

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Eélectrotechnique Industrielle

Présenté par :

Oulad Naoui Brahim El Khalil

Tounsi Hadj Bounoua

Thème :

Conception et simulation d'une machine à réluctance variable triphasée utilisée dans un véhicule électrique hybride

Soumis au jury composé de :

M^r Bouakaz Ouahid

MAA

Président

UKM Ouargla

M^r Taibi Djamel

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r Rezoug Mohamed Redha

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

REMERCIEMENT

Toute la gratitude et le merci à ALLAH qui ma donne la force pour effectuer et achever ce travail.

Ainsi mes parents qui ma aidé.

Je remercie en premièrement, mon encadreur monsieur. DJAMAL TAIBI, pour avoir accepté de diriger mon travail, pour ses précieux conseils pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité, et ses orientations judicieuses, sa patience et diligence, et par ses suggestions a grandement facilité ce travail.

Je remercie toutes personnes qui m'a aidé de près ou de loin à la finalisation de ce travail. Surtout : les professeurs au département de Génie électrique de l'UNIVERSITE KASDIMERBAH OUARGLA

Enfin mes remerciements s'adressent aux membres de jury qui je fère l'honneur de juger mon travail

DEDICACE

Nous dédions ce travail à nos chers parents, à qui nous souhaitons une très longue vie, pleine de joie, de bonheur et de prospérité.

A nos très chers parents à, qui, nous devront toute la reconnaissance, pour tous ce qu'ils ont fait et donné pour nous, depuis notre naissance, jusqu'à ce que nous puissions atteindre ce niveau-là, nos frères et tous les membres des deux familles sans oublier les amies et camarade

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE 1

**CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES VEHICULES ELECTRIQUE ET LES
MOTEURS A RELUCTANCE VARIABLE**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un Véhicule Electrique hybride	4
I.3 Classification des Véhicules électriques hybrides.....	4
I.3.1 Par architecture :.....	4
I.3.1.1 Architecture série :.....	4
I.3.1.2 Architecture parallèle :.....	5
I.3.1.3 Architecture mixte (série-parallèle) :.....	5
I.3.2 Par hybridation :.....	6
I.4 L'utilisation de moteurs électriques dans les VEH.....	6
I.4.1 Machines à courant continu :.....	7
I.4.2 Machines asynchrones :.....	7
I.4.3 Machines synchrones à aimants permanents.....	7
I.4.4 Machines à réluctance variable (MRV) :.....	8
I.5 Choix de la Machine à Réluctance Variable (MRV).....	8
I.6 Avantages et inconvénient des véhicules électriques.....	10
I.6.1 Les Avantages des véhicules électriques :.....	10
I.6.2 Les inconvénients des véhicules électriques :.....	10
I.7 Machine à Réluctance Variable (MRV)	11
I.8 Constitution.....	12
I.9 Principe de fonctionnement d'une MRV.....	13
I.10 Différentes topologies de MRV.....	16
I.10.1 MRV pures :.....	16
I.10.2 MRV vernier :.....	17
I.10.3 MRV hybrides :.....	18
I.11 Etude des avantages et inconvénient des MRV.....	19
I.12 Conclusion.....	19

CHAPITRE II : CONCEPTION DU MOTEUR MRV SOUS «MOTORSOLVE »

II.1 Introduction	20
II.2 Véhicule électrique hybride de Toyota Prius 2010..	20
II.3 Système d'alimentation électrique dans Toyota Prius 2010.....	21
II.4 Processus de conception du MRV	22
II.5 Spécifications des matériaux du MRV 24/16.....	24
II.6 Exploitation des résultats de conception du « MRV » :	25
II.7 Résultats d'analyse du modèle avec MotorSolve :	28
II.7.1 Inductances :	29
II.7.2 Couple électromagnétique :	29
II.7.3 Caractéristique du couple électromagnétique-vitesse :	30
II.7.4 Densité du flux dans l'entrefer : ..	31
II.7.5 Caractéristiques électriques et mécaniques : ..	31
II.7.6 Les pertes :	32
II.8 Conclusion :	33

CHAPITRE III : REGLAGE DE LA VITESSE DE LA MACHINE MRV PAR LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction	34
III.2 Simulation du modèle non linéaire de la MRV sous MATLAB/Simulink	34
III.2.1 Modèle non Linéaire de la MRV :	34
III.2.2 Alimentation de la Machine à Réductance Variable :	35
III.2.3 Schéma bloc de simulation du modèle non-linéaire de la MRV :	37
III.2.4 Résultats de simulation :	39
III.3 Commande du moteur MRV 24_16	41
III.3.1 Application du contrôleur flou au réglage de la vitesse :	41
III.3.2 Structure du contrôleur flou :	41
III.3.3 Schéma bloc de réglage de la vitesse par contrôleur flou :	43
III.3.4 Résultats de simulation de l'inversion de sens de rotation.....	44
III.4 Cycle de conduite	45
III.4.1 Résultats de la simulation :	46
III.5 Conclusion	47
CONCLUSION GENERALE	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DE FIGURES

Figure I - 1 Architecture série d'un HEV.	5
Figure I - 2 Architecture Parallèle d'un HEV	5
Figure I - 3 Architecture mixte d'un HEV	6
Figure I - 4 Vue en coupe d'une machine à réluctance variable	11
Figure I - 5 Caractéristique couple/vitesse de la Machine à Réluctance Variable	12
Figure I - 6 machine à réluctance variable « 6/4 » pôles.	12
Figure I - 7 Configurations de la MRV : (a) 6/4 pôles, 8/6 pôles, (b) 24/16 pôles	13
Figure I - 8 Machine à réluctance monophasée : Structure élémentaire	14
Figure I - 9 Machine à réluctance variable : Attraction sur une phase.	14
Figure I - 10 : positions extrêmes du rotor	15
Figure I - 11 : Caractéristiques de la MRV en fonction de la position.....	15
Figure I - 12 : MRV à 2 dents par phase	16
Figure I - 13 : (b) MRV à 4 dents par phase, (c) MRV à pôles statoriques dentés	16
Figure I - 14 : MRV à effet Vernier à stator externe et interne	17
Figure I - 15 : Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance.	18
Figure I - 16 :MRV hybride à effet vernier	18
Figure I - 17 : MRV à plots à aimants	18
Figure II - 1 Schéma mécanique de système de transmission hybride Toyota Prius 2010	21
Figure II - 2 Figure Batterie Lithium-ion (Li-ion) à haute tension.....	21
Figure II - 3 : Géométrie du moteur MRV 24/16	22
Figure II - 4 : modèle de moteur à réluctance variable dans logiciel MotorSolve.	25
Figure II - 5 : Les données globales du MRV 24/16 étudié sous MotorSolve.	25
Figure II - 6 : Modèle final du MRV 24/16 sous MotorSolve.....	26
Figure II - 7 : Les paramètres de stator et rotor du MRV 24/16.....	26
Figure II - 8 : Paramètres et Distribution des enroulements de bobinage statorique.....	27
Figure II - 9 : Les matériaux du noyau des composants du moteur.....	27
Figure II - 10 : La page des résultats	28
Figure II - 11 : Caractères des inductances en fonction du (rotor angle)	29
Figure II - 12 : caractéristique de couple statique en fonction du (rotor angle)	29
Figure II - 13 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré.....	30
Figure II - 14 : Caractéristique couple _vitesse du moteur (Caractéristique mécaniques).....	30
Figure II - 15 : Forme d'onde de la densité de flux dans l'entrefer	31
Figure II - 16 : le couple et la puissance de sortie générée par le MRV.	32
Figure III - 1 Diagramme de simulation de MRV par phase (model on linéaire)	35
Figure III - 2 Schéma de la structure générale du convertisseur à demi-pont asymétrique	36
Figure III - 3 Schéma de simulation des trois bras de convertisseur.....	36
Figure III - 4 Schéma bloc de simulation du modèle non linéaire de la MRV.....	37
Figure III - 5 Schéma bloc des trois phases du moteur MRV 24_16	37

Liste des figures

Figure III - 6 Schéma bloc de simulation de la phase 1	38
Figure III - 7 Schéma bloc d'application des angles θ_{on} et θ_{off}	38
Figure III - 8 Flux magnétique des trois phases en fonction du temps	39
Figure III - 9 Courant des trois phases en fonction du temps.....	39
Figure III - 10 Couple électromagnétique total en fonction du temps.....	39
Figure III - 11 Vitesse de rotation en fonction du temps	39
Figure III - 12 Flux magnétique des trois phases en fonction du temps	40
Figure III - 13 Courant des trois phases en fonction du temps.....	40
Figure III - 14 Couple électromagnétique total en fonction du temps.....	40
Figure III - 15 Vitesse de rotation en fonction du temps	40
Figure III - 16 Schéma fonctionnel de la régulation floue de la MRV.....	41
Figure III - 17 Schéma-bloc de contrôleur flou de la vitesse (FLC)	41
Figure III - 18 Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée E_{ω} et $[\Delta E]_{\omega}$	42
Figure III - 19 Fonctions d'appartenances de la sortie.....	42
Figure III - 20 Schéma bloc de simulation de réglage de la vitesse par contrôleur flou (FLC)	43
Figure III - 21 Flux magnétique en fonction du temps	44
Figure III - 22 Courant des phases en fonction du temps.....	44
Figure III - 23 Couple en fonction du temps	44
Figure III - 24 Vitesse de rotation en fonction du temps.....	44
Figure III - 25 Couple électromagnétique total avant et après l'amélioration	45
Figure III - 26 Cycle européen de conduite NEDC	46
Figure III - 27 Vitesse de rotation du moteur en (tr/min).....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - 1 : Comparaison des quatre machines de traction électrique.	9
Tableau II - 1 : Paramètres géométrique du MRV	22
Tableau II - 2 : Comparaison entre IPMSM et MRV	24
Tableau II - 3 : Matériaux utilisés dans le MRV 24/16	24
Tableau II - 4 : Paramètres nominales de la machine.	31
Tableau II - 5 : Pertes principales générées par le moteur MRV	32
Tableau III - 1 : Commutation des IGBT.....	36
Tableau III - 2 Règles d'inférence floue.....	43

LISTE DES SYMBOLES

α_s : Pas statorique

α_r : Pas rotorique

θ_m : Angle mécanique

N : Le nombre de spires du stator

C_{em} : Couple électromagnétique

L : L'inductance

Θ_{on} : Angle de commutation

Θ_{off} : Angle de commutation

I_{ref} : Courant de référence

E_ω : L'erreur de vitesse

ΔE_ω : La variation de l'erreur de vitesse

T_{max} : le couple maximal

T_{min} : le couple minimal

ΔT : Variation de couple

B : Le champ magnétique

H : Le champ électrique

LISTE DES ABREVIATIONS

MRV : Machine à Réluctance Variable

MRVDS : Machine à Réluctance Variable à Double Saillance

SRM: switched reluctance motor

IPMSM: the interior permanent-magnet synchronous motor

VEH : véhicule électrique hybride

VE : véhicule électrique

MSAP : moteur synchrone à aimant permanent

MCC : machines à courant continu

MAS : machine asynchrone

MEF : méthode des éléments finis

NEDC : New European Driving Cycle

UDC : Urbain Drive Cycle

EUDC : Extra Urbain Drive Cycle

FLC : contrôleur à logique floue

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

LE DOMAINE DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE a suscité un vif intérêt ces dernières années. Les véhicules électriques hybrides (VEH) et les véhicules électriques (VE) ont rapidement gagné du terrain sur le marché automobile mondial en offrant une efficacité énergétique élevée avec une réduction significative des émissions à effet de serre à des prix de plus en plus abordables. De nombreux équipementiers automobiles travaillent actuellement sur de nouveaux modèles de véhicules VEH et VE. L'un de ses principaux défis consiste à concevoir des machines de traction répondant à des critères tels que l'efficacité énergétique, la fiabilité, la robustesse et le coût. Du point de vue des applications industrielles, les machines les plus couramment utilisées dans ces véhicules sont les machines à courant continu, les machines synchrones à aimants permanents et les machines asynchrones [1].

La machine à réluctance variable est l'une de ces alternatives qui ne nécessite pas d'aimants permanents dans sa construction et qui peut réunir toutes les qualités pour convaincre les industriels. Parmi ces industriels, Toyota qui a développé un prototype de machine à réluctance variable à densité de couple élevé pour remplacer la machine synchrone à aimants permanents dans sa nouvelle génération de véhicules hybrides. Cette machine elle est de conception très simple et tolérante aux défauts grâce à sa redondance. Toutefois, cette /machine présente deux inconvénients principaux ; une ondulation de couple importante et la génération d'un bruit acoustique élevé. Ainsi, cette technologie de machine présente des caractéristiques fortement non linéaires et un fort couplage entre les paramètres rendant sa commande difficile par rapport aux autres technologies des machines. [1]

Le but principal de ce mémoire est la conception d'un moteur à réluctance variable (MRV) de 24/16 pôles, choisi avec des dimensions identiques à ceux d'un moteur synchrone à aimants permanents utilisé dans la Toyota Prius 2010 et de simuler sa conception géométrique par le logiciel Moto0rSolve, afin d'obtenir les caractéristiques électromagnétiques du moteur. L'approche de modélisation utilisée dans ce cas est une approche par élément finis. Le second but concerne l'amélioration de l'alimentation de la MRV afin de minimiser les ondulations du couple en utilisant MATLAB/SIMULINK. Cela sera effectué par un choix convenable des angles de décalage des courants. On applique une commande par l'utilisation de la technique de l'intelligence artificielle par logique floue.

Dans le **premier chapitre**, on va présenter des généralités sur les véhicules électriques et les moteurs à réluctance variable, nous présentons une généralité des véhicules électriques hybrides, tels que la définition et la classification. Ensuite, l'utilisation de moteurs électriques dans les VEH. Une grande partie de ce chapitre a été consacrée à là les différentes topologies de machines à réluctance variable, et le principe de fonctionnement d'une MRV.

Le **deuxième chapitre** traitera de la conception des moteurs à réluctance variable, et il sera consacré à des rapports sur le processus de conception à partir des dimensions en utilisant le logiciel de conception Motorsolve, ainsi que l'exploitation des résultats

Dans le **troisième chapitre**, nous étudierons le modèle non linéaire du moteur conçu, par l'utilisation des tableaux « *look up table* ». Ensuite, nous passons à la commande de la machine., la régulation à base de la logique floue est choisie pour régler la vitesse du moteur à réluctance variable. Finalement, nous appliquons le nouveau cycle de conduite européen (NEDC) au moteur pour en garantir l'efficacité dans l'environnement européen.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LES VEHICULES
ELECTRIQUE ET LES MOTEURS A RELUCTANCE
VARIABLE

Parti I : Généralités sur les véhicules électrique

I.1 Introduction

Le secteur des transports et de la traction électrique, en général, est à la pointe des progrès dans l'utilisation des technologies les plus avancées dans le domaine du génie électrique. En effet, les activités de recherche et de développement dans le domaine des transports ces dernières années ont été axées sur la mise au point d'un transport sûr, abordable et respectueux de l'environnement. Pour répondre à ces exigences, des véhicules hybrides électriques (VEH) ou entièrement électriques (VE) sont proposés. Ces véhicules occupent de plus en plus le marché automobile et tentent de remplacer les véhicules thermiques [1]. Pour la motorisation des VE, l'utilisation des moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) donne beaucoup de satisfactions particulièrement lorsqu'ils sont fabriqués à base de matériaux de terre rare [2]

En effet ces moteurs ont un rapport couple/volume important et présente une grande résistance à désaimantation. Malheureusement, le prix de revient des aimants permanents de type terre-rare ne cesse pas d'augmenter dans les dernières années. La machine à réluctance variable (MRV) se présente comme une alternative aux MSAP. Les MRV délivrent un couple important, leur commande en vitesse est simple et son cout de fabrication est relativement faible. Donc beaucoup de chercheurs envisagent l'utilisation des MRV dans les systèmes de propulsion des VE. [2]

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les véhicules électriques et les moteurs à réluctance variable, nous présentons un état de l'art sur la généralité des véhicules hybrides électriques, tels que la définition et la classification. Ensuite, l'utilisation de moteurs électriques dans les VEH. Une grande partie de ce chapitre a été consacrée à là les différentes topologies de machines à réluctance variable, et le principe de fonctionnement d'une MRV.

I.2 Définition d'un Véhicule Electrique hybride

Un véhicule électrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [3].

Un véhicule hybride utilise au moins deux sources d'énergie de nature différente pour se déplacer, dont au moins l'une des deux sources doit être réversible afin de récupérer l'énergie en phase de freinage. L'objectif étant de combiner les avantages du véhicule électrique (zéro pollution) et les prestations d'un véhicule traditionnel thermique (en termes d'autonomie) afin d'économiser l'énergie consommée. [4]

I.3 Classification des véhicules électriques hybrides

Les véhicules hybrides sont généralement classés selon deux catégories. La première dépend de l'architecture tandis que la seconde considère le taux d'hybridation du véhicule [5].

I.3.1 Par architecture :

La classification par architecture examine la disposition des composants de la chaîne de traction des véhicules électriques hybrides. Les trois grandes familles d'architectures série, parallèle et mixte (série-parallèle) regroupe la majorité des combinaisons d'agencement des constituants de la chaîne énergétique des VEHS prototypés ou déjà commercialisés [5].

I.3.1.1 Architecture série :

Dans l'architecture série, seul le moteur électrique est connecté directement aux roues et leur transmet un couple. Le moteur électrique est donc dimensionné pour pouvoir assurer seul la traction du véhicule, selon la demande de couple du conducteur. Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux.

