MRVDS 6/4) par l'optimisation des angles de commutation. Pour cela, une modélisation électromagnétique est réalisée sous FEMM, suivie d'une simulation dynamique sous MATLAB/Simulink. Les algorithmes d'optimisation génétique (AG) et Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) sont ensuite utilisés afin de déterminer les valeurs optimales des angles de commande permettant de réduire les ondulations du couple et d'améliorer les performances de la machine.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les machines à réluctance variable, leur structure, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs domaines d'application.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation électromagnétique de la machine à l'aide du logiciel FEMM et à l'étude de ses principales caractéristiques.
- Le troisième chapitre traite de l'alimentation, de la commande et de la simulation

dynamique de la MRV sous MATLAB/Simulink.

- Enfin, le quatrième chapitre porte sur l'optimisation des angles de commutation à l'aide des algorithmes AG et TLBO, ainsi que sur l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre I

Étude générale sur les machines à reluctance variable

Chapitre I : Étude générale sur les machines à reluctance variable

INTRODUCTION

Les machines à réluctance variable (MRV) constituent une solution attractive dans le domaine des entraînements électriques en raison de leur structure simple, robuste et dépourvue d'aimants permanents ou d'enroulements rotoriques. Leur principe de fonctionnement repose sur la variation de la réluctance du circuit magnétique en fonction de la position du rotor, ce qui permet la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Ce chapitre présente une étude générale des MRV. Il décrit leur constitution, leurs principales topologies ainsi que leur principe de fonctionnement. Les domaines d'application, ainsi que leurs avantages et limitations, sont également abordés afin de situer ces machines dans le contexte des systèmes d'entraînement modernes.

I.1 CONSTITUTION D'UNE MRV

Les machines à réluctance variable étudiées dans ce travail se distingue par une structure à double denture. Elles sont constituées d'un rotor comportant N_r dents et d'un stator bobiné possédant N_s dents. L'une des caractéristiques principales de ces machines est l'absence de circuit d'excitation. Le rotor et le stator sont fabriqués à partir d'un empilage de tôles en matériau ferromagnétique, ce qui permet d'améliorer le comportement magnétique et de limiter les pertes.

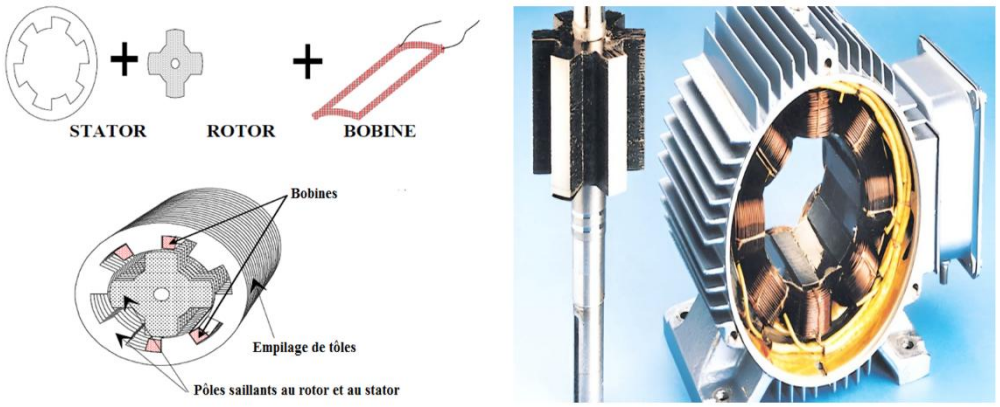


Figure I.1 Constitution d'une MRV [1]

I.2 TYPES DE MRV

Les machines à réluctance variable peuvent être classées selon leur topologie électromagnétique. On distingue principalement trois catégories : les MRV pures, les MRV à effet Vernier et les MRV hybrides.

I.2.1 Machines à réluctance variable pures

Les machines à réluctance variable pures se caractérisent par une structure à double saillance, aussi bien au stator qu'au rotor. Le stator porte les enroulements d'excitation, tandis que le rotor est dépourvu de bobinages et d'aimants permanents. Leur fonctionnement repose sur la variation de la réluctance magnétique et elles sont généralement alimentées par des courants pulsés unidirectionnels. Plusieurs configurations topologiques peuvent être distinguées [2]:

- Double denture "simple" (grosses dents) avec 2 dents par phase (figure I.2).

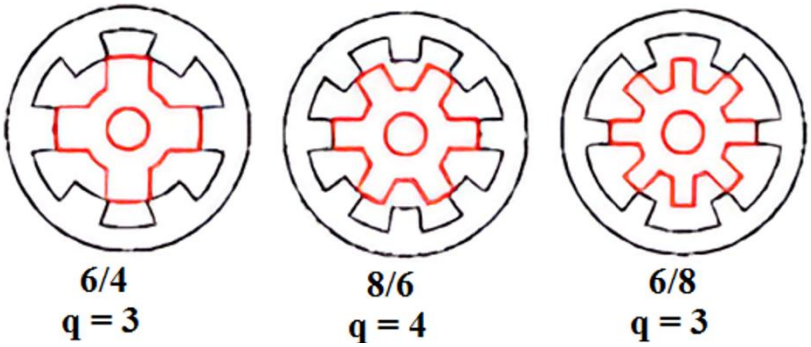


Figure I.2 MRV à 2 dents par phase

- Double denture "simple" (grosses dents) avec plus de 2 dents par phase (figure I.3).

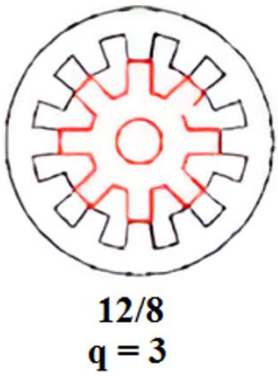


Figure I.3 MRV à 4 dents par phase

- Pôles statoriques dentés (petites dents), où un bobinage excite plusieurs dents à la fois (figure I.4).

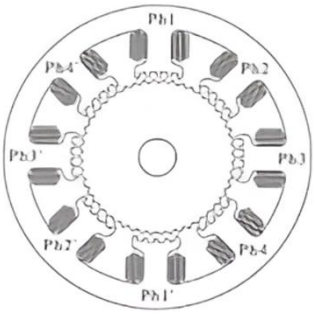


Figure I.4 MRV à pôles statoriques dentés

Ces machines offrent un couple massique élevé, une construction simple, un faible coût et une bonne robustesse.

I.2.2 Machines à réluctance variable vernier

La machine à réluctance variable vernier (MRV Vernier) est une catégorie particulière de machines à réluctance variable, caractérisée par une structure où le nombre de dents du stator et du rotor est légèrement différent ($N_s \neq N_r$), ce qui permet d'obtenir une perméance d'entrefer sinusoïdale et un fonctionnement similaire à celui d'une machine synchrone à pôles lisses. Contrairement à la MRV « pure », alimentée par des courants rectangulaires, la MRV Vernier est alimentée par des courants alternatifs sinusoïdaux [3]. L'architecture de la MRV Vernier permet de l'associer à un convertisseur classique, ce qui simplifie son contrôle et son intégration dans les systèmes d'entraînement.

Les MRV Vernier présentent un avantage majeur pour les applications à basse vitesse: en augmentant le nombre de dents au rotor (Nr), on peut réduire significativement la vitesse de rotation pour une fréquence d'alimentation donnée. Cette caractéristique offre une solution mécanique simple pour les applications à basse vitesse et couple élevé (ex : éoliennes).

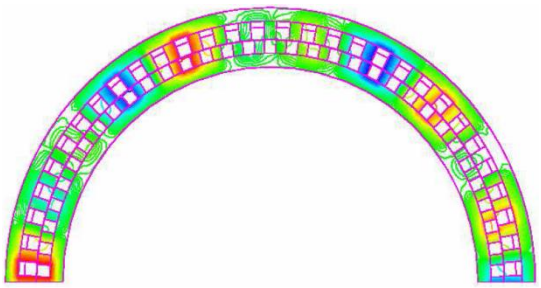


Figure I.5 Machine à reluctance variable excitée à effet vernier [4]

I.2.3 Machines à réluctance variable hybrides

Les machines à réluctance variable hybrides (MRVH) sont des machines électriques combinant les caractéristiques des machines à réluctance variable pures et celles à aimants permanents (MAP), dans le but de tirer avantage des deux types de moteurs. Elles utilisent la variation de réluctance du circuit magnétique pour produire du couple, tout en intégrant des aimants permanents pour améliorer leurs performances. Contrairement à la MRV pure, la MRVH intègre des aimants permanents, généralement soit dans le rotor, soit dans le stator (figure I.6). Cette hybridation permet d'obtenir un couple résiduel (de maintien) même lorsque l'alimentation est coupée, ce qui n'est pas le cas dans une MRV classique [5].

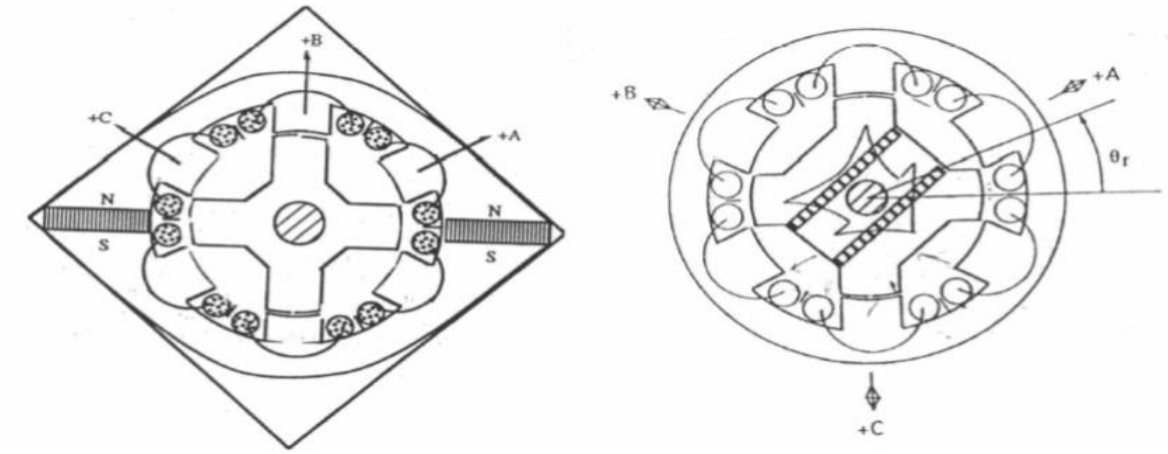


Figure I.6 Utilisation d'aiment dans les machines à double saillance

I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MRV

Le principe de fonctionnement d'une machine a reluctance variable peut être illustre à partir d'une structure monophasée élémentaire , telle que celle présenté à la figure I.7 [6].

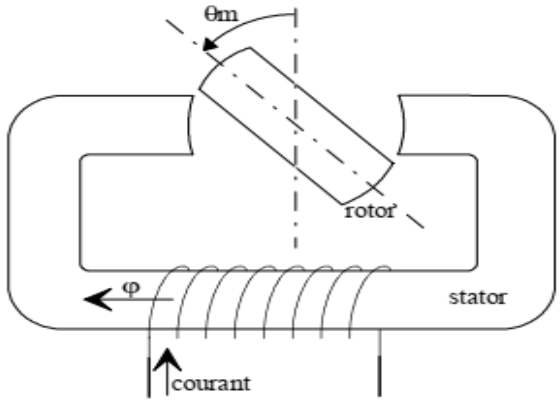


Figure I.7 Machine à réluctance variable ; structure élémentaire

Le mouvement de la machine est obtenu par la tendance du rotor à s'aligner avec l'axe magnétique de la phase statorique.

Cette structure possède deux positions rotoriques remarquables :

- Une position d'opposition pour laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale ou inductance minimale, figure I.8.a.
- Une position de conjonction où la réluctance est minimale donc inductance maximale, figure I.8.b.

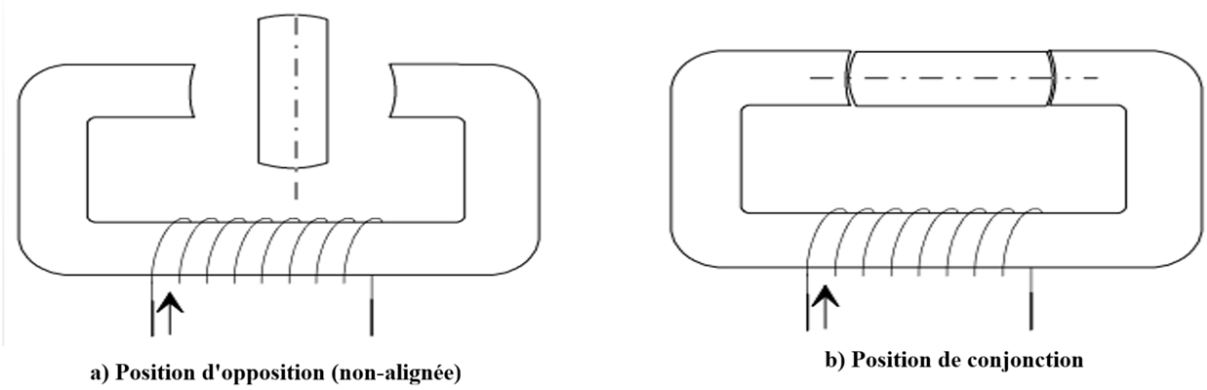


Figure I.8 Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction et si on injecte un courant dans l'armature fixe, ce dernier modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale, c'est-à-dire le passage du flux maximal entre les armatures.

Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on pourra répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation.

À partir de la position d'opposition $\theta = 0$, pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction $\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right)$ selon la règle du flux max ou de la reluctance min, et ainsi de suite

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est [7], [8]:

$$Te = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \qquad \text{(II .1)}$$

L'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Fig I.8) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

- **Moteur** ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta m)}{\partial \theta_m}\right) > 0$
- **Générateur** ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\left(\frac{\partial L(\theta m)}{\partial \theta_m}\right) < 0$

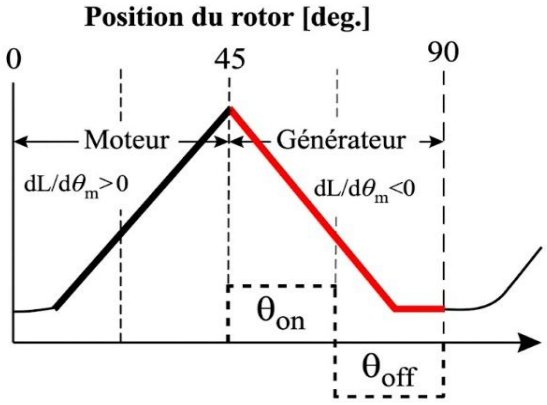


Figure I.9 Mode de fonctionnement d'une MRV

Dans une machine réelle (structure non élémentaire), comme illustré à la figure I.9, plusieurs phases sont disposées sur le stator. Chaque phase est enroulée sur deux dents statoriques diamétralement opposées.

- Lorsque la phase 1 est excitée, le circuit magnétique cherche à atteindre une configuration de réluctance minimale, entraînant ainsi le rotor vers l'alignement AA′ (position de conjonction de la phase 1).
- L'alimentation de la phase 2 provoque un déplacement similaire du rotor vers une nouvelle position de réluctance minimale, cette fois alignée sur l'axe BB′ correspondant à la phase 2.

Ainsi, une séquence d'excitation progressive des phases dans l'ordre **1 → 2 → 3** induit une rotation continue du rotor dans le même sens. Inversement, une modification de l'ordre d'alimentation (par exemple: **1 → 3 → 2**) entraîne une inversion du sens de rotation de la machine [6].

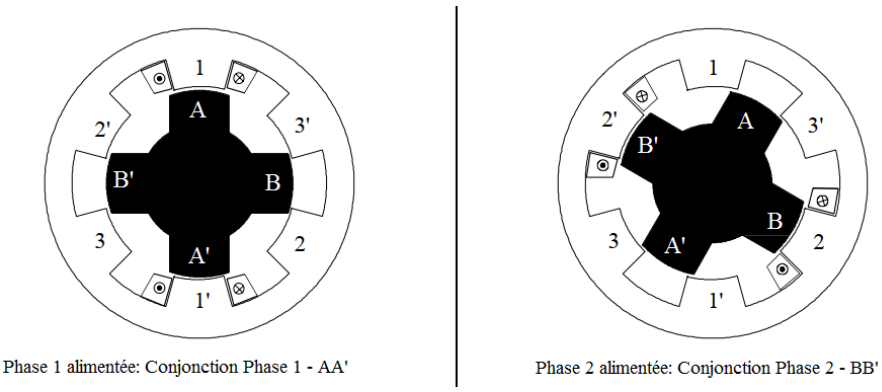


Figure I.10 Séquences d'alimentation des phases [4]

I.4 APPLICATIONS DES MRVDS

De manière générale, la MRV présente de nombreux avantages et peut être utilisée avec succès en tant que moteur à vitesse variable. Elle offre des solutions adaptées à une grande variété d'applications, en particulier dans le domaine de la traction de petite puissance, avec des performances très satisfaisantes et des puissances pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilowatts.

