



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi - Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم الإلكتروميكانيك
Département Electromécanique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Commande et contrôle d'un véhicule électrique

Par

KATOUS Linda

Devant le jury :

SOUDANI Med Salah	MAA	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
RECHACH Abdelkrim	MCB	Encadreur	Université Larbi Tebessi Tébessa
ZAAMOUCHE Fares	MCA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa
FARES Nour-Eddine	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa

Promotion 2021-2022

Remerciements

Nos premiers mots de remerciement s'adressent au bon Dieu le tout puissant qui nous a doté de santé, volonté et patience pour achever ce travail ;

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre promoteur : Dr. Rechach Abdelkrim de l'Université Laarbi Tebessi– Tebessa, de nous avoir proposé ce sujet de master, de sa disponibilité, son suivi, ses orientations et ses conseils précieux ;

Nous tenons également à remercier les membres de Jury pour avoir accepté d'examiner ce travail ;

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants du cursus de master et qui par leurs compétences et leurs savoir m'ont soutenu le long de mes années d'études ;

Enfin, Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère avec toute mon affection

A mon père avec toutes mes reconnaissances

A mes frères et mes sœurs

A ma famille

Et à mes amis

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Table des matières

	Introduction Générale	01
	Chapitre I - Historique, état de l'art et problématique	
I.1	Introduction	03
I.2-	Définition d'un véhicule électrique	05
I.3	Historique de véhicule électrique	06
I.4	Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique	08
I.5	Chaine de traction électrique	09
I.6	Classification du véhicule électrique	10
I.6.1	Véhicule tout électrique	10
I.6.2	Véhicule électrique à batterie rechargeable	10
I.6.3	Véhicules électriques a alimentation par pile à combustible	10
I.6.4	Véhicules hybrides	11
I.6.5	Véhicule hybride série	12
I.6.6	Véhicule hybride parallèle	13
I.6.7	Véhicule hybride combiné	13
I.7	L'électronique de puissance dans le véhicule électrique	14
I.7.1	Les redresseurs	14
I.7.2	Les hacheurs	15
I.7.3	Les onduleurs	15
I.8	Différentes configuration de véhicule électrique	16
I.8.1	Le véhicule électrique monomoteur	16
I.8.2	Les véhicules électrique multi moteur	17
I.9	Les batteries	17
I.9.1	Batterie au plomb	18
I.9.2	Batterie Nickel cadmium	19
I.9.3	Batterie Nickel-Métal hydrure	19
I.9.4	Batterie lithium –ion	19
I.9.5	Batterie tout solide	20
I.10	Durée de vie d'une batterie de véhicule électrique	21
I.10.1	Recyclage des batteries	21
I.10.2	Connexion du véhicule électrique	22

I.11	Principe de chargeur	22
I.11.1	Les modes de recharge	23
I.12	Le moteur électrique d'entraînement	25
I.12.1	Moteur a courant continue	26
I.12.2	Moteur a courant continue à aimant permanent	26
I.12.3	Machine asynchrones	26
I.12.4	Machine synchrones à aimant permanent	26
I.12.5	Moteur synchrone à inducteur bobine	27
I.12.6	Moteur à reluctance variable	27
I.13	Les avantages et les inconvénients des véhicules électriques	27
I.13.1	Avantages de véhicule électrique	27
I.13.2	Inconvénients de la voiture électrique	29
I.14	Conclusion	31

Chapitre II- Moteur à réluctance variable

II.1	Introduction	32
II.2	Le moteur a réluctance variable	32
II.3	Classification de MRV	34
II.4	Constitution	35
II.5	Structure de base d'un MRV	36
II.5	Mode de fonctionnement d'un moteur à reluctance variable	38
II.7	Types de moteur à reluctance variable	39
II.8	Topologie des MRV tournantes	42
II.8.1	MRV pure	43
II.8.2	MRV à effet vernier	44
II.8.3	MRV hybrides	45
II.9	Application de MRV	45
II.10	Avantage MRV	46
II.11	Inconvénient du MRV	46
II.12	Caractéristique couple vitesse	47
II.13	Energie/Co énergie et couple électromagnétique	48
II.14	L'équation électromagnétique d'un MRV	48
II.14.1	Equation générale du couple	49
II.15	Equation mécanique	49

II.16	Choix d'une structure d'étude	52
II.17	Alimentation MRV	53
II.18	Conclusion	55

Chapitre III- Commande et contrôle d'un MRV 6/4

III.1	Introduction	55
III.2	Configuration du MRV	55
III.3	Schéma de la commande du MRV6/4	56
III.3.1	Simulation de modèle MRV 6/4	56
III.3.2	Résultat de simulation	57
III.4	Problématique	60
III.5	Commande de convertisseur par hystérésis	61
III.6	Régulation de la vitesse avec un PI indirecte du couple	61
III.6.1	Commande classique par régulateur PI	62
III.6.2	Détermination de Kp et Ki	62
III.6.3	Résultat de simulation	61
III.7	Génération de vibration et de bruit dans la MRV	71
III.7.1	Les ondulations de couple	71
III.8	Première solution	74
III.8.1	Commande directe de couple (DTC)	76
III.8.2	Contrôle de flux et du couple électromagnétique	77
III.8.3	Principe de la DTC applique au MRV	79
III.8.4	Construire la table de commutation	79
III.8.5	Simulation des résultats du contrôle du MRV avec DTC	81
III.8.6	Résultat de simulation	86
III.9	Deuxième solution	86
III.9.1	Nouveau type de moteur IPMSynRM de TESLA	90
III.9.2	IPMSynRM de tesla model 3	93
III.9.2	Moteur a aimant permanent	95
III.9.2.2	Moteur SynRM	96
III.10	Analyse de couple du moteur IPMSynRM	99
III.11	Conclusion	101

Conclusion générale

Références bibliographiques

Référence

Liste des figures

Fig.I.1	Impacts environnementaux liés aux changements climatiques.	03
Fig.I.2	Principe des gaz à effet de serre.	04
Fig.I.3	Schéma d'une voiture électrique.	05
Fig.I.4	Thomas Parker assis dans une voiture électrique.	06
Fig.I.5	Première voiture électrique ' la jamais contente'.	06
Fig.I.6.	Les véhicules électriques en circulation en 2007.	07
Fig.I.7.	Schéma de fonctionnement d'un véhicule électrique.	08
Fig.I.8.	Schéma a,b) d'une chaîne de traction.	09
Fig.I.9.	Principe de fonctionnement de la pile à combustible.	11
Fig.I.10	Principe de véhicule hybride série.	12
Fig.I.11.	Principe véhicule hybride parallèle.	13
Fig.I.12	Principe du véhicule hybride combiné.	14
Fig.I.13	Principe de redresseur.	14
Fig.I.14.	Principe de hacheur.	15
Fig.I.15.	Principe des onduleurs.	16
Fig.I.16	Solution monomoteur.	16
Fig.I.17	Solution multi-moteurs.	17
Fig.I.18	Principe de fonctionnement de batterie au plomb.	18
Fig.I.19	Principe de fonctionnement de batterie Nickel-cadmium.	19
Fig.I.20	Principe de fonctionnement de batterie lithium-ion.	20
Fig.I.21	Principe de fonctionnement de batterie tout solide.	20
Fig.I.22	Schéma illustre le principe de chargeur.	23
Fig.I.23	Les Modes de chargements.	25
Fig.II.1	Moteur a reluctance variable.	33

Figure II.2	L'arbre généalogique de machines a courant alternatif.	35
Fig.II.3	Structure électromagnétique de la MRV6/4.	36
Fig.II.4	Machine à réluctance variable structure élémentaire.	37
Fig.II.5	Position d'opposition et de de conjonction.	37
Fig.II.6	Caractéristiques de la MRV en fonction de la position.	38
Fig.II7	Différentes Structures des MRV selon le nombre de dents.	41
Fig.II8	Structure du MRV et positions extrêmes de la dent du rotor.	41
FigII.9	Classification des MRV.	42
Fig.II.10	MRV pur à grosses dents.	43
Fig. II.11	MRV à effet Vernier.	44
Fig.II.12	MRV hybride.	45
Fig.II.13	Caractéristiques couple-vitesse.	47
Fig.II.14	Energie et Co-énergie électromagnétique	48
Fig.II.15	Variation du couple en fonction de la position rotorique.	52
Fig.II.16	Structure de choix de MRV.	53
Fig.II.17	Topologie du convertisseur asymétrique.	53
Fig.II.18	Les modes de fonctionnement d'un convertisseur asymétrique.	54
Fig.III.1	Schéma fonctionnel d'un schéma de contrôle MRV.	56
Fig.III.2	Modélisation Matlab Simulink de la configuration 6/4 SRM.	57
Fig.III.3	Résultat simulation de flux en fonction de temps.	57
Fig.III.4	Résultat simulation de courant en fonction de temps.	58
Fig.III.5	Résultat simulation de couple en fonction de temps.	58
Fig.III.6	Résultat simulation de vitesse en fonction de temps.	59
Fig.III.7	Schéma Bloc convertisseur.	59
Fig.III.8	Schéma Bloc bras de convertisseur.	60
Fig.III.9	Schéma de commande du convertisseur par hystérésis.	61
Fig.III.10	Block diagramme PI contrôleur.	62

Fig.III.11	les paramètres de régulateur PI.	65
Fig.III.12	Résultat de simulation avec vitesse 1000 rpm sans charge.	66
Fig.III.13	Résultat de simulation avec vitesse 1000 rpm avec charge.	67
Fig.III.14	Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm sans charge.	67
Fig.III.15	Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm avec charge.	68
Fig.III.16	Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm sans charge.	68
Fig.III.17	Résultat de simulation avec vitesse 3000 rpm avec charge.	69
Fig.III.18	MRV, forces et vibrations.	70
Fig.III.19	Schémas de la structure de base de la DTC.	72
Fig.III.20	Évolution de l'extrémité $\varphi_s(t)$.	74
Fig.III.21	Schéma fonctionnel du DTC.	77
Fig.III.22	Résultat de simulation la vitesse de MRV6/4 avec DTC.	78
Fig.III.23	Résultat de simulation la vitesse de MRV6/4 avec DTC.	78
Fig.III.24	Simulation de couple avec aucun contrôle.	79
Fig.III.25	Simulation de couple avec régulateur PI.	79
Fig.III.26	Moteur IPMSynRM.	80
Fig.III.27	Moteurs PM et attraction entre les deux champs magnétiques.	81
Fig.III.28	Un aimant permanent produit un champ magnétique combiné.	82
Fig.III.29	F.c.e.m induite	82
Fig.III.30	Rotor dans l'état de réluctance élevée.	83
Fig.III.31	Moteur IPM et moteur SynRM.	84
Fig.III.32	Le graphique de l'angle RMF est d'environ 50 degrés.	85
Fig.III.33	Affaiblissement du champ.	85

Liste des tableaux

Tab	Nomenclature	Page
Tab.I.1.	Avantages et les inconvénients des différents types de batteries	21
Tab.II.1.	Séquences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique	54
Tab.III.1	Temps de stabilisation de la vitesse sans et avec charge	69
Tab.III.2	Choix des vecteurs suivant les zones	76
Tab.III.3	Choix de vecteur de tension	77

Liste des symboles

R	Résistance d'une phase statorique
K	Coefficient du couple et de la force électromotrice
N_s	Dents au stator
N_r	Dents au rotor
W	La vitesse
T	Période
W_e, W_c	Energie et coénergie électromagnétiques
F	fréquence de rotation
Ω	vitesse angulaire de rotation
J	moment d'inertie du rotor
f	coefficient de frottement
T_L / C_{em}	couple de charge
θ_{on}	l'angle d'amorçage
θ_{off}	l'angle de blocage
V	La tension
I	Le courant
T_e	Couple électromagnétique
ω	Vitesse de rotation
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator
L	Inductance de la phase
ω	La pulsation propre
J	Coefficient d'amortissement
R	La reluctance magnétique
dl	Longueur élémentaire
s	Surface radiale par rapport aux passages des lignes de champ
μ	Perméabilité magnétique du matériau
φ	Le flux magnétique
φ_s	Le flux statorique
ξ	Coefficient d'amortissement
W_m	Puissance mécanique
W_f	L'énergie du champ magnétique

Résumé

Le moteur à réluctance variable a suscité l'intérêt des industriels et scientifiques contemporains, au vu de ses avantages bien nombreux tels que la simplicité du rotor, robustesse, ne comportant ni balais ni enroulements ni aimants permanents, large gamme de puissance, entraînement facile et notamment son usage spécial pour les véhicules électriques légers. Cependant, en raison de la forme saillante du rotor, le MRV est connu par les ondulations du couple produisant vibrations et du bruit acoustique. Pour résoudre ce problème afin de le choisir comme moteur de traction du véhicule électrique, nous proposons d'employer la technique de la commande directe du couple (DTC), donne de meilleurs résultats après les avoir comparés avec la commande par un simple PI sous environnement Matlab/Simulink ce qui a confirmé la prédominance du DTC.

Mots clés :

Machine à réluctance variable (MRV); Contrôle direct du couple (DTC) ; Régulateur proportionnel intégrateur (PI) ; Véhicule électrique (VE).

Abstract

The variable reluctance motor has aroused the interest of contemporary industrialists and scientists, in view of its many advantages such as the simplicity of the rotor, robustness, comprising neither brushes nor windings nor permanent magnets, wide power range, easy drive and in particular its special use for light electric vehicles. However, due to the protruding shape of the rotor, MRV is experienced by torque ripples producing vibrations and acoustic noise. To solve this problem in order to choose it as traction motor of the electric vehicle, we propose to use the technique of direct torque control (DTC), give better results after comparing them with some control by a simple PI under Matlab/Simulink environment which confirmed the predominance of DTC.

Keywords:

Switched Reluctance Motor (SRM); Direct Torque Control (DTC); Proportional integral (PI); Electric vehicles(EV)

ملخص

أثار محرك الممانعة المتغيرة اهتمام الصناعيين والعلماء المعاصرين، نظرًا لمزاياها العديدة مثل بساطة الدوار، المتانة، التي لا تحتوي على فرش ولا لفات ولا مغناطيس دائم، نطاق طاقة واسع، محرك سهل وخاصة استخدام للمركبات الكهربائية الخفيفة. ومع ذلك، نظرًا للشكل البارز للدوار، يتم اختبار MRV من خلال تموجات عزم الدوران التي تنتج الاهتزازات والضوضاء الصوتية. لحل هذه المشكلة من أجل اختياره كمحرك جر للسيارة الكهربائية، نقترح استخدام تقنية التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC)، وإعطاء نتائج أفضل بعد مقارنتها ببعض التحكم بواسطة PI بسيط تحت بيئة Matlab / Simulink التي أكد هيمنة DTC.

الكلمات المفتاحية :

الكلمات المفتاحية : محرك التردد المتغير (MRV)؛ التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) ؛ المتحكم التناسبي التكامل (PI)؛ السيارة الكهربائية (EV) .

Introduction générale

Le véhicule électrique connu dès 1890 a été utilisé jusqu'aux années trente, période à partir de laquelle le véhicule à moteur thermique prédomine en raison de son autonomie et de son prix. Depuis 1980, le nombre de véhicules thermiques polluants augmentent de façon importante. Des solutions de substitution ont toujours été envisagées pour les agglomérations urbaines dans les grandes villes.

Les constructeurs de véhicules, de batteries et de moteurs électriques, groupent actuellement leurs efforts de recherche, pour répondre aux cahiers de charges dressés par les différents services de l'environnement des états de la communauté européenne.

La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. Le développement des projets en matière de véhicule électrique peut s'expliquer tout d'abord par les objectifs environnementaux fixés dans les cadres mondiaux pour lutter contre le changement climatique, visant notamment à diminuer les émissions de CO₂. Par ailleurs, l'industrie automobile de cette époque est en crise mondiale et a besoin d'être renouvelée. La voiture électrique apparaît alors comme un levier de relance et de modernisation. Enfin, la maturité technologique de la batterie Lithium-ion ouvre des perspectives pour le développement à grande échelle du véhicule électrique. Jusqu'à présent, le frein essentiel au développement du véhicule électrique était la batterie dont la capacité était insuffisante [45].

Ce travail consiste à la modélisation, commande, régulation et simulation d'un moteur à réluctance variable afin de mieux l'utiliser comme moteur d'entraînement de choix pour les véhicules électriques. Ce travail est réparti en trois chapitres :

- Le premier chapitre est réservé aux généralités sur le véhicule électrique. Nous commencerons par un état de l'art et nous évoquerons ses différentes architectures et expliquerons son fonctionnement.
- Au deuxième chapitre, nous présenterons des notions de base sur les machines à réluctance variable, leur modélisation et principe de fonctionnement. Nous mettrons aussi en évidence l'optimisation de la commande de la machine à réluctance variable (MRV) qui est désormais un sujet de recherche d'actualité.
- Dans le troisième chapitre nous proposerons des résolutions au problème des ondulations du couple qui est compté pratiquement comme le seul inconvénient des MRV

réduisant les pertes et freinant pour en faire le moteur du premier choix en face d'innombrables avantages qui le rehausse aux catégories des moteurs les plus convoités. Vu la forte non linéarité du fonctionnement du MRV, la régulation par un simple PI ne nous avancera pas à grand-chose, pour cette raison, nous proposerons la commande directe du couple (DTC) du MRV 6/4 qui lui semble être bien adapté. Dans ce chapitre, nous présenterons la commande, la régulation et la simulation sous environnement Matlab/Simulink du MRV6/4, en utilisant en premier lieu un simple PI et puis en employant la commande DTC. Une ultime comparaison entre ces deux derniers sera présentée et analysée.

- Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui récapitulera l'essentiel de cette étude.

Chapitre I

La voiture électrique

I.1. Introduction

Les émissions de gaz à effet de serre (GES), dues aux activités industrielles et au parc mondial des véhicules légers et lourds ainsi que la réflexion du soleil ; agissent comme une sphère autour de la terre réchauffant ainsi la planète en engendrant la fonte des glaciers du pôle nord, précipitant le déséquilibre de l'écosystème, provoquant l'extinction de certaines espèces de faune et de flore et engendrant les inondations et haussement du niveau des mers, engloutissement ainsi de certains territoires côtier, sans oublier la détérioration de la couche d'Ozone et les maladies cancéreuses qui s'en suivent .

Aujourd'hui, la Terre se réchauffe plus vite que jamais et ce n'est pas un secret, on nage en pleine crise environnementale. La pollution et l'impact environnemental du transport routier pèsent lourd dans la balance. Présentement au Québec, le transport routier est actuellement responsable de 34 % d'émission de GES au Québec. La figure (I.1) montre les différents aspects du mauvais impact de la pollution sur l'environnement.



Fig.I.1.Impacts environnementaux liés aux changements climatiques [45]

La seule solution envisageable c'est d'électrifier les transports. Ce qui permettra de réduire les émissions de gaz responsables du changement climatique. Nous sommes

conscients aujourd'hui, des bienfaits des voitures électriques sur l'environnement. Toutefois, lors des premières apparitions des voitures électriques, plusieurs industries se sont acharnées afin qu'elles soient perçues comme autant polluantes que la voiture à essence.

Il est vrai que la voiture électrique a un impact environnemental lors de sa fabrication ; en revanche en matière de pollution de l'atmosphère, elle est beaucoup plus propre contrairement au véhicule à combustion interne.

Il faut prendre en compte aussi que les voitures électriques utilisent le freinage régénératif qui récupère l'énergie cinétique de potentielle de l'inertie pour la faire retourner dans les batteries sans produire des particules aéroportées nuisibles. La voiture à moteur thermique a autant de mauvais impacts environnementaux à la fabrication que pendant sa durée de vie. Les véhicules électriques (VE) constituent actuellement une alternative de substitution des véhicules thermiques conventionnels, permettant aux constructeurs de pouvoir bien répondre aux exigences demandées par les utilisateurs (performances élevées, couple, vitesse et autonomie) ainsi que la lutte contre les atmosphères nuisibles et pollution environnementale. La figure 1.2 montre l'effet de serre et son impact.

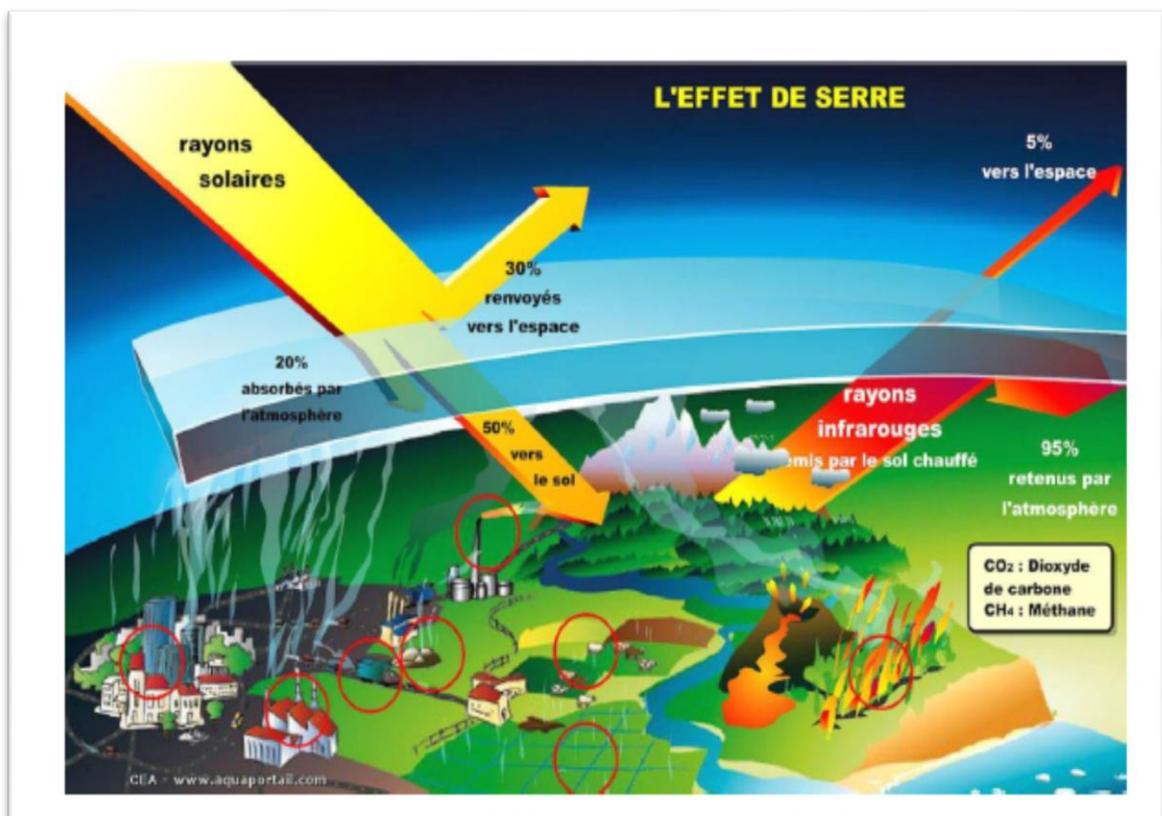


Fig.I.2.Principe des gaz à effet de serre [45]

Le véhicule électrique ne date pas d'aujourd'hui et sa structure n'était pas figée. Leur autonomie est basée sur la capacité de ses batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction, La première partie de ce travail consiste à présenter une étude générale sur véhicule électrique, l'état de l'art, les batteries ainsi que les chargeurs et les différents modes de charge.

I.2. Définition d'un véhicule électrique

Une **voiture électrique** est une automobile mue par un ou plusieurs moteurs électriques, généralement alimentés par une batterie d'accumulateurs voire une pile à hydrogénée concept de voiture électrique correspond au concept de véhicule électrique dans le domaine de la voiture. Le véhicule électrique comprend essentiellement un système de batterie qui joue le rôle du réservoir à carburant ainsi que de moteur(s) électrique(s) [2].

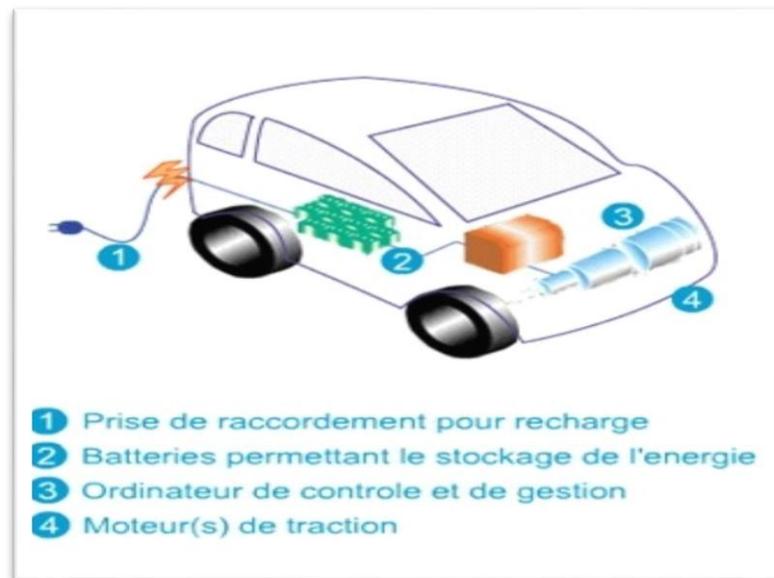


Fig.I.3. Schéma d'une voiture électrique [2]

I.3. Historique des véhicules électrique

Le premier véhicule électrique a fait son apparition aux alentours de 1830 qui ressemblaient à un sort de carriole (charrette) électrique inventée par Robert Anderson. Un homme d'affaires écossais Vers 1835 Thomas Davenport un américain fut le second initiateur du moteur électrique après écossais. Il créa une petite locomotive électrique. Ces deux tous premier véhicule électrique est donc la toute première origine de la voiture électrique. Vers 1838 l'Écossais Robert Davidson arrive avec un model similaire qui atteint la vitesse de 6 km/h [3].



Fig.I.4. Thomas Parker assis dans une voiture électrique [3]

- En 1859, le français Gaston Planté invente la batterie rechargeable au plomb acide. Elle sera améliorée par Camille Faure en 1881.
- En 1891, l'américain William Morrison construit la première vraie voiture électrique.
- En 1896, la Riker électrique de Andrew Riker remporte une course automobile.
- En 1897, on peut apercevoir les premiers taxis électriques dans les rues de New York.
- En 1899 en Belgique, une société construit « La Jamais Contente » la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h), L'auto était pilotée par le belge Camille Jenatzy, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille.



Fig.I.5. Première voiture électrique ' la jamais contente [3]

- Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur.
- En 1972, Victor Wouk le parain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de General.
- Cependant à partir de 2000 la voiture électrique va ré-mourir à nouveau.
- En 2007, il y a encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.
- De 2008 à 2010, le constructeur californien Tesla Motors Inc. produit sa voiture de sport électrique Tesla Roadster.
- En 2012, Tesla sort la berline sport Model S. Puis suivront le SUV Model X (2015), et la berline familiale Model 3 (2017) [4].



Fig.I.6. Les véhicules électriques en circulation en 2007 [4]

I.4. Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

Le principe de la voiture électrique (VE) est très simple : à la place d'un moteur thermique (essence ou diesel), un VE est équipé d'un moteur électrique alimenté par une batterie directement intégré au véhicule. Si le système est simple, tout le challenge est de proposer un véhicule avec les meilleures performances, le tout au service du confort et de la tranquillité du conducteur et de ses passagers [6].

Le convertisseur onduleur fournit le besoin en courant électrique du moteur, suivant les conditions de circulation et la volonté du conducteur. Il permet la fonction de régénération au moteur électrique : par exemple, en décélération, celui-ci se transforme en générateur de courant et fait office de ralentisseur électrique. Le moteur joue sur les forces d'interaction entre un électroaimant et un aimant permanent. L'électroaimant est alimenté par intermittence par l'énergie de la batterie pour mettre en rotation l'aimant.

Le véhicule électrique ne dispose pas de boîte de vitesse ou de composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif : l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture.

Le chargeur, quant à lui, gère la charge entre la borne de recharge et les besoins en énergie des batteries [6].

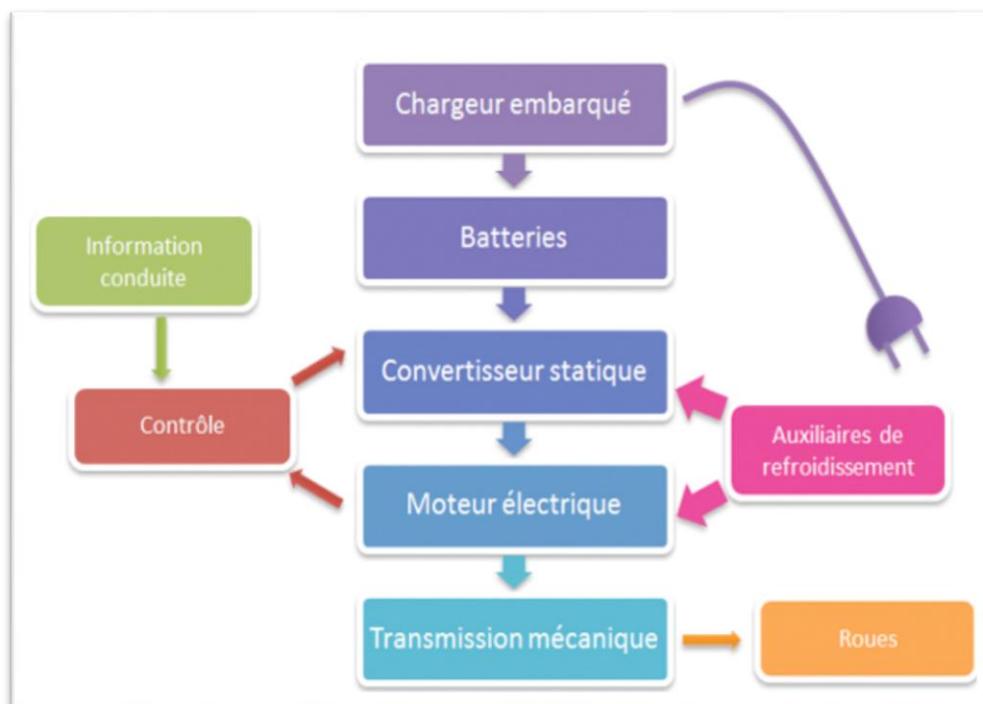


Fig.I.7.Schéma de fonctionnement d'un véhicule électrique [6]

I.5. Chaîne de traction électrique

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est l'ensemble des éléments, depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique, qui assurent la fourniture d'une puissance mécanique capable de mouvoir le véhicule. Une chaîne de motorisation d'un véhicule tout électrique se compose classiquement d'un moteur électrique, d'un système électronique (alimentation et commande), d'un système de liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues [32].

La chaîne de traction choisie est du type monomoteur, car le coût et la masse d'un seul moteur sont toujours plus faibles que ceux de plusieurs moteurs. L'utilisation d'un réducteur est dans le but de réduire le couple dimensionnant du moteur et par la suite sa masse et son coût. En plus, la commande d'un seul moteur évite le problème de dérapage lors de la commande de plusieurs moteurs à la même vitesse [7].

