

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA



FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER II EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Commande Electrique

Thème

Etude et commande d'un véhicule électrique

Réalisé par

- Mr Hamadache Meziane
- Mr Hassani Fouad

Encadré par

- Dr Mokrani Zahra

Membres du jury

- Mr. A. HAMMAS
- Mr. Y. ACHOUR

Remerciements

Remerciement à Dieu –le tout puissant– pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promotrice Mme Mokrani Zahra, Docteur en électrotechnique à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble, enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont encouragé à réaliser ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*À mes très chers parents, à mon frère Mohamed et ma
Chère sœur manél, à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et
encouragé tout au long de mon parcours.*

À tous mes chers amis qui m'aiment et qui m'apprécient.



HAMADACHE

MEZIANE.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail.

A :

- Mes très grands-parents,*
- Mes très chers parents,*
- Mes très chères sœurs et mon frère Mourad,*
- Toute ma famille,*
- Tout mes collègues.*

Hassani Fouad.

Liste des abréviations

CO2	Dioxyde de carbone.
GES	Gaz à effet de serre.
VE	Véhicule électrique.
MCC	Moteur à courant continu.
MAS	Moteur asynchrone.
MS	Moteur synchrone.
MSAP	Moteur synchrone à aimants permanents.
IGBT	Transistor (Insulated Gate Bipolar Transistor).
GTO	Thyristors (Gate Turn Off).
F.E.M	La Force Electromotrice.
CDC	Commande Directe du Couple (Direct Torque Control « DTC »).
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion.
AC/DC	Courant alternatif / Courant continu.
DC/AC	Courant continu / Courant alternatif.
DC/DC	Courant continu / Courant continu.

Nomenclature

N_s : Vitesse du synchronisme(tr/mn).

f : Fréquence d'alimentation [Hz].

P : Nombre de paires de pôles.

N_r : Vitesse de rotation(tr/mn).

g : Glissement .

a_s, b_s, c_s : trois phases du stator.

a_r, b_r, c_r : trois phases du rotor.

R_s : Résistance statorique (Ω).

R_r : Résistance rotorique (Ω).

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statoriques (a,b,c) (V).

$[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotoriques (a,b,c) (V).

$[I_{sabc}]$: Matrice des courants des phases statoriques (A).

$[I_{rabc}]$: Matrice des courants des phases rotoriques(A).

$[\varphi_{sabc}]$: Matrice des flux statorique (Wb).

$[\varphi_{rabc}]$: Matrice des flux rotorique (Wb).

$V_{s\alpha}, V_{s\beta}, V_{r\alpha}$ et $V_{r\beta}$: Tensions statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator α, β (V) .

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{r\alpha}$ et $I_{r\beta}$: Courants statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator α, β (A).

$\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}, \varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$: Flux statoriques et rotoriques dans le repère lié au stator α, β (Wb) .

M : Inductance mutuelle entre le stator et le rotor (H).

C_{em} : Couple électromagnétique (N. m).

C_r : Couple résistant (N.m).

Ω_r : Vitesse mécanique (tr/min).

J : Moment d'inertie (Kg/m).

F : Coefficient de frottement (SI).

$p(\theta)$: Matrice de Park.

$[T]$: Matrice de passage direct de Concordia.

$[T]^{-1}$: Matrice de passage indirect de Concordia.

[C] : Matrice de passage direct de Clarke.

[C]⁻¹ : Matrice de passage indirect de Clarke.

ω_s : Pulsation statorique (rad/s) .

θ : L'angle électrique entre le rotor et le stator.

θ_r : L'angle électrique entre l'axe d et le rotor(rad).

θ_s : L'angle électrique entre l'axe d et le stator(rad).

a, b, c : Indices correspondants aux trois phases du stator et du rotor.

α, β : Axes du référentiel fixe par rapport au stator.

n_0 : Point milieu fictif à l'entrée continu.

n : Le neutre de la machine.

$S_a, S_b, S_c, S'_a, S'_b, S'_c$: Variables logiques correspondantes à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} : Tension composé à la sortie de l'onduleur (V).

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tension simple à la sortie de l'onduleur (V).

V_{dc} : Tension continu à l'entrée de l'onduleur (V).

φ_s : Le flux du stator(Wb).

φ_r : Le flux du rotor(Wb).

T_e : Période d'échantillonnage (s).

V_s : Vecteur tension (V).

V_i : Secteur où se trouve le vecteur du flux statorique.

φ_{sref} : Flux statorique de référence (Wb).

$\Delta\varphi_s$: Bande d'hystérésis du correcteur flux (Wb).

$\varepsilon\varphi$: Erreur sur la grandeur du flux.

c_{fx} : Variable booléenne du comparateur à hystérésis à deux niveaux.

C_{eref} : Couple électromagnétique de référence (N.m).

ΔC : Bande d'hystérésis du correcteur couple (N.m).

ε_c : Erreur sur la grandeur du couple.

c_{cpt} : Variable du comparateur à hystérésis à trois niveaux.

α : Représente l'angle de la pente.

Listes des Tableaux

TABLEAU I.1 : PRESENTATION DE QUELQUE MODELE DES VEHICULES 100% ELECTRIQUES	6
TABLEAU IV.1 : TABLE DE COMMUTATION.	39
TABLEAU IV.2 : TABLE DE COMMANDE DE FLUX.....	40
TABLEAU IV.3 : TABLE DE COMMANDE DU COUPLE.	40
TABLEAU IV.4 : STRATEGIE DE CONTROLE AVEC COMPARATEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX AVEC LES VECTEURS DE TENSIONS NULS	40

Liste des figures

FIGURE I. 1 : EXEMPLES DES VOITURES ELECTRIQUES DU DEBUT DU 20EME SIECLE.	4
FIGURE I. 2 : SYNOPTIQUE D'UN SYSTEME DE PROPULSION.	6
FIGURE I. 3 : PRINCIPAUX ELEMENTS DU VEHICULE ELECTRIQUE.	8
FIGURE II. 1 : STRUCTURE DE LA CHAINE DE TRACTION DANS UN VE.	11
FIGURE II. 2 : BATTERIE D'UN VE TOUT ELECTRIQUE.	12
FIGURE II. 3 : UN ACCUMULATEUR.....	12
FIGURE II. 4 : PILE A COMBUSTIBLE.	12
FIGURE II. 5 : UN SUPER CONDENSATEUR.	13
FIGURE II. 6 : SCHEMA FONCTIONNEL DE LA CHAINE DE TRACTION D'UN VEHICULE TOUT ELECTRIQUE...	14
FIGURE II. 7 : REPRESENTE LES DIFFERENTS ELEMENTS CONSTITUANTS LA MACHINE ASYNCHRONE.	15
FIGURE II. 8 : LE STATOR A CAGE D'ECUREUIL.	16
FIGURE II. 9 : CAGE D'ECUREUIL.	17
FIGURE II. 10 : ROTOR A CAGE D'ECUREUIL.	17
FIGURE II. 11 : DIAGRAMME ET BILAN DE PUISSANCE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE.....	18
FIGURE II. 12 : SCHEMA EQUIVALENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE.	18
FIGURE II. 13 : MODE DU COUPLAGE DES ENROULEMENTS STATORIQUES.	19
FIGURE III. 1 : PRESENTATION DES AXES STATORIQUES ET ROTORIQUES.	21
FIGURE III. 2 : DEFINITION DES ANGLES ENTRE LES REPERES DIPHASES.	24
FIGURE III. 3 : SCHEMA DE LA TRANSFORMATION ABC VERS AB.....	25
FIGURE III. 4 : SCHEMA DE L'ONDULEUR TRIPHASE A DEUX NIVEAUX.	28
FIGURE III. 5 : ÉTAT DES INTERRUPTEURS ET VECTEUR TENSIONS CORRESPONDANTES	30
FIGURE III. 6 : REPRESENTATION DES FORCES AGISSANT SUR LE VEHICULE.	31
FIGURE IV. 1 : SCHEMA STRUCTUREL DU CONTROLE DIRECT DU COUPLE.	33
FIGURE IV. 2 : (A) ÉVOLUTION DE L'EXTREMITE DU FLUX STATORIQUE DANS LE PLAN A, B ; (B) LES HUIT VECTEURS TENSIONS GENERES PAR L'ONDULEUR.	35
FIGURE IV. 3 : CHOIX DU VECTEUR TENSION.....	36
FIGURE IV. 4 : ÉVOLUTION DU FLUX STATORIQUE DANS LA BANDE A HYSTERESIS.....	37
FIGURE IV. 5 : COMPARATEUR A HYSTERESIS A DEUX NIVEAUX.....	38
FIGURE IV. 6 : COMPARATEUR A HYSTERESIS A TROIS NIVEAUX.	38
FIGURE IV. 7 : VECTEURS ACTIFS DES TENSIONS STATORIQUES ET SECTEURS	39
FIGURE IV. 8 : STRUCTURE GENERALE D'UNE COMMANDE CDC ASSOCIE A UN VEHICULE ELECTRIQUE...	41

FIGURE IV. 9 : SCHEMA BLOC DE LA CDC ASSOCIE AU VEHICULE ELECTRIQUE.	42
FIGURE IV. 10 : PROFIL DE LA VITESSE DU VEHICULE ELECTRIQUE.....	42
FIGURE IV. 11 : PROFIL DU COUPLE DE CHARGE DU VEHICULE ELECTRIQUE.	43
FIGURE IV. 12 : ALLURE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE ET DU COUPLE CHARGE.	43
FIGURE IV. 13 : ALLURE DE LA VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE ELECTRIQUE.	44
FIGURE IV. 14 : ALLURE DU COURANT STATORIQUES DANS LE REPERE TRIPHASE.	44
FIGURE IV. 15 : ALLURE DU COURANT STATORIQUES DANS LE REPERE BIPHASE.	45
FIGURE IV. 16 : ALLURE DE FLUX STATORIQUES ET SA TRAJECTOIRE CIRCULAIRE.	45
FIGURE IV. 17 : SCHEMA BLOC DU TEST DE ROBUSTESSE DU LA CDC.	46
FIGURE IV. 18 : ALLURE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE ET DU COUPLE DE CHARGE.	47
FIGURE IV. 19 : ALLURE DE LA VITESSE DE ROTATION DE LA MACHINE ELECTRIQUE.	47
FIGURE IV. 20 : ALLURE DU COURANT STATORIQUE DANS LE REPERE TRIPHASE.	48
FIGURE IV. 21 : ALLURE DU COURANT STATORIQUE DANS LE REPERE BIPHASE.....	48
FIGURE IV. 22 : ALLURE DU FLUX STATORIQUE DANS LE DOMAINE TEMPOREL ET SA TRAJECTOIRE CIRCULAIRE.	49