La MRV constitue ainsi une alternative intéressante pour de nombreuses applications. Parmi celles-ci, on peut citer :

- **Applications spécifiques :** compresseurs, ventilateurs, pompes.
- **Équipements médicaux et de laboratoire :** pousse-seringues, centrifugeuses, fauteuils roulants électriques, etc.
- **Appareils ménagers :** robots ménagers, lave-linge, lave-vaisselle, horlogerie, jouets…
- **Applications pour véhicules électriques et hybrides :** moteurs de traction, MRV linéaires pour transport sur rails, (rotors *in-Wheel)* directement intégrés aux roues et équipements embarqués.
- **Automatismes industriels :** ascenseurs, servomécanismes, portes automatiques, actionneurs de positionnement.
- **Équipements informatiques et bureautiques :** imprimantes, ventilateurs, têtes de lecture.
- **Applications aéronautiques et spatiales :** pompes à carburant et équipements embarqués à bord d'avions, navettes spatiales, fusées et divers systèmes aérospatiaux. Dans l'espace, en l'absence d'atmosphère, le moteur électrique constitue la seule solution viable pour les systèmes de propulsion des robots d'exploration. Par exemple, la NASA a conçu pour son programme d'exploration de Mars un MRV capable de supporter une température de 540 °C pendant 27 heures [9].

I.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE MRV

I.5.1 Les avantages

Les principales motivations qui rendent la machine à réluctance variable (MRV) compétitive par rapport aux autres types de machines électriques sont les suivantes [10]:

- **Amélioration du rapport de saillance :** La MRV peut rivaliser avec la machine asynchrone, notamment en termes de facteur de puissance et de puissance absorbée.
- **Simplicité de commande pour les petits et moyens entraînements :** La commande d'une MRV est plus simple que la commande vectorielle requise pour une machine asynchrone.

- **Stabilité à basse vitesse et en charge complète :** Contrairement au moteur asynchrone, la MRV ne présente pas de risque de surchauffe aux faibles vitesses.
- **Absence d'aimants permanents :** La MRV n'utilise aucun aimant, ce qui constitue un avantage par rapport aux machines à aimants permanents, en particulier dans les applications à haute température, évitant tout risque de désaimantation.
- **Structure rotorique simple et robuste :** Le rotor ne comporte ni bobinages, ni conducteurs rotoriques, ni aimants. Le moment d'inertie est faible (typiquement la moitié de celui d'une machine asynchrone de même rayon externe), permettant une accélération élevée. De plus, les pertes rotoriques faibles simplifient le système de refroidissement.
- **Excellentes performances en environnement extrême :** Les MRV peuvent fonctionner à haute température et haute vitesse, ce qui les rend adaptées à des applications exigeantes.
- **Grande capacité de surcharge de courte durée :** Cette limitation est seulement fonction de la température maximale des bobines et de la saturation magnétique des matériaux. La MRV peut ainsi produire des couples de démarrage élevés et offrir une forte accélération.
- **Coût de fabrication et de maintenance potentiellement faible :** Malgré des exigences de fabrication liées aux faibles épaisseurs de l'entrefer, le coût global reste compétitif.
- **Large plage de puissance constante :** La MRV conserve un rendement élevé même au-delà de la vitesse de base, ce qui la rend adaptée aux applications telles que les véhicules hybrides ou électriques.

I.5.2 Les inconvénients

Malgré leurs nombreux avantages, les machines à réluctance variable (MRV) présentent également certaines limitations :

- Ondulations de couple, vibrations et bruit acoustique : Le couple produit par la MRV présente des ondulations plus importantes que celles des machines asynchrones ou à aimants permanents, entraînant des vibrations et des bruits acoustiques plus élevés. Heureusement, plusieurs méthodes de compensation, actives ou passives, permettent de réduire ces effets.
- Alimentation en courant : Les MRV conventionnelles sont généralement alimentées en courant unidirectionnel, ce qui nécessite souvent l'utilisation de convertisseurs non standard. Cependant, pour certaines applications, des convertisseurs bipolaires (demi-pont ou pont complet) ont également été développés.
- Fonctionnement à faible vitesse : Pour assurer un bon fonctionnement à basse vitesse, il est nécessaire de disposer d'un profil complexe de l'onde de courant ainsi que de mesures précises de la position du rotor [10].

CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter les bases théoriques des machines à réluctance variable, en détaillant leur constitution, leurs différentes topologies ainsi que leur principe de fonctionnement fondé sur la variation de la réluctance magnétique.

L'analyse des avantages, des limitations et des domaines d'application a mis en évidence l'intérêt croissant de ces machines dans les systèmes d'entraînement électrique modernes.

Ces éléments constituent un fondement essentiel pour la modélisation et l'étude approfondie qui seront développées dans la suite de ce mémoire.

RÉFÉRENCES

[1] R. Krishnan, *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC press, 2017.

[2] B. Multon, "*Moteurs Pas-a-Pas,*" Notes de cours, École Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France, mai 2004.

[3] R. Redjem, "*Modélisation et optimisation d'une structure de machine à réluctance variable dédiée aux énergies renouvelables,*", thèse Doctorat, Univ. Mentouri–Constantine, Algérie, 2010.

[4] F.Ben amor ,M. Abid, "*Étude d'une génératrice à réluctance variable*," Mémoire de Master, Univ. d'El-Oued, El-Oued, Algérie, 2014.

[5] S. Mouellef, "*Contribution A l'étude d'une machine a reluctance variable: conception, modélisation & simulation d'une MRVDS 6-4,*" Mémoire de Magister, Univ. Mentouri Constantine, Algérie, 2008.

[6] S. Taïbi, "*Contribution à l'étude, la conception, le dimensionnement et l'optimisation de machines à réluctance variable de type Vernier,*" Thèse de Doctorat, Univ. Lille 1, Lille, France, 2002.

[7] E. Hoang, "*Étude, modélisation et mesure des pertes magnétiques dans les moteurs à réluctance variable à double saillance.,*" Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France, 1995.

[8] A. Mailfert , F.-M. Sargos, "*Machines à réluctance variable (MRV). Principes des MRV. Machines à commutation,*" Techniques de l'Ingénieur, *Génie électrique*, vol. 7, no. D3680, 2004.

[9] D. Ilea, "*Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers,*" Thèse de Doctorat, École Centrale de Lille, Lille, France, 2011.

[10] S. Zeboudj, W. Zekraoui, "*Dimensionnement et étude magnétothermique d'une machine à réluctance variable (MRV 12/8)*," Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2019.

Chapitre II

Modélisation de la machine à réluctance variable

Chapitre II : Modélisation de la machine à réluctance variable

INTRODUCTION

Ce chapitre présente la modélisation électromagnétique de la machine à réluctance variable (MRV). Les équations de Maxwell et les relations constitutives des matériaux sont d'abord rappelées afin de décrire le comportement des champs électromagnétiques. Le logiciel FEMM, basé sur la méthode des éléments finis, est ensuite introduit comme outil de simulation. La structure de la MRV 6/4 est modélisée pour analyser ses performances. L'étude porte principalement sur le flux magnétique, l'inductance et le couple électromagnétique en fonction du courant d'excitation et de la position du rotor.

II.1 EQUATIONS DE MAXWELL ET LOIS DE COMPORTEMENT DES MILIEUX

L'étude des machines électriques s'appuie sur les équations de Maxwell, qui décrivent les interactions entre champs électriques et magnétiques à l'origine du phénomène de conversion électromécanique d'énergie. Ces équations traduisent notamment la création du champ magnétique par les courants et le principe d'induction électromagnétique.

Associées aux relations constitutives des milieux et à la loi d'Ohm généralisée, elles permettent d'établir les modèles électromagnétiques nécessaires au calcul des flux, des forces et du couple électromagnétique [1]. Elles constituent ainsi la base théorique essentielle à l'analyse des machines électriques étudiées dans ce travail.

II.1.1 Équations de Maxwell

Elles peuvent être écrites mathématiquement sous leur forme différentielle comme indiqué ci-dessous [2],[3] :

- **Équation de Maxwell-Faraday**

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \textbf{(II.1)}$$

- **Équation de conservation du flux magnétique**

$$\nabla . \vec{B} = 0 \quad \textbf{(II.2)}$$

- **Équation de Maxwell-Ampère**

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \textbf{(II.3)}$$

- **Équation de Maxwell-Gauss**

$$\nabla . \vec{D} = \rho \quad \textbf{(II.4)}$$

Avec

E : Champ électrique [V/m]

H : Champ magnétique [A/m]

B : Induction magnétique [T]

J_c : Densité de courant de conduction [A/m^2]

D : Déplacement électrique [C/m^2]

ρ : Densité volumique de charge [C/m^3]

II.1.2 Équations constitutives

Les équations de Maxwell sont complétées par les relations constitutives reliant les grandeurs électromagnétiques aux propriétés des matériaux :

- Relation diélectrique

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \textbf{(II.5)}$$

- Relation électrique

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad \textbf{(II.6)}$$

- Relation magnétique

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \textbf{(II.7)}$$

Où :

σ : Conductivité électrique [S/m]

ε : Permittivité diélectrique [F/m]

μ : Perméabilité magnétique [H/m]

II.2 LOGICIEL FEMM

II.2.1 Présentation du logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) constitue un outil de simulation numérique open source fondée sur la méthode des éléments finis, développé par David Meeker. Cet environnement de calcul est spécifiquement dédié à la résolution de problèmes d'électromagnétisme en régime basse fréquence, notamment pour des configurations géométriques bidimensionnelles planes ou axisymétriques [4],[5],[6].

II.2.2 Les composants du logiciel FEMM

☞ **Pré-processeur (Pre-processor : femm.exe)**

Interface graphique permettant de dessiner ou d'importer la géométrie (nœuds, segments, arcs), d'assigner les propriétés physiques des matériaux depuis la bibliothèque et de définir les conditions aux limites.

☞ **Générateur de maillage (triangle.exe) :**

Ce module discrétise automatiquement le domaine d'étude en un réseau d'éléments triangulaires. La finesse du maillage est ajustable selon la précision recherchée.

☞ **Solveurs physiques (fkern.exe, belas.exe...) :**

Ils constituent le cœur de calcul de FEMM et s'exécutent en arrière-plan sous forme de fichiers exécutables spécifiques selon le type d'analyse choisi. Le logiciel active ainsi **fkern.exe** pour le solveur magnétique (magnétostatique et harmonique), **belas.exe** pour le solveur électrostatique (champs électriques), **cckern.exe** pour le solveur de conduction du courant (milieux ohmiques), et **hckern.exe** pour le solveur thermique (transfert de chaleur) .

☞ **Post-processeur (femmview.exe) :**

Outil de visualisation des résultats sous forme de lignes de flux, de cartographies de couleurs (densité de flux B, champ H) ou de vecteurs. Il permet également de calculer des grandeurs globales (forces, couples, inductances, pertes Joule).

☞ **Interface de script et d'automatisation :**

FEMM intègre un moteur de script basé sur le langage Lua, permettant d'automatiser la création des modèles, la modification des paramètres et l'extraction des résultats. Il offre également des interfaces externes (PyFEMM pour Python, Octave/MATLAB), facilitant les études paramétriques et les procédures d'optimisation. [4],[7],[8] .

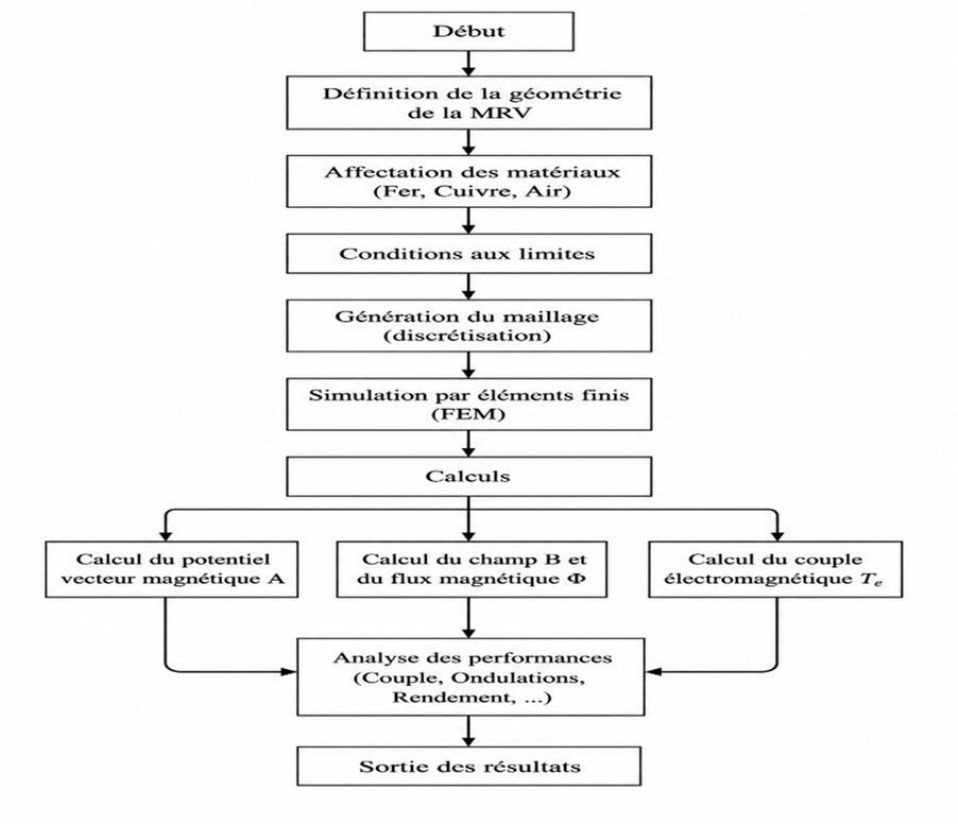


Figure II.1 Schéma de fonctionnement du logiciel FEMM

II.3 MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE SOUS FEMM

II.3.1 Structure de MRV étudiée

La machine à réluctance variable étudiée est une machine à double saillance (MRVDS) de configuration 6/4, comportant 6 pôles statoriques et 4 pôles rotoriques, comme illustré à la Figure II.2. Les principales dimensions géométriques de cette machine sont récapitulées dans le Tableau II.1.

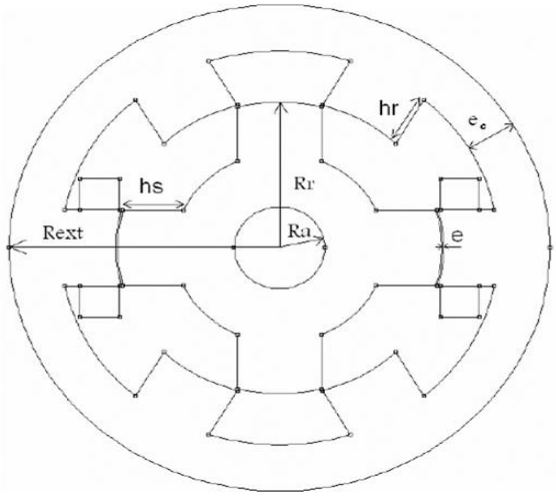


Figure II.2 Structure de Machine à Reluctance Variable étudiée

Tableau II.1 Dimensions géométriques de la MRV

Nombre des dents statoriques	N_s	6
Nombre des dents rotoriques	N_r	4
Rayon extérieur	R_{ext}	125 mm
Rayon de l'arbre	R_a	21 mm
Rayon du rotor	R_r	75 mm
Hauteur du pole rotorique	H_r	28 mm
Hauteur du pole statorique	H_s	26.2 mm
Longueur active de la machine	L	150 mm
Ouverture des dents rotoriques	B_r	32°
Ouverture des dents statoriques	B_s	30°
Entrefer	e	0.8 mm

II.3.2 Caractéristiques des matériaux magnétiques

Les circuits magnétiques du stator et du rotor sont réalisés en tôles ferromagnétiques NO20. Leur caractéristique d'aimantation B(H), présentée à la figure II.3, se distingue par une forte perméabilité initiale pour de faibles valeurs de H, suivie d'une saturation progressive lorsque l'induction B approche **2 T**.

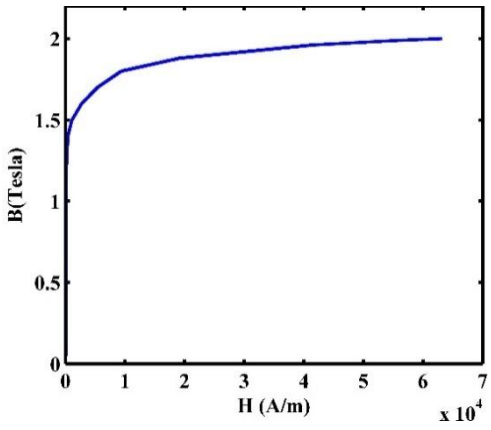


Figure II.3 Caractéristique magnétique des Tôles NO20

II.3.3 La géométrie de la machine sous FEMM

La figure II.4 présente la modélisation bidimensionnelle de la machine à réluctance variable (MRV) réalisée sous le logiciel FEMM. Elle met en évidence de manière claire les différentes régions géométriques ainsi que les matériaux constitutifs de la machine, notamment les zones d'air, les enroulements et les parties ferromagnétiques du stator et du rotor.

