

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Akli Mohand Oulhadj de
Bouira**

**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Électrique**



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Contrôle commande d'un véhicule électrique à
base d'un moteur synchrone a aimants
permanents.**

Réalisé par :

- ***KHENFOUR SALAH***
- ***SMAILI YUCEF***

Dr. Bouhedda Ali.....Encadreur

Année Universitaire : 2017 /2018

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoirs donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils et ses dirigés du début à la fin de ce travail.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à Mr. Houssine Hamza pour avoir fait de lecteur notre mémoire, aller l'examiner et ils peuvent évaluer cette mémoire. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail et pour vos précieux conseils et remarques.

Nous réservons également des remerciements très spéciaux à l'ensemble des enseignants de la faculté des sciences et technologies de l'université de Akli Mohand Oulhadj.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenu et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

Sommaire

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des symboles.....	III
Introduction générale.....	1

Chapitre I

I-1 Introduction	4
I-2 Le véhicule électrique : définition et fonctionnement	4
I-3 chaîne de traction d'un véhicule électrique	4
I-3-1 La batterie	5
I-3-2 Convertisseur statique	5
I-3-2-1 Les redresseurs (AC-DC)	6
I-3-2-2 Les hacheurs (DC-DC)	6
I-3-2-3 Les onduleurs (DC-AC)	6
I-3-3 Réducteur mécanique	7
I-3-3-1 Solution avec boîte de vitesse.	7
I-3-3-2 Solution avec réducteur mécanique a rapport fixe	7
I-3-3-3 Solutions multi-moteurs	8
I-3-4 Motorisation de la chaîne de traction	8
Moteurs à courant continu	9
Moteurs à courant alternatif	9
I-4 Les batteries	10
I-4-1 piles à combustible	12
I-4-3 Le super condensateur	14
I-5 les structures de chargeur	15
I-5-1 Principe de chargeur	15
I-5-2 Modes de connexion des chargeurs pour VE	16
Mode 1 : Prise domestique	16

Mode 2 : Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection	16
Mode 3 : Prise spécifique sur un circuit dédié	16
Mode 4 : Connexion courant continu	17
1-5-3 Chargeurs inductif	17
-Convertisseur à résonance série	18
Convertisseur à résonance parallèle	19
1-5-4 Chargeurs filaires	20
Chargeur bidirectionnelle	21
-Chargeur sur réseau monophasé	22
Chargeur sur réseau triphasée	22
I.5) Fonctionnement général de la chaîne de conversion.	24
Inconvénients et avantages du VE :	24
Conclusion	25

CHAPITRE II

II.1 Introduction	26
II.2 Description de la chaîne de traction	26
II-2-1 Modélisation du moteur électrique	27
II-2-1-1 Les différents moteurs d'entraînement	27
II-2-1-2 Le moteur à courant continu	28
II-2-1-3 Moteurs à Courant Alternatif	28
Le moteur asynchrone	28
Le moteur synchrone.....	28
II-3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	29
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	30
II.3.2 Equations de la machine MSAP	30
II.3.3 Transformation Park	33
II.3.4 Equations électriques dans le référentiel de PARK	33
II.3.5 Equations mécaniques.....	35
II.3.6 Equations d'état de la MSAP	36
II.4 Modélisation dynamique du véhicule	38
II.4.1 Contraintes dynamiques sur le véhicule.	38

· Contraintes d'accélération et freinage.	38
· Contrainte de vitesse maximale.	38
· Contrainte de non-glissement	39
· Force d'entraînement	
39	
II.4.2 Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale	40
II.4.3 Couples résistant au déplacement	41
II-4-4 Roulement uniforme sur sol plat.	42
1. Résistance au roulement R_r	42
2. Résistance aérodynamique R_a	42
II-5-5 Franchissement de pente.	43
II-4-6 Franchissement d'obstacles	44
II-4-7 Accélération	44
II-4-8 Résistance au glissement (adhérence)	44
II-5 Transmission et réducteur mécanique	45
II.6 Conclusion	46

CHAPITRE III

III.1 Introduction	47
III.2 Onduleur de tension triphasé	47
III.2.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux	48
III.2.2 La simulation de l'onduleur	50
III.2.2 Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-Triangle	50
III.3 Simulation de l'association Convertisseur Machine	53
III.3.1 Simulation Machine à vide	53
III.3.2 Schéma block	53
III.3.3 Résultats de simulation	54
III.3.3 Interprétation	55
III.3.4 Simulation de l'association Convertisseur Machine avec charge	55
III.3.4 Interprétation	57
III.4 La commande vectorielle du MSAP	57
III.4.1 Description du système global	58
III.4.2 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP	59

III.4.3. Découplage par compensation.....	60
III.3.4 Détermination des régulateurs des courants	62
III.3.5 Détermination du régulateur de vitesse	65
III.4. Simulations du comportement du MSAP associé à la commande vectorielle et piloté par un onduleur de tension à deux niveaux	66
a- Résultats de la simulation	66
- Interprétation	68
III.4.2 Teste des variations paramétriques (Test de robustesse)	68
a-Variation de la résistance statorique (1,5.Rs)	69
b-Variation de l'inductance statorique (1,5.(L _d ,L _q))	69
c-Variation du moment d'inertie (J)	70
Interprétation	71
III.5. Application à un véhicule électrique avec un cycle de conduit	71
III.5.1. Cycle de conduite	71
Résultat de simulation	72
III.6 Application du cycle de conduite au VE avec la technique de commande (CVE)	74
a- Résultats de la simulation	75
III.6.1. Application du cycle de conduite avec une inclinaison (pente de 5%) :	76
b- Interprétation des résultats	77
III.5 Conclusion	77

Conclusion générale

Bibliographie

Annexe

Liste des Figures

Figure I.1 Les Composantes de Véhicule électrique [1] .	1
Figure 1.2 : Schéma synoptique d'une chaîne de traction.	2
Figure I.3 Ensemble convertisseur machine triphasé.	3
Figure I.4 Solution monomoteur avec une boîte à vitesse.	4
Figure I. 5 Solution avec réducteur mécanique a rapport fixe.	5
Figure I.6 Solution multimoteurs.	6
Figure I.7 Recharge et décharge d'une batterie au plomb.	8
Figure I.8 Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion.[5]	9
Figure I.9 Schémas représentant les différents designs de batteries Li-ion actuelles: a) cylindrique, b) plate, c) prismatique et d) mince et plate. [6].	10
Figure I.10 Production de l'électricité dans une pile à combustible. [7]	12
Figure I.11 Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur.	13
Figure I.12 Modes de connexion. [10].	15
Figure I. 13 Synoptique de la structure du chargeur a couplage inductif. [10].	15
Figure I.14 convertisseur Flyback . [10].	16
Figure I.15 Convertisseur à résonance série. [10].	17
Figure I.16 Convertisseur à résonance série-parallèle[12].	17
Figure I.17 Synoptique du chargeur non embarqué ou non [13].	18
Figure I. 18 Chargeur unidirectionnel entrelacé [16].	19
Figure I.19 Chargeur unidirectionnel multi-niveaux[18].	19
Figure I.20 Chargeur embarqué monophasé utilisant une machine à réluctance Variable. [23].	20
Figure I.21 Chargeur triphasé avec utilisation d'un moteur possible. [24].	21
Figure I.22 Chargeur triphasé avec machine deux pôles. (a) Mode traction, (b) Mode charge [25].	21
Figure I.23 mode de freinage et recupératif , mode de charge	22
Figure II. 1 Schéma de fonctionnement d'un système de traction électrique	26
Figure (II. 2)Les différentes technologies de moteurs utilisés pour la motorisation des VE [28].	26
Figure II. 3 Représentation schématique de la MSAP dans l'espace électrique.	29
Figure II. 4 Schema bloc du MSAP implanté sous Matlab Simulink.	35
Figure II.5 Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α .	38

Liste des Figures

Figure II.6 Franchissement de pente.....	41
Figure II .7 Franchissement d'obstacle.....	41
Figure II.8 Le mécanisme du réducteur	43
Figure II. Modèle Simulink de la partie mécanique du VE et de son environnement.....	44
Figure(III.1) : Schéma de principe de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	46
Figure(III.2) : Schéma bloc de l'onduleur de tension.....	48
Figure(III.3) la simulation de MLI sinus-triangle.....	49
Figure(III.4) les instants de commutation des interrupteurs.(Sa.Sb.Sc).....	49
Figure(III.5) : tension de sortie de l'onduleur (Va).....	50
Figure(III.6) : tension de sortie de l'onduleur (Va).....	50
Figure(III.7) : tension de sortie de l'onduleur (Va).....	50
Figure (III.8) Schéma block de la MSAP associée à l'onduleur à deux niveaux.....	51
Figure (III.9) : courant Isq.....	51
Figure(III.10) : courant Isd.....	52
Figure(III.11) : Vitesse du moteur.....	52
Figure(III.12) : Couple électromagnétique et couple résistant.....	53
Figure (III.13) : courant Isq.....	53
Figure(III.14) : courant Isd.....	54
Figure(III.15) : Vitesse du moteur.....	54
Figure(III.16) : Couple électromagnétique et couple résistant.....	54
Figure (III. 17) Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP [49].....	56
Figure (III.18) : Principe de la commande vectorielle.....	58
Figure(III.19).Découplage par compensation.....	59
Figure(III.20) : Commande découplée.....	60
Figure (III. 21) Boucle de régulation des courants directe et en quadrature.....	61
Figure (III. 22) Schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse [47].....	64
Figure(III.23) courant Isq.....	66
Figure(III.25) Vitesse du moteur avec sa référence.....	66
Figure(III.24) courant Isd.....	66
Figure(III.26) Couple électromagnétique et couple résistant.....	67
Figure(III.27) Vitesse de MSAP.....	68
Figure(III.28) couple de MSAP avec variations de (Rs).....	68
Figure(III.29) Vitesse de MSAP avec variations de (Ld-Lq).....	69
Figure(III.30) couple de MSAP avec variations de (Ld-Lq).....	69

Liste des Figures

Figure(III.31) couple de MSAP avec variations du moment d'inertie (J).....	70
Figure(III.32) Vitesse de MSAP avec variations du moment d'inertie (J).....	70
Figure (III.34) Résultat de la simulation de consigne de vitesse(V_{ref}).....	71
Figure (III.35) Résultat de la simulation de consigne de couple.....	72
Figure (III.35) Résultat de la simulation de vitesse de référence en (rad/s).....	73
Figure (III.36) Résultat de la simulation de couple de référence.....	74
Figure(III.37) Résultats de simulation de la vitesse du véhicule en Km/h avec la technique de commande vectorielle.....	74
Figure (III.38) Résultats de simulation de la vitesse du véhicule en Km/h, Avec la technique de commande vectorielle.....	75
Figure (III.39) Résultat de la simulation de couple électromagnétique.....	75
Figure (III.40) Résultat de la simulation de C_r	76
Figure (III.41) Résultat de la simulation de C_m	76
Figure(III.42) Résultats de simulation de la vitesse du véhicule en Km/h, Avec la technique de commande vectorielle.....	76

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le contexte énergétique actuel (pénurie et pollution des énergies fossiles), l'automobile occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation, impliquent de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie.

Il reste en effet, le mode de transport le plus consommateur d'énergie rapporté à la tonne de produit et/ou de passager transporté par kilomètre. De ce fait, les émissions de CO₂ augmentent toujours plus. Les transports sont en effet la cause d'environ 30% des émissions de gaz à effet de serre et de la majeure partie de la pollution urbaine, que celle-ci soit atmosphérique (particules, oxydes d'azote, hydrocarbures) ou sonores. [1]

Ces problèmes d'environnement ont fait prendre conscience aux chercheurs et constructeurs automobiles de la nécessité de concevoir de nouveaux moyens de transports individuels intégrant de nouveaux types de motorisation propres et économiques en énergie. On introduit de plus en plus le concept de véhicule électrique (VE). Le devenir de l'automobile dans les prochaines années est donc un sujet de recherche d'actualité. Ces dernières années, ce sont la recherche d'une meilleure qualité de vie, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique. La réussite dans ce domaine proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie.

Il a de plus l'avantage d'être excellent: il est le seul véhicule motorisé à "zéro émission" et silencieux. Mais il se heurte à un problème de taille lié à ses faibles capacités de stockage d'énergie limitant son autonomie. En outre, l'analyse économique de la chaîne aboutissant au véhicule électrique souligne les nettes infériorités de celui-ci comparé au véhicule thermique (le coût pratique du véhicule électrique est de 2 à 3 fois plus élevé que celui de son homologue thermique). Le coût élevé des batteries et la construction en petites séries freinent encore la compétitivité au niveau des prix du véhicule électrique. Rien ne semble pouvoir lever à moyen terme de telles limitations, dues pour l'essentiel à l'impossibilité de stocker de l'énergie électrique de manière commode, massive et peu coûteuse. [2]

INTRODUCTION GENERALE

Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions ont été d'ores et déjà proposées. Les voies de progrès mettent en exergue les procédés à base d'électricité à savoir : les véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible.

Quel que soit la solution retenue, étant donné que la source d'énergie étant limitée, il est à prévoir que la gestion de l'énergie électrique destinée à la propulsion, depuis les sources primaires fixes jusqu'aux roues du véhicule, restera une difficulté majeure, et l'économie de cette énergie le souci primordial. Malgré les plus faibles kilométrages, l'usage privilégié des véhicules électriques en milieu urbain nécessite donc des réflexions et des recherches sur la gestion de l'énergie nécessaire.

Ainsi, toute idée qui va dans le sens d'optimiser l'encombrement des systèmes de propulsion, de rendre leur commande aussi robuste contre différentes sortes de perturbations, d'assurer une continuité de service en toute sécurité, d'améliorer le rendement des ensembles machines-convertisseurs et de bien gérer le flux d'énergie est de toute évidence une contribution non négligeable. [3]

Objectifs

Dans ce contexte, et en vue de satisfaire les éléments qui font une idée directrice sur la recherche de solutions innovantes et économiques dans la technologie du véhicule électrique, la modélisation constitue une étape très importante dans l'étude des processus d'entraînements à vitesse variable.

Nous présenterons un modèle de la machine synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension commandé par une modulation de largeur d'impulsion basée sur la technique sinus triangle, tout cela sera raccordé à travers un système de transmission au mécanisme d'action (roue du véhicule), en prenant en considération l'environnement du véhicule (la résistance de l'air, la nature du parcours...).

Nous allons calculer les paramètres des régulateurs PI par la méthode de compensation de pôle pour la commande vectorielle de la MSAP

Structure de mémoire

Ce mémoire est divisé en trois parties :

La première, partie sera consacrée aux généralités sur le véhicule électrique, les avancées technologiques qui ont affectées ce domaine ces dernières années, dans l'industrie

INTRODUCTION GENERALE

des batteries, des chargeurs ainsi que dans les techniques de commande et de gestion de l'énergie.

La deuxième partie sera consacrée à la modélisation des différentes parties de la chaîne d'entraînement du VE à savoir la machine et la partie mécanique du véhicule et son environnement.

La troisième partie sera consacrée à la modélisation de l'organe de variation de vitesse à savoir l'onduleur de tension, le calcul des paramètres des différents régulateurs pour réaliser la commande vectorielle du MSAP et ainsi simuler les différents scénarii et tester la chaîne complète du VE.

Nous terminerons par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I :

Généralité sur le véhicule électrique

Généralités sur le véhicule électrique

I-1 Introduction

L'émergence du véhicule électrique ces dernières années causé bien sûr par l'énorme impact des gaz à effet de serre sur le réchauffement planétaire ainsi que la pollution dans les métropoles, causée par les gaz d'échappement, a vu ces dernières années un énorme gain d'intérêt sur la recherche au sujet de l'améliorer et de le développer.

La première partie de ce travail consiste à dresser une étude générale sur véhicule électrique, les batteries ainsi que les chargeurs et les différents modes de charge.

I-2 Le véhicule électrique : définition et fonctionnement

Un véhicule tout électrique (VTE) est défini comme étant une automobile entraînée par un moteur fonctionnant exclusivement par l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [1]. La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. Compte tenu des progrès : scientifique et technologique, accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie avec de nouvelles conceptions sont explorés pour développer ce mode de propulsion.

1-batteries

2-Moteur

3-Transmission

4-Frein

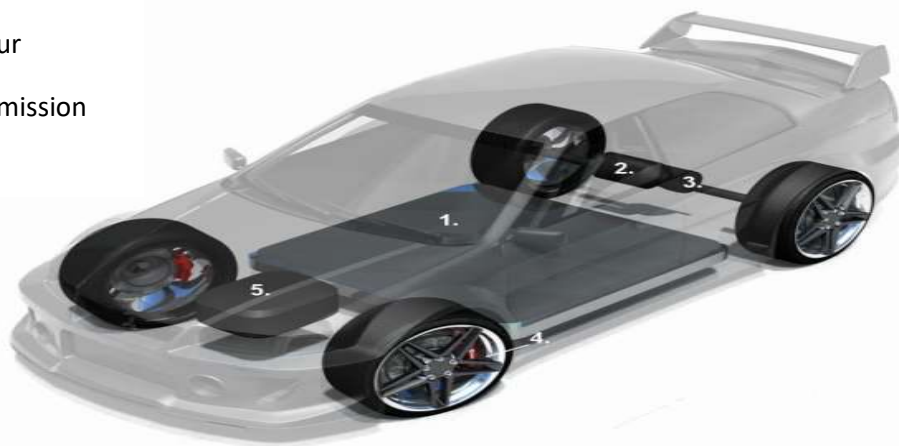


Figure 1.1: Les Composantes de Véhicule électrique

I-3 chaîne de traction d'un véhicule électrique

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la (figure 1.1). Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la

Généralités sur le véhicule électrique

transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur.

On s'intéresse ici à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule [2].

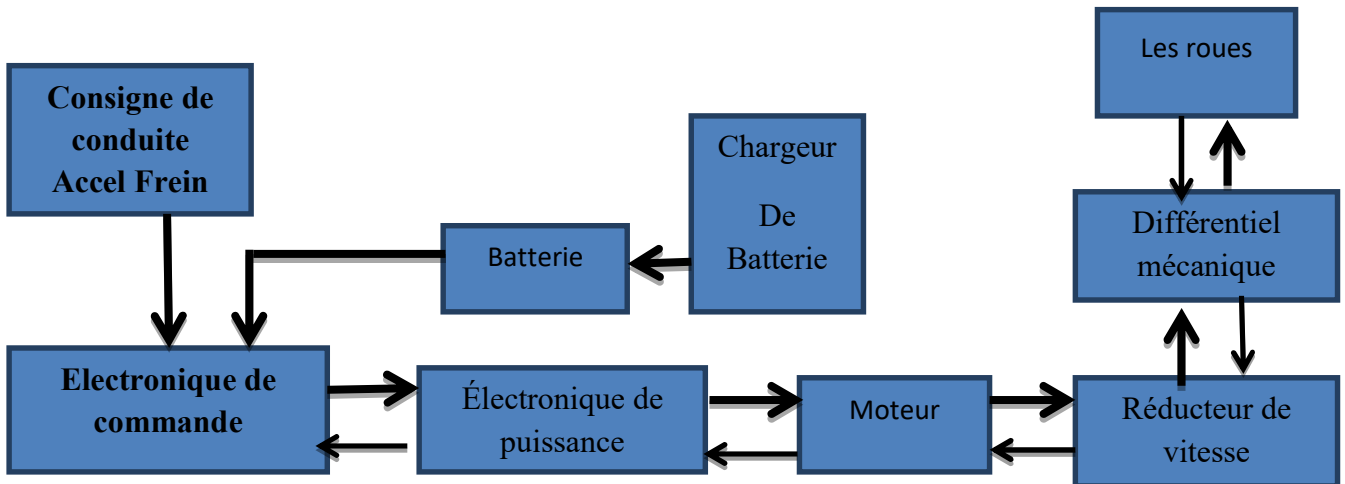


Figure 1.2 : Schéma synoptique d'une chaîne de traction

I-3-1 La batterie

La batterie est un réservoir d'énergie électrique qui se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient.[1]

Les circuits de bord des véhicules électriques nécessitent une alimentation fournie par une batterie. Pour réaliser des batteries capables de rendre crédible une offre de voiture électrique sur le marché, les chercheurs du monde entier travaillent à relever différents défis :

- Augmenter la capacité de stockage d'énergie des batteries des voitures électriques.
- Diminuer les temps de charge des batteries des véhicules électriques.
- Améliorer la sécurité des batteries des voitures électriques.
- Diminuer les coûts des batteries des voitures électriques.
- Renforcer l'approvisionnement et le recyclage du silicium des batteries du véhicule électrique.

I-3-2 Convertisseur statique

Généralités sur le véhicule électrique

Le rôle du convertisseur électronique est de lever les incompatibilités de fonctionnement et la compatibilité il peut être entre les tensions des sources et des récepteurs.

De ce fait nous trouverons à bord des véhicules électriques :

- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), appelés redresseurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC-DC), appelés hacheurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC), appelés onduleurs.

I-3-2-1 Les redresseurs (AC-DC)

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforme une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu. Nous pouvons distinguer : [3]

- Des redresseurs à diodes : ces convertisseurs établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie et la tension alternative d'entrée.
- Des redresseurs à thyristors, qui permettent de faire varier de manière continue le rapport entre la tension continue récupérée à leurs bornes de sortie et la tension alternative appliquée à leurs bornes d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors.
- Des redresseurs mixtes associant des diodes et des thyristors.
- Des groupements de redresseurs à thyristors destinés à améliorer les performances et à diminuer les perturbations.
- Des redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui associent des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes.

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique, en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques.

I-3-2-2 Les hacheurs (DC-DC)

Le hacheur est un convertisseur statique continu/continu (DC/DC) qui nous permet d'obtenir à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension continue de valeur moyenne réglable de plus forte ou faible valeur (élevateur ou abaisseur de tension).

Il est essentiellement constitué d'interrupteurs de puissance (transistors, diodes...) et de composants passifs (inductances, condensateurs...). Ce dernier agit en hachant le courant du circuit de charge, par la commutation ouverture fermeture, périodique d'un interrupteur unidirectionnel. Le rôle du convertisseur continu/continu dans un véhicule électrique est :

- Assurer l'alimentation du réseau de bord basse tension du véhicule (l'éclairage, Calculateurs, climatisation...).
- Recharger la batterie basse tension à partir de la batterie haute tension.

Généralités sur le véhicule électrique

Le but de l'utilisation d'un hacheur est de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

I-3-2-3 Les onduleurs (DC-AC)

Dans un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant alternatif nous pouvons utiliser un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique à courant continu en courant alternatif qui permet de contrôler le couple et la vitesse de moteur du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

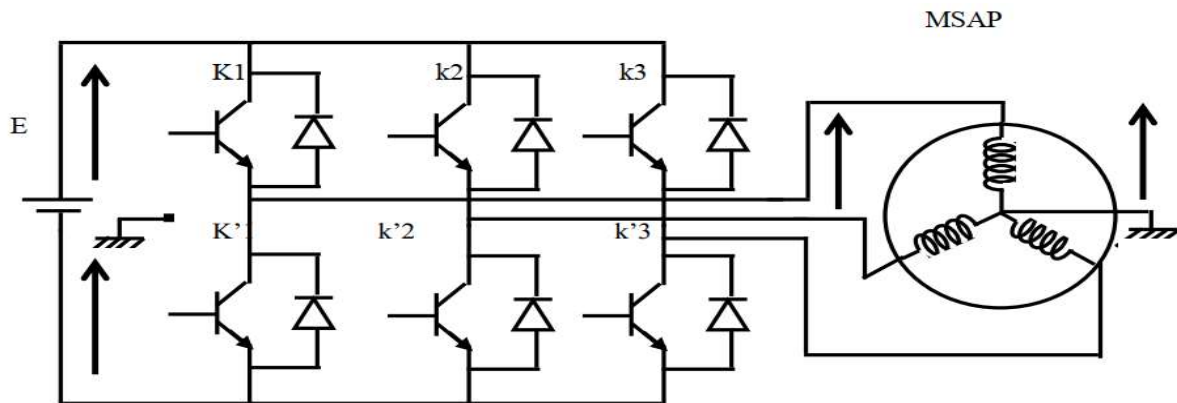


Figure I.3 : Ensemble convertisseur machine triphasé

I-3-3 Réducteur mécanique

La transmission mécanique d'un VE est la liaison entre le moteur et les roues. Nous pouvons envisager plusieurs possibilités de solutions d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique (à rapport fixe), la boîte de vitesse et éventuellement le différentiel. Le choix du réducteur est intimement lié, au type de véhicule et au choix du moteur quia un volume et une masse principalement fonctions de son couple. Pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique. Cela permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation. il doit être parfaitement adapté aux exigences fonctionnelles du véhicule.

I-3-3-1 Solution avec boîte de vitesse.

L'avantage essentiel de cette solution est de permettre l'utilisation d'un moteur à plus faible couple, donc plus léger, pour une vitesse maximale donnée. Remarquons qu'entre deux changements de vitesse (petite plage) si le moteur possède une capacité de fonctionnement à puissance maximale constante, cela peut permettre également la suppression des fluctuations de puissance. la figure ci-dessus montre cette solution.

Généralités sur le véhicule électrique

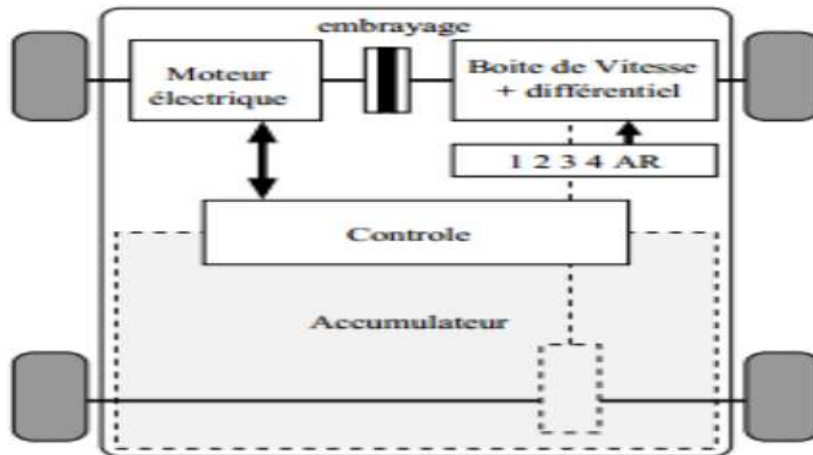


Figure I.4. Solution monomoteur avec une boîte à vitesse

I-3-3-2 Solution avec réducteur mécanique a rapport fixe

Le couple maximal que doit délivrer un tel moteur associé un réducteur de rapport fixe est supérieur à celui que devrait produire un moteur associé à une boîte de vitesse.

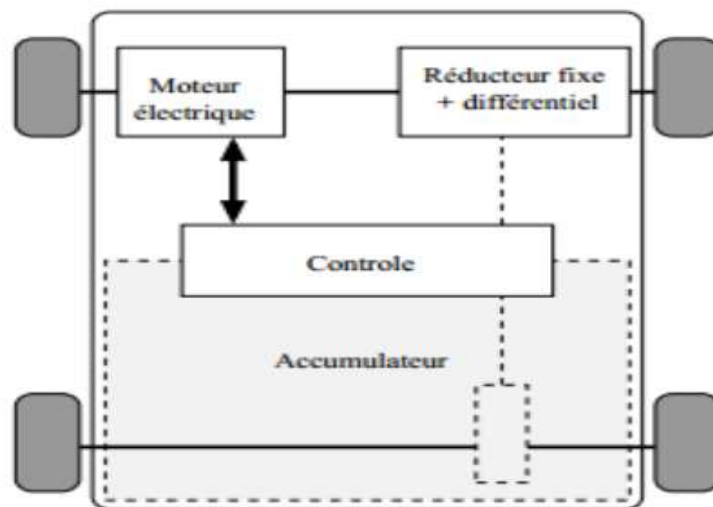


Figure I.5 Solution avec réducteur mécanique a rapport fixe

1-3-3-3 Solutions multi-moteurs

Il peut a priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel est les doubles joints de cardans nécessaires dans les deux solutions précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte à vitesse et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne

Généralités sur le véhicule électrique

de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant ou à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices.

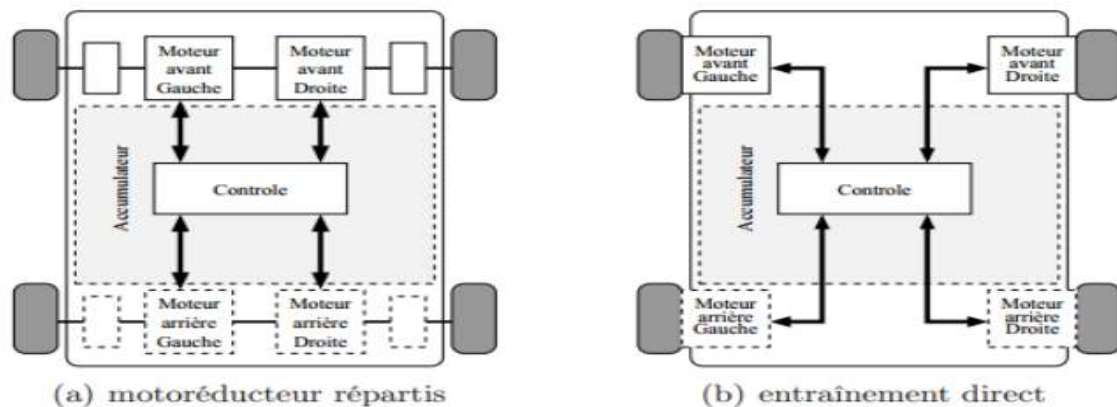


Figure I.6 Solution multi moteurs

I-3-4 Motorisation de la chaîne de traction

La motorisation des véhicules a connu l'introduction de l'actionneur électrique sous plusieurs configurations : moteur à courant continu, moteur synchrone et moteur asynchrone. En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu. Mais l'évolution de l'électronique de puissance conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations à courant alternatif.