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Liste des abréviations

Nomenclature

Listes des Tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

Chapitre I : État d'art de véhicule électrique

Introduction 3

I.1. Historique 3

I.2. Actualités des véhicules électriques 5

I.3. Structure d'un véhicule électrique 6

 I.3.1. Le Bloc Moteur Electrique 7

 I.3.2. Le Bloc de Commande et de Contrôle 7

 I.3.3. Le Bloc de Puissance 7

I.4. Définition d'une voiture électrique 7

I.5. Fonctionnement du moteur de véhicule électrique 7

I.6. Avantages et inconvénients d'un véhicule électrique 8

 I.6.1. Avantages 8

 I.6.2. Inconvénients 9

I.7. Domaine d'utilisation 9

 I.7.1. Transport de marchandises 9

 I.7.2. Véhicules de service 9

 I.7.3. Véhicules de transport en commun 9

 I.7.4. Transport individuel 10

Conclusion 10

Chapitre II : Machine électrique dédiées à la traction électrique

Introduction 11

II.1. Description générale de la chaîne de traction 11

II.2. Les sources d'énergie électriques 12

 II.2.1. Batterie 12

 II.2.2. Accumulateur 12

 II.2.3. Pile à combustible 12

II.2.4. Le super condensateur	13
II.3. Convertisseur statique.....	13
II.3.1. Les redresseurs (AC/DC)	13
II.3.2. Les hacheurs (DC/DC)	13
II.3.3. Les onduleurs (DC/AC).....	13
II.4. Motorisation de la chaine de traction	14
II.4.1. Moteur à courant continu(MCC)	14
II.4.2. Moteur synchrones (MS).....	14
II.4.3. Moteur asynchrones (MAS)	15
II.5. Définition de la machine asynchrone	15
II.6. Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil	15
II.6.1. Stator (inducteur)	16
II.6.2. Rotor à cage d'écureuil (induit)	166
II.7. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	17
II.8. Vitesse de synchronisme.....	17
II.9. Glissement.....	17
II.10. Bilan des puissances	18
II.11. Schéma équivalent	18
II.12. Choix du couplage	19
II.13. Différents types de démarrage	19
Conclusion.....	19

Chapitre III : Modélisation de la chaine de traction

III.1. Modélisation de la machine asynchrone.....	20
III.1.1. Hypothèses simplificatrices.....	20
III.1. 2. Mise en équation du modèle de la machine asynchrone	20
III.1. 2. 1. Équations électriques dans le repère abc	21
III.1. 2.2. Équations magnétiques dans le repère abc	22
III.1. 2.3. Équation mécanique dans le repère abc.....	23
III.1.3. Transformation de Park.....	23
III.1.4. Choix du système d'axes.....	24
III.1.4.1. Référentiel lié au stator.....	25
III.1.5. Équations électriques de la machine asynchrone dans le repère $\alpha\beta$	25
III.1.6. Modélisation de l'onduleur de tension	27
III.1.7. Modélisation du véhicule électrique	30

III.1.7.1. Les différentes forces agissantes sur le véhicule électrique	30
Conclusion.....	32

Chapitre IV : Application de la commande directe du couple au véhicule électrique

Introduction	33
IV.1. Principe du contrôle direct du couple.....	33
IV.2. Estimateurs	34
IV.2.1. Estimation du flux statorique	34
IV.2.2. Estimation du couple électromagnétique	35
IV.3. Choix du vecteur de tension	35
IV.4. Comparateurs à hystérésis	37
IV.4.1. Comparateur du flux statorique.....	37
IV.4.2. Comparateur du couple électromagnétique.....	38
IV.5. Élaboration de la table de commutation.....	39
IV.6. Avantages et inconvénients de la commande directe du couple.....	40
IV.6.1. Avantages de la CDC.....	40
IV.6.2. Inconvénients de la CDC	41
IV.7. Structure générale de la commande CDC	41
IV.8. Simulation de l'application de la commande directe du couple	41
IV.8.1. Résultat de Simulation de la commande directe du couple	42
IV.9. Robustesse de la commande CDC vis-à-vis de la variation du sens de rotation et à l'application d'une charge	46
Conclusion.....	49
Conclusion Générale	50

Liste Bibliographique

ANNEXES

Résumé

Introduction générale

Tout au long de son histoire, l'homme s'est forcé d'étendre le rayon de ses activités, ce qui l'a toujours entraîné à améliorer les techniques de transport. Chaque nouveau progrès des transports a modifié la vie humaine.

Née il y a plus de cent ans, l'automobile occupe notre univers quotidien. C'est une invention très originale qui a su au fil des ans, se faire une place en tant qu'instrument de transport ; objet de haute technologie, bien de consommation et de représentation de notre comportement social. Le devenir de l'automobile dans les prochaines années sera donc un sujet de recherche d'actualité [1].

Aujourd'hui, la forte hausse du nombre de voitures dans le monde équipées d'un moteur à combustion sont largement utilisées dans le domaine du transport. Ces véhicules engendrent cependant une pollution de l'environnement et consomment une quantité importante de combustible fossile. Pour les motifs tels que l'économie et la pollution (GES, réchauffement climatique, l'épuisement proche des sources d'énergie fossiles, compte tenu du prix des carburants...) sont deux facteurs qui ont rendu la recherche d'une source d'énergie alternative nécessaire. Les grands centres urbains mettent en place des législations de plus en plus strictes, limitant l'accès des véhicules au milieu urbain. En conséquence, le secteur du transport routier de marchandises et de passagers s'oriente de plus en plus vers des solutions de véhicules électriques. Ainsi, le remplacement des moteurs thermiques du véhicule conventionnel par des moteurs électriques est en cours [2].

Dans ce contexte, la propulsion électrique offre une solution idéale, sans émission et avec une opportunité d'être alimentée par une énergie électrique qui devient renouvelable. Toutefois, le véhicule électrique souffre de limites principalement liées à l'autonomie et au coût de fabrication en comparaison avec des solutions thermiques [3].

La chaîne de traction qui propulse ces véhicules est composée d'éléments spécifiques à savoir la source d'énergie électriques et la machine électrique notamment, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus spécialement les machines asynchrones. Actuellement un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux systèmes de conversion à base de machine asynchrone, cela est dû à son avantage majeur d'être robuste, et elle est dotée aussi d'une structure simple, peu coûteuse et elle ne nécessite pas un entretien régulier. Cependant, son comportement dynamique est souvent très complexe, vu que sa modélisation aboutit à un système d'équations non linéaire et multi variables. Grâce à L'évolution conjointe de l'électronique de puissance et la technologie de traitement numérique des signaux, il est devenu possible d'améliorer le comportement dynamique de la machine asynchrone par l'utilisation des différentes techniques de commande plus avancés pour contrôler en temps réel le couple et le flux de ces machines.

Dans la littérature, plusieurs techniques de commande ont été proposées, Vers le milieu des années 80, une stratégie de contrôle de la machine asynchrone, connue sous le nom de Commande Directe de Couple ou DTC (Direct Torque Control) étant l'une des plus populaires techniques de nos jours, est apparue pour concurrencer les commandes conventionnelles. Cette commande a été introduite par TAKAHASHI et M. DEPENDROCK. Son principe est basé sur une détermination directe de la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur de tension, afin de maintenir le couple électromagnétique et le flux statorique à l'intérieur des bandes à hystérésis.

Ce thème, consiste à simuler sous Matlab/Simulink une structure de contrôle directe du couple d'une machine asynchrone associée à un véhicule électrique, alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux. Les résultats de simulation démontrent la validité de cette stratégie, dans l'environnement Matlab/Simulink.

Le présent travail s'organise autour de quatre chapitres principaux, selon la chronologie suivante :

- Le premier chapitre est consacré à l'état d'art des véhicules électriques.
- Le deuxième chapitre portera sur la machine électrique dédiée à la traction électrique.
- Le troisième chapitre est réservé à la modélisation de la chaîne de traction.
- Le quatrième chapitre discute l'application de la commande directe du couple au véhicule électrique.

Enfin, ce manuscrit sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives quant à la contribution future.

Chapitre I
État d'art de véhicule électrique

Introduction

Au début du 20ème siècle la voiture à essence a connu un succès important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. C'est pourquoi jusqu'à nos jours la voiture à essence s'est développée. La voiture électrique ne fait donc pas encore partie de notre entourage mais elle devient de plus en plus sollicitée grâce à la constante hausse du pétrole et la médiatisation de la réduction du rejet de CO2. Après le grenelle de l'environnement et avant une crise pétrolière, de nombreuses entreprises et d'écologistes veulent développer la voiture électrique au niveau de l'autonomie des batteries et de l'utilisation maximale des énergies propres. Afin que celle-ci deviennent réellement plus propre et plus avantageuse que les voitures à essence [4].

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art de véhicule électrique, notamment du côté de leur structure, principe de fonctionnement, avantage et inconvénient, en commençant avec un bref historique sur cette technologie qui tôt ou tard révolutionnera le monde.

I.1. Historique

L'histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du 19 ème siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon, 39 en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail. Puis, en 1859, le français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable et en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval. Douze ans plus tard, en 1881, Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire.

Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu de 0,1 cheval et pesait 160 kg avec son conducteur.

Il a été précédé par Sir David Salomons qui construisit un VE avec une batterie rechargeable en 1874. Plus tard, en 1885, les allemands Daimler et Benz inventaient la première voiture à essence.

Les premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public due à leur technologie encore immature qui ne pouvait pas rivaliser avec les voitures à chevaux. Mais, les choses ont vite change ait et dans les années qui ont suivi la course était lancée : les véhicules électriques rivalisaient avec les véhicules thermiques mais aussi avec les véhicules à vapeurs. A titre d'exemple, parmi les automobiles construites en 1900 aux Etats-Unis, 1575 étaient électriques, 1684 à vapeur et seulement 936 à essence.