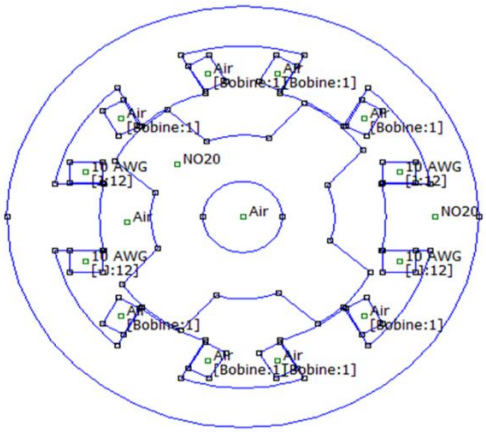


Figure II.4 Dessin de la géométrie de la machine sous FEMM

II.3.4 Maillage de la machine étudiée sous FEMM

La figure II.5 illustre le maillage bidimensionnel de la MRV obtenu par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel FEMM, pour les deux positions extrêmes du rotor : (a) la position d'opposition et (b) la position de conjonction.

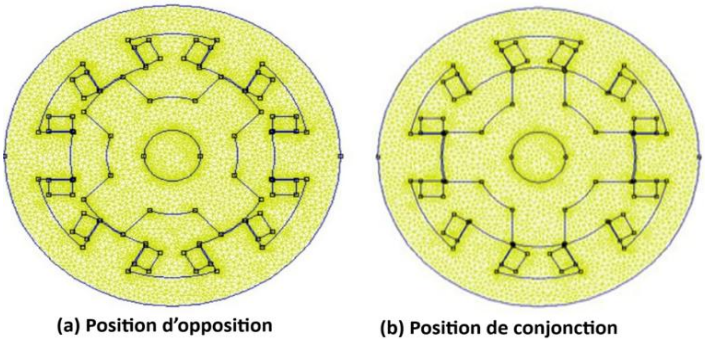


Figure II.5 Maillage de la machine étudiée sous FEMM : (a) position d'opposition, (b) position de conjonction

II.3.5 Lignes de champ pour les deux positions extrêmes

La figure II.6 illustre la répartition des lignes de flux magnétique, obtenue à l'aide du logiciel FEMM, pour *les deux positions extrêmes* du rotor : (a) la position d'opposition et (b) la position de conjonction.

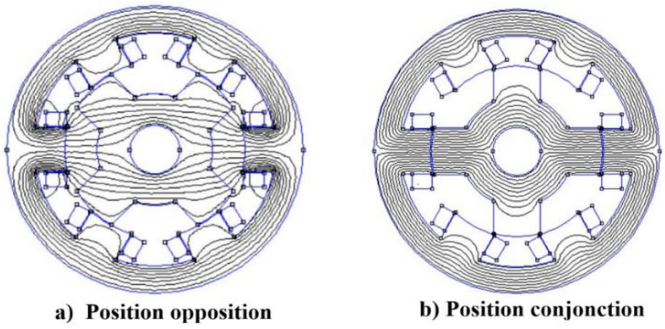


Figure II.6 Distribution des lignes de flux magnétique

II.4 CARACTERISTIQUES ELECTROMAGNETIQUES

Nous avons fait tourner le rotor sur une période électrique (90°), allant d'une position d'opposition à la position d'opposition suivante, avec un pas angulaire de 1°. Pour chaque position du rotor, une phase du stator est alimentée en courant continu, variant de 0 A à 400 A.

II.4.1 Caractéristique flux-courant : φ (θ, I)

La figure II.7 présente les caractéristiques du flux magnétique en fonction du courant de phase pour différentes positions angulaires du rotor, notées $\varphi(\theta, I)$. Nous obtenons ainsi un réseau de courbes qui met clairement en évidence les effets de la saturation magnétique et de la double saillance de la machine.

La courbe inférieure correspond à la position d'opposition, à forte réluctance, avec un flux quasi linéaire grâce au grand entrefer.

La courbe supérieure correspond à la position de conjonction, où la perméance est maximale : le flux croît rapidement puis se sature à partir d'environ 100 A.

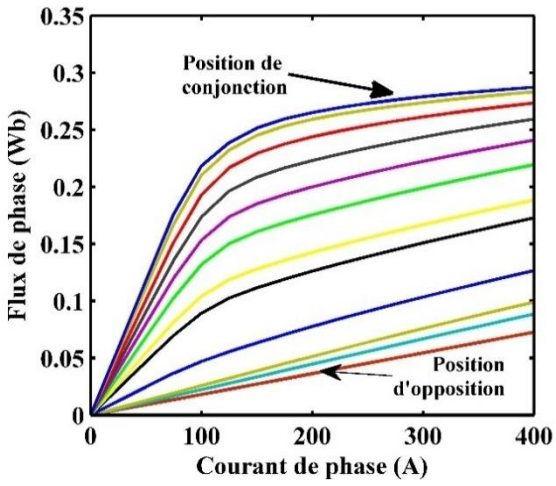


Figure II.7 Flux en fonction de la position du rotor

II.4.2 Caractéristique flux-position

La figure II.8 montre comment le flux magnétique varie en fonction de la position mécanique du rotor pour différentes valeurs d'excitation. Les résultats indiquent que la position de conjonction, à 45°, coïncide avec les valeurs maximales du flux magnétique, tandis que la position d'opposition, à 0° (ou 90°), correspond aux valeurs minimales du flux. De plus, la courbe en bleu représente un courant d'excitation nul, ce qui signifie qu'il n'y a pas de flux magnétique.

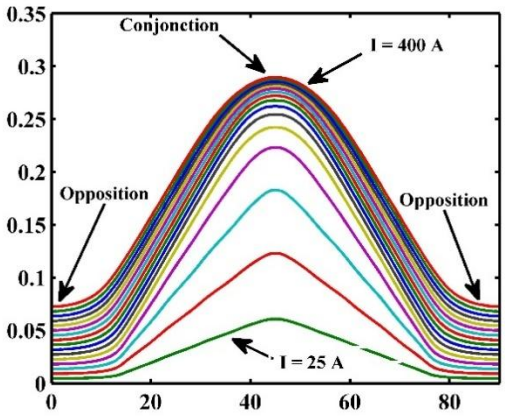


Figure II.8 Flux en fonction de la position du rotor

II.4.3 Inductance en fonction de la position : L (θ, I)

La figure II.9 montre l'évolution de l'inductance d'une phase en fonction de la position du rotor pour différents valeurs du courant d'excitation. L'inductance est minimale en position d'opposition et maximale en position de conjonction, en raison de la variation de la réluctance du circuit magnétique.

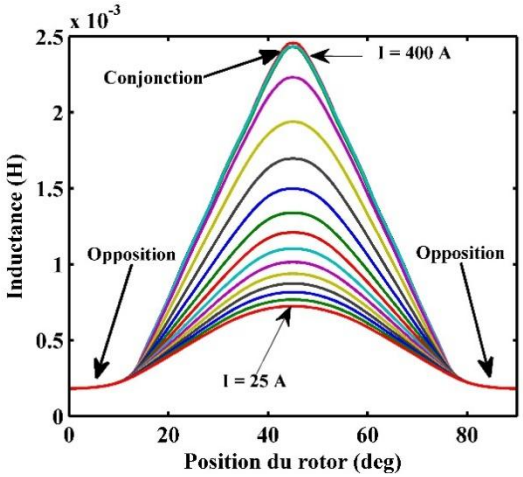


Figure II.9 Induction d'une phase en fonction de la position mécanique du rotor

II.4.4 Caractéristiques de couple

La figure II.10 montre l'évolution du couple électromagnétique en fonction de la position du rotor pour différentes excitations. Le couple varie périodiquement à cause des variations de réluctance liées à l'alignement et au désalignement des dents du rotor et du stator.

Les positions d'opposition (0° et 90°) correspondent à une réluctance maximale, où le couple est nul. À la position de conjonction (45°), l'alignement est maximal et l'inductance est maximale, mais le couple s'annule également en changeant de signe, marquant le passage entre régime moteur et régime générateur.

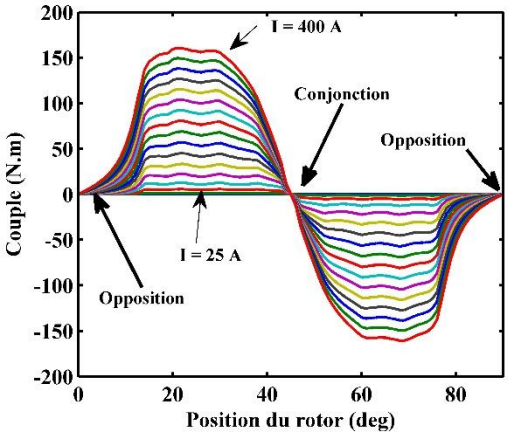


Figure II.10 Le couple en fonction de la position mécanique du rotor

CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la modélisation complète de la machine à réluctance variable (MRVDS 6/4) en s'appuyant sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme et la méthode des éléments finis via le logiciel FEMM. La simulation de la structure a permis d'analyser le comportement magnétique de la machine en fonction de la position du rotor et du courant d'excitation.

Les résultats obtenus mettent en évidence la forte non-linéarité du système à travers les caractéristiques du flux φ (θ, I) et de l'inductance L (θ, I). Par ailleurs, les caractéristiques de couple ont révélé une variation périodique, avec annulation aux positions d'alignement et de désalignement, permettant d'identifier les zones de fonctionnement moteur et générateur.

L'ensemble de ces résultats confirme le principe de fonctionnement basé sur la variation de réluctance et constitue une base essentielle pour l'étude du modèle dynamique et la commande de la machine dans le chapitre suivant.

REFERENCES

[1] S. YACINE et F. SAOULA " Etude d'une machine synchrone linéaire à aimants permanents". Mémoire de fin d'étude, d'ingénieur de l'UMMTO, promotion 2006.

[2] L. AOMAR, "Calcul tridimensionnel des courants induits dans des dispositifs électromagnétiques par la méthode intégrale PEEC et par une approche Intégro-Différentielle," Thèse de doctorat en science. Université de Jijel, 2019.

[3] Z. BELLI, "Modele analytico-numérique dynamique pour la prise en compte du mouvement." Université de Jijel-Mohammed Seddik Ben yahia.

[4] BENEDDINE Tayeb, BENANTEUR Youssef, "Etude et modélisation d'un moteur linéaire à aimant permanent par les logiciels COMSOL/FEMM," Pour l'obtention du diplôme de Master, Université d'Oran 2

[5] R. Rezika, "Etude d'une machine à réluctance variable linéaire par la méthode des éléments finis." Université Mouloud Mammeri, 2011.

[6] D. Meeker "Finite Element Method Magnetics 4.0 – User's Manual."

[7] R. Lyes and H. Ferhat, "Etude paramétrique d'une MRV avec le logiciel FEMM." Université Mouloud Mammeri, 2018.

[8] F. Rebahi, "Contribution a l'optimisation des performances d'une machine à réluctance variable," Mémoire magistère, Univ. Mentouri Constantine, vol. 3, 2009.

Chapitre III

Commande de la machine à réluctance Variable

Chapitre III : Commande de la machine à réluctance Variable

INTRODUCTION

La machine à réluctance variable (MRV) nécessite une alimentation séquentielle des phases statoriques, synchronisée avec la position du rotor. Ce chapitre présente dans un premier temps les topologies de convertisseurs statiques, notamment le demi-pont asymétrique et le convertisseur de Miller, ainsi que les stratégies de commande en courant et en tension. Ensuite, le modèle mathématique régissant le comportement électromécanique de la machine est établi. Enfin, un modèle de simulation sous MATLAB/Simulink, intégrant les données issues de la méthode des éléments finis, est développé afin d'analyser les performances dynamiques de la machine (courants, couple et vitesse).

III.1 ALIMENTATION DE LA MRV

Contrairement aux machines classiques (DC, synchrones ou asynchrones), la MRV ne peut pas être alimentée directement par une source continue ou un réseau triphasé. Elle nécessite une excitation séquentielle et indépendante des phases statoriques, synchronisée avec la position du rotor.

Cela impose l'usage d'un convertisseur électronique de puissance avec une commande adaptée, assurant la commutation des phases et influençant directement le couple, la vitesse et le rendement de la machine.

III.1.1 Convertisseurs en demi-pont asymétriques

L'onduleur le plus utilisé pour l'alimentation de la MRV est le demi-pont asymétrique (Fig. III.1). Chaque bras comporte deux interrupteurs (IGBT ou MOSFET) et deux diodes de roue libre [1]. Cette structure permet un contrôle indépendant de chaque phase, offrant ainsi une grande flexibilité de commande du moteur.

Le fonctionnement de cet onduleur repose sur une commande sélective des interrupteurs, synchronisée avec la position du rotor, afin de contrôler la circulation du courant pendant les zones de variation de l'inductance de phase, correspondant au mode moteur (inductance croissante) ou générateur (inductance décroissante).

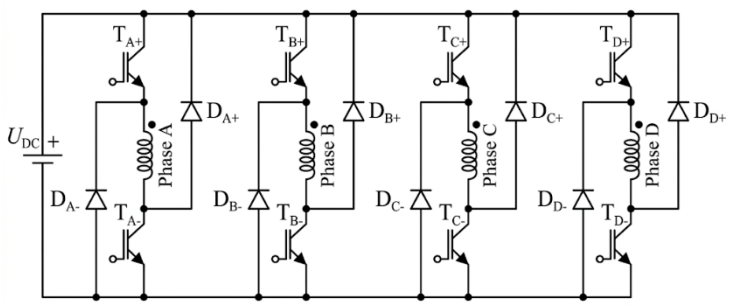


Figure III.1 Convertisseur en demi-pont asymétrique m phases [2], [3]

Trois états de commutation sont possibles, chacun correspondant à un mode de fonctionnement particulier [4]:

- **Alimentation active** : les deux interrupteurs du bras sont fermés (T_{A+} = 1, T2 = 1), ce qui applique la tension d'alimentation +U_{DC} à la phase (Figure III.2 a). Le courant augmente et le flux magnétique s'établit.
- **Roue libre (freewheeling)** : un seul interrupteur est fermé (T_{A+} = 1, T2 = 0 ou T_{A+} = 0, T2 = 1) ; dans ce cas, le courant décroît lentement, circulant à travers l'un des interrupteurs et une diode, avec une tension nulle aux bornes de la phase (Figure III.2 b).
- **Démagnétisation rapide** : les deux interrupteurs sont ouverts (T_{A+} = 0, T2 = 0) ; le courant s'annule rapidement en circulant à travers les diodes de roue libre, entraînant une tension inverse -U_{DC} sur la phase (Figure III.2 c).

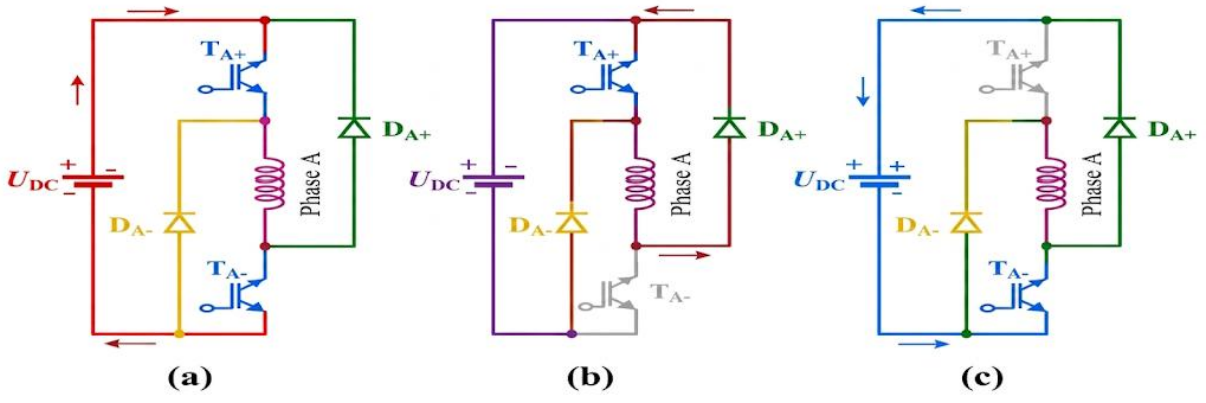


Figure III.2 Séquences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique

Le Tableau III.1 ci-dessous résume les différentes combinaisons des interrupteurs T_{A+} et T_{A-}, ainsi que la tension résultante U aux bornes de la phase.

Tableau III.1 États des commutateurs du convertisseur à demi-pont asymétrique [4]

Cas	T_{A+}	T_{A-}	U
1	1	1	$+U_{DC}$
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0	0	$- U_{DC}$

III.1.2 Convertisseur de Miller

Le convertisseur de Miller, ou topologie (m+1), est une structure d'alimentation de la MRV qui nécessite seulement m+1 interrupteurs pour une machine à m phases, ce qui réduit le coût et la complexité du convertisseur par rapport au demi-pont asymétrique [1], [5].

Comme illustré à la figure III.3, les interrupteurs inférieurs T_1, T_2 …, T_m assurent la sélection de la phase à exciter, tandis qu'un unique interrupteur supérieur T_r est partagé par toutes les phases.