Cette configuration permet à la batterie d'être rechargée soit :

- ❖ Par le moteur thermique, via la génératrice. Dans ce cas, le moteur thermique est contrôlé de manière à fonctionner à son rendement optimum.
- ❖ Par le moteur électrique, qui sera alors utilisé en mode générateur, lors d'un freinage récupérateur. L'intérêt de cette architecture réside dans la capacité à pouvoir faire fonctionner le moteur thermique. [6] [7]

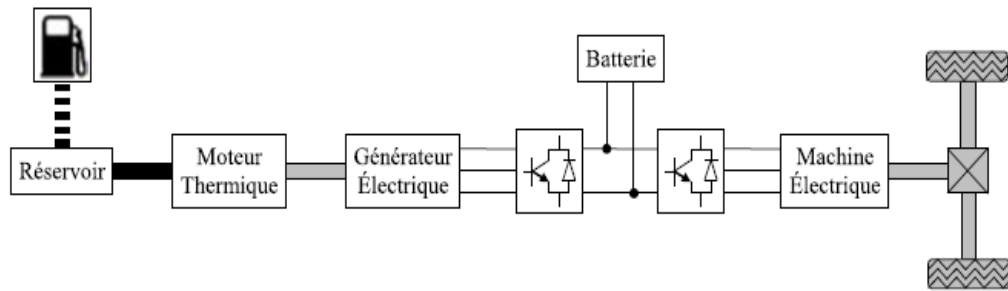


Figure I - 1: Architecture série d'un HEV.[5]

I.3.1.2 Architecture parallèle :

Ici, les moteurs électrique et thermique assurent tous les deux la rotation des roues, par contre, c'est le moteur électrique qui recharge la batterie. Un hybride parallèle se compose d'un moteur thermique, un moteur électrique, une batterie, un inverseur, et d'une transmission. Le moteur électrique, est alimenté cette fois par la batterie et non par le moteur thermique, il fonctionne également en tant que générateur pour recharger la batterie. L'inconvénient est qu'il ne peut produire de l'électricité durant la conduite. Encore une fois le moteur électrique fonctionne lors des conduites en ville et le moteur thermique lors des plus fortes demandes en puissance soit sur la route. Le nom parallèle vient du fait que le courant est parallèle.[8]

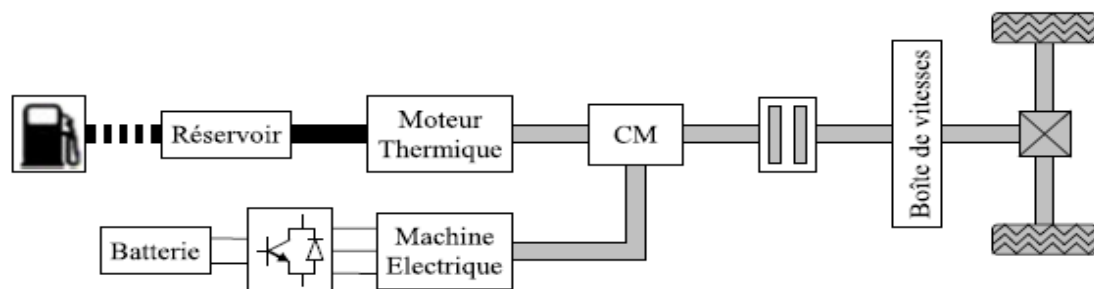


Figure I - 2: Architecture Parallèle d'un HEV.[5]

I.3.1.3 Architecture mixte (série-parallèle) :

La catégorie des architectures combinées (mixte) correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. [7]

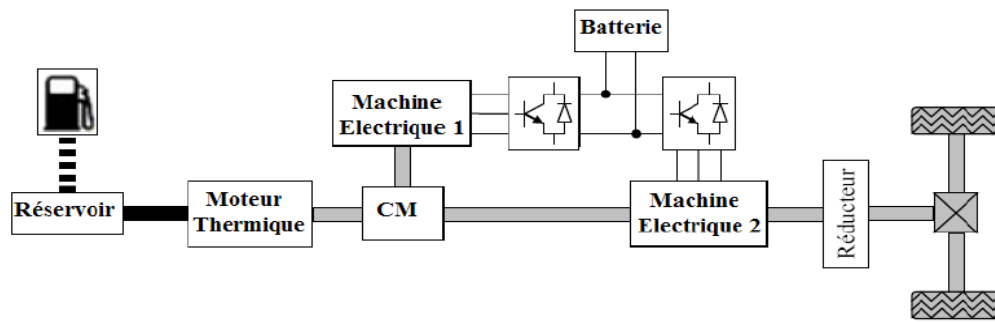


Figure I - 3: Architecture mixte d'un HEV

I.3.2 Par hybridation :

La classification par hybridation consiste à hiérarchiser les véhicules électriques hybrides en fonction du ratio (exprimé en %) entre la capacité de puissance disponible à partir de la seconde source d'énergie (typiquement des batteries ou super condensateurs dans le cas décrit) par rapport à la puissance totale disponible embarquée dans le véhicule. Quatre catégories sont à considérer : le "Micro-hybride", le "Mild-hybride", le "Full-hybride" et le "Plug-in hybride". Il est important de souligner qu'une définition universelle de la classification par hybridation n'existe pas. Certains auteurs considèrent les fonctionnalités du véhicule (par exemple la capacité en mode tout électrique, l'arrêt du MCI à l'arrêt du véhicule, etc.). Le tryptique taux d'hybridation, performances énergétiques et puissance totale embarquée ne conduit pas à une relation triviale, de ce fait la puissance de la machine électrique est considérée pour une classification par hybridation. Ainsi, en respectant l'ordre précédent de citation des quatre catégories, les puissances des machines électriques sont respectivement égales à 3kW, 10kW, 50kW et ≥ 30 kW.[5]

I.4 L'utilisation de moteurs électriques dans les VEH

Les machines électriques sont des transformateurs d'énergie bidirectionnels. Elles transforment l'énergie électrique en énergie mécanique rotationnelle et, réciproquement, l'énergie mécanique en énergie électrique. Le choix des machines électriques de traction pour les systèmes de propulsion hybride est une étape très importante qui nécessite une attention particulière. L'industrie automobile est toujours à la recherche du système électrique de propulsion le plus approprié pour les VEH et même pour les VE. Dans ce cas, les principales caractéristiques sont le rendement, la fiabilité et le coût auxquels il faut ajouter le niveau de vibration ou de bruit. Le processus de choix des systèmes de propulsion électrique appropriés est ainsi difficile et doit être réalisé au niveau du système. Les critères guidant le choix des systèmes de propulsion électrique pour les VEH dépend principalement de trois facteurs :[9]

- ❖ Le cycle de conduite.
- ❖ Les contraintes du véhicule.
- ❖ La source d'énergie.

D'un point de vue industriel, les principaux types de machines électriques adoptées ou en cours d'évaluation pour les VEH comprennent la machine à courant continu (CC) qui a été abandonnée, la machine asynchrone (IM), les machines synchrones à aimants ou rotor bobiné (AP) et le moteur à réluctance variable (VRM).[9]

I.4.1 Machines à courant continu :

Les machines à courant continu sont appropriées pour l'utilisation dans les véhicules électrifiés par leurs caractéristiques de couple et de vitesse. De plus, leur chaîne de commande est plus simple que les autres types de moteurs. Néanmoins, ils ont besoin d'entretien à cause de la présence des balais, leur rendement est également plus bas que celui des autres technologies de machine électriques, leur vitesse maximale est limitée et le rapport poids/puissance défavorable. De plus, les progrès dans les semi-conducteurs et l'électronique de puissance facilitant la commande des autres types de machines font que les moteurs asynchrones (à induction) et les moteurs synchrones sont devenus plus intéressants. [1]

I.4.2 Machines asynchrones :

La plus communément utilisée aujourd'hui dans les applications de traction électrique est la machine asynchrone, que ce soit en mode tout électrique (Twizy, Zoé, Leaf, e-Golf ...) ou hybrides (Prius, BMW i8, Mercedes-Benz S500 Plug-In Hybrid...). La MAS se compose de deux pièces principales ; le stator, servant de support et incluant un bobinage relié à un variateur de vitesse et le rotor qui est un cylindre en matériau ferromagnétique relié au stator par des paliers. Il comporte un enroulement constitué de conducteurs en court-circuit parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques.[1]

I.4.3 Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents (AP) est une autre candidate importante pour une utilisation dans les chaînes de traction des VEHs. Elle cumule de nombreux avantages comme son volume faible pour une puissance de sortie importante, leur rendement important et une meilleure dissipation des pertes. Les APs sont aussi la seule technologie de machine qui puisse être utilisée dans les solutions de type moteur-roue. Mais la caractéristique puissance-vitesse de ce type de machines peut être limitée et les possibilités de défluxage

(méthode de commande de la machine afin de diminuer le flux magnétique créé et permettant accéder à des vitesses importantes à puissance constante) sont plus limitées. Le risque d'utiliser un défluxage mal maîtrisé est la démagnétisation des aimants d'où il peut résulter une diminution du rendement. [1]

I.4.4 Machines à réluctance variable (MRV) :

Les machines à réluctance variable (MRVs) suscitent l'intérêt des fabricants de véhicules automobile en raison de leurs potentiels. Comme ces machines ont l'avantage d'être simples à construire, comparativement aux autres types de machine, elles ont une tolérance aux pannes plus importantes, une architecture de commande relativement simple et disposent d'une caractéristique couple-vitesse très adaptée aux VEHs. [1]

Leurs inconvénients sont le bruit acoustique, l'ondulation de couple, le besoin d'avoir un convertisseur adapté et la possibilité de génération de bruit résultant d'une interférence électromagnétique [1].

I.5 Choix de la machine à réluctance variable (MRV)

L'avenir de la machine électrique n'est certainement plus un sujet annexe dans les discussions sur les performances des véhicules électriques. Le choix de la machine est une étape essentielle qui affecte le coût et les performances de la voiture. Sur la base des caractéristiques des quatre technologies de machines résumées dans les sous-sections précédentes, nous allons justifier le choix de la machine à réluctance variable en tenant compte des principales contraintes de la traction électrique. Nous entamerons cette démarche en exposant les raisons de notre choix de cette machine en mettant en valeur ses avantages par rapport aux machines classiques (MCC, MAS et MSAP). Ainsi, une classification sera proposée suivant des critères énergétiques, mécaniques et économiques.

Une comparaison quantitative des quatre machines en fonction des critères spécifiques à la traction électrique est résumée dans le tableau I.1. Chaque machine est évaluée sur la base de 7 critères sur une échelle de 0 à 5, la note 5 correspondant à la meilleure réponse au critère [1]

Tableau I - 1 : Comparaison des quatre machines de traction électrique. [18]

Machine Critère	MCC	MAS	MSAP	MRV
Plage de vitesse	2.5	4.5	4.5	5
Performance énergétique	2	4	5	4
Poids	2	3	4	5
Coût	5	4	3	5
Fiabilité	2	4	3	5
Densité de puissance	1	4	5	3
Partie alimentation	4	5	3	2
Total	18.5	28.5	27.5	29

La machine à réluctance variable (MRV) est une machine électrique réversible. Son concept est connu depuis plus d'un siècle et elle est l'objet de plusieurs travaux d'étude et de recherche depuis les années 1920 et qui revient sur les devants de la scène après les découvertes récentes sur les matériaux et les progrès de l'électronique de puissance conjugués au développement de l'informatique. [1]

Dans cette partie de notre travail, nous allons présenter tous les aspects de la MRV, de sa modélisation et sa description aux différentes techniques utilisées pour sa commande. Nous décrirons également le principe de fonctionnement, son alimentation et les différentes topologies de convertisseurs utilisés [1].

I.6 Avantages et inconvénient des véhicules électriques

I.6.1 Les Avantages des véhicules électriques :

Les VE possèdent de nombreux avantages :

- ❖ Ne pas polluer l'environnement.
- ❖ Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.
- ❖ Le démarrage est très rapide.
- ❖ Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages.
- ❖ Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 40(par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- ❖ L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composé de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- ❖ Leurs chaînes de conversion est réversible et elle peut permettre la récupération d'énergie dans les descentes ou lors des freinages

I.6.2 Les inconvénients des véhicules électriques :

Les inconvénients notables d'un véhicule électrique concernent son système de stockage d'énergie

- ❖ Une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie.
- ❖ Une longue durée de recharge ou une puissance excessive de charge.
- ❖ La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.
- ❖ D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.

Partie II : Généralités sur les Moteurs à réluctance variable (MRV)

I.7 Machine à Réluctance Variable (MRV)

Les machines à réluctance variable sont des machines pas à pas les plus utilisées pour des applications à vitesse constante. Cette machine possède un rotor ferromagnétique non aimanté et robuste présentant une saillance importante. Comme les machines synchrones à aimants permanents, elle possède un stator en matériau ferromagnétique comportant des dents sur lesquelles sont enroulées des bobines ce qui créent le champ magnétique (Figure I.4). [1]

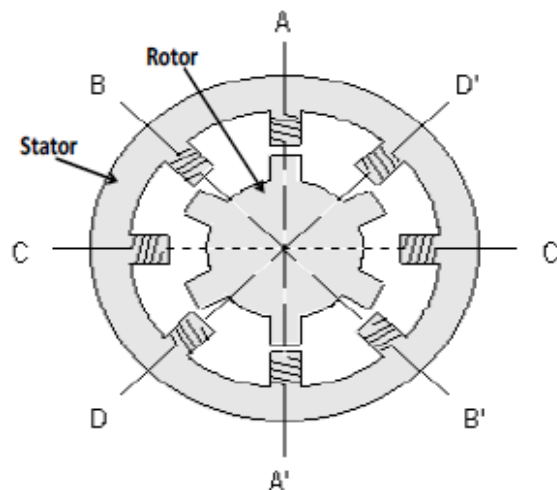


Figure I - 4: Vue en coupe d'une machine à réluctance variable

Le principe de fonctionnement de la MRV est fondamentalement différent de celui des machines classiques (asynchrones et synchrones). Dans ces dernières, la production du couple électromagnétique est régie principalement par la loi de Laplace, du fait que les conducteurs du rotor sont placés dans le champ électromagnétique créé par le stator. Tandis que celui des MRV, est basé essentiellement sur la variation de l'énergie magnétique associée au déplacement du rotor.[10]

En plus de sa robustesse et sa simple construction, cette dernière possède des caractéristiques très intéressantes pour la traction électrique : simplicité de fabrication, possibilité de géométries exotiques, faible coût et vitesses très élevées, tout en ayant la possibilité de fournir un fort couple à basse vitesse et un fonctionnement avec une très longue plage de puissance constante comme on le voit sur la Figure I.5.

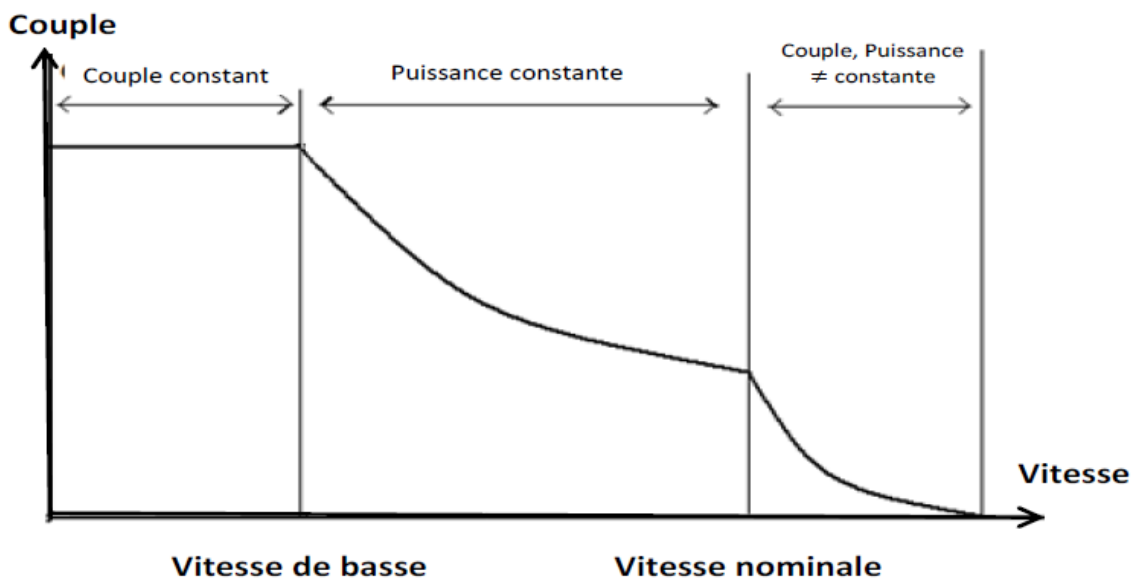
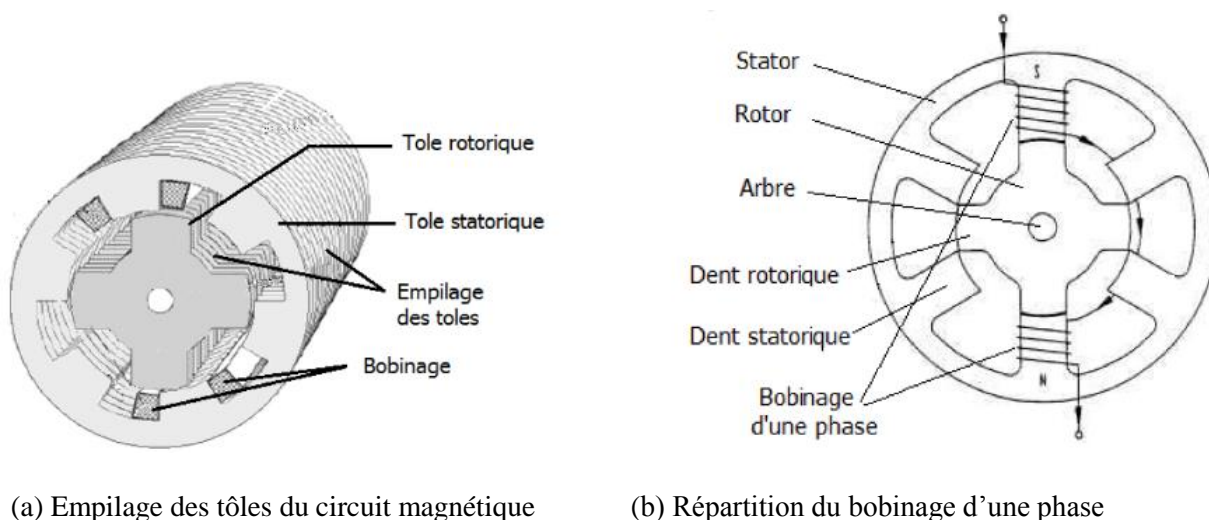


Figure I - 5: Caractéristique couple/vitesse de la machine à réluctance variable

I.8 Constitution

Les MRV sont des machines à double denture et de structure simple qui ne possèdent ni bobinages ni aimants permanents au rotor. Chaque structure reçoit une appellation relative à son nombre de dents, par exemple "24/16" signifie : 24 dents au stator et 16 dents au rotor. Les circuits magnétiques du stator et du rotor sont construits à partir d'un empilage de tôles magnétiques (voir figure I.6) afin de minimiser au maximum les pertes par courant de Foucault [1]



(a) Empilage des tôles du circuit magnétique

(b) Répartition du bobinage d'une phase

Figure I - 6 machine à réluctance variable « 6/4 » pôles.[1]

Cette constitution est simple et peu coûteuse relativement aux autres types de machines électriques, nécessite une électronique de commande spécifique. La machine à réluctance variable ne peut pas être alimentée directement avec une source continue ou alternative. Un convertisseur qui assure la commutation du courant dans les phases de la machine est indispensable pour son fonctionnement. Selon les applications, la machine à réluctance variable peut avoir plusieurs configurations. La Figure I.7 montre quelques configurations de la MRV.[10]

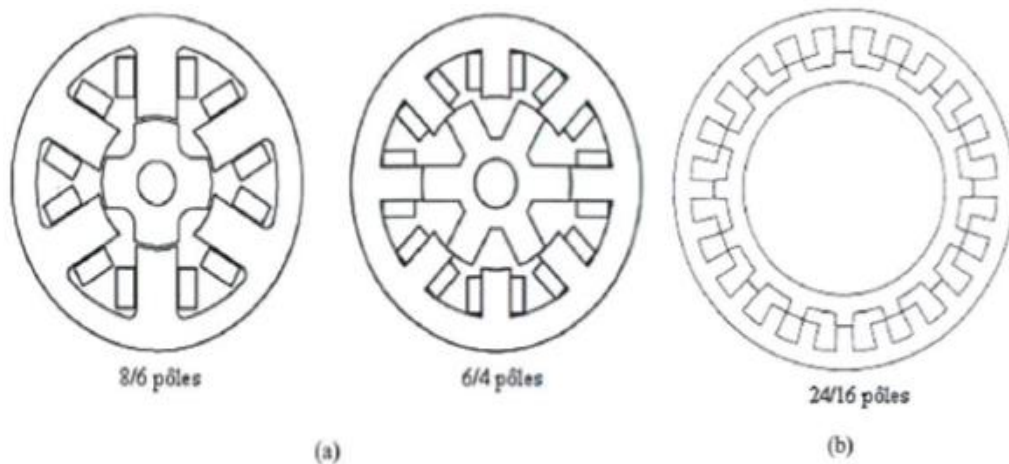


Figure I - 7: Configurations de la MRV : (a) 6/4 pôles, 8/6 pôles, (b) 24/16 pôles

Cette machine peut comporter deux, trois, quatre (ou même plus) phases. Dans notre projet nous avons choisi trois phases. Le stator comporte 24 dents tandis que le rotor n'en a que 16 : on classe souvent ces machines relativement aux nombres de dents statoriques et rotoriques, ainsi il s'agit là d'une "24/16". [1] alors :

$$\text{Pas statorique : } \alpha_s = 360^\circ / 24 = 15^\circ$$

$$\text{Pas rotorique : } \alpha_r = 360^\circ / 16 = 22.5^\circ. [1]$$

I.9 Principe de fonctionnement d'une MRV

Quel que soit le type de machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire, identique à celle représentée (Figure I.8).

Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant I et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui inter polaire de la pièce fixe.[12]

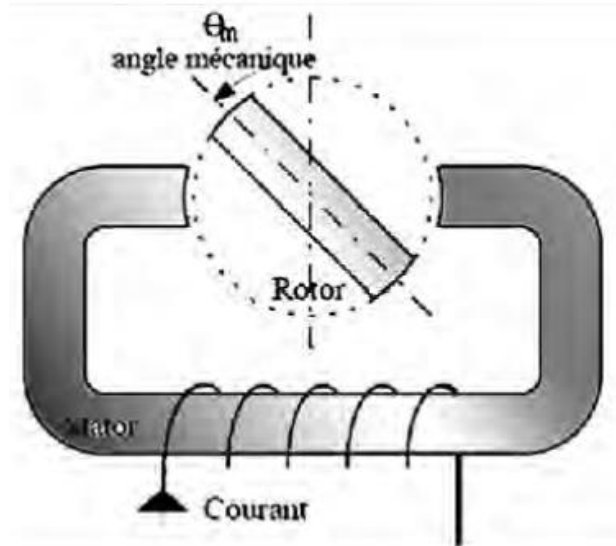


Figure I - 8: Machine à réluctance monophasée : Structure élémentaire [12]

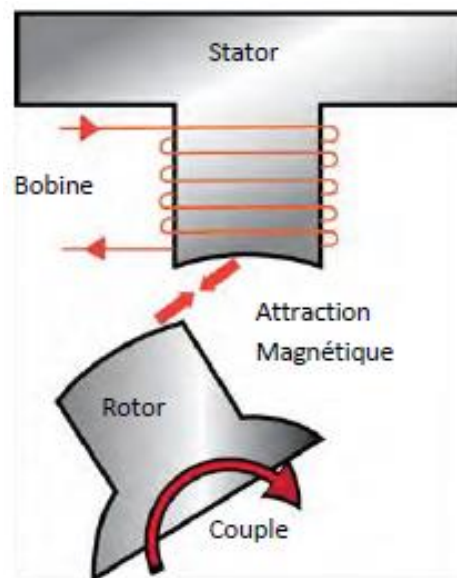


Figure I - 9: Machine à réluctance variable : Attraction sur une phase. [12]

Cette structure possède deux positions rotoriques remarquable :

- ❖ Une position d'opposition (Figure I.10.a) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale
- ❖ Une position de conjonction (Figure I.10.b) dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale. [13]

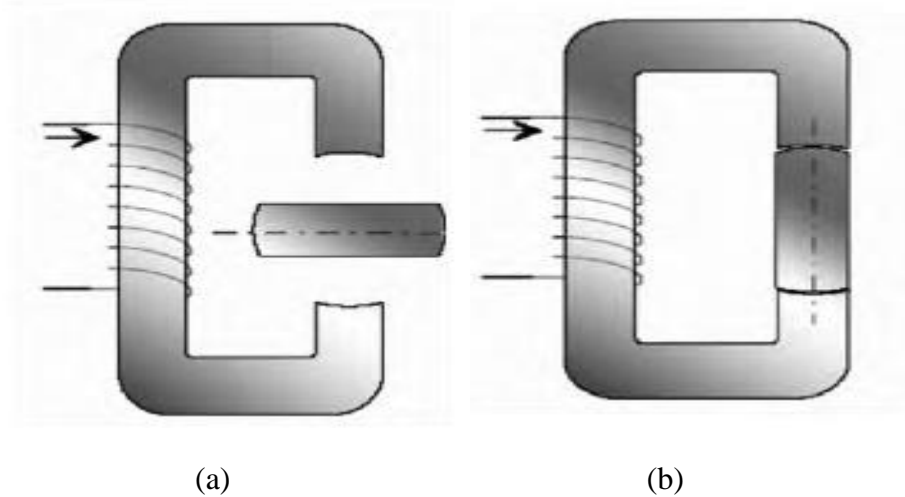


Figure I - 10: positions extrêmes du rotor

A partir de la position d'opposition ($\theta_m = 0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi/2$), selon la règle du *flux max* ou de la *reluctance min*, et ainsi de suite [14]

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_m} \quad (I.1)$$

L'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Figure. I.11) donne le régime de fonctionnement demandé :

- ❖ Moteur ($C_{em} > 0$) sur la phase croissante de l'inductance ($\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} > 0$)
- ❖ Générateur ($C_{em} < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance ($\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} < 0$)

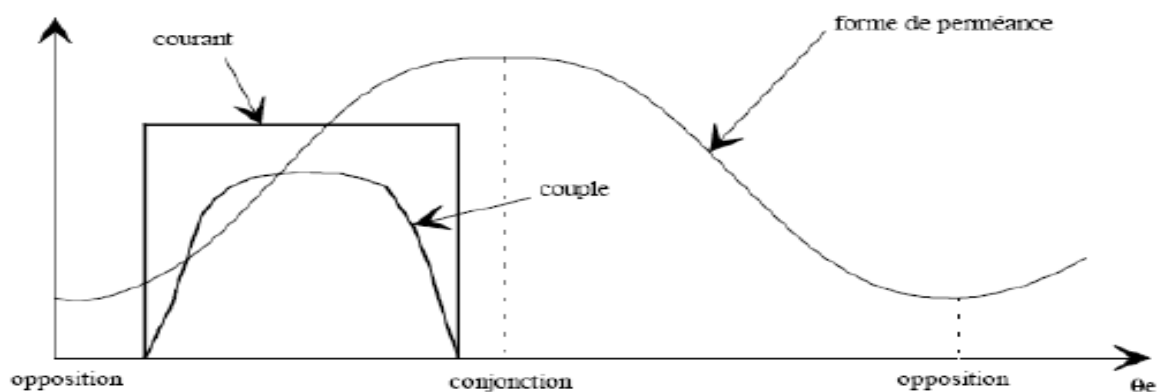


Figure I - 11: Caractéristiques de la MRV en fonction de la position

I.10 Différentes topologies de MRV

I.10.1 MRV pures :

La MRV dite "pure" a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants) qui la distingue des machines synchrones et asynchrones. Une autre particularité est qu'elle n'est pas à champ tournant mais à champ « pulsé ». Les moteurs à réluctance de ce type se satisfont de courants unidirectionnels de forme rectangulaire, ce qui fera la spécificité de leurs alimentations. [13]

On peut citer divers types (Figure I.12) de structures à réluctance pure [14] :

- ❖ Structures à double denture « simple » (« gosses dents ») et à 2 dents par phase.
- ❖ Structures à double denture « simple » (« gosses dents ») et à plus de 2 dents par phase.
- ❖ Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global »



Figure I - 12 : MRV à 2 dents par phase

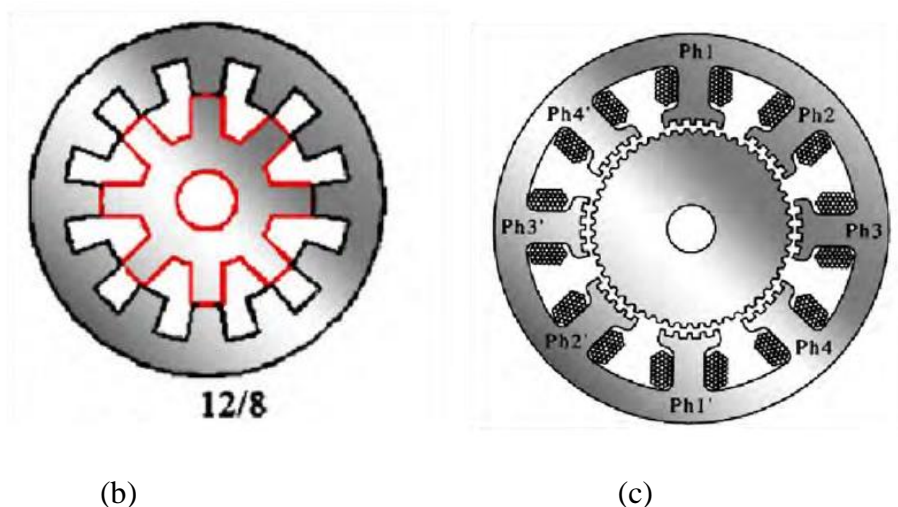


Figure I - 13 : (b) MRV à 4 dents par phase, (c) MRV à pôles statoriques dentés

Elle se caractérise par un couple massique élevé et une grande simplicité de construction d'où un faible coût et une bonne robustesse, Ces atouts lui ont permis de multiples applications : dans l'industrie pour les systèmes de démarreur-alternateur dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'éolien ou l'aérospatial. [12]

I.10.2 MRV vernier :

La structure de ces topologies est identique aux MRV pure, mais la MRV « pure » est alimentée par des courants de forme rectangulaire et la MRV vernier est alimentée par des courants sinusoïdaux [15]. Il existe des machines dites « Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes (figure I.14) ; sur chaque armature, Les dents sont identiques et régulièrement espacées, mais les nombres de dents statoriques et rotoriques ont une légère différence (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméabilité sinusoïdale. Il y a aussi les machines dites « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et leurs performances couple-vitesse peuvent être comparées à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.[16]



Figure I - 14 : MRV à effet Vernier à stator externe et interne [16].

I.10.3 MRV hybrides :

Les MRV hybrides utilisent des aimants permanents afin d'améliorer les performances de la machine. La MRV de la Figure I.15 met en œuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet Vernier pour une alimentation sinusoïdale. [15]

L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé. Il y'a deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS (Machine à Réluctance Variable à Double Saillance).

L'une met en œuvre des aimants placés au rotor, la machine se rapproche des machines synchrones à aimants enterrés (Interroi Permanent Magnet) ; la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise plutôt des aimants placés au stator : ce qui permet d'obtenir alors une machine à double saillance à aimants permanents au stator dite « MRV polarisée » figure (I.16). [16]

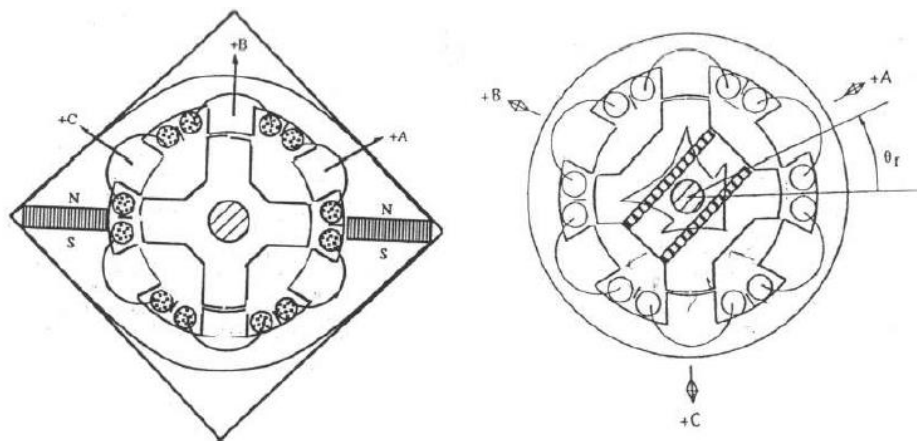


Figure I - 15 : Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance. [10]

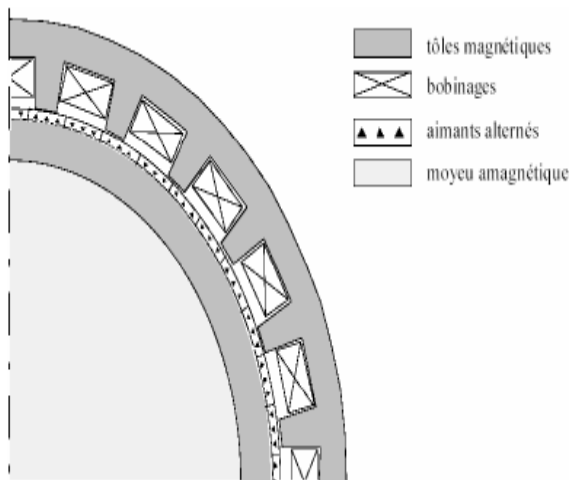


Figure I - 16 : MRV hybride à effet vernier

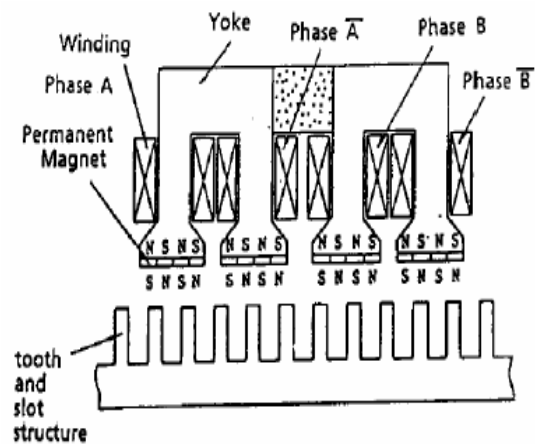


Figure I - 17 : MRV à plots à aimants

I.11 Etude des avantages et inconvénient des MRV

Les avantages du moteur à réluctances variables sont les suivantes :

- ❖ Structure simple et robuste avec un faible coût de fabrication.
- ❖ Le rotor ne comporte pas d'aimant. Il est constitué de tôles empilées ou d'un bloc massif de matériau fritté.
- ❖ Simplicité de construction du rotor.
- ❖ Couple massique relativement élevé.
- ❖ Les phases sont découplées magnétiquement, ce qui permet au moteur de continuer à tourner en mode dégradé, en l'absence d'une phase, par exemple

La MRV a cependant quelques inconvénients

- ❖ Ondulation de couple significative.
- ❖ Elle doit être commutée électroniquement et ne peut donc être alimentée directement par une source alternative (AC) ou (DC).
- ❖ Ses caractéristiques magnétiques non linéaires compliquent son analyse et son contrôle.
- ❖ Sa structure dentée, cause d'oscillations de couple et de bruits, surtout à vitesse élevée.
- ❖ Le courant nécessaire à la magnétisation du moteur est aussi une source de pertes.
- ❖ L'absence d'aimant est un avantage en coût et simplicité. Cependant, la magnétisation du rotor nécessite un courant important qui passe par le transit d'une puissance active, donc un facteur de puissance dégradé, et par conséquent, un surdimensionnement de l'onduleur.

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté l'utilisation des moteurs électriques dans les véhicules électriques. Nous avons d'abord étudié le principe de fonctionnement des voitures électriques et des moteurs à réluctance variable. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur l'élément clé d'un VE qui sont les moteurs électriques. Parmi les moteurs qui donnent beaucoup de satisfaction figurent les moteurs à réluctance variable (MRV).

Le chapitre suivant sera consacré à la conception d'un moteur à réluctance variable 24/16 de 60 kW à l'aide du logiciel. (Motorsolve).

CHAPITRE II :
CONCEPTION DU MOTEUR MRV SOUS
« MOTORSOLVE »

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons en détail les dimensions de chaque partie du moteur de traction utilisé dans un véhicule électrique hybride, sa conception et les matériaux nécessaires que nous utiliserons dans ce travail et leur comparaison avec les dimensions d'un moteur synchrone à aimants permanents utilisé dans un véhicule électrique hybride de type Prius Toyota 2010. La conception prend en compte la taille, le poids et les performances requis selon les spécifications requises et les normes internationales.

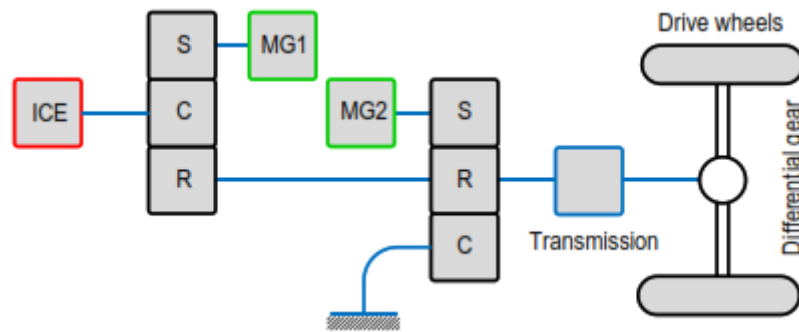
Les performances du moteur, telles que le profil couple-vitesse et le rendement du moteur, sont abordées dans ce chapitre. Un MRV 24/16 est proposé pour atteindre la même caractéristique couple-vitesse que MSAP utilisé dans la Prius Toyota 2010.

Dans ce chapitre nous allons dimensionner et simuler notre moteur proposé (MRV 24/16) via le logiciel MotorSolve par analyse en 2D.

Dans ce chapitre, nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition du moteur MRV 24/16, basée sur la méthode des éléments finis (MEF) dans le régime magnéto dynamique sous logiciel MotorSolve. Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie du moteur, l'effet de saturation des matériaux magnétiques et les caractéristiques non linéaires du moteur.