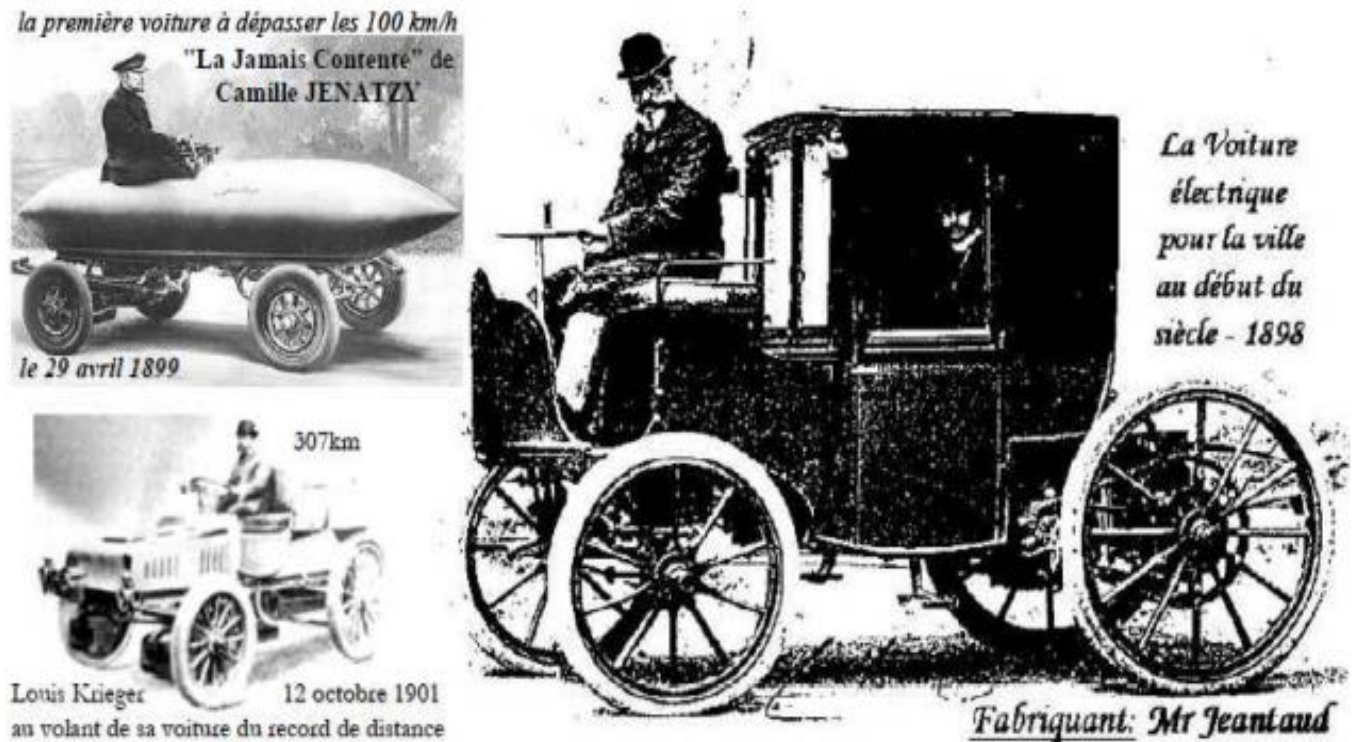


Figure I. 1 : Exemples des voitures électriques du début du 20ème siècle.

Sans doute, le début du 20ème siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée « La Jamais Contente » en forme d'obus. Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 kW (soit 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne. Deux ans plus tard, le 12 octobre 1901, l'ingénieur français Louis Krieger effectuait, sans recharge, le voyage Paris-Châtelleraut soit 307km à la vitesse moyenne de 17,5km/h. Cette performance lui a valu un statut parmi les plus importants constructeurs de véhicules électriques du début du siècle. Le véhicule électrique était donc bien présent dans le monde de l'automobile. Notamment, à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris, en 1900, la ville est traversée par « des taxis à batteries amovibles, d'élégants et silencieux coupés, des fourgons postaux, des voitures de livraison et des véhicules de pompiers, fonctionnant tous à l'électricité ». Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché, et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries, font disparaître progressivement les VE du marché. Ainsi, au début des années 30, la production de véhicules électriques est presque complètement interrompue, la période 1921-60 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors, les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. La dernière production significative de VE, d'un point de vue commercial, a été réalisée autour des années 1905. De nouvelles possibilités vont apparaître en traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell inventent le transistor et plus tard, à l'apparition des thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces découvertes conduisent au développement de l'électronique de puissance qui permet le remplacement des rhéostats et la commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

En même temps, dans les années 60-90, à cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers des années 70 et 80, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE. Les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. L'ère moderne du VE culmine entre les

années 80-90 avec quelques véhicules réalisés comme l'EV1 et la Peugeot 106 41 Electrique. Malgré les progrès, dans les années 90, il devient évident que les véhicules électriques ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules conventionnels à cause de leur autonomie et performances insuffisantes. Comme au début du 20ème siècle, le frein à leur développement est, et reste, la source de stockage d'énergie [5].

- Les Années 1990 - Aujourd'hui :

Une réponse du marché japonais a été lorsque Toyota a présenté sa Prius en 1997. C'était le premier véhicule électrique hybride produit en série, les ventes mondiales ont commencé en 2000. Il est devenu la voiture hybride la plus vendue de la première décennie du 21ème siècle., En 2006, une nouvelle start-up est apparue dans la Silicon Valley, s'appelant Tesla Moteurs, avec leur première voiture, un modèle entièrement électrique Tesla Roadster. En raison de leurs ressources limitées, la voiture était basée sur la plate-forme déjà existante d'un autre constructeur automobile, la Lotus Elise.

La situation financière de la société a changé de façon spectaculaire, lorsque le département de l'énergie a fourni à Tesla Motors un prêt de 465 millions de dollars, ils étaient en mesure de rembourser intégralement déjà en 2013. L'argent a été consacré à la construction de leur Giga-usine qui a fait de Tesla le plus grand constructeur automobile en Californie.

En raison du grand succès de Tesla, les véhicules électriques ont inspiré d'autres grands constructeurs automobiles, de sorte qu'en 2010 Chevrolet présente son modèle hybride Volt et Nissan son all Electric. En 2013, BMW a présenté son véhicule entièrement électrique i3 et l'hybride i8. La tendance dominante des véhicules électriques dans les dernières années se trouve être la technologie hybride plug-in, installé dans le modèle de tous les grands constructeurs automobiles [6].








I.2. Actualités des véhicules électriques

A l'heure actuelle, l'autonomie de l'ensemble des VEs proposés par les constructeurs comprennent des batteries qui peuvent développer une vitesse de (70 km/h à 200 km/h).

La gamme de puissance s'étale d'environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW. C'est l'utilisation des véhicules qui guident le choix de puissance.

Pour ce qui est du prix de ces véhicules, il est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. On peut cependant estimer que si les technologies d'alimentation employées (batteries, pile à combustible) sont fabriquées à grande échelle, alors les prix seraient comparables à ceux des véhicules thermiques. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique [7].

Tableau I.1 : Présentation de quelque modèle des véhicules 100% électriques :

Modèles	Autonomie	Vitesse max	Prix	photo
Honda e	200 km	100 km/h	38.600 €	
Hyundai IONIQ	280 km	100 km/h	34.900 €	
BMW i3	359 km	100 km/h	43.550 €	
Renault Zoé	395 km	100 km/h	34.600€	
Tesla Model 3	409 km	100 km/h	49.600€	
Audi E-Tron	415 km	100 km/h	82.600 €	
Porsche Taycan	550 km	100 km/h	108.632 €	

I.3. Structure d'un véhicule électrique

Compte tenu des progrès scientifique et technologique accomplis dans le domaine de l'électronique de puissances et les systèmes de gestion de l'énergie se sont heurtés à trois problèmes majeurs : la production, le transport, le stockage. Et l'utilisation de l'électricité. Le système de propulsion électrique (figure I.2) est l'organe principal du véhicule électrique, ce dernier est propulsé électriquement par des moteurs et comporte un système de transmission formé par un ou plusieurs moteurs électriques entraînant deux, quatre roues motrices [8].

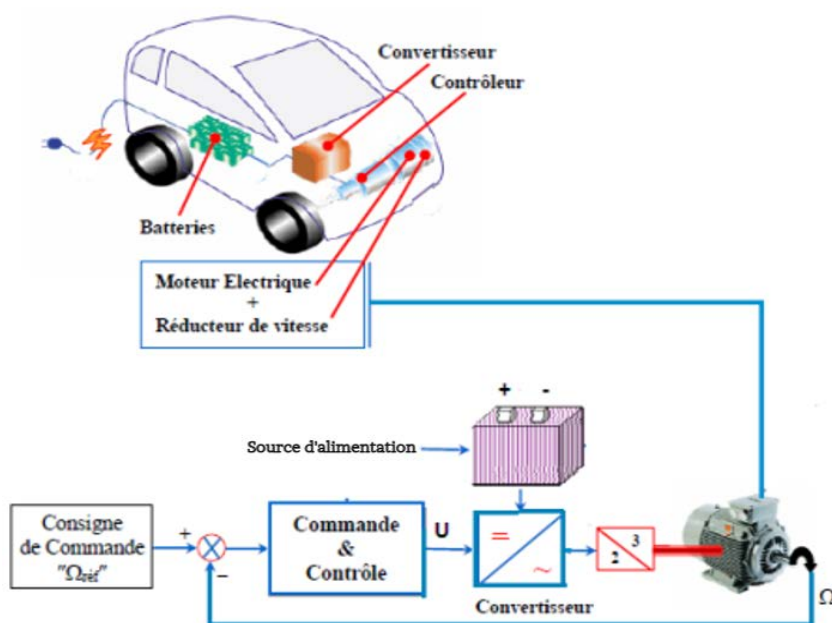


Figure I. 2 : Synoptique d'un système de propulsion [9].

Comme illustré sur la (figure I.2), ce système est constitué de trois principaux blocs [10], [11], [12] :

I.3.1 Le Bloc Moteur Electrique

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique, il doit être robuste, fiable et pratiquement sans entretien, ce qui est plus indiqué pour le moteur à induction. Selon le type de propulsion, il peut y avoir un ou plusieurs moteurs. Par ailleurs, différents types de moteurs peuvent être utilisés pour la propulsion. Cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes du type de propulsion (véhicule lourd, léger, faible ou à grande puissance) [10].

I.3.2 Le Bloc de Commande et de Contrôle

Le bloc de commande et de contrôle "Contrôleur" est le cerveau du système de propulsion, son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse, courants, etc...) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie [11].

I.3.3 Le Bloc de Puissance

Une autre vision sur les systèmes électroniques a émergé, cela est dû à l'évolution des semi-conducteurs. En effet, les convertisseurs de puissance permettent maintenant d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissances qui assure la liaison entre la source d'énergie électrique et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin [12].

I.4. Définition d'une voiture électrique

Une voiture électrique est propulsée par un ou plusieurs moteurs électriques, alimentés par une source d'énergie électrique (batterie d'accumulateurs, ou par une pile à combustible, etc..).

Ces sources fournissent de l'énergie électrique provenant de la recharge par câble depuis une source électrique extérieure, ou bien de la récupération d'énergie lors de la décélération du véhicule ou comme frein moteur lors des descentes, dans ce cas le moteur électrique passe en mode générateur. Les éléments constituant la chaîne de traction sont conçus de la même manière que celui des véhicules à moteur thermiques à combustible. De nos jours les voitures électriques atteignent une autonomie allant de cent à cinq cents kilomètres et nécessitent des temps de recharge directement proportionnels à la dimension de la source d'énergie électrique et du chargeur embarqué [6].

I.5. Fonctionnement du moteur de véhicule électrique

Les composants présents dans les voitures électriques ne sont jamais les mêmes selon le constructeur du modèle et la technologie utilisée. Cependant certains sont indispensables pour pouvoir qualifier un véhicule automobile comme électrique [13].

Les moteurs électriques sont relativement simples et très fiables. La puissance utilisée dans un moteur d'une voiture électrique est fournie par un convertisseur de puissance. Ce composant est alimenté par une source d'énergie électrique, et transmet l'énergie électrique aux différentes parties du moteur (Figure I.3). Dans le cas d'un véhicule électrique, un onduleur est utilisé pour passer du courant continu au courant alternatif. Le système requiert des câbles électriques et la transmission d'énergie électrique, mais ne nécessite pas autant d'éléments qu'un moteur à combustion. Les systèmes d'alimentation et d'échappement ne sont pas utilisés.