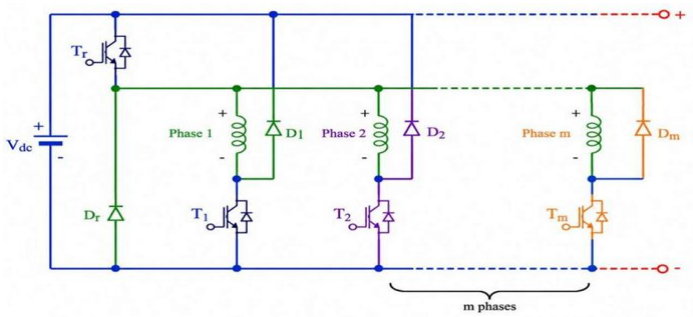


Figure III.3 Schéma du convertisseur de Miller

Le fonctionnement comporte quatre états principaux résumés dans le tableau III.2. Lorsque T_r et T_j conduisent simultanément, la tension $+V_{dc}$ est appliquée à la phase (magnétisation). Lorsque les deux interrupteurs sont bloqués, la tension $-V_{dc}$ favorise une démagnétisation rapide. Les deux autres configurations correspondent à la roue libre avec une tension nulle aux bornes de la phase.

Tableau III.2 États des commutateurs du convertisseur de Miller

CAS	T_j	T_r	U
1	1	1	$+V_{dc}$
2	0	1	**0**
3	1	0	**0**
4	**0**	**0**	$- V_{dc}$

III.2 STRATEGIES DE COMMANDE DE LA MACHINE A RELUCTANCE VARIABLE

L'autopilotage de la machine à réluctance variable repose sur la synchronisation de l'alimentation des phases de l'onduleur avec la position du rotor. Il s'effectue principalement par commande en courant ou en tension selon le régime de fonctionnement.

II.2.1 Commande en courant

Dans la zone de couple constant et à basse vitesse (Figure III.4), la MRVDS est alimentée par des impulsions de courant ajustées en fonction du couple demandé. Ces impulsions sont appliquées durant la zone de variation positive de l'inductance en mode moteur, ou négative en mode génératrice. Le courant de phase est généralement régulé autour d'une consigne selon différentes techniques [6], [7], [8].

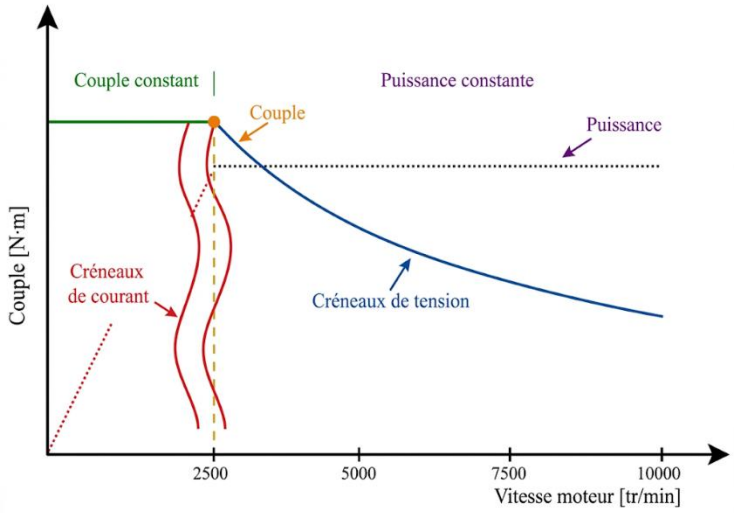


Figure III.4 Stratégies d'alimentation selon la vitesse de rotation

III.2.1.1 Contrôle des courants par MLI

Le contrôle des courants par MLI (PWM) assure une fréquence de commutation constante, ce qui permet une ondulation de courant fixe et un meilleur contrôle de l'onduleur. Le courant de phase est maintenu entre deux limites I_M et $-I_M$ durant la phase de croissance de l'inductance. Lorsque le courant atteint I_M, les interrupteurs sont ouverts pour le faire décroître jusqu'a $-I_M$, puis ils sont refermés. Ce cycle est répété afin de réguler le courant autour de sa consigne [3].

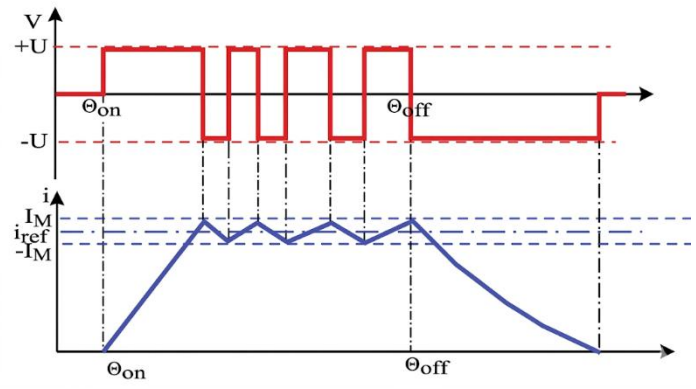


Figure III.5 Formes des courants pour une alimentation MLI [3]

III.2.1.2 Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Cette méthode, largement utilisée en industrie, consiste à maintenir les courants de phase dans une bande étroite autour de leur valeur de référence. Le courant mesuré est comparé en continu à sa consigne, et les interrupteurs de l'onduleur commutent dès que l'erreur dépasse les seuils fixés [9].

III.2.2 Commande en tension

Dans la zone de fonctionnement à puissance constante (Figure III.4), correspondant aux vitesses supérieures à la vitesse de base, la commande par MLI ou par hystérésis devient moins efficace en raison de l'augmentation de la force contre-électromotrice de la machine. Cette dernière réduit la tension disponible aux bornes des phases, ce qui limite la capacité de régulation du courant.

Une commande en tension est alors adoptée. Chaque phase est alimentée par une tension de forme rectangulaire égale à la tension du bus continu, comme illustré à la figure III.6.

Le contrôle du couple est réalisé par l'ajustement des angles d'alimentation, notamment l'angle d'amorçage θ_{ON} et l'angle de désamorçage θ_{OFF}, qui déterminent respectivement le début et la fin de l'application de la tension sur la phase.

Dans ces conditions, les formes d'ondes du courant injecté diffèrent significativement de celles observées à basse vitesse, où la régulation de courant est pleinement efficace [9].

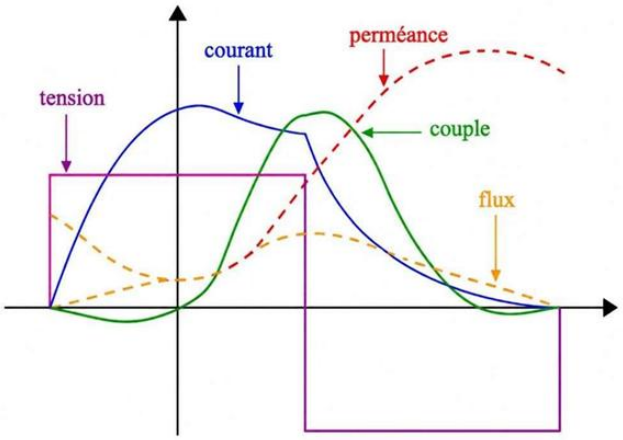


Figure III.6 Commande en créneaux de tension [4]

III.3 MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA MRV

III.3.1 Équation électrique

Le circuit équivalent d'une phase de la machine à réluctance variable est constitué d'une résistance statorique **R**, d'une inductance variable $L(\theta, i)$ et d'une force contre-électromotrice, montées en série, comme illustré à la figure III.7.

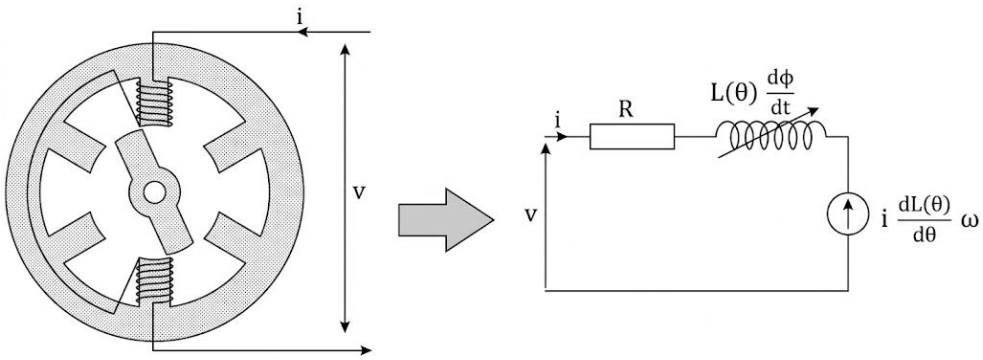


Figure III.7 Circuit équivalent d'une phase de la MRV

L'équation électrique aux bornes de chaque phase statorique s'écrit :

$$\mathbf{U = R\,i + \frac{d\phi}{dt}} \qquad \textbf{(III.1)}$$

U et i représentent respectivement la tension et le courant de phase.

ϕ: Flux total traversant le bobinage.

Cette relation peut être développée sous la forme :

$$\mathbf{U = Ri + L(\theta, i)\frac{di}{dt} + i\,\frac{dL(\theta,i)}{dt}} \qquad \textbf{(III.2)}$$

En tenant compte de la relation $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, on obtient :

$$R.i + L(\theta, i)\ \omega\ \frac{di}{d\theta} + i\ \omega \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \quad \textbf{(III.3)}$$

ω : Vitesse de rotation du rotor.

$e = i.\frac{dL(\theta,i)}{d\theta}.\omega$: Force contre-électromotrice.

III.3.2 Équation mécanique

Pour réaliser la simulation de la machine, il est nécessaire de compléter les équations électriques par l'équation mécanique du mouvement du système, établie à partir du principe fondamental de la dynamique. On obtient alors :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\,\Omega \quad \textbf{(III.4)}$$

III.4 SIMULATION SOUS MATLAB-SIMULINK

Dans cette partie, afin d'étudier le comportement dynamique de la machine à réluctance variable à double saillance 6/4 étudiée au chapitre III, une simulation est réalisée sous MATLAB/Simulink. L'alimentation est assurée par un convertisseur statique commandé en courant à l'aide d'un régulateur à hystérésis.

III.4.1 Schéma bloc de simulation

La figure III.8 illustre le modèle global de simulation développé sous l'environnement Simulink. Il est constitué de trois blocs principaux : un bloc de convertisseur de puissance assurant l'alimentation de la machine, un bloc représentant la machine à réluctance variable (MRV) et un bloc de capteur de position permettant la mesure de la position angulaire du rotor. L'interconnexion de ces différents blocs permet de reproduire le comportement dynamique de la machine à réluctance variable étudiée.

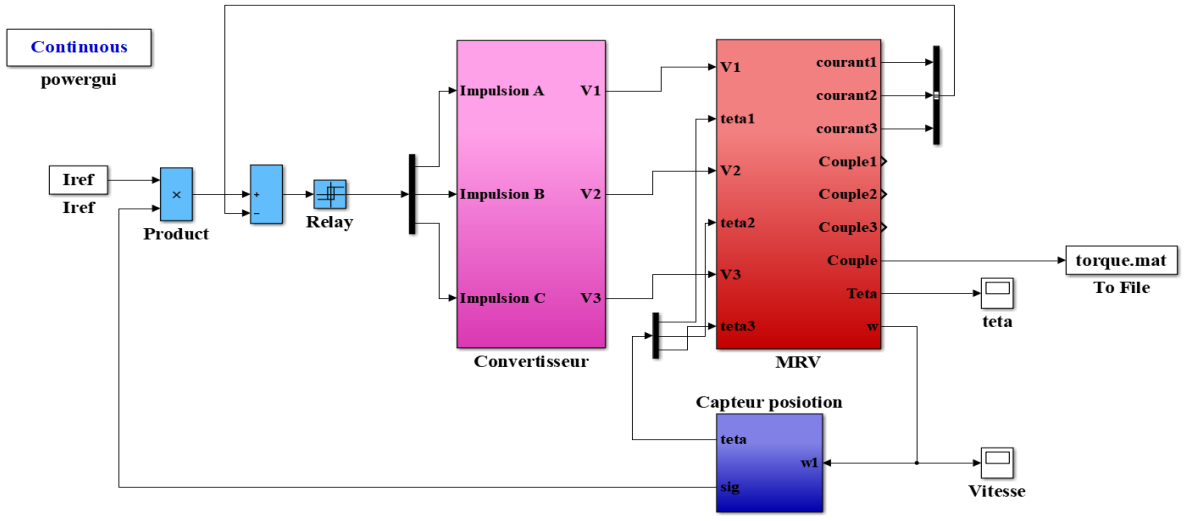


Figure III.8 Modèle global de la MRV sous MATLAB/Simulink

III.4.1.1 Bloc de convertisseur statique

La figure III.9 présente l'architecture interne du convertisseur statique destiné à l'alimentation de la MRVDS 6/4. Il est constitué de trois sous-ensembles indépendants, chacun associé à une phase de la machine (A, B et C). Chaque phase est commandée indépendamment par des interrupteurs de puissance de type IGBT, de manière à appliquer la tension continue d'alimentation V_{dc} selon les ordres délivrés par le régulateur à hystérésis, qui maintient le courant dans une bande de réglage définie.

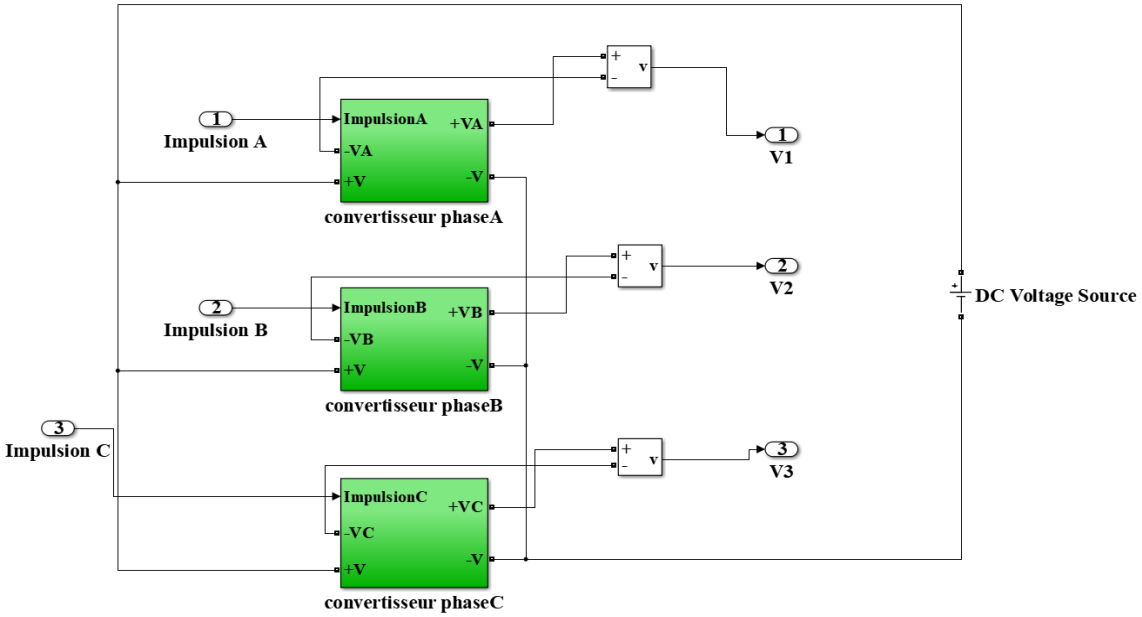


Figure III.9 Convertisseur de puissance

La figure III.10 illustre la structure interne du convertisseur asymétrique associé à une phase. Elle est composée de deux interrupteurs de puissance de type IGBT, commandés par des signaux d'impulsion, ainsi que de deux diodes de roue libre assurant la continuité du courant lors des phases de commutation.

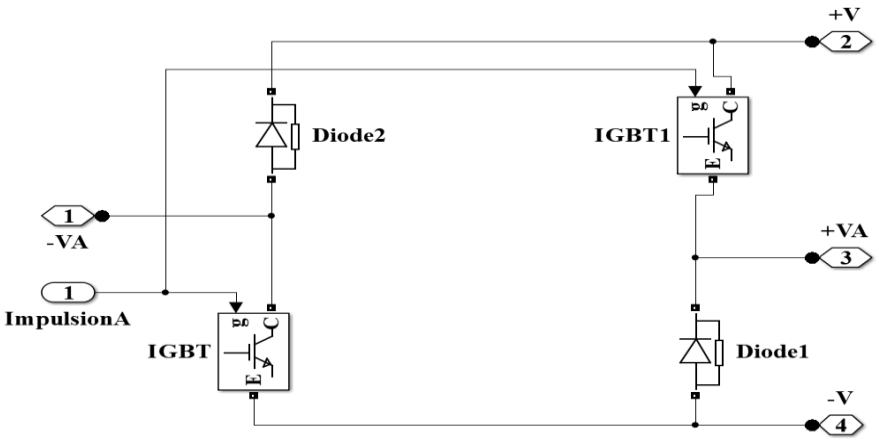


Figure III.10 Bloc Simulink d'un seul bras du convertisseur

III.4.1.2 Bloc de la MRV 6/4

La figure III.11 présente l'architecture interne du bloc utilisé pour simuler la MRVDS 6/4. Chaque phase reçoit deux grandeurs d'entrée, à savoir la position angulaire du rotor θ et la tension appliquée à la phase considérée.