➤ Moteurs à courant continu

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en général, les 0,3 à 0.5 KW/kg ; alors que celle des moteurs à essence est l'ordre de 0.75 à 1.1 KW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application. Ces raisons donc, ont conduit les différents industriels à s'orienter vers l'utilisation des machines alternatives triphasées

➤ Moteurs à courant alternatif

L'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant les moteurs à courant alternatif beaucoup plus préférables que les entraînements traditionnels avec des moteurs à courant continu. Car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins d'entretien que les moteurs à courant continu. Ces facteurs sont d'importance primordiale pour un système de

Généralités sur le véhicule électrique

propulsion de véhicule électrique. Dans ce cas, quatre principaux types de moteurs peuvent se discerner :

- **Moteurs à induction** : de construction simple, robuste, ces moteurs sont peu coûteux et ne demandent pas d'entretien. De plus, ils supportent des surcharges pouvant aller jusqu'à 5 ou 7 fois le couple nominal. De bonnes performances dynamiques du contrôle de couple. En revanche ces commandes assez complexes peuvent augmenter totalement le coût de revient de l'ensemble du système.

- **Moteurs synchrones** : le moteur à aimants permanents admet une puissance massique plus importante mais le coût des aimants est encore élevé, le champ magnétique procure au moyen des aimants permanents de haute énergie. Ceci mène à la réduction du poids et du volume global. En outre, pas de pertes de cuivre au niveau du rotor, donc ils ont un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux moteurs à induction.

Pour cela le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, la solution la plus adaptée pour une traction automobile grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement.

Machines linéaires : principalement utilisées en traction électrique pour les trains à grande vitesse supérieures à 500 km/h se sont des systèmes de sustentation magnétique développés au Japon et relèvent de la très haute technologie.

Moteurs à réticence : construits comme un moteur asynchrone, mais avec un rapport puissance / poids très important, ils en demeurent néanmoins bruyants (ondulation de couple).

I-4-1 Les batteries

➤ **Plomb/Acide – Pb :**

C'est la plus ancienne des technologies de batteries et la moins onéreuse actuellement. Inventée en 1859 par le français Gaston Planté et améliorée en 1881 grâce au luxembourgeois Henri Owen Tudor qui la rend plus robuste et efficace en remplaçant les feuilles de plomb baignant dans de l'acide sulfurique par des plaques de plomb enduites d'une pâte active.

Lors de sa charge une batterie au plomb dégage de l'oxygène et de l'hydrogène, la boîte n'étant pas fermée hermétiquement, la batterie doit être utilisée à plat et le niveau d'eau ajusté régulièrement. D'autre part les vapeurs et/ou projections d'acide sulfurique provoquent de la corrosion si l'emplacement de la batterie n'est pas entretenu (avec de l'eau et bicarbonate de soude). Ce type de batterie supporte très mal la décharge complète et la surcharge, elles sont faites pour rester chargées en permanence.

Généralités sur le véhicule électrique

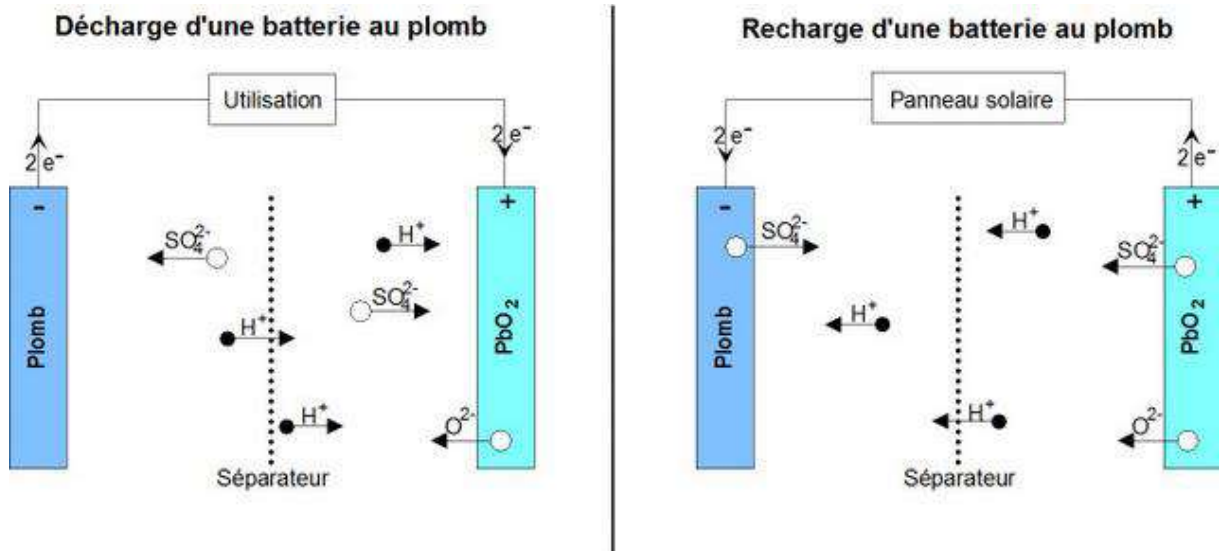


Figure 1.7. Recharge et décharge d'une batterie au plomb

➤ Cadmium-Nickel - Ni-Cd

C'est une technologie très ancienne aussi, inventée par le suédois Waldemar Jungner en 1899. Elle était très répandue pour les appareils électriques nécessitant un courant électrique important comme les téléphones portables ou les appareils photos numériques. Ce type de batterie a une longévité assez importante (environ 1000 cycles) Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigés pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour. [4]

➤ Nickel-Métal Hydrure - Ni-MH

C'est la technologie qui a succédé aux batteries Ni-Cd, commercialisée en 1990. Ces batteries ont une architecture similaire aux batteries Ni-Cd pour une densité énergétique doublée mais une résistance supérieure qui impose une phase de rodage des éléments pour débiter de forts taux de courants. C'est une technologie assez fragile car ne supportant pas la surcharge. Un avantage certain de cette technologie est qu'elle n'a pas d'effet mémoire mais a une capacité d'autodécharge importante. Ce type de batterie est adapté pour une transition vers les voitures électriques mais sa durée de vie n'est pas satisfaisante. La technologie Ni-Mh est la mieux adaptée pour les véhicules électriques grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion.[4]

➤ Lithium et dérivés :

➤ Lithium-ion - Li-ion -

Bien que le principe en soit connu depuis les années 1980 les premiers éléments rechargeables au lithium n'ont été commercialisés qu'en 1991. Cela à cause du caractère instable du lithium métallique pendant la phase de charge. Le problème a été résolu en utilisant des ions de lithium. Le lithium-ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions sont prises lors de la charge. En revanche il y a un risque de surchauffe et d'explosion si elles sont

Généralités sur le véhicule électrique

chargées dans de mauvaises conditions, la plupart des fabricants équiperont donc leurs blocs de batteries de circuits de protection. Avec un faible taux de décharge dans le temps et sans effet mémoire, cette batterie offre une densité énergétique importante (le double du Ni-Mh) mais une durée de vie inférieure aux batteries Ni-Mh. [4]

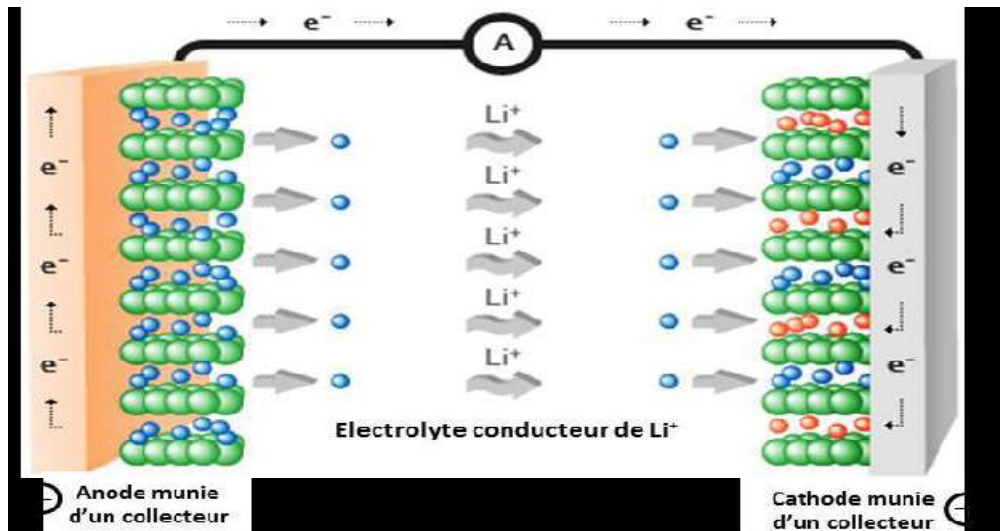


Figure I.8. Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion.[5]

➤ Lithium Polymère - Li-Po

Depuis 1999 est apparue une nouvelle génération d'accumulateurs Li-ion : Le Lithium ion Polymère (Li-po). L'électrolyte est un polymère gélifié qui permet d'obtenir des éléments très fins et plats pouvant prendre toutes les formes possibles. Encore chère aujourd'hui cette technologie récente est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins chère à la réalisation que le Li-ion classique.[..]

Généralités sur le véhicule électrique

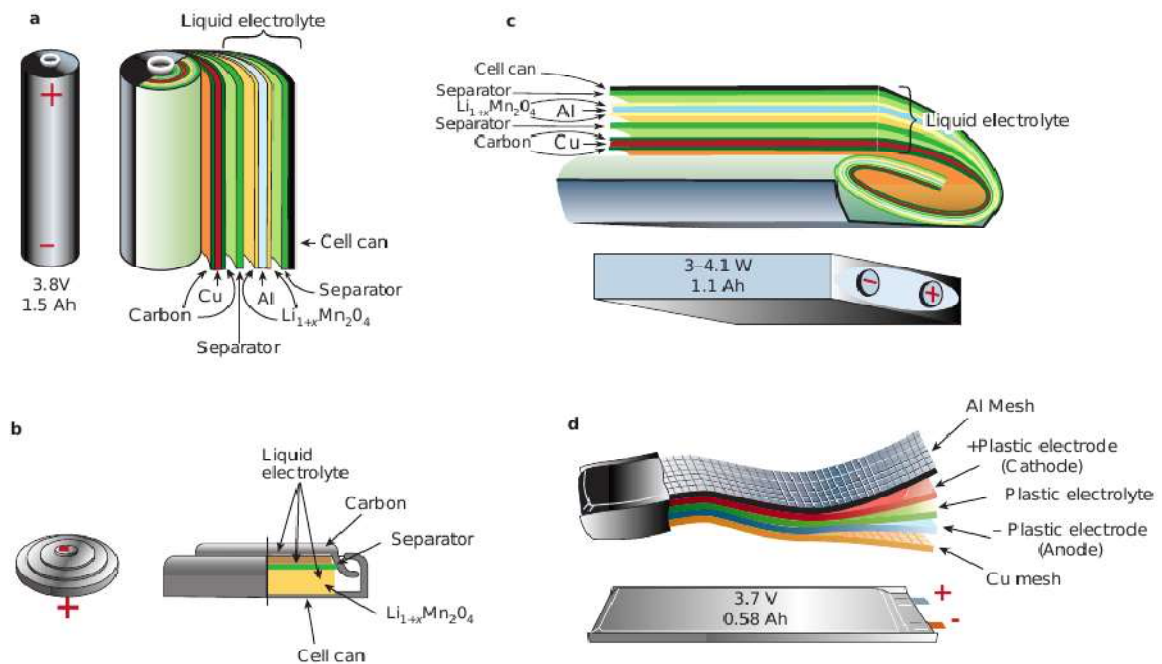


Figure I.9. Schémas représentant les différents designs de batteries Li-ion actuelles: a) cylindrique, b) plate, c) prismatique et d) mince et plate. [6]

➤ **Lithium-phosphate - LiFePO4**

Une des avancées majeures des cinq dernières années. Elles combinent les avantages des Li-ion et Li-Po et une durée de vie élevée. [6]

➤ **Lithium Métal Polymère – LMP**

Fonctionne à température interne d'environ 85 °C. Une technologie en cours de développement dont le promoteur est le groupe Bolloré. [6]

➤ **Zebra batteries**

Une technologie à part, car elle est mise en œuvre par un seul fabricant. Elle utilise du chlorure d'aluminium de sodium liquide et sa température interne est de 250 °C. [6]

➤ **Nickel-Zinc – Ni-Zn**

Considérée comme des batteries de nouvelle génération, leur développement industriel est en cours. Elles sont proches des Li-ion pour les performances, et devraient coûter sensiblement moins cher. [6]

I 4-2 piles à combustible

La possibilité de produire de l'électricité à partir de la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, appelée principe de l'électrolyse inverse, fut énoncée pour la première fois en 1802

Généralités sur le véhicule électrique

par Sir Henry David. Partant de ce procédé, Sir William Grove expérimente en 1839 la première pile à combustible avec des électrodes en platine dans un milieu acide sulfurique dilué. La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux : des PAC furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 [T. Berning].

La pile à combustible est un système de conversion directe de l'énergie d'un comburant en électricité. Une cellule élémentaire, formant le noyau de la pile à combustible est responsable de la conversion de l'énergie chimique en une énergie électrique. La structure de base d'une cellule est formée d'un milieu conducteur ionique ou un électrolyte en contact avec deux électrodes. Les PAC sont classées selon le choix de l'électrolyte et du combustible utilisé. Le choix de ces deux éléments détermine les réactions aux électrodes et le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne la température de fonctionnement de la pile. Le Tableau 2 énumère les différents types de PAC existantes [7].

	Nom	Électrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domaines d'applications
PAC à basses températures	DMFC (Direct methanol fuel cell)	Membrane polymère	1mW à 100kW	60-90 °C	Portable
	PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell)	Membrane polymère	100W à 500kW	60-90 °C	Transport Portable Stationnaire
	AFC (Alcaline fuel cell)	Solution alcaline aqueuse	10 kW à 100kW	50-250 °C	Transport Spatial
	PAFC (Phosphoric acid fuel cell)	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220 °C	Stationnaire
PAC à hautes températures	MCFC (Molten carbonate fuel cell)	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650 °C	Stationnaire
	SOFC (Solid oxide fuel cell)	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050 °C	Stationnaire

Chaque type de PAC a un domaine d'application privilégié. Parmi les divers types de pile, c'est la pile PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui se développe le plus vite [8]. Elle se présente comme le choix le plus adéquat pour des applications dans le domaine du transport et ceci pour trois raisons essentielles :

- Température de fonctionnement : la pile fonctionne à basse température, entre 60°C et 90°C, ce qui est adapté à un usage automobile. A haute température, la dégradation des matériaux est assez élevée.
- Structure solide : sa membrane en polymère solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile ; elle empêche notamment les fuites dues aux vibrations.
- Densité de puissance : la propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir

Généralités sur le véhicule électrique

une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEMFC répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1kg/kW et 3kg/kW.

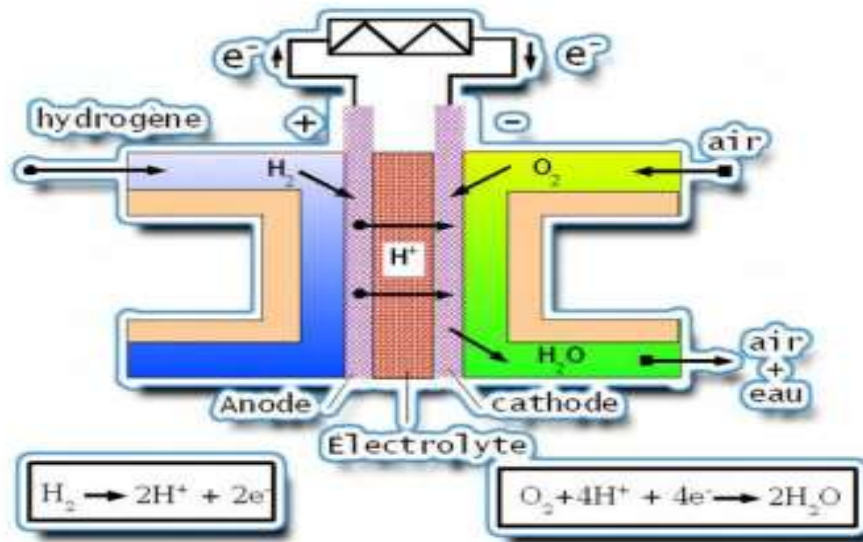


Figure 6 : Production de l'électricité dans une pile à combustible. [7]

I.4-3 Le super condensateur

Les super condensateurs ou super capacités constituent une nouvelle génération de composants électrochimiques destinés au stockage d'énergie. Ces composants relativement nouveaux occupent une position véritablement intermédiaire entre les condensateurs électrolytiques et les accumulateurs électrochimiques en termes d'énergie et de puissance spécifiques. Leur intérêt réside dans l'énergie importante, contrairement aux condensateurs, qu'ils sont capables de stocker directement sous sa forme électrique, conservant ainsi la disponibilité immédiate de ladite énergie. Dans un accumulateur électrochimique, l'énergie est stockée par réaction électrochimique réversible. Dans les condensateurs, le stockage d'énergie est électrostatique ne mettant en place que des déplacements de charges. La quantité d'énergie stockée dépend directement de la capacité du composant, laquelle est fonction de la surface des électrodes et de l'épaisseur du diélectrique. Dans les super condensateurs, en particulier la technologie au carbone, le stockage d'énergie est essentiellement électrostatique. La différence fondamentale avec les condensateurs réside dans l'absence de diélectrique. Le stockage d'énergie s'effectue par organisation de la distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface des électrodes, créant une zone dite "couche double électrique". [9]

1-5 les structures de chargeur

Généralités sur le véhicule électrique

1-5-1 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.[10]

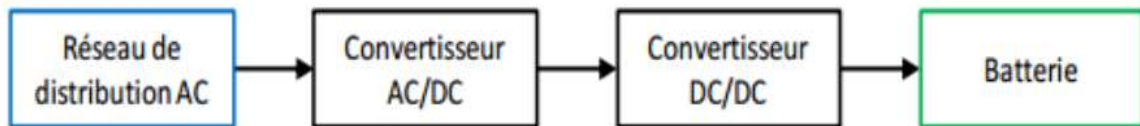


Figure 1.7 Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur.

Conversion AC/DC: la transformation du courant alternatif délivré par le réseau de distribution en courant continu est réalisée soit par un pont redresseur à diodes, ou par d'autres systèmes tels que, un pont à thyristors ou un convertisseur à absorption sinusoïdale de courant.[10]

Conversion DC/DC: le courant continu obtenu à l'issue de la première conversion est modifié pour correspondre au profil de charge de la batterie. Une alimentation à découpage permet par exemple d'adapter la puissance en entrée de la batterie. Cette conversion introduit généralement une isolation galvanique de sécurité.

Plusieurs structures de conversion existent. Les principales notions, définissant les différents types de chargeur sont présentés selon leur emplacement et leur niveau de puissance :

- Chargeur externe : installé à l'extérieur du véhicule, l'énergie électrique adaptée aux caractéristiques de la batterie, est fournie directement au véhicule.
- Chargeur embarqué : intégré au sein du véhicule, l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule. Cette configuration ne nécessite pas de convertisseurs supplémentaires au sol. En fonction de la puissance disponible et transmise à la batterie, la durée de recharge évolue. Le tableau donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation. [10]

Tableau I.2 Temps de charge des batteries. [10]

Généralités sur le véhicule électrique

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant max	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 kW	230 VAC	16 A	lente
2 à 3 heures	Triphasée 10 kW	400 VAC	16 A	
3 à 4 heures	Monophasée 7kW	230 VAC	32 A	
1 à 2 heures	Triphasée 22kW	400VAC	32 A	rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 kW	400VAC	63 A	
20 à 30 minutes	Continue 50 kW	400 à 500 VDC	100 a 125 A	

1-5-2 Modes de connexion des chargeurs pour VE

Une norme internationale (norme IEC 61851-1 *Electric Vehicle Conductive Charging System*), en cours de finalisation définit quatre modes de connexion pour recharger le véhicule, comme suit [10]:

- Mode 1 : Prise domestique

Le VE est branché au réseau d'alimentation à l'aide d'une prise normalisée (intensité standard jusqu'à 16 A). Adapté pour les petites puissances de charge telles que les deux roues, les quadricycles, les VEH et les anciennes générations de VE. L'installation électrique est équipée d'une prise de terre, un disjoncteur contre les surcharges et une protection différentielle. [10]

- Mode 2 : Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection

Il possède les mêmes propriétés que le premier mode, amélioré d'un boîtier de contrôle intégré au câble pour une meilleure sécurité. Un VE peut être rechargé en mode 2 avec une installation en mode 1. Cette configuration est considérée comme un mode dégradé de transition ou de dépannage, réservée à des applications de puissance inférieure ou égale à 3 kW. Du fait de la spécificité du câble, cette solution est particulièrement coûteuse. [10]

- Mode 3 : Prise spécifique sur un circuit dédié

Le véhicule est relié au réseau électrique via un socle (wallbox), une prise électrique et un circuit dédié. Equipé d'un quatrième fil entre la borne et le véhicule afin de garantir la continuité avec la terre et permettre au véhicule de dialoguer en permanence avec l'infrastructure. Une fonction de contrôle et de protection est installée en permanence dans l'installation. En effet, avant d'enclencher la recharge, le système de contrôle vérifie que le

Généralités sur le véhicule électrique

véhicule est bien connecté, que la masse est reliée au circuit de protection de l'installation et que les puissances entre le câble, le véhicule et le circuit de charge sont cohérentes. [10]

- Mode 4 : Connexion courant continu

Le VE est branché indirectement au réseau de distribution par le biais d'un chargeur externe. Tout comme pour le mode 3, il est également équipé d'une fonction de contrôle et de charge [10]. Ce mode est dédié à la recharge rapide continue la figure I.8 illustre ces quatre modes :

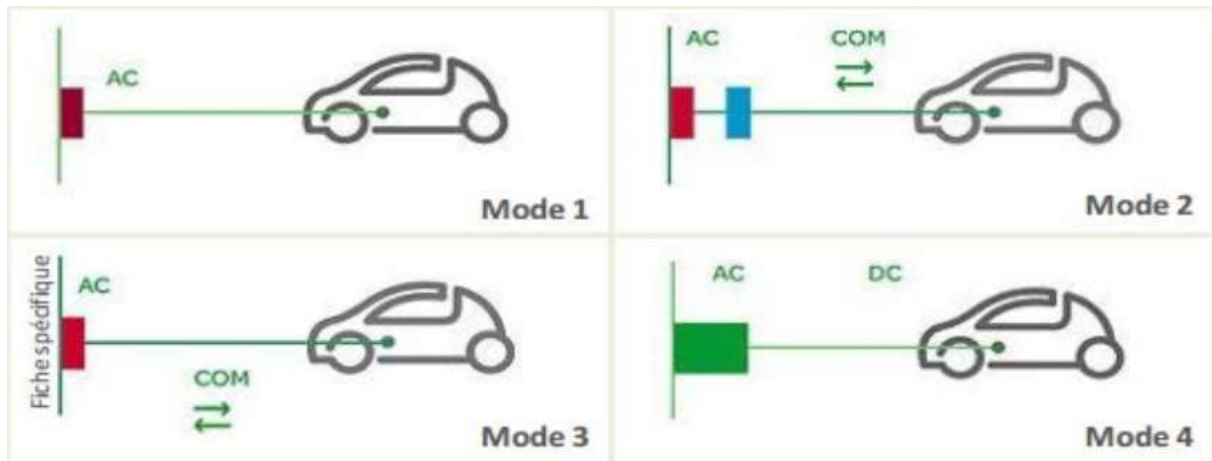


Figure I.8 Modes de connexion. [10]

1-5-3 Chargeurs inductif

Le transfert de l'énergie pour ce type de chargeur se fait par induction magnétique, sans contact électrique. Le principe de base est similaire au transfert d'énergie d'un transformateur. Le choix de la structure dépend de la puissance qui sera transmise. Le schéma des principaux éléments constituant le chargeur à couplage inductif est représenté sur la figure I.9. [10]

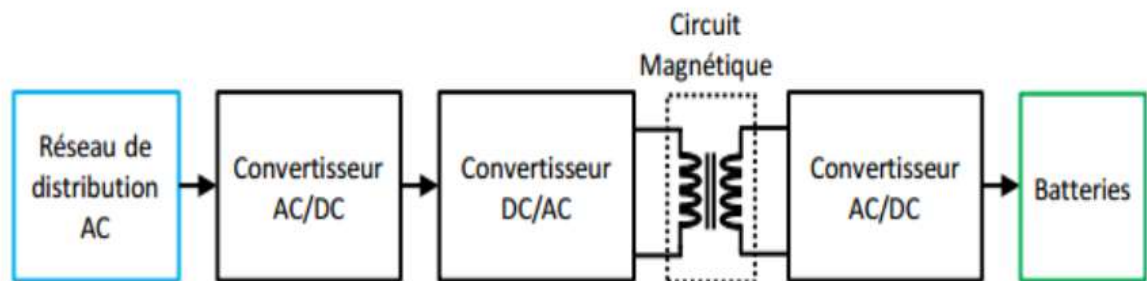


Figure I.9 Synoptique de la structure du chargeur à couplage inductif. [10]

Il existe différentes structures de chargeur inductif, certaines plus complexes que d'autres. Quatre d'entre elles sont présentées, allant de la plus simple à la plus

Généralités sur le véhicule électrique

complexe.[10]

Convertisseur « flyback »

Le schéma d'un convertisseur « flyback » est donné à la Figure 1.10 C'est l'une des structures de conversion isolée les plus simples, puisqu'elle ne possède qu'un interrupteur commandé. Toutefois, elle est limitée à quelques centaines de Watts. [11]

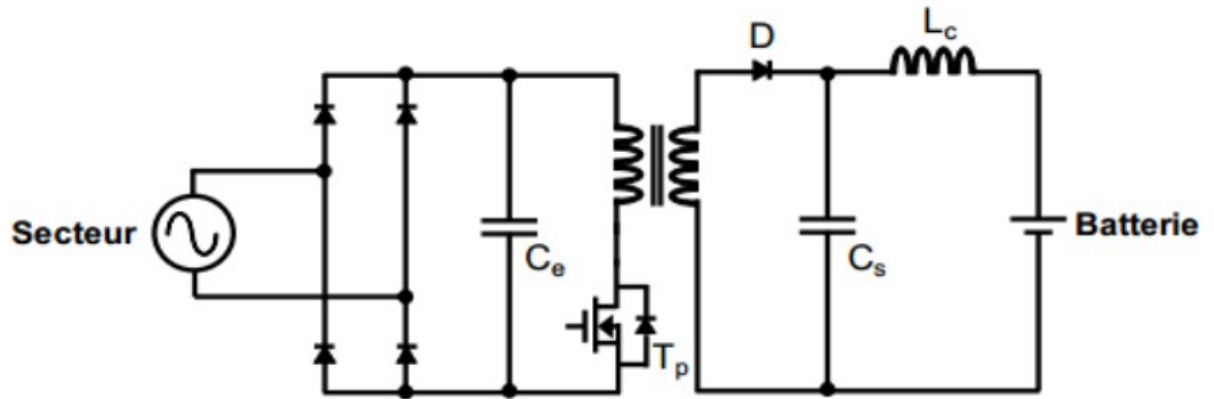


Figure I.10 convertisseur Flyback . [10]

Le principe de fonctionnement est le suivant : à la fermeture de l'interrupteur T_p , l'enroulement primaire est alors relié à la sortie du redresseur. Il en résulte une augmentation du flux magnétique au primaire. La diode D est quant à elle bloquée. Les deux enroulements ne sont donc pas parcourus par le courant en même temps. A l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. L'énergie magnétique stockée est transférée vers la batterie. [10]

-Convertisseur à résonance série

Les convertisseurs à résonance sont apparus il y a quelques années, pour pallier les limites du thyristor et permettre des fonctionnements à des puissances et fréquences plus élevées, c'est à dire quelques 100 kW et quelques kHz[11]. Le principe est d'utiliser des circuits résonnants. Ces circuits permettent d'obtenir, au niveau des interrupteurs, les conditions de commutation naturelle. Une commutation naturelle est définie comme étant la commutation spontanée d'un interrupteur pour laquelle les pertes par commutation sont nulles au blocage ou à l'amorçage.