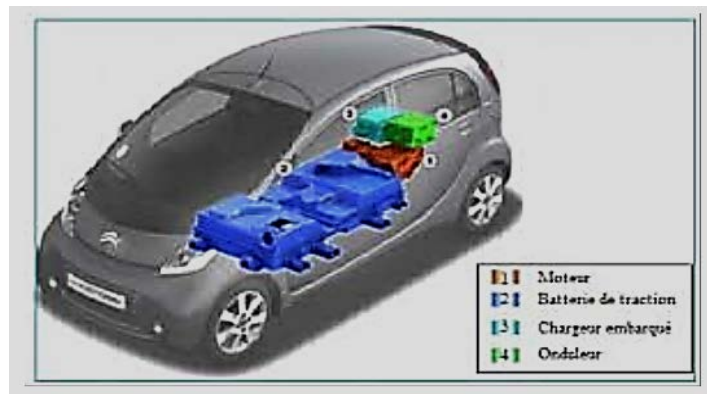


Figure I. 3 : Principaux éléments du véhicule électrique.

Un moteur électrique à courant alternatif assure la transmission de la puissance aux essieux et les roues. L'avantage d'utiliser un moteur à courant alternatif est qu'il permet le freinage par récupération, le refroidissement par eau, et de très grandes vitesses de révolutions par minute (plus de 10 000 tours). Les fonctionnalités supplémentaires telles que le mécanisme de direction, la pompe à eau et le système de climatisation sont aussi branchées à la source d'énergie électrique.

Le moteur utilise de l'énergie électrique du courant continu de la source d'énergie électrique et la convertit en énergie de rotation, qui à son tour propulse la voiture. Le moteur électrique peut être très petit étant donné la quantité de puissance qu'il délivre. Par rapport au système de source d'énergie électrique, les cellules de la source d'énergie électrique ont tendance à prendre beaucoup plus de place dans une voiture électrique que le moteur lui-même.

Par conséquent, il n'est pas surprenant de voir des voitures avec 25 à 50 batteries pour faire fonctionner le système. Par exemple, une voiture Tesla a des milliers de cellules. Le moteur électrique fournit un couple élevé à partir de la vitesse zéro dans la pratique et peut donc ne pas être aussi élevé que la puissance nominale du moteur à combustion, qui a le plus grand couple jusqu'à plusieurs milliers de tours par minute [14].

I.6. Avantages et inconvénients d'un véhicule électrique

I.6.1. Avantages

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permettront aux consommateurs de faire à terme la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques [15] :

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.
- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composé des pièces moins qu'une auto traditionnelle.
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30% à 40% (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont trois fois moins nombreuses.

- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principal mode d'habitat du futur.
- Le moteur électrique a un rendement énergétique trois fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).
- Le principal avantage est l'indépendance vis-à-vis du pétrole.

I.6.2. Inconvénients

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des malle-faits [15] :

- Question autonomie.
- Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.
- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- Ainsi la durée de recharge de la source d'énergie électrique est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.

I.7. Domaine d'utilisation

Les domaines d'utilisation que l'on peut envisager pour le véhicule électrique [16] :

I.7.1. Transport de marchandises

Les véhicules de petite livraison urbaine ; Le transport des marchandises à l'intérieur des usines ; La distribution des journaux ; La camionnette de transport Misee en location ; Le transport à l'intérieur des hôpitaux.

I.7.2. Véhicules de service

Les véhicules postaux effectuant le ramassage et la distribution du courrier. Le ramassage des ordures se fait déjà, en partie, avec des véhicules électriques.

I.7.3. Véhicules de transport en commun

Des recherches et des expérimentations ont été menées sur l'autobus et le minibus électriques. Un autre domaine d'utilisation possible pour cette catégorie de véhicules est constitué par le ramassage scolaire, le transport de touristes et le transport du personnel.

I.7.4. Transport individuel

Deux formes peuvent être envisagées :

- Le véhicule particulier qui, très probablement sera utilisé comme véhicule d'appoint par les ménages, le véhicule principal restant propulsé par un moteur à essence.
- Le véhicule banalisé ou taxi sans chauffeur mis à la disposition du public.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale le véhicule électrique, sa structure ainsi que le fonctionnement, on a terminé par citer ses avantages, inconvénient et le domaine d'utilisation.

Le chapitre prochain portera sur la machine électrique dédiée à la traction électrique.

Chapitre II
Machine électrique dédiées à la traction
électrique

Introduction

Dans ce chapitre nous avons cité les sources d'énergies électriques dédiées à un VE et aussi les différents éléments constituant sa chaîne de traction.

Pour finir, on a traité les différents types de machines existants en mettant en évidence leur avantages et inconvénients afin de justifier notre choix sur le type de machine pour l'élaboration de la chaîne de traction.

II.1. Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. L'arrangement des composants qui constituent cette chaîne de traction représenté dans la figure (II.1) tel que : sources d'énergie électrique, l'ensemble des convertisseurs statiques, le moteur électrique, de liaison mécanique (réducteur, différentiel et roues). Ces derniers assurent la fourniture d'une puissance mécanique capable de mouvoir le véhicule.

Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche [17].

Ces dernières années, la composition des différents éléments d'un véhicule électrique a changé et ces constituants font appel à de nouvelles technologies mais présentent toujours les mêmes principes de fonctionnement [18].

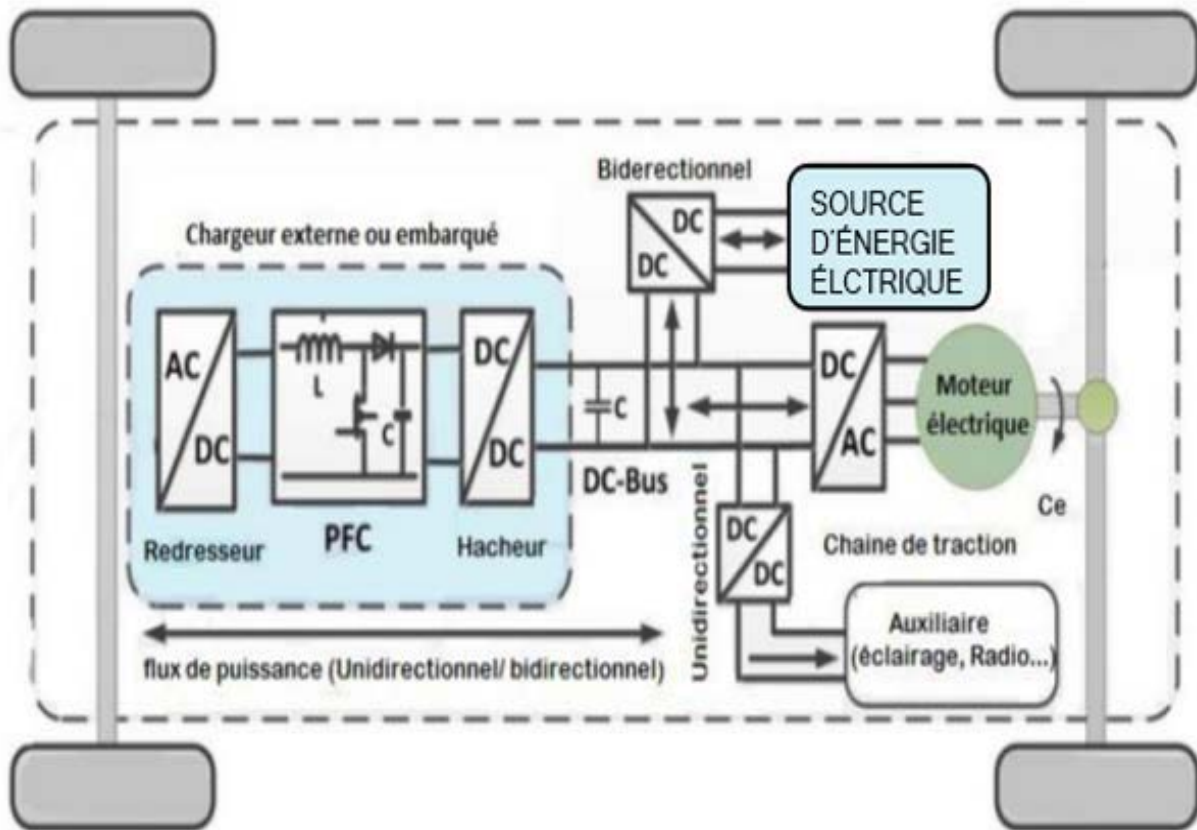


Figure II. 1 : Structure de la chaîne de traction dans un VE.

II.2. Les sources d'énergie électriques

II.2.1. Batterie

Une batterie est un système qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Il existe deux catégories de batteries : les piles (non rechargeables) et les accumulateurs (rechargeables) [14].



Figure II. 2 : Batterie d'un VE tout électrique.

II.2.2. Accumulateur

Un accumulateur électrochimique est un système capable de convertir de l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement. On appelle respectivement « charge et décharge » ces opérations [14].



Figure II. 3 : Un accumulateur.

II.2.3. Pile à combustible

Dispositif électrochimique qui combine l'hydrogène avec l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau [14].



Figure II. 4 : Pile à combustible.

II.2.4. Le super condensateur

Il Présente une énergie massique plus faible que celle de la batterie mais une densité de puissance plus importante, ainsi cette source d'énergie est plus réactive aux demandes de fortes puissance mais ne permet pas d'accumuler beaucoup d'énergie, son nombre de cycles de charge/décharge est très élevé comparé à celui d'une batterie. Il délivrera la puissance instantanée nécessaire aux fortes accélérations, quand les batteries seront lentes à répondre [9].



Figure II. 5 : Un super condensateur.

II.3. Convertisseur statique

Dans la plupart des VE, suivant l'utilisation de machines à courant alternatif, les convertisseurs d'énergie devront être différents à savoir :

II.3.1. Les redresseurs (AC/DC)

Dans un VE, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, soit par un alternateur placé à bord du véhicule électrique, en énergie électrique à courant continu, qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité [8].

II.3.2. Les hacheurs (DC/DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables, différents des valeurs d'entrée et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation de divers récepteurs (moteurs, batteries, etc.).

L'utilisation d'un hacheur permet en effet de maintenir le courant du moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique [8].

II.3.3. Les onduleurs (DC/AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le moteur de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage. Ce type de montage permet d'associer une

source de tension (de type batterie par exemple) et un récepteur de type source de courant (moteur asynchrone) [8].

II.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 [19].