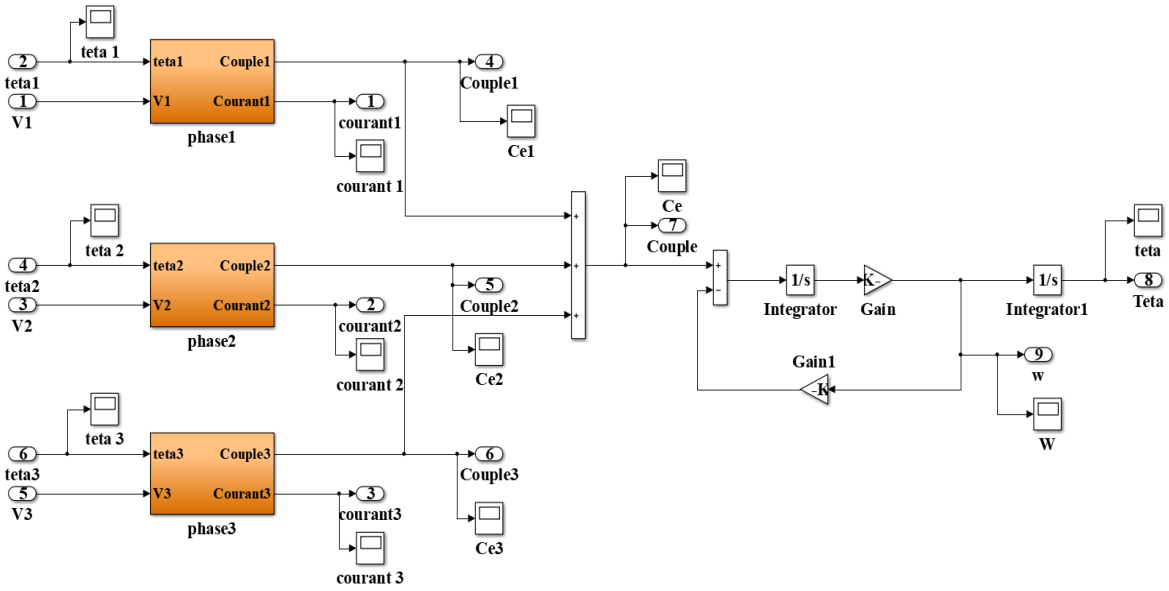


Figure III.11 Schéma bloc de la MRV 6/4

À partir des résultats obtenus par la méthode des éléments finis au chapitre précédent, deux matrices de données sont construites : la première correspond aux courants de phase et la deuxième au couple électromagnétique. Ces matrices sont ensuite intégrées au modèle de la MRV à l'aide des blocs *Look-Up Table* de la bibliothèque Simulink, afin de déterminer le courant de phase ainsi que le couple électromagnétique, comme illustré à la figure III.12.

Les couples produits par les trois phases sont ensuite sommés pour obtenir le couple total de la machine. Ce dernier est appliqué au modèle mécanique, qui permet alors de calculer la vitesse de rotation ω ainsi que la position angulaire θ du rotor.

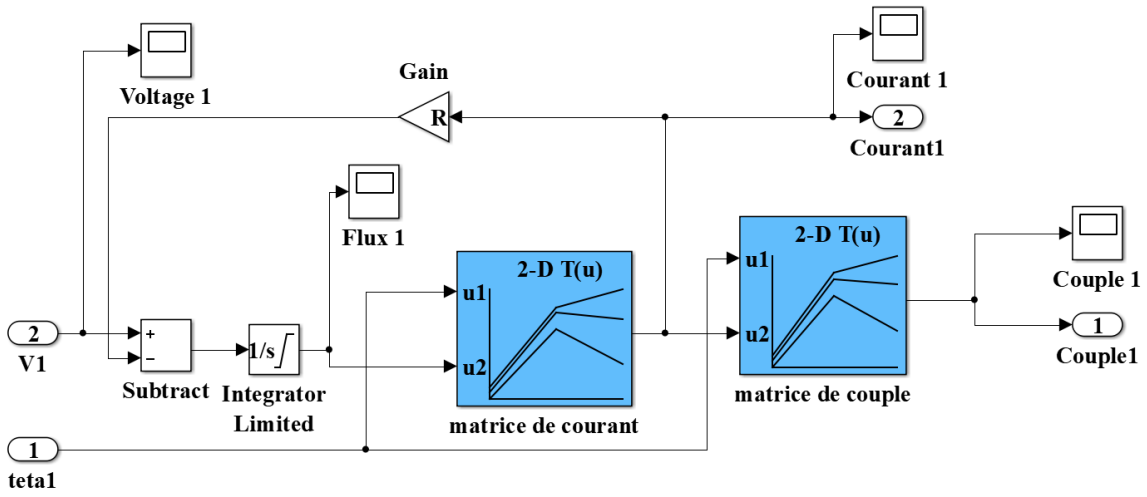


Figure III.12 Schéma bloc de la phase A de la MRV 6/4

III.4.1.3 Capteur de position

Le capteur de position est crucial pour la MRV : il fournit en temps réel la position angulaire du rotor, permettant ainsi de synchroniser l'excitation des phases pour garantir un fonctionnement correct et performant.

La figure III.13 présente le modèle du capteur de position développé sous Simulink. En intégrant la vitesse angulaire du rotor ω (rad/s), ce bloc détermine la position rotorique instantanée. Celle-ci est ensuite ramenée périodiquement dans l'intervalle [0° - 90°] par une opération de modulo, comme l'illustre la figure III.14. Lorsque cette position se situe dans la plage définie entre θ_{on} et θ_{off}, une impulsion logique de niveau haut (1) est générée afin de commander l'ouverture et la fermeture des IGBT du convertisseur statique (Figure III.15).

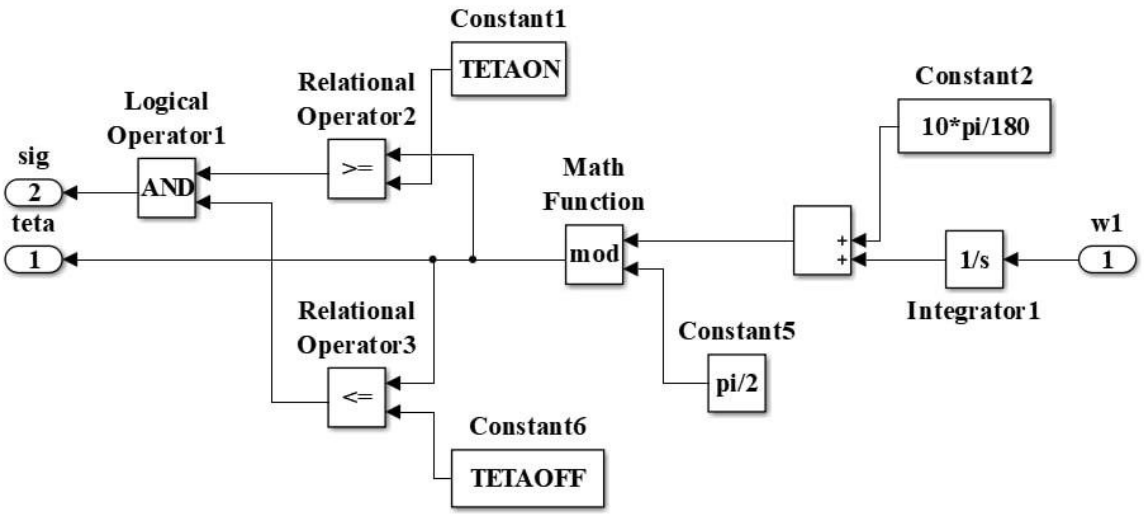


Figure III.13 Capteur de position

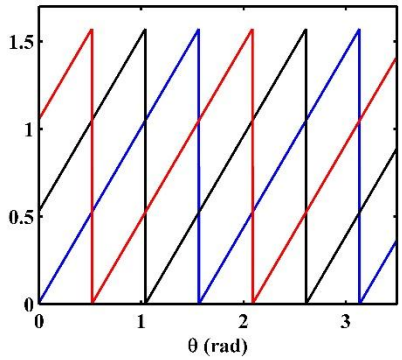


Figure III.14 Position angulaire du rotor

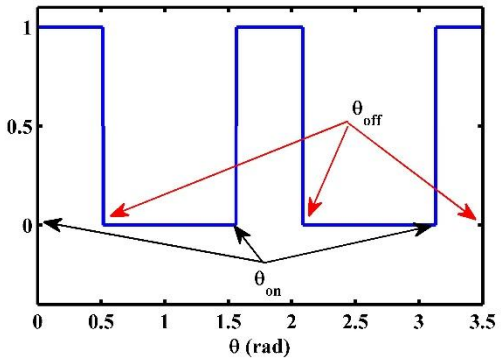


Figure III.15 Signaux d'impulsion

III.4.2 Résultats de la simulation

Les caractéristiques de la machine retenue pour la simulation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 Paramètres de simulation de la MRVDS

Paramètre	Valeur
Angle d'amorçage $\boldsymbol{\theta_{on}}$	0°
Angle de blocage $\boldsymbol{\theta_{off}}$	30^0
Tension d'alimentation **V**	$120\ Volts$
Résistance d'une phase **R**	$0.0078\ \Omega$
Moment d'inertie **J**	$0.02836\ kg.m^2$
Coefficient du frottement **F**	$0.02\ N.m\ .s/rad$

Le comportement dynamique de la MRVDS en fonctionnement à vide est étudié sous une commande de courant par hystérésis. Les résultats sont présentés pour $\theta_{on} = 0^{\circ}$, $\theta_{off} = 30^{\circ}$ avec un courant de référence $I_{ref} = 50A$.

III.4.2.1 Courants de phase

La figure III.16.a illustre l'évolution des courants dans les trois phases de la MRV. On observe des allures similaires, décalées d'un angle de 30°. Les courants restent globalement centrés autour de la valeur de référence $I_{ref} = 50A$. La figure III.16.b présente, quant à elle, l'évolution du courant d'une seule phase.

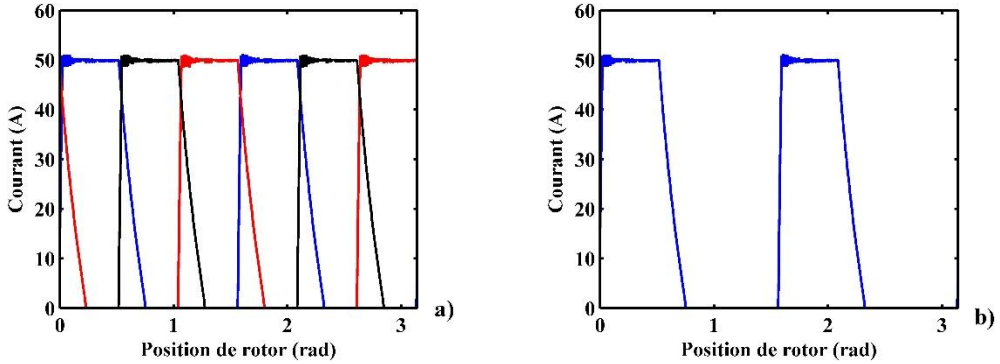


Figure III.16 Variation des courants de la MRV : (a) phases A, B et C ; (b) phase A

III.4.2.2 Couples électromagnétiques

La figure III.17 montre l'allure du couple électromagnétique généré par chacune des trois phases de la machine. On constate que chaque phase participe à la production d'un couple d'environ 5.2 N·m. La somme de ces contributions donne le couple total, représenté sur la figure III.18.

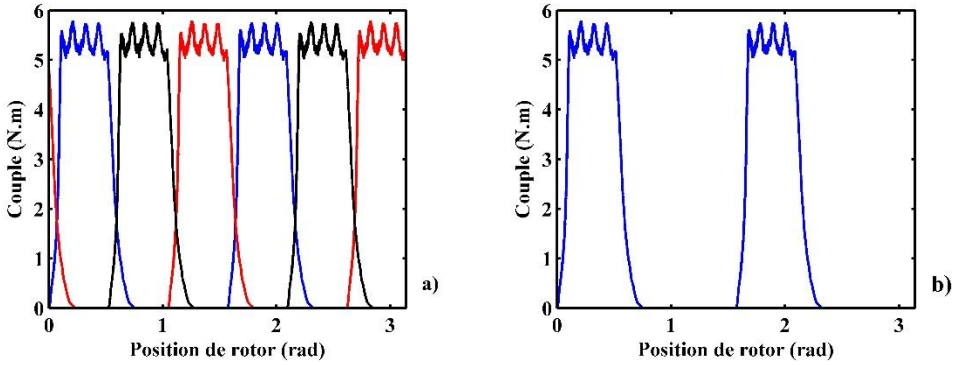


Figure III.17 Variation du couple électromagnétique : (a) Phases A, B et C ; (b) Phase A

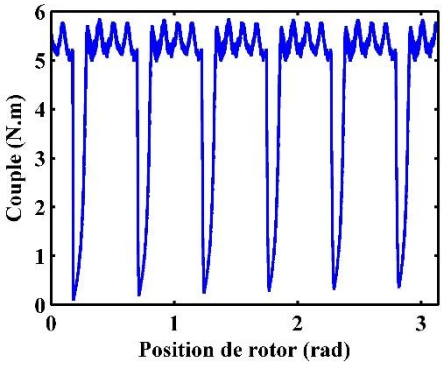


Figure III.18 Variation du couple électromagnétique total

III.4.2.3 Vitesse de rotation

La figure III.19 illustre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor (rad/s) en fonction du temps. On observe une augmentation rapide de type exponentielle durant les premières secondes, avec une vitesse atteignant environ 200 rad/s entre 2 et 3 s. Par la suite, la croissance devient plus lente jusqu'à atteindre une valeur de 256 rad/s au bout d'environ 7 s. Au-delà de cet instant, la vitesse se stabilise, ce qui confirme que le système a atteint son régime permanent.

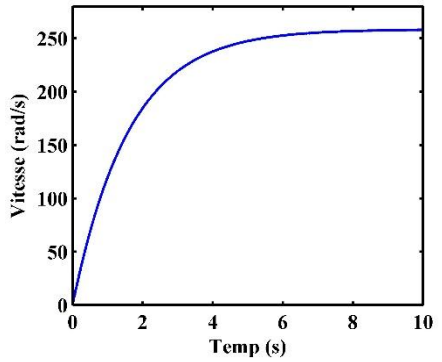


Figure III.19 Variation de la vitesse de rotation

CONCLUSION

Ce chapitre a permis de détailler les structures d'alimentation et les stratégies de commande adaptées à la MRV. L'analyse a mis en évidence l'efficacité du convertisseur en demi-pont asymétrique associé à une commande en courant par hystérésis pour le fonctionnement à basse vitesse.

L'élaboration du modèle mathématique et son implémentation sous MATLAB/Simulink, enrichie par les données de la méthode des éléments finis via des tables de consultation (LUT), ont permis de simuler fidèlement le comportement dynamique de la machine. Les résultats de simulation valident le modèle développé et démontrent la capacité du système à réguler les

courants de phase, à produire le couple électromagnétique souhaité et à atteindre un régime permanent stable.

REFERENCES

[1] Y. Saadi, "S*tratégies de contrôle et analyse des défauts d'une machine à réluctance variable pour une chaîne de traction électrique*," 2019, Université Paris Saclay (COmUE).

[2] K. T. Chau, *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*. John Wiley & Sons, 2015.

[3] M. CHOUITEK, "*Commande d'un moteur à reluctance variable par l'emploi de l'intelligence artificielle*," 2017, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ….

[4] C. Labiod, "*Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable*," 2014, Université Mohamed Khider Biskra.

[5] S. Hiteshree, K. B. Sakhar, and D. D. Porate, "*Comparative performance Analysis of Switched Reluctance Motor Using Converter Topology*," Int. J. Electr. Electron. Data Commun. ISSN, pp. 2084–2320, 2015.

[6] G. Séguier and F. Notelet, "*Électrotechnique industrielle, 3e éd*," Paris Éditions TEC DOC, 2006.

[7] H. Kuss, T. Wichert, and B. Szymanski, "*Design of a high speed Switched Reluctance Motor for spindle drive,*" in 2007 Compatibility in Power Electronics, IEEE, 2007, pp. 1–5.

[8] P. Laurent, B. Multon, E. Hoang, and M. Gabsi, "*Sensorless Position Measurement Based on PWM Eddy Current Variation for Switched Reluctance Motor*," in European Power Electronics Conference, 1995, p. pp-787.

[9] R. Redjem, "*Modélisation et optimisation d'une structure de machine à réluctance variable dédiée aux énergies renouvelables*," 2010, thèse Doctorat de l'université de Mentouri–Constantine, option modélisation.