II.2 Véhicule électrique hybride de Toyota Prius 2010

Les véhicules électriques hybrides (HEV) combinent des groupes motopropulseurs à moteur à combustion interne conventionnels avec une propulsion par moteur électrique. Dans la Toyota Prius 2010, deux MSAP sont utilisés pour améliorer le rendement énergétique : un moteur de démarreur-générateur, MG1, et un moteur de traction pour entraîner directement le véhicule, MG2. Un deuxième ensemble d'engrenages planétaires de réduction est utilisé entre le moteur et l'arbre de sortie de la transmission, comme illustré à la Figure II-1. L'objectif de ce mémoire est de remplacer le moteur MSAP (MG2) par un moteur MRV de même performance.



S: Sun gear transmission

C: Carrier

R : Ring

ICE : Moteur à combustion interne

MG1 : Démarreur moteur, générateur

MG2 : Moteur de traction

Figure II - 1: Schéma de système de transmission hybride Toyota Prius 2010

II.3 Système d'alimentation électrique dans Toyota Prius 2010

Toyota Prius 2010 contient une batterie Lithium-ion (Li-ion) à haute tension qui alimente le moteur électrique MG2, et l'onduleur/convertisseur. Tous les autres appareils électriques automobiles conventionnels tels que les phares, et la radio sont alimentés par une batterie auxiliaire séparée de 12 volts. De nombreuses protections ont été conçues dans la Prius Toyota 2010 hybride pour aider à garantir que la batterie HV, environ 346 Volt, est maintenue en toute sécurité dans un accident. L'onduleur/convertisseur contient un circuit de boostage qui augmente la tension de la batterie HV de 346 à 650 volts CC. L'onduleur/convertisseur crée un courant alternatif triphasé pour alimenter le moteur de traction MG2.



Figure II - 2: Batterie Lithium-ion (Li-ion) à haute tension

II.4 Processus de conception du MRV

Le moteur à réluctance variable (MRV ou SRM) construit est de 24 pôles au stator et 16 pôles au rotor de trois phases, ce moteur est alimenté par une source de tension continue de 650 V et un courant de 240A, la vitesse nominale du moteur est de 2800 tr/ min. Le MRV 24/16 en cours de conception doit respecter les caractéristiques couple-vitesse ainsi que le diamètre extérieur (264 mm), et la longueur axiale (108 mm) du stator. Les paramètres du moteur sont présentés dans le tableau II.1. La géométrie du moteur MRV 24/16 utilisé dans notre travail est présentée sur la figure II.3.

Sur la figure II.3, β_s et β_r sont les arcs polaires du stator et du rotor, D_s et D_{in} sont le diamètre extérieur et intérieur du noyau du stator, D_r et D_{inr} sont le diamètre extérieur et intérieur du noyau du rotor, h_s et h_r sont les hauteurs des pôles du stator et du rotor, t_s et t_r sont les largeurs des pôles du stator et du rotor, y_s et y_r sont les largeurs de culasse du stator et du rotor.

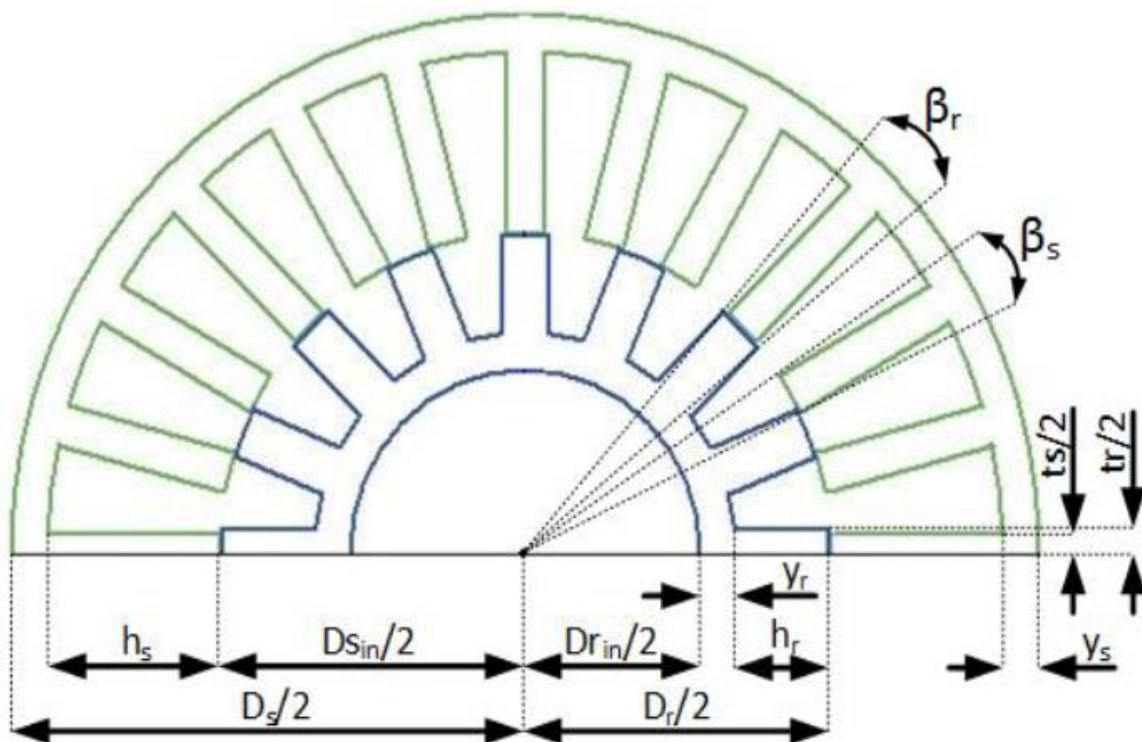


Figure II - 3 : Géométrie du moteur MRV 24/16

Tableau II - 1 : Paramètres géométrique du MRV

Paramètres	Valeur
Nombre de pôles du stator	24
Diamètre extérieur du stator [mm]	264
Diamètre intérieur du stator [mm]	170
Hauteur des pôles du stator [mm]	24.7
Arc polaire du stator [deg]	8.8
Largeur de culasse du stator [mm]	22.3
Facteur de remplissage de fente [%]	0.54
Nombre de spires	11
Epaisseur d'entrefer [mm]	0.5
Nombre de pôles du rotor	16
Diamètre extérieur du rotor [mm]	169
Diamètre intérieur du rotor [mm]	52
Hauteur des pôles du rotor [mm]	15.5
Arc polaire du rotor [deg]	9.5
Largeur de culasse du rotor [mm]	43
Rayon de pointe polaire (pole tip radius) [mm]	4
Rayon du fond du poteau (pole bottom radius) [mm]	4

Le moteur MG2 a une puissance nominale maximale de 60 kW, un couple nominal maximal de 207 Nm et une vitesse de rotation maximale de 10 000 tr/min. On note à travers la comparaison entre le MSAP et MRV 24/16 que le moteur MSAP peut être remplacé par le moteur MRV 24/16, notamment en termes de taille, de performance et de rendement électrique.

Tableau II - 2 : Comparaison entre IPMSM et MRV

Moteur Critère	MSAP	MRV 24/16
Diamètre extérieur du stator	264 mm	264 mm
Longueur axiale	108 mm	108 mm
Epaisseur d'entrefer	0.8 mm	0.5 mm
Nombre de spires	12	11
Facteur de remplissage	54	54
Tension d'alimentation DC	650 v	650v
Courant nominal DC	240 A	240A
Le couple maximale	207 nm	207 nm
Plage de vitesse	2768 tr/min _13900 tr/min	2768 tr/min _13900 tr/min

II.5 Spécifications des matériaux du MRV 24/16

Les matériaux utilisés dans le moteur affectent les caractéristiques du moteur telles que le poids, la température de fonctionnement et divers changements climatiques qui peuvent affecter le fonctionnement du moteur, il est donc essentiel de choisir les matériaux qui conviennent à la nature et garantir une durée de vie plus longue et un bon travail. Le tableau II.3 montre les matériaux utilisés dans notre moteur MRV 24/16

Tableau II - 3 : Matériaux utilisés dans le MRV 24/16

Description	Matériau
Stator	M_19 29 Ga
Rotor	M_19 29 Ga
fil de bobinage	cuiivre: 100 %
Matériau isolant dans le stator	résine époxy

II.6 Exploitation des résultats de conception du « MRV » :

En exploitant logiciel MotorSolve qui nous permet de tracer les différentes caractéristiques de la machine étudiée. Le moteur à réluctance variable peut être conçu en créant un nouveau projet sous la carte moteur IM, Lors de l'ouverture de MotorSolve, l'interface graphique affiche trois fenêtres, les fenêtres (**Motors explorer panel**) et (**Inputs**), qui sont en cascade sur la gauche de la fenêtre (**Viewwindow**), qui peut être fait pour afficher le modèle 2D ou 3D d'un moteur sur la droite.

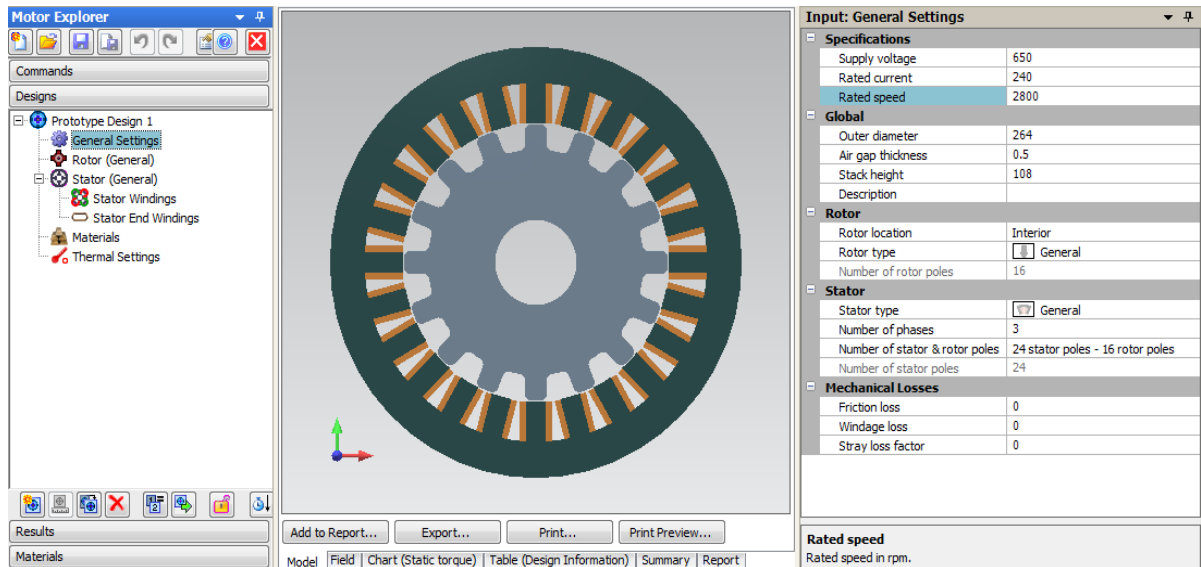


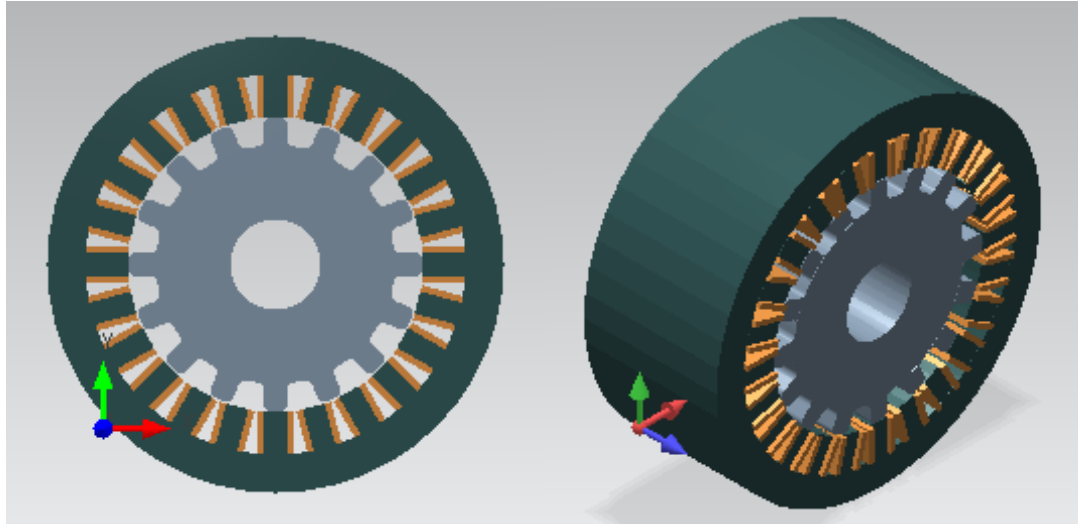
Figure II - 4 : modèle de moteur à réluctance variable dans logiciel MotorSolve.

La figure II.5 montre Les données globales de la MRV 24/16 étudiée.

Input: General Settings	
Specifications	
Supply voltage	650
Rated current	240
Rated speed	2800
Global	
Outer diameter	264
Air gap thickness	0.5
Stack height	108
Description	
Rotor	
Rotor location	Interior
Rotor type	General
Number of rotor poles	16
Stator	
Stator type	General
Number of phases	3
Number of stator & rotor poles	24 stator poles - 16 rotor poles
Number of stator poles	24
Mechanical Losses	
Friction loss	0
Windage loss	0
Stray loss factor	0

Figure II - 5 : Les données globales du MRV 24/16 étudié sous MotorSolve.

Dans cette étude nous allons dimensionner et simuler notre moteur MRV 24/16 via le logiciel MotorSolve par analyse en 2D ou 3D, Pour notre moteur le diamètre externe, l'épaisseur de l'entrefer, le nombre de phases et les pôles de stator et du rotor peuvent être saisis en fonction des besoins du concepteur.



Modèle en 2D

Modèle en 3D

Figure II - 6 : Modèle final du MRV 24/16 sous MotorSolve

Dans l'onglet **Stator** et **Rotor**, spécifiez le diamètre intérieur et extérieur, la largeur de l'ouverture ainsi que l'angle et le rayon de la dent. Comme indiqué sur la Figure II.7.

Input: Stator (General)		Input: Rotor (General)	
Diameters		Diameters	
Inner diameter	170	Inner diameter	52
Outer diameter	264	Outer diameter	169
Coils		Core	
Coil angle	90.2	Core thickness	43
Coil bottom width	3.77	Teeth	
Coil length	24.4	Bifurcation radius	0
Teeth		Rotor pole angle	9.5
Bifurcation radius	0	Tooth angle	90
Slot depth	24.7	Fillets	
Stator pole angle	8.8	Pole bottom radius	4
Tooth angle	90	Pole tip radius	4
Fillets		Viewing Options	
Bottom fillet radius	0	Rotor core transparency	50
Tooth tang radius	0		
Viewing Options			
Stator core transparency	50		
Stator winding transparency	50		

a- Paramètres du stator

b- Paramètres du rotor

Figure II - 7 : Paramètres du stator et rotor du MRV 24/16

MotorSolve présente rapidement au concepteur la disposition la plus optimale de chacun des enroulements de phase le long du stator sous la fenêtre d'entrée comme indiqué dans les Fig.II.8

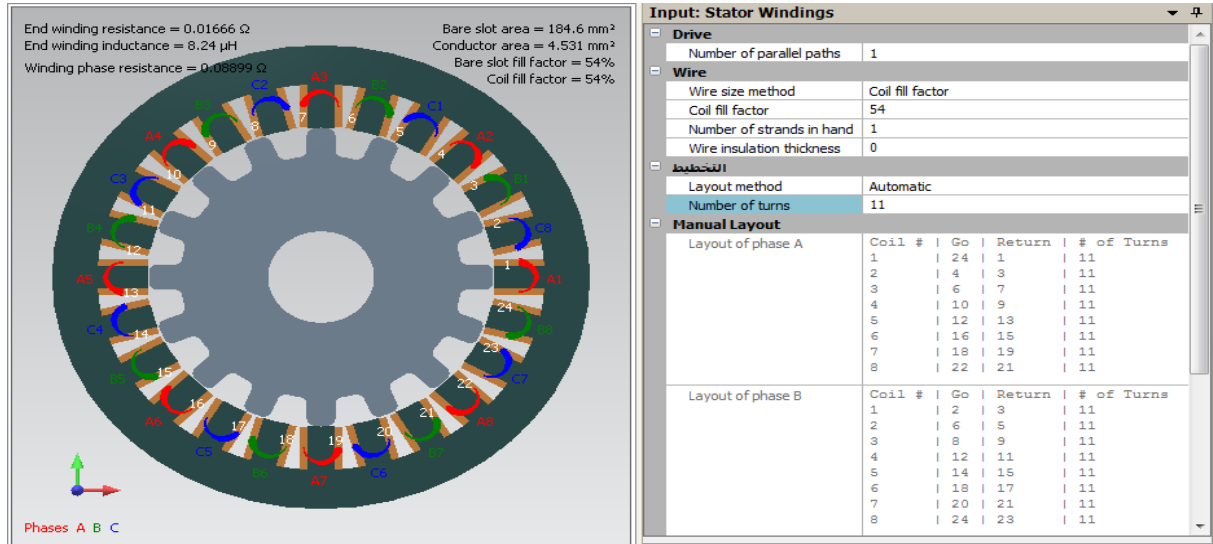


Figure II - 8 : Paramètres et Distribution des enroulements de bobinage statorique.