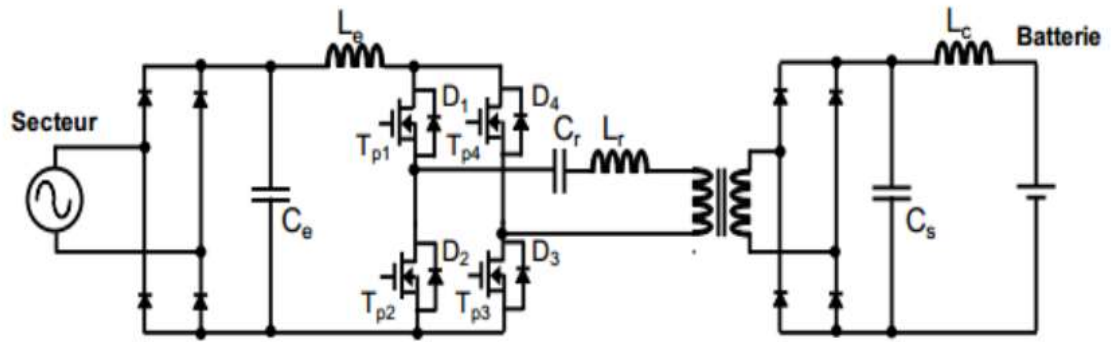


Figure I.11 Convertisseur à résonance série. [10]

Le convertisseur de la Figure 1.12 utilise un circuit à résonance série composé d'une inductance L_r et d'un condensateur C_r . Le circuit série excité par une tension alternative à la fréquence F , est parcouru par un courant quasi-sinusoïdal en avance de phase si $F < F_0$ et en retard si $F > F_0$. Plusieurs modes de fonctionnement sont donc possibles selon la fréquence de commande F_0 . Cette structure est beaucoup plus coûteuse en nombre d'interrupteurs que l'alimentation Flyback, elle présente toutefois un meilleur rendement et permet d'atteindre des puissances et des fréquences bien plus élevées. [10]

- **Convertisseur à résonance parallèle**

Dans le cas d'un convertisseur à résonance parallèle représenté à la Figure 1.13, le comportement du circuit résonant est dual de celui du circuit série. Par conséquent, le circuit parallèle est excité par un courant alternatif à la fréquence F . Nous obtenons alors une tension en avance de phase si $F < F_0$ et en retard si $F > F_0$. [10]

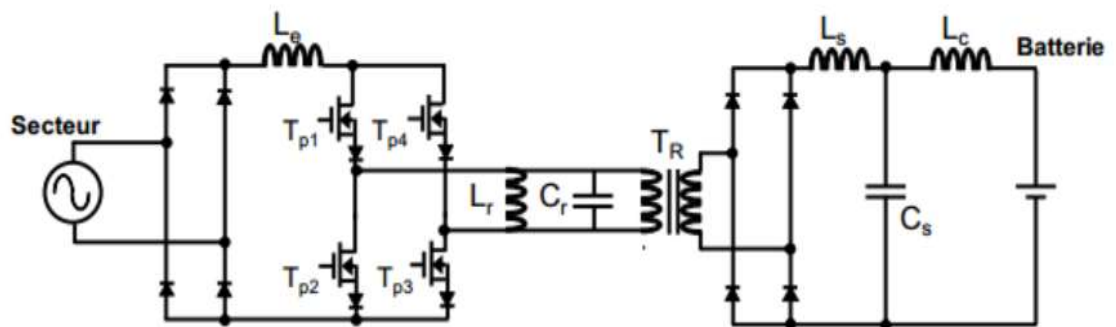


Figure I.12 Convertisseur à résonance série-parallèle [12].

Elle est composée au primaire d'un redresseur, d'un onduleur associé au circuit résonant série (L_s et C_s) et au secondaire, d'un circuit résonant parallèle (L_p et C_p), d'un second pont de diode et de la batterie. Les condensateurs C_1 , C_2 , C_3 et C_4

Généralités sur le véhicule électrique

permettent la commutation à tension nulle [12]. Par la commande des interrupteurs de l'onduleur, le courant redressé en sortie du pont de diode est asservi pour suivre un signal sinusoïdal redressé dont l'amplitude est déterminée par la régulation de la puissance de sortie.

1-5-4 Chargeurs filaires.

Parmi les chargeurs connectés par câble électrique, il est possible de distinguer les chargeurs embarqués et non embarqués, comme nous l'avons mentionné précédemment. Les chargeurs non embarqués (cf. Figure 1.13) présente l'avantage de limiter les contraintes de masse et d'encombrement d'un VE, au détriment du coût lié à la redondance des installations de recharge au sol. [10]

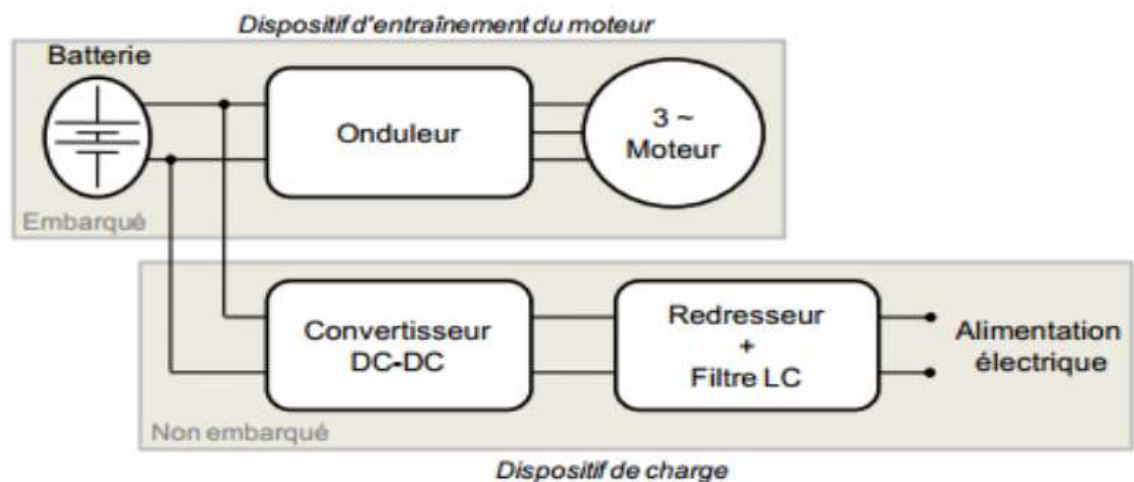


Figure I.13 Synoptique du chargeur non embarqué ou non [13]

- Les chargeurs peuvent être classifiés selon les possibilités de transfert d'énergie, c'est-à-dire unidirectionnel ou bidirectionnel. Nous allons donc présenter des chargeurs embarqués dans chacune de ces catégories

- Chargeur unidirectionnelle

Dans le cadre d'une structure unidirectionnelle, le transfert d'énergie s'effectue du réseau à la batterie. C'est une première étape logique, car elle limite la configuration matérielle requise, simplifie les problèmes d'interconnexion, et tend à réduire la dégradation de la batterie [14],[15]. Les schémas des Figure 1.14 et Figure 1.15 sont composés d'un redresseur monophasé, d'un convertisseur Boost et d'un convertisseur continu-continu unidirectionnel. Les deux topologies se différencient l'une de l'autre par le type de convertisseur Boost utilisé. Le convertisseur élévateur de la Figure 1.16

Généralités sur le véhicule électrique

est réalisé par deux structures Boost mises en parallèle, qui fonctionnent avec un déphasage de 180° . Cet entrelacement des commandes. [10]

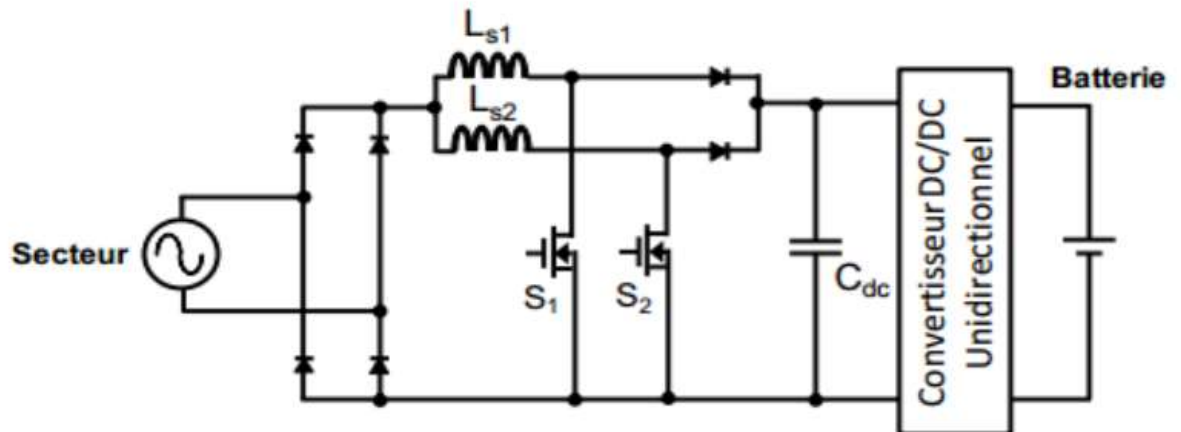


Figure I.14 Chargeur unidirectionnel entrelacé[16]

Permet la réduction de l'ondulation de la tension de sortie et du courant d'entrée. Néanmoins, ce chargeur est limité en puissance à environ 3,5 kW. Sur la Figure 1.15, le convertisseur Boost présenté est multi-niveaux, ce qui permet de réduire le dimensionnement, la fréquence de commutation et le stress des cellules de commutation.[17]

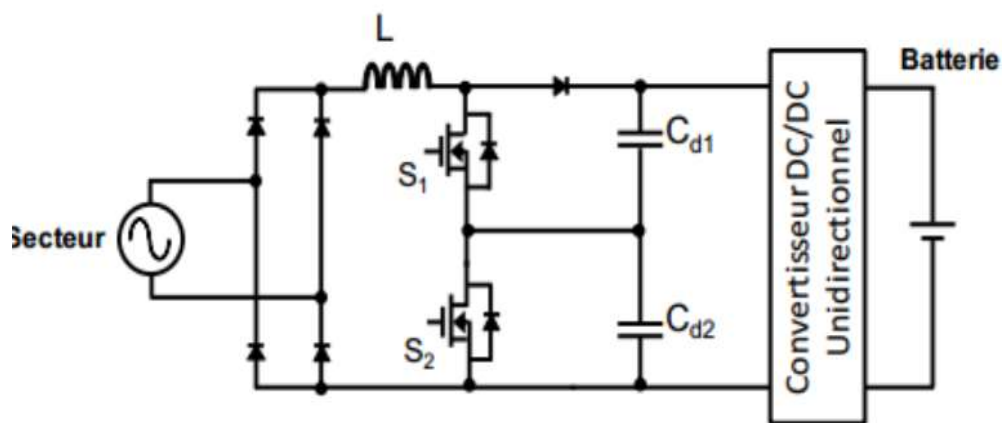


Figure I.15 Chargeur unidirectionnel multi-niveaux[18]

Dans les deux cas, le principe de fonctionnement est le même. L'association du redresseur au Boost autorise la conversion alternative continue avec absorption d'un courant sinusoïdal sur un réseau monophasé.[10]

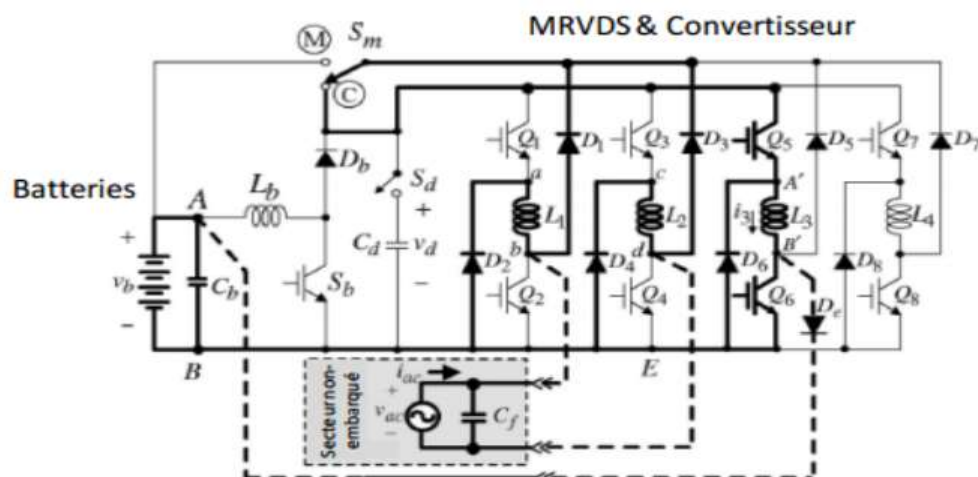
Généralités sur le véhicule électrique

- Chargeur bidirectionnelle

Le chargeur étant embarqué au sein du véhicule, certains ont eue l'idée d'utiliser des éléments de la chaîne de traction pour la charge des batteries [19], [20], [21], [22] profitant ainsi du caractère bidirectionnel de certains convertisseurs. Tout chargeur bidirectionnel peut être utilisé lors de phases de freinage récupératif. Nous avons fait le choix ici, de présenter uniquement des architectures bidirectionnelles réutilisant les enroulements des moteurs de traction. Pour cela, nous distinguons deux cas : le cas d'une alimentation monophasée (charge lente) puis d'une alimentation triphasée (charge rapide).

- Chargeur sur réseau monophasé

Le montage de la (Figure 1.16) présenté utilise une machine à réluctance variable (MRVDS) à double saillance. En mode charge, les enroulements du moteur et des interrupteurs du dispositif embarqué réalisent la fonction chargeur. Les contacteurs S_m et S_d permettent le passage du mode traction au mode charge. Pour réduire les pertes par commutation, l'interrupteur Q_5 est continuellement passant et l'IGBT Q_6 est utilisé pour les commandes de commutation. Une diode D est ajoutée pour éviter tout court-circuit de la batterie lorsque Q_6 est passant. Les deux premières inductances du moteur sont utilisées pour le filtrage et la troisième sert d'élément de stockage de la structure qui s'apparente alors à une structure Boost [23]. Lors de l'ouverture de l'interrupteur Q_6 , l'énergie stockée dans l'enroulement est envoyée à la batterie.



Généralités sur le véhicule électrique

Figure I.16 Chargeur embarqué monophasé utilisant une machine à réluctance Variable. [23]

- Chargeur sur réseau triphasé

L'adaptation pour une alimentation par un réseau triphasé de la Figure 1.17 est donnée ci-dessous. Dans ce cas de figure, il n'est plus possible d'adapter la tension à celle de tous les types de batteries. Les trois enroulements du moteur sont alors utilisés comme inductance. C'est l'un des inconvénients de ce chargeur. [10]

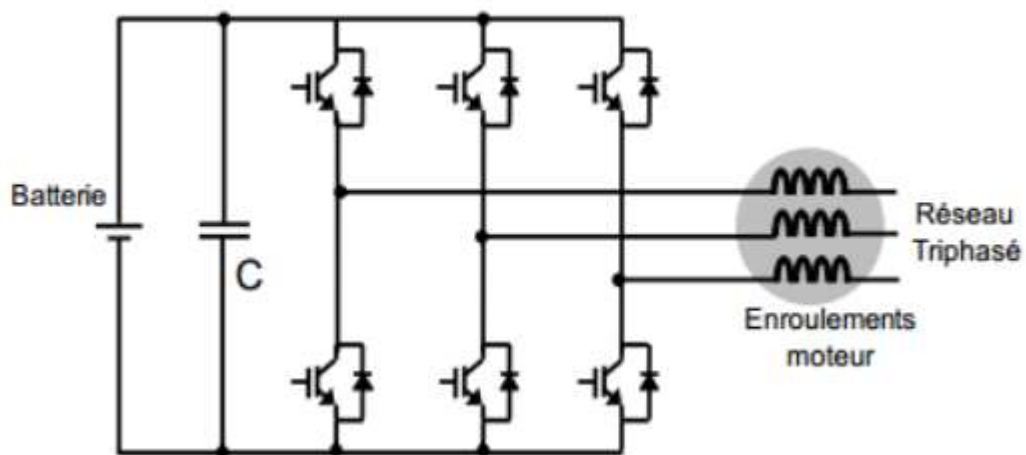


Figure I.17 Chargeur triphasé avec utilisation d'un moteur possible. [24]

Le dernier exemple (Figure 1.18) est adaptable à un réseau monophasé et triphasé. Dans ce schéma, seul le fonctionnement en triphasé est présenté.

(a) représente le fonctionnement en mode traction.

(b) représente le fonctionnement en mode charge.

Généralités sur le véhicule électrique

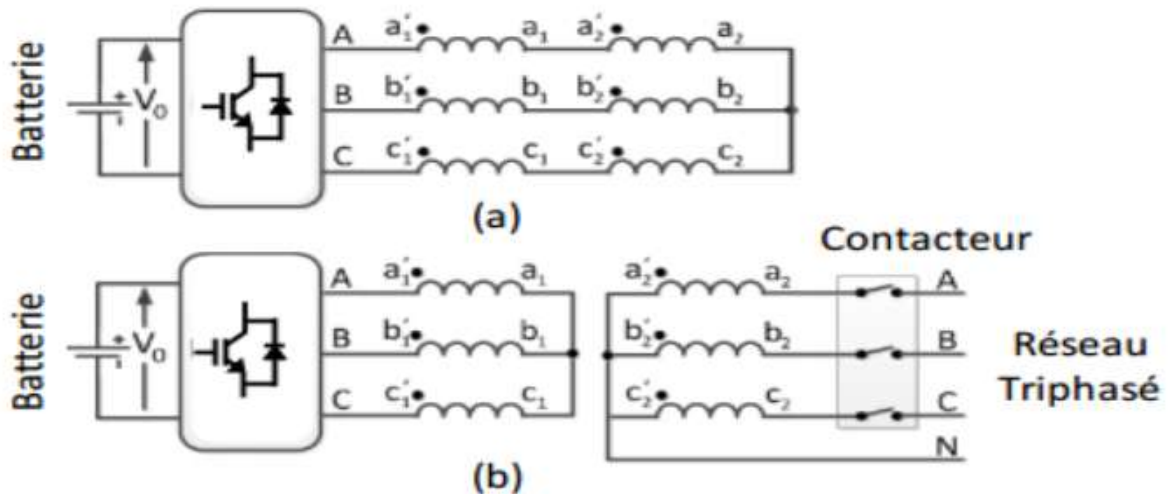


Figure I.18 Chargeur triphasé avec machine deux pôles. (a) Mode traction, (b) Mode charge[25]

En mode traction, les enroulements sont connectés les uns aux autres en série pour constituer un système à trois phases. Ces phases peuvent être reliées en Δ ou Y pour former le stator d'une machine triphasée classique. La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) de cette structure est alors alimentée par la batterie au travers du convertisseur fonctionnant en onduleur de tension. Dans le fonctionnement en mode chargeur, le système est reconfiguré par des contacteurs. Un contacteur triphasé permet de connecter le système au réseau électrique. Afin de garantir un bon rendement du chargeur, le rotor du moteur doit tourner, ce qui limite le courant de magnétisation de la machine. [25]

I.5) Fonctionnement général de la chaîne de conversion.

L'idée principale est de réutiliser les composants électroniques de la chaîne de traction du moteur pour réaliser le dispositif de charge des batteries. Le synoptique de la chaîne de conversion en mode freinage récupératif et en mode charge est représenté à la figure I.19.

Généralités sur le véhicule électrique

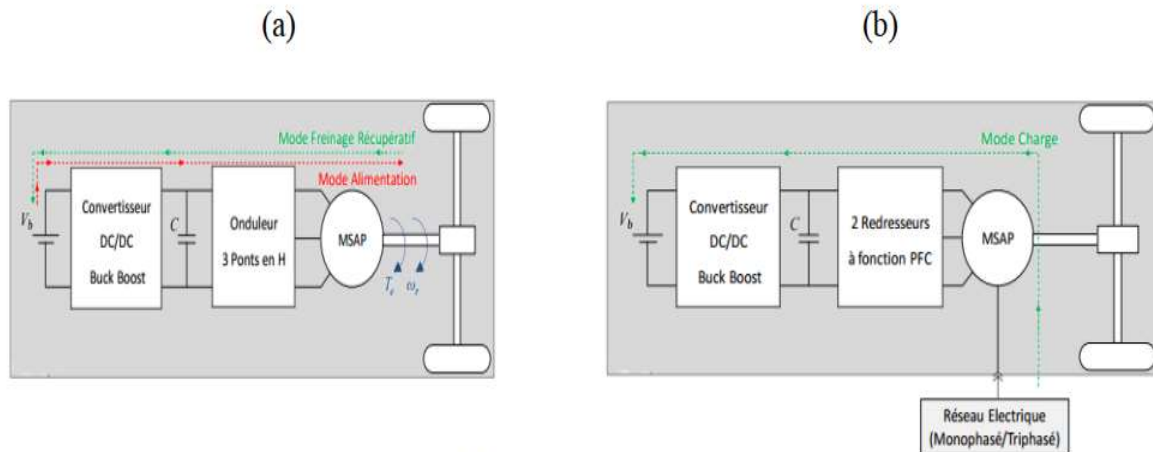


Figure I.19 a) Mode de freinage et récupératif

b) mode charge

Le véhicule électrique est équipé de batteries hautes tensions délivrant une tension et un courant continu à l'onduleur via un convertisseur continu-continu élévateur de tension. En mode traction, l'onduleur transforme les grandeurs continues délivrées par le convertisseur continu-continu en courants et tensions alternatifs alimentant une Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) constituant la machine de traction du véhicule. Lors d'une phase de freinage récupératif, la MSAP se comporte comme un alternateur délivrant des courants et des tensions alternatifs à l'onduleur, qui de part sa nature réversible fonctionne alors en redresseur MLI, et qui transforme les courants et tensions alternatifs en grandeurs continues. Ceci permet de transmettre l'énergie récupérée au freinage aux accumulateurs via le convertisseur continu-continu qui fonctionne alors en abaisseur de tension.

Inconvénients et avantages du VE :

Parmi les principaux freins à la présence significative des VE dans le trafic urbain, citons une autonomie limitée, l'absence d'infrastructures de recharge et un coût d'achat élevé. Ainsi, deux inconvénients notables du VE liés à son système de stockage d'énergie, apparaissent : d'une part, une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie, d'autre part, une longue durée de recharge. En revanche on trouve l'absence totale d'émission gazeuse, ce qui rend localement le véhicule très écologique ; pour le faible niveau sonore du véhicule, uniquement provoqué par le roulement de ses roues et éventuellement le "sifflement" de l'alimentation à basse vitesse. Ainsi, VTE semble bien adapté pour les petits véhicules urbains. En effet, ceux-ci ne sont pas trop pénalisés par la limitation de la puissance et de l'autonomie et le problème des pollutions gazeuse et sonore est essentiel pour eux.

Conclusion

Généralités sur le véhicule électrique

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. Cela nous a permis de faire une synthèse afin de choisir les composants adéquats à une chaîne de traction pour notre étude. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation dynamique du véhicule électrique et principalement le moteur synchrone à aimant permanent ainsi que de ses différents agrégats mécaniques.

Chapitre II :

*Modélisation dynamique de la chaîne
d'entraînement du véhicule électrique*

II.1 Introduction

La modélisation est une phase primordiale dans le processus d'étude et de commande des systèmes. Les progrès enregistrés dans l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes qui nous permette d'envisager même un travail d'optimisation. Cette deuxième partie de notre travail, sera consacrée à la modélisation des différentes parties de la chaîne d'entraînement du véhicule électrique, une chaîne qui est composée d'un mécanisme d'entraînement (le moteur électrique), de transmission (réducteur, multiplicateur, arbre) et d'action (les roues).

II.2 Description de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un VE se compose principalement d'une source d'énergie, d'électronique de commande, de convertisseurs d'énergie, d'une ou de machines électriques et d'un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel). A partir de ces éléments, nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations [30]. Les performances globales d'un VE dépendent amplement des différents éléments qui le constituent et qu'on peut les présenter en deux sous-systèmes regroupant une source d'énergie électrique embarquée et un groupe motopropulseur qui intègre le moteur électrique et le convertisseur de puissance avec sa commande. L'ensemble doit posséder les caractéristiques de fonctionnement suivantes [30]:

- Couple élevé à basse vitesse et suffisant à haute vitesse.
- Faible ondulation de couple (ne pas dépasser $\pm 2\%$).
- Récupération de l'énergie au freinage.
- Faisabilité industrielle et faible coût.

La Figure (II.1) représente le schéma de fonctionnement d'une chaîne de traction électrique.

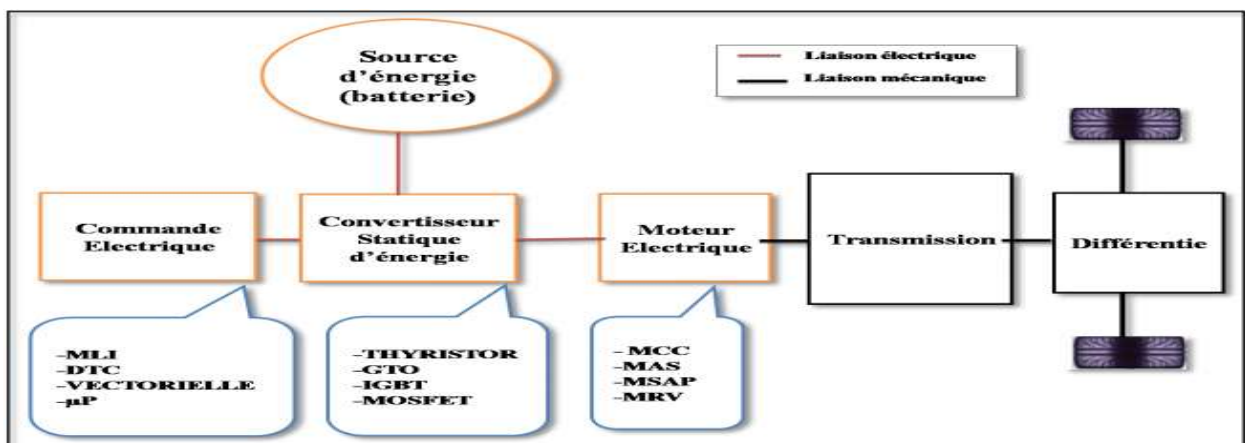


Figure II. 1 Schéma de fonctionnement d'un système de traction électrique

II-2-1 Modélisation du moteur électrique

II-2-1-1 Les différents moteurs d'entraînement

Très utilisée, depuis plus d'un siècle, la machine électrique est le composant principal de la voiture électrique, elle est souple, silencieuse, ne pollue pas et elle s'adapte à toutes les situations. Il existe principalement deux types de motorisation électrique destinés à la voiture électrique ou hybride électrique, la motorisation avec balais (*Brushed*) et la motorisation sans balais (*Brushless*). [31]

La Figure (II.2) résume respectivement les deux familles de technologies pour les véhicules électriques.

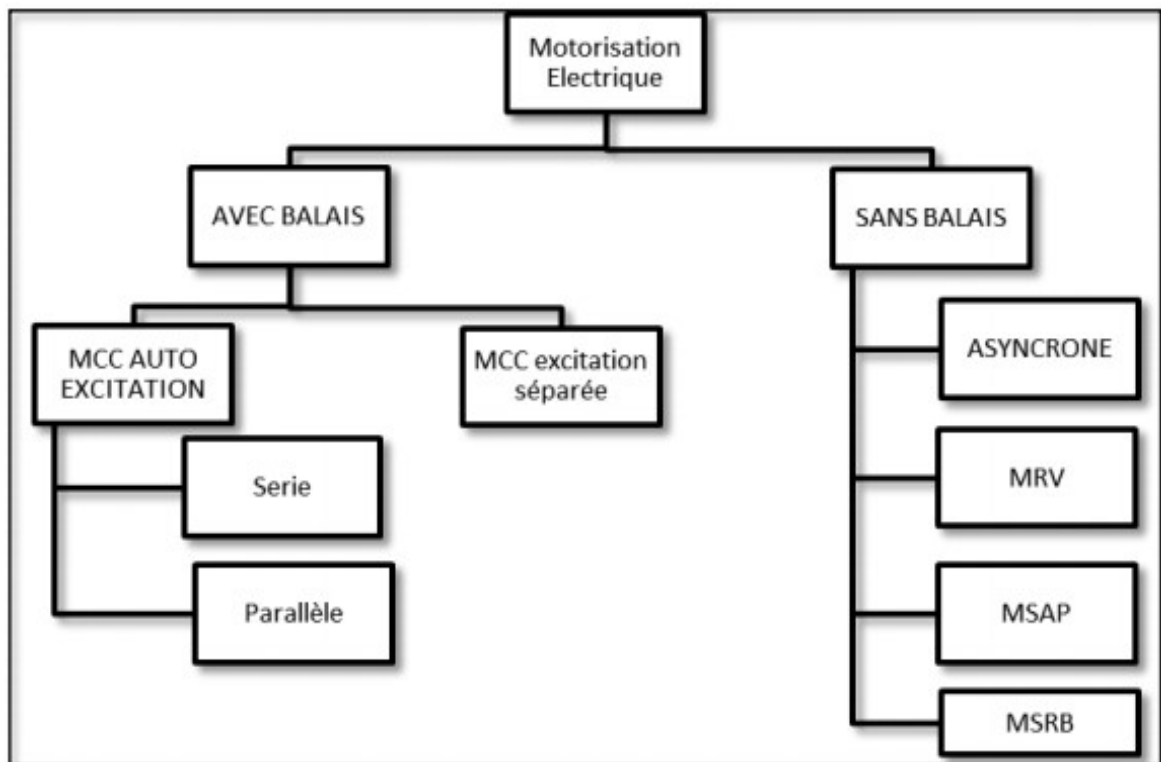


Figure (II. 2) Les différentes technologies de moteurs utilisés pour la motorisation des VE [31].

Les constructeurs orientent leurs choix sur trois principaux types des moteurs électriques :

- La machine à courant continu
- La machine synchrone
- La machine asynchrone.

II-2-1-2 Le moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est la technologie la plus ancienne utilisée dans le domaine automobile. Elle est classique et peu chère (en tenant compte de l'électronique) car elle bénéficie d'une production importante. Mais ses performances sont limitées. [31] En fonction de la nature des sources et de la topologie de la connexion entre le champ et l'induit, la machine à courant continu peut être classée comme suit [32] :

- ❖ MCC à excitation séparée
- ❖ MCC à excitation parallèle.
- ❖ MCC à excitation série.
- ❖ MCC à aimant permanent.

II-2-1-3 Moteurs à Courant Alternatif

Les moteurs à courant alternatif sont plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux MCC, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins d'entretien que les moteurs à courant continu. Grâce à ces avantages, l'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant ces moteurs beaucoup plus préférables que ceux traditionnels avec des moteurs à courant continu. Puisque ces avantages sont d'importance primordiale pour un système de traction de véhicule électrique, il existe deux principaux types de moteurs peuvent se discerner [33] : le moteur asynchrone, le moteur synchrone.