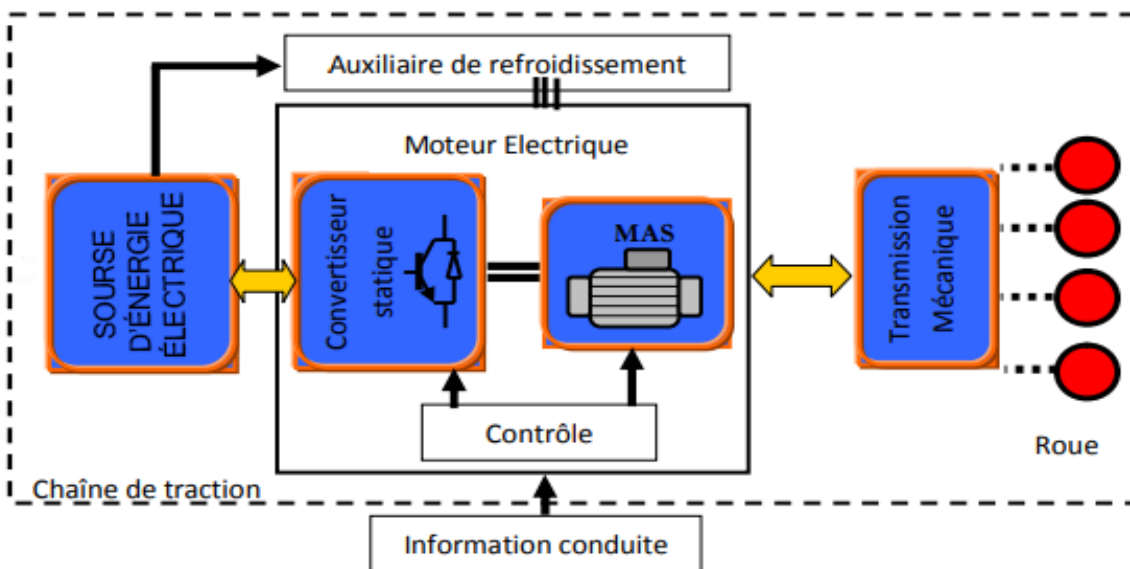


Figure II. 6 : Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique [8].

II.4.1 Moteur à courant continu (MCC)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu, le moteur à excitation séparée est très répandu car son intérêt réside dans le fait qu'il peut facilement être commandé en vitesse ou en couple et que son sens de rotation peut être inversé. De plus, ces moteurs peuvent être raccordés directement à la source d'énergie électrique (batteries, accumulateurs, piles ...). Cependant, cette technologie comporte des inconvénients comme par exemple, le bruit rayonné plus important que pour les autres moteurs électriques, la difficulté de refroidir l'induit, la présence de balais et de collecteurs qui limitent la vitesse de rotation et nécessitent un entretien périodique [2].

II.4.2. Moteur synchrones (MS)

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons la plus fréquente dans la littérature : Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, une solution adaptée pour ses performances techniques et en particulier, son rendement. L'excitation dans ce cas est créée par les aimants permanents. Les avantages dont disposent cette machine est 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 [19].

II.4.3. Moteur asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone est la solution envisagée par de nombreux constructeurs. On peut distinguer deux types : les moteurs à bagues et à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est plus simple, plus robuste et moins chère pour la chaîne de traction et ne nécessite pratiquement pas d'entretien. Particulièrement, le moteur asynchrone peut travailler pendant de longues périodes dans des conditions difficiles. En plus, il représente le choix préféré de beaucoup de fabricants et de développeurs. Le moteur asynchrone à cage est le candidat le plus adapté pour propulser les véhicules électriques (VE), grâce à l'implantation des techniques de commande nouvelles.

D'autre part, parce qu'il bénéficie de la plus grande expérience en matière de moteur électrique sans collecteur qu'il est souvent retenue pour la motorisation des automobiles électriques et commence à être utilisée dans les grandes puissances [19].

Dans notre étude, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

II.5. Définition de la machine asynchrone

La machine asynchrone connue également sous le nom de machine à induction, est une machine à courant alternatif dont le stator et le rotor sont mécaniquement indépendants l'un de l'autre.

Les machines possédantes un rotor en cage d'écureuil sont aussi connues sous le nom de machines à cage. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [20].

II.6. Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

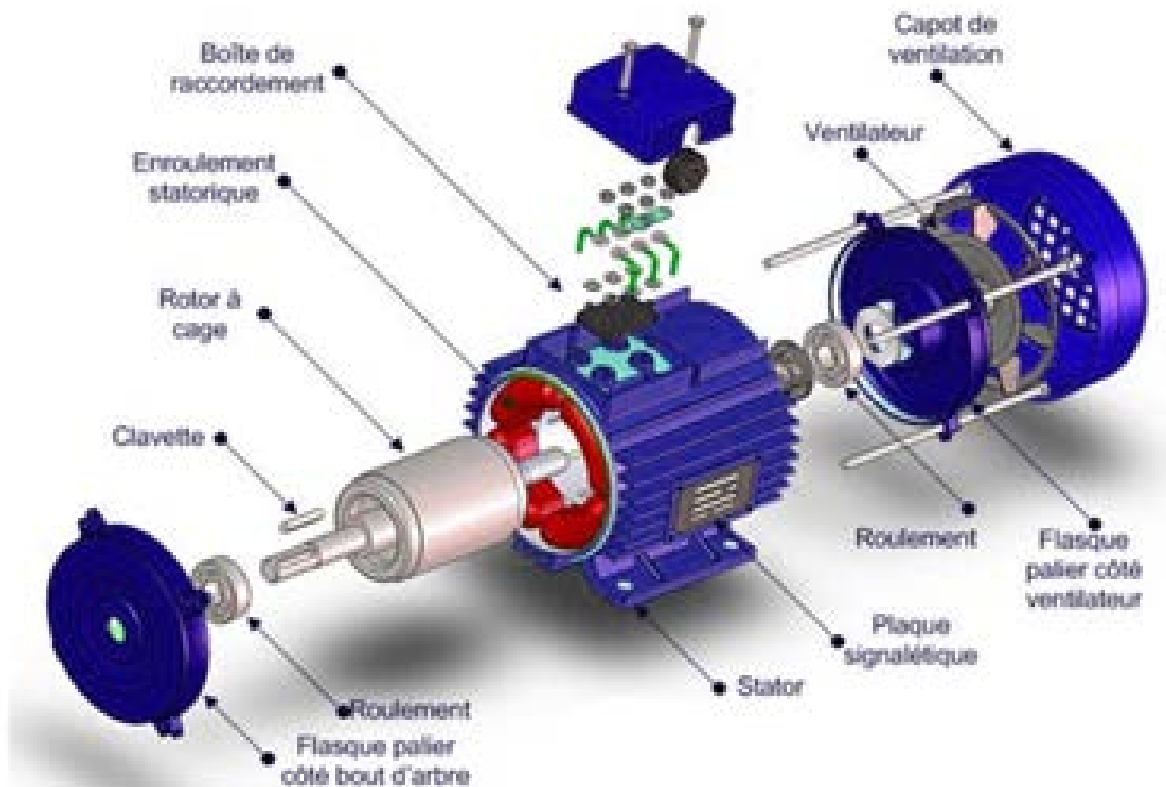


Figure II. 7 : Représente les différents éléments constituant la machine asynchrone.

Il est constitué de deux parties, une partie fixe stator une partie rotative rotor :

II.6.1 Stator (inducteur)

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilement de tôles identiques. Elles constituent un cylindre vide et pourvues de trous à leurs périphéries intérieures. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé figure (II.8)



Figure II. 8 : Le stator à cage d'écureuil.

Ces bobines sont parcourues par des courants de fréquence f , il se produit un champ magnétique tournant à la dite fréquence de rotation.

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{II.1})$$

N_s : En tr/mn.

P : nombre de paires de pôles.

f : en Hz.

Les enroulements du stator sont prévus pour être couplés, soit en étoile, soit en triangle. Le couplage des enroulements dépend de la tension nominale par phase prévue pour ce moteur et qui est imposé du réseau dont on dispose [21].

II.6.2. Rotor à cage d'écureuil (induit)

Les rotors à cage d'écureuil des moteurs asynchrones sont constitués par un cylindre de tôles empilées, percées à la périphérie pour former des encoches.

Ces encoches fermés ou semi-fermés sont destinées à recevoir le bobinage, qui est constitué par des barres en cuivres nu, ou par de l'aluminium coulé sous pression à une température voisine de 735°C . Les cages en métal sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées ou brasées, parallèle de chaque côté du cylindre de tôles magnétiques, forment une cage solide au point de vue mécanique et de faible résistance électrique [22]. (Voir les figures (II.9), (II.10)).



Figure II. 9 : Cage d'écureuil.



Figure II. 10 : Rotor à cage d'écureuil.

II.7. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

On dispose sur le stator trois bobines identiques réparties géométriquement à 120° l'une de l'autre. Ces trois bobines alimentées par trois tensions décalées de 120° électrique (période $=360^\circ$) issues donc d'un système triphasé, produisant un champ magnétique tournant (champ inducteur) le rotor se trouvant au centre de ce champ. Tant que le rotor a une fréquence de rotation différente que celle de champ inducteur, chaque point de rotor voit une variation de champ. Les conducteurs rotoriques produisent donc une F.E.M qui, dans le circuit fermé va donner naissance à des courants induits. Ces courants vont à leur tour produire un champ magnétique qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance [23].

II.8. Vitesse de synchronisme

Le moteur asynchrone triphasé démarre seul et il prend rapidement sa vitesse de régime en charge comme à vide. Sa vitesse de rotation (N_r) est proche de la vitesse de rotation de synchronisme (N_s) mais toujours inférieure, elle diminue peu entre la marche à vide et en charge [24].

II.9. Glissement

Le glissement qu'on note « g » est le rapport de la vitesse du glissement ($N_s - N_r$) du rotor par rapport au champ tournant du stator à la vitesse de synchronisme N_s . Il est exprimé en pourcentage [25]. On écrit donc :

$$g = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \cdot 100 \quad (\text{II.2})$$

[N_s]: La vitesse de synchronisme (tr/mn).

[N_r] : La vitesse du rotor (tr/mn).

II.10. Bilan des puissances

Le principe de MAS consiste à transmettre une puissance absorbée (électrique) vers une puissance utile (mécanique) passe par quelques étapes comme sur la figure ci-dessous :

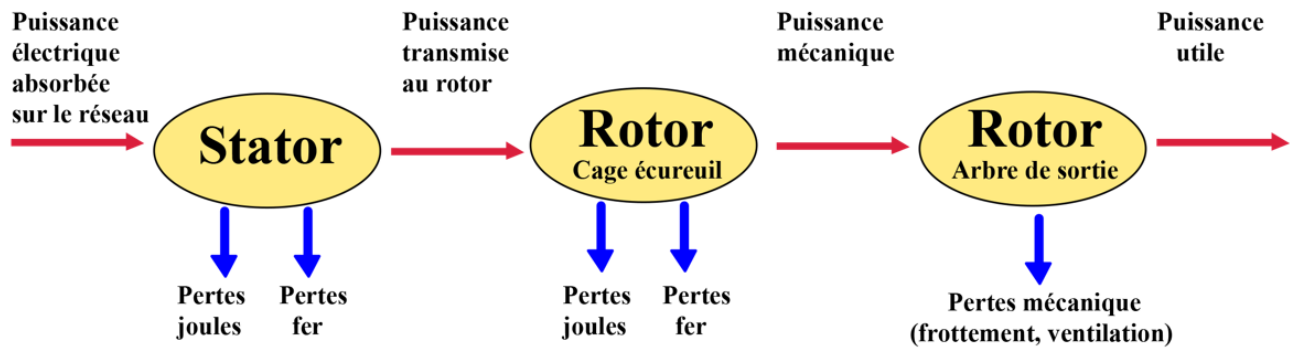


Figure II. 11 : Diagramme et bilan de puissance d’une machine asynchrone à cage.