Le choix des matériaux est aussi disponible dans MotorSolve dans l'onglet 'Materials', le matériau choisi pour les conducteurs et de type cuivre (Copper : 100% IACS) et pour le fer de stator ainsi que le rotor (M-19 29 Ga), comme illustré dans la figure II.9

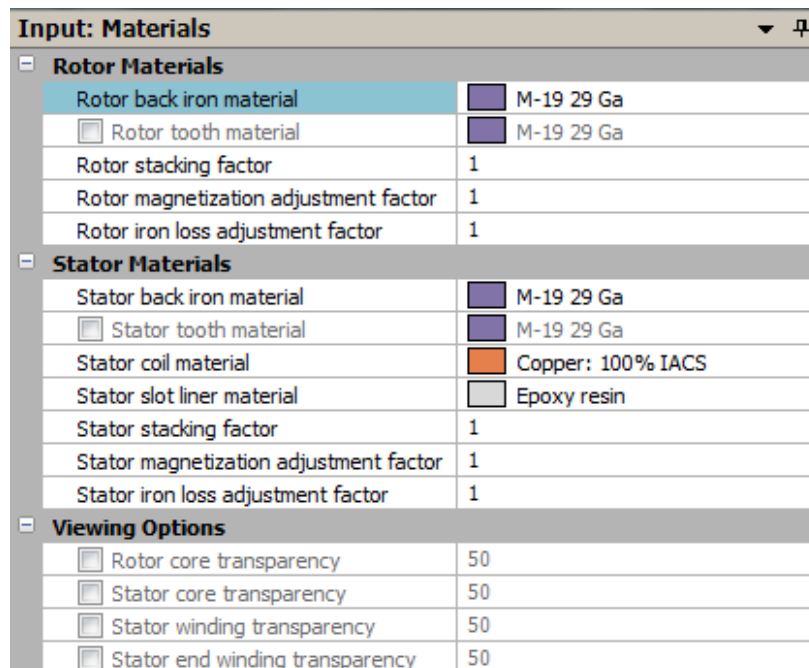


Figure II - 9 : Matériaux du noyau des composants du moteur

Et à la fin et après avoir terminé le processus de conception, le logiciel MotorSolve nous permet voir tous les résultats à partir de l'onglet ' **Results** ', y compris les graphes d'analyse de mouvement, à savoir les courants, le couple, la puissance d'entrée / sortie, et le flux, inductances, et toutes les pertes pour une ou toutes les phases, comme indiqué sur la figure.10

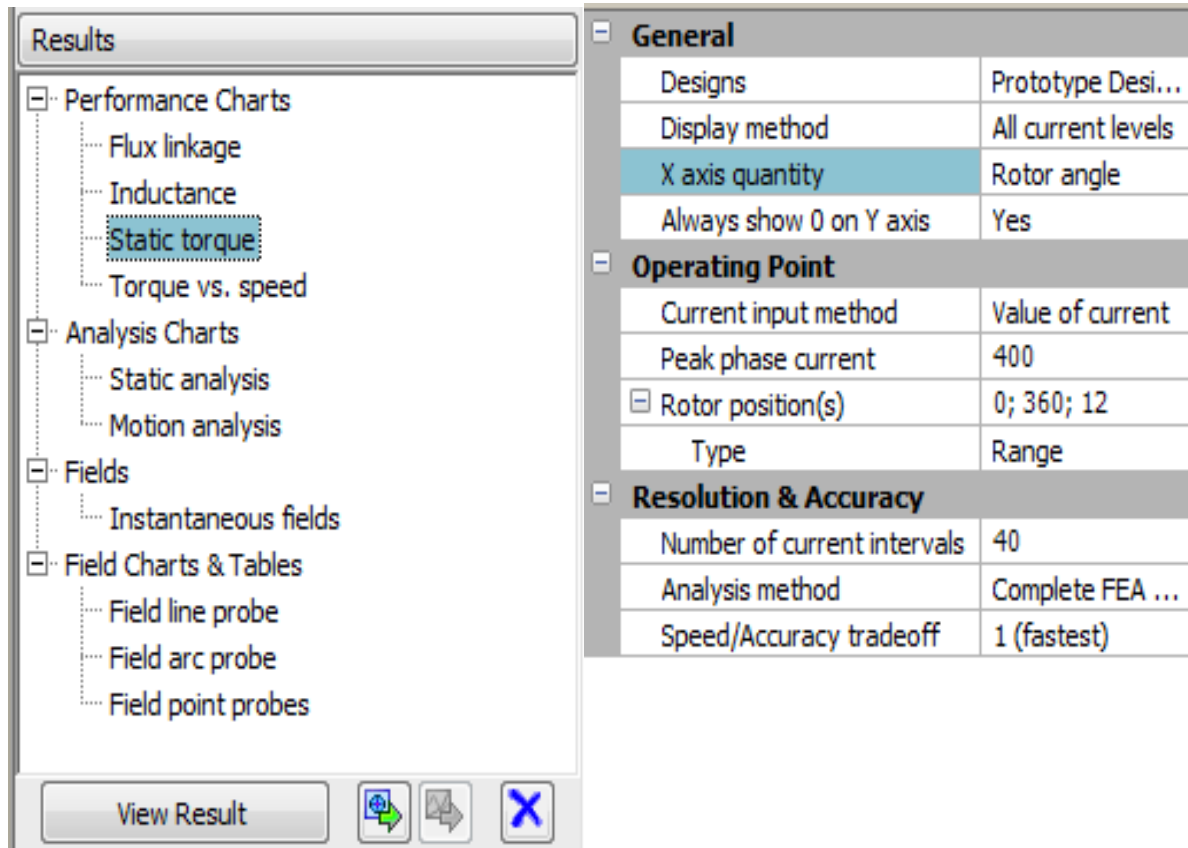


Figure II - 10 : Page des résultats

II.7 Résultats d'analyse du modèle avec "MotorSolve" :

L'étude des performances du moteur consiste à l'analyse des caractéristiques suivantes : Des inductances, de couple électromagnétique-vitesse ; de couple électromagnétique ; et caractéristique de densité du flux dans l'entrefer. Une fois terminé l'analyse du modèle on a obtenu les résultats ci-dessous qu'on peut visualiser en cliquant sur « Results » et on aura les figures suivantes :

II.7.1 Inductances :

Les valeurs des inductances calculées par ce logiciel en fonction de la position du rotor et courant sont présentées à la figure II.11.

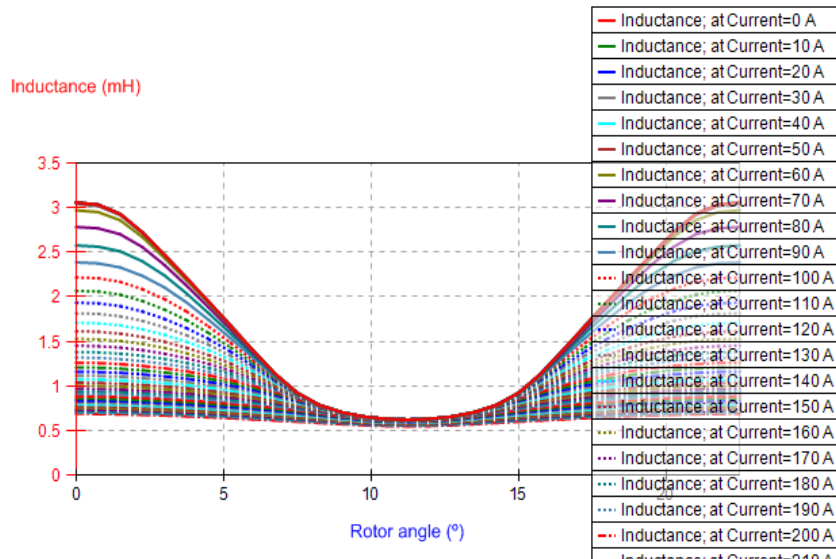


Figure II - 11 : Inductances en fonction de la position du rotor

II.7.2 Couple électromagnétique :

La figure II.12 montre la caractéristique du couple statique de la phase 1 en fonction du courant et de position du rotor, pour des positions variantes de 0 à 25° et des courants variantes de 0 à 400A par pas de 10A.

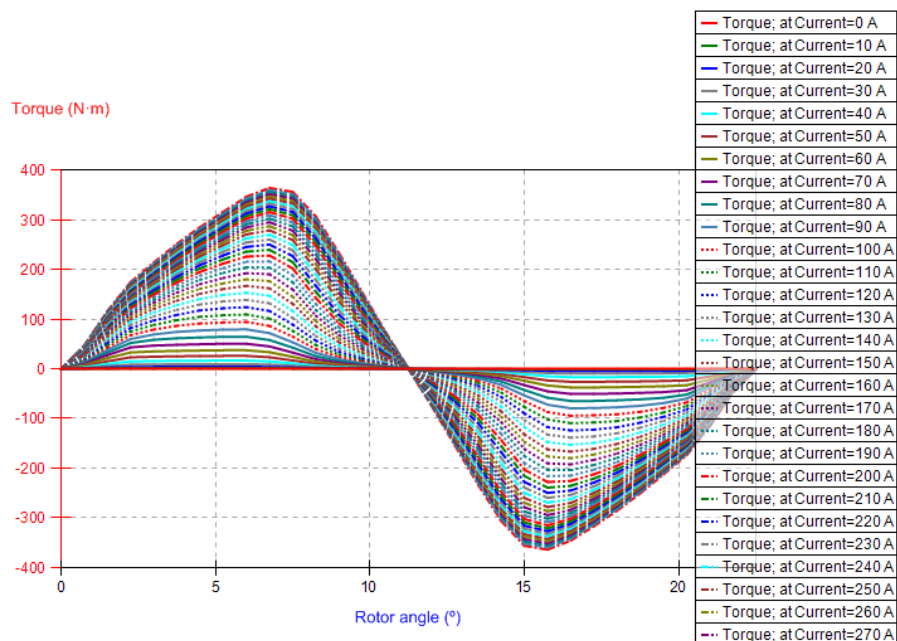


Figure II - 12 : Caractéristique de couple statique de la phase 1 en fonction de position du rotor

La figure II.13 montre la valeur de couple électromagnétique total généré par le MRV, qui est à la valeur maximale de 260 Nm et sa valeur minimale de 165 Nm.

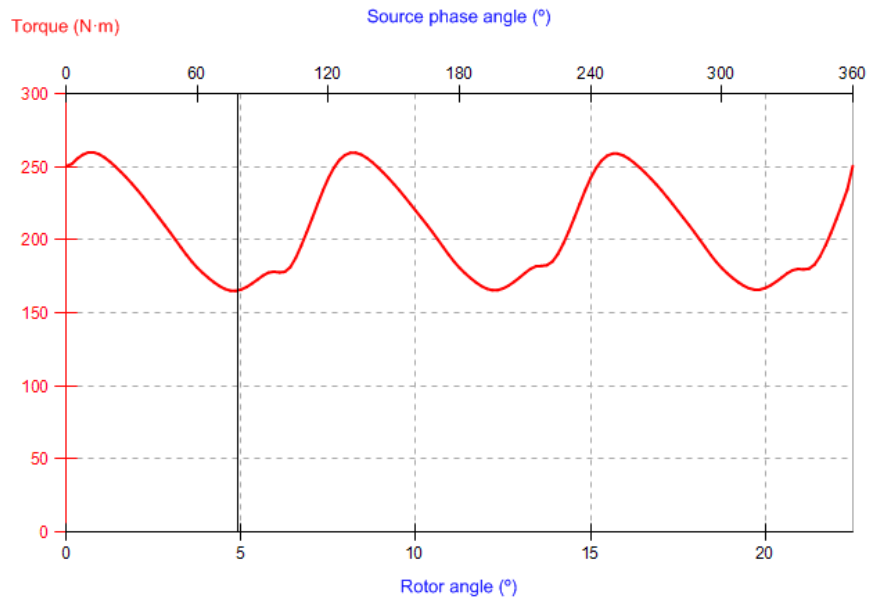


Figure II - 13 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré

II.7.3 Caractéristique du couple électromagnétique-vitesse :

La figure II.14, montre la caractéristique du couple électromagnétique en fonction de la vitesse, nous observons une valeur de couple stable jusqu'à 2800 tr/min, à 2800 tr/min, le moteur devrait générer un couple de sortie maximal de 207 Nm, puis commencer à diminuer progressivement jusqu'à 10 Nm à la vitesse de 10000 tr/min.

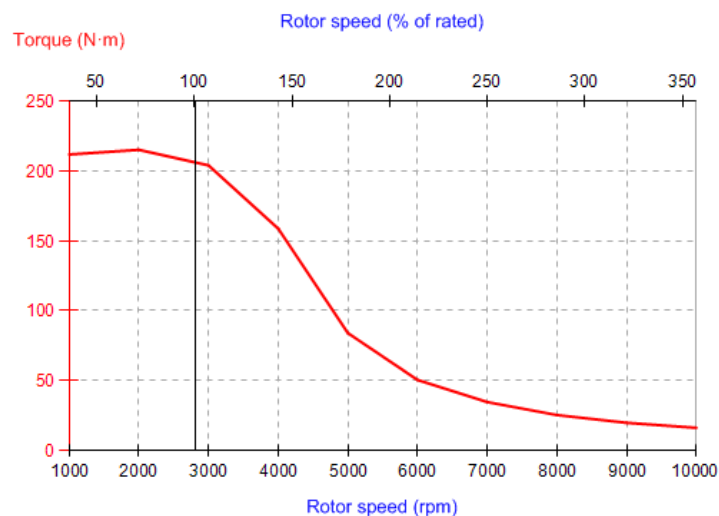


Figure II - 14 : Caractéristique couple _vitesse du moteur

II.7.4 Densité du flux dans l'entrefer :

La figure II.15 montre la caractéristique magnétique du flux en fonction du courant et de position du rotor, pour des positions variantes de 0 à 25° et des courants variantes de 0 à 400A par pas de 10A. Nous obtenons alors le réseau de courbes révélant les effets de la saturation.

La plus basse courbe correspond à la position non alignée et la courbe du haut correspond à la position alignée

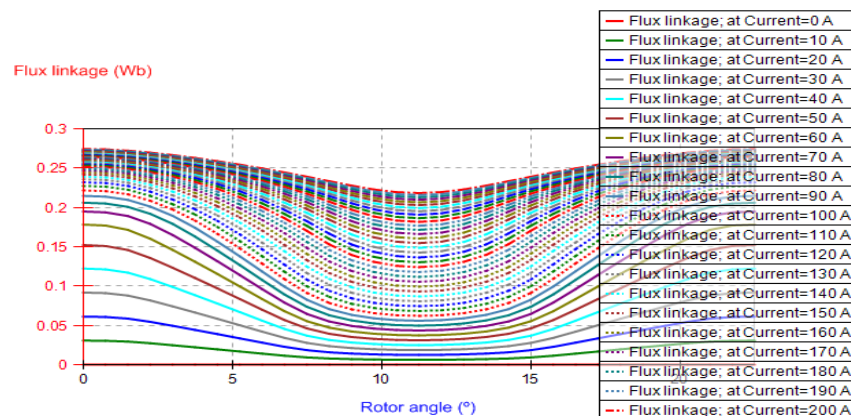


Figure II - 15 : Forme d'onde de la densité de flux dans l'entrefer

II.7.5 Caractéristiques électriques et mécaniques :

Avec MotorSolve, nous avons également pu extraire les propriétés et valeurs électriques et mécaniques du modèle utilisé dans ce travail sous forme de tableau, tels que le courant, le couple, la tension, le rendement, la puissance de sortie, etc., comme indiqué dans le tableau II.4

Tableau II - 4 : Paramètres nominales de la machine.

	Prototype Design 1
Torque (N·m)	208
Output power (kW)	60.9
Efficiency (%)	88.8
RMS voltage (V)	453
RMS current (A)	153

Notre moteur à réluctance variable permet de réaliser l'ensemble des propriétés mécaniques et électriques de sa contrepartie (MSAP), notre moteur est également de bon rendement de 89%.

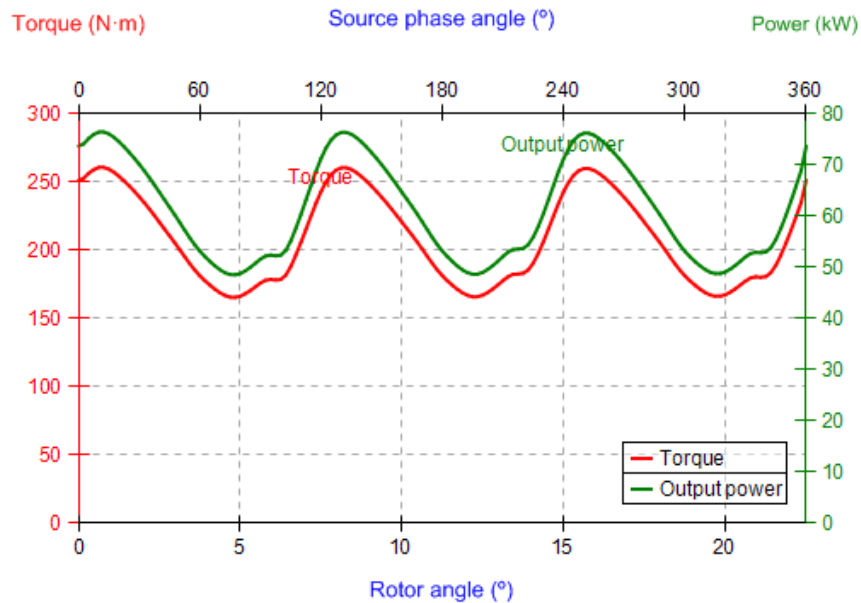


Figure II - 16 : le couple et la puissance de sortie générée par le MRV.

II.7.6 Les pertes :

Grâce au logiciel MotorSolve, nous avons pu calculer toutes les pertes du moteur, sur un tableau simple et précis indiquant les pertes de cuivre et de fer, y compris les pertes par hystérésis et courants de Foucault. etc.

Les pertes totales générées sont de 7.71 KW, le maximum des pertes était enregistré si les pertes dans le cuivre (pertes joule) en 6.25 KW (81,06%). Comme indiqué dans le tableau II.5.

Tableau II - 5 : Pertes principales générées par le moteur MRV

	Prototype Design 1
Loss - Total (kW)	7.71
Loss - Winding (kW)	6.25
Loss - Stator back iron hysteresis (kW)	0.229
Loss - Stator back iron eddy current (kW)	0.258
Loss - Stator teeth hysteresis (kW)	0.295
Loss - Stator teeth eddy current (kW)	0.26
Loss - Rotor back iron hysteresis (kW)	0.069
Loss - Rotor back iron eddy current (kW)	0.0689
Loss - Rotor teeth hysteresis (kW)	0.134
Loss - Rotor teeth eddy current (kW)	0.147
Loss - Friction (kW)	0
Loss - Windage (kW)	0
Loss - Stray (kW)	0

II.8 Conclusion :

La conception de la MRV se fait par le logiciel motorsolve. Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de Maxwell afin de déterminer les caractéristiques électromagnétiques en régime statique à dimensions données. Les résultats obtenus donnent des informations sur la forme de l'inductance et le couple ainsi que la forme du flux.

Ces résultats seront utilisés avec les équations électriques et l'équation mécanique de la MRV pour élaborer un modèle dynamique de simulation. Cette simulation sera donnée dans les chapitre suivant pour le modèle non linéaire

CHAPITRE III :
REGLAGE DE LA VITESSE DE LA
MACHINE MRV PAR LOGIQUE FLOUE

III.1 Introduction

Les industrielles automobiles s'intéressent aujourd'hui de plus en plus à la machine à réluctance variable pour ses avantages évoqués dans le chapitre I, de même, nous avons aussi cité dans le chapitre ses inconvénients, à savoir l'ondulation du couple et le bruit acoustique. Néanmoins, ces derniers peuvent être réduits, voire éliminés soit par l'optimisation de la conception, soit par la commande ou soit par les deux. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la commande par logique floue de la machine à réluctance variable dédiée à la traction électrique. Étant donné, que le modèle de la machine est fortement non linéaire, la commande linéaire n'est pas suffisante pour assurer de bonnes performances en boucle fermée. Pour cette raison, nous allons concevoir d'autre type de commande qui prennent en compte la non linéarité du modèle.