➤ Le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone à cage est robuste, et facilement industrialisable. Il a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement pour la chaîne de traction. De plus, il supporte des surcharges pouvant aller jusqu'à 5 ou 7 fois le couple nominal. Le moteur asynchrone est le candidat le plus adapté pour propulser les Véhicules Electriques (VE) et Hybrides (HEV). Cependant, la principale difficulté reste son pilotage. L'excitation étant induite par les courants statoriques, la commande séparée du couple et du flux est difficile à faire. Des bonnes performances dynamiques du contrôle de couple peuvent être réalisées par la commande vectorielle ou bien par la commande directe du couple [33].

➤ Le moteur synchrone

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes [33] :

❖ Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les avantages dont disposent ces machines sont les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse ainsi que leur bon rendement. Cependant, le prix des aimants est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente. Le fonctionnement en dé fluxage dans la zone de fonctionnement à puissance constante est difficile (commande de la machine complexe, risque de désaimantation, pertes électriques supplémentaires dues à l'augmentation du courant statorique).

❖ Le moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Il donne facilement la possibilité de dé fluxage que l'on peut effectuer par simple réduction du courant d'excitation. Ainsi, cette structure offre un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines à aimants permanents, mais elle offre aussi la possibilité d'adaptation des lois de commande permettant l'optimisation du rendement. Par contre, le rotor nécessite des bagues Pour l'alimenter, et les bobines d'excitation sont difficiles à refroidir ; cependant, la densité de courant peut être choisie faible pour diminuer les pertes. Les contacts glissants (balais – bagues) limitent le fonctionnement à très haute vitesse de ce type de machines à cause de l'usure des balais. Le rendement et le rapport couple/vitesse sont relativement faibles par rapport à ceux des machines à aimants permanents et cela à cause des pertes au rotor.

❖ Le moteur à réluctance variable (MRV)

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet réluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif. Les inconvénients pour ce type de machine se résument par la délicatesse de la fabrication à cause de la nécessité d'un rapport de saillance élevé, la faiblesse du facteur de puissance et la complexité de l'électronique de commande nécessitant un capteur de position. Les principaux avantages de ces machines sont la possibilité de fonctionnement à vitesse élevée et le rendement relativement élevé par rapport à la machine asynchrone.

II-3 Modélisation de la machine synchrone a aimants permanents (MSAP)

Pour l'application de la commande de la MASP, la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents repose sur les paramètres électrique et mécanique (le moment d'inertie, le frottement visqueux, résistances et inductances, flux d'excitation des aimants...), qui décrivent les phénomènes électromagnétiques et électromécaniques, et sur les hypothèses simplificatrices citées ci-dessous. La modélisation de cette machine associée à un onduleur triphasé permet

D'appliquer la commande et à l'identification de ces paramètres. Nous nous intéresserons, tout d'abord, à la modélisation de la MSAP dans l'espace d'état. Ensuite, nous présenterons le modèle de l'onduleur [34].

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Dans cette modélisation, nous prenons en considération les hypothèses suivantes [35] :L'effet d'hystérésis, l'effet de peau ainsi que l'effet de la température et les pertes dans l'acier sont négligeables ;

- 1- La machine fonctionne dans un régime non saturé.
- 2- Les résistances de fuites sont indépendantes de la position du rotor [36].
- 3- La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale. Ce qui nous permet de considérer seulement le premier harmonique d'espace de la distribution de la F.M.M créée par chaque phase de l'induit [37].

II.3.2 Equations de la machine MSAP

Le comportement de toute machine électrique est entièrement déterminé par les équations électriques, magnétiques et mécaniques. La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est donnée sur figure (II.3) :

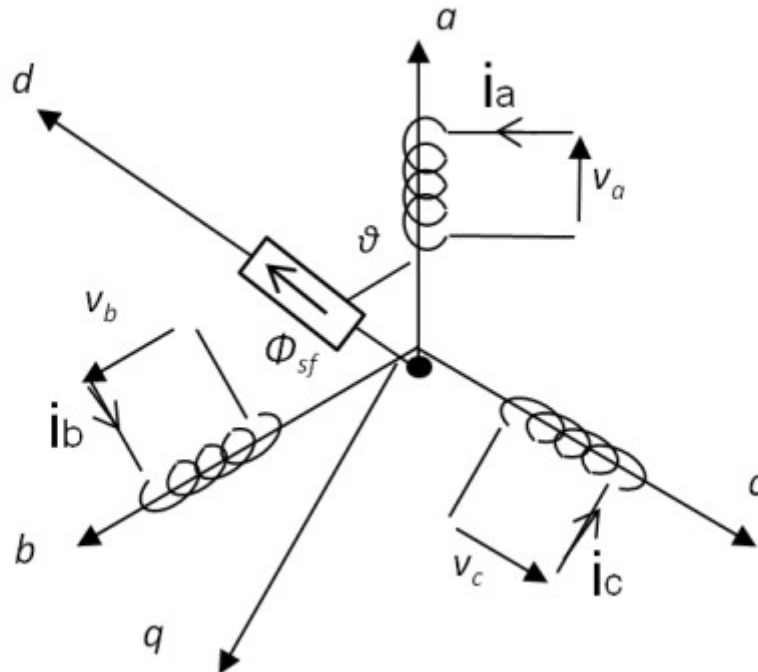


Figure II. 3 Représentation schématique de la MSAP dans l'espace électrique [34]

Le stator comporte trois phases a, b et c identiques et décalées l'une par rapport à l'autre par un angle électrique de $(\frac{2\pi}{3})$, par contre le rotor comprend deux axes caractérisés par :

- ❖ Un axe inter polaire en quadrature (q), déphasé de (2π) par rapport à l'axe (d).
- ❖ Un axe d'aimantation rotorique longitudinale (d).

La position du rotor est repérée par l'angle électrique.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} , les tensions de l'enroulement statorique.

L_a, L_b, L_c , Inductance propre du stator.

R_a, R_b, R_c , Résistance du stator.

φ_f flux de l'aimant magnétique. Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents en convention récepteur et en absence d'enroulements amortisseurs s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II.1)$$

En désignant par :

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Les courants qui traversent les bobines statorique.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$: Les flux totaux à travers ces enroulements.

Les équations (II.1) peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \Leftrightarrow \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\varphi_{sa} = L_{aa}I_{sa} + L_{ab}I_{sb} + L_{ac}I_{sc} + \varphi_{fa}$$

$$\varphi_{sb} = L_{ab}I_{sa} + L_{bb}I_{sb} + L_{bc}I_{sc} + \varphi_{fb} \quad (II.3)$$

$$\varphi_{sc} = L_{ac}I_{sa} + L_{bc}I_{sb} + L_{cc}I_{sc} + \varphi_{fc}$$

Le flux produit dans chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes.

Comme exemple :

Pour la phase 'a', le flux φ_{sa} est la somme des termes :

$L_{aa} I_{sa}$: Flux propre de la phase 'a' sur 'a'.

$L_{ab} I_{sb}$: Flux mutuel de la phase 'b' sur 'a'.

$L_{ac} I_{sc}$: Flux mutuel de la phase 'c' sur 'a'.

φ_{fa} : Flux mutuel de l'aimant sur la phase 'a'.

Sous forme matricielle on a :

$$[\varphi_{s,abc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [\varphi_{fabc}] \quad (\text{II.4})$$

D'après les équations (II.3) (II.4) on trouve :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{\max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Pour simuler la machine, en plus des équations électriques il faut ajouter l'équation du mouvement du système. Le couple électromagnétique est donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator.

$$C_{em} - C_r - f\Omega_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Ω_r : Vitesse mécanique de rotation ($\Omega_r = \frac{\omega}{p}$).

f : coefficient de frottement visqueux.

La puissance instantanée d'entrée peut être écrite comme suit :

$$P(t) = V_{sa} I_{sa} + V_{sb} I_{sb} + V_{sc} I_{sc} \quad (\text{II.7})$$

II.3.3 Transformation Park

Le modèle de la machine synchrone le plus utilisé est basé sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park et qui permet d'obtenir un système équivalent formé de deux enroulements orthogonaux qui sont situés dans le même plan que les enroulements a, b et c. Avec cette transformation, nous pouvons passer d'une représentation dans le repère triphasé (abc) à une représentation dans un repère cartésien d'axes (dq) [34].

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d, q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (II.8)$$

Où :

X : représente les valeurs du courant, tension ou flux.

X_d, X_q : représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques.

θ : l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator.

$[P(\theta)]$: La matrice de Park modifiée est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

II.3.4 Equations électriques dans le référentiel de PARK

En appliquant la transformation de Park à l'équation (II.1) on obtient

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][V_{sabc}] = [P(\theta)]([R_s][I_{sabc}] + \frac{d[\varphi_{fabc}]}{dt}) \quad (II.10)$$

Telle que :

V_{dq0} : sont les composantes directes, en quadrature et homopolaire de la tension.

Après développement on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

Quand le système est équilibré $V_0=0$, on obtient finalement le modèle électrique biphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Equations électromagnétiques :

$$[\varphi_{dq0}] = [P(\theta)][\varphi_{s,abc}] \quad (\text{II.13})$$

φ_{dq0} : sont les composantes directes, en quadrature et homopolaire du flux

On a :

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{\max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Alors :

$$[P^{-1}] (\theta) \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} [P^{-1}] (\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{\max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

On multiplie par la matrice $[P] (\theta)$ on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [P](\theta) \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} [P^{-1}] (\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{\max} [P](\theta) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Après développement :

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + \varphi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Donc les équations du flux d'axe directe (d) et en quadratique (q) s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Où φ_f est le flux d'excitation constant des aimants permanents.

II.3.5 Equations mécaniques

- **La puissance instantanée** : le calcul du couple mécanique de la machine synchrone se base sur la connaissance de la puissance instantanée $P(t)$ [35].

Soit :

$$P(t) = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (II.19)$$

En remplaçant (II.12) dans (II.19)

$$P(t) = \frac{3}{2} [(R_s (I_d^2 + I_q^2))] + \left[I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right] + \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (II.20)$$

Avec : $\omega = p\omega_r$.

$\frac{3}{2} [(R_s (I_d^2 + I_q^2))]$: représente les pertes par effet Joules dans les enroulements statoriques.

$\frac{3}{2} [I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt}]$: représente les variations de l'énergie magnétique emmagasiné dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d]$: représente la puissance électrique qui convertie à la puissance mécanique (utile).

Donc l'expression de la puissance électromagnétique est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{3}{2} \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] = \frac{3}{2} p\Omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (II.21)$$

- **Le couple** : Le rôle du couple électromagnétique est justement d'équilibrer à tout instant l'action, résultante exercée sur l'arbre du rotor par :

Le couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique : C_r

Le couple des frottements visqueux : $f \cdot \Omega_r$.

Le couple d'inertie des masses en rotation rapporté au diamètre du rotor : $J \frac{d\Omega_r}{dt}$

$$C_{em} - C_r - f\Omega_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (II.22)$$

Avec:

$$C_{em} = \frac{Pe}{\Omega} = \frac{3}{2} [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (II.23)$$

On remplace (II.21) dans (II.23) :

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(L_d - L_q)I_d I_q + \varphi_f I_q] \quad (II.24)$$

II.3.6 Equations d'état de la MSAP

On peut déduire la forme finale du modèle de la MSAP dans le référentiel d-q en fonctionnement normal, c'est-à-dire l'unique perturbation inconnue c'est le couple de charge appliqué à la machine et on considère les tensions (V_d, V_q) et le flux d'excitation (Φ_m) comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_d, I_q) comme variables d'état.

On écrit l'équation (II.12) sous la forme suivant [39] :

$$\frac{d}{dt} [X] = [A][X] + [B][U] \quad (II.25)$$

Avec :

X : vecteur d'état.

U : vecteur de commande.

A : matrice fondamentale qui caractérise le système.

B : matrice d'application de la commande.

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{dI_q}{dt} - L_d \omega I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} \omega I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} \omega I_d + \frac{1}{L_q} V_q - \frac{1}{L_q} \omega \varphi_f \end{cases} \quad (II.26)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{1}{L_q} \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

On suppose :

$$X = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} ; \quad Y = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{1}{L_q} \omega \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'équation mécanique est donné par :

$$f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r$$

$$C_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q] \tag{II.28}$$

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

Le modèle dynamique tel qu'il a été élaboré sous Matlab Simulink est donné par la figure suivante :

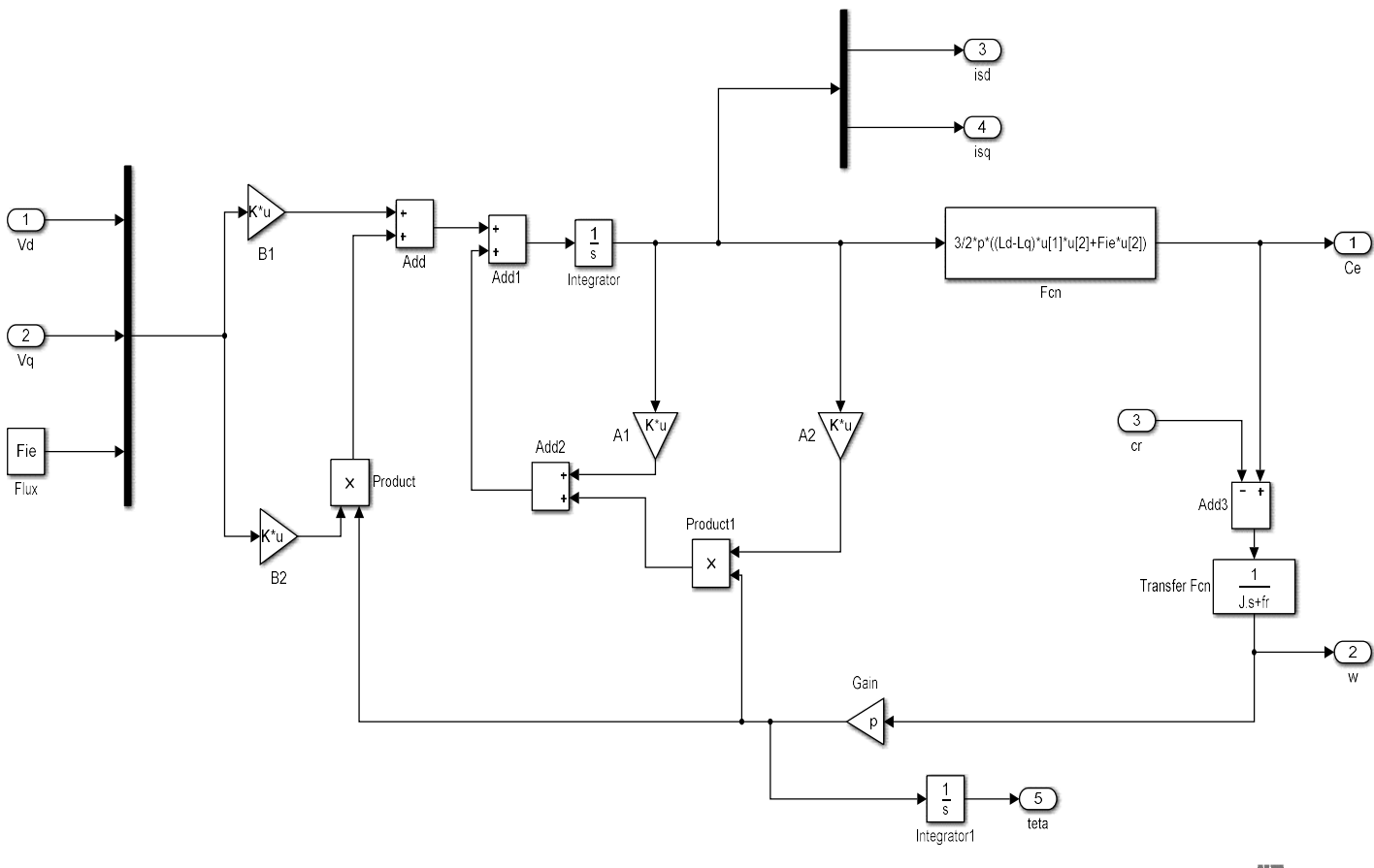


Figure II.4 Schéma bloc du MSAP implanté sous Matlab Simulink

II.4 Modélisation dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui prend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif ; la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender [40].

La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération. Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui déterminent les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule. [41]

II.4.1 Contraintes dynamiques sur le véhicule.

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel, il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage.

➤ Contraintes d'accélération et freinage.

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération γ qu'il peut fournir. Cela se traduit par :

$$\gamma = \gamma_{\max} \quad (\text{II.29})$$

De même, le freinage du véhicule est contrôlé par une force de freinage qui est proportionnelle à la décélération des roues. Cette nouvelle contrainte impose

$$\gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \quad (\text{II.30})$$

➤ Contrainte de vitesse maximale.

Il semble naturel que le véhicule aura une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes :

$$0 \leq V_x \leq V_{x\max} - \omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max} \quad (\text{II.31})$$

➤ **Contrainte de non-glissement**

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement μ qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la surface de contact. Si F tangentielle $\geq \mu F$ normale alors il y aura glissement [42], [43]. Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit :

$$M \gamma \geq \mu M.g \tag{II.32}$$

Ce qui implique :

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \geq \mu.g \tag{II.33}$$

Où :

M : Masse du véhicule.

γ : Accélération tangentielle du véhicule.

g : Accélération de pesanteur.

Donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \leq \mu^2.g^2 \tag{II.34}$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire. Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés, [44]

$F_{adhérence} = f(\text{Poids, Pression des pneus, Température, Etat de revêtement de la route})$.

• **Force d'entraînement**

Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force F qui est parallèle à l'axe X_v . Cette force est contrainte par l'expression :

$$0 \leq F \leq F_{\max} \tag{II.35}$$

II.4.2 Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge le pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire. Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion de la roue au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement. Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent. Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, figure 1.9, Soit (α) l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale [45].

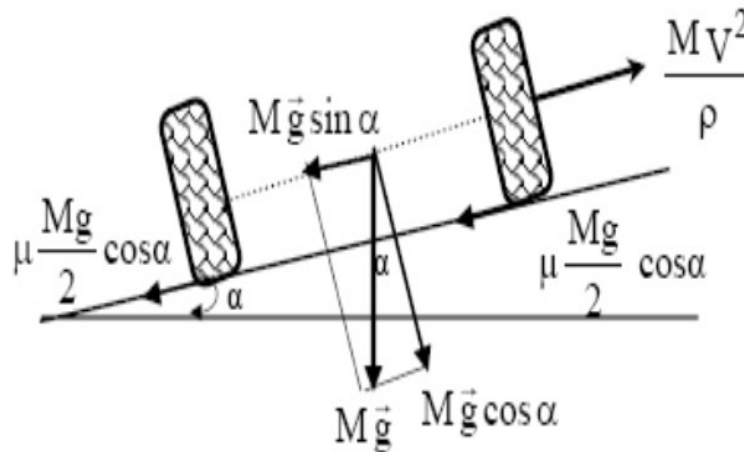


Figure II.5. Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α . [45]

La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{M.V^2}{\rho} \leq M.g.\sin\alpha + \mu.M.g.\cos\alpha \tag{II.36}$$

Où :

ρ : Rayon du virage.

V : Vitesse du véhicule.

μ : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

Par suite, la valeur maximale V_{\max} de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut:

$$V_{\max} = \sqrt{\mu \cdot g \rho} \quad (\text{II.37})$$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons :

- Diminuer la vitesse du véhicule V .
- Augmenter le rayon de courbure ρ de la trajectoire.
- Augmenter le Coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation [40]

II.4.3 Couples résistant au déplacement

Le couple résistant à la roue ($C_{r \text{ roue}}$) lié à l'effort résistant total (F_{rt}) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation:

$$C_{r \text{ roue}} = F_{rt} \cdot r = [R_r + R_a + p] \cdot r \quad (\text{II.38})$$

Ou :

R_r : Résistance au roulement.

R_a : Résistance aérodynamique.

R_p : Résistance due à la pente.

r : rayon d'une roue.

Nous raisonnerons sur un véhicule de masse M , à deux roues motrices de rayon extérieur r situées à l'avant, son accélération est γ , sa vitesse V . Tous les couples résistants seront exprimés en fonction du facteur $Mgr/2$ caractéristique du véhicule.

II-4-4 Roulement uniforme sur sol plat.

Les efforts résistants sont alors :

- La résistance au roulement qui fait intervenir les pertes d'énergie se produisant dans la surface de contact entre la roue et la surface de roulement.
- La résistance aérodynamique.

1. Résistance au roulement R_r .

L'expérience montre que la force qu'il faut appliquer à une roue pour la faire avancer en tournant est égale au produit du poids Mg par le coefficient de frottement de roulement f_r [39].

$$R_r = f_r \cdot M \cdot g \quad (\text{II.39})$$

g : accélération due à la gravité (9.81m/s²).

M : masse totale du véhicule (kg)

f_r : coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement

Nous donnons ci-dessous quelques valeurs indicatives de f_r en fonction de l'état du terrain:

- Pneumatique sur bon terrain : $f_r = 0.015$ à 0.03
- Pneumatique sur mauvais terrain : $f_r = 0.15$
- Pneumatique en tout terrain : $f_r = 0.2$ à 0.3

2. Résistance aérodynamique R_a

L'expression de la résistance aérodynamique est la suivante [46]

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a \cdot S \cdot C_x \cdot (V \pm V_v)^2 \quad (\text{II.40})$$

Ou :

ρ_a : désigne la masse volumique de l'air ($\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$);

S : est la surface frontale du véhicule en [m²];

C_x : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement);

V : est la vitesse du véhicule en [m/s] ;

V_v : est la vitesse du vent en [m/s].

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de 60Km/h, mais devient rapidement prépondérante ensuite. Le couple maximum de roulement à plat (hors pertes dans la transmission) sera donc, pour une roue [47]:

$C_{\text{roulement}} = 0.08 Mgr/2$ véhicule avec pneumatiques.

$C_{\text{roulement}} = 0.01 Mgr/2$ véhicule avec bandage plein.

II-5-5 Franchissement de pente.

Appliquer le théorème de la résultante dynamique (figure II.5), dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, conduit à l'équation suivante :

$$R_p = M \cdot g \sin \varphi \quad (\text{II.41})$$

Le couple nécessaire au franchissement vaut pour une roue :

$$C_p = R_p \cdot r = M r g \quad (\text{II.42})$$

Ou :

M : masse du véhicule en [Kg].

g : l'accélération de pesanteur.

r : rayon d'une roue.

φ : Angle de la pente

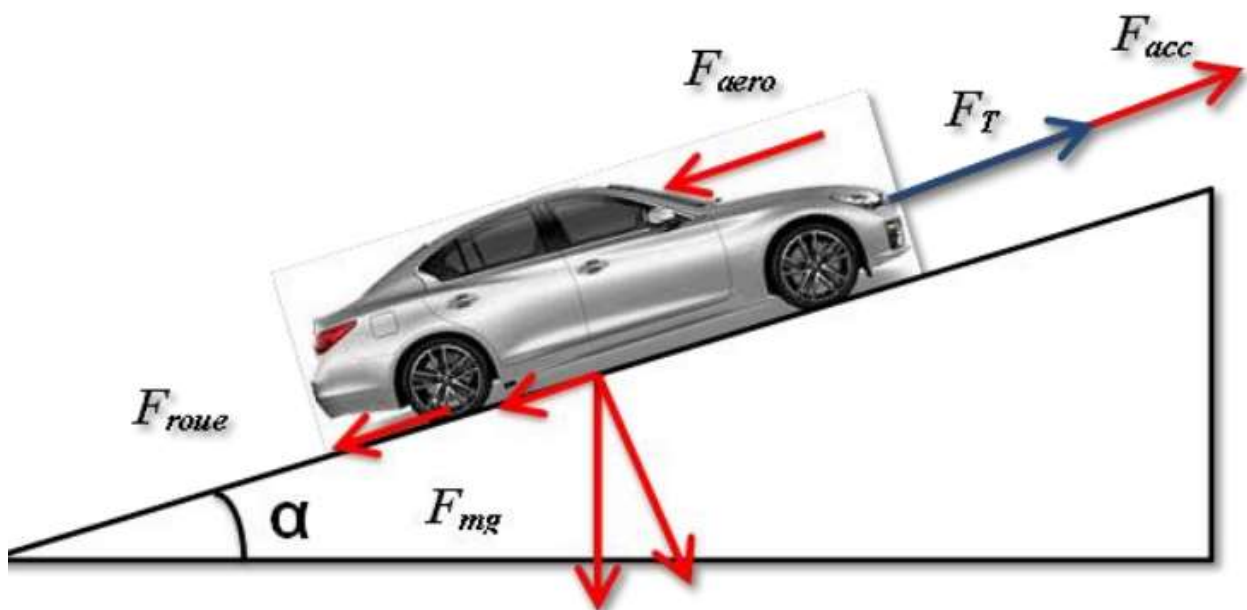


Figure II.6. Forces appliquées sur un véhicule électrique en roulement

II-4-6 Franchissement d'obstacles

Le véhicule doit, en principe, pouvoir franchir des obstacles jusqu'à une hauteur h égale au demi rayon de roue $r/2$ (figure 1.11).

Le couple nécessaire au franchissement est:

$$C_f = 12 \cdot \sin\varphi \cdot M \cdot r \text{ avec } \varphi_{\max} = 600 \tag{II.43}$$

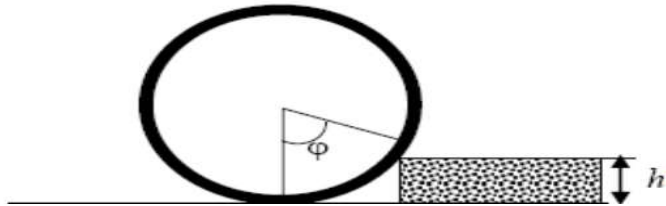


Figure II .7Franchissement d'obstacles.

Notons que ce couple estimé est surdimensionné ; en effet [42]

- Un obstacle n'est jamais attaqué à vitesse nulle.
- L'adhérence naturelle de la bande de roulement et/ou l'écrasement du pneumatique facilitent le franchissement. Le rayon de la roue doit être le plus grand possible, pour faciliter le franchissement des obstacles.

II-4-7 Accélération

La résistance inertielle totale vaut :

$$R_i = M \cdot \gamma + \sum J \tag{II.44}$$

Au maximum, le deuxième terme est couramment estimé à 15% du premier. Le couple nécessaire à l'accélération du véhicule est donc, pour une roue [43]:

$$C_{aac} = 1.15 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot M \cdot g \cdot \frac{r}{2} \tag{II.45}$$

Notons que (γ/g) caractérise la performance du véhicule en accélération.

II-4-8 Résistance au glissement (adhérence)

Pour qu'une roue tourne effectivement, il faut qu'elle adhère au sol. L'expérience montre que pour déplacer un corps sur une surface, il faut lui appliquer une force égale au produit de son poids par un coefficient de frottement de glissement.

$$R_g = \mu \cdot M \cdot g \tag{II.46}$$

II-5 Transmission et réducteur mécanique

Le réducteur est un élément très important permettant souvent une économie conséquente sur la masse du moteur dont les dimensions sont déterminées principalement par le couple à fournir [45][46] comme montre la figure (II.7)

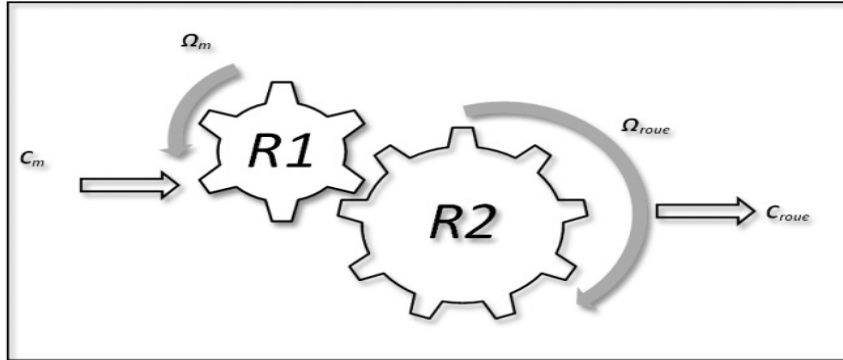


Figure II.7 Le mécanisme du réducteur [42]

Le réducteur est modélisé par un gain k en supposant qu'il n'y a pas de pertes mécaniques.

$$\begin{cases} C_{roue} = k \cdot C_m \\ \Omega_{roue} = \frac{1}{k} \cdot \Omega_m \end{cases} \tag{II.47}$$

Tel que :

$$K = \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_{roue}}{C_m} \tag{II.48}$$

C_{roue} : couple dans la roue ; C_m : couple moteur ; Ω_{roue} : vitesse dans la roue ; Ω_m : vitesse dans le moteur ; R_1 et R_2 : nombre des dents.