II.11. Schéma équivalent

Le schéma équivalent le plus commode d’emploi est le schéma monophasé de la figure (II.12), Où le moteur asynchrone est assimilé à un transformateur statique dont le secondaire serait fermé sur une résistance R'_2/g inversement proportionnelle au glissement [26].

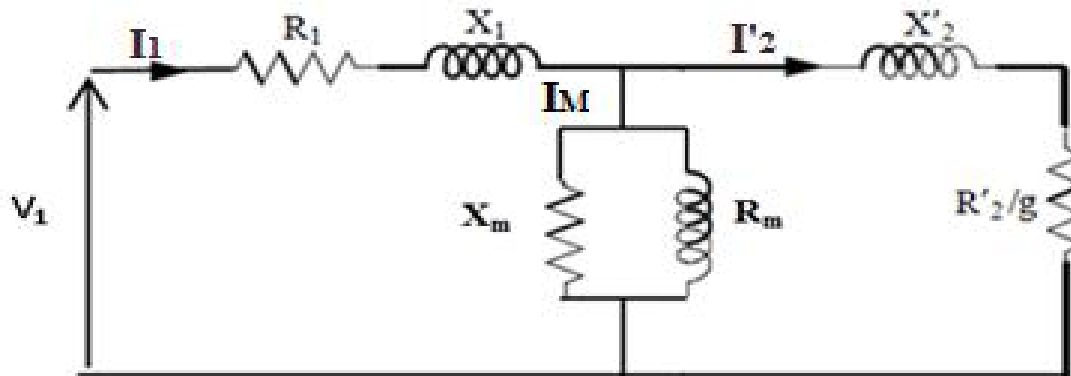


Figure II. 12 : Schéma équivalent d’un moteur asynchrone.

Avec :

X_m : Réactance magnétisante.

R_m : Résistance magnétisante.

R_1 : Résistance du stator.

X_1 : Réactance du stator.

R'_2 : Résistance du rotor ramené du stator.

X'_2 : Réactance du rotor ramené du stator.

g : Glissement.

II.12. Choix du couplage

Afin d'adapter électriquement un moteur (éviter de le griller) par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau il est impératif de coupler les enroulements du moteur. La tension du réseau doit correspondre à la tension que supporte un enroulement du moteur. La plus petite tension inscrite sur la plaque signalétique du moteur correspond à la tension que supporte un enroulement. En effet, dans le montage triangle, un enroulement est câblé entre deux fils de phases. Alors que dans un montage étoile, deux enroulements sont câblés entre deux fils de phases. Si la tension la plus élevée, du moteur, correspond à la tension du réseau, le couplage sera étoile. Si c'est l'autre tension, alors le couplage sera Triangle [27].

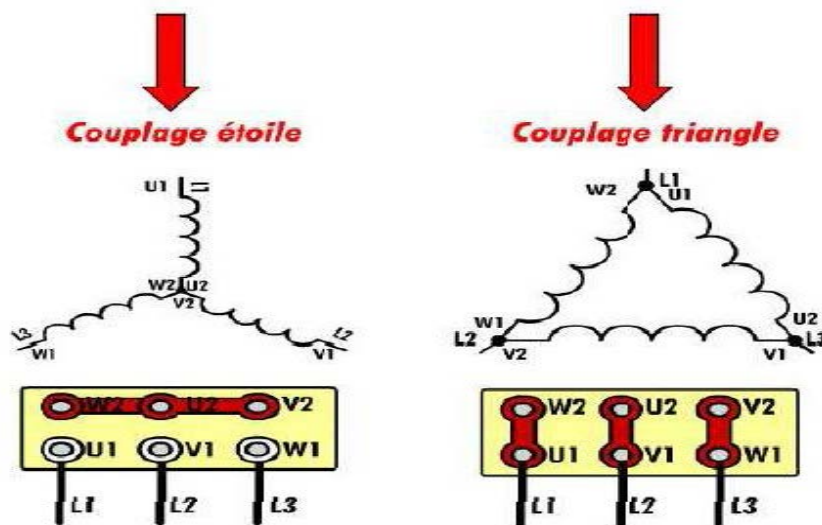


Figure II. 13 : Mode du couplage des enroulements statoriques.

II.13. Différents types de démarrage

Quel que soit le type du moteur utilisé, il est nécessaire au démarrage de limiter le courant d'appel et de conserver un couple de démarrage suffisamment important.

Les modes de démarrage de ce type de rotor sont des démarrages statoriques [22], Cité-ci-dessous :

- Démarrage direct par application de la tension nominale.
- Démarrage étoile triangle.

Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté les éléments de base de la chaîne de traction d'un véhicule électrique. Ensuite on établit un état d'art sur les machines électriques tournantes.

Notre choix au final est focalisé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil, ou on a exposé sa constitution, son principe de fonctionnement ainsi que le choix du couplage, les différents types de démarrage.

Le chapitre suivant concerne la modélisation de la chaîne de traction.

Chapitre III
Modélisation de la chaîne de traction

Introduction

La machine asynchrone, de par sa simplicité de fabrication et d'entretien, a la faveur des industriels depuis son invention par N. Tesla à la fin du 19^{ème} siècle quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. Le moteur asynchrone a un intérêt majeur par rapport aux autres types de moteur par ses qualités de robustesse, le faible coût de fabrication et d'entretien (économique) [28].

Pour l'étude de n'importe quelle système physique il est nécessaire de faire une modélisation. Celle-ci nous permet, de simuler le comportement de ce système. Pour cette raison dans le présent chapitre, on présente une modélisation explicite des sous-systèmes composant le véhicule électrique, à citer : le moteur de traction (machine asynchrone), le convertisseur statique (onduleur de tension à deux niveaux) et enfin la dynamique du véhicule.

III.1. Modélisation de la machine asynchrone [29]

La modélisation d'une machine asynchrone est une phase primordiale sur le chemin de la simulation et la réalisation. Le modèle adopté devrait interpréter le plus fidèlement possible l'ensemble des phénomènes que le concepteur cherche à mettre en évidence, pour ainsi prédire le comportement en régime dynamique et stationnaire du système physique.

III.1. 1. Hypothèses simplificatrices

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses, qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

- L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.
- Entrefer constant, l'effet des encoches négligeable.
- Le bobinage est réparti de manière à donner une force magnétomotrice sinusoïdale.
- La parfaite symétrie de la machine.
- L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont négligeables).
- On néglige l'effet de peau.
- La constance des résistances statoriques et rotoriques par rapport à la température.

III.1. 2. Mise en équation du modèle de la machine asynchrone

Dans le repéré abc Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés dans le schéma si dessous, où les trois bobines rotoriques sont court-circuitées et déphasées de 120°.

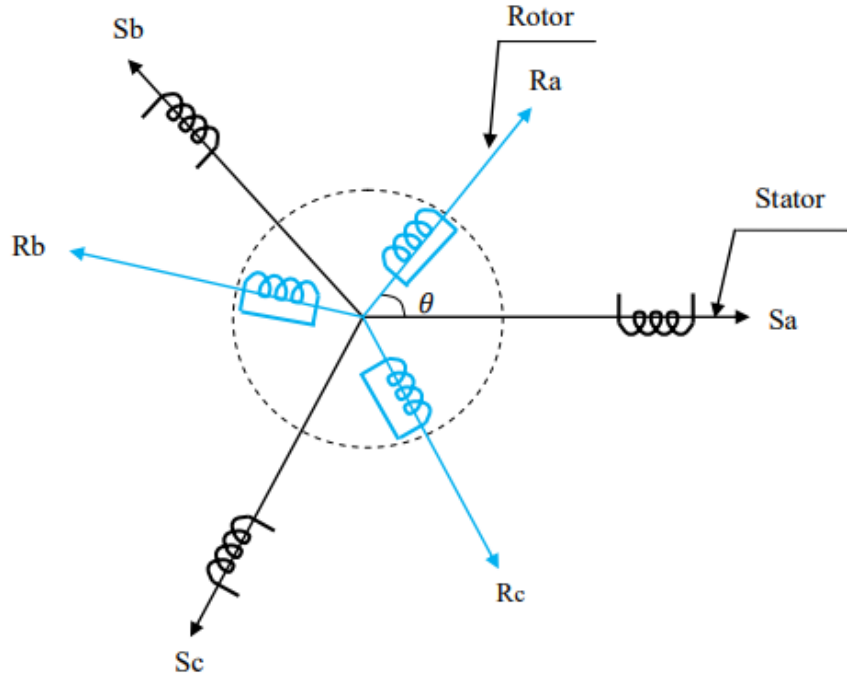


Figure III. 1 : Présentation des axes statoriques et rotoriques.

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

Sa, Sb, Sc : Axes statoriques.

Ra, Rb, Rc : Axes rotoriques.

III.1. 2. 1. Équations électriques dans le repère abc

On peut résumer les trois phases statoriques et rotoriques par l'écriture matricielle suivante [29]:

$$[v_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (III.1)$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] = 0 \quad (III.2)$$

Les grandeurs, $[v_{sabc}]$, $[i_{sabc}]$, $[\varphi_{sabc}]$ sont des vecteurs de dimension 3×1 définis comme suit :

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Celles du rotor sont ;

$$[v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}; [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Les résistances du stator et du rotor sont définies comme suit :

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

III.1. 2.2. Équations magnétiques dans le repère abc

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre) [30] :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \dots \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ \dots \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ \dots \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$[M_{ss}]$: Matrice d'inductance mutuelle entre deux phases du stator(H).

$[M_{rr}]$: Matrice d'inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H).

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductance mutuelle entre stator- rotor (H).

$[M_{rs}]$: Transposée de la matrice d'inductance mutuelle entre stator- rotor (H).

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

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & \vdots & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & \vdots & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & \vdots & m_3 & m_2 & m_3 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 & m_2 & m_3 & \vdots & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & \vdots & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & \vdots & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} m_1 = m_{sr} \cos \theta \\ m_2 = m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m_3 = m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

m_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H).

m_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H).

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique (H).

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique (H).

m_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre les phases statorique et rotorique (H).