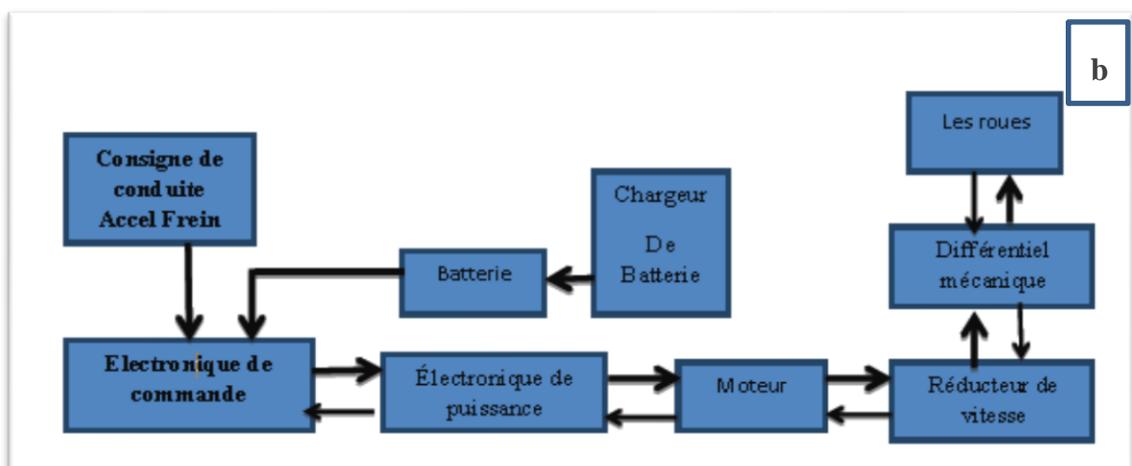
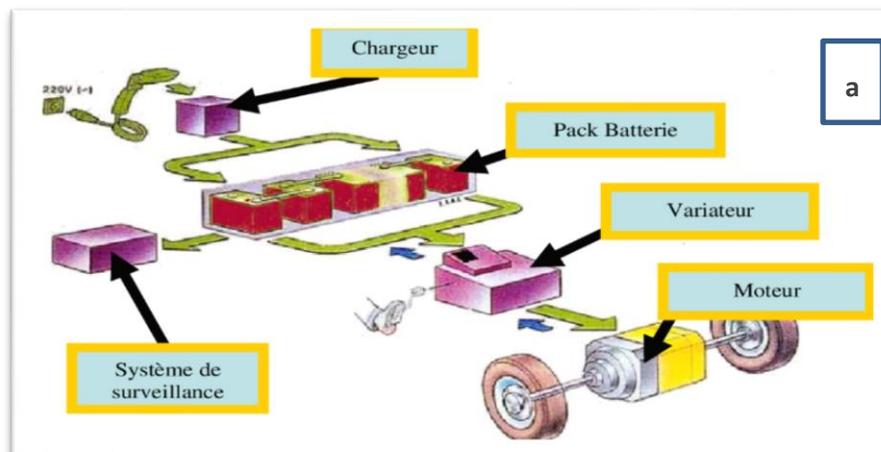


Fig.I.8. a.b) Schémas de la chaîne de traction [7]

I.6.Classification des véhicules électriques

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, etc. Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions des VEs sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité.

Les véhicule électrique font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides rechargeables et électriques. A l'intérieur de ces familles, plusieurs sous-catégories peuvent exister [8].

I.6.1.Véhicules tout électrique

Les véhicules entièrement électriques sont équipés d'un moteur électrique et d'une batterie qui est rechargée à partir de l'électricité du réseau. Ils fonctionnent sans émettre de gaz à effet de serre (GES).

Les véhicules tout électriques disponibles sur le marché disposent d'une autonomie qui répond amplement aux besoins habituels de déplacement en milieu urbain [9].

Exemples de modèles :

- Chevrolet Bolt EV
- Hyundai Kona EV
- Nissan Leaf

On distingue essentiellement deux types de véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

I.6.2.Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement [40].

I.6.3. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

La pile à combustible d'une voiture à hydrogène est un élément assez complexe qui fait office de générateur électrochimique. Au sein de la pile, l'hydrogène arrivant du réservoir se recombine avec l'oxygène provenant d'une admission d'air, ce qui génère de l'électricité pour alimenter le moteur. Cette réaction chimique ne rejette que de la vapeur d'eau. L'absence d'émissions néfastes pour l'environnement et la santé au roulage fait donc du véhicule à hydrogène une solution tout aussi intéressante que le véhicule électrique « classique » [10].

Cette réaction produit, en fait, de l'électricité, l'eau et de la chaleur selon l'équation suivante :

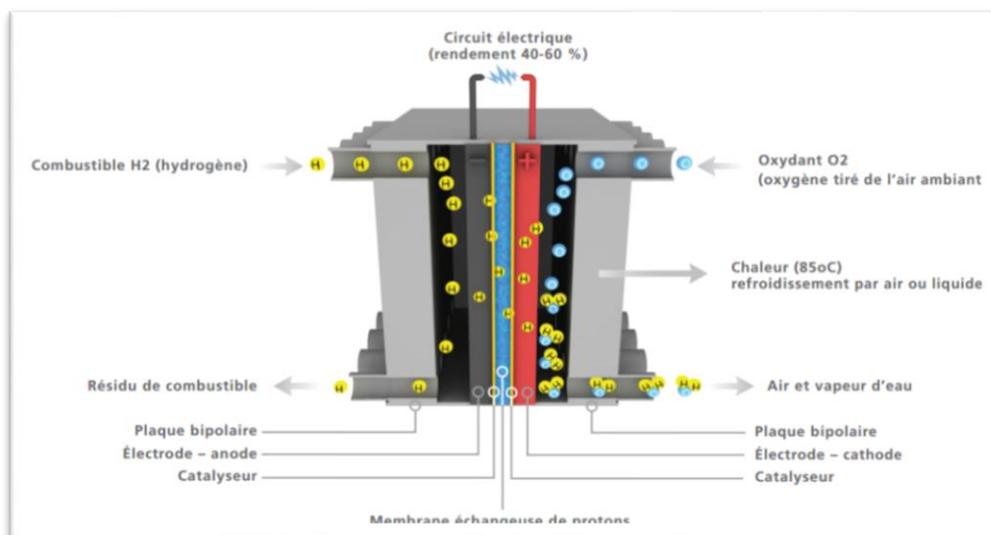


Fig.I.9.Principe de fonctionnement de la pile à combustible [10]

I.6.4. Véhicules hybrides

Le véhicule hybride est équipé d'un système de motorisation mixte thermique/électrique et de deux systèmes de stockage d'énergie : un réservoir de carburant et une batterie.

Les véhicules hybrides présentent un potentiel élevé pour optimiser la gestion de l'énergie. L'association de deux types de motorisation permet en effet de choisir le

meilleur mode de fonctionnement (thermique, électrique ou combiné) selon le profil du trajet, et notamment de réserver l'utilisation du moteur thermique dans ses zones de bon rendement. Et ainsi de réduire les émissions de polluants et de CO₂ localement, et la consommation de carburant (de 10 à 50 % selon le degré d'hybridation [21]).

I.6.5.Véhicules hybrides série

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série, d'où l'appellation. On peut alors choisir la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum et par conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la (figure.I.10)

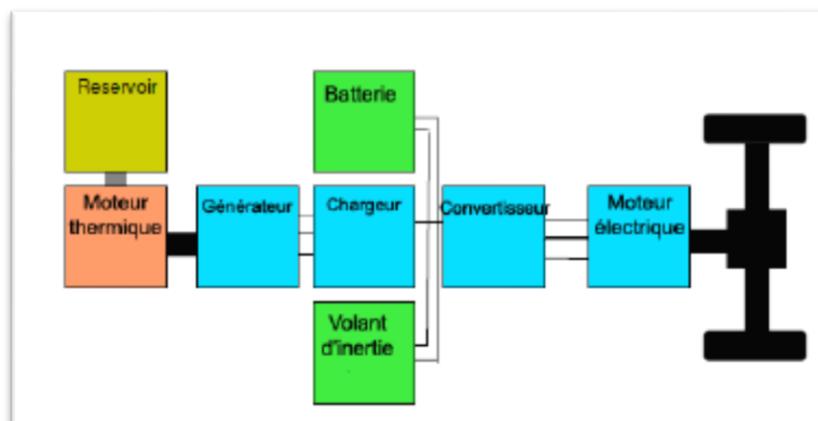


Fig.I.10.principe de véhicule hybride série [38]

La plus grande partie de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique est fournie par la génératrice. La batterie est là uniquement en tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique.

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les

batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite.

I.6.6. Véhicule hybride parallèle

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [38].

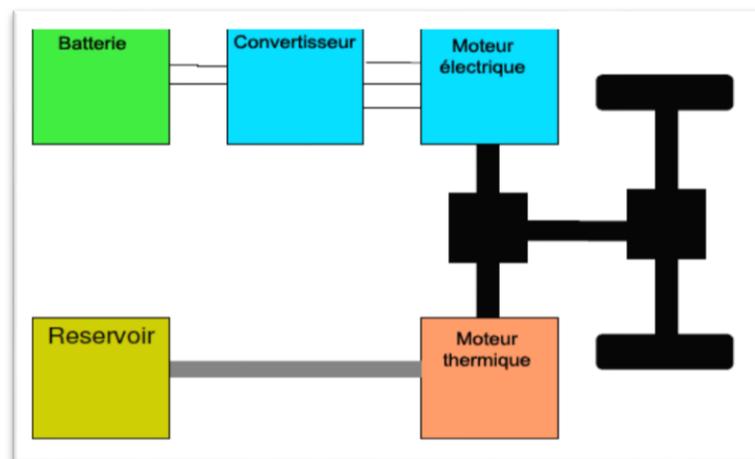


Fig.I.11.principe véhicule hybride parallèle [38]

I.7.7. Véhicule hybride combiné

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, 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. Schématise Le fonctionnement d'un hybride combiné [39].

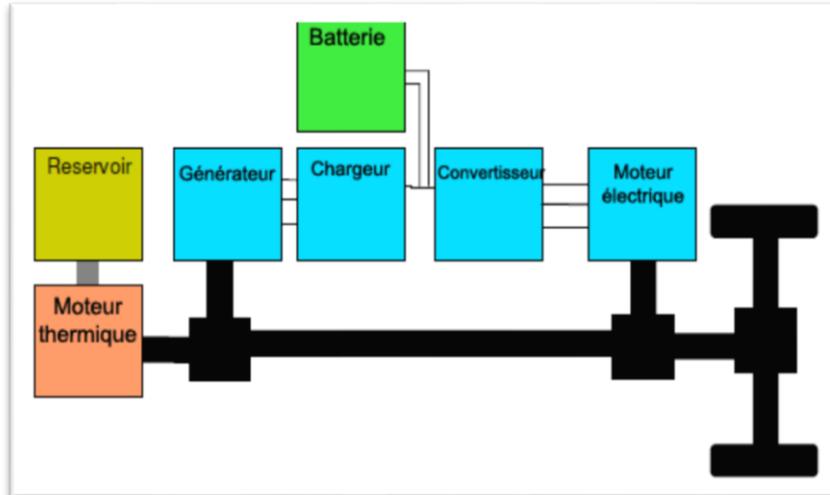


Fig.I.12.Principedu véhicule hybride combiné 39]

I.7.L'électronique de puissance dans le véhicule électrique

I.7.1 Les redresseurs (AC/DC)

Les redresseurs permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés (Thyristors). On peut grouper les composants utilisés dans les convertisseurs statiques AC- DC en deux catégories [22] :

- Les diodes
- Les thyristors (Silicon-Controlled Rectifier : SCR)

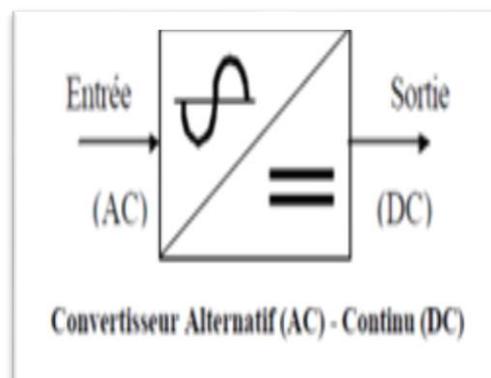


Fig.I.13.Symbole de redresseur [23]

I.7.2 Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent d'obtenir une tension continue variable et ce avec un rendement voisin de l'unité. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant alternatif. Ils sont principalement utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu ainsi que dans les alimentations à découpage à courant continu. Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.

- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc...) [23].

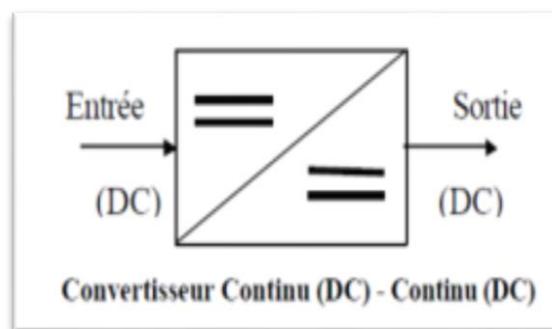


fig.I.14.Symbole de hacheu [23]

I.7.3 Les onduleurs

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de générer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique de tension continue ou de fréquence différente. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur statique de type continu/alternatif.

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en H, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors.

Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [24].

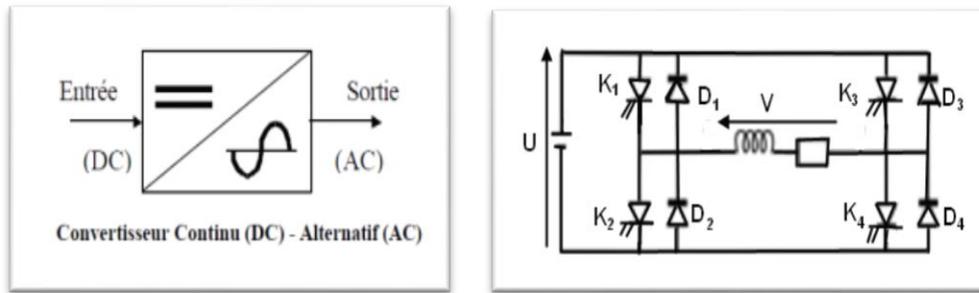


Fig.I.15. Symbole et montage d'onduleur en H [24]

I.8. Différentes configurations de véhicule électrique

I.8.1 Les véhicules électriques mono moteurs (machine à courant continu)

C'est une architecture avec moteur à courant continu, une batterie, un variateur (un hacheur réversible), une machine à courant continu, un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple) [25].

Donc ce cas on peut envisager deux solutions :

- Solution 1 : un seul moteur électrique + boîte de vitesse + différentiel
- Solution 2 : un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel

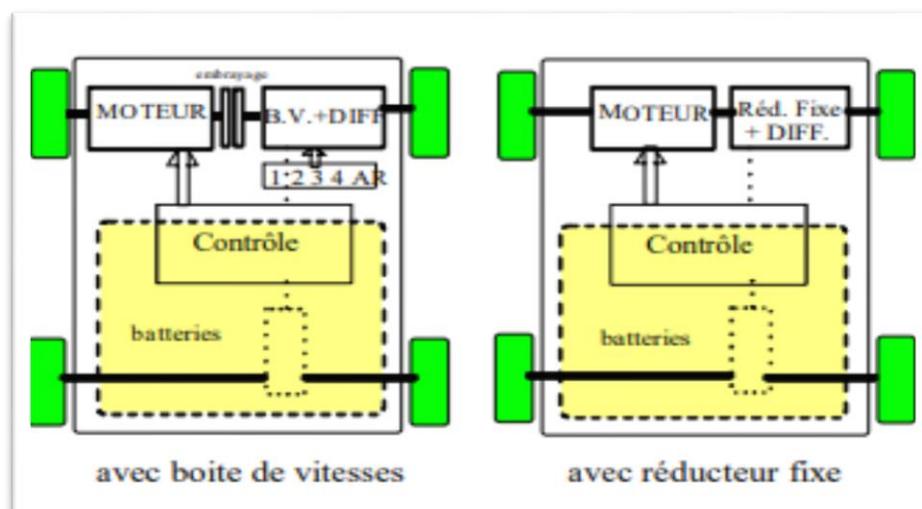


Fig.I.16. Les solutions monomoteur [25]

I.8.2 Les véhicules électriques multi- moteur (machine à courant alternatif)

Dans ce type, la chaîne énergétique est doublée, c'est une architecture avec moteur synchrone (dans la roue), une batterie, deux variateurs (onduleur), deux machines synchrones. L'onduleur est utilisé pour convertir le courant électrique continu fourni par la batterie en courant alternatif nécessaire au moteur de la voiture électrique.

On peut envisager deux solutions :

- Solution 3 : un moteur électrique + réducteur par roue motrice, soit deux ou quatre motoréducteurs
- Solution 4 : un moteur électrique à entraînement direct par roue motrice, soit deux ou quatre moteurs.

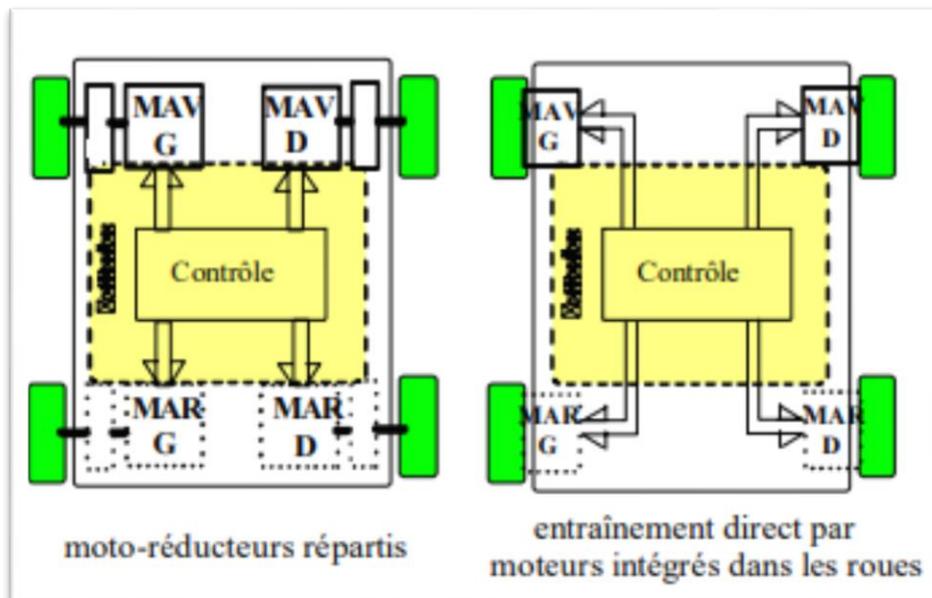


Fig.I.17. Les solutions multi-moteur [25]

I.9. Les batteries

I.9.1. Batterie au plomb

Inventée en 1859, la batterie au plomb trouve encore sa place dans de nombreux véhicules, thermiques comme électriques. En 1899, le véhicule électrique « La jamais contente » équipée de cette technologie fut d'ailleurs la première automobile à dépasser les 100 km/h bien avant les véhicules thermiques.

De nos jours, les batteries au plomb ne sont plus utilisées pour la traction : elles alimentent le circuit électrique des accessoires ou des équipements spécifiques au monde thermique comme le démarreur. La batterie au plomb n'offre qu'une capacité limitée malgré un encombrement et un poids élevé, mais elle a le mérite d'être à la fois économique et simple à produire ou à recycler. Utilisée comme dispositif de stockage principal pour des voitures électriques jusque dans les années 80, elle a rapidement cédé la place à d'autres technologies plus performantes[12]

I.9.2. Batterie Nickel-Cadmium

Si vous utilisiez des piles rechargeables dans les années 90, vous connaissez la technologie Nickel-Cadmium. Les accumulateurs « Ni – Cd » ne manquaient pas d'avantages, avec une densité de stockage importante et une durée de vie de l'ordre de 500 à 1 000 cycles de recharge [12]

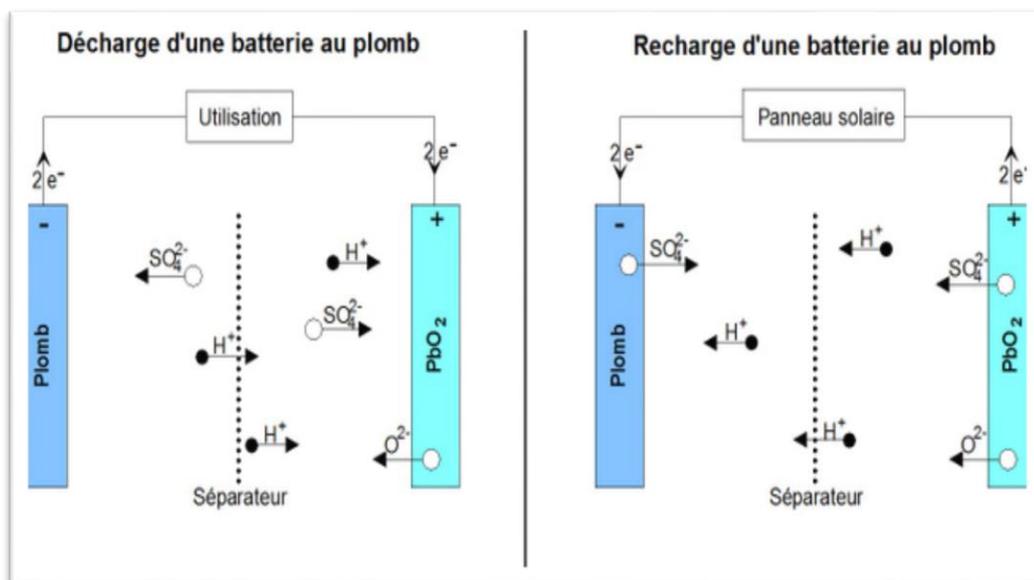


Fig.I.18.principe de fonctionnement de batterie au plomb [12]

Ils souffraient en revanche de l'effet mémoire, un phénomène physique qui altère les performances de la batterie en cas de cycles de « charge-décharge » partiels. Utilisées pour la production de véhicules électriques dans les années 90, les batteries Ni-Cd sont aujourd'hui interdites, du fait de la toxicité du cadmium.

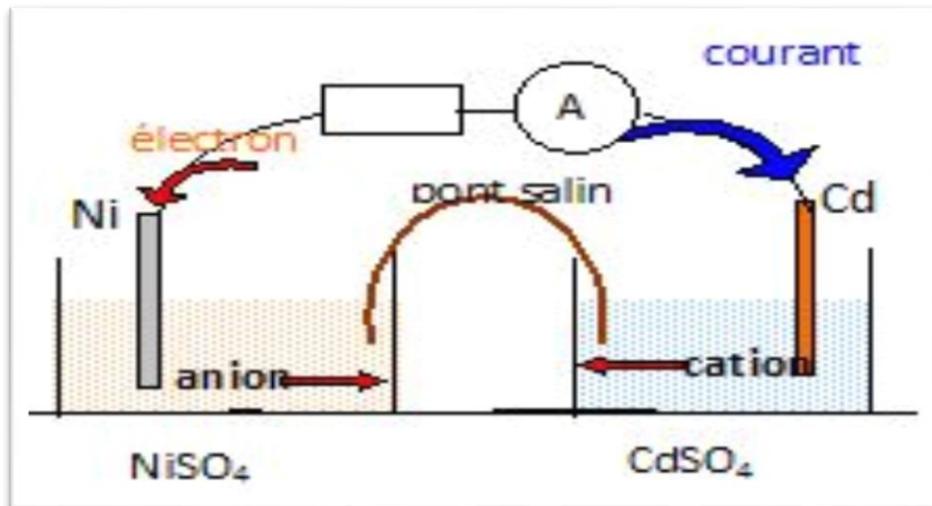


Fig.I.19.principe de fonctionnement de batterie Nickel-cadmium [12]

I.9.3. Batterie Nickel-Métal Hydrures

Avec leurs performances comparables à celles de la technologie Ni-Cd, les accumulateurs Nickel-Métal Hydrures ou « Ni-MH » ont connu un succès plus durable du fait de l'absence de métaux lourds. Cette technologie de batterie rechargeable portable était la plus économique au début des années 2000 : c'est pourquoi elle a largement dominé le marché du véhicule hybride jusqu'à l'avènement de la technologie lithium-ion [12].

I.9.4. Batterie lithium-ion

Élaborée au début des années 90, la batterie lithium-ion s'est progressivement imposée comme la technologie de référence, dans le monde du transport comme dans celui de l'électronique grand public. Dotée d'une importante durée de vie, elle offre une densité d'énergie bien supérieure à celle de toutes les technologies concurrentes et ne présente pas d'effet mémoire.

Elle exige en revanche un conditionnement adapté ainsi qu'un pilotage précis de la recharge, généralement assuré par un circuit électronique dédié. Renault utilise la technologie lithium-ion pour ZOE et les autres véhicules électriques de sa gamme. Le Groupe travaille par ailleurs à l'intégration de ses batteries dans un schéma d'économie circulaire visant à prolonger au maximum leur durée de vie [12].

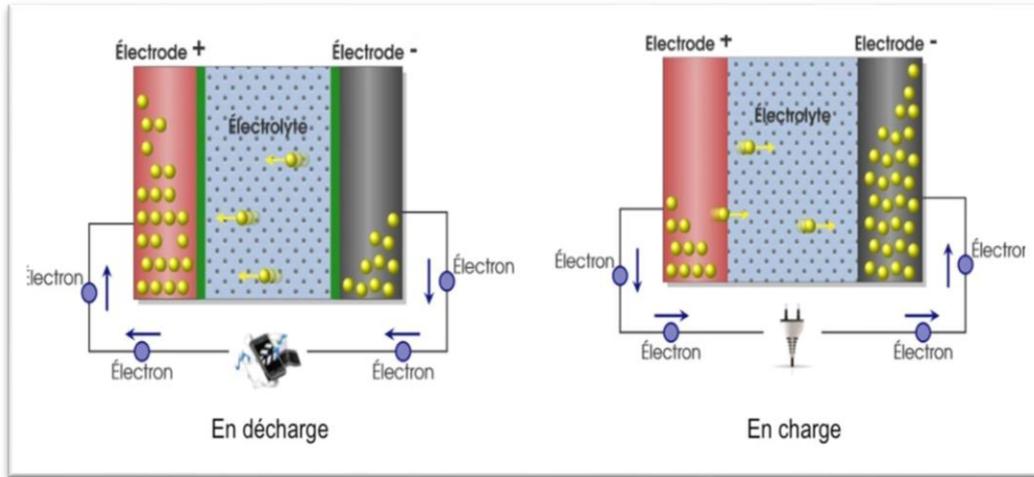


Fig.I.20.principe de fonctionnement de batterie lithium-ion [12]

I.9.5. Batterie tout solide

La recherche scientifique s'intéresse depuis toujours au concept de batterie tout solide, mais ce n'est que depuis 10 ans que ses avancées permettent d'imaginer, dans un futur lointain, son adoption au monde automobile.

Son principe consiste à remplacer l'électrolyte liquide des batteries par un matériau solide qui pourrait prendre la forme d'un polymère plastique, de poudres inorganiques compactées ou d'un mélange des deux. En théorie, la technologie n'a que des avantages : elle permet d'augmenter la densité d'énergie et la stabilité tout en simplifiant la gestion thermique. La batterie solide n'en est cependant qu'au stade du prototype de laboratoire. La batterie lithium-ion a donc encore de beaux jours devant elle [11].

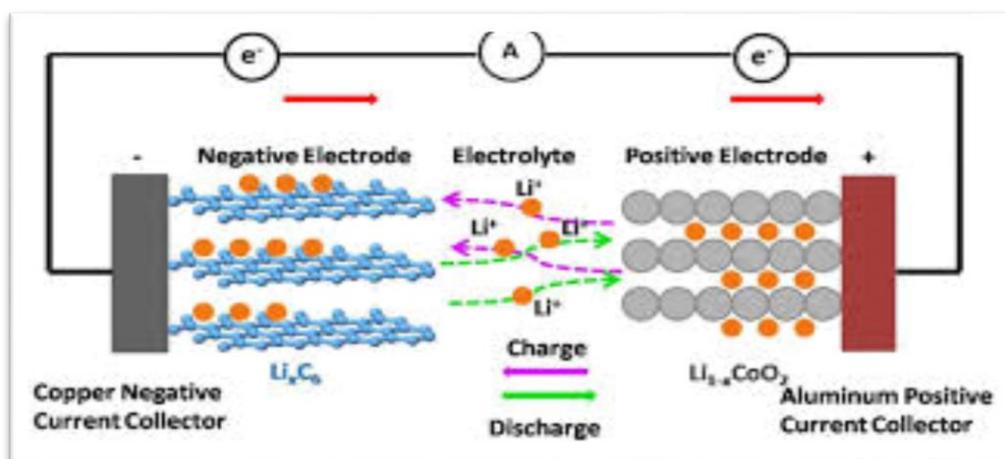


Fig.I.21.principe de fonctionnement de batterie tout solide [12]

Tab.I.1.les avantages et les inconvénients des différentes types de batteries

Batteries	Avantages	Inconvénient
Cadmium nickel	<ul style="list-style-type: none"> • Légère • Durée de vie importante 	<ul style="list-style-type: none"> • Haute toxicité du cadmium (n'est plus utilisée)
Nickel métal hydrure	<ul style="list-style-type: none"> • Légère • Capacité importante (stockage énergie) • Peu polluante 	<ul style="list-style-type: none"> • Onéreuse • Élévation de température proportionnelle à la charge, donc nécessité d'un système de refroidissement
Lithium	<ul style="list-style-type: none"> • Tension nominale élevée (3 à 3,7 volts/élément) • Stable en charge et décharge • Importantes densités d'énergies massiques et volumiques (160 Wh/Kg et 400 Wh/l) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation délicate (nécessité d'une gestion automatisée de l'alimentation) • Recyclage encore non maîtrisé (Réglementation UN 3490 - UN 3090 pour le transport et le conditionnement de ces batteries)
Lithium-ion	<ul style="list-style-type: none"> • Forte énergie massique et volumique 	<ul style="list-style-type: none"> • Inflammabilité

I.10. Durée de vie d'une batterie de voiture électrique

Au fil des utilisations et des cycles de charge/décharge, la batterie d'une voiture électrique finit par s'user : elle perd de sa capacité énergétique. Cette dégradation est cependant très lente, et l'on estime qu'une batterie de véhicule électrique conserve en moyenne 75 % de sa capacité au bout de dix ans. De fait, la batterie d'une voiture électrique est conçue pour avoir la même durée de vie que le véhicule lui-même [12].

I.10.1. Recyclage des batteries

Une batterie de voiture électrique contient bien des matériaux valorisables : lithium, cobalt, nickel, aluminium... Les filières pour la recycler existent d'ailleurs déjà. Mais il s'agit là d'une opération complexe et coûteuse qui exige des transformations chimiques. Mieux vaut donc d'abord lui trouver de nouveaux usages, moins exigeants, pour lui offrir une seconde vie. C'est l'une des missions de MOBILIZE, qui propose notamment des solutions innovantes de stockage d'énergie [12].