La synthèse de la modélisation des différentes parties mécaniques du véhicule électrique, ainsi que des paramètres de son environnement, nous ont permis de construire le modèle du véhicule

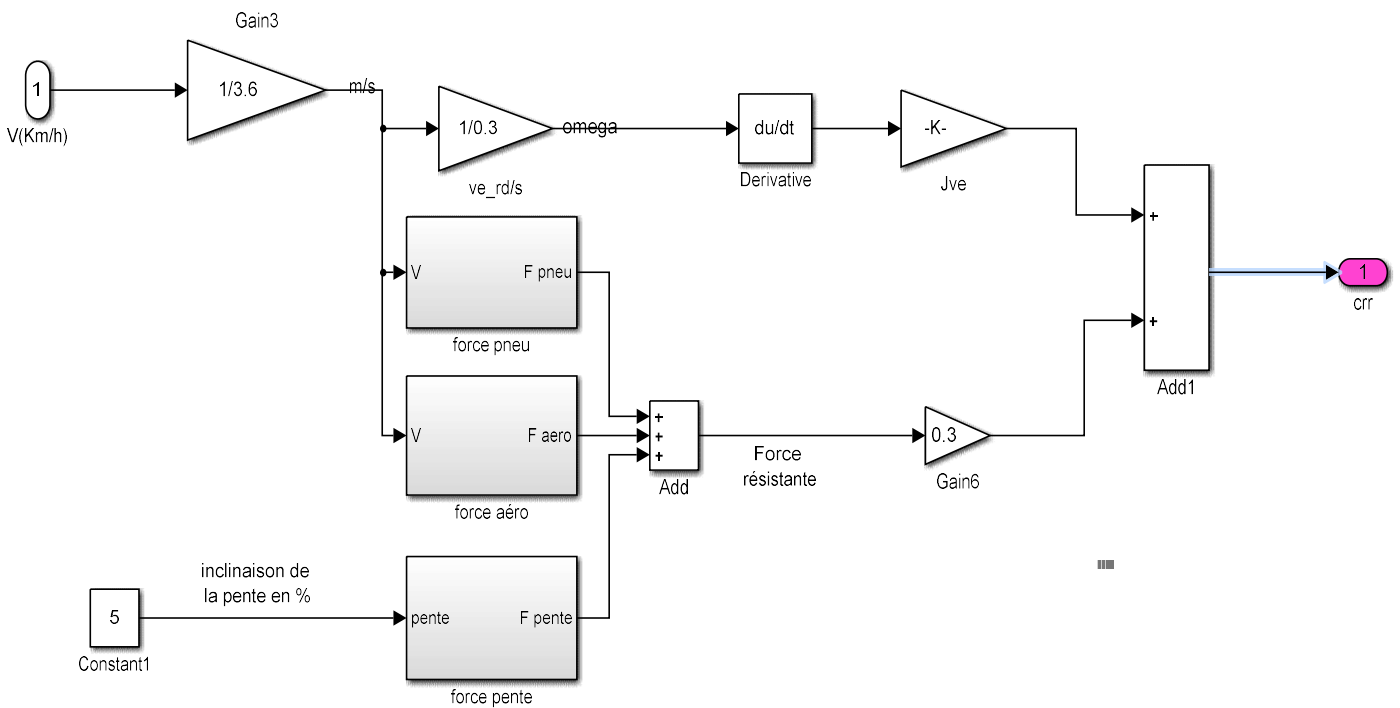


Figure II.8. Modèle Simulink de la partie mécanique du VE et de son environnement électrique sous l'environnement Matlab Simulink

II.6 Conclusion

Dans cette partie de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un modèle dynamique du VE, incluant les différents éléments mécaniques et électriques. Tous les modèles ont été implantés, testés dans Matlab Simulink.

La prochaine partie sera consacré à la modélisation et simulation de l'organe de commande du moteur électrique, à savoir, l'onduleur, implanter la commande vectorielle et simuler l'association des deux parties (électrique et mécanique) et émuler différents scenarii.

Chapitre III :

Contrôle commande de la chaîne
d'entraînement de véhicule électrique

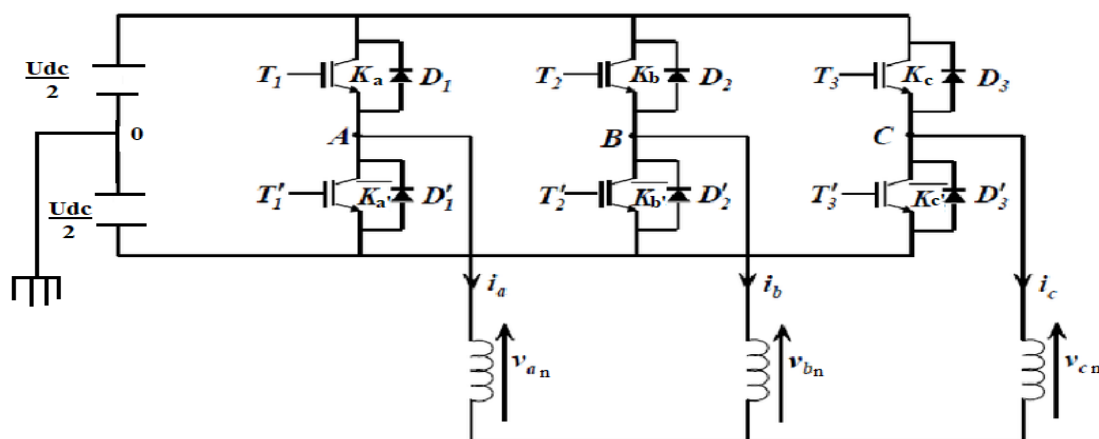
III.1 Introduction

L'alimentation doit pouvoir fournir et récupérer en cas de freinage, l'énergie électrique du moteur. Elle est généralement composée d'un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue constante, qui permet d'imposer aux enroulements statoriques de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique. Elle présente la solution adéquate pour le démarrage des moteurs synchrones qui ne peuvent avoir couple hors synchronisme. L'implantation de la commande nécessite la modélisation complète de tout le système de traction : La machine synchrone associée à un convertisseur statique. L'alimentation du MSAP est constituée de deux étages qui sont connectés l'un à l'autre par un circuit intermédiaire constitué d'une inductance et /ou d'un condensateur. Alimenté par une batterie, le premier étage est un redresseur et le deuxième étage est un onduleur de tension. La source d'alimentation triphasée est supposée symétrique, d'une tension à amplitude et fréquence, imposées et constantes. Le redresseur et le filtre de tension doivent être dimensionnés convenablement afin de les associer à l'onduleur de tension alimentant le MSAP.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. La stratégie la plus utilisée est la *Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI)*.

III.2 Onduleur de tension triphasé

Le schéma de la structure de puissance est représenté sur la figure (III.1). L'onduleur est alimenté par une source de tension continue qui est la batterie du véhicule. Le côté alternatif est réalisé à l'aide de trois bras d'onduleur qui sont connectés sur les trois phases du moteur .



Figure(III.1) : Schéma de principe de l'onduleur triphasé à deux niveaux

III.2.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

La modélisation de l'onduleur de tension permet de donner une vue mathématique de leur principe de fonctionnement, c'est-à-dire grâce à cette vue on peut comprendre mieux leur fonctionnement [49].

La grande importance de ce modèle mathématique c'est la simulation numérique de l'onduleur, et l'association onduleur-moteur, par ce que la simulation numérique faite par logiciel exécuté par un ordinateur, donc on a besoin d'un modèle mathématique.

Pour simplifier l'étude, on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Les interrupteurs (K_a, K_a') , (K_b, K_b') , (K_c, K_c') . Doivent être commandés d'une manière complémentaire :

$$K_a : \text{conduit} \quad \Leftrightarrow \quad K_a' : \text{ouvert}$$

Equations d'état d'onduleur

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{A0} - V_{B0} \\ U_{BC} = V_{B0} - V_{C0} \\ U_{CA} = V_{C0} - V_{A0} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

$$\text{Tel que : } \begin{cases} V_{A0} = V_{An} - V_{n0} \\ V_{B0} = V_{Bn} - V_{n0} \\ V_{C0} = V_{Cn} - V_{n0} \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Puisque (V_{A0}, V_{B0}, V_{C0}) sont référencées par rapport a 1 point milieu ((0))

$$\text{Soit } V_{j0} = V_{j0} - V_0 = \begin{cases} \frac{U_{DC}}{2} & \Leftrightarrow \text{Si } K_j \text{ est fermé } (S_j = 1) \\ \frac{-U_{DC}}{2} & \Leftrightarrow \text{Si } K'_j \text{ est fermé } (S_j = 0) \end{cases} \quad (j = A, B, C)$$

Le système V_{An}, V_{Bn} et V_{cn} étant équilibré ;

$$V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0 \quad (\text{III.3})$$

En remplaçant dans (2)

$$V_{n0} = \frac{1}{3} (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \quad (\text{III.4})$$

En remplaçant (4) dans (2) :

$$\begin{cases} V_{A0} = V_{An} + \frac{1}{3} (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \\ V_{B0} = V_{Bn} + \frac{1}{3} (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \\ V_{C0} = V_{Cn} + \frac{1}{3} (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) \end{cases} \Rightarrow \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3} V_{A0} - \frac{1}{3} V_{B0} - \frac{1}{3} V_{C0} \\ V_{Bn} = -\frac{1}{3} V_{A0} + \frac{2}{3} V_{B0} - \frac{1}{3} V_{C0} \\ V_{Cn} = -\frac{1}{3} V_{A0} - \frac{1}{3} V_{B0} + \frac{2}{3} V_{C0} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} = U_{DC} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} . \quad (\text{III.7})$$

Donc nous avons le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = U_{DC} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

III.2.2 La simulation de l'onduleur

La Figure (III.2) représente la simulation d'un onduleur triphasé sous Matlab Simulink.

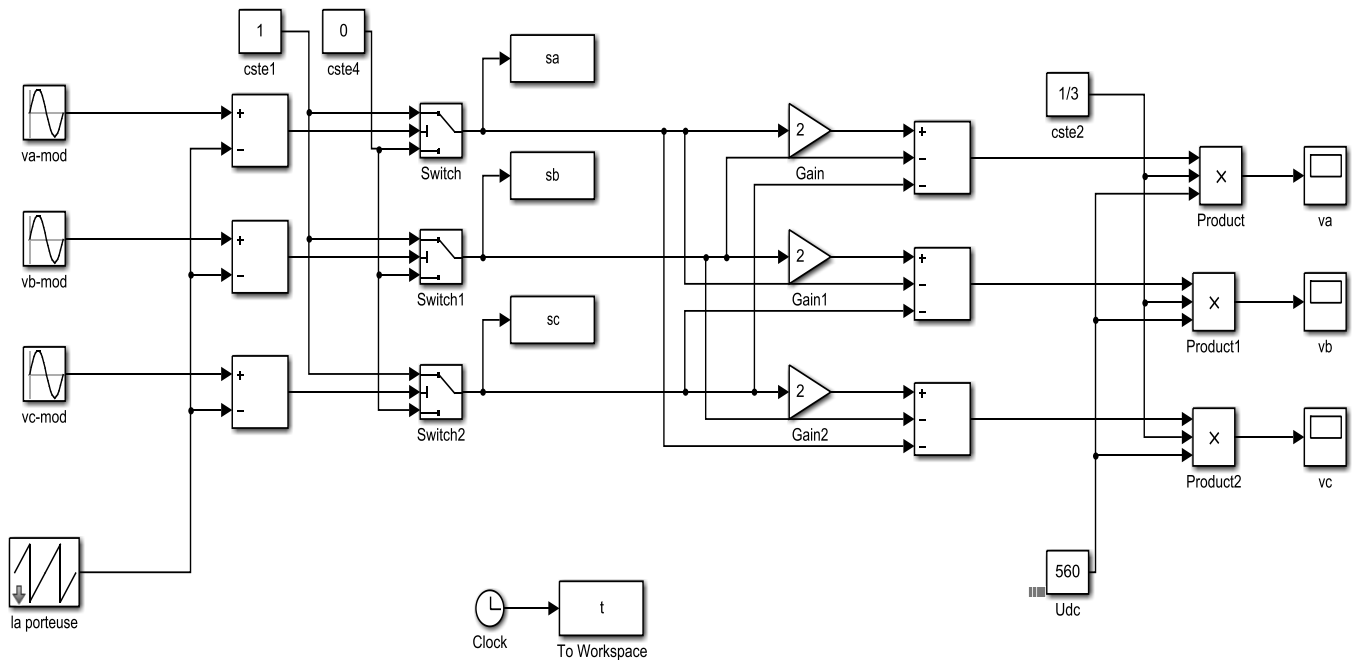


Figure (III.2) : Schéma bloc de l'onduleur de tension.

III.2.2 Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-Triangle

La MLI permet de former à la sortie d'un onduleur chaque alternance de la tension à l'aide d'une succession de créneaux rectangulaires, dont la largeur varie suivant une loi de commande qui a pour but de [50] :

- Repousser les fréquences des harmoniques en haut pour faciliter leur filtrage.
- Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.

Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, dont on peut citer :

✓ Les modulations *sinus-triangle* effectuant la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire.

✓ Les modulations *pré calculées* pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.

✓ Les modulations *post calculées* appelées encore *MLI régulières symétriques* ou *MLI vectorielles* dans lesquelles les angles de commutation sont calculés online.

Notre choix pour cette application est porté sur la modulation sinus triangle qui est très simple à modéliser et à mettre en œuvre

Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement. La loi de modulation est une comparaison entre une tension de référence sinusoïdale $V_{ref}(t)$ et une onde triangulaire appelée porteuse d'une fréquence F . comme indiqué dans la Figure (III.3).

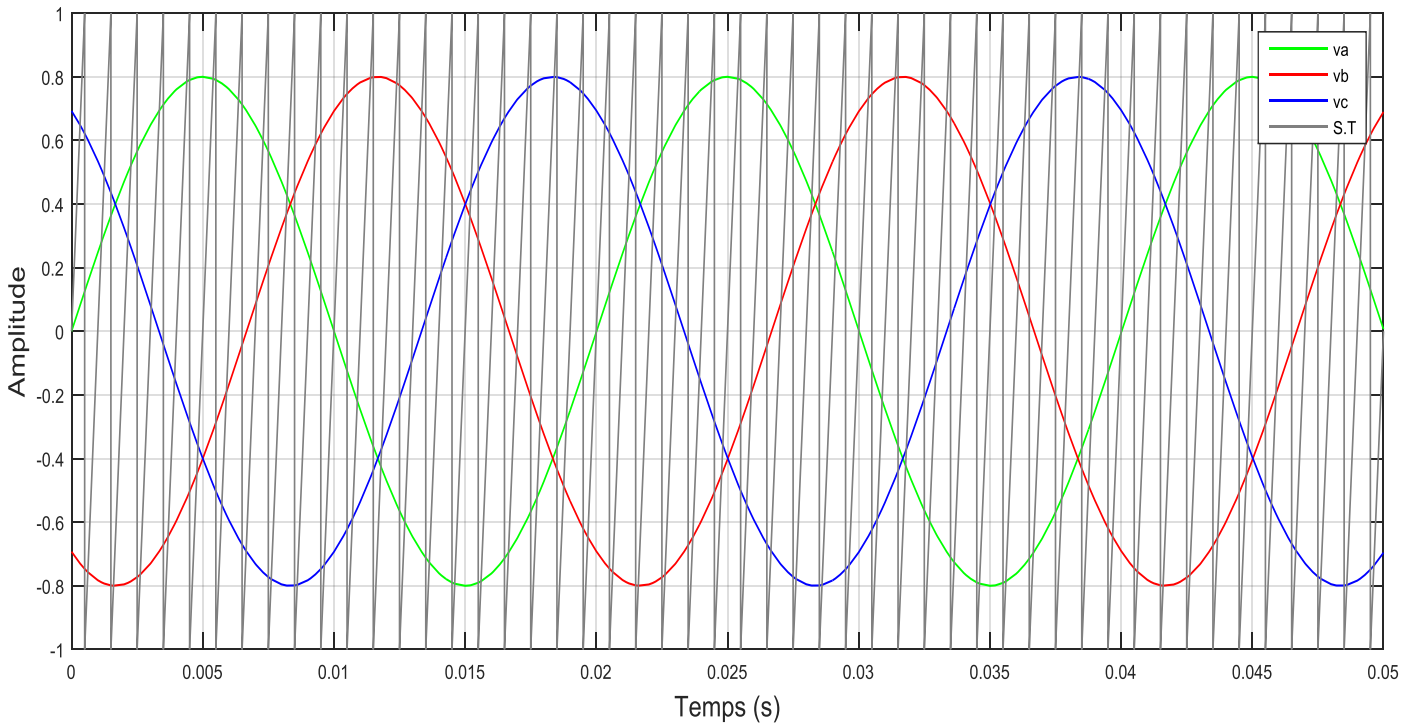


Figure (III.3) Simulation de la MLI sinus-triangle

L'intersection de ces signaux de référence sinusoïdale et le signale triangulaire de porteuse donne les instants de commutation des interrupteurs.

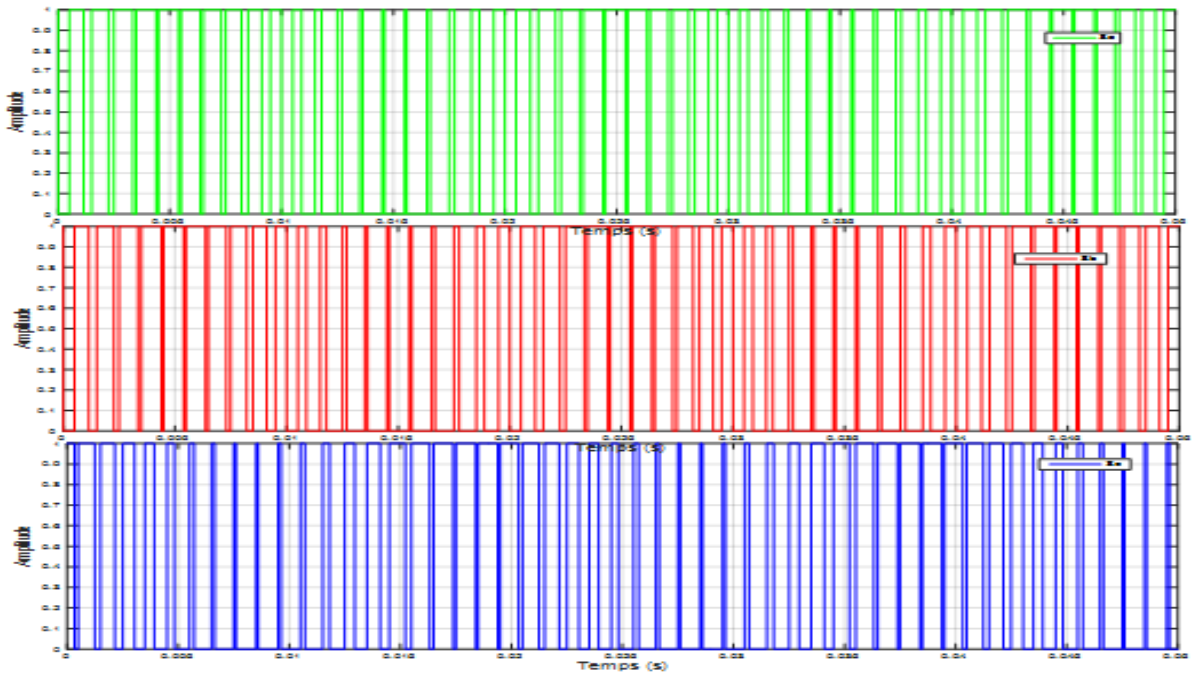
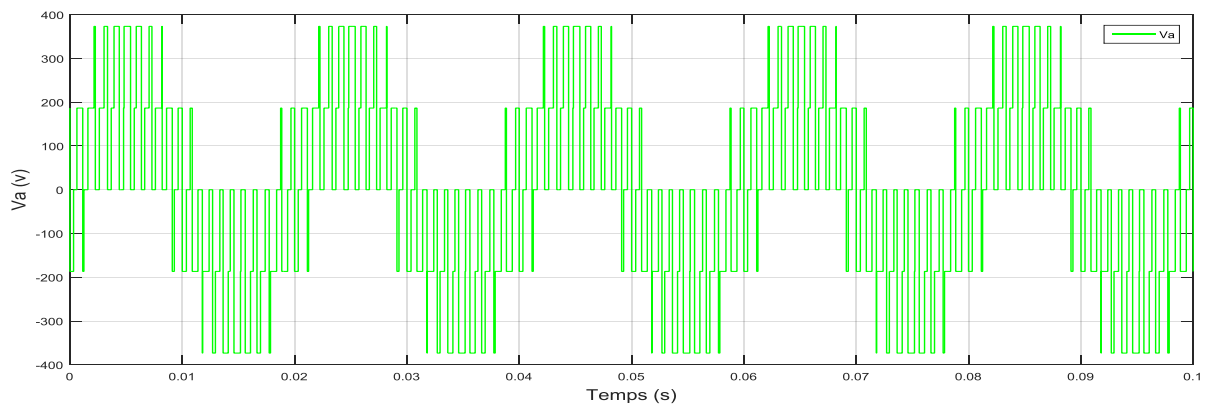


Figure (III.4) Les instants de commutation des interrupteurs. (Sa,Sb,Sc)



Figure(III.5) : tension de sortie de l'onduleur (Va)

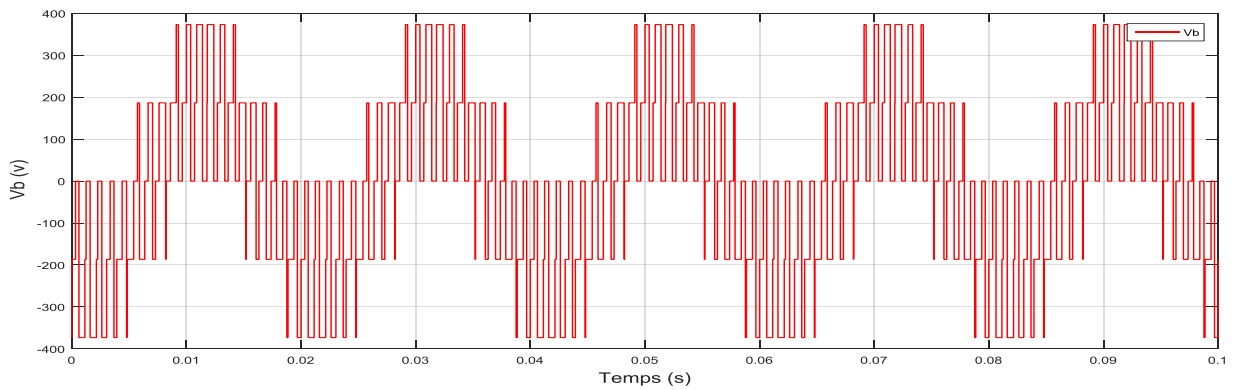
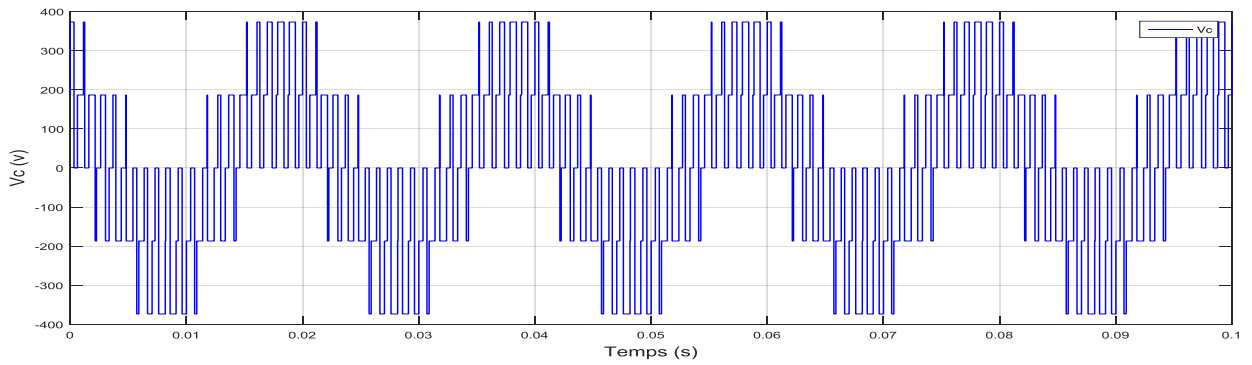


Figure (III.6) : tension de sortie de l'onduleur (Vb)



Figure(III.7) : tension de sortie de l'onduleur (Vc)

III.3 Simulation de l'association Convertisseur Machine

III.3.1 Simulation Machine à vide

Le but de cette simulation est de valider le modèle adopté de la machine synchrone à aimant permanent, et d'analyser le comportement lorsque la machine est alimentée par un onduleur de tension commandé par modulation de la largeur d'impulsion (MLI).

L'alimentation de la machine est modélisée par trois sources sinusoïdales parfaites de même amplitude et décalées dans l'espace de $\frac{2\pi}{3}$.

III.3.2 Schéma block

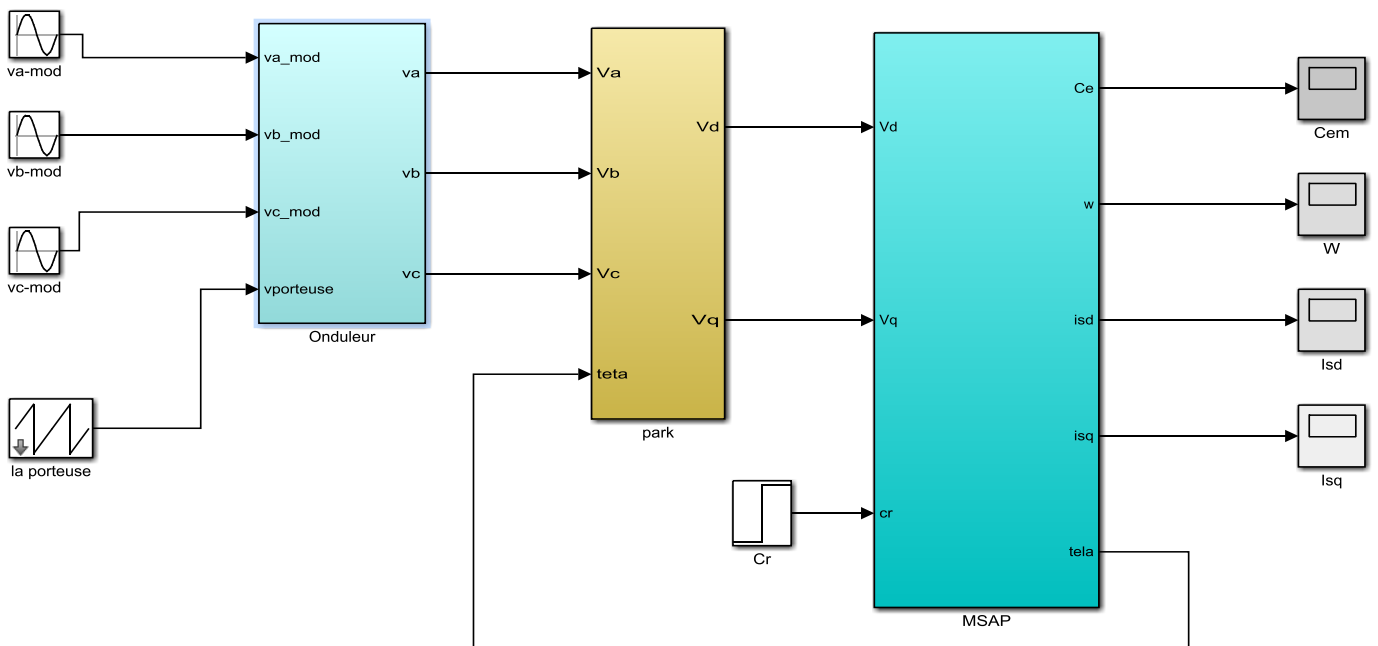


Figure (III.8) Schéma block de la MSAP associée à l'onduleur à deux niveaux.