III.1. 2.3. Équation mécanique dans le repère abc

L'équation mécanique de la machine est donnée par [29] :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \quad (III.9)$$

C_e : Le couple électromagnétique de la machine. [Nm]

C_r : Le couple résistant (statique) à l'arbre de la machine. [Nm]

Avec : J : Moment d'inertie. (Kg /m²)

f: Le coefficient de frottement. (SI)

III.1.3. Transformation de Park

La modélisation de la machine asynchrone passe par la transformation d'un système triphasé à un système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Pour cela on applique la matrice de passage de Park qui repose sur l'invariance des puissances entre les deux systèmes triphasé et biphasé, suivante [30] :

$$[P(\theta_i)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & \cos(\theta_i - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_i + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_i) & -\sin(\theta_i - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_i + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

$$[P(\theta_i)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_i - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_i - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_i - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_i - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

Le changement de variable relatif aux courants, aux tensions et aux flux est :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta_i)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ Et } \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta_i)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Il existe principalement deux transformations : Clarke et Concordia. La transformation de Park pour une égalité des amplitudes ($\theta_i = 0$) porte le nom de transformation de Clarke [C] et la transformation de Concordia [T] pour la conservation des puissances [29].

Les matrices de passage direct et indirect sont respectivement :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad [T]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

$$[C] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad [C]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

III.1.4. Choix du système d'axes

Il en existe trois importants. Nous pouvons fixer le repère du système d'axe biphasé au stator, au rotor ou au champ tournant [30].

- Système d'axes lié au stator :

Immobile par rapport au stator, d'où $\theta_s = 0$. (III.15)

-Système d'axes lié au rotor :

Immobile par rapport au rotor, d'où $\theta_r = 0$. (III.16)

-Système d'axes lié au champ tournant :

Le champ tournant est créé par le bobinage statorique et tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique, qui permet de donner une idée visuelle de la phase et du module d'amplitude du flux. Ce système d'axe est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques donc :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (\text{III.17})$$

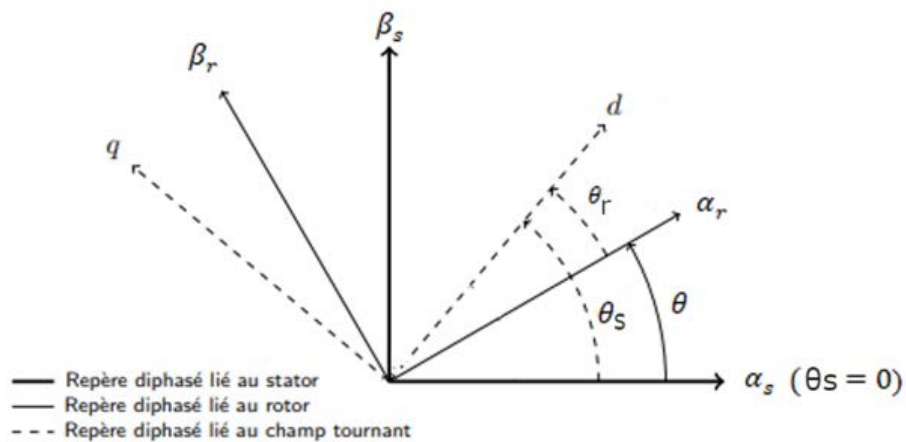


Figure III. 2 : Définition des angles entre les repères diphasés.

III.1.4.1 Référentiel lié au stator

Le référentiel le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées est le repère immobile par rapport au stator. Il possède des tensions et des courants réels et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif, dans l'axe (α, β) .

Le système d'équations dans le repère (abc) est à coefficients variables dans le temps. Ce qui rend sa résolution complexe et difficile, c'est pourquoi il faut simplifier et réduire les équations du moteur pour obtenir des coefficients constants. Physiquement, cela peut être compris comme la transformation des trois enroulements du moteur à induction en seulement deux enroulements, c'est-à-dire le passage du repère (abc) vers le repère immobile (α, β) afin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles [31].

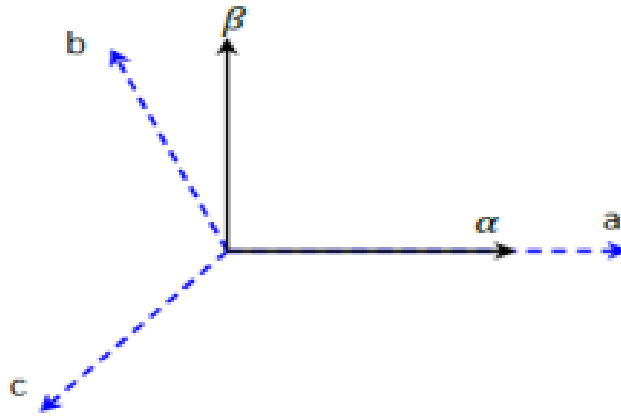


Figure III. 3 : Schéma de la transformation abc vers $\alpha\beta$.

III.1.5. Équations électriques de la machine asynchrone dans le repère $\alpha\beta$

Les équations de la machine asynchrone dans le référentiel $(\alpha \beta)$ sont [28], [32], [33] :

- Les équations différentielles de la tension statorique :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

- Les équations différentielles de la tension rotorique :

$$\begin{cases} v_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \varphi_{r\beta} \\ v_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

- Les liaisons de flux statorique et rotorique exprimées en termes de courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned}\varphi_{s\alpha} &= L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \varphi_{r\alpha} &= L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} &= L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}\end{aligned}\quad (III.20)$$

- L'équation du couple électromagnétique exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (III.21)$$

- Les courants rotoriques peuvent s'exprimer en fonction du flux statorique et du courant statorique par :

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \frac{(\varphi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha})}{M} \\ i_{r\beta} = \frac{(\varphi_{s\beta} - L_s i_{s\beta})}{M} \end{cases} \quad (III.22)$$

- En les remplaçant dans les tensions rotoriques (III.22) dans (III.19) :

$$\begin{cases} 0 = R_r \frac{(\varphi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha})}{M} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \varphi_{r\beta} \\ 0 = R_r \frac{(\varphi_{s\beta} - L_s i_{s\beta})}{M} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (III.23)$$

- Les flux rotoriques peuvent s'exprimer en fonction du flux statorique et du courant statorique par (III.22) dans (III.20) :

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \frac{L_r}{M} (\varphi_{s\alpha} - \sigma L_s i_{s\alpha}) \\ \varphi_{r\beta} = \frac{L_r}{M} (\varphi_{s\beta} - \sigma L_s i_{s\beta}) \end{cases} \quad (III.24)$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: Coefficient de dispersion.

- En les dérivant (III.24) par rapport au temps, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_r}{M} \left(\frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} - \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) \\ \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_r}{M} \left(\frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} - \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) \end{cases} \quad (III.25)$$

- En remplaçant les dérivées des flux rotoriques dans les équations des tensions rotoriques ((III.25) et (III.24)) dans (III.23) on obtient :

$$\begin{cases} 0 = \frac{R_r}{M} \varphi_{s\alpha} - \frac{R_r L_s}{M} i_{s\alpha} + \frac{L_r}{M} \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} - \frac{L_r \sigma L_s}{M} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r \frac{L_r}{M} \varphi_{s\beta} - \omega_r \frac{L_r}{M} \sigma L_s i_{s\beta} \\ 0 = \frac{R_r}{M} \varphi_{s\beta} - \frac{R_r L_s}{M} i_{s\beta} + \frac{L_r}{M} \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} - \frac{L_r \sigma L_s}{M} \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r \frac{L_r}{M} \varphi_{s\alpha} + \omega_r \frac{L_r}{M} \sigma L_s i_{s\alpha} \end{cases} \quad (III.26)$$

- On cherche à avoir les **dérivées des courants statoriques** par rapport au temps $\left(\frac{di_{s\alpha}}{dt}\right)$ et $\left(\frac{di_{s\beta}}{dt}\right)$ en fonction des **courants statoriques et des flux statoriques** à partir des équations des tensions rotoriques précédentes (III.26) :

$$\begin{cases} \frac{L_r \sigma L_s}{M} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{R_r}{M} \varphi_{s\alpha} - \frac{R_r L_s}{M} i_{s\alpha} + \frac{L_r}{M} \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} + \omega_r \frac{L_r}{M} \varphi_{s\beta} - \omega_r \frac{L_r}{M} \sigma L_s i_{s\beta} \\ \frac{L_r \sigma L_s}{M} \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{R_r}{M} \varphi_{s\beta} - \frac{R_r L_s}{M} i_{s\beta} + \frac{L_r}{M} \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} - \omega_r \frac{L_r}{M} \varphi_{s\alpha} + \omega_r \frac{L_r}{M} \sigma L_s i_{s\alpha} \end{cases} \quad (III.27)$$

D'où :

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{R_r}{L_r \sigma L_s} \varphi_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r \sigma} i_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} + \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{s\beta} - \omega_r i_{s\beta} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{R_r}{L_r \sigma L_s} \varphi_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r \sigma} i_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} - \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{s\alpha} + \omega_r i_{s\alpha} \end{cases} \quad (III.28)$$

- Les dérivés flux statoriques par rapport au temps peuvent s'exprimer en fonction des tensions statoriques du courant statorique (III.18), on obtient :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} = V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} \\ \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} = V_{s\beta} - R_s i_{s\beta} \end{cases} \quad (III.29)$$

- En les remplaçant les dérivés flux statorique précédentes (III.29) dans les équations des dérivés des courants statoriques (III.28) :

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{R_r}{L_r \sigma L_s} \varphi_{s\alpha} - \left(\frac{R_r}{L_r \sigma} + \frac{R_s}{\sigma L_s} \right) i_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\alpha} + \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{s\beta} - \omega_r i_{s\beta} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{R_r}{L_r \sigma L_s} \varphi_{s\beta} - \left(\frac{R_r}{L_r \sigma} + \frac{R_s}{\sigma L_s} \right) i_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{s\beta} - \omega_r \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{s\alpha} + \omega_r i_{s\alpha} \end{cases} \quad (III.30)$$

III.1.6. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) ou à thyristors GTO (GateTurn Off) pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine un système de tensions alternatives triphasées réglables en fréquence et en valeur efficace grâce à des lois appropriées de commande des semi-conducteurs [29].

Nous utilisons un onduleur à trois bras et deux niveaux de tension. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, les interrupteurs sont des semi-conducteurs (transistors IGBT) shunté en antiparallèle par des diodes. L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i ($i = a, b, c$).

En appelant T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a [34] :

Si $S_i = +1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert ;

Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (III.4)

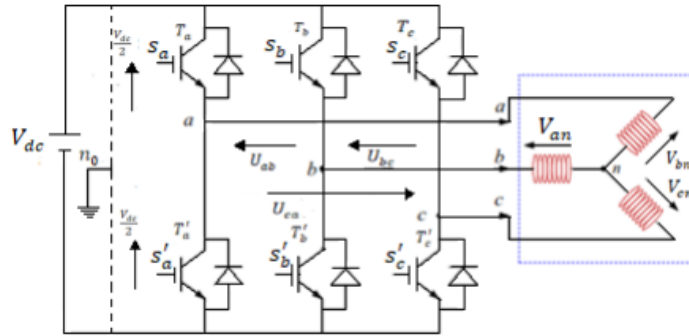


Figure III. 4 : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

L'onduleur alimenté par une tension parfaite donne à sa sortie une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.