Dans la première partie de ce chapitre, le modèle non linéaire du moteur est simulé par l'utilisation des tableaux « *look up table* », disponible dans la catégorie non-linéaire de MATLAB/SIMULINK, ensuite, nous passons à la commande de la machine.

Plusieurs stratégies de commande existent dans la littérature telle que la régulation à base de la logique floue et la régulation PI. Dans ce chapitre, la régulation à base de la logique floue est choisie pour régler la vitesse du moteur à réluctance variable. Finalement, nous appliquons le cycle de conduite européen (NEDC) au moteur pour garantir l'efficacité de fonctionnement du véhicule dans la route.

III.2 Simulation du modèle non linéaire de la MRV sous MATLAB/Simulink

La machine à reluctance variable peut être modélisée dans Simulink comme une combinaison entre un système électromagnétique et un autre système mécanique ; il existe deux types de simulation selon que le modèle est linéaire ou non-linéaire.

III.2.1 Modèle non linéaire de la MRV :

La caractéristique magnétique non-linéaire $B = f(H)$ est considérée dans le modèle du moteur. La meilleure solution qui permet d'aboutir à une bonne simulation d'une machine à réluctance variable réside dans l'utilisation d'une méthodologie qui permet de prendre en compte la non-linéarité de sa caractéristique magnétique en minimisant le temps de simulation. La procédure que nous avons adoptée avec MATLAB/SIMULINK consiste à utiliser des tableaux « *look up table* » avec interpolation des relations flux / courant/position et courant/couple /position.[8]

Dans le chapitre précédent, notre machine MRV 24/16 a été modélisée en magnétostatique 2D par éléments finis avec le logiciel Motorsolve ; ce dernier nous a fourni ses différentes données magnétiques pour la réalisation des tableaux « *look-up-table* ».

La figure (III.1), montre le schéma de la phase 1. Elle montre deux tableaux « *look-up-table* » : flux/position/courant (tableau du courant) et courant/position/couple (tableau du couple). Le tableau « *look-up* » donnant le courant de la phase I qui trouvé par une interpolation entre le vecteur du flux et le vecteur de position du rotor et le couple par interpolation entre le vecteur du courant et la position. Les blocs correspondant aux phases 2 et 3 sont similaires à la phase 1.

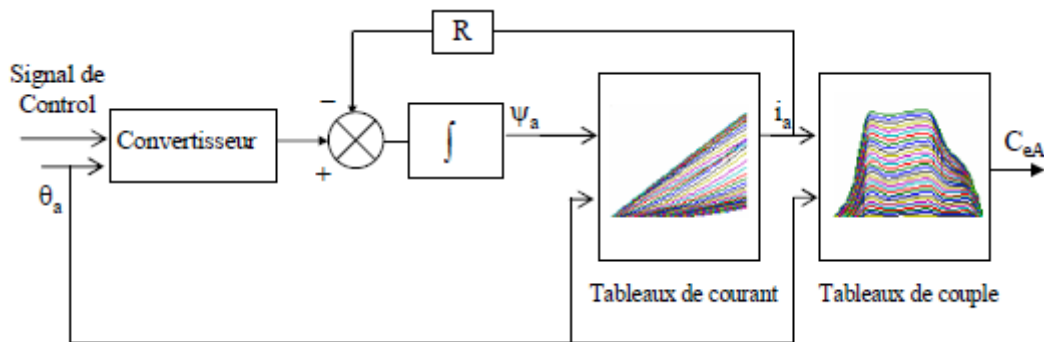


Figure III - 1: Diagramme de simulation de MRV par phase (model on linéaire)

III.2.2 Alimentation de la Machine à Réductance Variable :

La conception de la machine à réductance variable est indissociable de leur convertisseur. En effet, les exigences imposées à la puissance pour l'application de traction électrique sont souvent celles de la simplicité et de la réduction des coûts tout en maintenant les critères de performance, du couple et de vitesse. Il existe plusieurs topologies de convertisseurs destinés à l'alimentation des MRVs. Nous détaillerons le convertisseur à demi-pont asymétriques dans cette section.

➤ **Convertisseur à demi-pont asymétrique :**

Le convertisseur le plus utilisé pour l'alimentation du moteur à réductance variable est le convertisseur en demi-pont asymétrique Figure (III.2). Un bras de convertisseur est formé par deux commutateurs semi-conducteurs et deux diodes de roue libre. L'avantage majeur de ce convertisseur est le contrôle indépendant des phases du moteur et qu'il offre une protection du bobinage du moteur entre les deux composants semi-conducteurs.

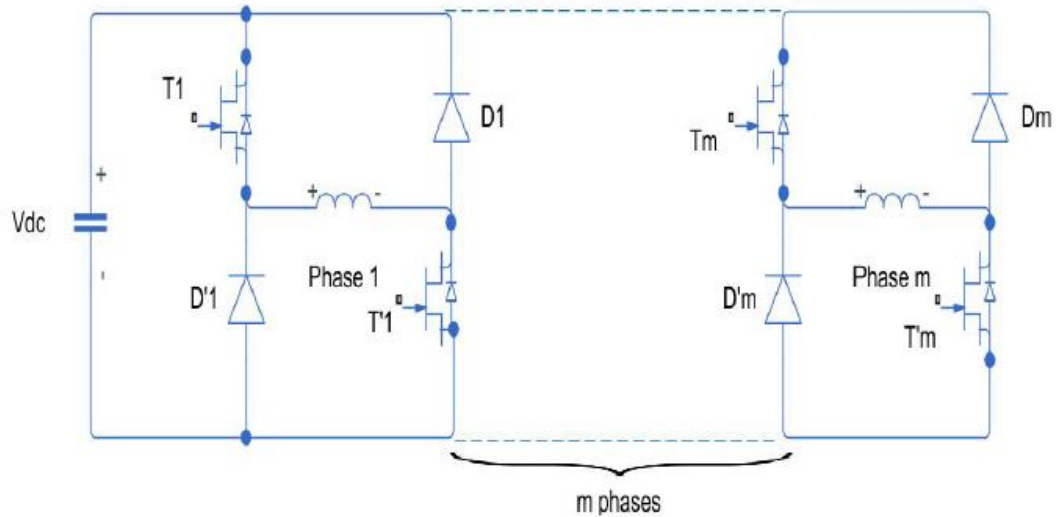


Figure III - 2: Schéma de la structure générale du convertisseur à demi-pont asymétrique

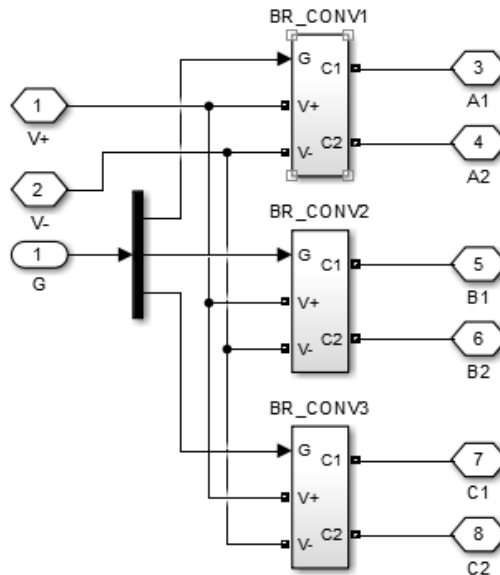


Figure III - 3: Schéma de simulation des trois bras de convertisseur

Le fonctionnement d'un seul bras du convertisseur est décrit dans le tableau suivant :

Tableau III - 1 : Commutation des IGBT

Cas	IGBT	IGBT1	Tension de la phase
1	passant	passant	+V _{dc} (phase de magnétisation)
2	Bloqué	passant	0 (phase de roue libre)
3	passant	Bloqué	0 (phase de roue libre)
4	Bloqué	Bloqué	-V _{dc} (phase de démagnétisation)

III.2.3 Schéma bloc de simulation du modèle non-linéaire de la MRV :

La tâche la plus difficile dans la simulation du modèle non linéaire est la construction des tableaux « *look-up-tables* ». En effet, les résultats obtenus par Motorsolve concernent les caractéristiques du flux en fonction du courant et de la position du rotor, mais dans notre modèle, les entrées du « *look-up-table* » sont le flux et la position du rotor et le courant comme sortie, donc il faut trouver une relation opposée du courant en fonction du flux et de la position du rotor. Cela est effectué par les instructions « *linspace* » et « *interpole* ». La simulation est réalisée en utilisant des blocs MATLAB / SIMULINK comme indiqué dans les figures (III.4, III.5, III.6 et III.7)

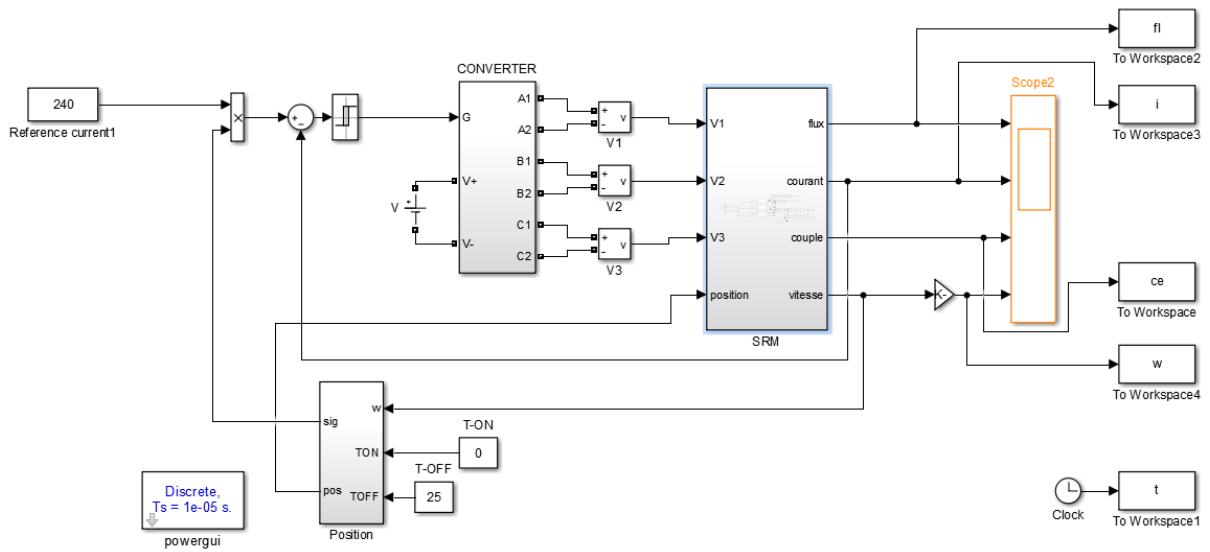


Figure III - 4: Schéma bloc de simulation du modèle non linéaire de la MRV.

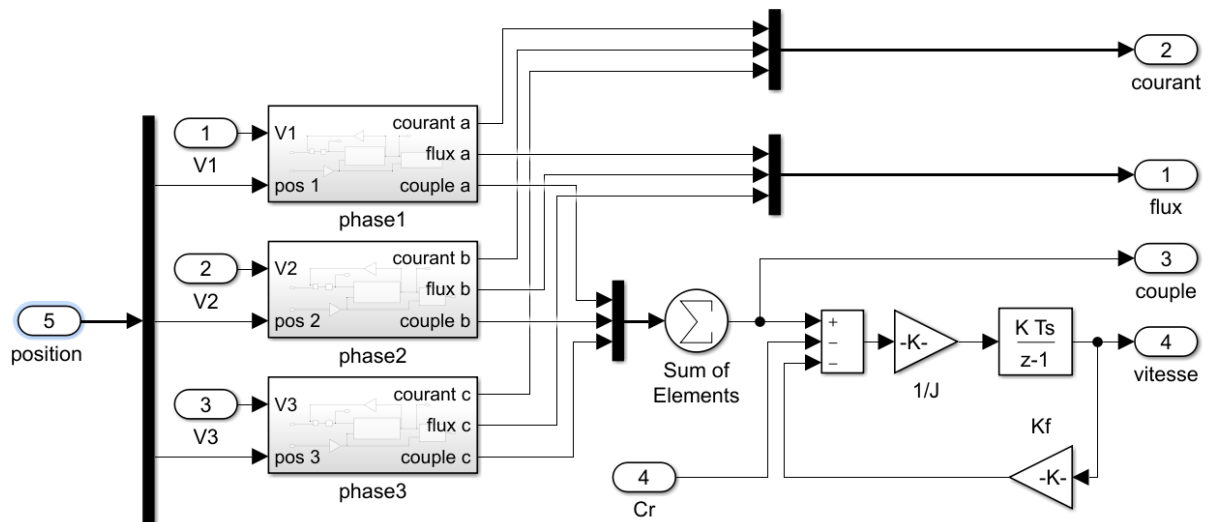


Figure III - 5: Schéma bloc des trois phases du moteur MRV 24_16

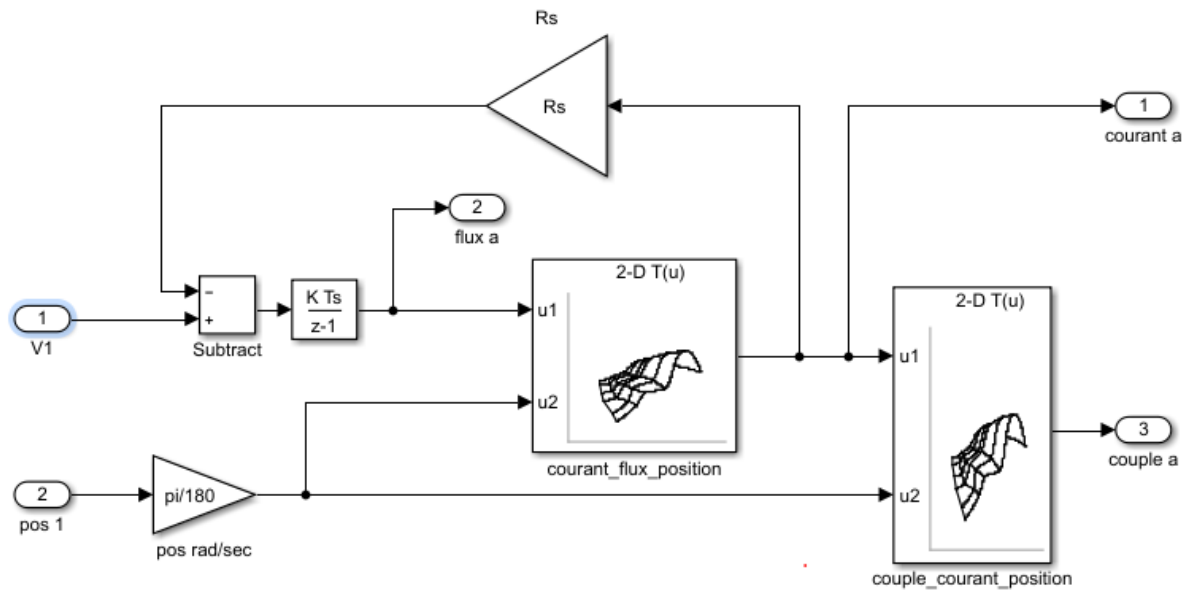


Figure III - 6: Schéma bloc de simulation de la phase 1

Le flux dans le moteur à réluctance variable n'est pas constant mais doit être établi commençant par zéro dans chaque pas. Le processus est contrôlé en appliquant la tension d'alimentation sur l'angle θ_{on} , et en l'éteignant à l'angle de la commutation θ_{off} , le schéma bloc d'application des angles θ_{on} et θ_{off} est donné par la figure III.7.

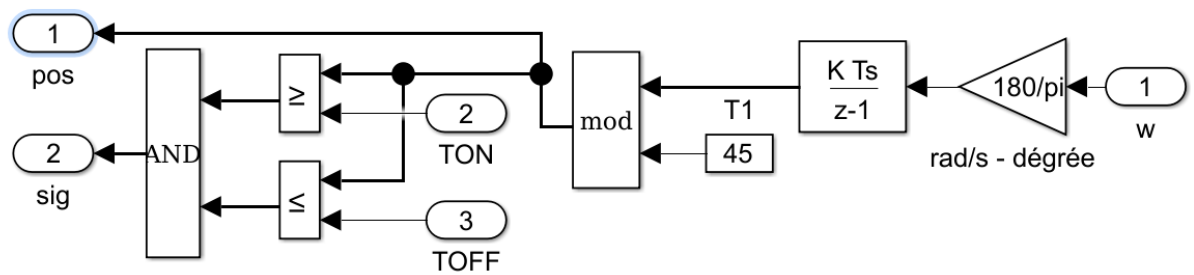


Figure III - 7: Schéma bloc d'application des angles θ_{on} et θ_{off}

III.2.4 Résultats de simulation :

a) Fonctionnement à vide :

Les résultats de simulation de fonctionnement à vide sont donnés dans les figures (III.8.9.10 et 11) pour $\theta_{on} = 0^\circ$, $\theta_{off} = 25^\circ$ et $I_{ref} = 240A$. On remarque que la vitesse atteint une valeur de 9600 tr/min, ce qui confirme les résultats obtenus à travers les caractéristiques de couple en fonction de vitesse dans le chapitre précédent. Nous utilisons dans le prochain une technique pour la minimisation des ondulations du couple.