I.10.2. Connexion du véhicule au réseau électrique

Lorsque l'on parle de modes de recharge, il faut par-là comprendre, comment le véhicule électrique est-il connecté au réseau électrique, comment le courant électrique arrive au véhicule. Le courant électrique existe sous deux formes différentes sont :

- Le courant alternatif (AC)
- Le courant continu (DC)

Pour faire simple, on trouve le courant AC dans les prises électriques à la maison, et le courant DC dans les batteries, il est donc transformé, ce qui conditionne la vitesse de recharge. Le courant alternatif (AC) et courant continu (DC).

Maintenant pour la petite explication, le courant alternatif (AC) est facilement transportable sur de longues distances et parfait pour un usage domestique. Dans votre maison, le courant qui arrive aux prises électriques est du courant alternatif.

Le courant continu (DC) est quant à lui utilisé pour stocker l'énergie dans les batteries. Il alimente tous vos appareils, de votre smart phone à votre brosse à dents électrique.

Pour transformer le courant AC en courant DC, il faut utiliser un rehausseur (ou convertisseur AC/DC), qu'on appellera simplement chargeur. Tous les véhicules électriques sont équipés d'un chargeur pour transformer le courant AC du réseau en courant DC stocké dans la batterie.

Cependant plus un chargeur est puissant et plus il est lourd et cher. Des caractéristiques qui ne se prêtent pas à un usage dans un véhicule électrique. D'où l'intérêt des bornes de recharges rapides, qui sont, elles, de puissants chargeurs, pour recharger très rapidement votre véhicule électrique.

Lorsque l'on utilise une borne de recharge rapide, le courant n'est pas transformé dans le véhicule, mais dans la borne, puis injecté directement dans la batterie.

La recharge rapide vous permet de récupérer plusieurs centaines de kilomètres d'autonomie en quelques minutes seulement et vous ouvre ainsi la porte aux trajets longues distances [13].

I.11.Principe de chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique, c'est à dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Dans le cas d'une alimentation par courant alternatif, la charge s'effectue généralement en deux étapes.

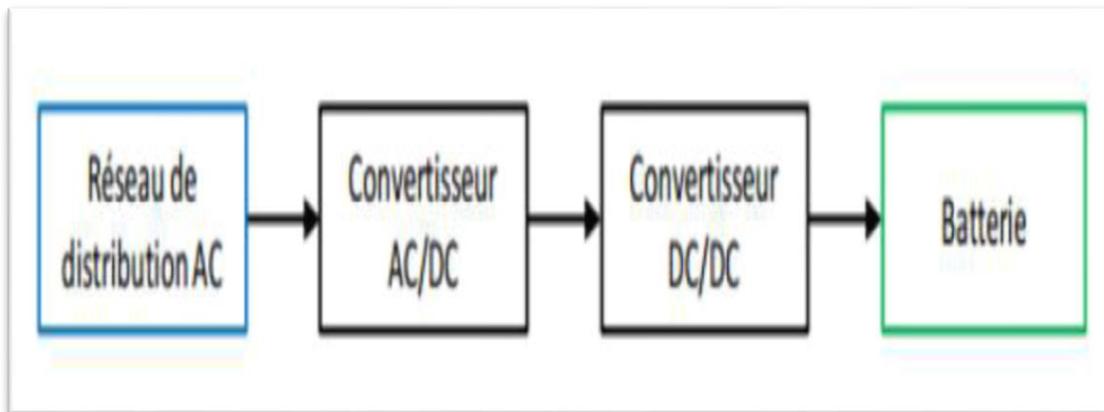


Fig.I.22.schéma illustre le principe de chargeur [13]

I.11.1.Les modes de recharge

Il existe 4 modes de recharge pour les véhicules électriques. Nous avons résumé leur fonctionnement dans ces infographies. Dans tous les cas, lorsque le véhicule électrique est en charge, le câble de recharge est verrouillé dans la prise du véhicule.

Il est impossible de le démarrer tant qu'il est encore branché. Le mode de recharge définit la façon dont votre véhicule est connecté au réseau électrique pour la recharge, il déterminera la vitesse à laquelle vos batteries se rechargent.

- **Mode 1**

Nous ne traiterons pas le cas du mode 1 car il est aujourd'hui obsolète, et ne répond pas aux normes électriques. Un véhicule électrique compatible avec le mode 4, le sera avec le mode 3, qui le sera avec le mode 2.

- **Mode 2 (charge standard AC)**

Le mode 2 consiste en un branchement sur une prise domestique classique, comme vous brancheriez votre smart phone le soir. Le câble de recharge utilisé est doté d'un système chargé de réguler la charge. C'est-à-dire que ce dispositif permet d'assurer la sécurité de la connexion en dialoguant avec le véhicule électrique et protège l'utilisateur d'une électrocution. Tous les véhicules électriques sont aujourd'hui livrés avec un câble de ce type à l'achat du véhicule. Utiliser une prise électrique renforcée comme la Green 'Up Access permet de recharger son véhicule électrique 2 fois plus rapidement.

- **Mode 3 (charge intelligente AC)**

Mode 3 se caractérise par l'utilisation d'un circuit électrique dédié, c'est à dire une ligne électrique directement reliée au compteur électrique. Cela pour éviter l'usure du réseau électrique de la maison en cas de charge régulière. Une installation de ce type est conseillée, il offre de multiples avantages par rapport au mode 2. À la différence du mode 2, le mode 3 permet une recharge intelligente du véhicule. Typiquement une installation de type Wall box ou borne de recharge permet de réguler la puissance pendant la charge pour s'adapter aux contraintes du réseau. C'est à dire que la puissance s'adapte à la quantité d'énergie disponible dans la maison en temps réel. Ainsi, il n'y a aucun risque de coupure d'électricité dû à la recharge du véhicule électrique. Ce type d'installation est très intéressant car il permet aussi d'optimiser sa charge pour profiter des tarifs heures creuses et ainsi faire des économies sur sa charge.

- **Mode 4 (charge rapide DC)**

Le mode 4 se définit par une charge en courant continu (DC). Plus connu sous le terme de "charge rapide". La charge en courant continu permet de récupérer 80 % de son autonomie en moins de 30 min. Le temps de recharge exacte dépend du véhicule, et de la température de la batterie (si celle-ci est extrême). Les bornes de charge rapide se trouvent généralement dans les aires d'autoroutes et grandes agglomérations. Plusieurs réseaux se développent comme ceux de Iziva, IONITY et Fastned [13].

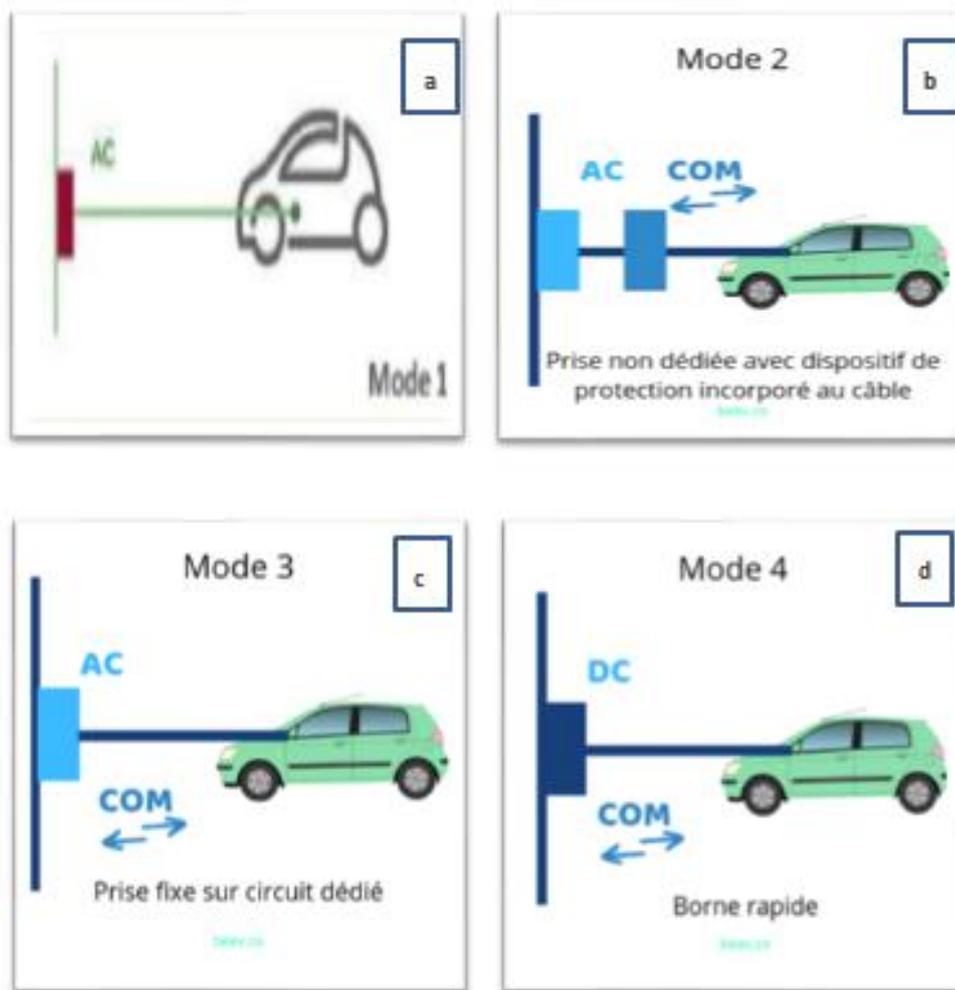


Fig.I.23. a,b,c,d) Les modes de chargements [13]

I.12. Le Moteur électrique d'entraînement

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes:

- Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé),
- Obtenir une vitesse maximale,

- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses) [8].

I.12.1. Moteur à courant continu à excitation séparée

Les moteurs à courant continu à excitation séparée, sont commandés par un hacheur de puissance agissant sur l'induit du moteur et un hacheur de plus faible puissance commandant l'excitation ou inducteur. Dans la traction électrique automobile, c'est le système le plus employé. En effet, le moteur de LEROY Sommer [40] qui entraîne la plupart des véhicules électriques en circulation est un moteur à courant continu conçu à partir des modèles destinés à la traction industrielle. L'électronique permet d'optimiser la valeur de consigne du courant d'induit et d'excitation, en fonction de la caractéristique couple/vitesse désirée, grâce à un système de thyristors relativement simple et peu coûteux [42].

I.12.2. Moteurs à courant continu à aimant permanent

Les moteurs à courant continu à aimant permanent sont actuellement en pleine expansion dans l'industrie. Cette technologie permet d'obtenir des moteurs encore plus légers avec un meilleur rendement que les précédents. Malheureusement, ces aimants font appel pour leur composition, à des terres rares, dont le coût est très élevé. Ils sont également très sensibles aux montées en température.

I.12.3. Machines asynchrones

C'est une solution envisagée par de nombreux constructeurs. On peut distinguer deux types de machines asynchrones, les machines à bagues et à cage d'écureuil.

I.12.4. Machines synchrones à aimant permanent

Les moteurs synchrones à aimants permanents ont une puissance massique et un rendement élevés. Leurs coûts élevés restent le plus gros handicap. Des ferrites peuvent être utilisées mais elles ne présentent pas des performances excellentes. Par contre, les aimants à terres rares, Samarium-Cobalt ou Fer-Néodyme-bore sont plus intéressants. Un des inconvénients de cette machine est l'impossibilité du réglage de l'excitation.

I.12.5.Moteur synchrone à inducteur bobiné

Ce moteur peut présenter une alternative très intéressante. En comparaison avec le moteur synchrone à aimants permanents. Il dispose d'un degré de liberté supplémentaire : le réglage du flux d'excitation. En effet, cela ouvre une large palette d'algorithmes de commande : compensateur synchrone, facteur de puissance unitaire, couple maximal, minimisation des pertes [42].

I.12.6.Moteur à réluctance variable

Ce moteur présente un faible coût. Néanmoins, la principale difficulté reste la commande. En effet, ce moteur produit un couple très pulsatoire à haute vitesse engendrant des problèmes de vibrations mécaniques et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents. Ceci est une des conséquences de son principe de fonctionnement. D'autres technologies comme les moteurs-roues encore en phase de mise au point, pourraient présenter des avantages spécifiques indéniables qui devraient jouer un rôle décisif dans le développement du véhicule électrique [43].

I.13.Les avantages et les inconvénients des véhicules électriques

I.13.1.Avantages des véhicules électriques

- Pas de polluants de l'air et pas d'émission de CO₂ à l'utilisation

Les voitures électriques ne rejettent de polluants dans l'atmosphère quand elles roulent. Pas de NO_x, particules fines, hydrocarbures imbrûlés et autre monoxyde de carbone, souvent incriminés pour leurs impacts sur la santé. Il reste toutefois les émissions de particules venant des pneus et, dans une moindre mesure, des freins (grâce au freinage régénératif les freins sont moins sollicités que ceux d'un véhicule thermique).

Passer au véhicule électrique présente donc un bénéfice immédiat pour la qualité de l'air dans les villes et à proximité des routes.

Les véhicules électriques n'émettent pas non plus de CO₂ lors de l'utilisation. Et si l'électricité utilisée est peu carbonée comme en Belgique (230 g CO₂/kWh) ou en France

(60 g CO₂/kWh) le bilan carbone de la voiture électrique est meilleur que celui d'une voiture thermique (à essence ou Diesel)

- Un bel avenir

Pour limiter le réchauffement climatique et respecter l'accord de Paris, la Belgique doit diminuer ses émissions de 80 à 95 % d'ici 2050 (par rapport à 1990). Pour y arriver, il faut notamment réduire drastiquement l'utilisation des combustibles fossiles (diesel et essence) pour le transport.

Une des solutions techniques est de rouler à l'électricité. À condition de diminuer le nombre total de véhicules en circulation et de produire l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (solaire, éolien...).

Pour donner une idée, le nombre de voitures électriques dans le monde (y compris les hybrides) devrait passer de 10 millions en 2020 à 150 millions en 2030 selon les politiques et mesures prévues par les États (notamment les engagements climatiques pris dans l'Accord de Paris). C'est le "Stated Policies Scenario". Un scénario plus volontariste, nommé "Sustainable Development Scenario", imagine une part de 30% de véhicules électriques parmi les véhicules neufs en 2030. Cela donnerait 225 millions de véhicules électriques

- Silencieuse

Quand elle démarre et quand elle roule, la voiture électrique est quasi silencieuse. Un véritable atout pour la quiétude des villes. Ce ne sont pas les habitants proches des grands axes qui le contrediront. Le hic : cela peut représenter un danger pour les piétons qui ne l'entendent pas arriver.

- Économique à l'utilisation

On sait que les véhicules actuels consomment théoriquement entre 13 et 25 kWh/100 km (cycle normalisé). Cela revient à un coût de 3,25 € à 6,25 € par 100 km (1 kWh coûte en moyenne 0,25€).

Un véhicule à essence ou diesel qui consomme théoriquement 5 l/100 km coûte quant à lui entre 6 et 7 € de carburant par 100 km.

- Peu d'entretien

La voiture électrique demande peu d'entretien. Le système moteur est très simplifié par rapport à un véhicule thermique (essence, diesel ou gaz). Il y a cent fois moins de pièces en rotation, il n'y a pas de boîte de vitesse et pas d'huile à changer.

Grâce au freinage régénératif (on récupère une partie de l'énergie cinétique pour en faire de l'électricité), les freins sont beaucoup moins sollicités et les plaquettes doivent être remplacées moins souvent qu'avec une voiture thermique.

Par contre, il peut arriver qu'on doive changer la batterie de sa voiture électrique, après 1000 à 1500 cycles de recharge ou 8 à 10 ans. Le prix d'une nouvelle batterie est très élevé : 8100 € pour la batterie d'une petite voiture type Renault Zoe (52 kWh). Afin de limiter le coût de remplacement, certaines marques proposent de louer les batteries plutôt que de les acheter

I.13.2. Inconvénients de la voiture électrique

- L'impact de ses batteries

La production des batteries des voitures électriques pose de grands problèmes environnementaux et sociaux. On utilise de plus en plus de batteries au lithium pour les véhicules mais aussi pour leurs équipements informatiques et électroniques. Cela accroît la pression sur ce métal.

Le lithium – aussi surnommé or blanc – provient souvent d'Amérique latine. Sa production, très gourmande en eau, met à mal les écosystèmes et la survie des populations locales dans des zones où la sécheresse est déjà problématique.

Ces préoccupations restent d'actualité, même si l'efficacité des batteries évolue rapidement. Entre 2009 et 2016, elles sont passées de 100 Wh/litre à 350 Wh/litre, soit une capacité 3,5 fois plus élevée pour la même taille. Dans le même temps, leur prix a été divisé par trois. Tout indique que la performance des batteries va encore s'améliorer.

La capacité des batteries diminue au cours du temps. Quand leur capacité n'atteint plus qu'environ 75 à 80% de leur capacité, elles ne plus être utilisées dans les véhicules mais

peuvent encore être servir comme solution de stockage stationnaire (par exemple comme batterie domestique si on a des panneaux photovoltaïques). Les batteries en fin de vie peuvent un problème de gestion des déchets. Leur recyclage se développe progressivement en Belgique. À terme, une bonne partie des matériaux utilisés dans les batteries pourraient servir à en fabriquer de nouvelles.

- La recharge reste une contrainte

Longtemps considérée comme un facteur limitant, l'autonomie des voitures électriques évolue de manière spectaculaire. De plus en plus de modèles proposent 300 km, voire 600 km d'autonomie avec une seule charge.

Une conduite agressive et l'utilisation du chauffage ou de la climatisation diminuent rapidement cette autonomie. Pour aller loin, il faut ménager sa monture !

Évidemment, plus d'autonomie signifie des batteries de capacité plus importante (jusqu'à 100 kWh), plus de poids, plus d'impact à la fabrication et plus de temps pour les recharger.

Une autonomie de 200 km suffit largement pour une utilisation quotidienne. Ce n'est que pour de plus longs trajets que le temps de recharge peut être handicapant, tant que le réseau de chargeurs rapides (de grande puissance) n'est pas suffisamment développé.

- Le temps de recharge et la disponibilité des bornes

L'autonomie restant limitée, la facilité de recharge est un critère important. On peut charger sa voiture électrique à la maison via une prise normale ou sur une borne domestique, publique ou d'entreprise. Le nombre de bornes est en hausse mais reste restreint.

En ville, où l'on n'a pas nécessairement un garage, un réseau de bornes publiques facilite la recharge des véhicules [15].

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un bref aperçu de l'état de l'art sur le véhicule électrique. Les différents éléments constituant une chaîne de traction ont été présentés comme les batteries et les moteurs électriques, ainsi que les différentes architectures de la motorisation et les technologies de convertisseurs statiques utilisés. Notre choix s'est focalisé sur le moteur à reluctance variable (MRV) comme moteur d'entraînement des véhicules électriques, pour les innombrables avantages.

Chapitre II

Moteur à reluctance variable

II.1.Introduction

La machine à réluctance variable a été une première solution technique pour la conversion électromécanique de conception rotative, idée qui remonte vers les débuts du 19^{ème} siècle. Son principe de fonctionnement, basé sur la règle de la fluctuation du flux entre sa valeur maximal et minimal ou la réluctance est respectivement minimale et maximale, a été mis en œuvre soit pour produire des courants de fréquence élevée (de l'ordre de 10kHz) à l'époque des débuts de la radioélectricité, soit pour réaliser des actionneurs ou relais électromagnétiques. Le MRV a connu un développement et un intérêt sans précédent depuis ces dernières trois décennies, à cause d'une part de sa simplicité et sa capacité d'entraînement à couple élevé, et d'autre part, de l'apport de l'électronique de puissance.

Malgré qu'il fut marginalisé et surpassé dans le passé par les machines synchrones utilisées comme grands alternateurs dans les centrales de production de l'énergie électrique, par les machines asynchrones fréquemment utilisés comme moteurs ou par les machines à courant continu à collecteur ; les machines à réluctance variable sont utilisées actuellement dans les dispositifs d'entraînement à grandes vitesses de rotation et comme moteurs de tractions industrielles grâce à leurs couples satisfaisants avec seulement 30% d'appels de courant comparés aux moteurs à induction. Décidément les MRV possèdent de meilleures performances que les moteurs à induction. et permettent aussi une variation de vitesse aisée et contrôlable.

Ce sont des machines de très simple construction, robustes, peu coûteuses et qui procurent un bon fonctionnement sur des plages très étendues de vitesses et de puissances. Aujourd'hui les MRV trouvent de plus en plus de domaines d'application comme les appareils ménagers, la traction automobile et ferroviaire et les systèmes embarqués, pour ne citer que l'essentiel On s'intéresse dans ce présent chapitre à la présentation du MRV. Cette deuxième partie de notre travail sera consacrée à la modélisation et généralités sur la MRV en introduisant le principe de fonctionnement et les différents types rencontrés. Nous avons parlé aussi sur son alimentation et ses stratégies de commande.

II.2.Le moteur a réluctance variable

Un moteur à réluctance variable fonctionne à travers un couple de réluctance. Différent des types de moteurs à courant continu à balais courants, la puissance peut être transmise

aux enroulements à l'intérieur du stator au lieu du rotor. Un autre nom de ce moteur est MRV (Variable Reluctance Moteur). Pour un meilleur fonctionnement de ce moteur, il utilise un onduleur à découpage. Les caractéristiques de commande de ce moteur sont les mêmes que celles des moteurs à courant continu à commutation électronique. Ces moteurs sont applicables lorsque le dimensionnement, ainsi que la puissance par rapport au poids, sont critiques

Ce moteur simplifie sa conception mécanique pour limiter le passage du courant vers une pièce rotative ; cependant, cela complique la conception car un certain type de système de commutation doit être utilisé pour transmettre la puissance vers les différents enroulements. Cette conception mécanique peut également être utilisée pour un générateur. La charge peut être commutée vers les bobines dans la séquence pour coordonner le flux de courant à travers la rotation. Ainsi, ces générateurs peuvent également fonctionner à grande vitesse par rapport aux types de moteurs conventionnels car l'induit est constitué d'une seule pièce de matériau magnétisable comme un cylindre fendu [16].

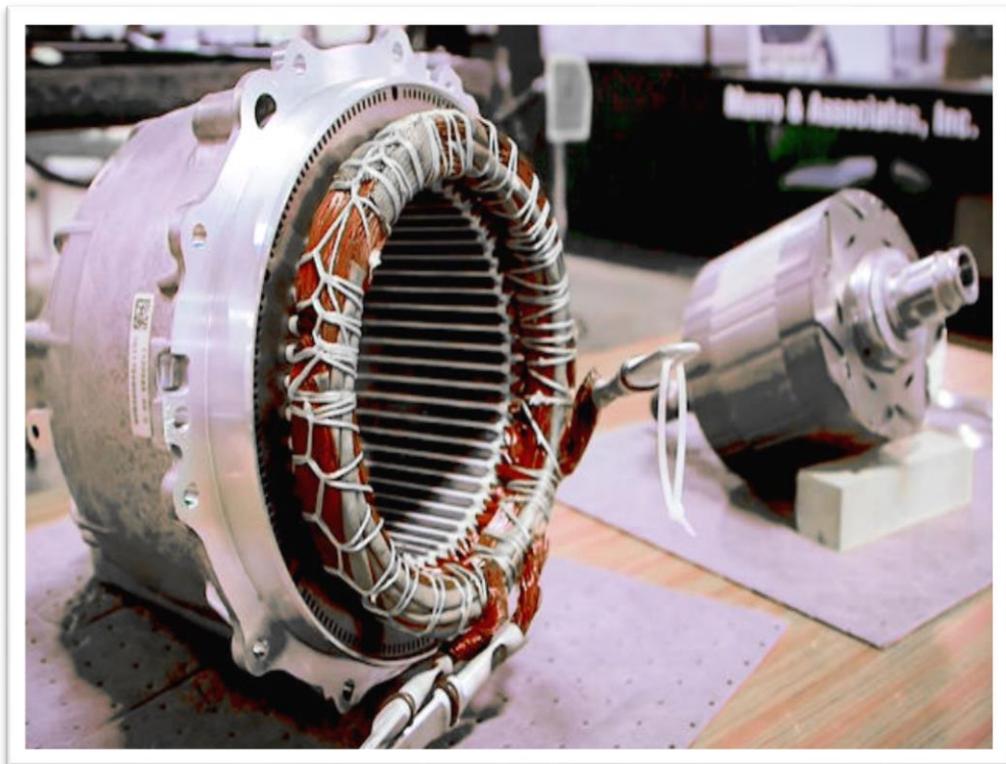


Fig.II.1.Moteur a reluctance variable [16]

La Réluctance d'un circuit magnétique est une grandeur qui caractérise un élément de volume traversé par un flux magnétique. Elle est fonction des dimensions géométriques de l'élément et de la perméabilité magnétique du matériau. La réluctance d'une zone de l'espace traversée par un champ magnétique s'exprime par la relation suivante :

$$R = \int \frac{dl}{\mu S} \quad (1.1)$$

II.3. Classification des MRV

En électrotechnique, il a été convenu de classer les machines électrique selon le type d'énergie électrique (continu ou alternative). Mais cela n'empêche pas que certaines classifications prennent en considération la géométrie, le type de mouvement (linéaire, rotatif ou combiné)...etc. En menant notre recherche bibliographique, nous avons constaté que les MRV ne se plient pas à une classification évidente. En effet, pour la même géométrie, ils peuvent fonctionner avec de l'énergie continu comme le MRV pure à double saillance, ou avec de l'énergie alternative comme le MRV synchrone, VERNIER, hybride, ...etc. Certains auteurs ont tenté de lui trouver sa place dans « l'arbre généalogique » des machines électriques. Dépourvu de collecteur, le MRV se place du côté des machines à courant alternatif comme la montre la figure [16].

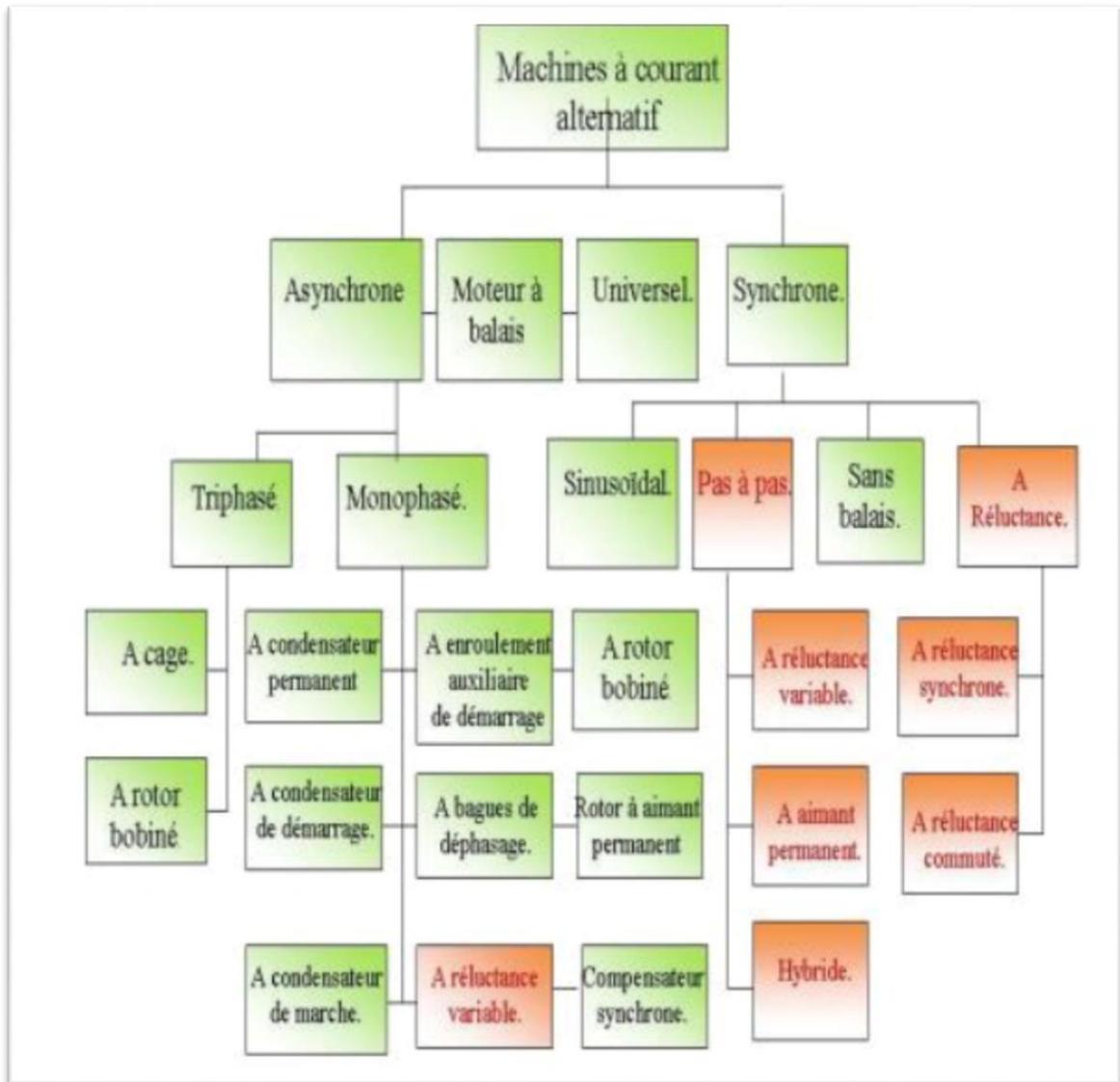


Figure II.2. L'arbre généalogique de machines a courant alternatif [16]

II.4. Constitution

Parmi les différentes structures de MRV existantes, nous avons choisi d'utiliser une machine à réluctance variable à double saillance de type « 6/4 ». La figure montre la structure de cette machine

Ce moteur comporte une denture dont le pas n'est pas le même au stator et au rotor :

Le rotor : n'est pas aimanté le rotor est constitué d'un empilage de tôles identiques découpées. Cet empilage est solidaire de l'axe de transmission. Il ne comporte ni

conducteurs électriques ni aimants, ce qui lui confère une grande robustesse et une extrême simplicité.

Le stator : est également constitué de tôles ferromagnétiques empilées. Deux pôles diamétralement opposés reçoivent deux bobinages alimentés en série, constituant ainsi une phase.

Cette machine peut comporter deux, trois, quatre (ou même plus) phases. Dans notre projet nous avons choisi trois phases. Le stator comporte 6 dents tandis que le rotor n'en a que 4 : on classe souvent ces machines relativement aux nombre de dents statoriques et rotoriques, ainsi il s'agit là d'une "6/4" [43] [44].