III.3.3 Résultats de simulation

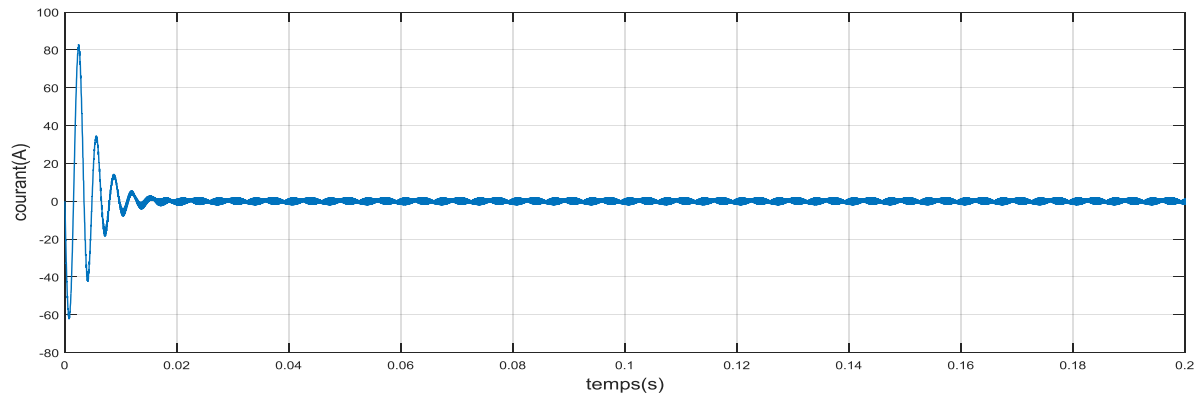
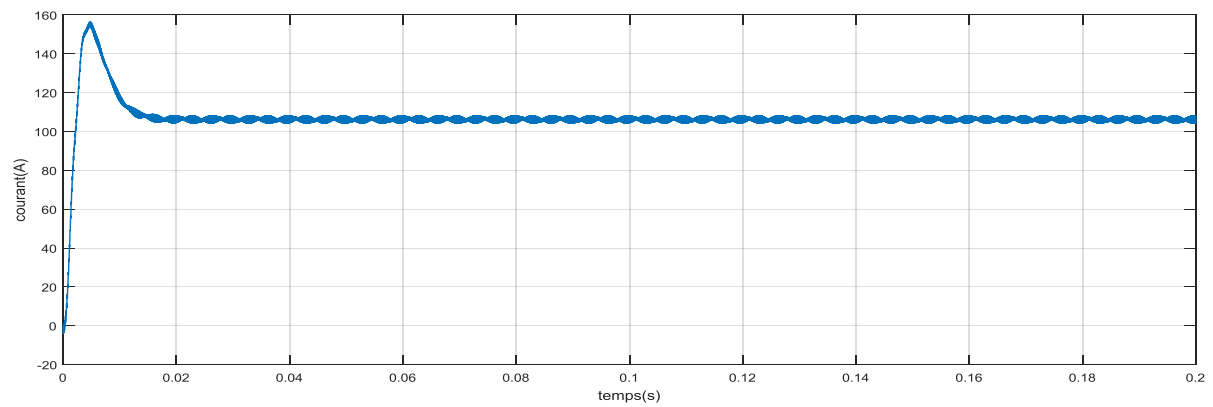
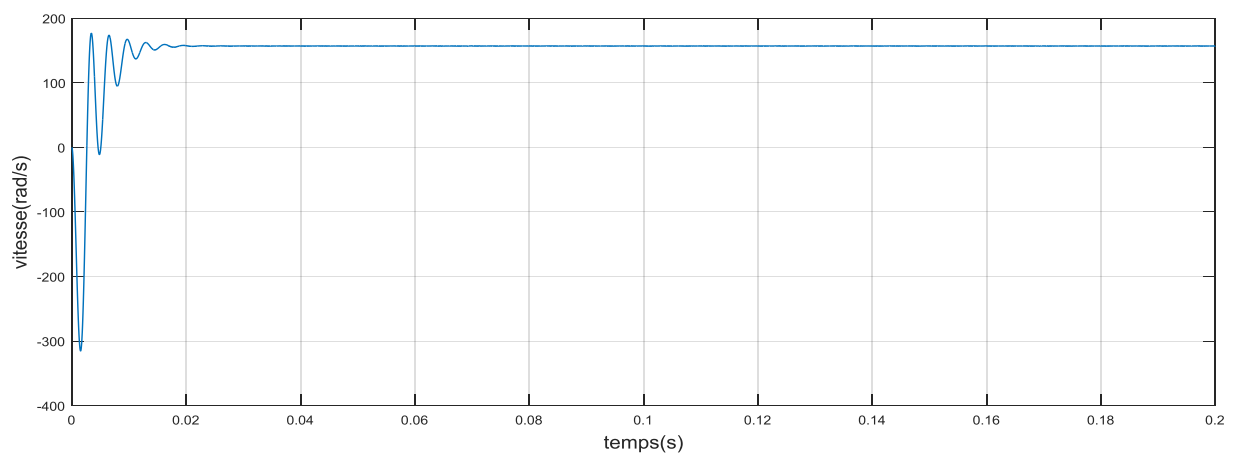
Figure(III.9) : courant I_{sq} Figure(III.10) : courant I_{sd} 

Figure (III.11) : Vitesse du moteur

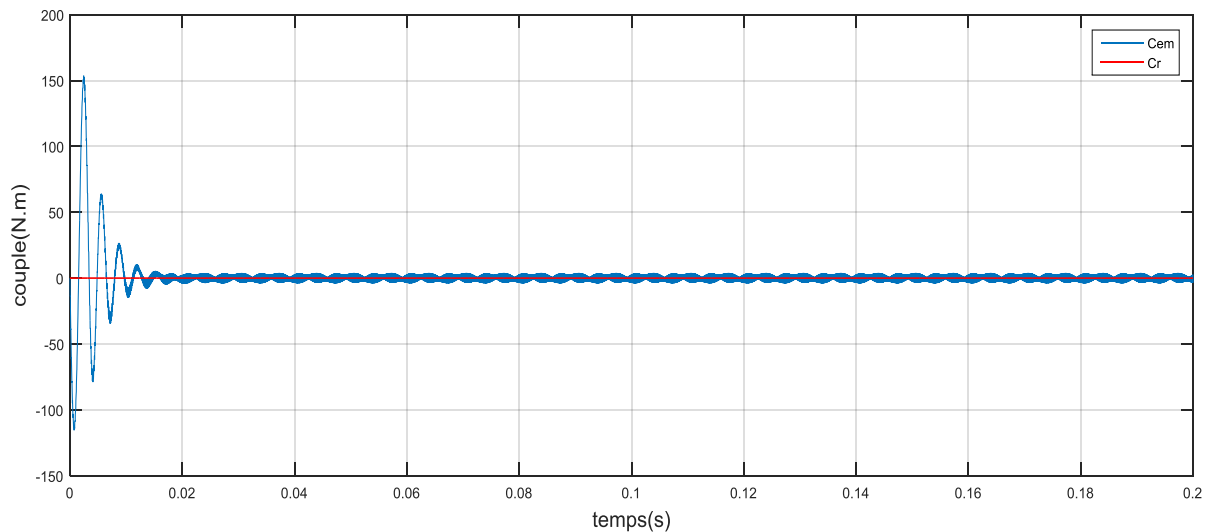


Figure (III.12) : Couple électromagnétique et couple résistant

III.3.3 Interprétation

La présence de pics très importants sur les courbes de la vitesse et du couple lors du démarrage montre l'importance des enroulements d'amortissement, chose que la machine à aimants est dépourvue, néanmoins, après un régime transitoire qui durera moins de 0.02 sec, le couple ramène le rotor à sa vitesse de synchronisme.

Les courants (direct et de quadrature), sont aussi affectés par des pics importants lors du démarrage, ce qui est due à une faible force contre électromotrice, mais après le régime transitoire, ils tendent vers leurs valeurs nominales.

III.3.4 Simulation de l'association Convertisseur Machine avec charge

Dans cette partie d'étude nous avons associé à la MSAP notre onduleur de tension (l'onduleur à deux niveaux) pour cela nous avons testé la simulation à ($C_r=0\text{N.m}$). A l'instant $t=0.1$, on va introduire un couple de charge ($C_r=50\text{ N.m}$).

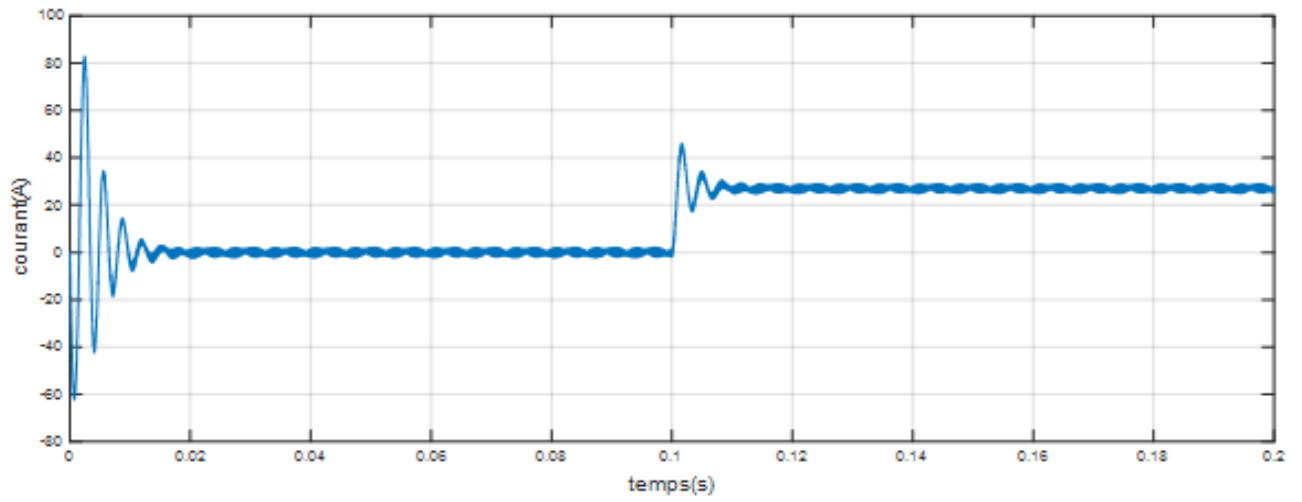


Figure (III.13) : courant I_{sq}

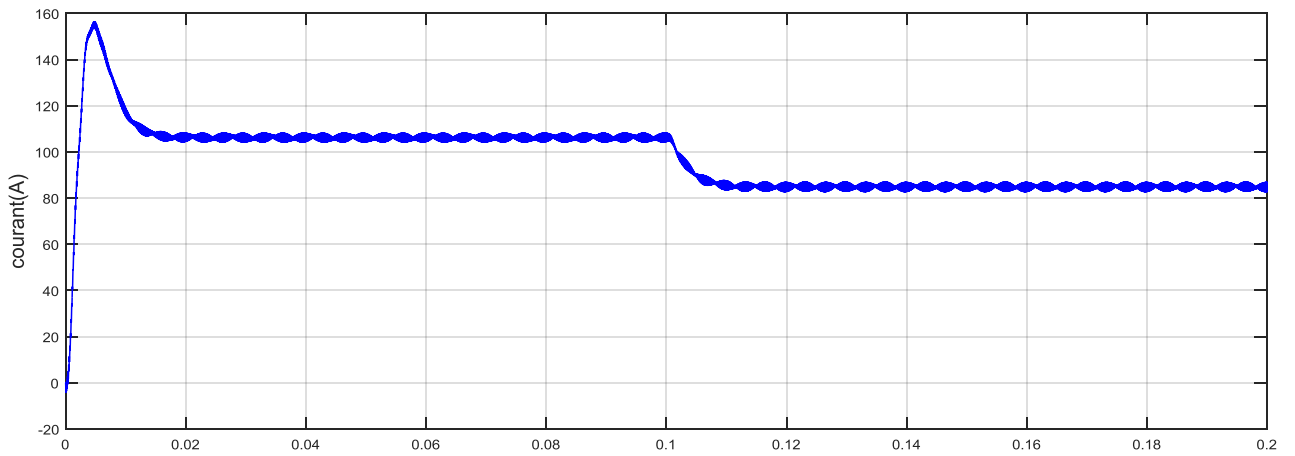


Figure (III.14) : courant I_{ds}

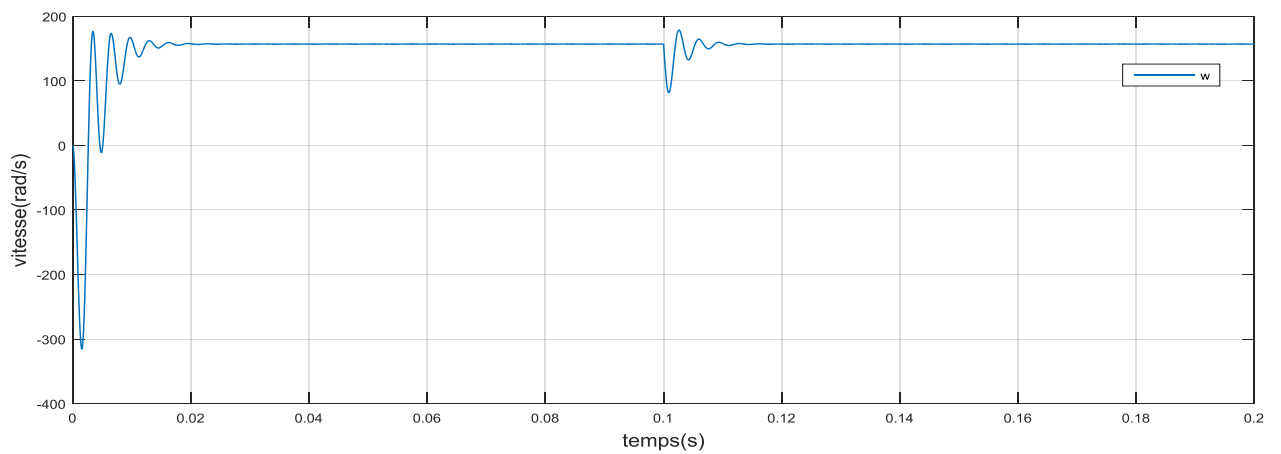


Figure (III.15) : Vitesse du moteur

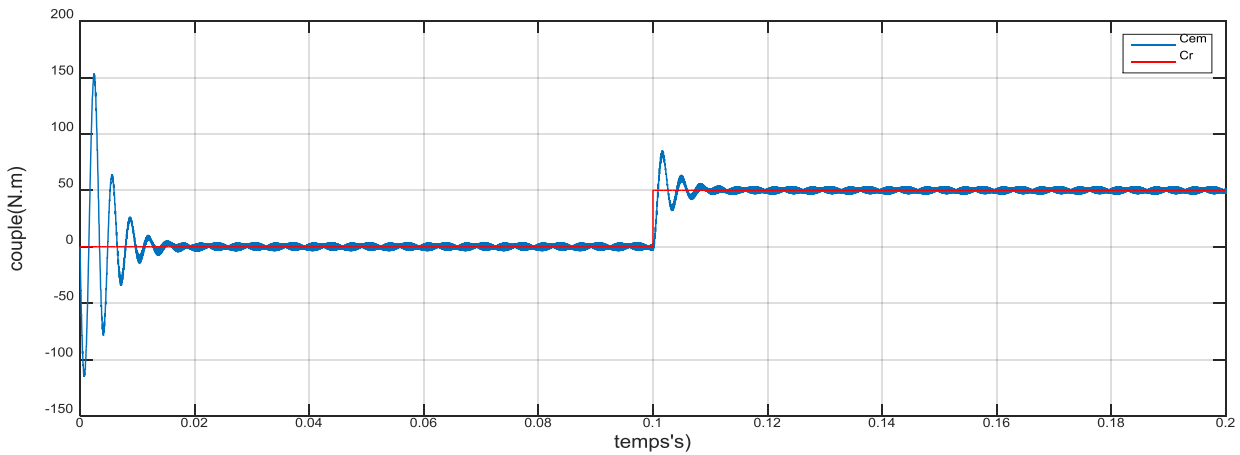


Figure (III.16) : Couple électromagnétique et couple résistant

III.3.4 Interprétation

La dynamique de la machine reste inchangée avant l'application d'un couple de charge mais, dès l'application de la charge à 0,1 sec, nous remarquons que la vitesse de rotation est très affectée à cause du fonctionnement forcé par la source constante (fréquence constante=50Hz), le moteur ne peut pas fonctionner ni au-dessus, ni au-dessous de la vitesse de synchronisme.

Le comportement dynamique de notre modèle est très satisfaisant pour calculer la commande vectorielle, qui est nécessaire pour palier à la limitation de la vitesse fixe.

III.4 La commande vectorielle du MSAP

Dans cette partie, nous allons développer puis tester par des simulations, la commande vectorielle dans le repère de Park [51]. Le principe de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

L'équation (III.1), donnant le couple, montre que celui-ci dépend de deux variables qui sont choisies comme variables d'états \mathbf{Id} et \mathbf{Iq} (respectivement courants longitudinal et en quadrature).

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \varphi_f] \quad (\text{III.9})$$

Il s'agit donc de définir une relation entre ces deux variables, puisqu'il n'y a qu'une grandeur à commander (le couple) et deux variables à réguler (\mathbf{Id} et \mathbf{Iq}).

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante I_d nulle. Nous contrôlons le couple uniquement par le courant I_q . On règle ainsi la vitesse ou la position par la composante I_q [31].

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \varphi_f i_q \tag{III.10}$$

III.4.1 Description du système global

La figure (III.17) représente le schéma global de la commande vectorielle en vitesse ou en position d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d,q) . La référence du courant direct I_{dref} est fixe et la sortie du régulateur de vitesse I_{qref} constitue la consigne de couple C_{ref} . Les références des courants I_{dref} et I_{qref} sont comparées séparément avec les courants réels de la machine I_d et I_q . Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références V_{dref} , V_{qref} . Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant I_{qref} . Cette référence est limitée au courant maximal. Par contre, le courant I_{dref} est imposé nul dans notre cas. Les sorties de la régulation des courants I_d et I_q , après passage dans le repère (a,b,c) , servent de références de tensions ($V_{aref}, V_{bref}, V_{cref}$) pour la commande de l'onduleur à MLI[52].

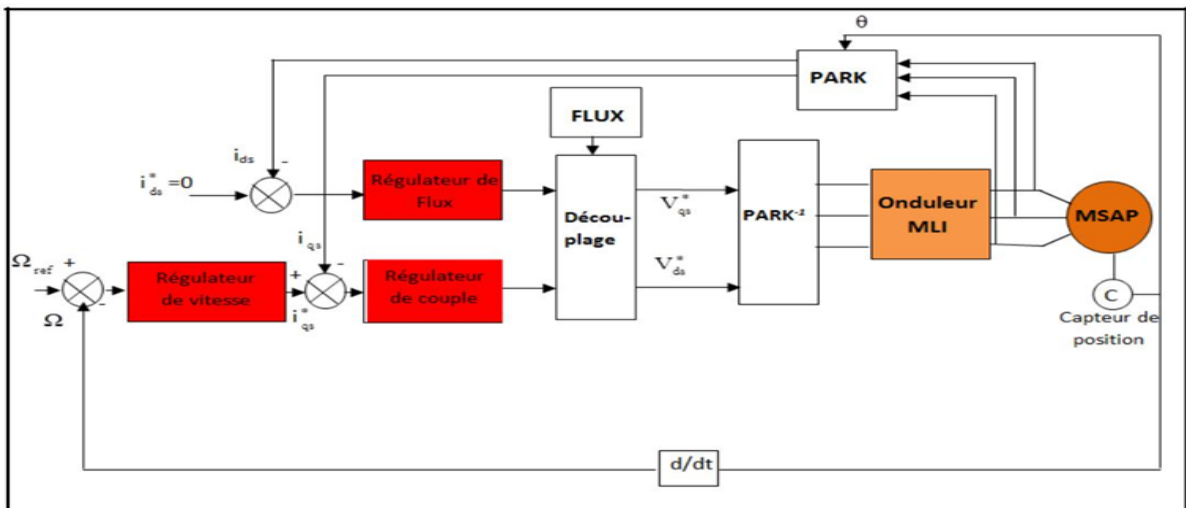


Figure (III. 17) Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP [52]

III.4.2 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

Le modèle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} I_d - L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} I_q - L_q \omega I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = \frac{-R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} \omega I_q + \frac{1}{L_d} V_d \\ \frac{d}{dt} I_q = \frac{-R_s}{L_q} I_q + \frac{L_d}{L_q} \omega I_d + \frac{1}{L_q} V_q - \frac{1}{L_q} \omega \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - F \cdot \omega_r \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$\omega = p \cdot \omega_r \quad (\text{III.14})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot [\varphi_q Id] [\varphi_d Iq] \quad (\text{III.15})$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi-variable, non linéaire et fortement couplé. Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

La machine étudiée est de couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de *Park* est maintenu calé sur l'axe q ($I_s = I_q$). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle figure (II.3) qui a pour effet la diminution des pertes joule. Le système d'équations (II.4) devient :

$$\begin{cases} V_d = -L_q \omega I_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} I_q + \omega \phi_f \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Et le couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot [\phi_d I_q] \quad (\text{III.17})$$

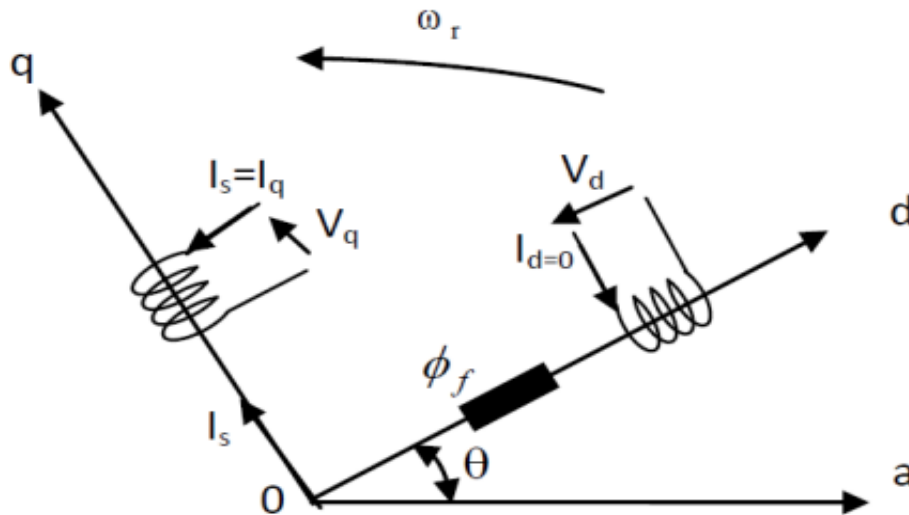


Figure (III.18) : Principe de la commande vectorielle

III.4.3. Découplage par compensation

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence.

Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes *d* et *q*. [53]

Les tensions suivant les axes (*d*, *q*) peuvent être écrites sous les formes suivantes

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (III.18)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{cases} \quad (III.19)$$

Et :

$$\begin{cases} e_d = L_q \omega i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III.20)$$

On a donc les courants i_d et i_q sont découplés. Le courant i_d ne dépend que de V_{d1} et i_q ne dépend que V_{q1} , à partir de l'équation (2.7) les courant i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante:

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + pL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + pL_d} \end{cases} \quad (III.21)$$

p : Opérateur de Laplace.

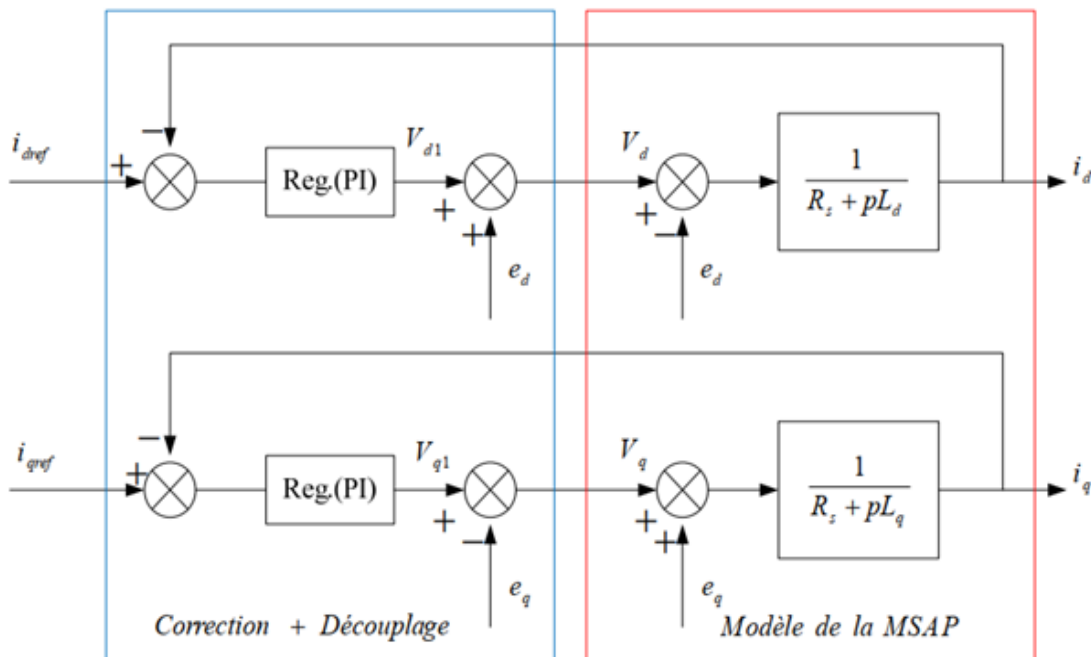
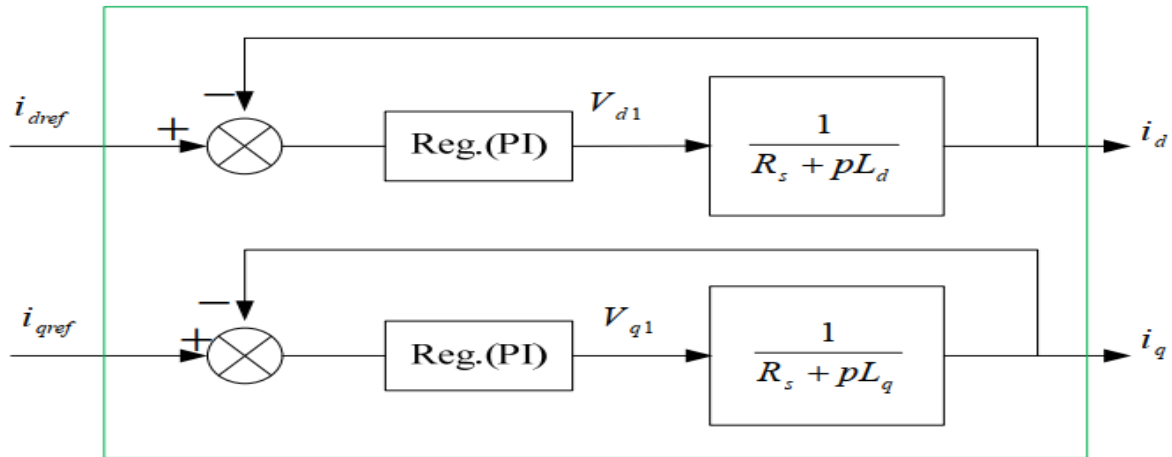


Figure (III.19) Découplage par compensation

Les actions sur les axes d et q sont donc découplés et représentées par la Figure III.2



Figure(III.20) : Commande découplée.

III.3.4 Détermination des régulateurs des courants

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus. Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre [51], [53]. Le tableau ci-dessus représente l'action de régulateurs dans la boucle

Tableau III. 1. Les différentes actions sur les régulateurs [29]

Régulateurs	Action
Action Proportionnelle (Kp) est grande.	La correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît
Action Proportionnelle (Kp) est petite.	La correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.
Action Intégrateur (Ki).	<ul style="list-style-type: none"> - L'action intégrale régit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne. - Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

Le contrôle des courants direct et en quadrature est assuré par un correcteur **PI** dont les gains sont K_{p_id} , K_{p_iq} , K_{i_id} , K_{i_iq} . Pour la détermination des paramètres du régulateur **PI**, nous avons utilisé la méthode de placement des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée [48]. Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation des courants I_d et I_q par un régulateur **PI** est donné par la figure suivante :

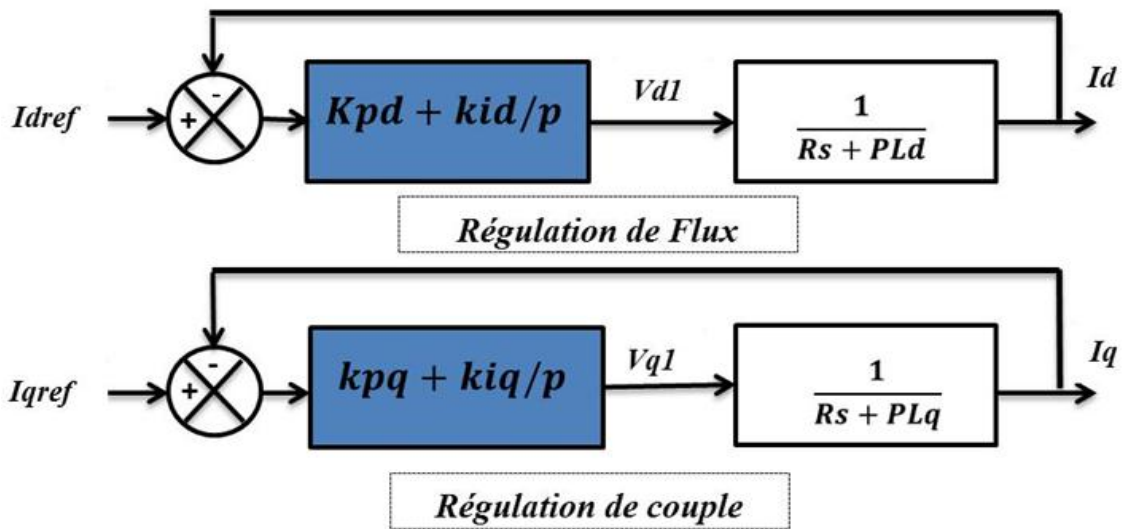


Figure (III. 21) Boucle de régulation des courants directe et en quadrature.

La dynamique du moteur relative à la partie électrique est égale à :

$$F_d(p) = \frac{1}{R_s + L_d p} = \frac{1}{R_s} \left(\frac{1}{1 + T_d p} \right) \tag{III.22}$$

Avec :

$$T_d = \frac{L_d}{R_s} \tag{III.23}$$

T_d : est la constante de temps électrique relative à l'axe d .

Cependant, pour déterminer les constantes du correcteur, on dégage la fonction de transfert en boucle ouvert :

$$F_{od}(p) = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{p}\right) \frac{1}{R_s} \left(\frac{1}{1+T_d p}\right) \quad (\text{III.24})$$

$$F_{od}(p) = \frac{K_{id}}{p} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} p\right) \frac{1}{R_s} \left(\frac{1}{1+T_d p}\right) \quad (\text{III.25})$$

En plaçant le zéro du correcteur de façon à compenser le pôle du système en boucle ouverte,

C'est-à-dire

$$T_d = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (\text{III.26})$$

Compensons le pôle $\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$ donc on a :

$$F_{od}(p) = \frac{K_{id}}{p R_s} \quad (\text{III.27})$$

La compensation de pôle dominant repose sur la bonne évaluation du système à corriger. Cette méthode en étant simple et rapide à mettre en œuvre, pourvoit l'avantage d'avoir des performances acceptables. Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine synchrone sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante [51].