Chapitre IV

Optimisation De la machine à réluctance variable

Chapitre IV : Optimisation De la machine à réluctance variable

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'optimisation des performances de la machine à réluctance variable (MRV) à travers la détermination des angles de commutation optimaux. Le choix des angles d'amorçage θ_{on} et de coupure θ_{off} influence directement le couple électromagnétique et son taux d'ondulation. Dans un premier temps, les concepts fondamentaux de l'optimisation ainsi que les principales méthodes métaheuristiques sont présentés. Les principes de fonctionnement des algorithmes génétique (AG) et Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) sont ensuite décrits. Ces deux approches sont appliquées sous MATLAB/Simulink afin de rechercher les valeurs optimales des angles de commutation. La fonction objectif retenue consiste à minimiser le taux d'ondulation du couple électromagnétique. Enfin, les résultats obtenus sont analysés et comparés afin d'évaluer les performances des deux algorithmes.

IV.1 DEFINITION DE L'OPTIMISATION

L'optimisation consiste à rechercher la meilleure solution possible à un problème donné en déterminant le minimum ou le maximum d'une fonction objective. Cette fonction représente généralement un critère de performance que l'on souhaite améliorer. Dans certains problèmes, les variables de décision sont soumises à des contraintes qui limitent leurs valeurs à une zone précise de l'espace de recherche. Ces problèmes sont appelés des problèmes d'optimisation sous contraintes. De manière générale, un problème d'optimisation met en relation des données d'entrée, une fonction objective et des contraintes afin d'obtenir une solution optimale.

La structure générale de ce processus est illustrée par la Figure IV.1, qui présente les entrées et les sorties d'un bloc d'optimisation [1].



Figure IV.1 Structure globale du problème d'optimisation

IV.2 PROBLEME D'OPTIMISATION

De manière générale, un problème d'optimisation consiste à déterminer les meilleures valeurs d'un ensemble de variables afin d'optimiser une fonction objectif *f*, tout en respectant un certain nombre de contraintes d'égalité ou d'inégalité. L'ensemble des solutions admissibles constitue ce que l'on appelle l'espace de recherche, dans lequel chaque variable représente une dimension.

Selon les objectifs de l'étude, la fonction objective *f* peut être minimisée ou maximisée. Les problèmes d'optimisation peuvent prendre différentes formes : ils peuvent être statiques ou dynamiques lorsque les paramètres évoluent au cours du temps, mono-objectif lorsqu'un seul critère est considéré, ou multi-objectifs lorsque plusieurs critères doivent être optimisés simultanément. De même, ils peuvent être formulés avec ou sans contraintes, et comporter des variables continues ou discrètes.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs méthodes d'optimisation ont été développées. Les méthodes déterministes, également appelées méthodes exactes, permettent d'obtenir la solution optimale dans un temps de calcul raisonnable pour certaines catégories de problèmes. Toutefois, leur efficacité dépend généralement de propriétés particulières de la fonction objectif, telles que la continuité, la convexité ou la dérivabilité. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, notamment dans le cas de problèmes complexes et non linéaires, il devient souvent nécessaire de recourir à des méthodes d'optimisation plus avancées, telles que les algorithmes métaheuristiques [2].

IV.3 OPTIMISATION METAHEURISTIQUE

Les métaheuristiques sont des algorithmes d'optimisation de haut niveau, conçus pour résoudre des problèmes complexes sans modifier profondément l'algorithme sous-jacent. Le terme « métaheuristique » vient de la combinaison de deux mots grecs : *méta* (« au-delà » ou « à un niveau supérieur ») et *heuristique* (« je trouve »). Il a été créé par Fred Glover en 1986.

Ces algorithmes sont généralement génériques et souvent inspirés de phénomènes naturels. Ils sont particulièrement utiles pour traiter des problèmes d'optimisation difficiles comportant un grand nombre de solutions sous-optimales. La résolution satisfaisante de tels problèmes justifie souvent l'utilisation d'une métaheuristique puissante [3].

On distingue deux grandes familles de métaheuristiques :

Les métaheuristiques à base de population : elles manipulent simultanément un ensemble de solutions. Parmi elles, on trouve les algorithmes génétiques, l'optimisation par colonies de

fourmis, et l'optimisation par essaim particulaire (PSO). Ces méthodes sont plutôt exploratoires et permettent une meilleure diversification de l'espace de recherche.

Les métaheuristiques à solution unique : elles évoluent itérativement autour d'une seule solution. La méthode Tabou et le recuit simulé sont des exemples typiques. Ces méthodes sont davantage axées sur l'exploitation de l'espace de recherche, mais on n'est jamais certain d'atteindre l'optimum global.

En général, les métaheuristiques sont non déterministes : leurs résultats peuvent varier d'une exécution à l'autre. La majorité des algorithmes utilisés pour résoudre ces problèmes d'optimisation sont des métaheuristiques à base de population [4].

IV.4 TEACHING-LEARNING BASED OPTIMIZATION ALGORITHM

L'algorithme TLBO (Teaching-Learning-Based Optimization), développé par Rao et ses collaborateurs, est une métaheuristique d'optimisation globale inspirée du processus d'enseignement et d'apprentissage en classe. La population de solutions est assimilée à un groupe d'étudiants, tandis que la meilleure solution représente l'enseignant.

Le principal avantage du TLBO réside dans sa simplicité de paramétrage. Contrairement à de nombreuses métaheuristiques, il ne nécessite que deux paramètres de contrôle : la taille de la population et le nombre d'itérations. Cette caractéristique facilite sa mise en œuvre et réduit le risque d'un mauvais réglage des paramètres [5]-[9].

IV.4.1 Principe de l'algorithme TLBO

Le principe du TLBO repose sur deux phases : la phase d'enseignement, durant laquelle l'enseignant (la meilleure solution) améliore les connaissances des étudiants (les autres solutions), et la phase d'apprentissage, où les étudiants progressent grâce aux échanges entre eux. Les variables du problème sont assimilées aux matières enseignées, tandis que la valeur de fitness représente les performances des étudiants.

a) Phase de l'enseignant

Il s'agit de la première étape de l'algorithme où les apprenants apprennent à travers l'enseignant, qui est reconnu comme étant le meilleur apprenant. Durant cette phase, l'enseignant vise à améliorer la performance moyenne de la classe dans la matière qu'il enseigne, en utilisant ses compétences et ses capacités. À chaque itération i, supposons qu'il y ait m sujets (variables de conception) différents, n apprenants (taille de la population, $k = 1, 2, \dots, n$), et $M_{j,i}$ représente la performance moyenne des apprenants dans un sujet spécifique j ($j = 1, 2, \dots, m$). Le meilleur résultat global $X_{total-kbest,i}$, obtenu en considérant l'ensemble des

sujets dans la population entière des apprenants, peut être considéré comme le résultat du meilleur apprenant kbest. Cependant, étant donné que l'enseignant est généralement reconnu comme une personne hautement éduquée, chargée de former les apprenants pour améliorer leurs performances, l'algorithme considère le meilleur apprenant kbest identifié comme étant l'enseignant. La différence entre le résultat moyen existant de chaque matière et le résultat correspondant de l'enseignant pour chaque matière est donnée par :

$$\text{Differnce_Mean}_{j,k,i} = r_i\left(X_{j,kbest,i} - T_F\, M_{j,i}\right) \quad \textbf{(IV.1)}$$

Où $X_{j,kbest,i}$ représente le meilleur apprenant dans la matière j et r_i est une valeur aléatoire comprise entre 0 et 1.

La valeur de TF peut prendre soit 1, soit 2, et elle est décidée de manière aléatoire par l'algorithme en utilisant l'équation suivante:

$$TF = \text{round}\,[1 + \text{rand}\,(0,1)\{2-1\}] \quad \textbf{(IV.2)}$$

En se basant sur la $\text{Differnce_Mean}_{j,k,i}$, la solution existante $X_{j,k,i}$ est mise à jour dans la phase de l'enseignant en utilisant l'expression suivante :

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + \text{Differnce_Mean}_{j,k,i} \quad \textbf{(IV. 3)}$$

La valeur mise à jour $X'_{j,k,i}$ est acceptée si elle conduit à une amélioration de la valeur de la fonction.

Toutes les valeurs de fonction acceptées à la fin de la phase de l'enseignant sont préservées et deviennent les données d'entrée pour la phase d'apprentissage.

b) Phase d'apprentissage

La phase d'apprentissage constitue la deuxième partie de l'algorithme, au cours de laquelle les apprenants renforcent leurs connaissances par des interactions mutuelles. Chaque apprenant interagit de manière aléatoire avec d'autres apprenants dans le but d'accroître ses connaissances. Cette phase permet à un apprenant d'apprendre de nouvelles choses lorsqu'il interagit avec un autre apprenant possédant un niveau de connaissance supérieur.

En tenant compte d'une population de taille n, le processus d'apprentissage de cette phase peut être décrit comme suit : deux apprenants, P et Q, sont sélectionnés au hasard, sous la condition que $X'_{total-P,i} \neq X'_{total-Q,i}$ (où, $X'_{total-P,i}$ et $X'_{total-Q,i}$ sont les valeurs de fonction mises à jour de $X_{total-P,i}$ et $X_{total-Q,i}$ de P et Q, respectivement, à la fin de la phase d'enseignement).

$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i\left(X'_{j,P,i} - X'_{j,Q,i}\right) \quad \text{si} \quad X'_{total-P,i} < X'_{total-Q,i} \quad \textbf{(IV.4)}$$

$$X''_{j,P,i} = X'_{j,P,i} + r_i\left(X'_{j,Q,i} - X'_{j,P,i}\right) \quad \text{si} \quad X'_{total-Q,i} < X'_{total-P,i} \quad \textbf{(IV.5)}$$

La valeur $X''_{j,P,i}$ est acceptée si elle conduit à une amélioration de la valeur de la fonction.

IV.4.2 Organigramme de l'algorithme TLBO

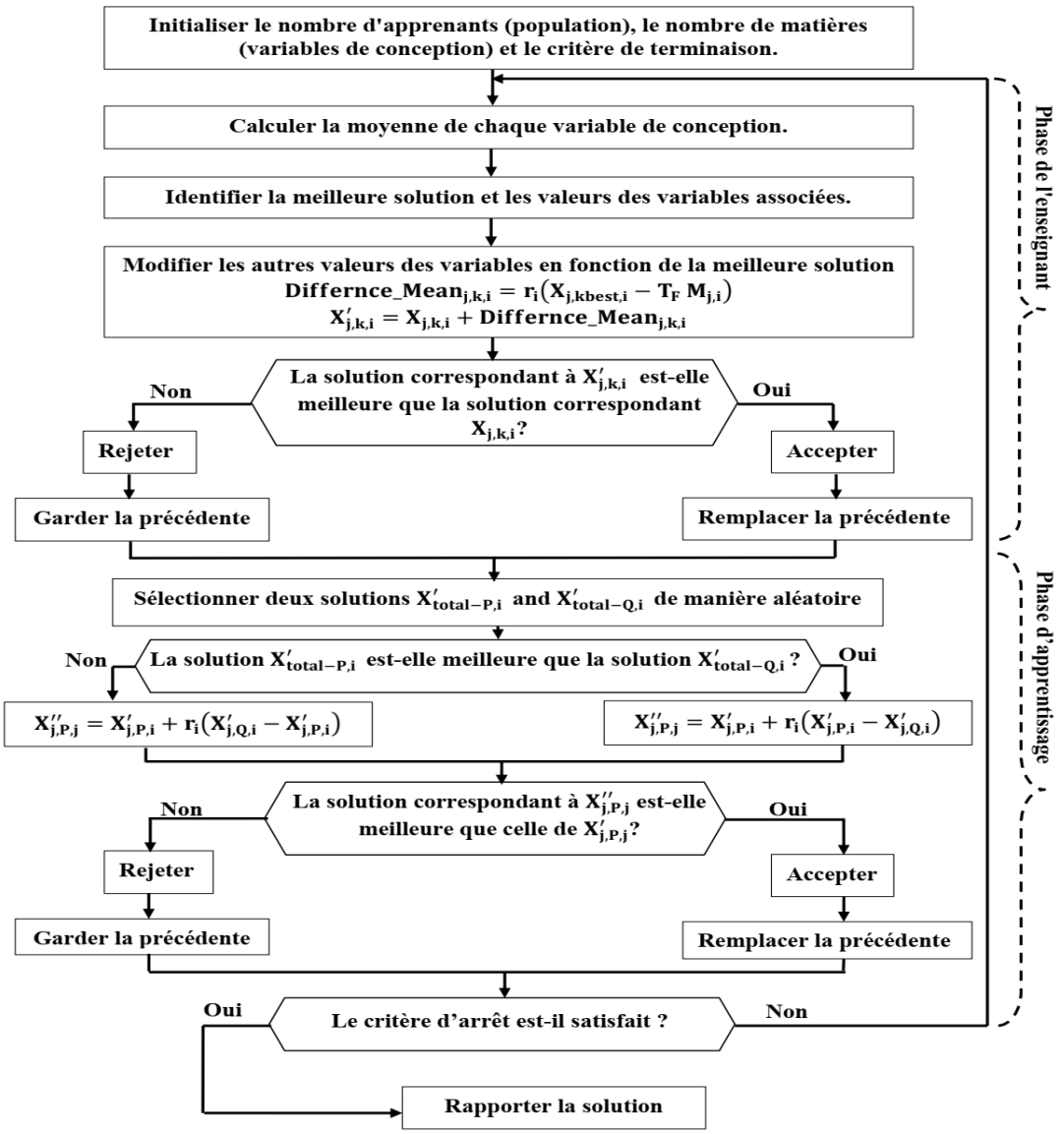


Figure IV.2 Organigramme de l'algorithme TLBO

IV.5 ALGORITHME GENETIQUE

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation stochastique qui s'inspirent de la sélection naturelle et des principes de la génétique. John Holland est le premier à avoir développé ces algorithmes en 1975. Ensuite, en 1989, Goldberg a écrit un ouvrage de référence intitulé *« Genetic algorithms in search, optimization and machine learning »*. Ce livre explique comment utiliser les AG pour résoudre des problèmes réels et a contribué à populariser cette technique dans la communauté scientifique. L'intérêt pour les algorithmes génétiques a vraiment augmenté dans les années 90, grâce à l'apparition de calculateurs plus performants.

Aujourd'hui, c'est une des méthodes d'optimisation les plus répandues et les plus utilisées dans de nombreux domaines [10].

Les AG imitent les mécanismes de l'évolution biologique : ils appliquent des concepts de génétique et de sélection naturelle pour transformer les processus d'évolution des espèces en outils d'optimisation. Quand on utilise un algorithme génétique, on suit généralement ces étapes

1. **Évaluation** : on calcule la fonction d'évaluation (fonction sélective) pour chaque individu de la population.
2. **Création d'une nouvelle population** : on applique des opérations comme la sélection proportionnelle, le croisement et la mutation sur les individus évalués.
3. **Remplacement** : on abandonne l'ancienne population et on recommence le même processus avec la nouvelle.

On peut identifier **quatre différences fondamentales** entre les algorithmes génétiques et les méthodes d'optimisation classiques :

- **Codage des paramètres** : les AG travaille sur une représentation codée des paramètres (comme des chaînes binaires).
- **Population multiple** : les AG traitent un ensemble de solutions simultanément, contrairement aux méthodes qui travaillent sur un seul point. Cela permet d'explorer plusieurs zones de l'espace de recherche et réduit le risque de tomber sur un optimum local.
- **Seulement la fonction objective** : les AG n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, sans avoir besoin de dérivées ou d'autres informations supplémentaires.
- **Transition probabiliste** : les règles de passage d'une génération à l'autre sont probabilistes, pas déterministes. Donc, les AG peuvent fonctionner même si l'espace de recherche n'est pas continu.[11]

IV.5.1 Présentation des algorithmes génétiques

Cela peut inclure des algorithmes génétiques et des définitions de base :

- **Individu (ou chromosome ou séquence) :** Il s'agit d'une solution parmi les candidats répondant au problème.
- **Population :** C'est un groupe de chromosomes, offrant un plus grand nombre de points différents dans l'espace de recherche.

- **Environnement :** Représente l'espace dans lequel la solution est recherchée.
- **Fonction d'évaluation :** C'est la fonction positive utilisée pour optimiser et minimiser.
- **L'objectif d'un algorithme génétique est simple :** trouver le chromosome (la chaîne) qui optimise le mieux la fonction objective. Son utilisation peut parfois poser problème.

Le fonctionnement d'un algorithme génétique se déroule en plusieurs étapes principales :

A. Initialisation :

Une fois la population initiale de N chromosomes créée, le nombre de chromosomes est déterminé.

B. Évaluation : Pour évaluer le chromosome, on décode la solution proposée, puis on calcule sa valeur d'évaluation.

C. Sélection

Pour choisir les meilleurs chromosomes afin de former une nouvelle population d'individus N, utilisez une méthode de sélection adaptée (intégrez la sélection à votre compte ou à votre classe).

D. Reproduction

Cette nouvelle population est créée par deux opérations : le croisement (combinaison de chromosomes pour en créer un nouveau) et la mutation (modification de certains éléments chromosomiques).