Alors : Pas statorique :

$$\alpha_s = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

Pas rotorique :

$$\alpha_r = \frac{360^\circ}{4} = 90^\circ$$

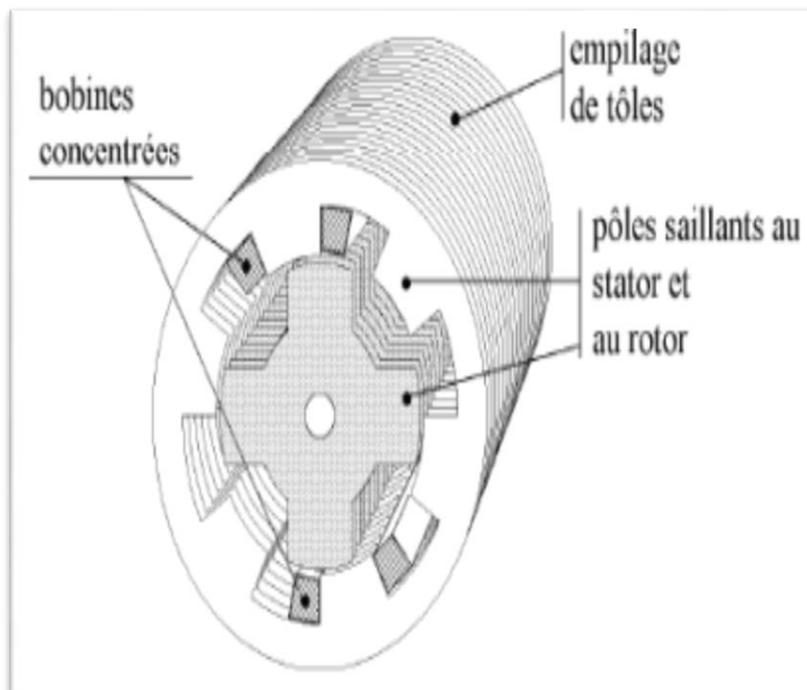


Fig.II.3.Structure électromagnétique de la machine a reluctance variable 6/4 [17]

II.5. Structure de base d'une MRV :

Le principe de fonctionnement d'une machine à réluctance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous figure

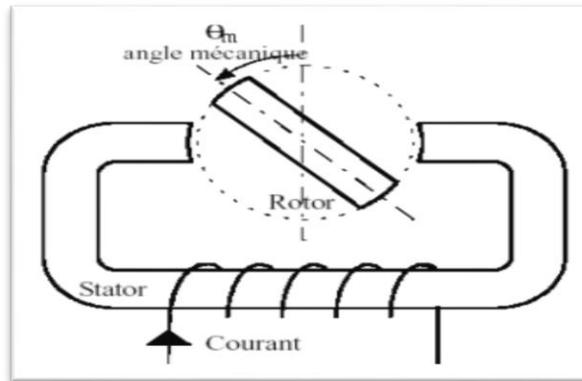


Fig.II.4.Machine à réluctance variable structure élémentaire [17]

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
- Une position de conjonction où la réluctance est minimale donc inductance maximale, figure (II.5) [17].

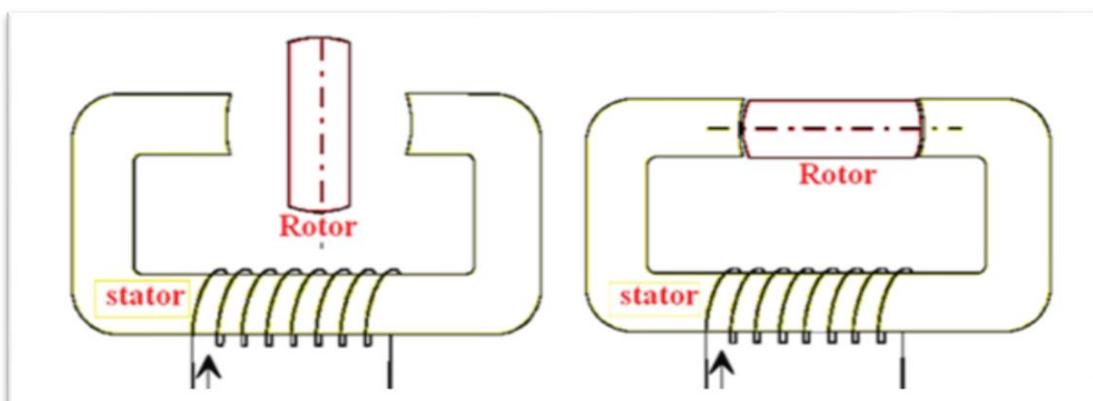


Fig.II.5 Respectivement : la position d'opposition et la position de conjonction du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes [17]

A partir de la position d'opposition ($\theta_m = 0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, par le principe qui veut qu'un circuit abandonné à lui-même dans un champ magnétique se déplace sous l'effet des forces de Laplace jusqu'à ce que le flux qui le traverse soit maximal.

On alimente l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \frac{\pi}{2}$), selon la règle du flux max ou de la reluctance min, et ainsi de suite ...

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\delta L}{\delta \theta} \tag{2.1}$$

L'alimentation de la machine avec une tension constante lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Fig) donne le régime de fonctionnement demandé [17] :

- Moteur ($C_{em} > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\frac{\delta L(\theta)}{\delta \theta} > 0$
- générateur ($C_{em} < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\frac{\delta L(\theta)}{\delta \theta} < 0$

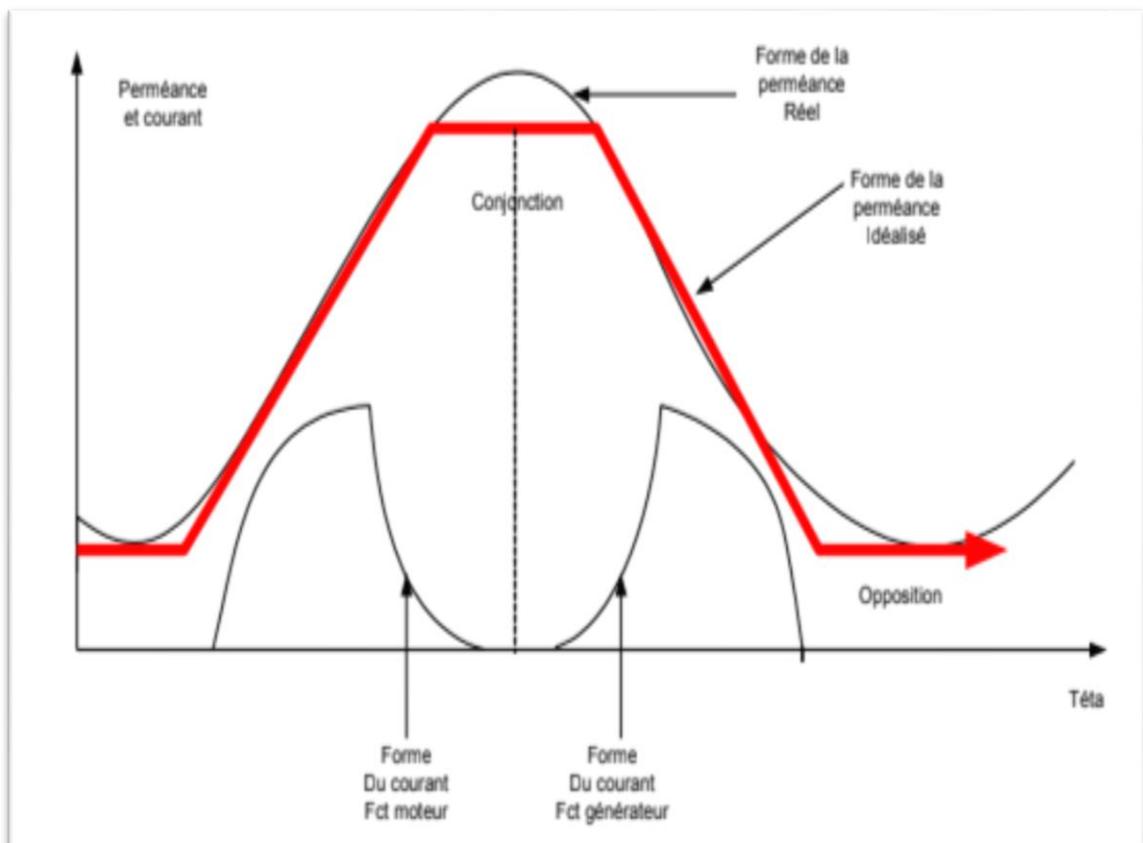


Fig.II.6.Caractéristiques de la MRV en fonction de la position [18]

II.6. Mode fonctionnement d'un moteur a réluctance variable

Le principe de fonctionnement du moteur à réluctance variable est simple, prenons une pièce en fer. Si nous le maintenons dans un champ magnétique, la pièce de fer s'alignera avec la position de réluctance minimale et se verrouillera magnétiquement. Le même principe est suivi dans le moteur à réluctance variable. Comme son nom l'indique, un onduleur de commutation est nécessaire pour le fonctionnement d'un moteur à réluctance commutée. Il fonctionne sur le principe de la réluctance variable, ce qui signifie que le rotor essaie toujours de s'aligner le long du chemin de réluctance le plus bas. La partie à réluctance minimale du rotor essaie de s'aligner avec le champ magnétique du stator. Par conséquent, le couple de réluctance est développé dans le rotor. Ce moteur exploite le fait que les forces d'un champ magnétique sur le fer dans le rotor peuvent être jusqu'à dix fois supérieures aux forces magnétiques sur les conducteurs porteurs de courant.

Dans notre moteur, considérons la notation suivante pour une meilleure compréhension

Pôles de stator :

- Axe des pôles AA' pour la phase A
- Axe des pôles BB' pour la phase B
- Axe des pôles CC' pour la phase C

Pôles rotors

- aa ' axe des pôles du rotor pour la Position 1
- bb ' axe des pôles du rotor pour la position 2

Maintenant, l'entrée est donnée à la phase A, les autres phases B et C ne sont ni maximales ni minimales, puis l'axe des pôles du stator AA' et l'axe des pôles du rotor aa' sont alignés la figure II.7 indique que la phase A a atteint la position de réluctance minimale.

Parce que l'entrefer entre le stator et le rotor est très inférieur et qu'ils ont une position de réluctance minimale par rapport aux autres pôles. Alors,

$$\mathbf{T} = \frac{dL_a}{d\theta} = \mathbf{0}$$

Maintenant, la phase A sera désactivée et la phase B est alimentée. Puis l'axe du rotor bb' devient l'axe du stator BB'. Déplacez-vous dans le sens des aiguilles d'une montre selon:

Notre schéma. En changeant la polarité du moteur, on peut facilement inverser le moteur. Le couple évolue puisque la réluctance passe d'un maximum à un minimum. Le couple développé est égal à

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dLb}{d\theta}$$

Le mouvement du rotor dépend du nombre de pôles et dans notre cas, nous obtenons une rotation de 30 degrés en alimentant une phase à la fois. Les gars ici, le couple n'est rien d'autre qu'un mouvement de rotor uniquement. Lorsque l'arbre arrive en position BB'. Il n'y a alors pas de couple.

$$\mathbf{T} = \frac{dLb}{d\theta} = 0$$

Maintenant, la phase B sera désactivée et la phase C sera activée. Ensuite, le couple est développé car l'axe du rotor aa' est aligné avec l'axe du stator CC'. Le rotor continue de tourner pendant 30 degrés supplémentaires.

Encore une fois, C sera éteint et A sera regardé. Le fonctionnement du moteur se poursuit jusqu'à l'alimentation d'entrée. Ici, vous pouvez observer que le moteur tourne par lui-même. Ainsi, les moteurs à réluctance commutée sont des moteurs à démarrage automatique.

Le circuit de commande surveille en permanence la vitesse du moteur et le courant d'entrée. si la vitesse du moteur chute par rapport à la référence, alors la commande considère qu'il y a un besoin de couple élevé.

Par conséquent, il augmente le courant d'entrée du moteur pour répondre à l'exigence de vitesse. Dans le cas où le courant du moteur est atteint au-delà du courant de pleine charge, il déclenche le moteur [19].



Fig.II.7.Structures des MRV pour différentes combinaisons des nombres de dents et de phases [19]

Selon la règle du flux maximal correspond à la réluctance minimale et le cycle se répète périodiquement

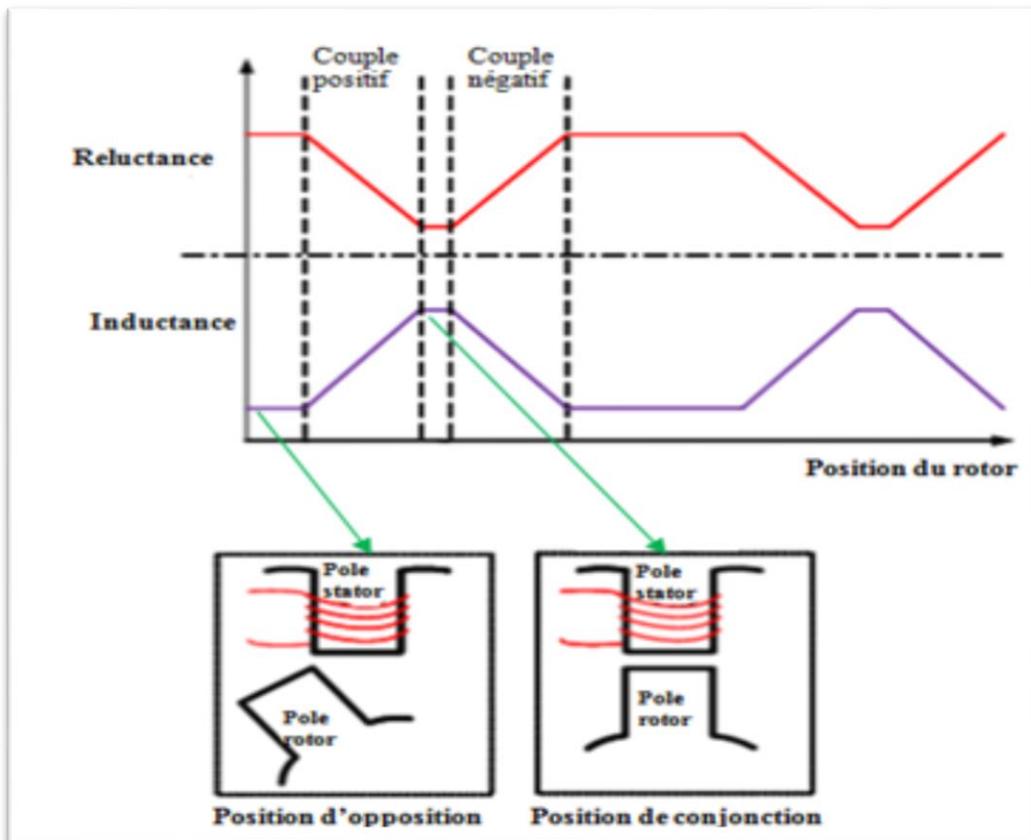


Figure. II.8. Structure élémentaire du MRV et positions extrêmes de la dent du rotor [19]

II.7. Types de moteur à réluctance variable

La catégorisation du moteur à réluctance commutée peut être effectuée en fonction de la construction comme MRV linéaire ainsi que MRV rotatif.

- **MRV linéaire**

Les moteurs linéaires MRV ou à réluctance commutée linéaire sont connus sous le nom de servomoteurs sur le marché. Il comprend un stator à un étage ainsi que le rotor.

- **MRV rotatif**

Les moteurs rotatifs MRV ou à réluctance commutée rotative sont disponibles en deux types, à champ radial et à champ axial. Les MRV à champ axial sont classés en deux types, à savoir une pile unique et plusieurs piles. Ce MRV rotatif comprend plus d'un rotor et d'un stator [16].

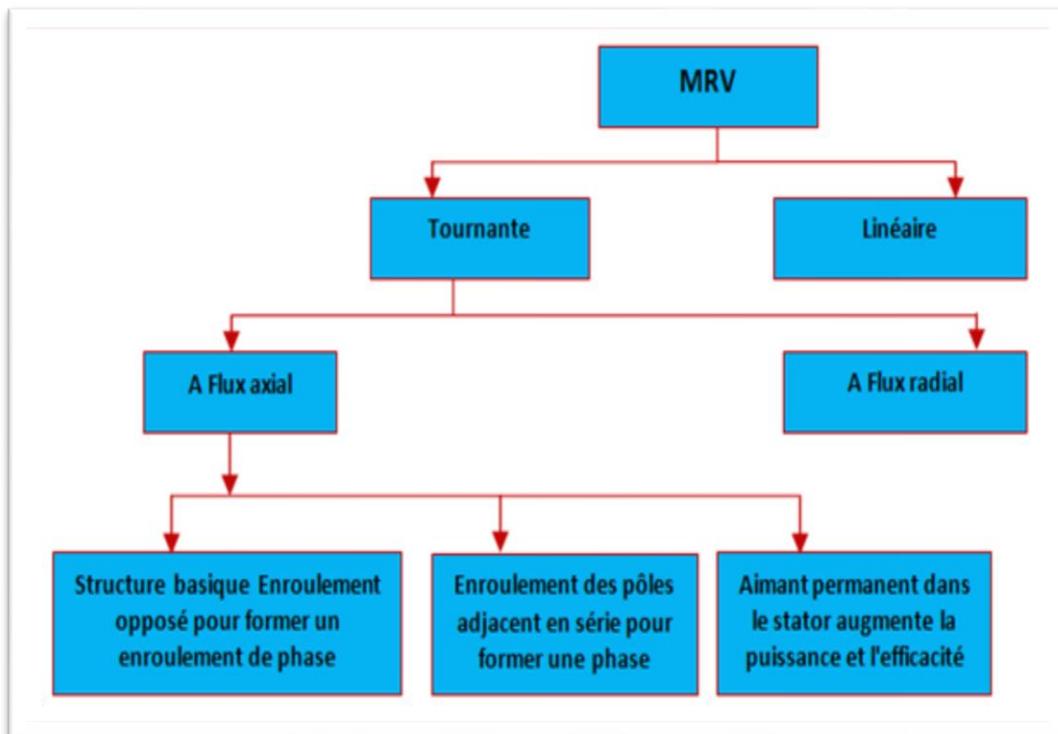


Fig.II.9. Classification des MRV selon le type de mouvement, flux et mode d'excitation [16]

II.8. Topologies des MRV tournantes

Les MRV peuvent être à mouvement rotatif ou linéaire, mais dans notre cas nous allons nous intéresser aux machines tournantes. Il existe plusieurs configurations géométriques pour les MRV rotatifs, les plus usuelles sont celles qui considèrent le nombre de pôles statoriques plus élevé que le nombre de pôles rotoriques (cela n'empêche pas que dans

certains cas le rotor contient plus de dent que le stator). Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent, entre autres :

La valeur du couple et sa forme lors du démarrage, du freinage et en régime permanent.

- Le type d'alimentation (triphase, monophasé, etc.) et le circuit de commande utilisé.
- Les chemins de flux magnétique et les pertes fer produites.

II.8.1. MRV purs

Les MRV dits "purs" ont 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). Alimentés avec une tension ou un courant de forme rectangulaire (alimentation en créneaux), ils induisent des couples à caractère pulsé considéré comme inconvenient. On peut citer divers types de structures de MRV purs :

- Structures à double denture à gosses dents à 2 dents par phase (figure ci-dessous). Structures à double denture à gosses dents 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 ».



Fig.II.10. MRV pur à grosses dents [17]

II.8.2. MRV à effet Vernier

Les MRV à effet Vernier ont des structures identiques aux MRV pures sauf qu'ils possèdent des enroulements repartis et sont alimentées en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. Il existe des machines dites «Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes sur chaque armature, les dents sont identiques et équiréparties mais les nombres de dents statoriques et rotoriques sont légèrement différents (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance 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 les performances couple-vitesse sont comparables à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.

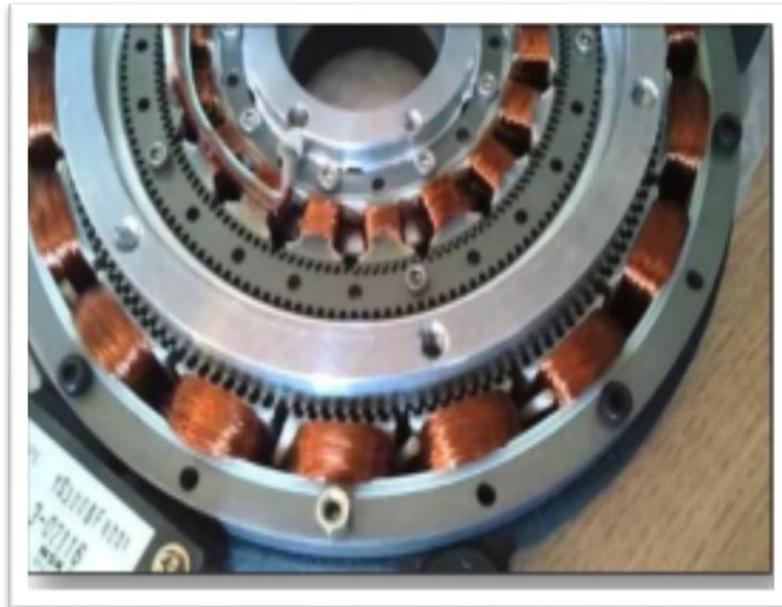


Fig II.11. MRV à effet Vernier [17]

II.8.3. MRV hybrides

Les MRV hybrides ont parfois la même structure que les deux types précédents, mais en plus ils sont dotés d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé. Deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS: l'une met en œuvre des aimants placés au rotor (figure II.4), la machine se rapprochant des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet); la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise des aimants placés au stator: on obtient alors une machine

à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée ». [17].

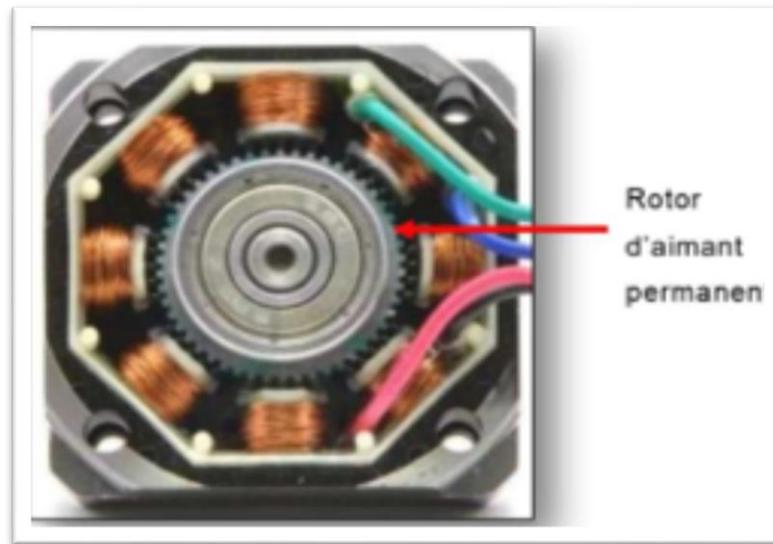


Fig.II.12.MRV hybride [17]

II.9. Applications des MRV

Dans les applications de moteurs à réluctance variable, à la fois énergétiques et économiques, l'efficacité joue un rôle essentiel. Le moteur à réluctance variable est envisagé, de nos jours, pour des applications allant des servomoteurs de faible puissance aux entraînements de traction de forte puissance. Des moteurs de puissances variant de 4 à 22 kW sont actuellement disponibles dans le commerce pour de nombreuses applications. Les applications typiques incluent [34]:

- Les appareils électroménagers tels que les machines à laver, les aspirateurs, les ventilateurs.
- Machines-outils : Raboteuses , tours verticaux, perceuses.
- Machinerie générale : ventilateurs, pompes, compresseur.
- Machines à mélanger les aliments.
- Engins de levage : élévateurs, treuils, convoyeurs.
- Équipement de production d'énergie : contrôle de la charge des pales du rotor de l'éolienne.
- Fabrication de plastique : machines d'extrusion, machines de moulage par injection.
- Machines de papeterie.

- Laminoir à métaux.
- Machines d'enroulement et de déroulement de bobines.
- Machines pour champs pétrolifères, y compris pompes verticales, pompes à faisceau, machines d'essai de puits.
- Presses mécaniques telles que les presses à vis.
- Machines minières, y compris cisailles, convoyeurs, treuils, aléseuses, broyeurs à boulets, concasseurs de charbon.
- Véhicules électriques.

II.10. Avantage du MRV

- Il ne nécessite pas de système de ventilation externe. Le flux d'air maintenu entre les fentes.
- Le rotor n'a pas de bobinage car il n'est donc pas nécessaire de maintenir l'ensemble balai de charbon et bague collectrice.
- Depuis l'absence d'aimant permanent, de tels moteurs sont disponibles à un prix moins cher.
- Un simple générateur d'impulsions triphasé ou biphasé suffit pour entraîner le moteur
- La direction du moteur peut être inversée en modifiant l'ordre des phases.
- Auto-démarrage et ne nécessite pas d'arrangements externes.
- Le couple de démarrage peut être très élevé sans courants d'appel excessifs.
- Haute tolérance aux pannes
- Les pertes de phase n'affectent pas le fonctionnement du moteur.
- Rapport couple/inertie élevé
- Un couple de démarrage élevé peut être atteint.

II.11. Inconvénient du MRV :

- Crée une ondulation de couple lors d'un fonctionnement à grande vitesse
- Le capteur de position du rotor externe est requis.
- Le niveau de bruit est élevé
- À une vitesse plus élevée, le moteur génère des harmoniques, pour réduire cela, nous devons installer des condensateurs de plus grande taille.

- Depuis l'absence d'aimant permanent, le moteur doit être conçu pour supporter un courant d'entrée élevé. Il augmente l'exigence de KVA du convertisseur [16].

II.12. Caractéristiques couple-vitesse

Le point de fonctionnement couple-vitesse d'un MRV est essentiellement programmable et déterminé presque entièrement par le contrôle. C'est l'une des caractéristiques qui rend le MRV attractif Solution. L'enveloppe des possibilités d'exploitation est bien sûr limitée par les contraintes physiques Tels que la tension d'alimentation et l'échauffement admissible du moteur en cas d'augmentation Charge. De manière générale, cette enveloppe est décrite par la figure(II.13).

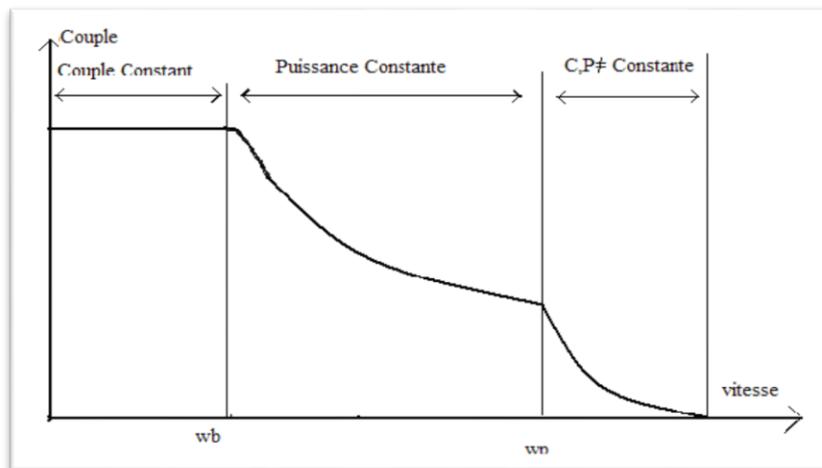


Fig.II.13. Caractéristiques couple-vitesse [16]

Comme les autres moteurs, le couple est limité par le courant maximal autorisé et la vitesse par le bus disponible Tension. Avec l'augmentation de la vitesse de l'arbre, une région de limite de courant persiste jusqu'à ce que le rotor atteigne une vitesse où la force contre-électromotrice du moteur est telle que, compte tenu de la limitation de tension du bus CC, nous pouvons n'obtenons plus de courant dans l'enroulement, donc plus de couple du moteur. À ce stade, appelé la vitesse de base, et au-delà, la puissance de sortie de l'arbre reste constante, et à son maximum. Toujours des vitesses plus élevées, la force contre-électromotrice augmente et la puissance de sortie de l'arbre commence à chuter. Cette région est caractérisée par le produit du couple par le carré de la vitesse restant constant. [20].

II.13. Énergie/Co énergie et couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est l'un des grandeurs physiques principales caractérisant un moteur électrique. Pour obtenir l'expression du couple, plusieurs approches existent : la méthode qui utilise l'énergie et la Co énergie magnétiques est parmi les plus utilisées.

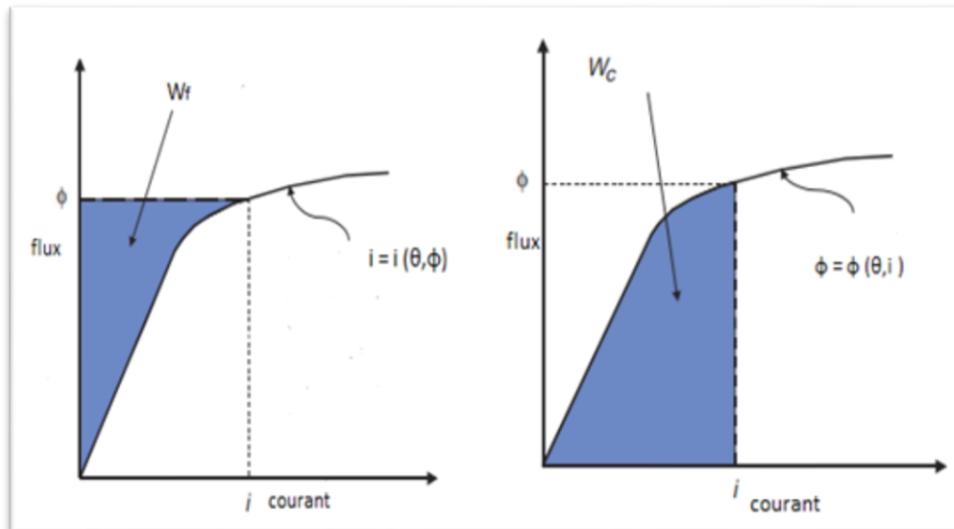


Fig.II.14. Energie et Co-énergie électromagnétique dans un circuit magnétique [20]

II.14.L'équation électromagnétique d'un MRV

Bien que le fonctionnement du moteur SR semble simple, une analyse précise du comportement du moteur nécessite une approche mathématique formelle et relativement complexe. La tension instantanée aux bornes d'une seule phase d'un bobinage moteur SR est liée au flux lié dans le Bobinage selon la loi de Faraday [20].

$$\mathbf{V} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{R}_m + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

En raison de la double construction saillante du moteur SR (à la fois le rotor et le stator ont des pôles saillants) et à cause des effets de saturation magnétique, en général, le flux lié dans une phase MRV varie en fonction de la position du rotor, θ , et du courant moteur. Ainsi, l'équation (1) peut être étendue

$$\mathbf{v} = \mathbf{iRm} + \frac{\delta\phi}{\delta i} \frac{di}{dt} + \frac{\delta\phi}{\delta\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2)$$

II.14.1. Équation générale de couple

L'équation (2.2) régit le transfert d'énergie électrique vers le champ magnétique du SRM. Dans cette section, les équations qui décrivent la conversion de l'énergie du champ en énergie mécanique sont développées. La multiplication de chaque côté de l'équation (2.1) par le courant électrique, i , donne une expression pour la puissance instantanée dans un SRM,

$$vi = i R_m + i \frac{d\theta}{dt} \quad (2.3)$$

la somme de la puissance mécanique de sortie du SRM et de toute puissance stockée dans le champ magnétique ainsi [21].

$$i \frac{d\theta}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (2.4)$$

Où

$\frac{dW_m}{dt}$: est la puissance mécanique instantanée,

$\frac{dW_f}{dt}$: est la puissance instantanée, qui est stockée dans le champ magnétique. Parce que la puissance, selon sa propre définition, est le taux de changement dans le temps d'énergie,

W_m : est l'énergie mécanique

W_f : est l'énergie du champ magnétique.