En boucle fermée on a trouvé :

$$F_{fd}(p) = \frac{1}{1+p\frac{R_s}{K_{id}}} = \left(\frac{1}{1+T_d p}\right) \quad (\text{III.28})$$

$$\text{Avec :} \quad \tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad (\text{III.29})$$

$$K_{id} = \frac{R_s}{\tau_d} = \frac{R_s^2}{L_d} \quad (\text{III.30})$$

$$K_{pd} = K_{id} \cdot T_d \quad (\text{III.31})$$

Remarque : On retrouve la même boucle de régulation pour le courant I_q .

$$K_{pq} = K_{iq} \cdot T_q \tag{III.33}$$

III.3.5 Détermination du régulateur de vitesse

Dans les conditions de la commande des courants avec compensation, la situation est effectivement devenue similaire à celle de la machine à courant continu. Ceci facilite la conception du contrôle de vitesse. Ainsi, le réglage peut être envisagé suivant le schéma fonctionnel figure (III.22) où le régulateur adopté est un régulateur **PI** [53]. Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante [50]

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - F \cdot \omega_r \Rightarrow \tag{III.34}$$

$$\frac{C_{em} - C_r}{Jp + F} = \omega_r(p) \tag{III.35}$$

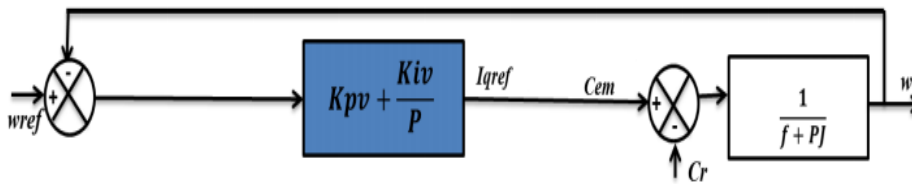


Figure (III. 22) Schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse [53].

En considérant le couple de charge comme une perturbation, on dispose d'une fonction de transfert en boucle fermée en adoptant la méthode de placement de pôle et la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{1}{\frac{J}{K_{iv}} p^2 + \frac{1}{K_{iv} K_{pv}} (K_{iv} + f) p + 1} \tag{III.36}$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2nd ordre :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0} p^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + 1} \tag{III.37}$$

Après avoir identifié le dénominateur à la forme canonique, il est nécessaire de résoudre le système d'équations suivant :

$$\frac{J}{K_{iv}} = \frac{1}{\omega_0^2} \tag{III.38}$$

$$\frac{2\xi}{\omega_0} = \frac{1}{K_{iv} K_{pv}} (K_{iv} + f) \tag{III.39}$$

Pour la détermination des caractéristiques du régulateur, on choisit un facteur d'amortissement égal à 1 et on définit la pulsation des oscillations non amorties à partir de la dynamique souhaitée.

Les paramètres du régulateur de vitesse sont les suivantes :

$$\begin{cases} K_{iv} = \omega_0^2 J \\ K_{pv} = \frac{f^2 \omega_0 K_{iv}}{2\xi K_{iv} - f \omega_0} - K_{iv} \end{cases} \tag{III.40}$$

Pour un coefficient d'amortissement $\xi = 1$ nous avons $\omega_0 . t_{rep} = 4.75rad$ ou le temps de réponse de la boucle. La détermination de cette constante est liée à l'application et tient compte de limitation du système après avoir déterminé les paramètres des régulateurs des courant et de vitesse, nous présentons dans la section qui suite les résultats de simulation. Dans notre application nous avons choisis $t_{rep}=10ms$ par rapport à notre système cette valeur a été choisie de façon à assurer en plus de l'annulation de l'erreur statique la stabilité et la rapidité de cette boucle [51].

III.4. Simulations du comportement du MSAP associé à la commande vectorielle et piloté par un onduleur de tension à deux niveaux

Nous allons tester les performances de la commande vectorielle sous Matlab/Simulink.

a- Résultats de la simulation

Les figures (III.23.24.25.26) représentent les résultats de la simulation de la commande vectorielle où on applique un couple résistant de **50 N.m** dans l'intervalle **[0.1s 0.2s]** . Et la vitesse du référence égale **200 rad/s** dans l'intervalle **[0s 0.2s]**.

Les résultats de simulation en terme de couple, vitesse et courants statoriques (d,q) sont résumés dans les figures ci-dessous.

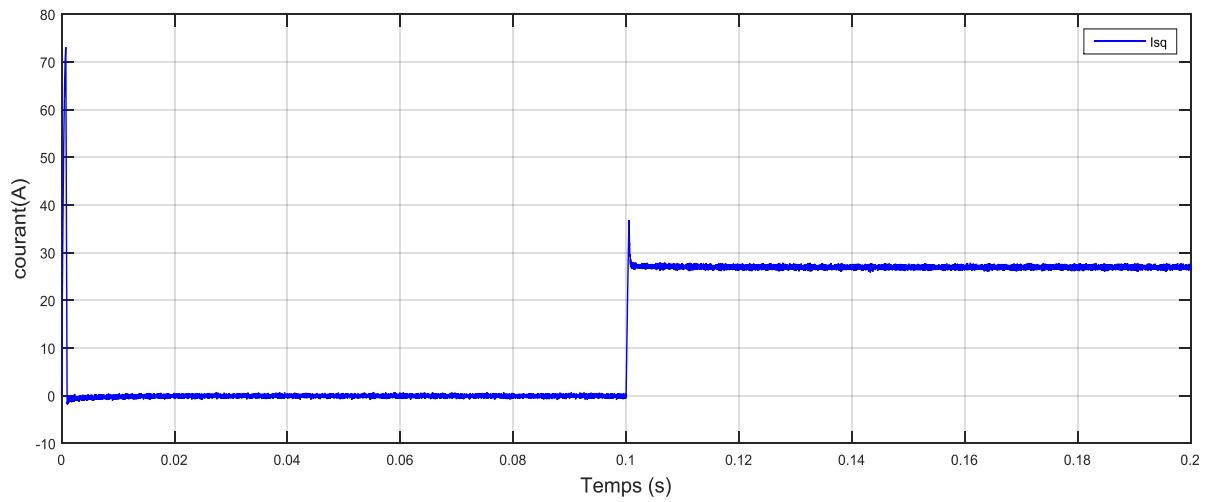


Figure (III.23) courant I_{sq}

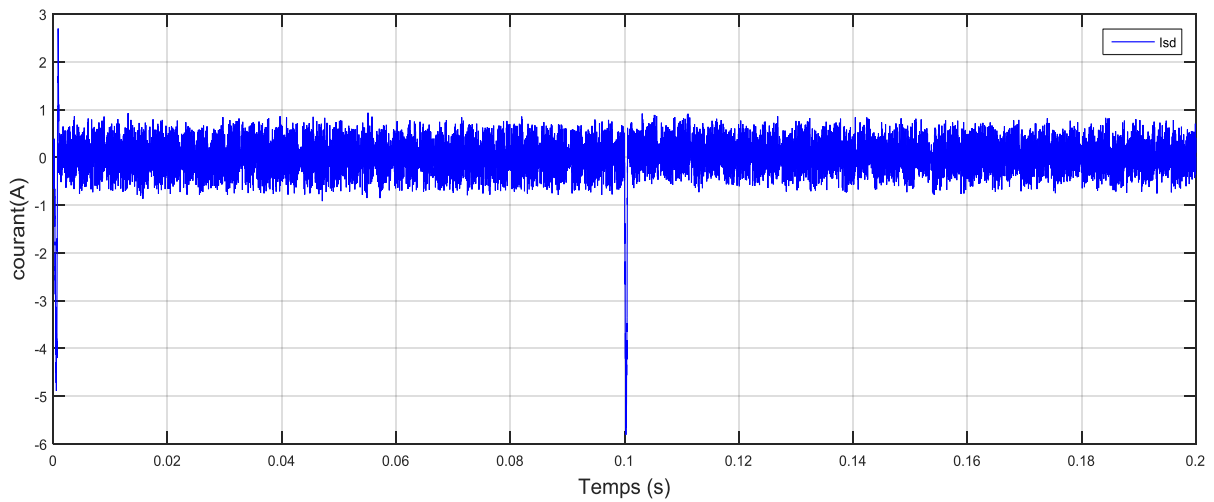


Figure (III.24) courant I_{ds}

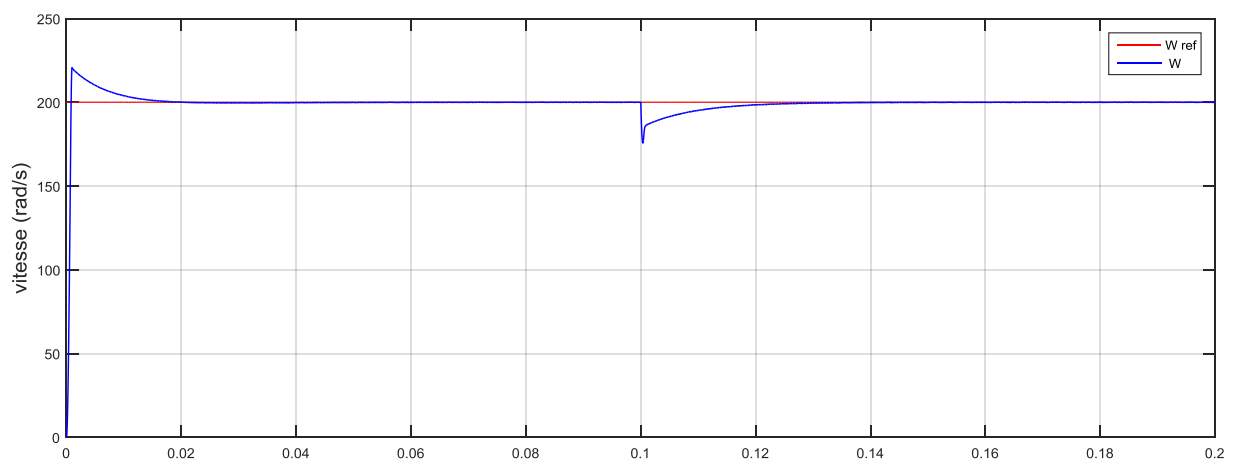
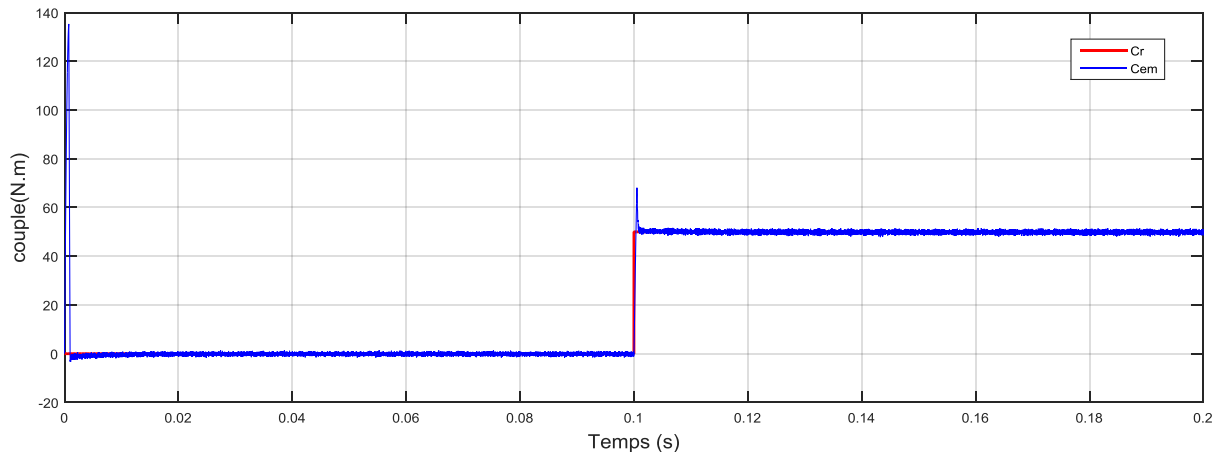


Figure (III.25) Vitesse du moteur avec sa référence



Figure(III.26) couple électromagnétique et couple résistant

- Interprétation

La figure (III.25) : On constate également que la vitesse suit sa consigne (V_{ref}) avec une petite ondulation dans le démarrage et à l'instant $t=0.1s$ une petite perturbation «application de ($Cr=50 N.m$)»

La figure (III.26) : Le couple subit au moment du démarrage un pic avec une petite ondulation, puis atteint rapidement à la valeur du couple de charge avant et après l'application de la charge, et une ondulation en régime permanent considérable.

Donc on peut dire que la commande que la commande vectorielle a amélioré la dynamique de notre système, en diminuant les effets de la charge et en limitant les appels de courants.

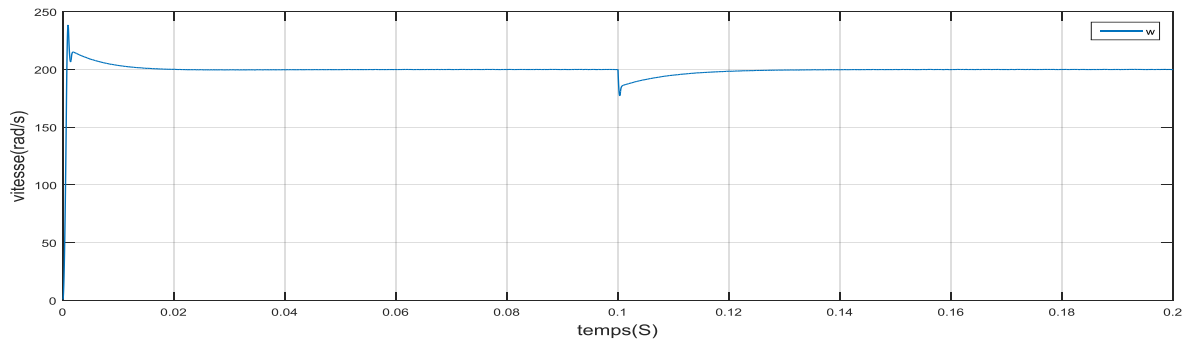
La figure (III.23) : Le courant d'axe ' q ' présente une allure identique à celle du couple électromagnétique fait de la linéarité existante entre ces deux grandeurs.

III.4.2 Teste des variations paramétriques (Test de robustesse)

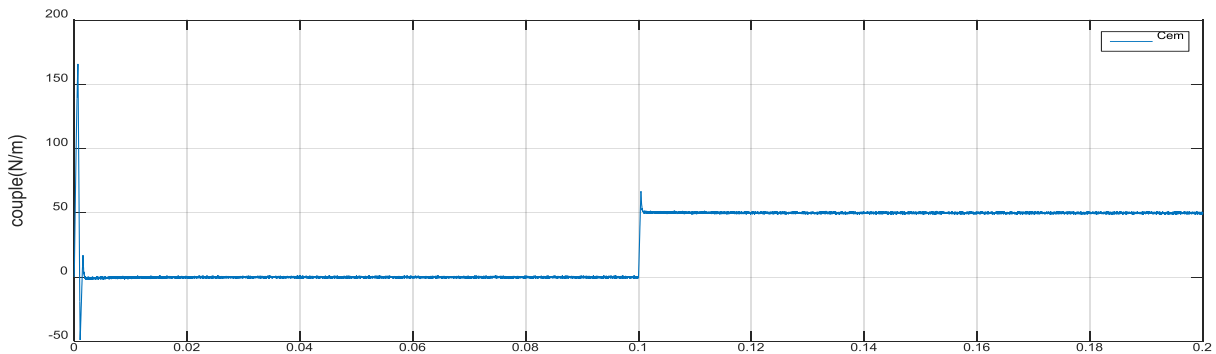
Les paramètres de la MSAP sont soumis à des variations qui peuvent être dues à la saturation ou à l'échauffement, il est donc important d'étudier l'influence de la variation des paramètres caractérisant le modèle sur les performances de la commande afin d'évaluer la

robustesse de cette dernière. Nous allons varier l'inertie, l'inductance et la résistance statorique.

a-Variation de la résistance statorique ($1,5.R_s$)

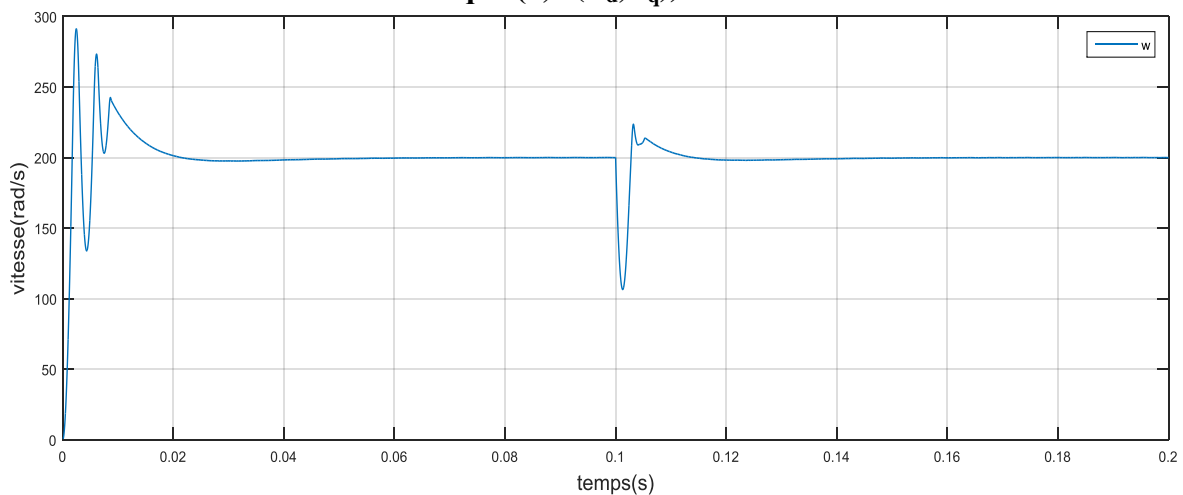


Figure(III.27) Vitesse de MSAP

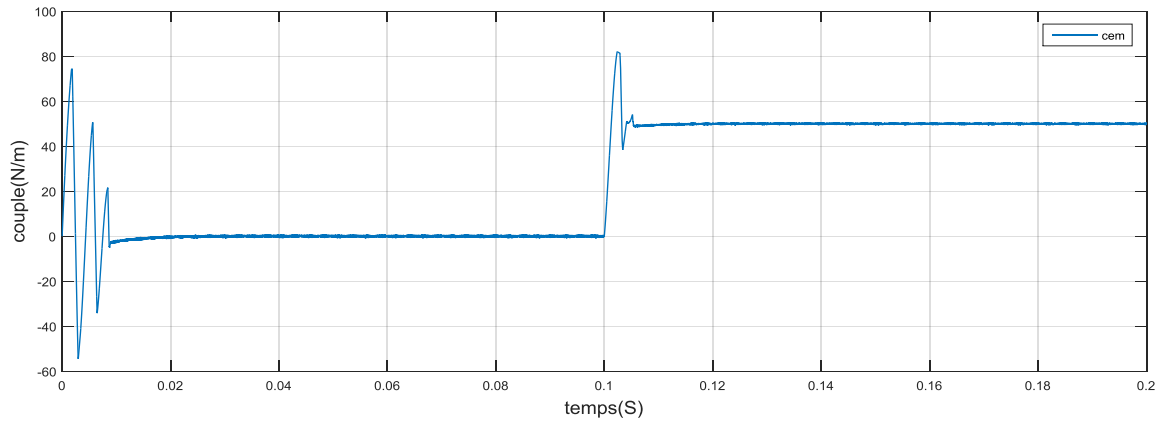


Figure(III.28) couple du MSAP avec variations de (R_s)

b-Variation de l'inductance statorique ($1,5.(L_d, L_q)$)

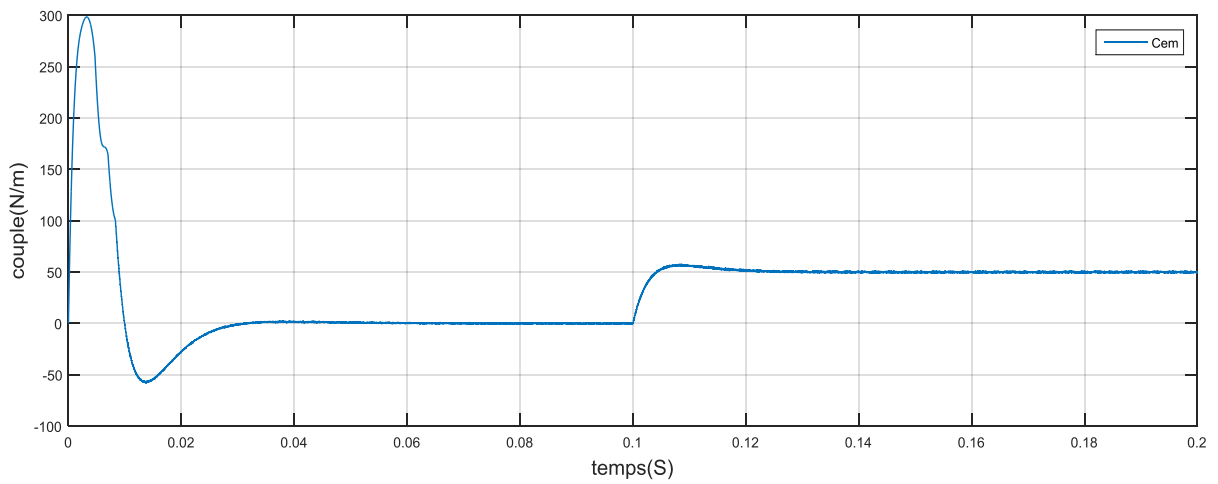


Figure(III.29) vitesse du MSAP avec variations de (L_d-L_q)

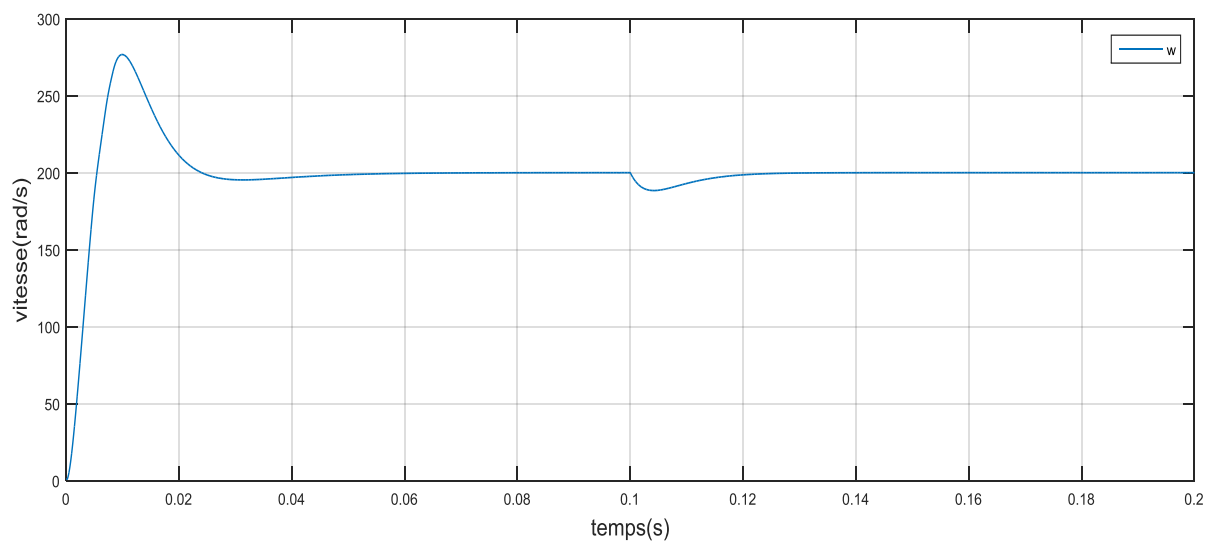


Figure(III.30) couple de MSAP avec variations de (Ld-Lq)

c-Variation du moment d'inertie (J)



Figure(III.31) couple de MSAP avec variations du moment d'inertie (J)



Figure(III.32) Vitesse de MSAP avec variations du moment d'inertie (J)

Interprétation

En faisant augmenter la résistance statorique nous avons diminué la constante de temps des courants ce qui a permis d'avoir un système rapide et un régime transitoire très court, la valeur de la résistances 1.5 fois plus grande n'est une grande valeur mais notre commande réagit bien pour une telle variation.

En faisant augmenter l'inductance le contraire est observé, un régime transitoire plus grand au démarrage et en appliquant la charge, mais la commande demeure toujours robuste.

En augmentant le moment d'inertie c'est la constante de temps mécanique qui augmente, nous remarquons un temps de réponse plus grand et moins d'ondulations puisque l'inertie a été augmentée

En conclusion, sachant que la commande vectorielle est sensible aux variations paramétriques, notre test de robustesse est assez concluant et nous permet de dire que dans la mesure du possible notre commande est robuste.

III.5. Application à un véhicule électrique avec un cycle de conduit

A cette phase, nous devons tester les performances de notre système dans un véhicule réel. Pour cela, on doit appliquer comme vitesse de référence un cycle de conduite et un couple résistant qui émule les différentes forces de roulement du véhicule en utilisant un modèle dynamique. Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une étude comparative entre les convertisseurs et les actionneurs qui peuvent être utilisés dans une chaîne de traction. Pour cela, on a fixé les composants adéquats (moteurs, convertisseurs, ...) pour la suite de notre étude. Par la suite, la technique de commande à base des régulateurs PI (la commande vectorielle) a été testée et discutée en détail pour des consignes de vitesses bien définies

III.5.1. Cycle de conduite

Une mission de conduite pour un véhicule, est constituée, par un trajet partant, d'un point **A** et allant à un point **B**. De manière générale, le profil de vitesse du véhicule et/ou son trajet physique sont inconnus. Pour des applications automobiles plusieurs cycles de conduite sont normalisés pour représenter des missions standards. Les cycles de conduite sont composés d'un profil de vitesse et d'un profil de pente de la route et parfois profil de couple.

Résultat de simulation

La figure (III.34) montré la vitesse de référence

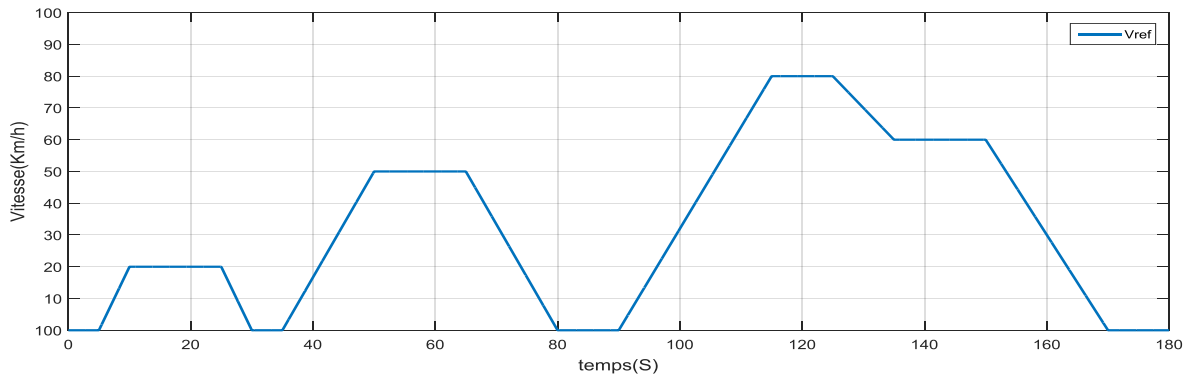


Figure (III.34) Résultat de la simulation de consigne de vitesse(V_{ref})

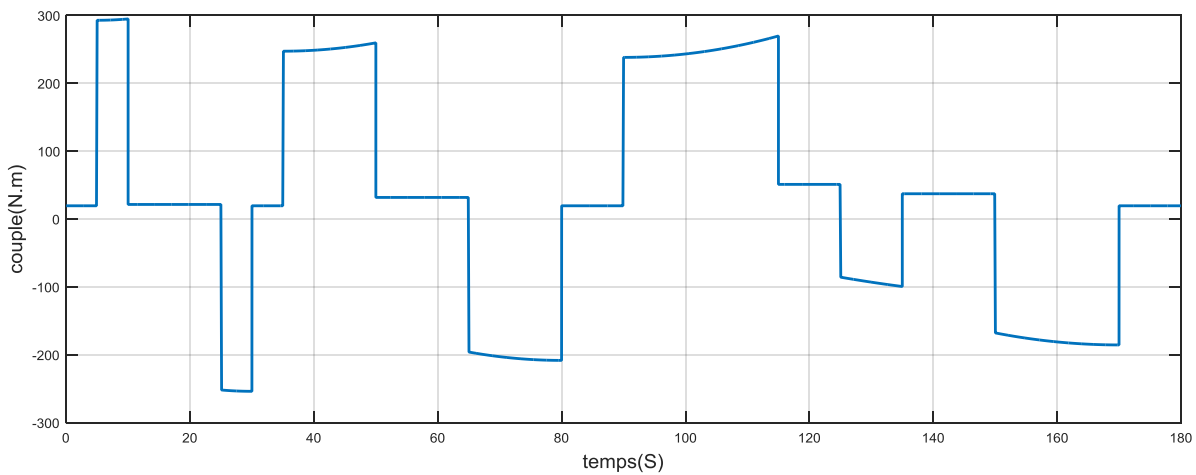


Figure (III.35) Résultat de la simulation de consigne de couple

La figure (III.35) montre le couple de charge, tant que Le couple de charge a été calculé à partir de ce profil de vitesse en utilisant les caractéristiques mécaniques et aérodynamiques du véhicule.

Remarque :

- 1- Pour appliquer notre technique de commande il faut remettre la vitesse de référence en (rad/s).