E. Retour

L'évaluation est relancée avec la nouvelle population, et tous les cycles ayant conduit l'algorithme à aboutir sont corrigés (ainsi que le nombre maximal d'itérations ou la recherche d'une solution satisfaisante). [12]

IV.5.2 Le codage

Le codage consiste à représenter une solution d'un problème sous la forme d'une suite de caractères appelée chromosome. Chaque caractère, également nommé gène, correspond à une variable du problème ou à une partie de ce problème [13]. L'objectif central est de choisir le contenu des gènes de manière à simplifier la description du problème tout en respectant ses contraintes.

IV.5.3 La sélection

La sélection attribue à chaque individu, en fonction de sa qualité, un pourcentage de probabilité d'être retenu pour la reproduction. Ce pourcentage reflète l'importance relative de la qualité de cet individu comparée à la qualité globale de toute la population [14].

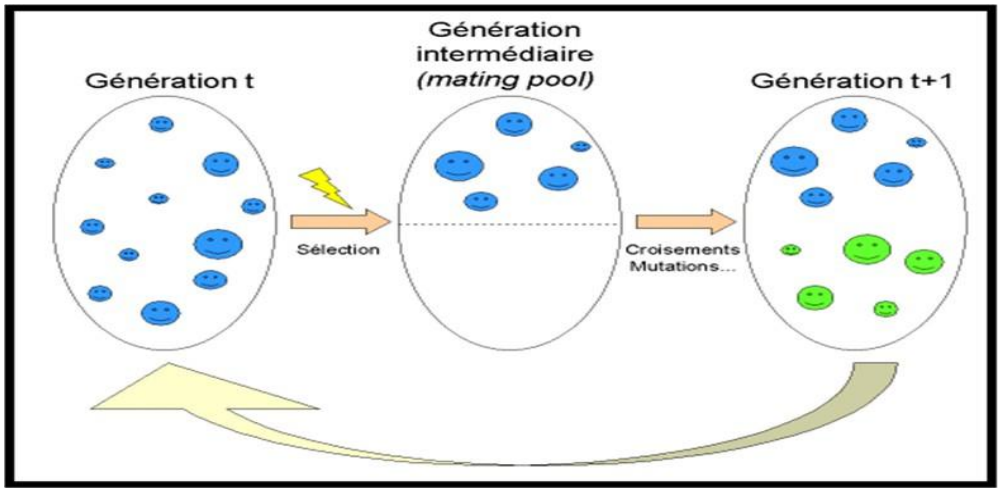


Figure IV.3 Représentation schématique du fonctionnement de notre algorithme

IV.5.4 Le Croisement

Dans un algorithme génétique, le croisement consiste à échanger des segments entre les individus sélectionnés (les parents) afin de générer de nouveaux individus (les enfants ou descendants). Cet opérateur peut impliquer un ou plusieurs parents et produire un ou plusieurs enfants. De nombreuses stratégies de croisement existent ; nous présentons ici les méthodes classiques : le croisement en un point, le croisement en deux points. D'autres approches, telles que le croisement diagonal et le croisement par bloc, sont également disponibles. Ces opérateurs sont particulièrement efficaces pour préserver et transmettre les propriétés topologiques des parents aux descendants [15].

IV.5.4.1 Le croisement en un point :

On choisit au hasard un point de croisement, pour chaque couple (voir la figure IV.5). Notons que le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non pas au niveau des gènes. Un chromosome peut donc être coupé au milieu d'un gène.

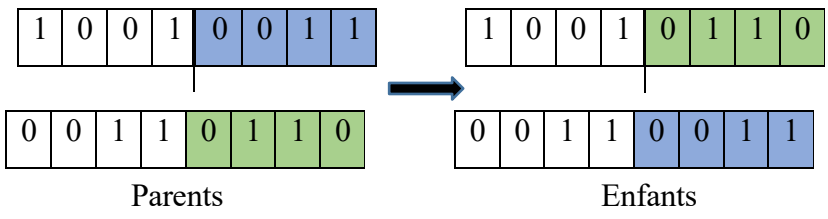


Figure IV.4 Représentation schématique du croisement en un point

IV.5.4.2 Croisement en deux Points :

On choisit au hasard deux points de croisements successifs. Cet opérateur est généralement considéré comme plus efficace que le précédent.

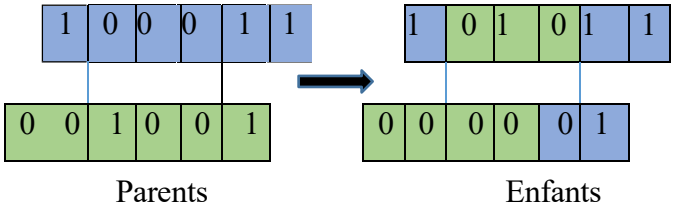


Figure IV.5 Représentation schématique du croisement en deux point

IV.5.5 La mutation

La mutation est définie comme l'inversion d'un bit au sein d'un chromosome, ce qui correspond à une modification aléatoire de la valeur d'un paramètre du système. En agissant comme un bruit, la mutation évite que l'évolution ne converge prématurément vers un point fixe et ne progresse plus. Elle assure ainsi une recherche à la fois globale et locale, selon le nombre de bits mutés et l'importance de ces modifications. De plus, elle garantit, d'un point de vue mathématique, que l'optimum global peut être atteint (Figure IV.7) [16].

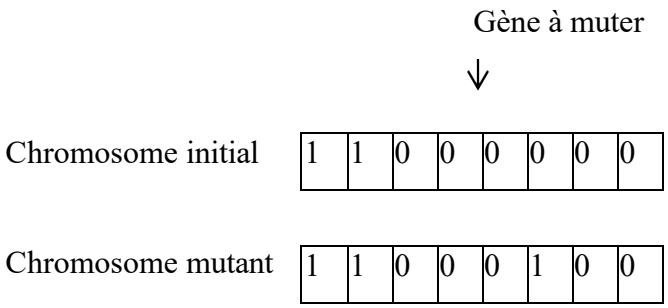


Figure IV.6 Principe de la mutation

IV.5.6 Organigramme d'un algorithme génétique :

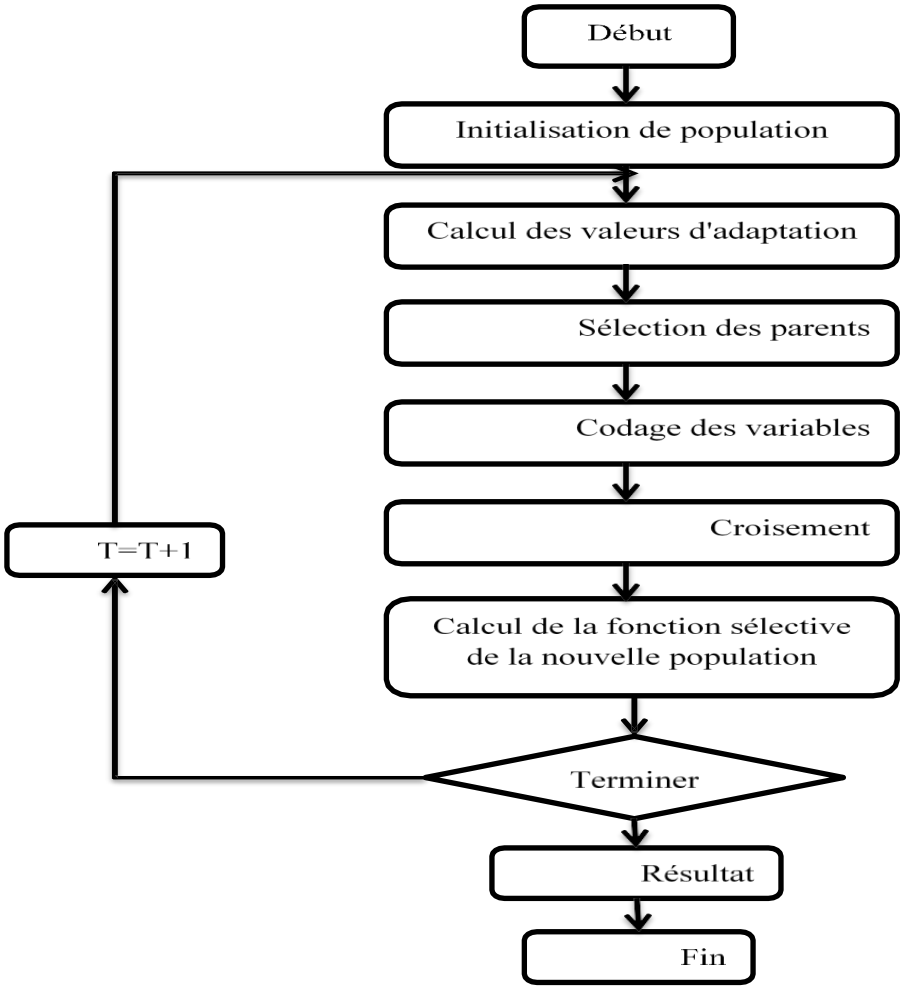


Figure IV.7 Organigramme de l'algorithme génétique [17].

IV.6 EFFET DES ANGLES DE COMMUTATION θ_{on} ET θ_{off}

Le choix des angles de commutation θ_{on} et θ_{off} a joue un rôle déterminant dans la réduction de l'ondulation du couple total produit par la machine à réluctance variable. La figure IV.8.a montre que, pour une valeur relativement faible de $\theta_{off} = 25°$, le chevauchement des couples produits par les trois phases est insuffisant, ce qui se traduit par une augmentation notable de l'ondulation du couple global. À l'inverse, un angle de coupure plus élevé ($\theta_{off} = 43°$) permet un chevauchement complet entre les phases, mais entraîne l'apparition de couples négatifs dans les trois phases (figure IV.8.b).

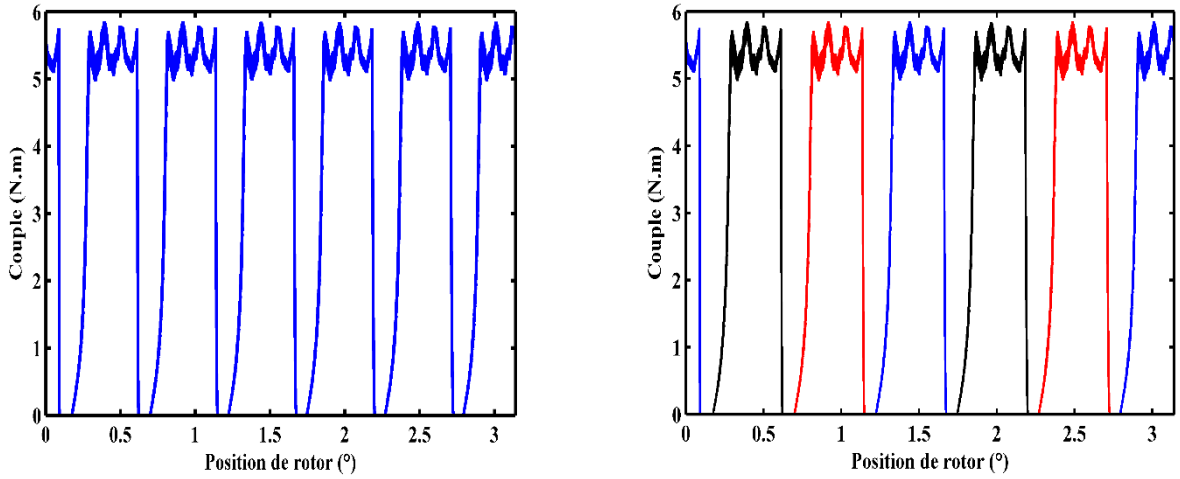


Figure IV.8.a Variation du couple électromagnétique total et dans les A, B, C pour θ_{off}=25°

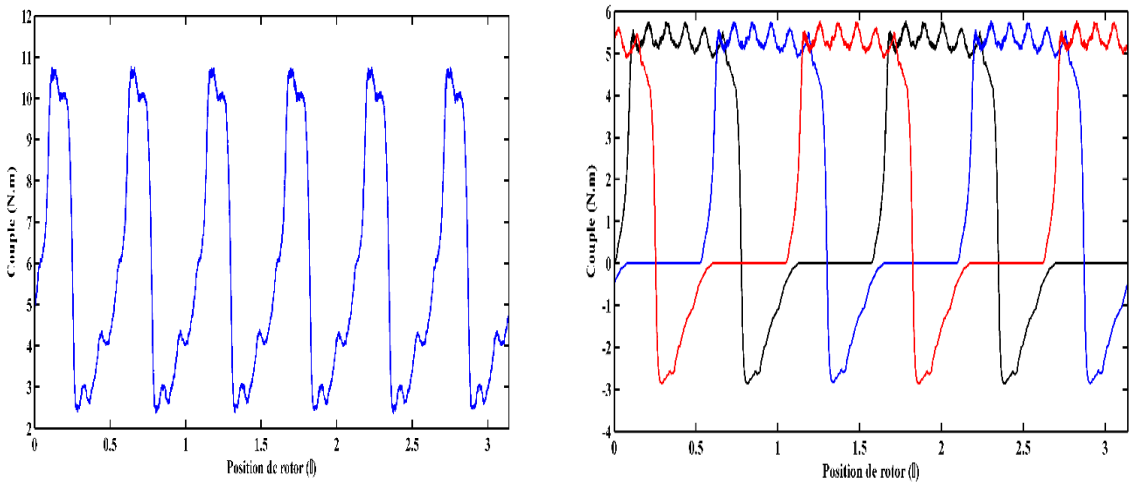


Figure IV.8.b Variation du couple électromagnétique total et dans les A, B, C pour θ_{off}=43°

IV.7 OPTIMISATION DES ANGLES DE COMMUTATION θ_{on} ET θ_{off}

Afin d'améliorer les performances de la machine à réluctance variable (MRV), non avons appliqué deux algorithmes d'optimisation (algorithme génétique (AG) et TLBO) ont été utilisé pour déterminer les valeurs optimales des angles d'enclenchement θ_{on} et de déclenchement θ_{off} des phases. L'objectif principal de cette optimisation est de minimiser les ondulations du couple électromagnétique (Torque Ripple).

IV.7.1 Formulation Mathématique du Problème d'Optimisation

IV.7.1.1 Variables d'optimisation

Dans cette étude, chaque individu est représenté par un vecteur contenant deux variables :

$$X = [\theta_{on}, \theta_{off}]$$

θ_{on} : Angle d'amorçage.

θ_{off} : Angle de coupure.

IV.7.1.2 Limites de l'espace de recherche

Les limites de l'espace de recherche introduites dans l'environnement MATLAB sont définies par les bornes inférieures l_b et supérieures u_b suivantes :

$$0^{\circ} \leq \theta_{on} \leq 10^{\circ}$$

$$25^{\circ} \leq \theta_{off} \leq 45^{\circ}$$

L'optimisation est réalisée sous MATLAB à l'aide des algorithmes génétique (AG) et TLBO. Afin d'assurer une comparaison entre les deux méthodes, les mêmes paramètres sont adoptés, avec une population de 15 individus et un nombre maximal de 50 itérations.

IV.7.1.3 Fonction objectif

Pour chaque solution candidate générée par l'algorithme génétique (AG) ou l'algorithme TLBO, les angles de commutation correspondants sont injectés dans le modèle Simulink de la machine à réluctance variable (MRV). La simulation dynamique temporelle permet d'extraire le profil du couple électromagnétique total T. Le taux d'ondulation du couple (Torque Ripple), qui constitue la fonction objective à minimiser, est alors calculé par :

$$f(x) = T_R = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{moy}}$$

Où :

T_{max} : Couple maximal.

T_{min} : Couple minimal.

T_{moy} : Couple moyen.

La minimisation de T_R indique une meilleure qualité du couple produit par la machine.

IV.7.2 Optimisation par Algorithme Génétique

Une approche d'optimisation basée sur l'algorithme génétique (Genetic Algorithm, GA) est mise en œuvre afin de déterminer les valeurs optimales de l'angle d'amorçage θ_{on} et de l'angle de coupure θ_{off} permettant de minimiser les ondulations du couple électromagnétique.

La figure IV.9 illustre l'évolution du taux d'ondulation du couple au cours des 50 générations de l'algorithme génétique. Les courbes de la meilleure solution (best fitness) et de de la moyenne de la population (mean fitness) diminuent rapidement au cours des premières générations, traduisant l'amélioration progressive des solutions. À partir de la 15ème génération, elles convergent vers une valeur stable d'environ **0,2703**, indiquant que l'algorithme a atteint la solution optimale.

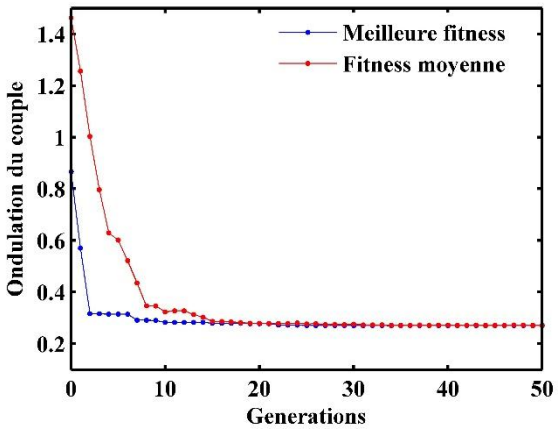


Figure IV.9 Évolution du taux d'ondulation du couple par algorithme génétique en fonction des générations

Les valeurs optimales de l'angle d'amorçage θ_{on} et de l'angle de coupure θ_{off} obtenues par l'algorithme génétique (AG) sont respectivement de 3,56° et 33,94°. Ces valeurs permettent de minimiser le taux d'ondulation du couple, qui atteint une valeur minimale de 0,2703. La figure IV.10 illustre la variation du couple électromagnétique total obtenue pour cette solution optimale.