Il est bien connu que la puissance mécanique peut être écrite comme le produit du couple et de la vitesse.

$$\frac{dW_m}{dt} = t\omega = t \frac{d\theta}{dt} \quad (2.5)$$

On remplace de l'équation (2.5) dans l'équation (2.4) donne

$$i \frac{d\theta}{dt} = t \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (2.6)$$

La résolution de l'équation (2.6) pour le couple donne l'équation :

$$t(\theta, \varphi) = i(\theta, \varphi) \frac{d\varphi}{d\theta} - \frac{dW_f(\theta, \varphi)}{d\theta} \quad (2.7)$$

Pour un flux constant, l'équation (2.7) se simplifie en :

$$T = - \frac{\delta W_f}{\delta \theta} \quad (2.8)$$

Puisqu'il est souvent souhaitable d'exprimer le couple en termes de courant plutôt que de flux, on peut aussi exprimer le couple en termes de Co-énergie, W_c , au lieu d'énergie.

Pour introduire le concept de Co-énergie, considérons d'abord une interprétation graphique de l'énergie de champ. Pour un angle d'arbre constant $\frac{d\theta}{dt} = 0$ l'intégration de l'équation (6) montre que l'énergie du champ magnétique peut être donnée par :

$$W_f = \int_0^\varphi i(\theta, \varphi) d\varphi \quad (2.9)$$

Pour l'angle fixe, θ , laissez la courbe de magnétisation définir le flux en fonction du courant, au lieu de courant défini en fonction du flux. La zone ombrée sous la courbe,

$$W_c = \int_0^i \varphi(\theta, i) di \quad (2.10)$$

L'équation (2.10) est définie comme la Co-énergie du champ magnétique. À partir de les figures nous voyons que la zone définissant le champ énergie et Co-énergie peut être décrit par la relation

$$W_c + W_f = i\varphi \quad (2.11)$$

La différenciation des deux côtés de l'équation (11) donne :

$$dW_c + dW_f = \varphi di + i d\varphi \quad (2.12)$$

Résolution de l'énergie de champ différentiel dans l'équation (2.12) et remplacement dans l'équation (2.7) :

$$T = \frac{i\varphi d - (\varphi di + i d\varphi - dW_c(\theta, i))}{d\theta} \quad (2.13)$$

Pour simplifier, l'équation générale du couple, l'équation (2.13), est généralement simplifiée pour les valeurs de courant constant. La Co-énergie différentielle peut être écrite en termes de sa dérivée partielle comme :

$$dW_c(\theta, i) = \frac{\delta W_c}{\delta \theta} d\theta + \frac{\delta W_c}{\delta i} di \quad (2.14)$$

À partir de l'équation (2.13) et de l'équation (2.14), on peut montrer l'équation suivant sous un courant constant :

$$T = \frac{\delta W_c}{\delta \theta} \quad (2.15)$$

Lorsque la saturation magnétique est négligée, la relation entre le flux et courant est donné par :

$$\varphi = L(\theta).i \quad (2.16)$$

L'inductance de moteur ne varie pas, on remplace l'équation 16 dans l'équation (2.10) :

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 L(\theta) \quad (2.17)$$

On remplace l'équation (2.17) on (2.15) :

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.18)$$

On a aussi La puissance électromagnétique

$$P_{em} = f.W \quad (2.19)$$

Avec f est la fréquence électrique d'alimentation qui peut s'écrire à partir de la pulsation de rotation du moteur

$$f = N_r \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \quad (2.20)$$

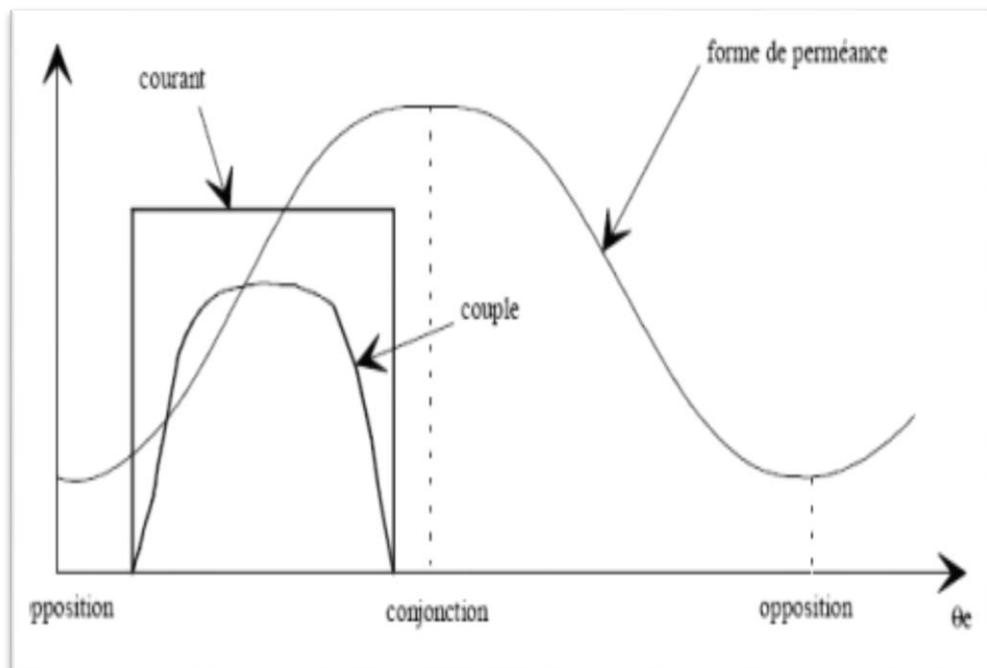


Fig.II.15. Variation du couple en fonction de la position rotorique [20]

II.15. Equation mécanique

Si l'on néglige le frottement sec et si on suppose un couple de charge linéaire, on peut définir un modèle mécanique linéaire de la forme

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} + fr\Omega + TL \quad (2.21)$$

II.16. Choix d'une structure d'étude

Notre étude porte sur les machines à réluctance variables (MRV) en fonctionnement générateur de ratio 6/4. Etudier cette configuration revient à analyser les performances globales des machines à réluctance variable à plus grand nombre de pôles ayant les mêmes principes de fonctionnement, Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire ou une MRV 6/4. L'ensemble convertisseur-générateur est ensuite analysé en vue de sa commande. Les dimensions de la machine sont ceux utilisés par les travaux de qui présente des paramètres détaillés de la MRV 6/4 que nous nous sommes inspirés.

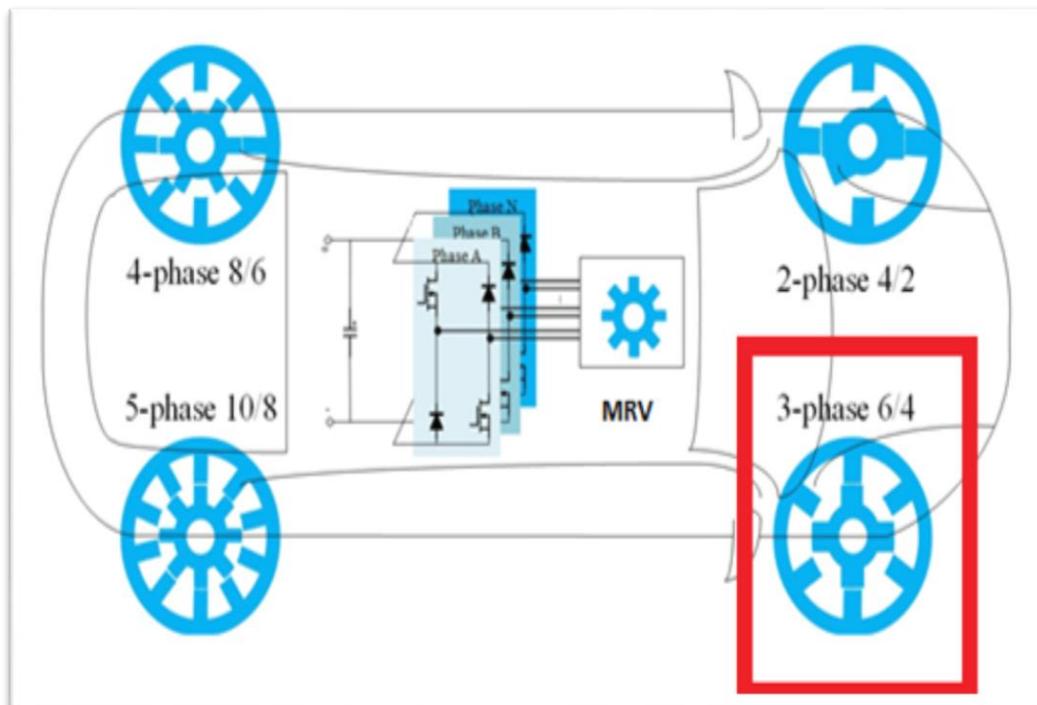


Fig.II.16. Structure de choix de MRV

II.17. Alimentation de la MRV

Le type de convertisseur alimentant le MRV dépend de la géométrie du moteur, du nombre de phases et des spécifications de l'application. Les MRV sont également dotés de capteurs de position permettant de détecter la position du rotor pour synchroniser les séquences d'alimentations des phases. , la topologie de pont asymétrique est la plus populaire et largement utilisée [26].

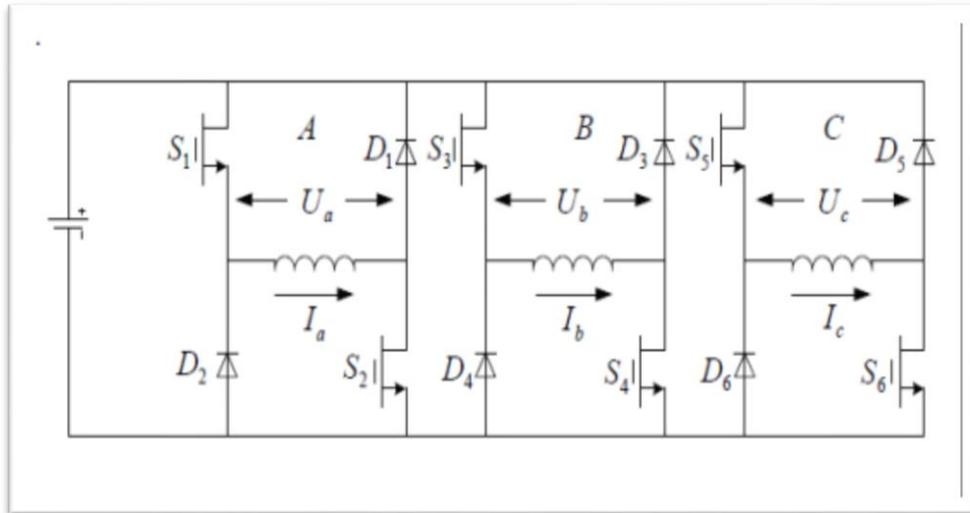


Fig.II.17.Topologie du convertisseur asymétrique [26]

Il existe trois modes de fonctionnement de cette topologie de convertisseur, qui sont définis : le mode de magnétisation, le mode de roue libre et le mode de démagnétisation. Comme le montre la figure (II.17), la direction actuelle de trois modes est indiquée par la flèche rouge. En activant les interrupteurs S1 et S2, la phase A est excitée par la source de tension et le courant de phase commence à augmenter. Ce processus s'appelle la magnétisation. En désactivant seulement S1 tout en maintenant S2, la diode D2 est conduite et l'alimentation en tension est coupée. Ce processus est appelé roue libre et le courant diminuera lentement pendant cette période. Lorsque les deux commutateurs S1 et S2 sont fermés, les diodes D1 et D2 sont conduites et la tension négative est appliquée sur l'enroulement de phase. Ce processus s'appelle la démagnétisation. Le courant de phase chutera considérablement sous la tension de démagnétisation [33], la forme d'onde actuelle est illustrée à la Fig (II.18).

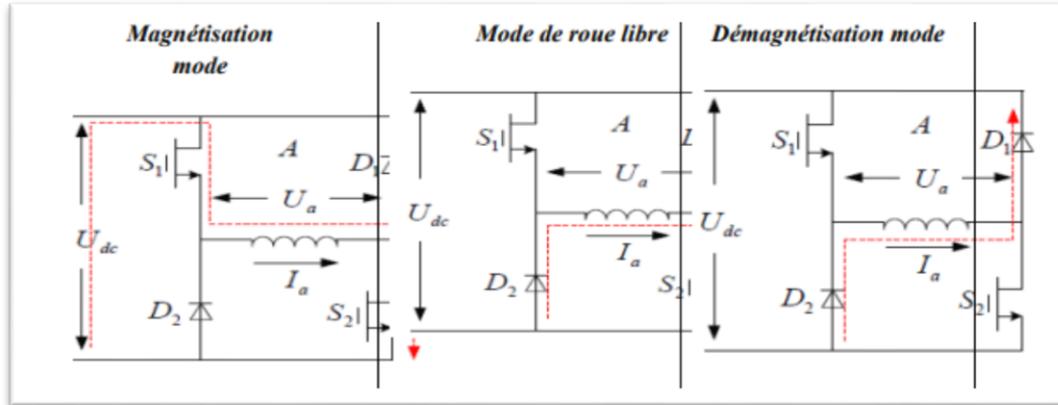


Fig.II.18.Les modes de fonctionnement d'un convertisseur asymétrique [33]

Tab.II.1. Séquences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique

	S1	S2	Tension de phase
1	Conducteur	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	Conducteur	0(phase roue libre)
3	Bloqué	Bloqué	$-V_{dc}$ (phasedémagnétisation)

Grâce à sa possibilité d'alimenter indépendamment les phases, ce type de convertisseur rend la machine plus fiable. De plus, cette structure permet d'alimenter le MRV dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse et peut fonctionner dans une très large gamme de vitesse [27].

II.18.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales de base sur les machines à réluctance variable, leur principe de fonctionnement et les différents concepts et modélisation .

L'alimentation et la commande de la machine à réluctance variable restent toujours indissociables de cette dernière. Dans cette section, nous avons évoqué le principe de l'alimentation du MRV a travers le convertisseur a demi pont asymétrique qui est très bien adapté au fonctionnement de ce moteur. Cependant, le développement d'algorithmes de commandes performants nécessite une bonne connaissance du modèle de la machine, en ce sens nous avons présenté ce modele pour pouvoir par la suite lui associer la commande appropriée.

Chapitre III
Commande et contrôle
d'un MRV6/4

II.1.Introduction

Plusieurs stratégies de contrôle existent dans la littérature. La plus simple est celle de la régulation à base d'un simple PI. Dans ce chapitre, nous mettrons en évidence la commande du MRV allant d'un simple PID à la commande directe du couple DTC pour régler le problème des ondulations du couple qui sont principalement le seul inconvénient du MRV et qui lui sont freinasses pour en faire le moteur du premier choix. Les résultats de la simulation sous environnement Matlab/Simulink sont présentés, discutés, analysés et comparés dans ce chapitre pour un MRV 6/4 pour résoudre le problème des ondulations du couple.

Notons que les paramètres du modèle du MRV objet de notre étude ont été puisés de la littérature.

III.2. Configuration du MRV

Les moteurs à réluctance variable sont disponibles en différentes configurations Mais ici, nous mettons l'accent sur la configuration 6/4. Cela a 3 pôles paires au stator et paires à 2 pôles au rotor. C'est aussi appelé MRV triphasé. La MRV est alimenté par un convertisseur de puissance asymétrique triphasé à trois branches, dont chacun se compose de deux IGBT et de deux diodes de roue libre. Pendant les périodes de conduction, les actifs Les IGBT appliquent une tension de source positive au stator enroulements pour conduire des courants positifs dans la phase enroulements. Pendant les périodes de roue libre, la tension négative est appliquée aux enroulements et l'énergie stockée est renvoyé à la source d'alimentation CC par les diodes. Le temps de descente des courants dans les enroulements du moteur peut être ainsi réduit. En utilisant un capteur de position fixé au rotor, les angles d'activation et de désactivation des phases du moteur peuvent être imposés avec précision. Ces angles de commutation peuvent être utilisés pour contrôler les formes d'onde de couple développées, La fréquence de commutation des IGBT est principalement déterminée par la bande d'hystérésis [28].

III.3. Schéma de fonctionnement de la commande du MRV6/4

La position du rotor est détectée par le capteur de position du rotor et il fournit sa sortie correspondante au détecteur d'erreur. Le détecteur d'erreur compare la vitesse de référence et la vitesse réelle pour générer un signal d'erreur qui est transmis au bloc contrôleur. Le contrôleur donne le signal de commande approprié au convertisseur en fonction du signal d'erreur. La vitesse du moteur est contrôlée par le convertisseur grâce à une excitation appropriée des enroulements correspondants dans le stator.

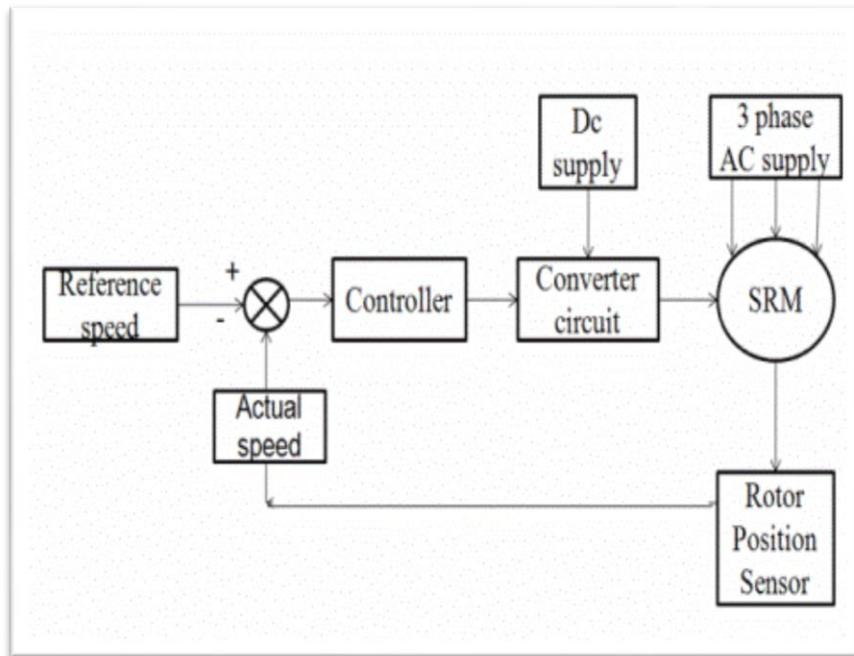


Fig.III.1.Schéma fonctionnel d'un schéma de contrôle MRV [28]

III.3.1. Simulation de modèle MRV 6/4

Une tension immutation continue de 240V est utilisée. Les angles d'activation et de désactivation du convertisseur sont maintenus constants à 45° et 75° , respectivement, sur les plages de vitesse. La référence le courant est de 200A et la bande d'hystérésis est choisie comme $\pm 10A$. Le MRV est démarré en appliquant la référence d'étape à l'entrée du régulateur. Le taux d'accélération dépend les caractéristiques de charge. Pour raccourcir le temps de démarrage, une charge très légère est choisie 5 Nm. Étant donné que seuls les courants sont contrôlés, la vitesse du moteur augmentera en fonction de la dynamique mécanique du système. Le lecteur MRV formes d'onde (tensions de phase, flux

magnétique, enroulements courant, couple moteur et vitesse) sont affichés sur l' oscilloscope figure (III.2).

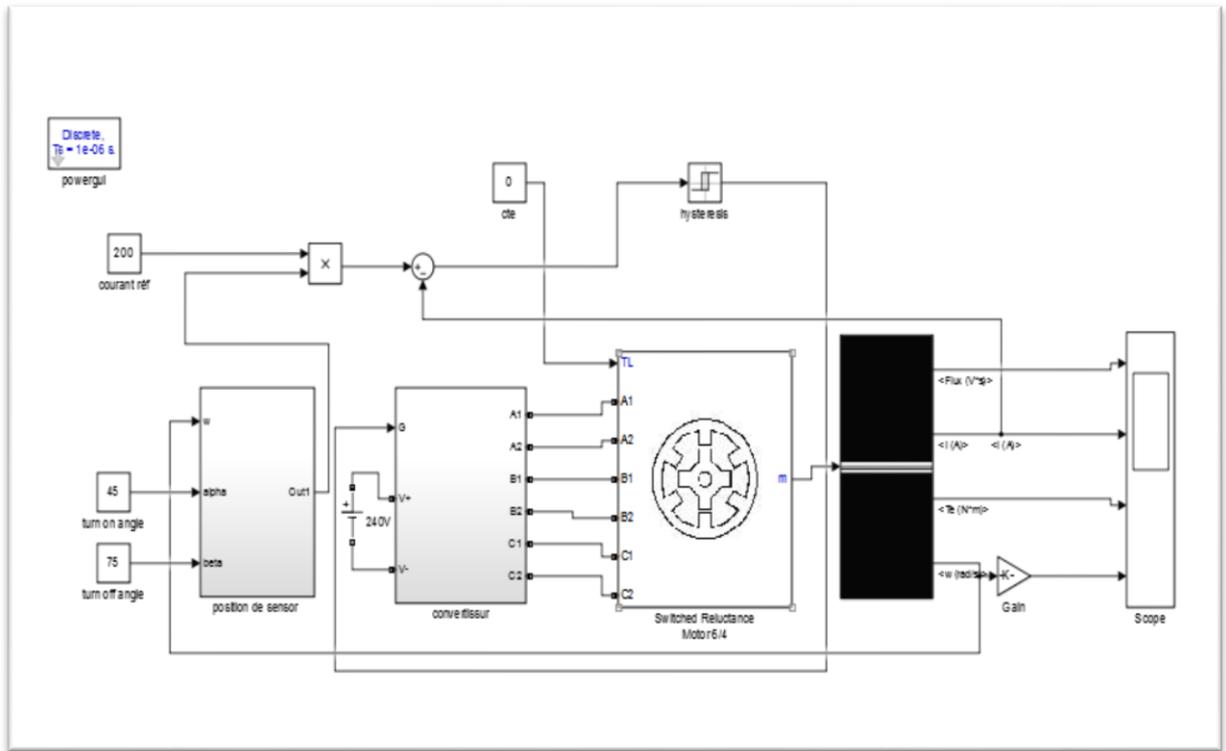


Fig.III.2. Schéma de simulation du MRV 6/4

III.3.2. Résultat de simulation

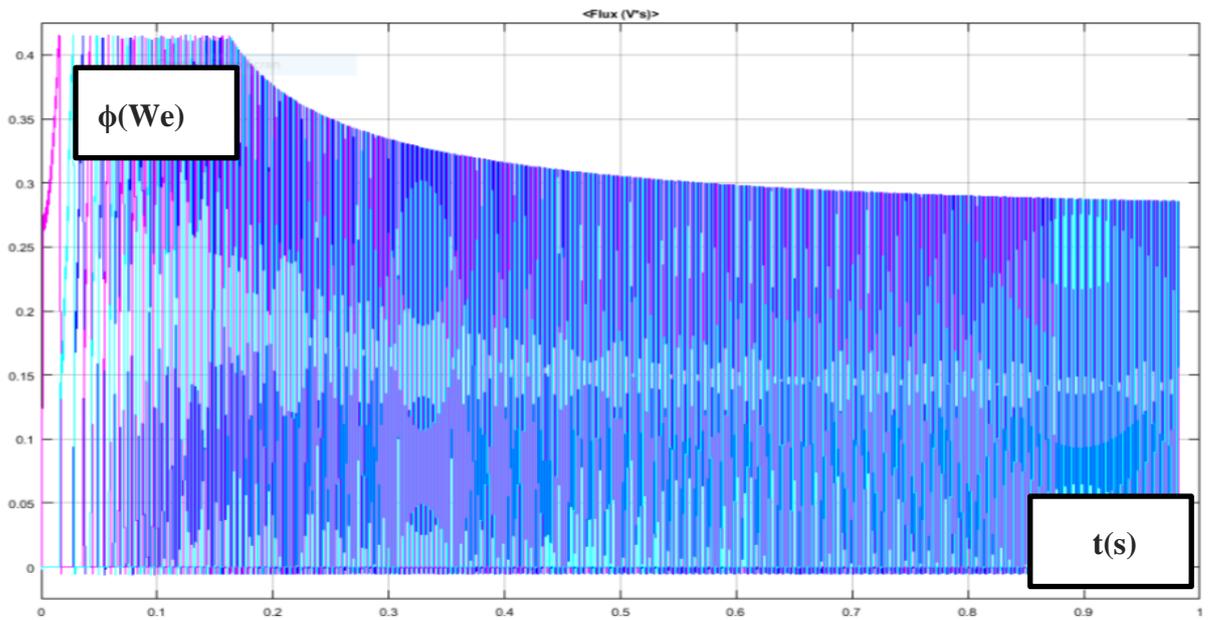


Fig.III.3. Résultat simulation de flux en fonction de temps

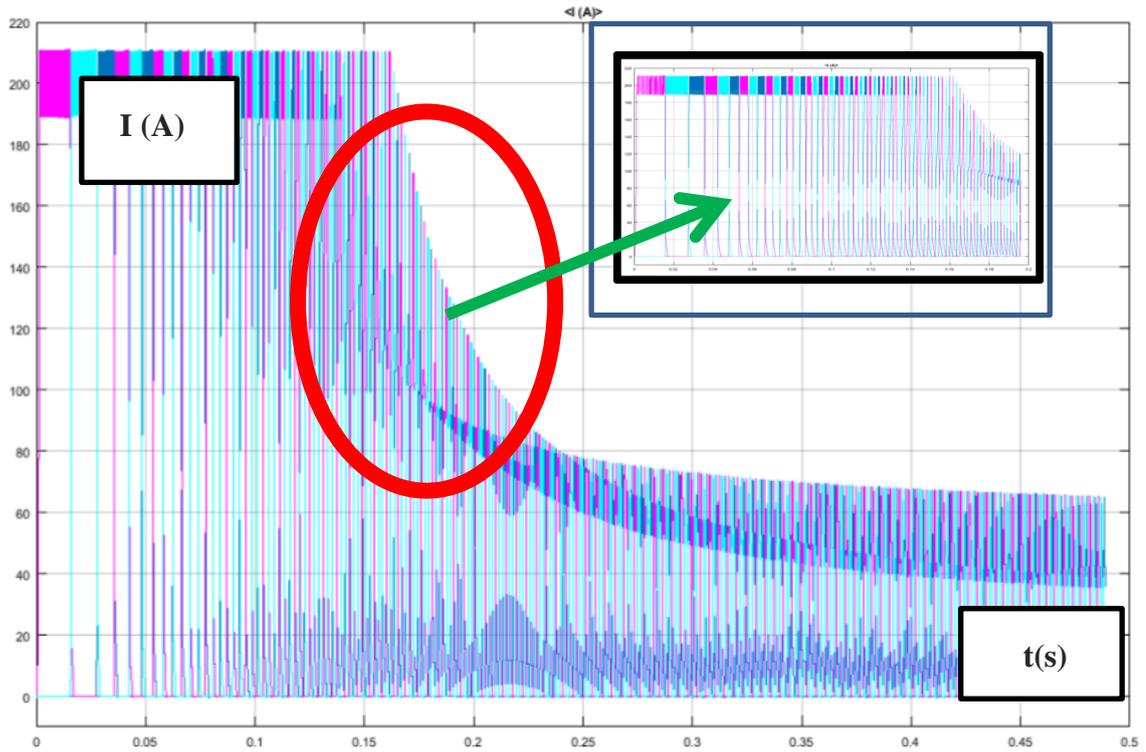


Fig.III.4.Résultat simulation de courant en fonction de temps

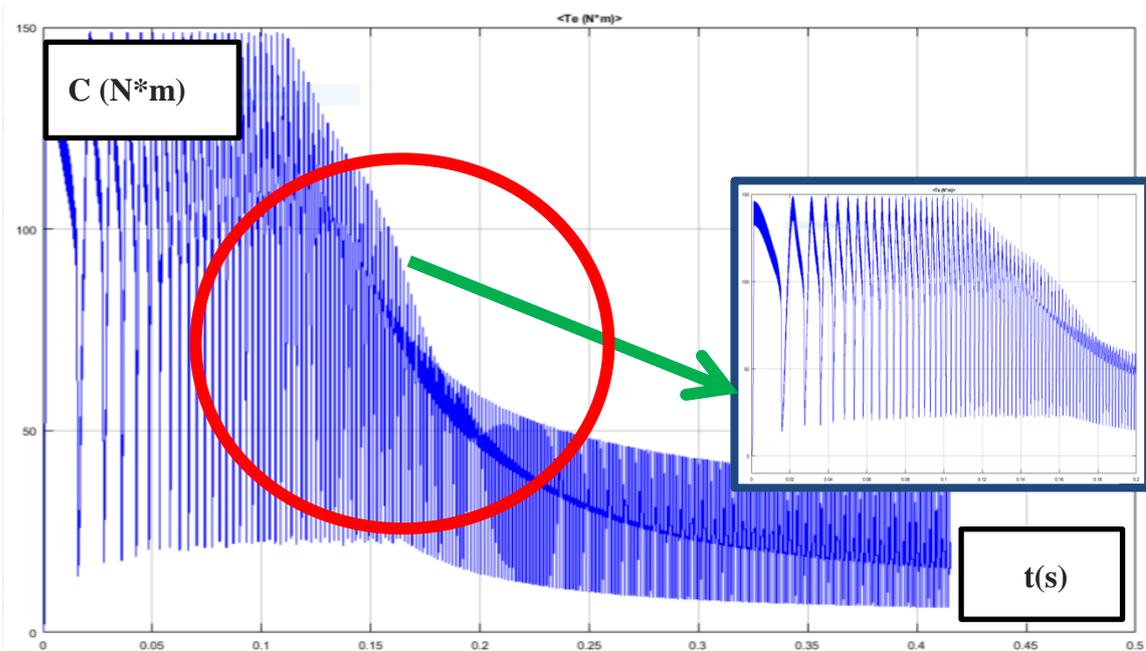


Fig.III.5.Résultat simulation de couple en fonction de temps

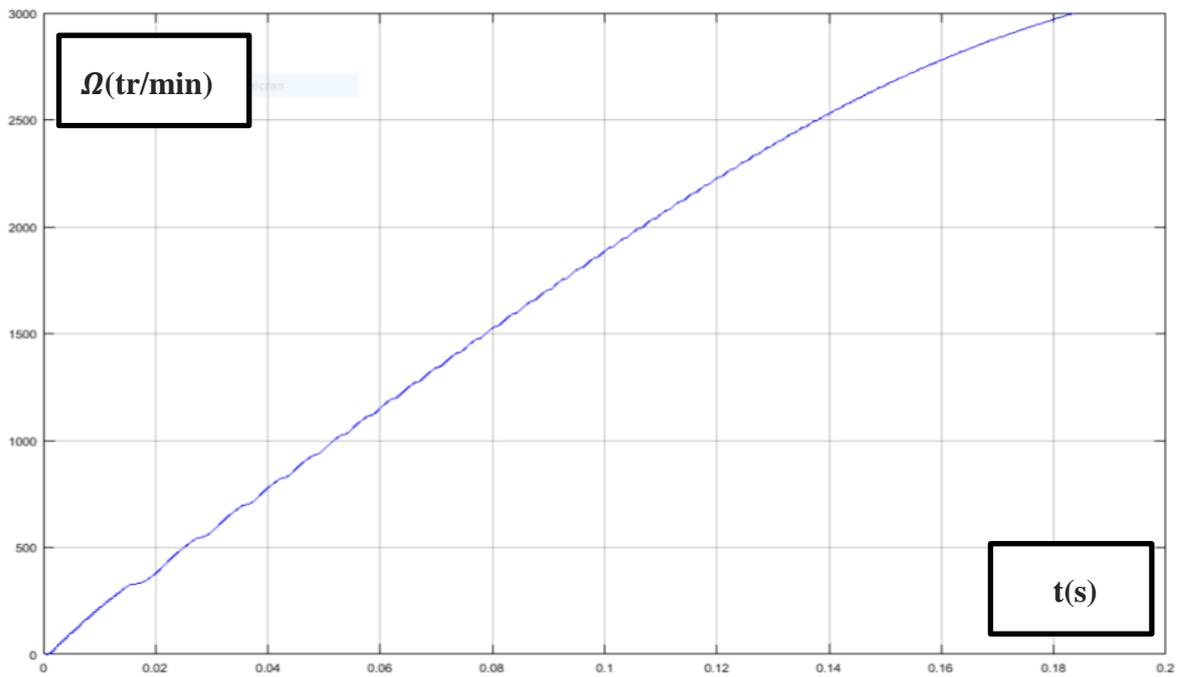


Fig.III.6.Résultat simulation de vitesse en fonction de temps

Le convertisseur utilisé ici est un convertisseur à pont asymétrique qui commute le courant fourni à la phase en fonction de la position du rotor.