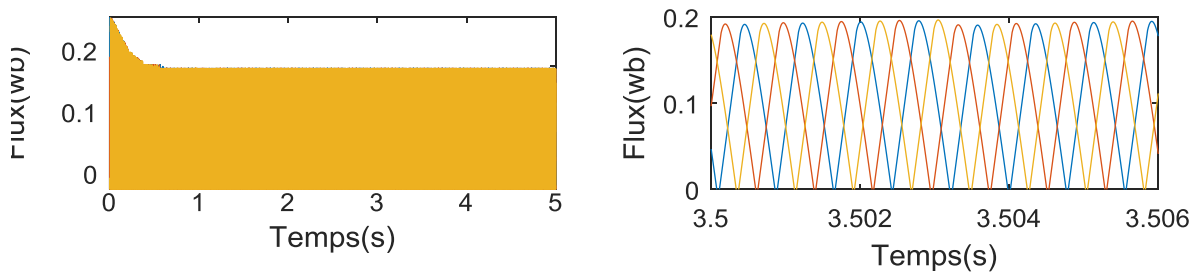


Figure III - 8: Flux magnétique des trois phases en fonction du temps

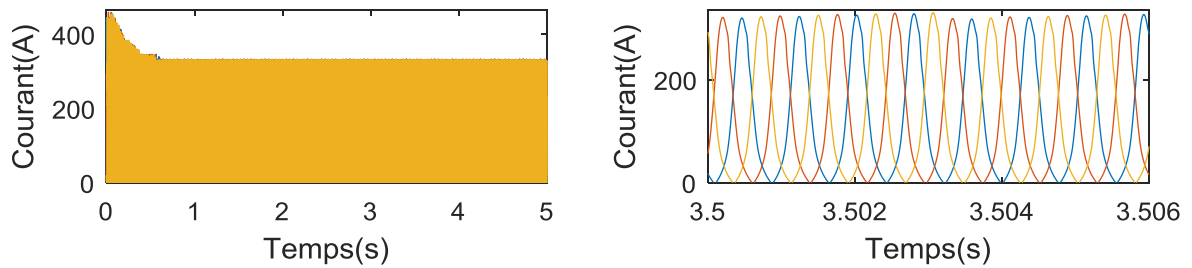


Figure III - 9: Courant des trois phases en fonction du temps

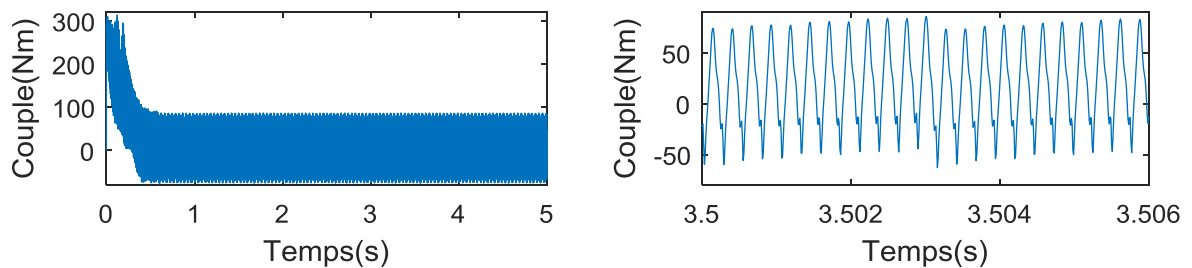


Figure III - 10: Couple électromagnétique total en fonction du temps

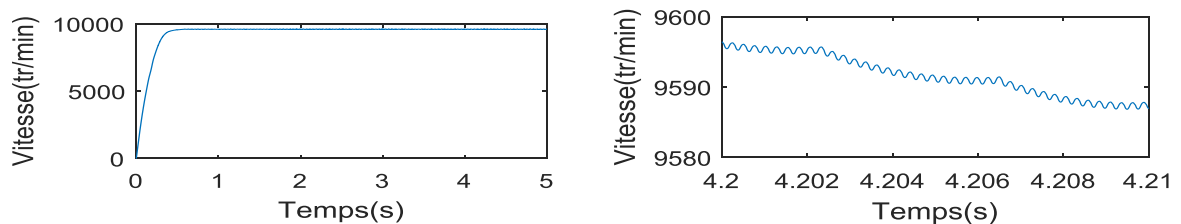


Figure III - 11: Vitesse de rotation en fonction du temps

a) Fonctionnement en charge :

Les résultats de simulation obtenus présentés sur les figures (III.12, III.13, III.14 et III.15) pour l'application d'une charge (couple résistant) de $C_r=207$ Nm. Dans ces résultats, on constate que la vitesse atteint une valeur de 2800 tr/min dans le cas en charge, ce qui confirme également les résultats obtenus à travers les caractéristiques de couple en fonction de vitesse, où à la charge nominale le moteur tourne à la vitesse nominale

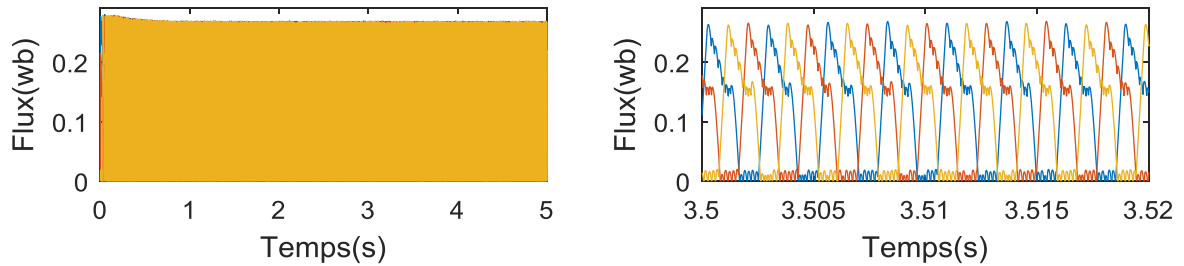


Figure III - 12: Flux magnétique des trois phases en fonction du temps

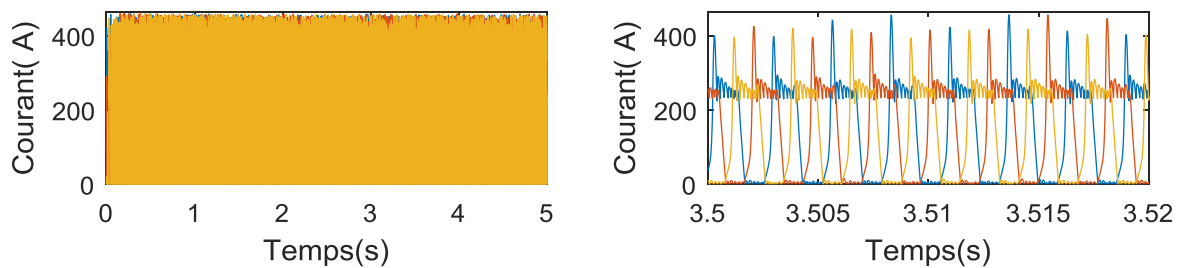


Figure III - 13: Courant des trois phases en fonction du temps

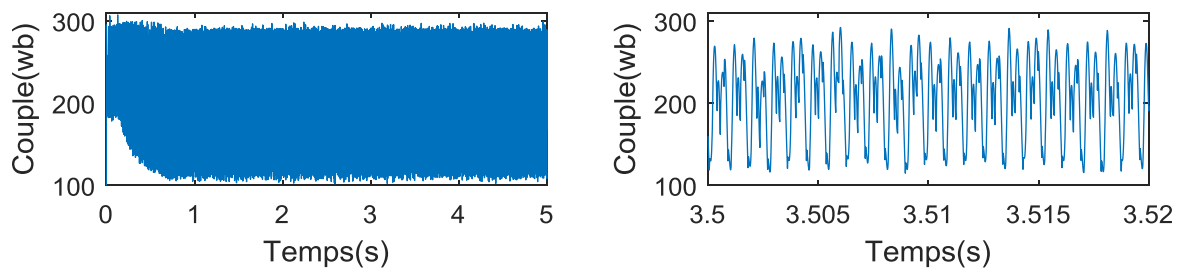


Figure III - 14: Couple électromagnétique total en fonction du temps

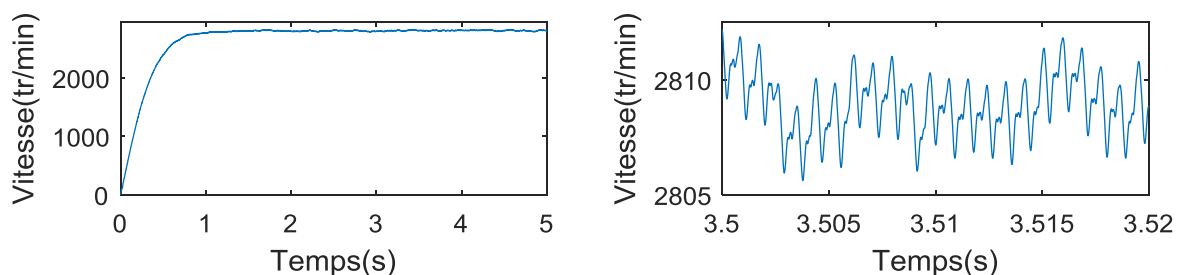


Figure III - 15: Vitesse de rotation en fonction du temps

III.3 Commande du moteur MRV 24_16

III.3.1 Application du contrôleur flou au réglage de la vitesse :

Dans cette partie, nous intéressons à la mise en place d'un contrôleur flou pour contrôler la vitesse du MRV avec minimisation de l'ondulation du couple. Le contrôleur de courant utilisé dans ce travail est le contrôleur à hystérésis, puisqu'il est suffisant pour contrôler les courants des phases. [19]

Le schéma fonctionnel de réglage par logique floue de la MRV est donné sur la figure III.16. Le schéma de commande se compose de deux boucles de réglage en boucle fermée, l'un est une boucle externe de contrôle de vitesse par le contrôleur flou et l'autre est une boucle interne de contrôle du courant par hystérésis. Le régulateur par logique de la vitesse produit le courant de référence qui dépend de l'erreur entre la vitesse du rotor et la vitesse de référence.

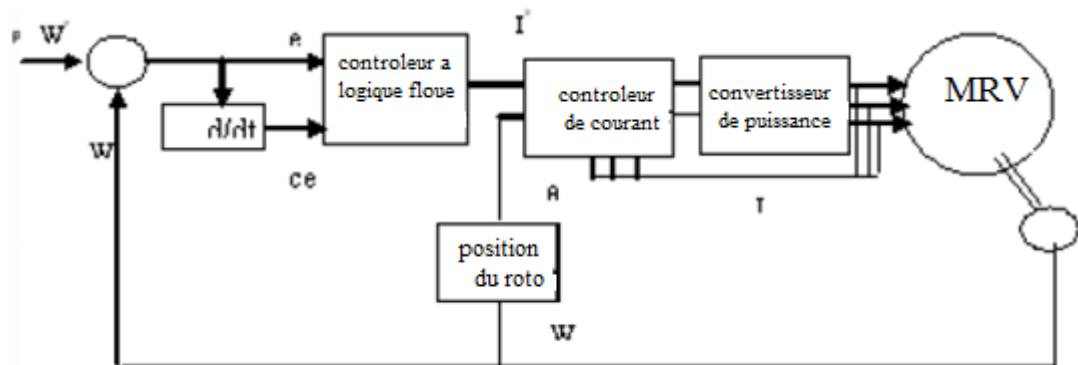


Figure III - 16: Schéma fonctionnel de la régulation floue de la MRV

III.3.2 Structure du contrôleur flou :

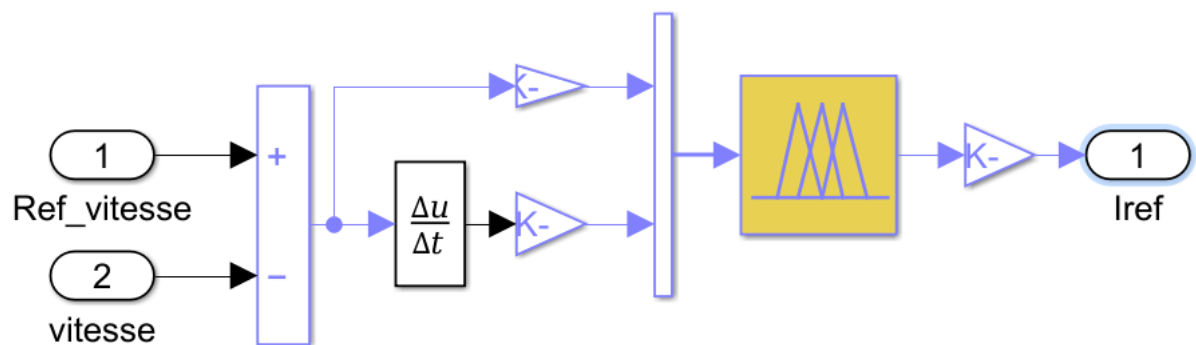


Figure III - 17: Schéma-bloc de contrôleur flou de la vitesse (FLC)

- Les variables d'entrée dont les fonctions d'appartenance des ensembles flous sont triangulaires et trapézoïdales.
- Les entrées sont l'erreur et la variation de l'erreur notées respectivement E_ω et ΔE_ω
- La sortie est le courant de référence I_{ref}

Les entrées E_ω et ΔE_ω sont standardisés dans un univers $[-1 \times 10^5, 1 \times 10^5]$ voir la fig.III.18

Et le sortie I_{ref} est standardisé dans un univers de discours $[-30,30]$ voir la fig.III.19

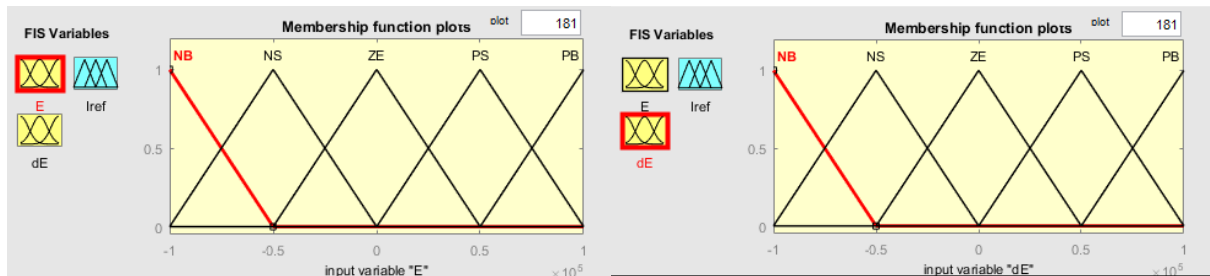


Figure III - 18: Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée E_ω et $[\Delta E]_\omega$

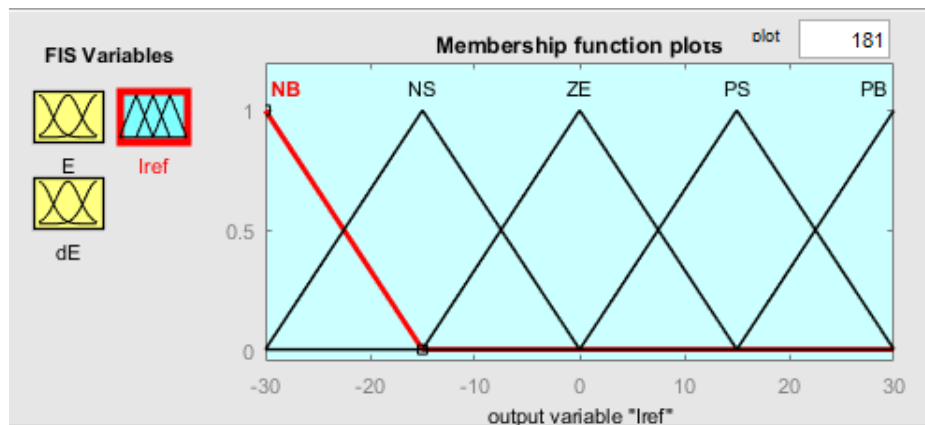


Figure III - 19: Fonctions d'appartenances de la sortie

Les règles floues, qui permettent de déterminer la variable de sortie du régulateur en fonction des variables d'entrée, sont déduites de la table Mac-Vicar. Dans ce cas, il a 25 règles comme indiquées dans le tableau d'inférence ci-dessous dans le tableau III.2. L'intervalle pour chaque variante linguistique est divisé en cinq classes. À chacune des catégories on associe la fonction d'appartenance. Sur la base du fonctionnement du contrôleur, les règles d'inférence floue suivantes sont déduites.

Tableau III - 2: Règles d'inférence floue

E \ dE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

III.3.3 Schéma bloc de réglage de la vitesse par contrôleur flou :

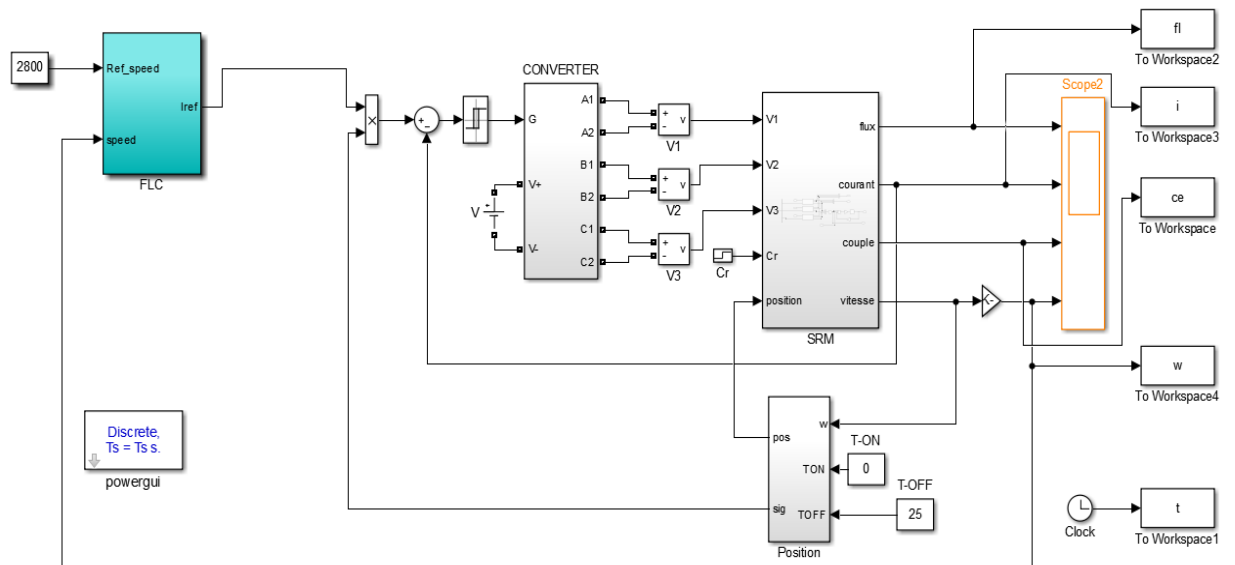


Figure III - 20: Schéma bloc de simulation de réglage de la vitesse par contrôleur flou (FLC)

III.3.4 Résultats de simulation de l'inversion de sens de rotation

Pour réaliser ce test on introduit une inversion de sens de rotation du moteur de $\Omega_{ref}=2800$ (tr/min) à $\Omega_{ref}=-2800$ (tr/min) à l'instant $t=2.5$ s. Les figures (III.21, III.22, III.23 et III.24) montrent que les grandeurs telles que la vitesse, le couple, les flux et les courants sont influencées par cette variation. On constate également que le couple et la vitesse suit sa consigne et l'inversion de sens de rotation, donc on peut dire que la robustesse de cette commande est garantie vis-à-vis de ce fonctionnement.