Donc :

$$\begin{cases} (km/h) \frac{1}{3.6} = (m/s) \\ (m/s) \frac{1}{r} = (rad/s) \end{cases} \tag{III.41}$$

2- La puissance du moteur de notre VE est égale **16kw**, donc on calcule le couple nominal comme suit :

On a **P=2** ‘nombre de pair de pole’ ; La vitesse nominale est égale **157 rad /s**

$$\begin{cases} C_m = P_u = \frac{16000}{157} \\ C_m = 102 \text{ N.m} \end{cases} \quad \text{(III.42)}$$

On remarque que le couple de charge max dans les résultats égale presque **300N.m**, donc on calcule le rapport du réducteur pour maximise le couple dans la roue.

$$K = \frac{C_{roue}}{C_m} \quad \text{(III.43)}$$

Résultat de la simulation des consignes de couple, de vitesse et de puissance **K= 2.72**

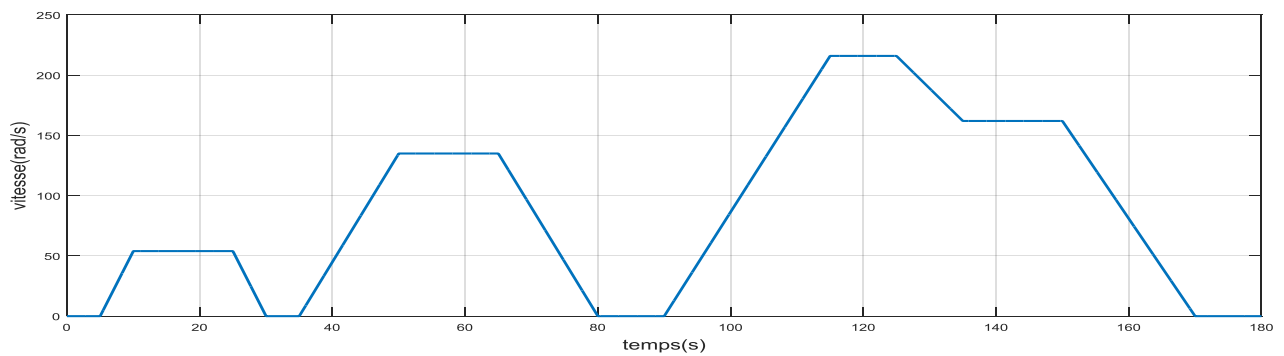


Figure (III.35) vitesse de référence en (rad/s)

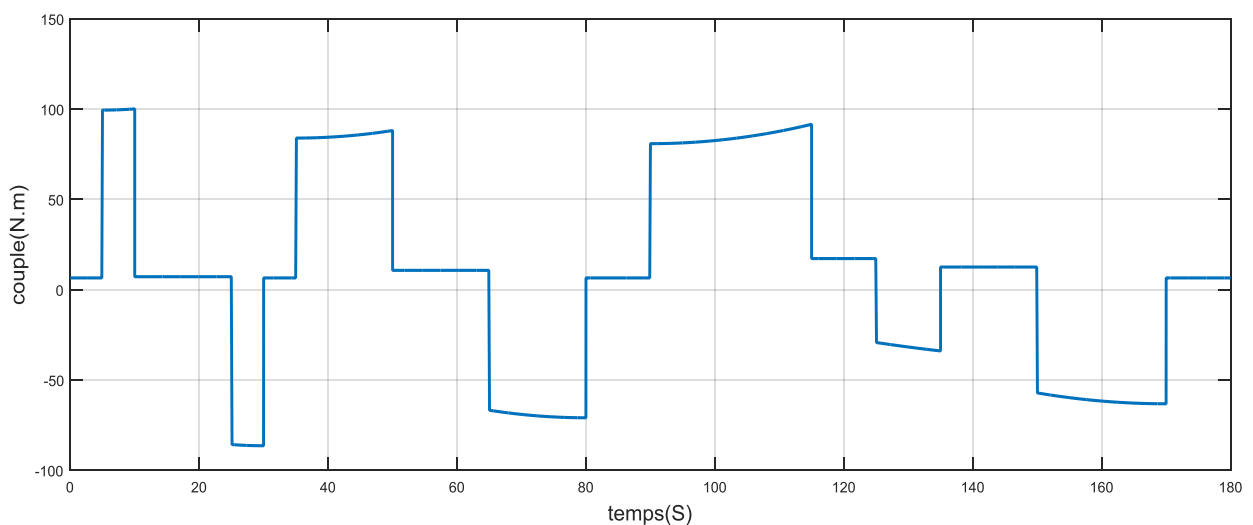
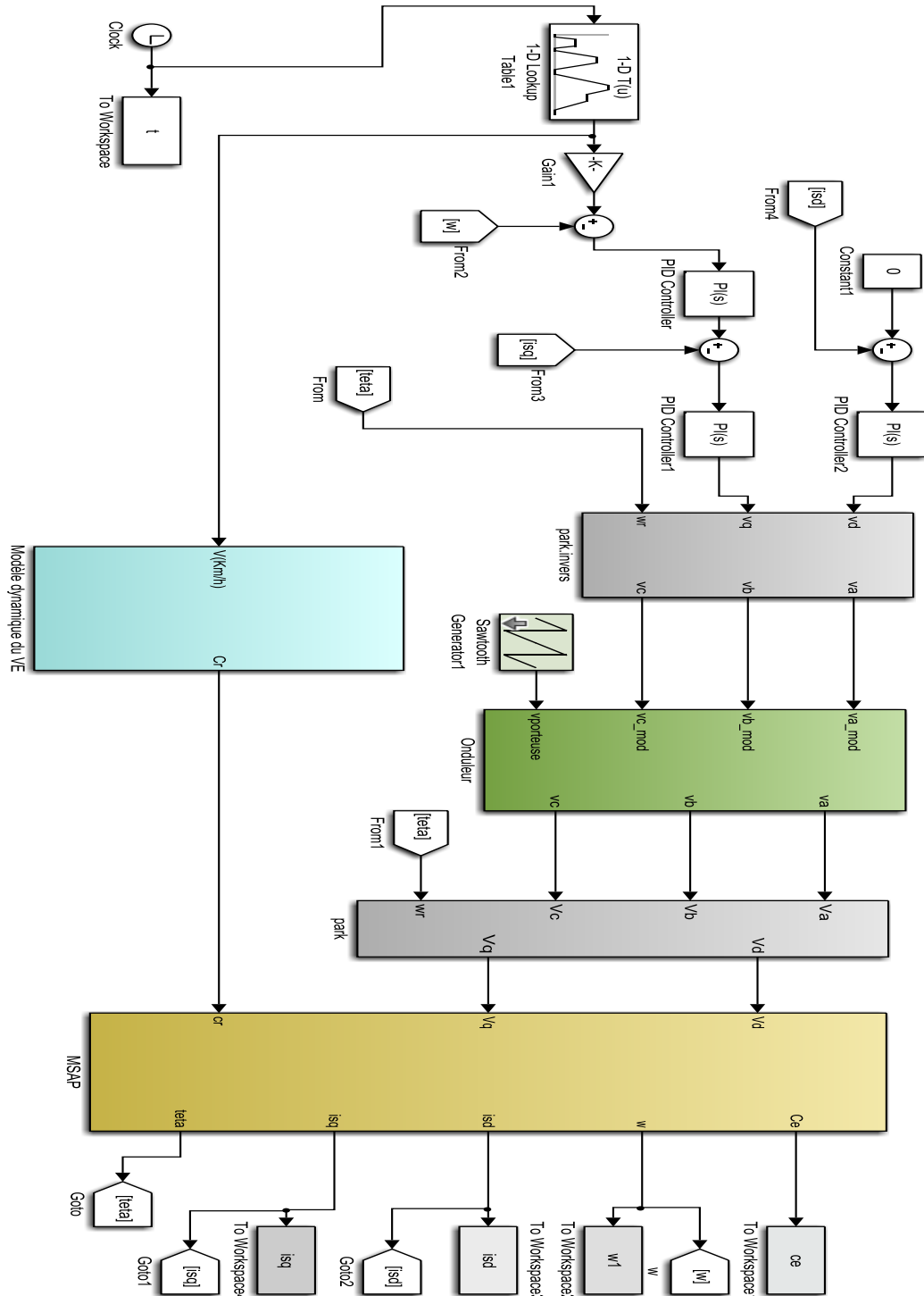


Figure (III.36) le couple de charge

III.6 Application du cycle de conduite au VE avec la technique de commande (CVE)



Figure(III.37) Shémas de simulation de la chaîne d'entraînemt de véhicule électrique(associaton de model mécanique et électrique.

a- Résultats de la simulation

Nous considérons ici l'application comme vitesse de référence un cycle de conduite représenté sur la figure (III.34), d'autre part on applique un couple résistant qui est obtenu d'après le modèle dynamique du véhicule. La figure suivante montre les résultats de la réponse de notre chaîne de traction avec la technique de commande à savoir la commande vectorielle (en bleu) et la vitesse de référence (en rouge).

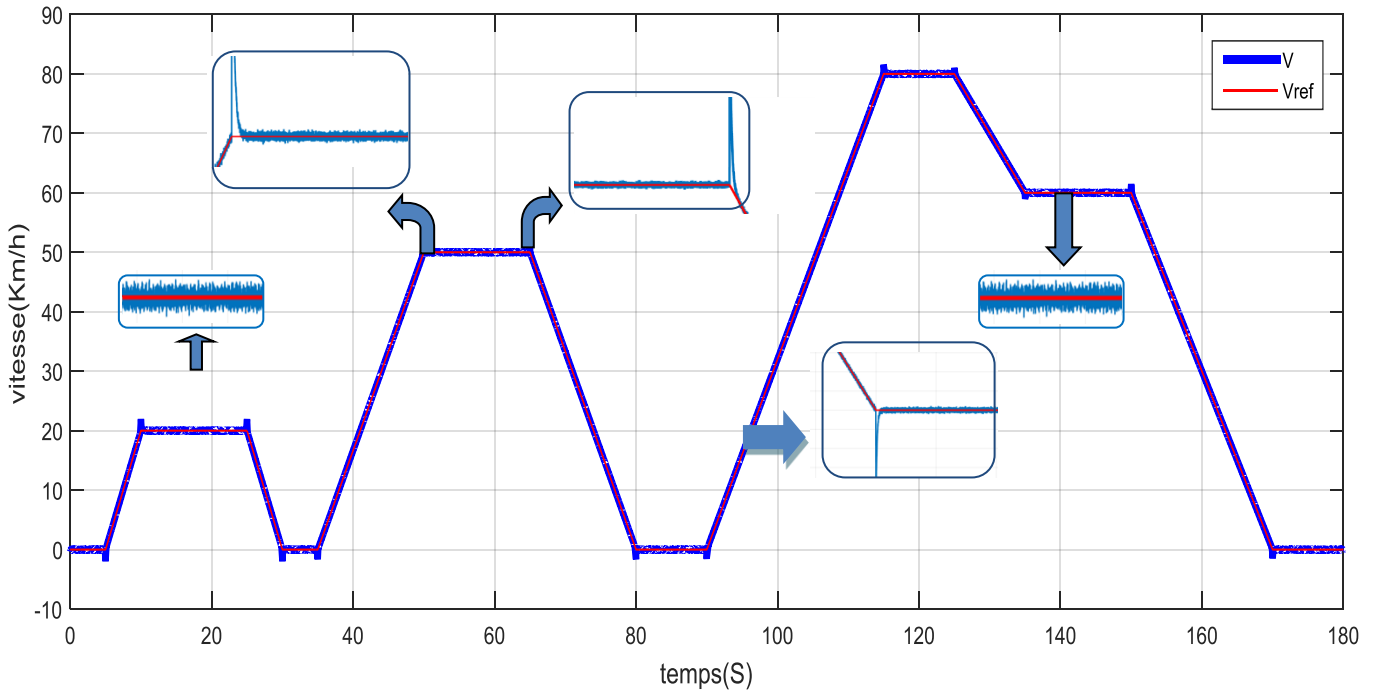


Figure (III.38) Résultats de simulation de la vitesse du véhicule en Km/h,
Avec la technique de commande vectorielle

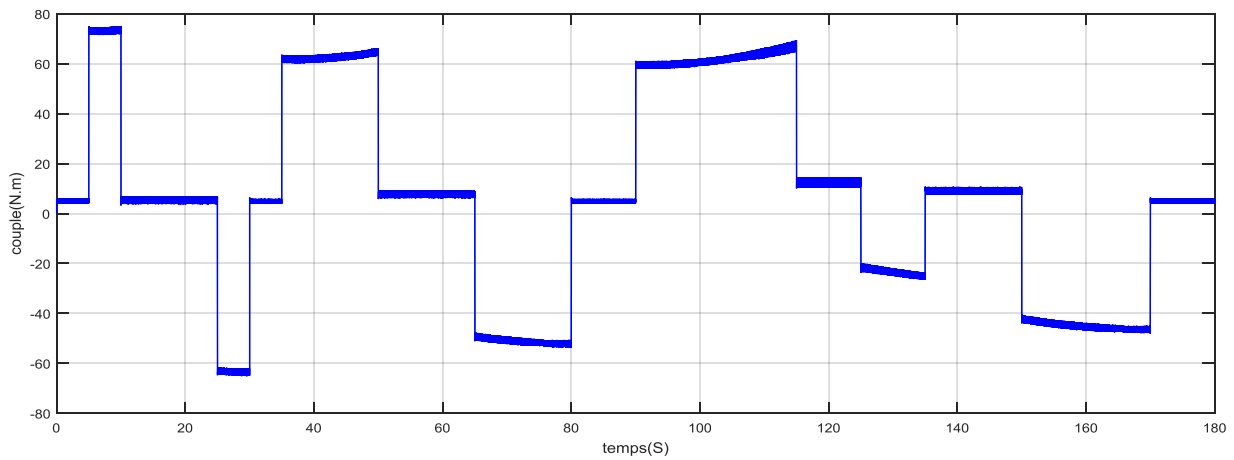


Figure (III.39) Résultat de la simulation de couple électromagnétique

III.6.1. Application du cycle de conduite avec une inclinaison (pente de 5%) :

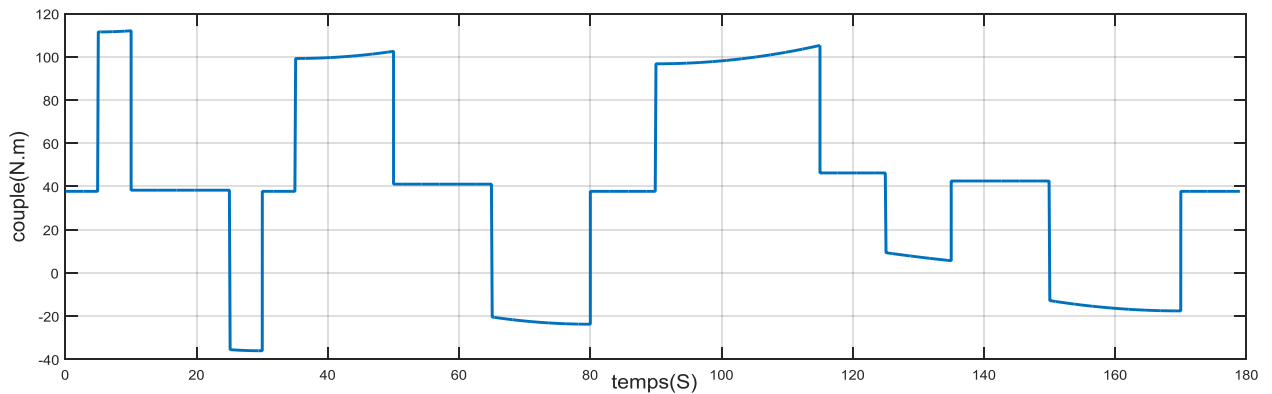


Figure (III.40) Résultat de la simulation de Cr

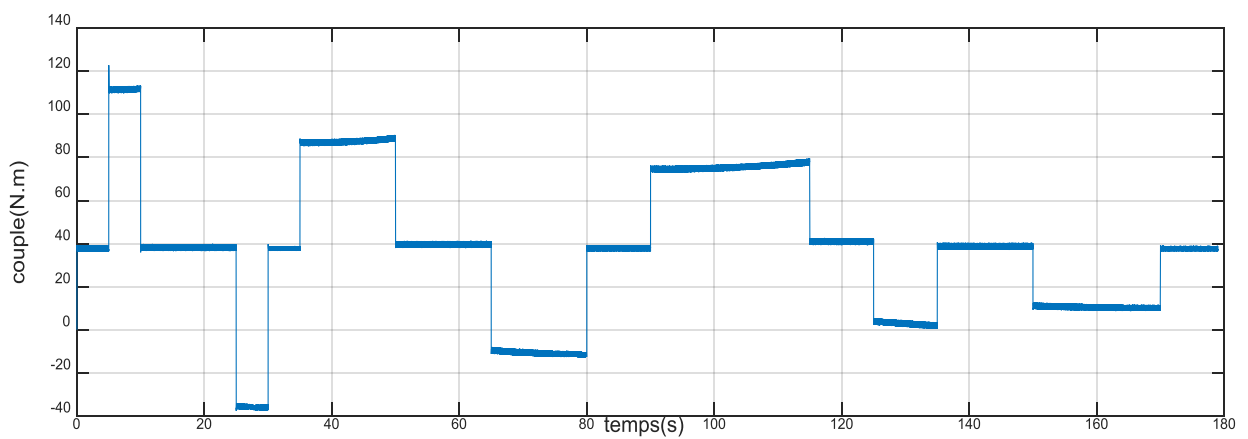
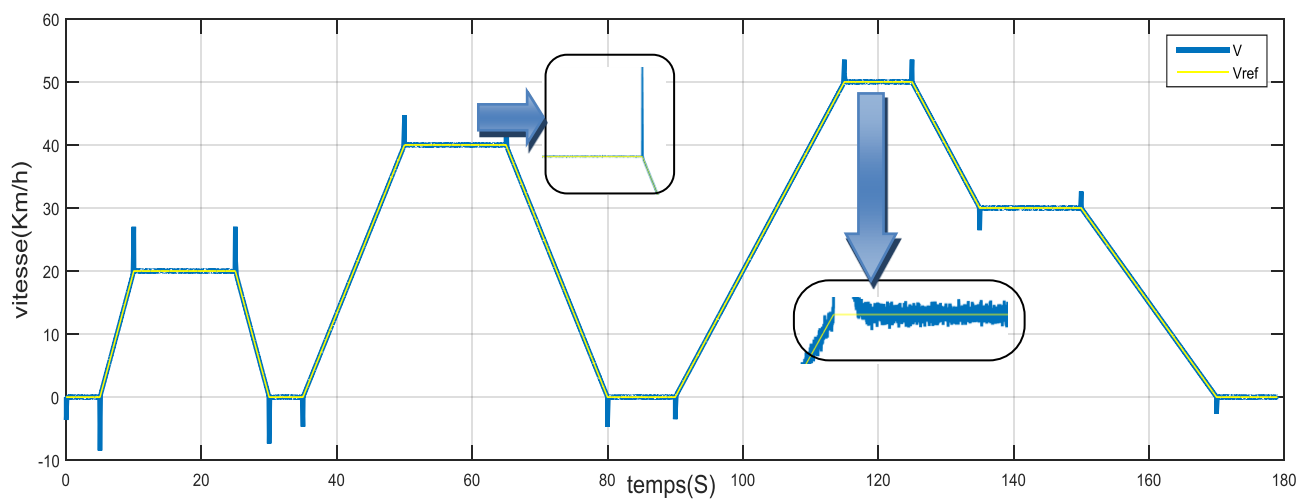


Figure (III.41) Résultat de la simulation de Cem



Figure(III.42) Résultats de simulation de la vitesse du véhicule en Km/h,

Avec la technique de commande vectorielle

b- Interprétation des résultats

D'après ces figures, nous constatons que les grandeurs suivent leurs consignes convenablement en utilisant la technique de commande vectorielle comme illustré par les figures (III.38 et III.42), la commande ici nous a permis un suivi de consigne et une limitation des ondulations du couple lors des changements brusques de vitesse (phase d'accélération, de décélération et de vitesse constante).

Nous pouvons noter aussi que le modèle mécanique implanté dans ces simulations traduit bien le comportement du VE lors de l'augmentation de la pente (5%), puisque, nous remarquons une augmentation du couple et des pics plus importants lors des changements brusques de vitesse.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la commande vectorielle à base des régulateur PI appliquée à la machine synchrone à aimant permanent. Cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu. Les résultats de simulation nous montrent que les réponses avec la commande vectorielle permettent d'obtenir des performances dynamiques satisfaisantes selon les scénarii simulés.

Le modèle dynamique, du VH électrique, implanté dans Matlab Simulink traduit bien le comportement réel selon les scénarii simulés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a eu pour objectif principal, l'insertion dans la plateforme Matlab Simulink d'un modèle comportemental du véhicule électrique.

Pour y arriver nous avons tracé un cahier des charges au début et nous avons opté pour trois parties.

Dans la première partie nous avons dressé la situation du VE dans le contexte économique actuel, l'engouement des chercheurs à développer un VE plus performant, plus autonome et avec le moindre impact sur l'environnement. Nous avons dressé aussi les différents chargeurs utilisés puisqu'ils constituent l'inconvenant majeur dans l'utilisation du VE.

La deuxième partie a été consacrée au développement des différents modèles de la chaîne d'entraînement du VE, à savoir, le MSAP et la partie mécanique du VE.

Le modèle du MSAP a été calculé dans le repère de Park pour simplifier les équations et faciliter son insertion dans Matlab Simulink. La partie mécanique a nécessité, la prise en considération des variables mécaniques et de l'environnement du véhicule pour traduire un comportement qui se rapproche de la réalité du VE.

La troisième partie a été consacrée à la modélisation de l'organe de variation de vitesse (l'onduleur), nous avons donc choisi la technique de commande des interrupteurs, la MLI sinus triangle, pour sa simplicité et la facilité de sa mise en œuvre. Le calcul des paramètres des régulateurs PI pour la commande vectorielle du MSAP, pour un fonctionnement à vitesse variable et c'est ainsi que nous avons testé notre chaîne d'entraînement entière incluant l'onduleur, le MSAP, la partie mécanique du VE et la commande vectorielle sur une charge constante, les résultats de la simulation sont très concluants pour valider le modèle proposé ainsi qu'un test de robustesse validant notre commande a été aussi effectué. Néanmoins des tests supplémentaires ont été proposés pour un cycle de conduite bien précis incluant des accélérations, des décélérations et des vitesses constantes ont montrés un bon suivi de consigne et un fonctionnement à vitesse variable assez performant. Des simulations supplémentaires ont été aussi effectuées touchant aussi à l'environnement du véhicule (la pente) et ont montrées aussi le bon suivi de consigne et un fonctionnement à vitesse variable très satisfaisant.

Perspectives

Du point de vue scientifique, la conception de nouvelles méthodes de commande non linéaire robustes reste un sujet de préoccupation majeur pour les scientifiques. Ce problème constitue d'ailleurs une perspective de continuité de ce mémoire :

- Développement d'un contrôle sans capteur mécaniques.
- Etude du MSAP associée à d'autres stratégies de commandes.
- Etude d'autres techniques utilisant l'intelligence artificielle.

Bibliographie

- [1] Aiman, NOUCHE « *Contribution au développement d'un Simulateur pour les véhicules électriques routiers* », thèse doctorat, 'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, génie électrique, 2008
- [2] P. DEGOBERT « *Pollution atmosphérique : réduction des émissions dues au moteur* », Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, Doc. B 2 714.
- [3] 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.
- [4] Kermani S., (2009), *Gestion énergétique de véhicule hybride de la simulation à la commande temps réel*. Thèse de doctorat, valenciennne et du Hainaut Cambrésis.
- [5] Aiman Nouh contribution au développement d'un simulateur pour le véhicule électrique routier : université de technologie de Belfort de Montbéliard et l'université de franche – comté.
- [6] : Marc DEBRUYNE « Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique » technique d'ingénieur. 2010.
- [7] : Redah SADOON, « Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », thèse de doctorat ECOLE CENTRALE DE LILLE, France, 2013.
- [8] : Kevin Tanguy, « Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier », Québec, Canada, 2013.
- [9] Beziau, J. J. (1998). Systèmes de piles à combustible pour la cogénération: état de l'art. *Rapport réalisé pour le compte de l'ADEME, du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris*, 31.
- [10] Emadi, A., Rajashekara, K., Williamson, S. S., & Lukic, S. M. (2005). Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 54(3), 763-770.
- [11] BELHACHEMI, Farid. (2001). Thèse de doctorat, modélisation et caractérisation des super condensateurs a couche double électrique utilises en électronique de puissance.

Bibliographie

- [12] Samantha LACROIX. (2013) Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries. THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD.
- [13] J.-P. Ferrieux, F. Forest, "Alimentations à découpage – Convertisseur à résonance", édition Masson, 1994.
- [14] M. G. Egan, D. L. O'Sullivan, J. G. Hayes, M. J. Willers, and C. P. Henze, "Power-Factor-Corrected single-stage inductive charger for electric vehicle batteries".
- [15] L. Solero, "Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 50, no. 1, pp. 144-149, January 2001.
- [16] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey and D. P. Kothari, "A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC–DC Converters", in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 3, pp.641-660, 2004.
- [17] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, "Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies, " *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 413-421, March 2012.
- [18] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, "Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies, " *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 413-421, March 2012.
- [19] M. Yilmaz, P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles", in *Proc. on IEEE Trans.Pow. Elec.*, no. 99, 2011.
- [20] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey and D. P. Kothari, "A Review of Single-Phase Improved Power Quality AC–DC Converters", in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 962-981, 2003.
- [21] F. Anan, Y. Goto, K. Yamasaki, K. Niwra and M. Ono, "Development of an on-board charger using the car air-conditioner", *E.V.S.'12*, Vol2, pp 542- 551, 1994.

Bibliographie

- [22] H. C. Chang and C. M. Liaw, "Development of a Compact Switched Reluctance Motor Drive for EV Propulsion With Voltage-Boosting and PFC Charging Capabilities", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3198-3215, Sep. 2009.
- [23] A. G. Cocconi, "Combined motor drive and battery charger system", US patent 5341075, Aug. 1994.
- [25] H. C. Chang and C. M. Liaw, "Development of a Compact Switched Reluctance Motor Drive for EV Propulsion With Voltage-Boosting and PFC Charging Capabilities", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3198-3215, Sep. 2009.
- [26] B. Chauchat, "Chargeur de batteries intégrés pour véhicule électrique", thèse de doctorat, INPG, novembre 1997.
- [27] S. Haghbin, S. Lundmark, M. Alakula, and O. Carlson, "An Isolated HighPower Integrated Charger in Electrified Vehicle Applications," in *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4115-4126, 2011.
- [28] R. Trigui, F. Harel, B. Jeanneret, F. Badin, and S. Dérou, "Optimisation globale de la commande d'un moteur synchrone à rotor bobiné. Effets sur la consommation simulée de véhicules électriques et hybrides .," *GEVIQ'2000.*, pp. 21-22, 2000.
- [29] N. Bouchetata, "Contribution à la commande d'un véhicule électrique à quatre roues motrices," Thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2017.
- [30] A. Bouchrit, "Conception d'un convertisseur de puissance pour les véhicules Électriques," Thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort -Montbéliard, 2011.
- [31] J. Král, "Simulation of Electric Vehicle Including Different Power Train Components'," Mémoire master, Université CZECH TECHNICAL, PRAGUE, 2017.
- [32] K. Benmansour, "Commande Tolérante aux Défauts d'une Chaîne de Traction Electrique," Thèse magister, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, Bordj elbahri.
- [33] K. Amor, "Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)," Thèse doctorat, Université Aix Marseille, 2012.

Bibliographie

- [34] A. Tahri and M. Hadjmhamed, "Amélioration de l'alimentation du moteur asynchrone par l'utilisation de l'onduleur MLI," Mémoire d'ingénieur, Université Mohamed Bouguerra, Boumerdes, 2007.
- [35] R. Trigui, F. Harel, B. Jeanneret, F. Badin, and S. Dérrou, "Optimisation globale de la commande d'un moteur synchrone à rotor bobiné. Effets sur la consommation simulée de véhicules électriques et hybrides .," *GEVIQ'2000.*, pp. 21–22, 2000.
- [36] S. R. Jape and A. Thosar, "COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION," *IJRET eISSN: 2319-1163*, pp. 12–17, 2017.
- [37] A. DJELLIK and S. HAOUACHI, "Commande d'un Moteur Synchrone à Aimant Permanent Par une DTC à SVM Jury," Mémoire de master, Université Amar Thelidji, Laghouat, 2016.
- [38] F. Laieb and H. Guerrouche, "Etude comparative de la commande par mode glissant et la commande vectorielle d'une machine asynchrone," Mémoire d'ingénieur, Université MOHAMED BOUDIAF, M'SILA, 2004.
- [39]. A. Laguidi, "Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [40]. H.CHENNOUFI "Contribution à l'Etude de la Commande d'un Véhicule Electrique à Deux Roues Motrices", Thèse Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Février 2005.
- [41]. 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.
- [42]. R. TRIGUI, "Motorisation Asynchrone pour Véhicule Electrique", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Paris, 1997.
- [43]. User Manual, "DSP Based Electric Drives Laboratory", Department of Electrical and Computer Engineering University of Minnesota.
- [44]. Mustapha KHELIFI, Ahmed SEKOUR, "Etude de la carte DSPACE DS1104", *Projet de Fin d'Etudes, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006.*
- [45]. B .GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.

Bibliographie

[46]. “Cours Sur les Hacheur”, Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle.

[47]. S. Guy “Electronique de Puissance.

[48] : H. BRIGHEN and S. HALAIMIA, “Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale, ”mémoire master, LARBI TEBSSI, TEBESSA, 2016.

[49] : A. Tahri and M. Hadj Mohamed, “Amélioration de l’alimentation du moteur asynchrone par l’utilisation de l’onduleur MLI,” Mémoire d’ingénieur, Université Mhamed Bouguerra , Boumerdes, 2007.

[50] A. Abid, “Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP,”

Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.

[51] K. Amor, “Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP),” Thèse doctorat, Université Marseille, 2012.

[52] F. BENCHABANE, “Commande en position et en vitesse par mode de glissement d’un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring,” Thèse magister, UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER , BISKRA, 2005.

[53].M. H. Kacem, S. Tounsi, and R. Neji, “Dimensionnement de la chaîne de traction d’un véhicule électrique,” in *International Conference on Green Energy and Environmental Engineering (GEEE-2014)*, 2014.