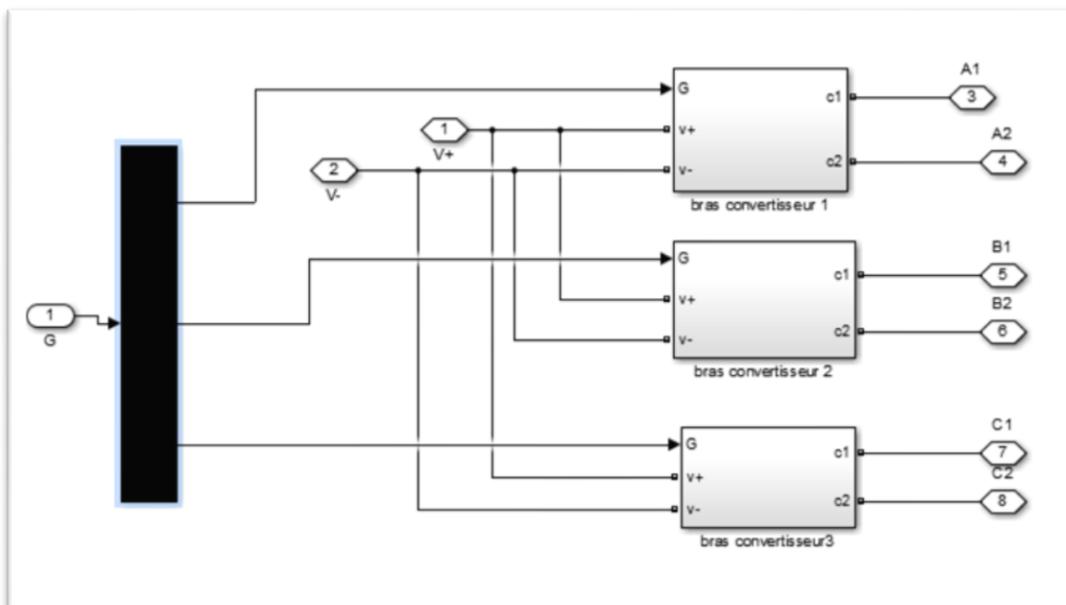


Fig.III.7. Schéma Bloc convertisseur

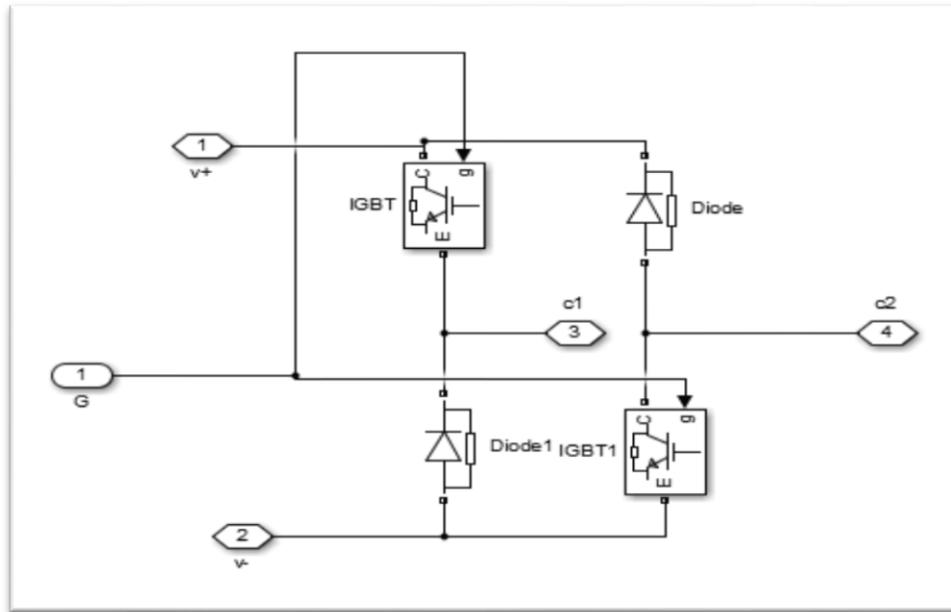


Fig.III.8.Schéma Bloc bras de convertisseur

III.4.Problématique

Le fait est que le MRV est caractérisé par des ondulations du couple très élevée dues à l'alimentation séquentielle des phases et à la forme saillante du rotor ; un simple PI ne nous avancera pas à grand-chose à cause de la forte non linéarité. Pour cette raison, on a opté pour l'utilisation de la commande DTC qui semble être très bien adaptée au fonctionnement des MRV.

Néanmoins, pour pouvoir mettre en évidence l'amélioration du comportement en employant le DTC une comparaison avec la commande par simple PI est nécessaire.

Il y a une autre solution pour réduire les ondulations du couple. Elle se résume à l'emploi du moteur IPMSynRM (internal permanent magnet synchrone reluctance motor), employée dans l'industrie des véhicules électriques contemporains (voiture Tesla S3), mais elle s'avère extrêmement onéreuse à cause de l'utilisation des aimants permanents fabriquée à base de terre rares. Cette alternative va être développée superficiellement dans ce travail en attendant une meilleure investigation future.

III.5. Commande du convertisseur par hystérésis

Afin de maintenir le couple de la machine constant, on va utiliser la deuxième technique. Elle repose sur l'alimentation du MRV par des courants prédéterminés d'après les caractéristiques à partir d'une consigne de couple en forme de trapèze qui assure un couple constant sur une période complète. Cette technique a été souvent réalisée au moyen des régulateurs du courant à hystérésis qui a pour effet d'assurer le même principe décrit au paravent en imposant une référence de courant dans une bande d'hystérésis pour contrôler les courants de phases

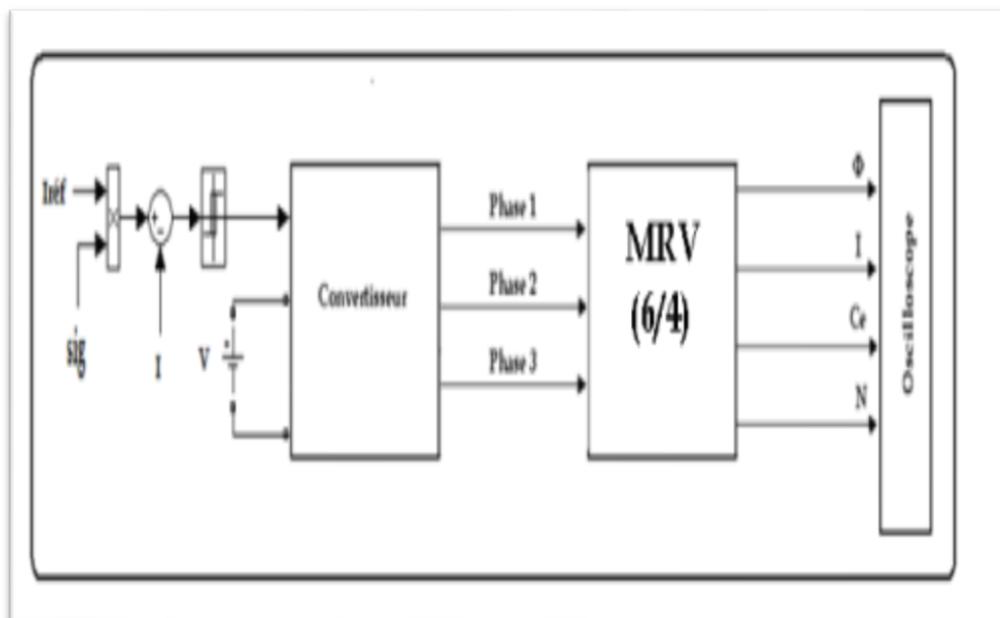


Fig.III.9. schéma de commande du convertisseur par hystérésis [29]

III.5.1. Principe du contrôle par hystérésis

Le principe de ce contrôle est basé sur la commande des interrupteurs du convertisseur de telle sorte que la variation du courant dans la phase du moteur soit limitée dans une bande encadrant la référence du courant. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés à partir de la comparaison instantanée du courant réel à la bande encadrant la référence. La sortie du comparateur est reliée à la logique de commande du convertisseur de manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte de la valeur d'hystérésis de sa référence [29].

III.6.Régulation de la vitesse avec un régulateur PI

III.6.1.Commande classique par régulateur PI

Le régulateurs PI est utilisé dans l'industrie pour les entraînements. Dans beaucoup de processus industriels, le contrôle de la vitesse est indispensable particulièrement lors de phénomènes transitoires. Cela permet d'assurer une bonne qualité du produit. Beaucoup de non - linéarités interviennent dans les entraînements.

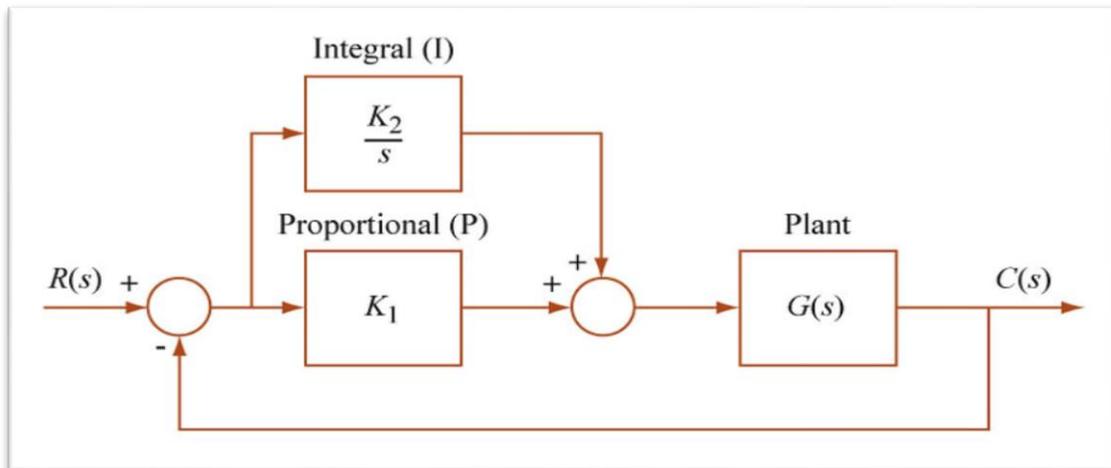


Fig.III.10. Block diagramme PI contrôleur [30]

Pour le MRV les régulateurs de type PI, pour les boucles de régulation en cascade vitesse ont le signal de commande donné par:

$$U=K_p e(t)+K_i \int e(t)dt \quad (3.1)$$

Ou

$e(t)$:l'erreur qui traduit la différence entre la valeur de consigne et celle mesurée de la variable à contrôler.

K_p et K_i : les gains proportionnel et intégral.

Le calcul des gains et pour la boucle de vitesse du MRV utilise l'équation mécanique du MRV qui s'écrit comme suit :

$$\mathbf{T}_e = \mathbf{J} \frac{d\Omega}{dt} + \mathbf{fr}\Omega + \mathbf{TL} \quad (3.2)$$

Les paramètres du régulateur de vitesse PI sont calculés en supposant que la dynamique des boucles de courants est négligeable par rapport à la dynamique de la boucle de vitesse. Ceci est dû à la constante de temps électrique très faible comparée à la constante de temps mécanique. Le signal de commande pour le régulateur de vitesse représente le couple de référence total de la machine T_e' :

$$\mathbf{T}_e' = \mathbf{K}_p (\Omega' - \Omega) + \mathbf{K}_i \int (\Omega' - \Omega) dt \quad (3.3)$$

Ou

$(\Omega' - \Omega)$: l'erreur entre la vitesse de consigne et la vitesse mesurée. On boucle fermée $\mathbf{T}_e = \mathbf{T}_e'$ on peut écrire

$$\mathbf{J} \frac{d\Omega}{dt} + \mathbf{fr}\Omega + \mathbf{TL} = \mathbf{K}_p (\Omega' - \Omega) + \mathbf{K}_i \int (\Omega' - \Omega) dt \quad (3.4)$$

On dérive l'équation :

$$\mathbf{J} \frac{d^2\Omega}{dt^2} + (\mathbf{fr} + \mathbf{K}_p) \frac{d\Omega}{dt} + \mathbf{Ki}\Omega = \mathbf{Ki}\Omega' \quad (3.5)$$

Par représentation d'état :

$$\mathbf{G}(p) = \frac{\mathbf{G}(p)}{\mathbf{L}(p)} \quad (3.6)$$

$$\left[\begin{array}{l} X' = A_x + B_u \\ Y = C_x + D_u \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Ou

$$\mathbf{u} = \Omega' \text{ et } \mathbf{y} = \Omega$$

On suppose que

$$\begin{cases} x_1=y = \Omega \\ x_2=y = \frac{d\Omega}{dt} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} x_1' = y = x_2 \\ x_2' = y'' = x_3 \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec $u=\Omega'$ et $y=\Omega$ on trouve :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} & -\frac{fr}{J} + \frac{Kp}{J} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Ki}{J} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0]$$

En remplaçant les matrices A, B et C par leurs expressions dans l'équation, on aura :

$$G(s) = \frac{\frac{Ki}{J}}{s^2 + \left(\frac{fr}{J} + \frac{Kp}{J}\right)s + \frac{Ki}{J}} \quad (3.9)$$

On décrit le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée comme un dénominateur d'un système de second ordre standard, comme suit :

$$s^2 + \left(\frac{fr}{j} + \frac{Kp}{j}\right)s + \frac{Ki}{j} = s^2 + 2\omega_n \xi_s + \omega_n^2 \quad (3.10)$$

Alors on peut définir les paramètres PI par :

$$\begin{cases} K_p = 2J \omega_n \xi_s + f_r \\ K_i = J \omega_n^2 \end{cases} \quad (3.11)$$

Pour obtenir une réponse en vitesse en boucle fermée avec de bonnes performances, le régulateur de vitesse sera implémenté avec un anti-emballement. La structure du régulateur vitesse PI avec les gains et sont montrés sur la figure

On peut réaliser sous environnement Matlab Simulink la simulation du MRV6/4 avec un contrôle de vitesse assuré par un simple régulateur PI et une commande indirecte du couple comme c'est le cas dans la figure, où on a utilisé le convertisseur asymétrique. Le convertisseur pour une phase est montré à la figure et les paramètres du régulateur PI.

III.6.2.Détermination de K_P , K_i

Le signal de commande est toujours proportionnel au signal d'erreur et au gain proportionnel K_P à l'aide d'un contrôleur proportionnel. Cela aura également pour effet de réduire le temps de montée et l'erreur mais n'éliminera jamais l'erreur. Le contrôle intégral aura pour effet de réduire l'erreur, en principe, à une valeur nulle tandis que le contrôle dérivé est utilisé pour anticiper le comportement futur du signal d'erreur en utilisant des actions correctives basées sur le taux de variation du signal d'erreur.

Le contrôle dérivé aura pour effet d'augmenter la stabilité du système, de réduire le dépassement et d'améliorer la réponse transitoire. L'action de commande dérivée ne peut jamais être utilisée seule car cette action de commande n'est efficace que pendant les périodes transitoires. Le contrôleur PI permet à une boucle de contrôle de répondre plus rapidement avec moins de dépassement et c'est la méthode de contrôle la plus populaire avec une grande marge. L'action combinée présente les avantages de chacune des trois actions de contrôle individuelles [28].

La résistance du stator est de 0,05 ohms et l'inertie du moteur de 0,05 kg/m². La valeur des constantes du contrôleur K_P , K_i et dépend du système à contrôler, donc après un réglage approprié et des tests pour les meilleures conditions, les valeurs de la constante utilisées pour cette analyse ont été obtenues comme illustré dans la figure(III.11)

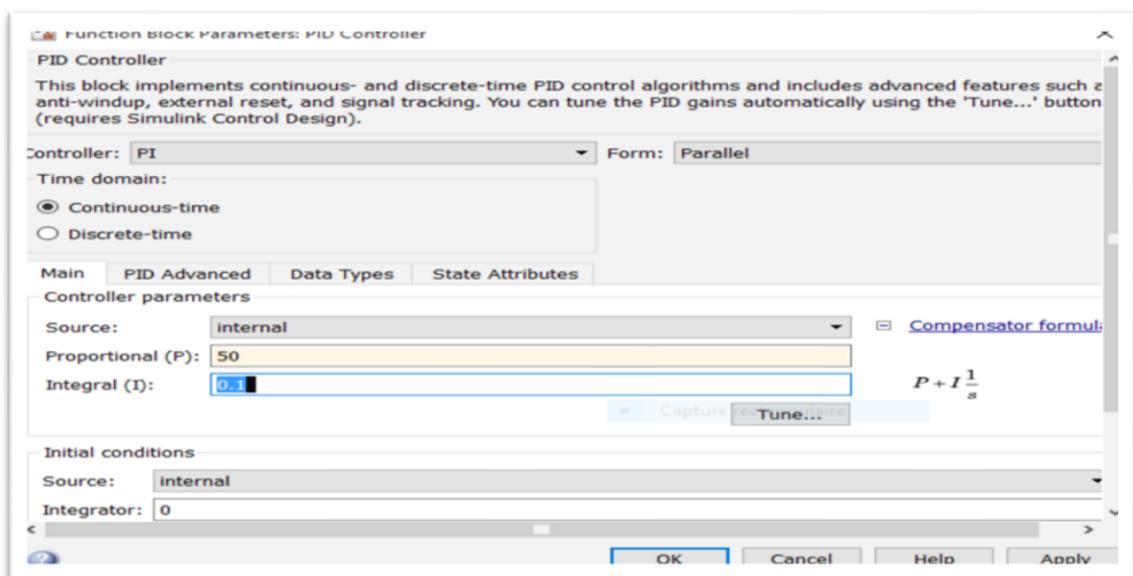


Fig.III.11.les paramètres de régulateur PI

La vitesse de référence a été réglée à 1 000 tr/min, 2 000 tr/min et 3 000 tr/min et la réponse résultante est affichée dans l'oscilloscope. Le graphique affiché sur l'oscilloscope est la vitesse par rapport au temps. En augmentant la vitesse de référence, on observe à partir du tracé de la portée que le temps de stabilisation augmente,. On observe à partir de l'oscilloscope qu'avec le contrôleur PI, nous subissons un dépassement de vitesse et une oscillation avant de nous stabiliser à la valeur de référence. Ce dépassement reste toujours avec le contrôleur PI après un réglage approprié. Le temps de stabilisation est moindre avec le régulateur PI et l'erreur d'état stable est éliminée. La simulation a également été étendue à une condition de charge de 5 Nm. Les résultats globaux sont présentés dans le tableau