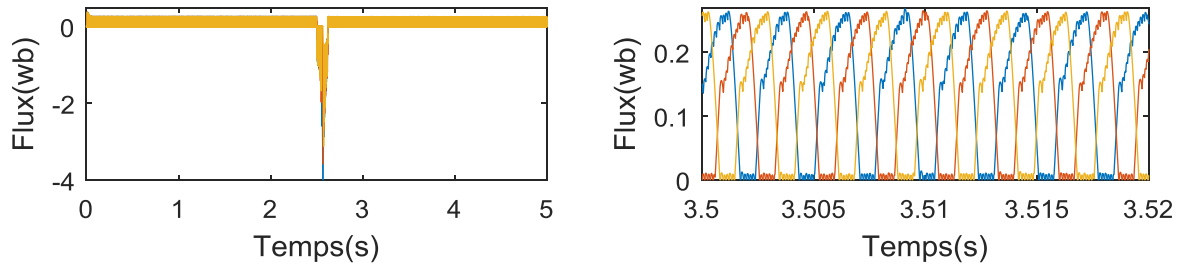


Figure III - 21: Flux magnétique en fonction du temps

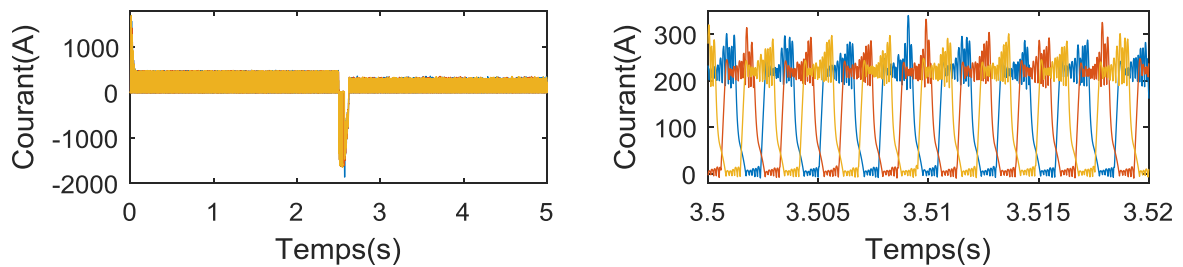


Figure III - 22: Courant des phases en fonction du temps

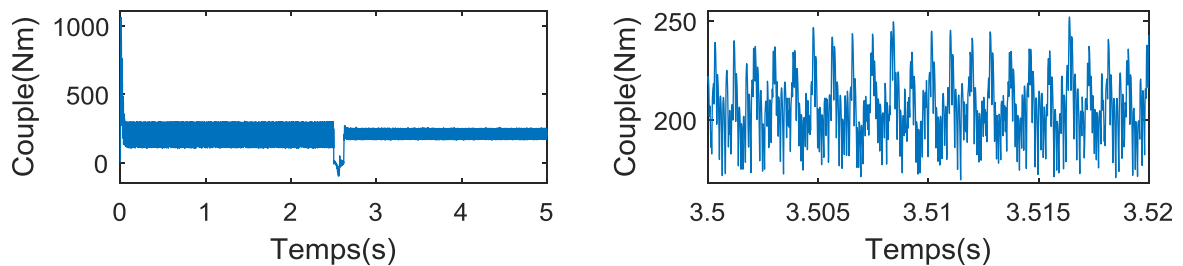


Figure III - 23: Couple en fonction du temps

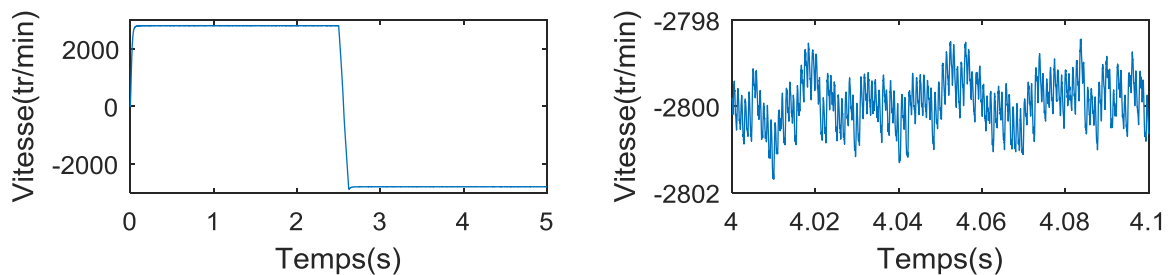


Figure III - 24: Vitesse de rotation en fonction du temps

L'ondulation de couple des moteurs à réluctance variable est divisée en deux parties, la première partie est liée à la forme d'onde de couple monophasée et la seconde partie est liée à la région de commutation (θ_{on} , θ_{off}). Dans ce travail, en changeant les angles de l'excitation de chaque phase du moteur, afin d'avoir une ondulation de couple plus faible.

La réduction des ondulations du couple dans les moteurs se fait soit en construisant un moteur optimal en appliquant des techniques d'optimisation dans la procédure de conception, soit en améliorant la technique de commande, ce que nous avons fait dans ce travail.

La figure III.25 montre le couple électromagnétique total avant et après la minimisation d'ondulation du couple du moteur. On remarque une réduction sensible de l'ondulation de couple, son pourcentage est atteint 35.3 %.

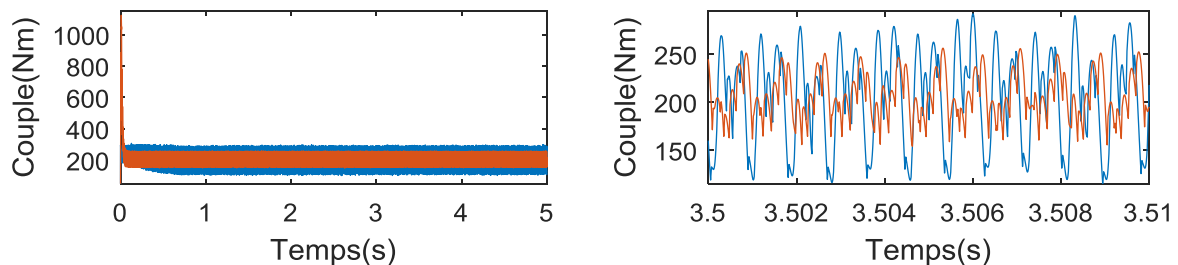


Figure III - 25: Couple électromagnétique total avant et après l'amélioration

III.4 Cycle de conduite

Le cycle de conduite, présenté sur la figure III.26, c'est le nouveau cycle européen de conduite (NEDC New European Driving Cycle). Il constitue un parcours mixte incluant quatre parties consécutives de cycle de conduite urbain (UDC : Urbain Drive Cycle), c'est un parcours idéal d'un véhicule dans un environnement urbain (de 0 à 800 s) avec des arrêts et des démarrages fréquents, suivis d'un segment du cycle de conduite extra urbain (EUDC : Extra Urbain Drive Cycle), qui présente un parcours parfait d'un véhicule dans un environnement suburbain (de 800 à 1200 s) avec des vitesses plus importantes et plus soutenues.[19]

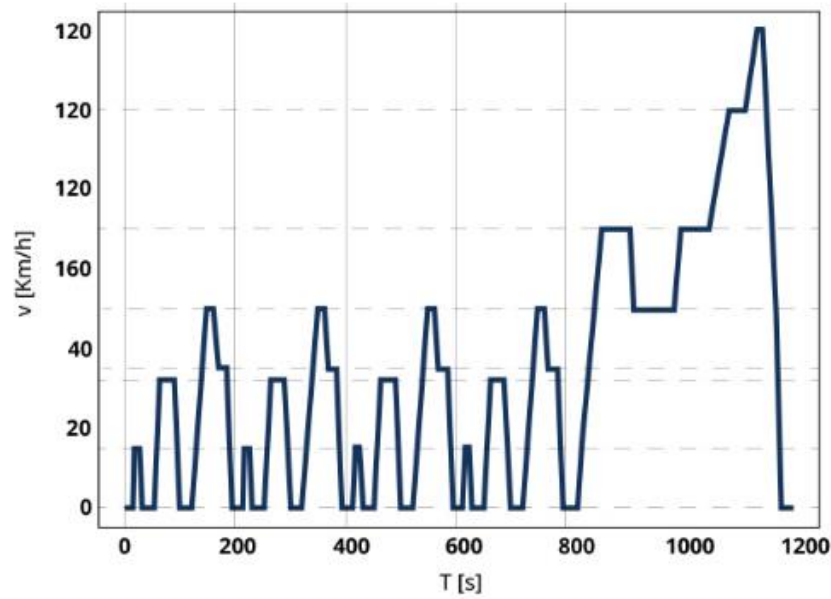


Figure III - 26: Cycle européen de conduite NEDC

III.4.1 Résultats de la simulation :

Nous appliquons le profil de vitesse de référence pour un véhicule suivant un cycle représenté sur la Figure III.27 à l'aide de bloc « *signal Builder* ». Il convient de noter que la simulation a été effectuée selon quatre demandes de vitesses sous une forme trapézoïdale (500 tr/min, 1900 tr/min, 2800 tr/min et 2400 tr/min). Ce cycle de conduite est très utile pour tester les performances du véhicule électrique dans les différents phases (urbain, routier et autoroutier, etc...). On remarque que la variation de la pédale d'accélération suit parfaitement le changement du profil de la route, ce qui permet d'améliorer les performances énergétiques du véhicule

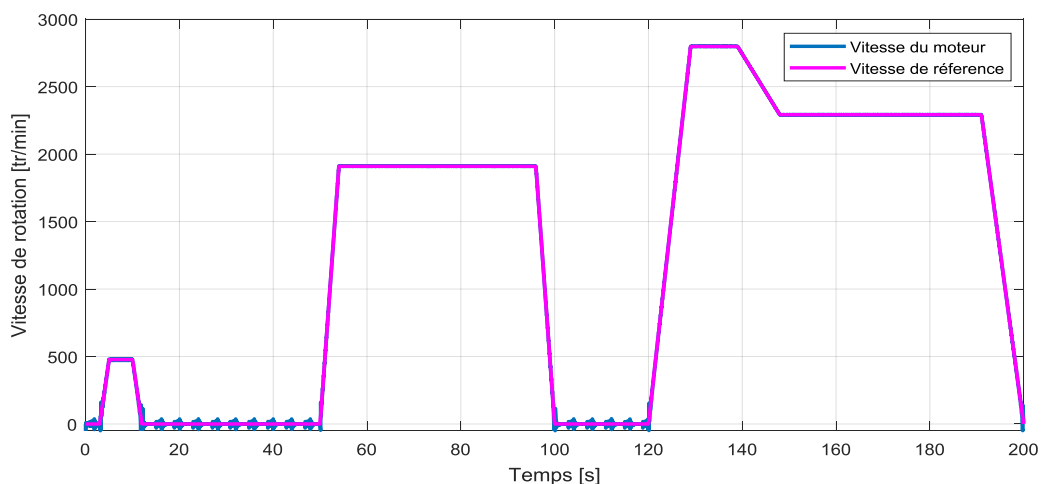


Figure III - 27: Vitesse de rotation du moteur en (tr/min)

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la description et la discussion détaillée de la simulation de modèle non-linéaire de la MRV. La régulation de la vitesse est effectuée à travers l'utilisation du régulateur flou et on a appliqué une stratégie de commande à hystérésis pour les courants. Les résultats obtenus sont acceptable.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, un moteur MRV a été conçu et utilisé comme moteur de traction dans une application de véhicule électrique hybride dans Toyota Prius 2010. Les performances de son moteur, telles que le profil couple-vitesse et le rendement, sont analysées. La géométrie du moteur et ses principaux paramètres sont introduits. Ce mémoire propose également un MRV 24/16 pour obtenir le même profil couple-vitesse que le moteur MSAP de traction de la Prius 2010. Le diamètre extérieur du stator et la longueur axiale sont utilisés comme contraintes géométriques pour le MRV 24/16. Le processus de conception et les plages des principaux paramètres géométriques du MRV sont également abordés dans ce mémoire.

Dans le deuxième chapitre, la conception d'un MRV 24/16 de 60 kW est présentée. Le moteur est destiné à remplacer le moteur synchrone de traction à aimants permanents utilisé dans le groupe motopropulseur HEV de la Toyota Prius 2010, ce qui est vérifié dans ce chapitre par le biais des résultats des éléments finis par le logiciel MotorSolve. Le profil couple-vitesse du MRV correspond à celui de MSAP utilisé dans la Toyota Prius 2010. Le MRV a un rendement compétitif sur toute la plage de fonctionnement par rapport au moteur MSAP de Prius Toyota 2010.

Dans un troisième chapitre, on a exposé les résultats de simulation de la machine à réluctance variable MRV 24_16 commandée par un contrôleur flou. L'ondulation du couple est minimisée par une technique qui basée sur le changement des angles de décalage des courants. D'après ces résultats, on peut conclure que le contrôleur à logique floue, stabilise la vitesse assez rapidement, avec une réponse douce et améliore le comportement dynamique du moteur, cette réponse est sans dépassement, conduisant ainsi à de meilleures performances et une plus grande robustesse, qui permettent de compenser les non linéarités du moteur et de réduire les ondulations de couple

Comme perspectives de ce présent travail, on propose :

- L'optimisation du dimensionnement de la MRV avec Motorsolve (en optimisant les arcs polaires du stator et du rotor avec le logiciel d'optimisation OptiNet intégré au Motorsolve) afin de minimiser les ondulations du couple.
- Amélioration de la qualité du couple du MRV en utilisant une autre méthode de contrôle, par exemple, la fonction de partage de couple.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Yakoub Saadi, « Stratégies de contrôle et analyse des défauts d'une Machine à Réductance Variable pour une chaîne de traction électrique ». Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, France, le 08 juillet 2019
- [2] Boulebtina Aziza, Meghaichi Leila, « Commande optimale pour la réduction des vibrations et bruit dans les machines à réductance variable utilisées dans les véhicules électriques » Mémoire du master en machines électriques, Université de Jijel, novembre 2020.
- [3] Boucha Abdellah, « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué », Thèse de magister en automatique, université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 19-10-2015
- [4] Slah Farhani, « Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques ». Thèse de doctorat, Université de Tunis, 2019
- [5] Harun Turker. «Véhicules électriques Hybrides Rechargeables : évaluation des Impacts sur le Réseau électrique et Stratégies Optimales de recharge». Sciences de l'ingénieur, Université de Grenoble, France, 2012.
- [6] Gharbi Henni, « Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride ». Thèse de magister en électrotechnique, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2015.
- [7] Grégory Rousseau «Véhicule hybride et commande optimale». École National Supérieure des Mines de Paris, France, 2008.
- [8] Lazreg Mohamed Oussama, « étude d'un véhicule hybride photovoltaïque biodiesel» Mémoire d'Ingénieur, école supérieure en sciences appliquées, Université de Tlemcen, le 09/2020
- [9] Mert Mokukcu, « Optimisation énergétique d'un véhicule hybride ». Université Parissaclay, France, 2018.
- [10] Mohamed Chakir, « Conception et optimisation de la performance d'une génératrice à Réductance Variable » pour l'obtention du grade de Maître es Sciences UNIVERSITÉ LAVAL, France en 2010
- [11] Guidoum Fatima, et Didi Hiba, « Modélisation d'une machine à réductance variable de type « 6/4 » par la méthode numérique des éléments finis » Mémoire du master, Université Larbi Ben M'hidi Oum EL Bouaghi, 2009.
- [12] Rabah Redjem, « Modélisation et Optimisation d'une Structure de Machine à Réductance Variable Dédiée aux Energies Renouvelables » Thèse de doctorat, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2010
- [13] Abid Mohammed, et Ben Amor Fathi « étude d'une génératrice à Réductance Variable » Mémoire du master, Université d'EL-Oued, 2014
- [14] Sihem Mouellef, « Contribution à l'étude d'une machine à réductance variable : Conception, modélisation & simulation d'une MRVDS 6-4 ». Thèse de magister en électrotechnique, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008

Références bibliographiques

[15] Luc Moreau. « Modélisation, conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse ». Thèse de doctorat en énergie électrique, Université de Nantes, France, 2005.

[16] Savané Kissima et Mohamed Mokhtar Ould Amar « Etude d'une Machine à Réluctance Variable Supraconductrice ». Mémoire du master, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, 2018.

[17] Saoud Mohammed, Cherif et Benzina Sohaib « Conception et simulation d'un moteur asynchrone monophasé ». Mémoire du Master en électrotechnique industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.

[18] Guettaf Abd-Erazek, « Contribution à la conception de la machine à réluctance variable en vue de sa commande » Thèse de magister en électrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 2005.

[19] Banumathi S et Jeyapriya M, «Fuzzy logic based speed control technique for switched reluctance motor» journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences ISSN: 0974-2115 , 1: February 2017

[20] Mohamed Redha Rezoug, Djamel Taibi and Mahdi Benaouadj «State-of-charge Estimation of Lithium-ion Batteries Using Extended Kalman Filter » International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE), 2021.

ABSTRACT:

In this thesis, the design of a variable reluctance motor has been studied whose torque, power, speed range and efficiency values are competitive with those of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) used in the Toyota Prius 2010. The outer diameter and axial length are the same as those of the PMSM. A maximum torque of 207 N.m is required up to a speed of 2800 rpm. A power of 60 kW is required in the speed range from 2800 to 10000 rpm. At rated speed, the simulation results show that the output performance of the designed variable reluctance motor is greatly improved compared to that of the PMSM. A Fuzzy speed control is applied to the motor to control the speed of the motor with the use of technology to reduce torque ripples.

RESUME :

Dans ce mémoire, la conception d'un moteur à réluctance variable a été étudiée dont les valeurs de couple, de puissance, de plage de vitesse et de rendement sont compétitives avec celles du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) utilisé dans la Toyota Prius 2010. Un couple maximal de 207 N.m est requis jusqu'à une vitesse de 2800 tr/min. Une puissance de 60 kW est nécessaire dans la plage de vitesse de 2800 à 10000 tr/min. À vitesse nominale, les résultats de la simulation montrent que les performances du moteur à réluctance variable conçu sont grandement améliorées par rapport à celles du PMSM. Un contrôle flou de vitesse est appliqué au moteur pour contrôler la vitesse du moteur avec l'utilisation d'une technique pour réduire les ondulations de couple.

ملخص:

في هذه المذكرة، تمت دراسة تصميم محرك ممانعة متغيرة له قيم عزم وقوة ونطاق سرعة وكفاءة منافسة لتلك الخاصة بالمحرك المتزامن ذو المغناطيس الدائم (MSAP) المستخدم في تويوتا بريوس 2010. القطر الخارجي والطول المحوري هما نفسهما في MSAP. والمطلوب عزم أقصى قدره 207 نيوتن متر عند السرعة الاسمية 2800 لفة / دقيقة وكذا قدرة خرج 60 كيلو واط في نطاق السرعة من 2800 إلى 10000 دورة / دقيقة. يتضح أنه يمكن تلبية المتطلبات المذكورة أعلاه بواسطة المحرك ذو الممانعة المتغيرة المصمم، عند السرعة الاسمية، تظهر نتائج المحاكاة أن ناتج المحرك المصمم قد تم تحسينه بشكل كبير فيما يتعلق بإخراج MSAP. يتم تطبيق التحكم في السرعة بواسطة معدل المنطق الضبابي للتحكم في سرعة المحرك وكذا استخدام تقنية لتقليل تموجات عزم الدوران .