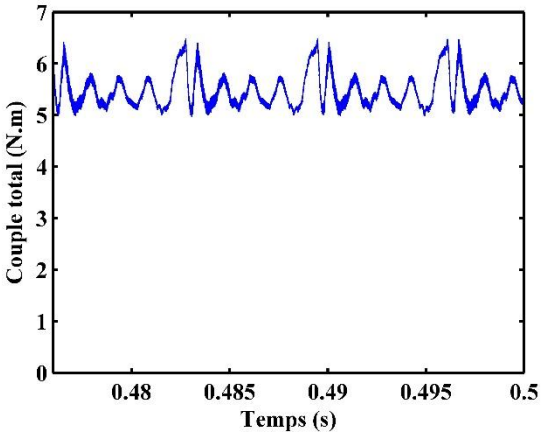


Figure IV.10 Couple électromagnétique total après optimisation par AG

La figure IV.11 illustre l'évolution des angles de commutation θ_{on} et θ_{off} au cours des différentes générations de l'algorithme génétique. À la première génération (Gen 01), les individus sont distribués aléatoirement dans tout le domaine de recherche défini par les contraintes d'optimisation, soit $0^{\circ} \leq \theta_{on} \leq 10^{\circ}$ et $25^{\circ} \leq \theta_{off} \leq 45^{\circ}$. Cette dispersion traduit la phase initiale d'exploration de l'espace des solutions par l'algorithme.

Au fil des générations, notamment à partir des générations 5 et 10, on observe un regroupement progressif des individus autour d'une région particulière de l'espace de recherche. Cette concentration résulte des mécanismes de sélection, de croisement et de mutation qui favorisent la conservation et la reproduction des solutions présentant les meilleures performances en termes de réduction de l'ondulation du couple.

À la génération 15, l'espace de recherche s'est considérablement restreint : les individus se focalisent dans un voisinage étroit autour d'une zone prometteuse située approximativement à $\theta_{on} \in [3^{\circ}, 4^{\circ}]$ et $\theta_{off} \in [34^{\circ}, 35^{\circ}]$.

Les générations 25 et 50 montrent finalement une quasi-superposition des individus autour d'un point unique correspondant aux valeurs optimales des angles de commutation de $\theta_{on} = 3{,}56°$ et $\theta_{off} = 33{,}94°$.

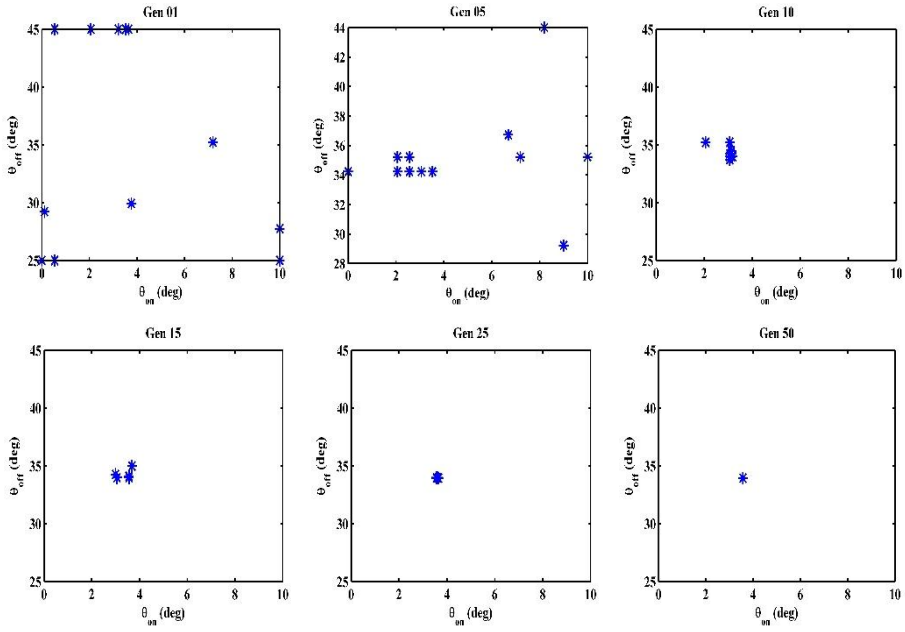


Figure IV.11 Évolution des angles de commutation au cours des générations par GA

IV.7.3 Optimisation par Algorithme TLBO

L'algorithme TLBO est appliqué au même problème d'optimisation afin de déterminer les angles de commutation optimaux θ_{on} et θ_{off} minimisant le taux d'ondulation du couple électromagnétique.

La figure IV.12 présente l'évolution du taux d'ondulation du couple au cours des 50 itérations du TLBO. À l'instar de l'algorithme génétique, la fonction objective diminue rapidement durant les premières itérations avant de converger vers une valeur stable de 0,2717.

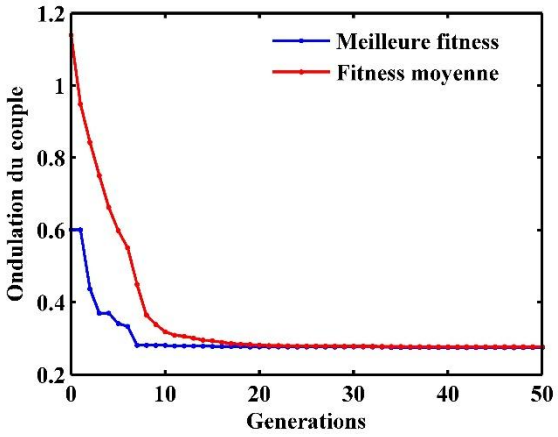


Figure IV.12 Évolution du taux d'ondulation du couple Tr par TLBO en fonction des générations

Les valeurs optimales de θ_{on} et θ_{off} obtenues par le TLBO sont respectivement de **0,54°** et **33,95°**, conduisant à un taux d'ondulation minimal de **0,2717**. La figure IV.13 illustre le couple électromagnétique total correspondant à cette solution optimale.

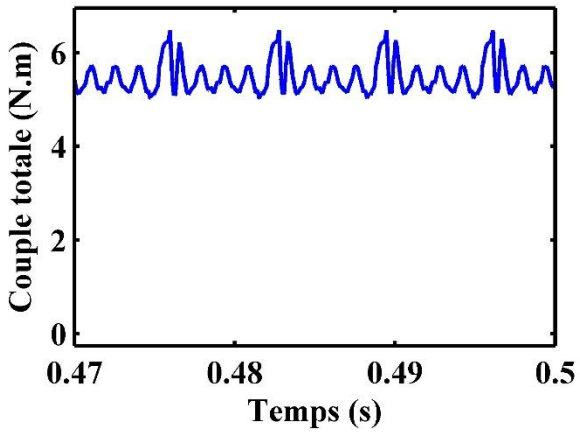


Figure IV.13 Couple électromagnétique total après optimisation par TLBO

La figure IV.14 montre l'évolution des angles de commutation au cours des itérations. Comme pour l'algorithme génétique, les individus convergent progressivement vers une région optimale de l'espace de recherche jusqu'à atteindre les valeurs optimales des angles de commutation.

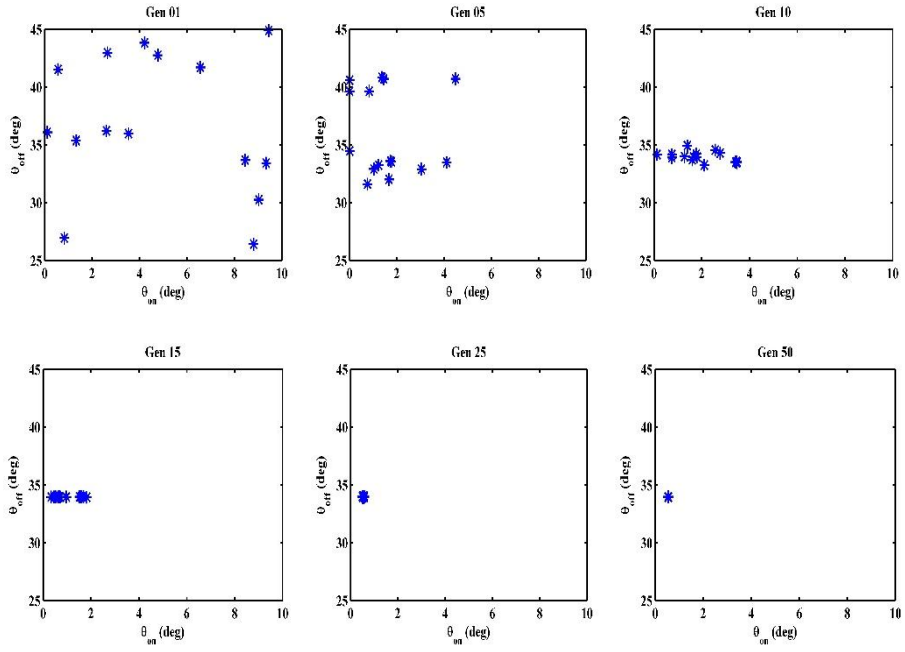


Figure IV.14 Évolution des angles de commutation au cours des générations par TLBO

IV.7.4 Comparaison entre les résultats des les algorithmes génétiques et Tlbo

La figure IV.15 compare l'évolution du taux d'ondulation du couple obtenue par les algorithmes AG et TLBO au cours des générations. Les deux méthodes présentent une diminution rapide de la fonction objective durant les premières générations, suivie d'une convergence vers une valeur stable. Toutefois, l'algorithme génétique atteint un taux d'ondulation légèrement inférieur (**0,2703**) à celui obtenu par le TLBO (**0,2717**), ce qui traduit une performance légèrement meilleure en termes de réduction des ondulations du couple.

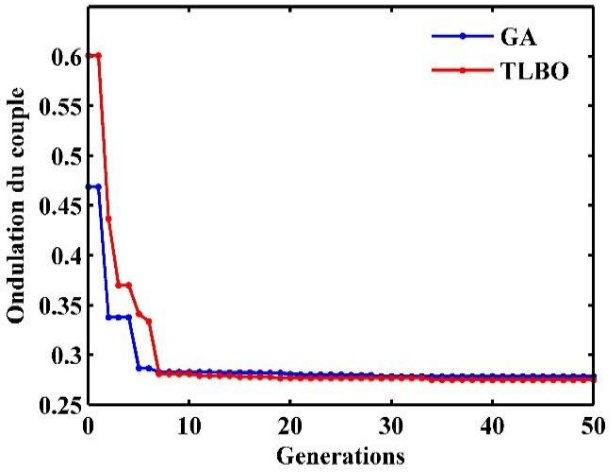


Figure IV.15 Comparaison de l'évolution du taux d'ondulation du couple Tr en fonction des générations pour les algorithmes TLBO et AG

CONCLUSION

Dans ce chapitre, une optimisation des angles de commutation de la machine à réluctance variable a été réalisée à l'aide des algorithmes AG et TLBO. Les deux méthodes ont permis de déterminer des valeurs optimales de θ_{on} et θ_{off} conduisant à une réduction significative des ondulations du couple électromagnétique. Les résultats des simulations montrent une convergence rapide des deux algorithmes vers des solutions performantes. La comparaison met en évidence un léger avantage de l'algorithme génétique, qui fournit le plus faible taux d'ondulation. Les paramètres optimisés obtenus permettent ainsi d'améliorer les performances dynamiques de la machine tout en réduisant les fluctuations du couple.

REFERENCES

[1] Y. Colletto , P. Siarry, ” Optimisation Multi-objectif,” EYROLLES, Nov. 2002.

[2] A. El Dor, "Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique" Université Paris-Est, 2012, France.

[3] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", Computers & operations research, vol 13, pp. 533-549, May 1986, USA.

[4] I. Boussaid, "Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue", Université Paris Est, 2013, France.

[5] R. V. Rao, “Teaching-learning-based optimization algorithm,” in *Teaching learning based optimization algorithm*, Springer, 2016, pp. 9–39.

[6] R. Rao, “Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems,” *Decis. Sci. Lett.*, vol. 5, no. 1, 2016.

[7] R. V. Rao , V. Patel, “An elitist teaching-learning-based optimization algorithm for solving complex constrained optimization problems,” *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 3, no. 4, 2012, doi: 10.5267/j.ijiec.2012.03.007.

[8] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, “Teaching-Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems,” *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 183, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.ins.2011.08.006.

[9] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, “Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 43, no. 3, 2011, doi: 10.1016/j.cad.2010.12.015.

[10] L.SLIMANI, “contribution à l’application de l’optimisation par des méthodes métaheuristiques à l’écoulement de puissance optimal dans un environnement de L’électricité dérégulé ”, thèse de magister de l’université de Batna, 22/12/2009.

[11] O. Hajji, “contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques”, thèse de doctorat de l’université des sciences et technologies de LILE, 03 décembre 2003.

[12] M.sahara , S. Kehili “ Etude d'un Dispatching économique des puissance active par les algorithmes génétiques modifiée”, L’Université d’Echahid Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued Faculté de la Technologie Département de Génie Electrique En vue de l’obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE En réseaux Electrique

[13] N.Djebbari , E.Soltani, “ Résolution du problème de puissance active dans un réseau d'énergie utilisant les techniques méta-heuristique”, Mémoire de Master, Université Hamma Lakhder-El-Oued, 2018.

[14] M. Abdelhak, “ Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique”, Magister en micro-électronique, Université de Batna, 2011.

[15] F.Louetri , I. mesbahi, “Dispatching Economique par Utilisation de Méthodes d'Optimisation Méta heuristiques”, Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued

[16] L.A. Koridak, M. Rahli “Optimisation d'un dispatching environnement /économique de la production d'énergie électrique par un algorithme génétique”, Université de Bechar Algérie, 2010.

[17] Z.Fridgat, T. M.Elhadi, “Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la production énergie active dans réseau électrique”, Mémoire de Fin d'Etude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER académique, 2013/2014.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de fin d'études a été consacré à l'étude, à la modélisation, à la simulation dynamique et à l'optimisation des performances d'une machine à réluctance variable à double saillance de configuration 6/4 (MRVDS 6/4). L'objectif principal de cette étude était de réduire l'un des principaux inconvénients de cette machine, à savoir les importantes ondulations du couple électromagnétique, en optimisant les angles de commutation θ_{on} et θ_{off}. Cette approche vise à améliorer les performances dynamiques de la machine tout en préservant sa simplicité de conception, sa robustesse et son faible coût, qui constituent ses principaux atouts pour les applications industrielles.

Dans un premier temps, les aspects théoriques des machines à réluctance variable ont été présentés afin de mettre en évidence leur structure, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs principaux domaines d'application.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation électromagnétique bidimensionnelle de la machine à réluctance variable sous le logiciel FEMM, en s'appuyant sur la méthode des éléments finis. Cette modélisation a permis de déterminer avec précision les caractéristiques électromagnétiques non linéaires de la machine, notamment le flux magnétique, l'inductance et le couple électromagnétique en fonction de la position du rotor et du courant d'excitation.

Dans le troisième chapitre, un modèle dynamique de la machine a été élaboré sous MATLAB/Simulink en intégrant les données issues de la modélisation électromagnétique. Les simulations réalisées ont permis d'analyser le comportement dynamique de la machine et de valider le modèle développé.

Enfin, une optimisation des angles de commutation a été effectuée à l'aide de deux algorithmes métaheuristiques, l'Algorithme Génétique (AG) et le Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO). Les résultats obtenus montrent que ces deux méthodes permettent de réduire efficacement les ondulations du couple électromagnétique. Toutefois, l'algorithme génétique s'est révélé légèrement plus performant en fournissant le plus faible taux d'ondulation. Cette étude confirme ainsi que l'optimisation des angles de commutation constitue une solution efficace pour améliorer les performances de la machine à réluctance variable.

Les résultats obtenus démontrent qu'une stratégie de commande optimisée, permet de réduire significativement les ondulations du couple électromagnétique. Cette amélioration contribue directement à l'atténuation des vibrations mécaniques et du bruit acoustique générés par la machine, tout en assurant un fonctionnement plus stable et un meilleur comportement dynamique.

Perspectives

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- **Validation expérimentale :** La perspective la plus immédiate consiste à implémenter les angles de commutation optimisés par TLBO et AG sur un banc d'essai expérimental réel au laboratoire, afin de confronter les résultats de simulation aux mesures physiques.
- **Optimisation multicritère :** Développer une approche d'optimisation multicritère intégrant simultanément les paramètres géométriques de la machine (dimensions des pôles, entrefer, nombre de spires, etc.) et les paramètres de commande (angles de commutation, courant d'excitation, stratégie de commande), afin d'améliorer les performances électromagnétiques, dynamiques et énergétiques de la MRV.