III.6.3.Résultat de simulation

La vitesse 1000 rpm avec

TL=0 Nm

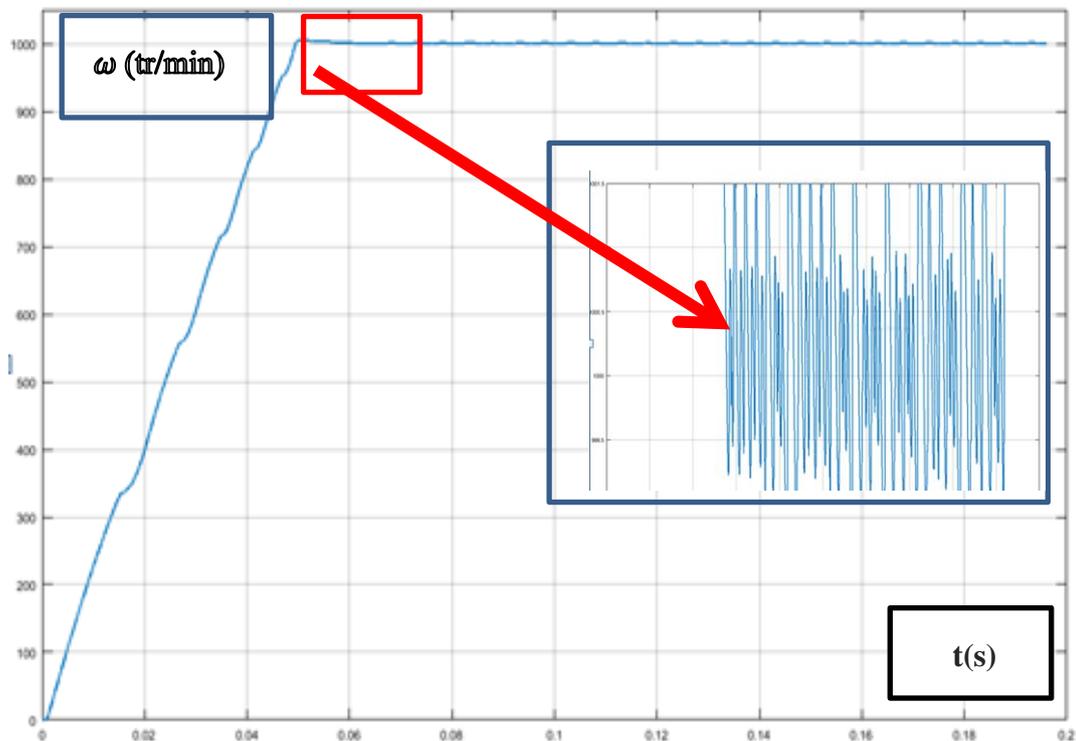


Fig.III.12.Résultat de simulation avec vitesse 1000 rpm sans charge

TL=5Nm

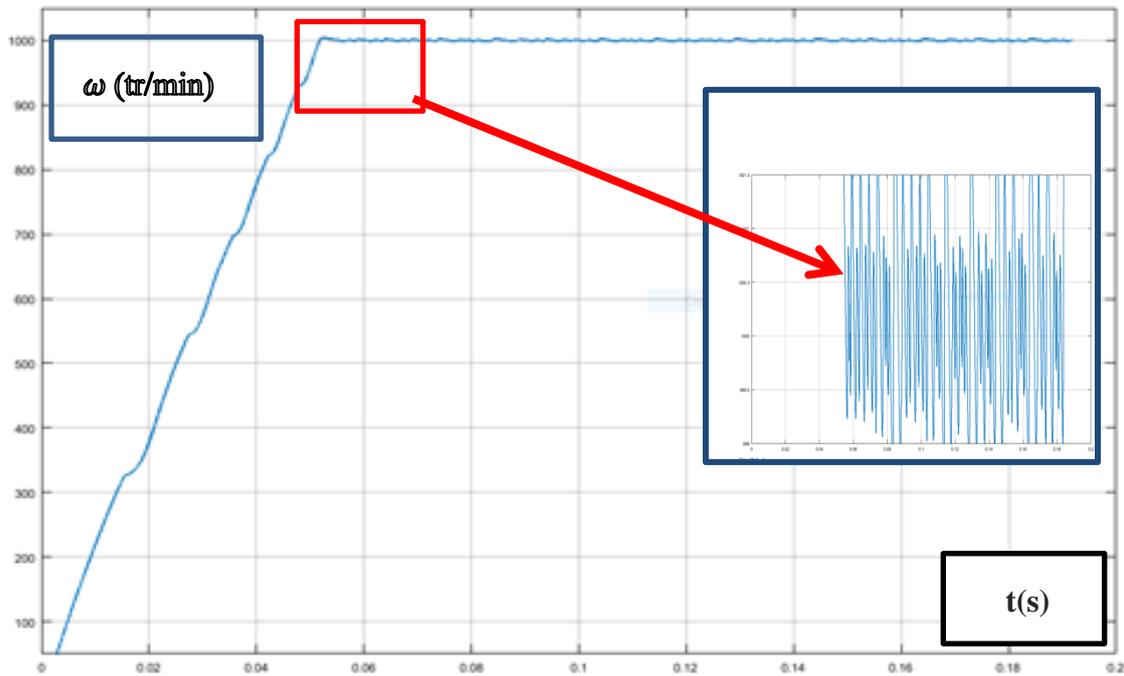


fig.III.13.Résultat de simulation avec vitesse 1000 rpm avec charge

La vitesse 2000 rpm

TL=0 Nm

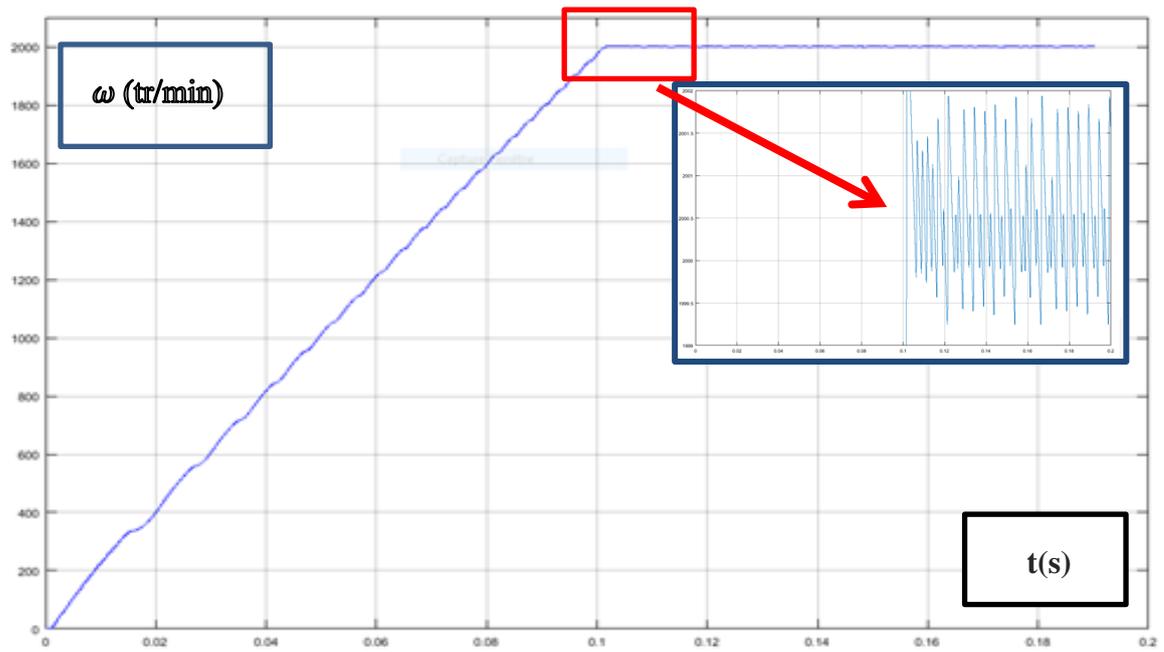


Fig.III.14.Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm sans charge

TL=5Nm

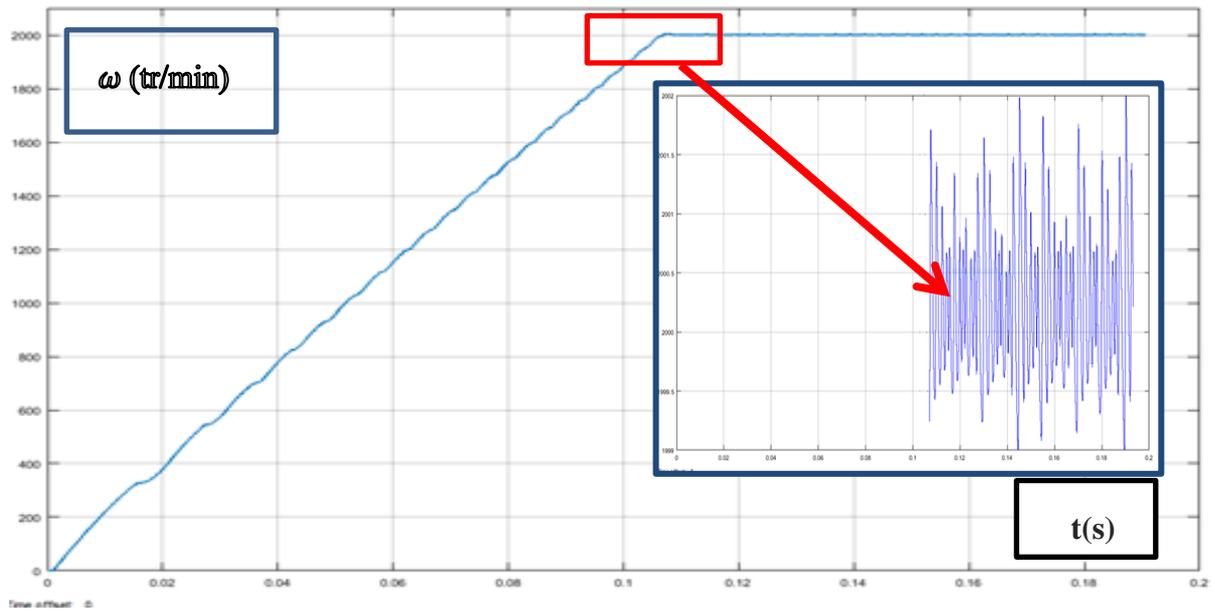


Fig.III.15.Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm avec charge

La vitesse 3000 rpm

Avec TL=0Nm

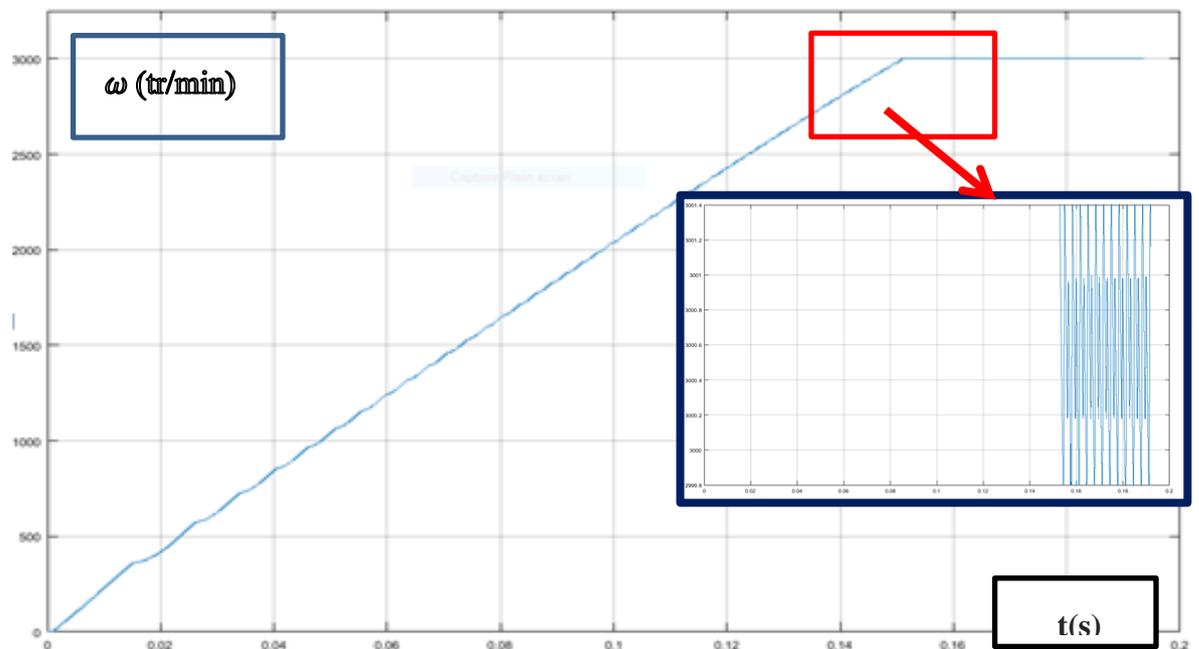


Fig.III.16.Résultat de simulation avec vitesse 2000 rpm sans charge

TL= 5Nm

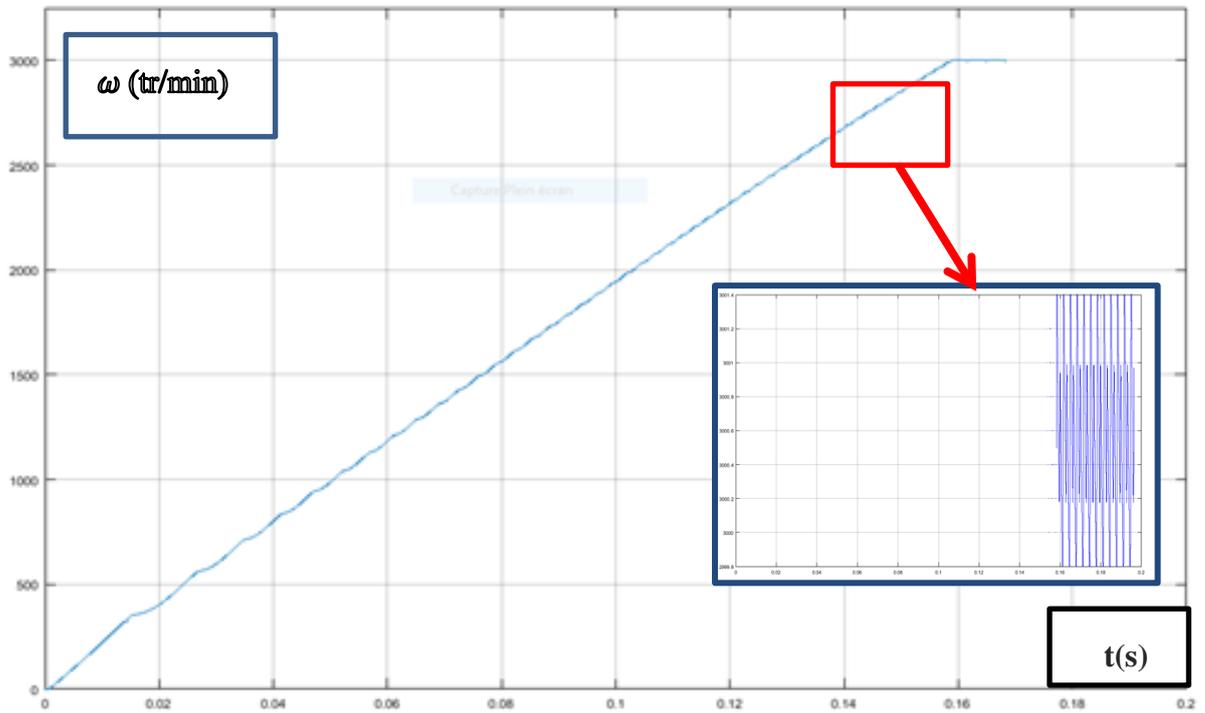


Fig.III.17.Résultat de simulation avec vitesse 3000 rpm avec charge

Tab.III.1.le temps de stabilisation de la vitesse sans et avec charge

La vitesse (rpm)	Temps de stabilisation T_s (sec) No load	Temps de réponse T_s (sec) TL=5Nm
1000	0.063	0.058
2000	0.106	0.108
3000	0.156	0.161

Le contrôleur PI a le temps de stabilisation bas et dépassement bas donc le plus approprié pour le contrôle de la vitesse dans des conditions de charge.

La réduction du temps de stabilisation devient plus prononcée lorsque la vitesse atteint 50000 tr/min ou plus. Ainsi, cette étude a prouvé la supériorité du contrôleur PI. Cela se traduit par l'élimination du dépassement de vitesse, l'élimination de l'erreur de régime

permanent ainsi que par la réduction du temps de stabilisation lorsque la vitesse du moteur passe de zéro à la vitesse de référence.

Le moteur à réluctance variable 6/4 est entraîné par un convertisseur à pont asymétrique et sa construction et sa commande sont simples par rapport à un moteur à commutation. Le MRV a été modélisée sur Simulink et simulé pour obtenir les meilleures performances. Le contrôleur PI a donné le meilleur résultat en termes de réduction du temps de stabilisation, d'élimination du dépassement de vitesse et de l'erreur de régime permanent.

III.7. Génération de vibrations et de bruit dans le MRV intégré dans VE

Les véhicules électriques (VE) se sont développés très rapidement ces dernières années en raison de la nécessité de réduire la consommation d'énergie et les émissions polluantes des véhicules conventionnels. Des efforts considérables ont été faits dans la recherche et le développement de batteries, de moteurs électriques et d'électronique de puissance. La MRV avec ses avantages est l'un des moteurs qui donne beaucoup de satisfactions lorsqu'il est utilisé dans la propulsion des VE. Le problème de vibrations et bruit dans ces moteurs reste un inconvénient major

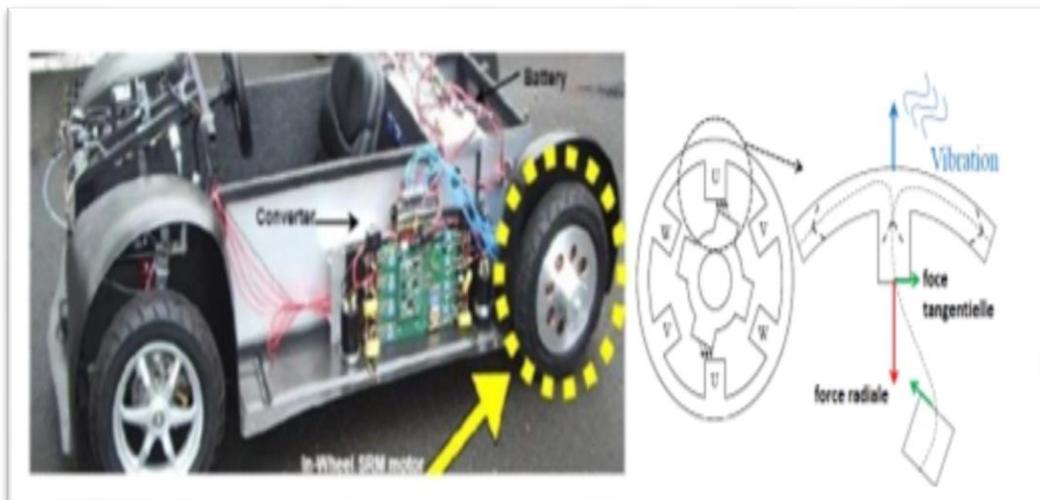


Fig.III.18. MRV, forces et vibrations [18]

Une fois la phase est alimentée un flux magnétique circule dans le circuit magnétique. Ce flux donne naissance à une force d'attraction entre les dents du stator et du rotor.

Cette force est décomposée en deux Chapitre 2 MRV Dans les Véhicule électrique 36 composantes : une composante tangentielle qui crée le couple, l'autre est une composante radiale, inutile et de plus elle est considérée comme la principale source de vibrations et de bruit dans le MRV .Cette force est généralement dix fois supérieure à la force tangentielle. Cette force provoque des déplacements de la structure dans le sens radial. Ce phénomène peut être aggravé si une ou plusieurs fréquences de cette force coïncident avec une fréquence propre de la structure [18].

III.7.1. Les ondulations de couple

L'ondulation de couple produite dans un moteur à réluctance variable (MRV) peut être considérée comme l'un de ses principaux inconvénients. Cela se produit principalement en raison de la commutation séquentielle des phases du moteur et des modifications de la longueur de l'entrefer Dans le moteur à réluctance variable, le problème de contrôle de base est la production d'un couple sans ondulation. La Présence d'ondulations dans le couple conduit à la production de bruits indésirables et de vibrations indésirables pendant le fonctionnement. Les caractéristiques statiques ainsi que le modèle de magnétisation des phases individuelles dictent la quantité d'ondulation de couple pendant le fonctionnement

III.8. Première solution

III.8.1. La commande direct de couple DTC

Au cours de ces dernières décennies, l'avancement technologique dans le domaine de l'électronique de puissance et les progrès de l'informatique industrielle, permettent de développer des stratégies de commande avancées pour les machines électriques. Afin de positionner notre étude dans le domaine de la commande DTC, un état de l'art de la commande DTC est présenté en regroupant l'ensemble des publications qu'on a choisi pour aborder notre étude. La Commande DTC a été proposée par Takahashi [Tak189] au milieu des années 80. Comparée à la commande vectorielle, la commande DTC est moins sensible aux variations paramétriques de la machine et permet d'obtenir une dynamique précise et rapide du couple. Le principe de cette commande est de contrôler directement le couple et le flux statorique de la machine. Dans ce cadre, deux comparateurs à hystérésis sont utilisés et qui permettent de comparer les valeurs estimées avec celles de références,

ensuite on commande directement les états de l'onduleur à travers une table de sélection prédéfinie. La stratégie de la Commande DTC de la machine asynchrone, les principaux éléments constitutifs de la structure de commande DTC avec asservissement de vitesse sont les suivants :

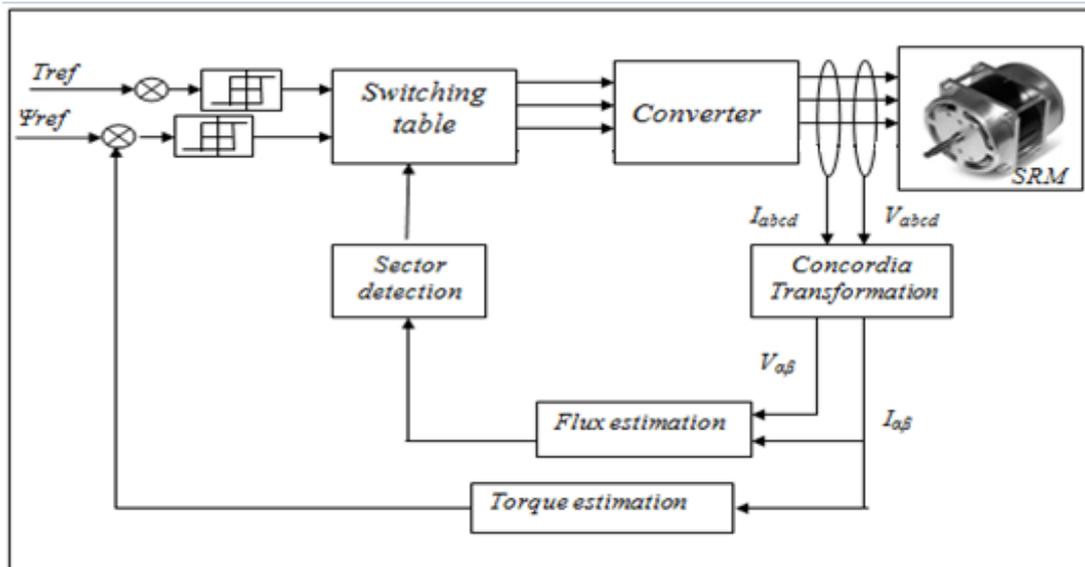


Fig.III.19. Schémas de la structure de base de la DTC.

- Deux estimateurs du couple et du flux statorique basés sur le modèle lié au stator,
- Une table de sélection du vecteur tension désiré du stator, établie en concordance avec les erreurs du flux et du couple engendrés,
- Deux comparateurs à hystérésis l'un à deux niveaux destiné pour le contrôle du flux, l'autre à trois niveaux consacré au contrôle du couple électromagnétique [30].

III.8.2. Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique

Les équations mathématiques du DTC [46] appliquées au MRV sont décrites ci-dessous. La sortie du couple moteur peut être trouvée en utilisant l'équation électromagnétique

$$v = Ri + d\varphi \frac{(\theta,i)}{dt} \quad (4.1)$$

Où

$\varphi(\theta, i)$ est la fonction non linéaire de la liaison de flux de phase en fonction de la position du rotor θ et du courant i . on obtien :

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ri} + \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4.2)$$

l'équation du flux de puissance peut être écrite comme

$$v i^2 = R i^2 + i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4.3)$$

le flux de puissance efficace P_{eff} de la source électrique peut être défini comme suit :

$$\mathbf{P}_{eff} = \mathbf{ei} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{e} = (\mathbf{v} - \mathbf{Ri}) \quad (4.5)$$

Où dans un temps différentiel dt , l'énergie électrique différentielle dW_e transférée de la source est donnée par :

$$dW_e = \mathbf{eidt} \quad (4.6)$$

Pour trouver une expression pour la production de couple moteur, l'équation d'énergie

S'écrit :

$$dW_e = dW_m + dW_f \quad (4.7)$$

Où

dW_m et dW_f : sont respectivement l'énergie mécanique différentielle et l'énergie de champ. L'énergie du champ peut être séparée en ses composants constitutifs comme indiqué dans l'équation.

$$dW_f = \frac{\partial W_f}{\partial i} di \Big|_{\theta} = \cos \tan t + \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta \Big|_i \quad (4.8)$$

De la considération de l'énergie de champ stockée, il peut être démontré que

$$dW_e = i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial i} di \Big|_{\theta} \quad (4.9)$$

$$dW_f \Big|_{\theta} = \cos \tan t = i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial i} di \Big|_{\theta} = \quad (4.10)$$

Par substitution d'équation (4.6) dans l'équation (4.7), on peut constater que :

$$dW_m = i \frac{\partial\varphi(\theta,i)}{\partial i} d\theta - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta \quad (4.11)$$

Le couple instantané est défini par

$$\mathbf{T} = \frac{dW_m}{d\theta} \quad (4.12)$$

Ainsi en substituant l'équation (3.41) dans l'équation (3.40), l'expression de la production de couple instantanée d'une phase de MRV peut s'écrire :

$$\mathbf{T} = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi(\theta, \mathbf{i})}{\partial \theta} - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \quad (4.13)$$

$\frac{\partial W_f}{\partial \theta}$ est négligeable. Par conséquent, en utilisant cette approximation, l'équation suivante pour la production de couple peut être dérivée comme suit [32] :

$$\mathbf{T} = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi(\theta, \mathbf{i})}{\partial \theta} \quad (4.14)$$

III.8.3. Principe de la commande directe du couple appliquée au MRV

L'introduction de la commande directe du couple est basée sur l'orientation du flux statorique, et en considérant que $V_s \gg R_s I_s$, donc dans le cas où on applique un vecteur tension un laps de temps, nous obtenons.

$$\Delta \varphi = \varphi_{s2} - \varphi_{s1} = V_s \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

L'équation implique que l'extrémité du vecteur statorique (t) φ_s se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliqué V_s .

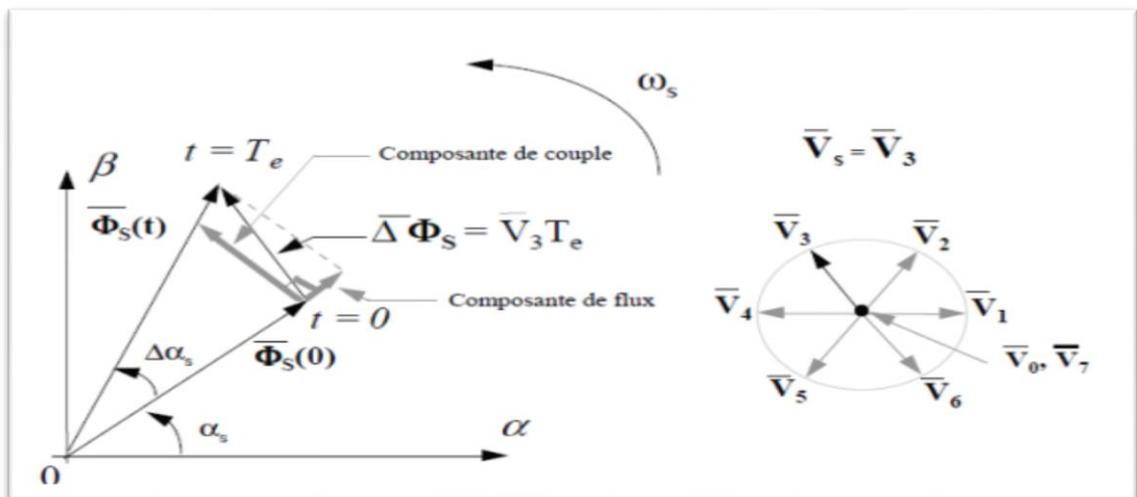


Fig.III.20. Évolution de l'extrémité $\varphi_s(t)$ pour $R_s I_s$ négligeable [32]

La composante radiale (du flux) du vecteur tension fait varier l'amplitude de φ_s et la composante tangentielle fait varier la position du flux et donc la valeur du couple.

En choisissant une séquence adéquate des vecteurs V_s , sur les périodes de temps constantes T_s , il est donc, possible de fonctionner avec un module de flux φ_s , pratiquement constant, en faisant suivre à l'extrémité de φ_s est donnée par la dérivée $d\varphi/dt$, ainsi la vitesse de déplacement de l'extrémité φ_s . Lorsqu'on néglige le terme $R_s I_s$, la tension est donnée par le terme $V_s = d\varphi/dt$.

La vitesse de rotation de φ_s dépend du choix de V_s elle est maximale pour le vecteur V_s perpendiculaire à la direction de φ_s et nulle si on applique un vecteur nul, et peut être aussi négative [33].

III.8.4. Construire la table de commutation

Cependant, contrairement au DTC pour machines AC conventionnelles, chaque phase peut être soumise à trois états, essentiellement sur un total de 27 configurations possibles. Toutefois dans le but de définir six vecteurs tension égaux en amplitudes, décalés de $\pi/6$ radians comme dans un algorithme de DTC classique, les six états vecteur tension possible sont V_1, \dots, V_6 , basée sur la somme des vecteurs tension dans chaque phase,

Un des six états tension est choisi à n'importe quel moment, pour maintenir le flux statorique et le couple à l'intérieur d'une bande hystérésis. Comme en DTC conventionnel, si le flux se trouve dans une zone k , son module peut être augmenté en commutant la tension au vecteur V_{k+1} et V_{k-1} , aussi peut être diminué en commutant vers le vecteur [27].

Tab.III.2.Choix des vecteurs suivant les zones

N	N	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
$\varphi_s = 1$	Ce=1	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁
$\varphi_s = 1$	Ce=0	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅
$\varphi_s = 0$	Ce=1	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂
$\varphi_s = 0$	Ce=0	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄

Les flux dans les trois phases sont résolus en axes α - β fixes en utilisant la transformation en 3 phases montrée sur la figure 3.11. L'équation pour les flux dans les axes α - β est obtenue comme suit [26] :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha}(n) = \varphi_{s\alpha}(n-1) + [V_{s\alpha}(n-1)] - r_s i_{s\alpha}(n-1) T_e \\ \varphi_{s\beta}(n) = \varphi_{s\beta}(n-1) + [V_{s\beta}(n-1)] - r_s i_{s\beta}(n-1) T_e \end{cases} \quad (5.2)$$

Le module de flux et sa phase sont calculés par :

$$\begin{cases} \varphi_s = \sqrt{\varphi_a^2 + \varphi_b^2} \\ \theta_\varphi = \arctg \frac{\varphi_{sb}}{\varphi_{sa}} \end{cases} \quad (5.3)$$

Les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux φ_s . Le tableau (3.2) montre l'évolution des deux grandeurs flux et couple pour chacun des quatre vecteurs V_{i+1} , V_{i+2} , V_{i-1} , V_{i-2} qui peuvent être appliqués dans la zone Z_i .

Lorsque le flux se trouve dans une zone i , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des 6 vecteurs de tensions suivantes :

- Si V_{i+2} est sélectionné alors l'amplitude du flux φ_s décroît et le couple T_{em} croît;
- Si V_{i-1} est sélectionné alors l'amplitude du flux φ_s croît et le couple T_{em} décroît;
- Si V_{i-2} est sélectionné alors l'amplitude du flux φ_s décroît et le couple T_{em} décroît;

- Si V_{i+1} est sélectionné alors l'amplitude du flux ϕ_s croit et le couple T_{em} croit;

Vector V_i	V_{i-2}	V_{i-1}	V_{i+1}	V_{i+2}
ϕ_s	↓F	↑F	↑F	↓F
T_e □	↓ T_e	↓ T_e	↑ T_e	↑ T_e

Tab.III.3. Choix de vecteur de tension

III.8.5.Simulation des résultats du contrôle du MRV avec DTC

Les performances de MRV 6/4 sont appliquée à une charge ($C_r=1.5Nm$ à $t=0.07s$), la vitesse, le couple et le flux suivent leurs références avec une dynamique robuste et très rapide sans dépasser les bandes d'hystérésis, d'où la trajectoire circulaire du flux.

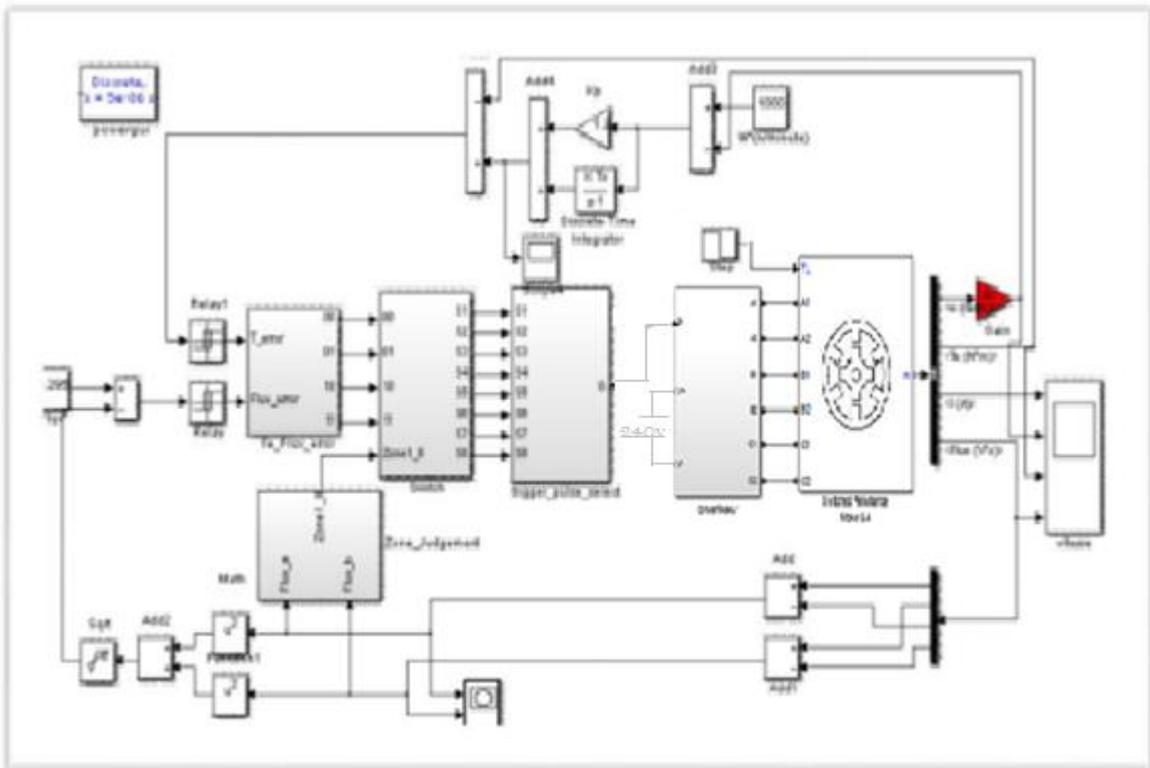


Fig.III.21.Block du DTC

III.8.6. Résultat de simulation

Avec DTC

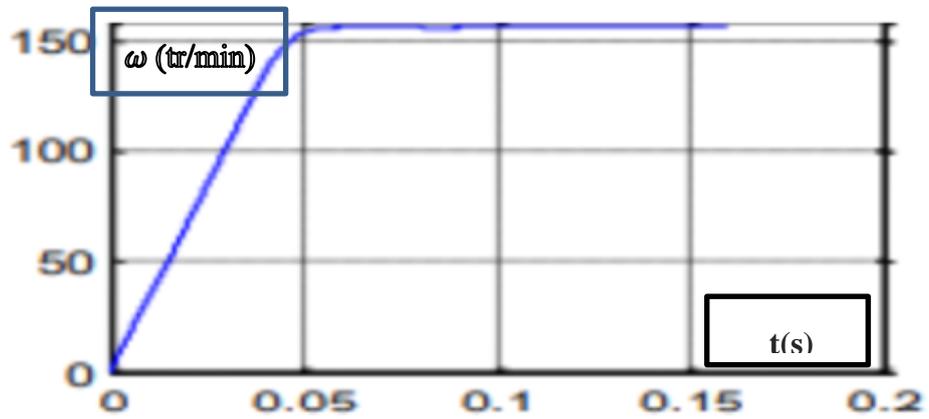


Fig.III.22.résultat de simulation la vitesse de MRV6/4 avec DTC

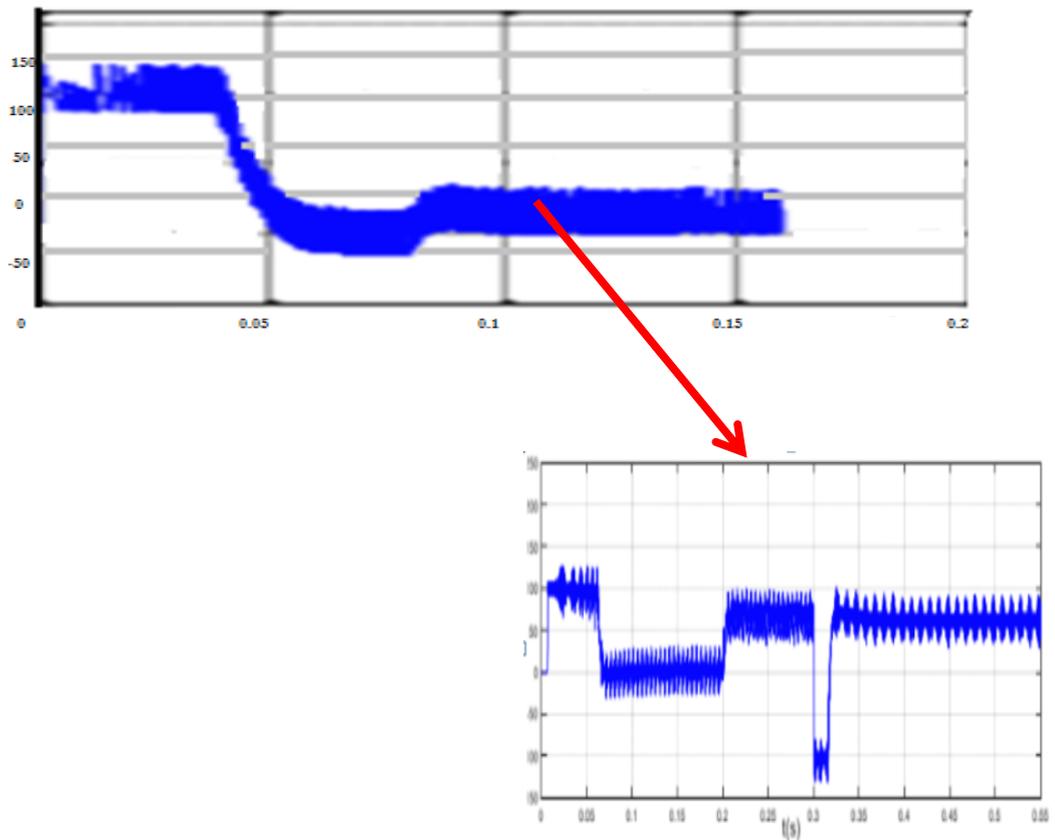


Fig.III.23.Résultat de simulation la vitesse de MRV6/4 avec DTC

Avec commande

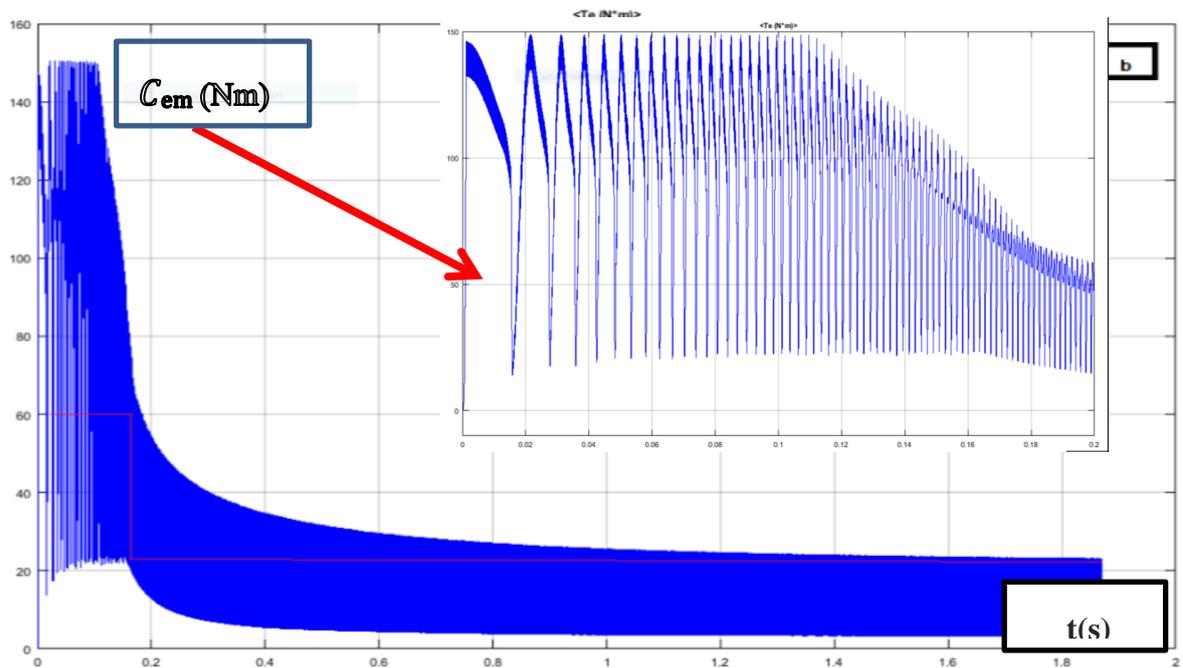


Fig.III.24.Simulation de couple avec aucun contrôle

Avec PI

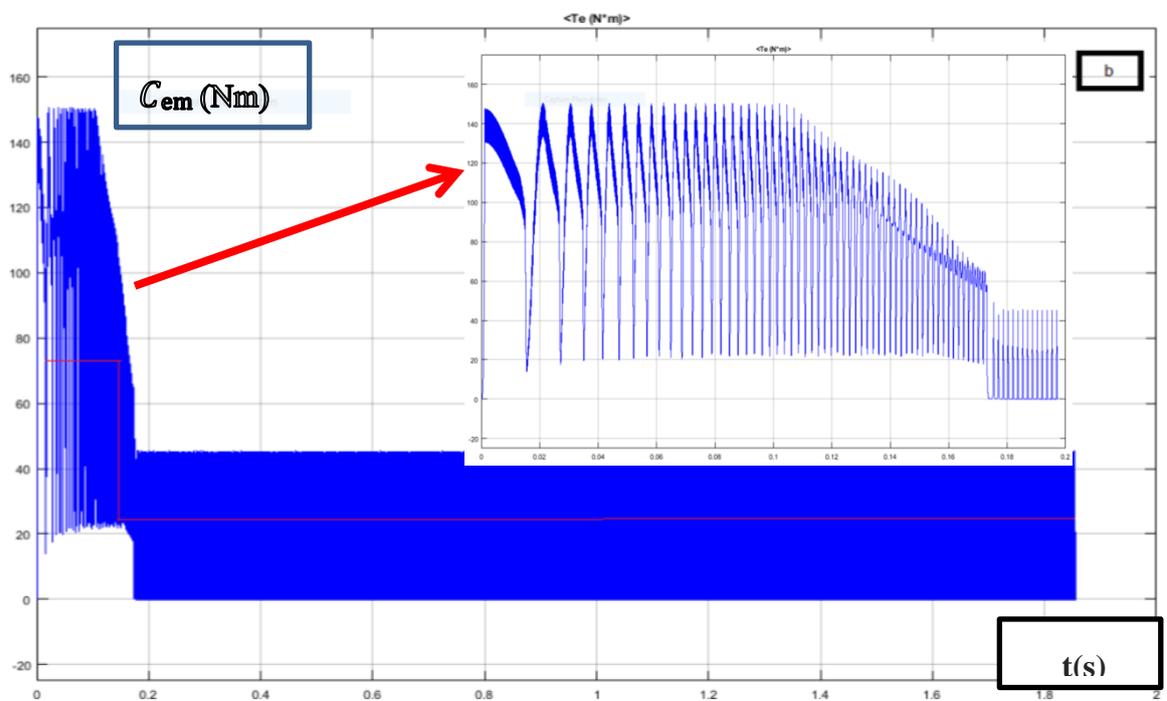


Fig.III.25.Simulation de couple avec régulateur PI

Interprétation

D'après les résultats nous remarquons que les ondulations du couple ont diminuées par rapport aux résultats obtenus avec sans commande et avec un contrôleur PI simple et grâce au contrôle direct du couple (DTC) nous avons pu améliorer les performances de la machine.

III.9. Deuxième solution pour réduire les ondulations de couple :

Les ingénieurs de Tesla Motor ont fait un choix de conception étonnante lorsqu'ils ont développé le Tesla Model 3. Ils ont abandonné les moteurs à induction conventionnels et éprouvés et les ont remplacés par un nouveau type de moteur, appelé moteur IPMSynRM. Ces moteurs ont une conception totalement différente, utilisant à la fois une action magnétique et une action à réluctance.

Tesla Motors a également commencé à remplacer les moteurs à induction de ses modèles S et X par ce nouveau moteur.

TESLA Motors remplace ce moteur dans les voitures RWD et AWD par des moteurs IPMSynRM pour une meilleure efficacité [35].

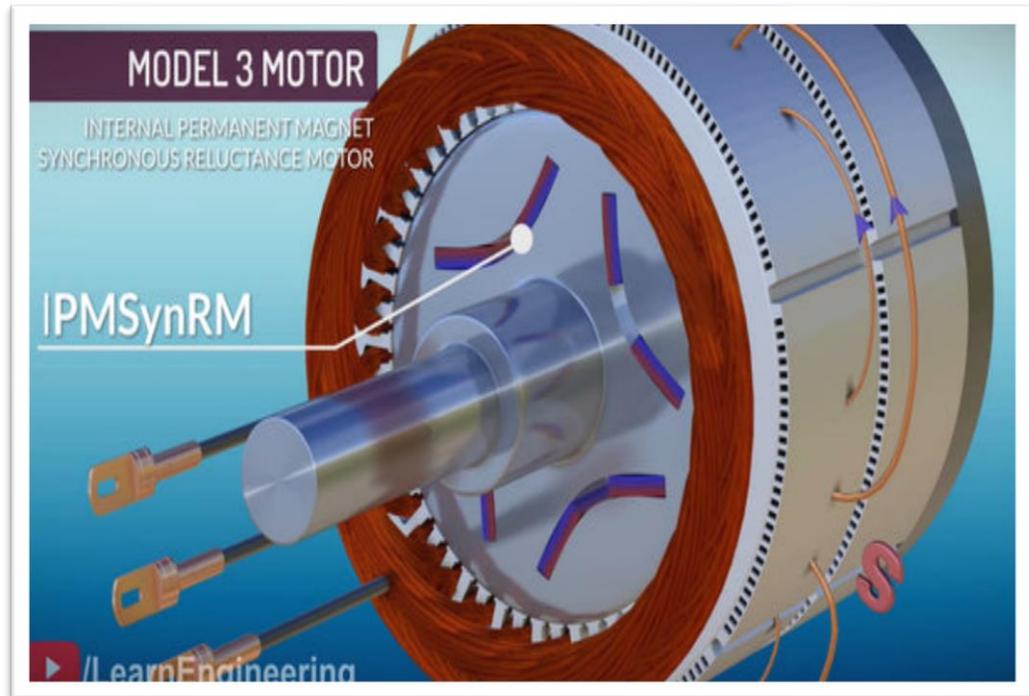


Fig.III.26.moteur IPMSynRM [35]

III.9.2.IPMSynRM de Tesla Model 3

L'IPMSynRM est une combinaison de moteurs à aimant permanent et SynRM, et si nous l'intégrons en plaçant les aimants permanents dans les fentes du moteur SynRM, au plus profond du noyau de fer. Pour le comprendre de manière simple, je vais expliquer ici les deux types de moteurs, le premier est à aimant permanent.

III.9.2.2. Moteur à aimant permanent :

Les moteurs PM fonctionnent sur la base de l'attraction entre deux champs magnétiques . Ils produisent un bon couple de démarrage à partir du même volume moteur. Ceci est plus efficace lorsque vous les utilisez à l'aide d'un contrôleur et qu'ils ne subissent pas de perte d'énergie dans le rotor. Mais les moteurs PM ont un problème, lorsque la voiture roule sur la route à grande vitesse, les moteurs à aimants permanents ont des performances terribles en raison de la génération de contre-électromotrice dans les bobines de stator.



Fig.III.27. Les moteurs PM fonctionnent sur la base de l'attraction entre deux champs magnétiques [36]



Fig.III.28. Un aimant permanent produit un champ magnétique combiné [36]

La force contre-motrice électro est induite lorsque les lignes de champ magnétique produites par les aimants permanents se lient aux enroulements du stator. Il s'agit

clairement d'une tension inverse à la tension d'alimentation du stator. Plus la vitesse du rotor est élevée, plus il produit de contre-électromagnétisme

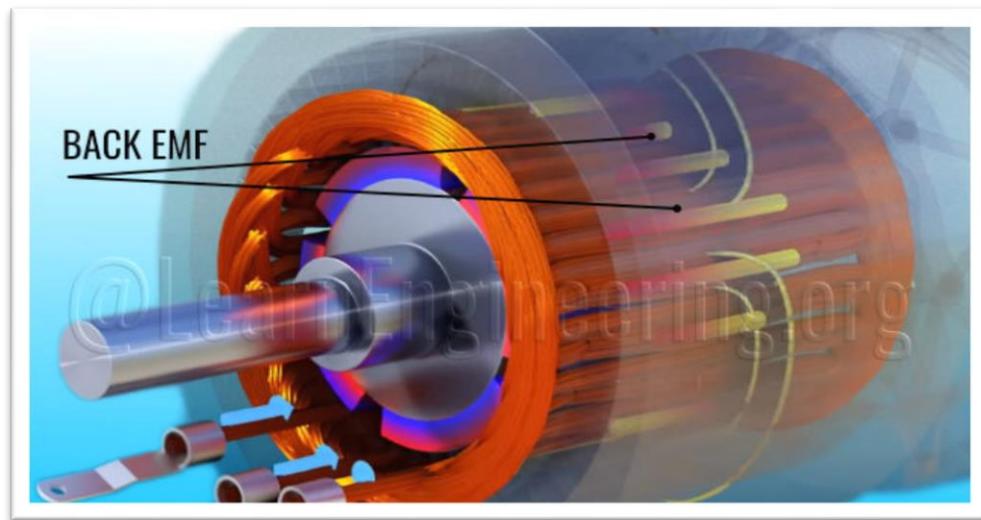


Fig.III.29. La force contre-électromotrice est induite lorsque les lignes de champ magnétique produites par les aimants permanents sont liées aux enroulements du stator [36]

Un autre inconvénient est que les aimants entraînent des pertes de courants de Foucault magnétiques, ce qui augmente la chaleur dans la machine. Et n'est pas favorable. Gardez cette explication à l'esprit, maintenant je vais vous expliquer le deuxième type de moteur.

III.9.2.3. Moteurs SynRM :

Nous allons maintenant comprendre comment le moteur Tesla a dépassé ces problèmes en utilisant des moteurs SynRM. Pour un fonctionnement à grande vitesse, les ingénieurs de Tesla ont utilisé la propriété de réticence du fer. Ici, le fer s'oppose moins aux champs magnétiques que l'air. En utilisant ce phénomène, les moteurs SynRM ont généré une rotation. Pour obtenir ce mouvement de rotation, nous avons découpé des fentes dans le rotor. À cette position du rotor, le rotor est dans un état de réluctance élevée, comme indiqué sur la Fig(III.31) côté gauche de l'image. Cependant, si le rotor est tourné de 45 degrés, il fera face à une très faible réluctance.

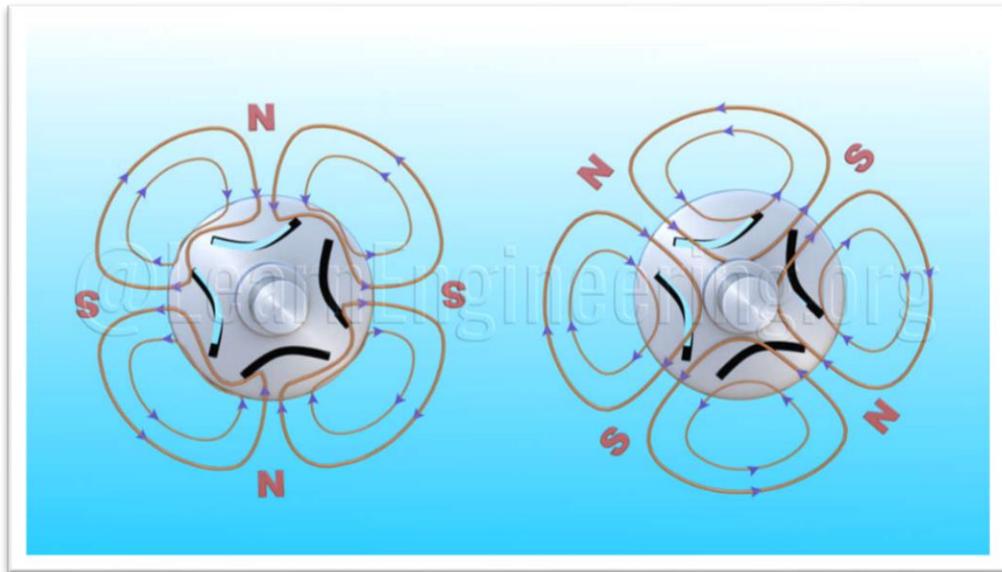


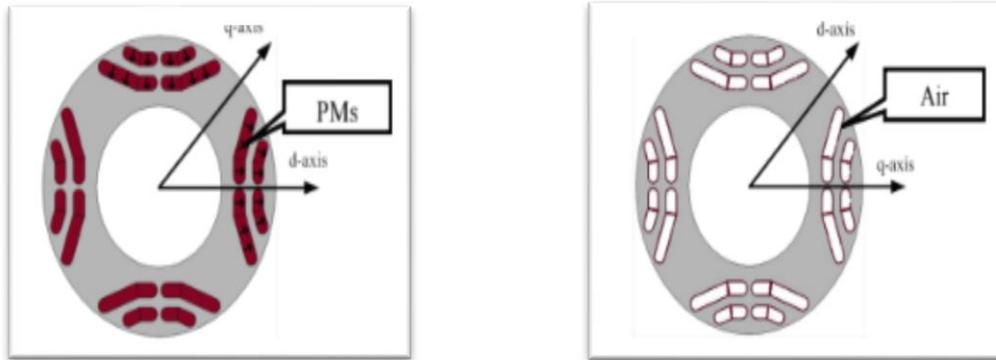
Fig.III.30. Le rotor est dans un état de réluctance élevée [36]

Le rotor a toujours tendance à atteindre un état de faible réluctance. Par conséquent, si le champ magnétique tourne, le rotor tournera avec lui de sorte que le rotor pourra toujours être dans un état de faible réluctance. La vitesse de rotation du rotor sera la même que la vitesse RMF. Le couple produit par ce phénomène est appelé «couple de moteurs à réluctance» et ces moteurs sont appelés à réluctance synchrone. Vous pouvez consulter notre article précédent également basé sur les moteurs SynRM, vous y permettant des informations supplémentaires.

Vous devez garder à l'esprit que les SynRM peuvent améliorer les opérations à grande vitesse, qu'ils n'ont pas de problèmes de retour EMF et que les moteurs à aimants permanents peuvent être conçus pour fonctionner correctement à basse vitesse.

Dans ce cas, il est bon d'intégrer la technologie SynRM dans le moteur à aimants permanents Si nous le faisons, ces moteurs peuvent fonctionner efficacement

La chose intéressante à propos de cette conception est que les pièces d'aimant permanent et de réluctance de ce moteur ont un comportement totalement différent en ce qui concerne la position du RMF.



Internal aimant permanent (IPM) Moteur

Synchrones Reluctance Moteur (SynRM)

Fig.III.31.moteur IPM et moteur SynRM [35]

III.10.Analyse de couple du moteur IPMSynRM

Maintenant, analyse le moteur de la Tesla modèle 3. Il ressort clairement du graphique du couple total que si l'angle RMF est d'environ 50 degrés, ceci est illustré sur la figure 8 ci-dessous, nous obtiendrons le couple maximal du moteur. Les ingénieurs de Tesla Motors sont donc assurés que lorsque vous démarrez la voiture, l'angle RMF est d'environ 50 degrés, ce qui garantit une production de couple maximale. Utilisation à la fois de la réluctance et du couple d'aimant permanent. Mais après une certaine vitesse élevée, la force électromotrice arrière apparaît. Pour rétablir cet affaiblissement du champ est fait. Je vais l'expliquer brièvement ci-dessous [35]

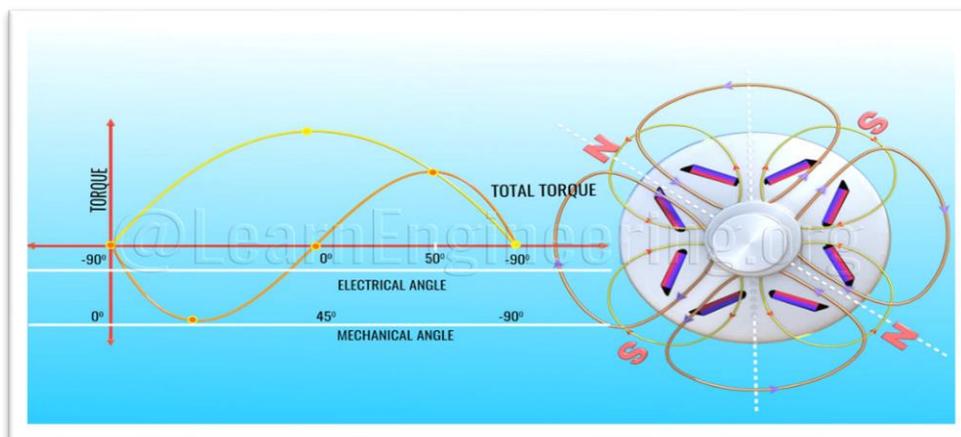


Fig.III.32. Le graphique de l'angle RMF est d'environ 50 degrés [36]

Les aimants permanents du moteur IPMSynRM ont encore un certain effet sur le stator produisent une contre-électromotrice à des vitesses plus élevées. Pour résoudre ce problème, nous pouvons aligner le RMF à l'opposé du champ magnétique permanent, comme indiqué sur la figure 9 ci-dessous à gauche.

Le RMF affaiblit ou annule presque le champ de l'aimant permanent, comme le montre la figure 9 ci-dessous à droite. De cette façon, même à des vitesses élevées, ces moteurs ne produiront pas beaucoup de force contre-électromotrice. Évidemment, à ce stade la production de couple proviendra surtout de l'effet de réluctance [36].

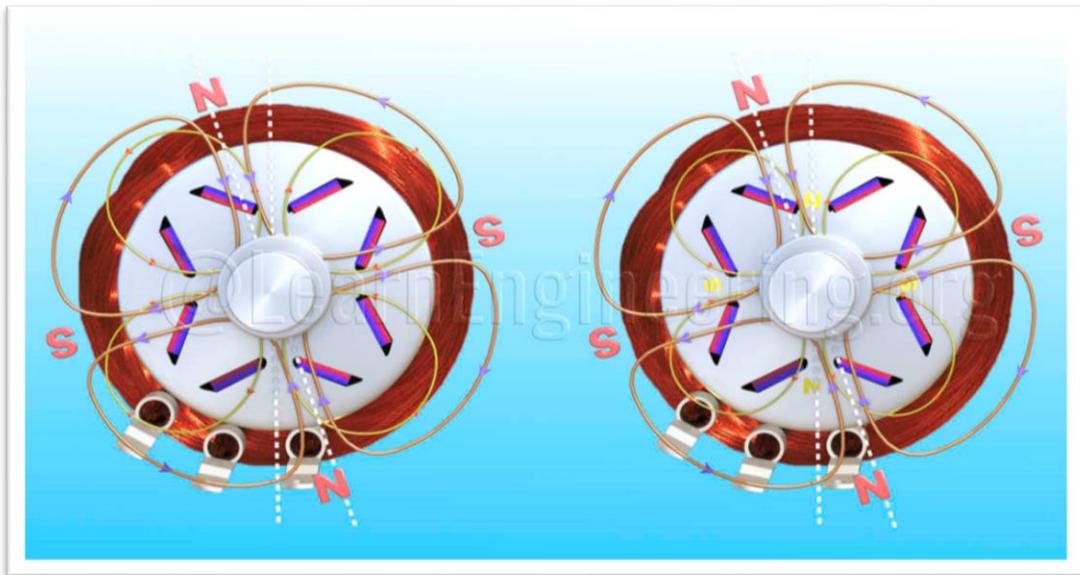


Fig.III.33.Affaiblissement du champ [36]

III.11.Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a réalisé une simulation de la machine à reluctance variable 6/4 sans aucune commande nous avons remarqué une très importante ondulation du couple ce qui a diminué les performances du MRV,

D'après ces résultat on a réalisé un régulateur PI pour améliorer la vitesse Afin d'améliorer les performances de la machine nous avons réalisés la deuxième partie la commande DTC pour minimiser les ondulations du couple. D'après les résultats obtenus nous remarquons que les ondulations de couple ont diminuées et les performances de l'entraînement DTC de la machine MRV sont analysées avec une sélection appropriée de 6 vecteurs de tension spatiale pour un couple de charge constant puis variable. Le couple et le flux sont maintenus dans leurs bandes respectives d'hystérésis.

Dans la dernière partie de chapitre nous avons proposé un nouveau type du moteur combiné entre deux types IPM SynRM, ce qui à son tour contribue à réduire le taux de ces ondulations. Nous pouvons conclure qu'avec le régulateur PI et le contrôleur DTC les performances de la machine ont été nettement améliorées.

Conclusion générale

Notre travail est une contribution à la commande et contrôle du moteur à réluctance variable en vue de son utilisation comme moteur de traction du véhicule électrique.

Un état de l'art de véhiculé électrique a été présenté et les éléments de base de la chaine de traction des VE ont été discutés dans ce travail, en insistant sur les différentes technologies disponibles. Notre choix c'est porté sur le moteur à reluctance variable du fait qu'il bénéficie d'innombrables avantages qui le rend compétitif par rapport aux autres types de moteurs et qu'il est souvent retenu pour la motorisation des véhicules électriques modernes pour ces bonnes performances.

Un seul inconvénient prohibitif du MRV pour en faire le moteur électrique du premier choix est les ondulations du couple qui produisent les vibrations et le bruit acoustique important.

Ce travail consiste à la modélisation, commande, régulation et simulation d'un moteur à réluctance variable en partant d'une alimentation sans commande, puis un simple contrôle classique (PI). Ces deux derniers ne nous ont pas servi à grand-chose vu la forte non linéarité du comportement du MRV à cause de la forme saillante du rotor et à l'alimentation séquentielle du convertisseur asymétrique.

Pour répondre au mieux aux exigences de consigne et pour réduire au maximum les ondulations du couple, nous avons proposé la commande directe du couple (DTC) pour MRV à 3 phases 6/4 pôles. Les résultats de simulation ont montré que les ondulation ont été remarquablement réduites et le comportement du MRV est devenu nettement meilleur [46].

On a réparti notre travail sur les trois chapitres suivants :

- Dans le premier chapitre, on a mis l'accent sur la nécessité d'adopter des nouvelles techniques pour atténuer la consommation des carburants a origine fossile. Nous avons évoqué en ce sens le véhicule électrique et son état de l'état de l'art. Nous avons expliqué son fonctionnement et nous avons précisé les facteurs essentiels qui favorisent le choix du moteur à reluctance variable comme moteur de traction des VE.
- Dans le deuxième chapitre on a présenté les notions de base des machines à réluctance variable, leur modélisation et principe de fonctionnement. On a mis en évidence l'optimisation de la commande de la machine à réluctance variable (MRV) qui est un sujet de recherche d'actualité.

- Le troisième chapitre présente un contrôle de la machine à réluctance variable (MRV) 6/4 pôles et pour résoudre le problème des ondulations du couple, nous avons proposé la commande classique de la vitesse PI et la commande directe du couple (DTC). Cette dernière est basée sur la détermination directe de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs d'un onduleur de tension comme nous avons proposé un deuxième type moteur IPMSynRM qui est une deuxième solution moderne pour éliminer ces ondulations sans aucune commande mais plus onéreuse.

Pour la continuité de ce travail, nous suggérons l'approfondissement de l'étude de IPMSynRM et si possible la validation expérimentale des résultats trouvés.

Annexe

Annexe

Les paramètres utilisés dans la simulation sont les suivants : Les paramètres MRV :

Résistance statorique (Ω)	0.05
Inertie (Kg.m ²)	0.05
Frottement (N.m.s)	0.02
Vitesse et position initiales [ω_0 (rad / s) Theta0 (rad)]	[0.0]
Inductance non alignée (H)	0.67
Inductance alignée (H)	23.6
Inductance alignée saturée (H)	0.15e-3
Courant maximum (A)	450
Maximum flux linkage (V.s)	0.486
DC Voltage (V)	240
La puissance (KW)	60
Nombre de phase	3
Nombre pôles de stator	6
Nombre pôles de rotor	4

Les paramètres de capteur de position :

$$K_1 = \frac{180}{\pi}$$

$$K_2 = \frac{30}{\pi}$$

$$T_s = 1e-06$$

$$\theta_{on} = 45^\circ$$

$$\theta_{off} = 75^\circ$$

Références bibliographique

- [1] REBBAH.Redjem « Modélisation et optimisation d'une structure de machine à reluctance variable dédiée aux énergies renouvelables »Thèse de doctorat en science électrotechnique, Université de Constantine, 08/07/2010
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/ Voiture_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique) »__Concept voiture électrique, 20/02/2022
- [3]_B. Multon (2001). Motorisation des véhicules électrique dans technique d'ingénieur, numéro 3996
- [4] Khaled, histoire de la voiture électrique « voiture électrique.net » 6 mai 2021.
- [5] Fonctionnement de la voiture électrique « achat-voiture.ooreka.fr ».
- [6] « Achat-voiture.ooreka.fr ». Ooreka, voiture électrique
- [7] MOEZ Hadj Kacem, TOUNSI Souhir, Nedji Rafik « dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicule électrique » Université de Sfax Laboratory of Electronic and Information Technologie (LETI-Sfax), E.N.I.S Tunisie, 2014
- [8] Mr.BOUCHA Abdallah « réalisation et commande d'un véhicule électrique par dspace embraqué » Mémoire de magister, Université mohammed boudiaf .Oran.
- [9] « Québec.com », Les types de véhicules, Février 2022.
- [10] « Renault Groupe » Qu'est-ce qu'une voiture à hydrogène 20 octobre 2020.
- [11] Les différents types de batteries de voiture électrique «renaultgroup»18 octobre 2019.
- [12] Tout ce qu'il faut savoir sur les batteries des voiture électrique « events, renault group».
- [13] « Recharger son véhicule électrique : types de prises et modes de recharge », « beev.co » mai 19, 2022.
- [14] JONAS.Moarman voiture électrique :ses avantages et inconvénients « ecoconso.be.fr » 01 decembre 2019.

[15] B.Multon .Principe et éléments de dimensionnement des machines à reluctance variable à double saillance autopilotées", Proc, Journées électrotechniques club EEA, 1993.

[16] Bernard Multon. "Historique des machines électriques et plus particulièrement des machines à réluctance variable", La Revue IEEE, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, 1995, pp.3-8hal-00674038.

[17] Machine à réluctance variable « staff_univ_batna2.dz »

[18] BENTALHA Youcef, HELLOU Zana, « MODELISATION ET SIMULATION DU MODELE NON LINEAIRE D'UN MOTEUR A RELUCTANCE VARIABLE »thèse master, université abou bekr-belkaid, 2015/2016.

[19] <https://www.kehui.com/products/switched-reluctance-driver-srd-system>.

[20] P.J. Lawrenson. "Development in the Performance and Theory of Segmental Rotor Reluctance Machines", AGU, proc.IEE, Vol 114, May 1967, pp. 645-653.

[21] le véhicule hybride « IFP energies nouvelles.fr ».

[22] HIDRI Imed « support de cours d'électronique de puissance le convertisseur AC_DC » institut supérieur des études technologique de Nabeul.

[23] G. SOUFFRAN « Dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicules électrique hybride basé sur une modalisation stochastique de ses profils de mission », Thèse doctorat, Université de Nantes, 2012.

[24] L'onduleur génie électrique « for-gr.blogspot. » Aout 2015.

[25] S. Meziani , A.Bourenane, Contrôle par logique floue d'une chaine de traction d'un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

[26] Derradji Ilhem « Modélisation Analytique et Numérique et Contrôle d'un Moteur à Reluctance Variable de type 6/4 » Thèse doctorat en sciences, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2020.

[27] RECHACH Abdelkrim « Modélisation et contrôle intelligent du moteur a reluctance variable en vue de son utilisation en énergie propre »Thèse doctorat en sciences Université laarbi tebessi, 05/05/2022.

[28] A.E.Analya Bechi « Simulation of speed control techniques of switched reluctance motors (SRM) » electrical engineering department, Naandi Azikiwe University Awka, Anambra state, Nigeria, 12/12/2018.

[29] P.Andrada, M.Torrent, B.Blanqué, and J.I. Perat. "Switched reluctance drives for electric vehicle applications", Proc. Intern. Conf. on renewable energies and power quality, No.4, 207-213, April 2002.

[30] A.J.O.Cruickshank, R.W.Menzies. "Axially Laminated Anisotropic Rotors for Reluctance Motors", proc. IEE, Vol.113, 1966, pp.2058-2060.

[31] Gdaim Soufien « Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de technique intelligent » Thèse doctorat, école nationale d'ingénieurs de Monastir, 26/12/2019

[32] SRINIFAS Pratapgiri, PARASAD Polaki « Direct torque control of 4 phase 8/6 switched reluctance motor drive for constant torque load » University College of engineering Osmania University, Hyderabad 515005, India.11/01/2012.

[33] FAHAS Sofiane « commande directe du couple appliquée a une machine a reluctance commutée a trois phases » Université LAVAL,Québec .2021

[34] MAX, Linuip « Everything about switched reluctance motor » mars 2021

[35] Saenitk, « Moteur électrique IPMSynRM » ,10/10/2021.

[36] Lesics, « Moteur électrique IPMSynRM de tesla model 3 »,08 janvier 2021

[37] C. Espanet. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée - Application au moteur-roue, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.

[38] G. Henni, « Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride », Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef 2014/2015.

[39] MARIF Ismail, ABDAT Hichem « La commande en vitesse d'un véhicule électrique » diplôme de master, Université de Tlemcen, 03/07/2019.

[40] B .GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.

[41] Bernard MULTON, Laurent HIRSINGER " Problème de la motorisation d'un véhicule électrique ", Ecole normale supérieure de Cachan, d1375Revue 3E.I n°5 mars 96 pp.55-64.

[42] J. BELHADJ, "Commande Direct du Couple d'une Machine Asynchrone : Structures d'observation, Application aux systèmes multi machines multi-convertisseurs ", Thèse de Doctorat, INPT et ENIT, Tunis, 2001.

[43] Jean Claude Mouchoux « Etude et réalisation de l'alimentation électronique d'un moteur à réluctance variable pour véhicule électrique -expérimentation du moteur » thèse d'ingénieur C.N.A.M. en électrotechnique, France, 1994.

[44] Taïbi. S « Contribution à l'étude, la conception, la dimensionnement et l'optimisation de machines à réluctance variable de type Vernier » thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologie, Lille, 2002.

[45] BOUGUENNA Ibrahim Farouk, « Commande Robuste d'une Chaine de Traction d'un Véhicule Electrique ´ Multi sources » Thèse de doctorat , UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES., 13/02/ 2020.