- Soit « n », le point neutre du côté alternatif, alors les trois tensions composées U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (III.31)$$

- La charge constituée par la machine est équilibrée ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (III.32)$$

- Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an_0} = V_{an} + V_{nn_0} \\ V_{bn_0} = V_{bn} + V_{nn_0} \\ V_{cn_0} = V_{cn} + V_{nn_0} \end{cases} \quad (III.33)$$

- En introduisant le point de référence "n₀", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (III.34)$$

➤ On peut déduire le potentiel entre les points n et n_0 :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{III.35})$$

➤ L'état des interrupteurs supposés parfaits S_i ($i = a, b, c$), on a :

$$V_{in} = s_i \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = \left(s_i - \frac{1}{2}\right)V_{dc} \quad (\text{III.36})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = \left(s_a - \frac{1}{2}\right)V_{dc} \\ V_{bn_0} = \left(s_b - \frac{1}{2}\right)V_{dc} \\ V_{cn_0} = \left(s_c - \frac{1}{2}\right)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

➤ En remplaçant (III.35) dans (III.34), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an_0} \\ V_{bn_0} \\ V_{cn_0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

En remplaçant l'équation (III.37) dans (III.38), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

Les tensions simples du moteur asynchrone (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}) sont en fonction des trois grandeurs booléennes (S_a , S_b , S_c).

➤ La matrice de transfert est donnée par :

$$G = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

G : Matrice de l'onduleur.

Le vecteur tension V_s est directement calculé à partir des états des six interrupteurs de puissance de l'onduleur et de la tension continue V_{dc} . Les combinaisons des trois grandeurs (S_a , S_b , S_c) permettent de générer, par rapport au système d'axes (α , β), huit positions du vecteur tension V_s dont deux correspondent au vecteur nul : (S_a , S_b , S_c) = (111) ou (S'_a , S'_b , S'_c) = (000), Les tensions phase point neutre fictive de la charge peuvent s'écrire, en triphasé, sous la forme du système d'équations (III.43), [28].

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cn} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (III.41)$$

➤ Le modèle de L'onduleur peut s'exprimer sous forme complexe :

$$V_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \frac{2}{3}V_{dc}\left(S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}\right) \quad (III.42)$$

➤ L'ensemble des vecteurs tensions délivrées par un onduleur à deux niveaux ainsi que les séquences de niveaux de phase correspondantes sont représentés dans la figure (III.5).

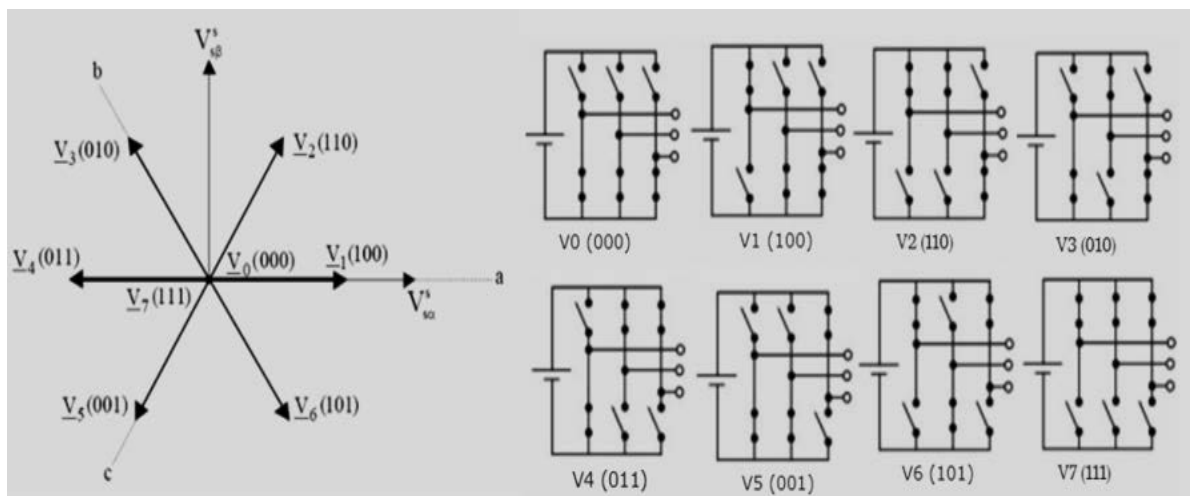


Figure III. 5 : État des interrupteurs et vecteur tensions correspondantes [35].

Les huit vecteurs de tensions sont représentés dans le plan (α, β) par la figure (III.5) où V_0 et V_7 sont identiquement nuls, coïncident avec l'origine. Les six autres ont la même amplitude égale à $\frac{2}{3} V_{dc}$. Les extrémités de ces six vecteurs définissent les sommets d'un hexagone régulier puisque deux vecteurs successifs font entre eux un angle de $\frac{\pi}{3}$ appelée secteur ou zone.

III.1.7. Modélisation du véhicule électrique

Pour modéliser le véhicule électrique, on doit déterminer le bilan des efforts appliqués au véhicule. Les équations sont basées directement sur les théories de la mécanique et de l'aérodynamique. Nous allons modéliser les différentes forces que subit le véhicule électrique lorsqu'il se déplace le long d'une pente [4].

III.1.7.1. Les différentes forces agissant sur le véhicule électrique

Les différentes forces agissant sur le véhicule électrique avec une masse total m , en mouvement au long d'une pente sont représentées sur la figure (III.6).

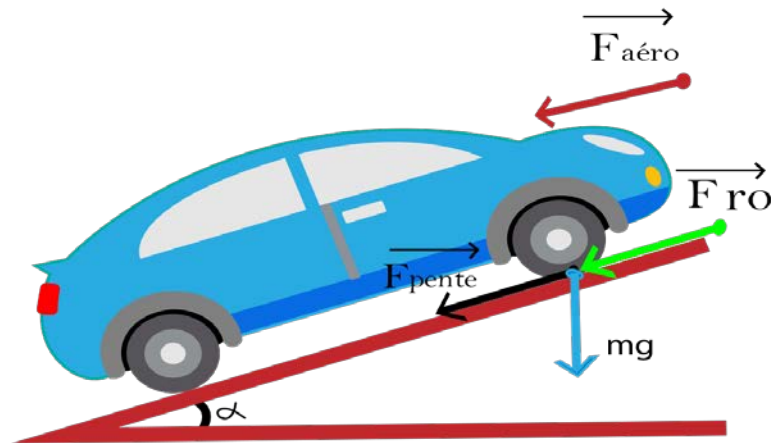


Figure III. 6 : Représentation des forces agissant sur le véhicule.

On peut résumer ces forces en trois forces principales [4] :

➤ **Force de résistance au roulement**

Due principalement à de la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Le coefficient μ dépend de la pression du pneu et la vitesse de déplacement du véhicule. Cette force est donnée par la relation :

$$F_{ro} = \mu mg \cos(\alpha) \quad (\text{III.43})$$

Où : μ est le coefficient de résistance de roulement du pneu ; m (kg) est la masse du véhicule ; g (m/s^2) représente la gravité.

➤ **Force résistante à la pénétration dans l'air**

Lors du déplacement du véhicule dans l'air, une force aérodynamique contraire au sens du déplacement est engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carcasse du véhicule. Son expression est donnée par

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} C_d A_f (v + v_0)^2 \quad (\text{III.44})$$

Avec :

ρ_{air} (kg/m^3) : est la densité de l'air ;

C_d : Est le coefficient de traînée aérodynamique ;

A_f (m^2) : représente la surface frontale du véhicule ;

v (m/s) : est la vitesse du véhicule ;

v_0 (m/s): est la vitesse du vent de face.

➤ **Force résistante due à la pente à gravir**

- Cette force est proportionnelle à la masse m du véhicule pour gravir une pente avec un angle α .

$$F_{\text{pente}} = m g \sin(\alpha) \quad (\text{III.45})$$

- On obtient la Force résistive totale par l'expression :

$$F_{rt} = F_{ro} + F_{aéro} + F_{pente} \quad (\text{III.46})$$

- Le moteur électrique doit assurer la force de traction du véhicule électrique F , on aura l'équation du mouvement comme suit :

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_{rt} \quad (\text{III.47})$$

- L'expression du travail est définie comme suit :

$$\vec{W} = \sum_i^3 \vec{F}_i \cdot \vec{dx} \quad (\text{III.48})$$

- Une fois l'expression (III.48) dérivée par rapport au temps on obtient la puissance mécanique du véhicule électrique suivante :

$$P_v = \frac{dw}{dt} = \vec{F}_{rt} \left(\frac{dx}{dt} \right) \Leftrightarrow P = \vec{F}_{rt} \cdot \vec{v} \quad (\text{III.49})$$

- L'expression du couple mécanique est donnée par :

$$T = \frac{r_w}{i} F_{rt} \quad (\text{III.50})$$

r_w : est le rayon effectif de la roue.

i : représente le gain réducteur qui relie le moteur à l'axe.

Conclusion

Dans ce chapitre, On a modélisé la machine asynchrone triphasée. Le chapitre ayant commencé par la mise en place des repères de référence, en passant du système réel triphasé au système biphasé équivalent, suivi d'un rappel sur les transformations de coordonnées (CLARKE et Concordia). Un modèle biphasé de la machine asynchrone dans un référentiel fixe (α, β) lié au stator est présenté. Enfin, on a procédé à la modélisation du convertisseur statique qui est l'onduleur de tension à deux niveaux ainsi que le bilan des efforts appliqués au véhicule électrique. Cette étude nous a permis d'élaborer le modèle dynamique du moteur asynchrone. Ce modèle est mis en œuvre pour analyser les comportements dynamiques de la machine et pour mettre en place la stratégie de commande.

Dans le chapitre suivant, on s'intéresse à l'étude et l'application de la commande directe du couple « CDC » utilisée pour le contrôle de la machine asynchrone.

Chapitre IV
Application de la commande directe du
couple au véhicule électrique

Introduction

La commande des machines électriques a fait l'objet de plusieurs recherches, afin de mieux les exploiter. La complexité dont le modèle des moteurs à courant alternatif nécessite d'assurer un contrôle découplé des grandeurs électriques assurant le fonctionnement du moteur. De différents travaux de commandes ont été développés afin de pouvoir commander la machine asynchrone.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse spécialement à la commande directe du couple (Direct Torque Control "DTC", en anglais), est l'une des méthodes qui a été introduite par TAKAHASHI et DEPENBROK au milieu des années 80, pour pallier les inconvénients inhérents de la commande vectorielle (le problème de capteur de vitesse et de la sensibilité aux variations paramétriques).

Dans ce chapitre, il sera présenté en premier lieu, le principe du contrôle direct du couple pour une machine asynchrone. Dans l'objectif de déterminer les règles du comportement des grandeurs à contrôler et la structure du contrôle. En deuxième lieu, on va procéder à la simulation de notre système de commande en utilisant le module Simulink du logiciel Matlab. Les résultats de simulation viendront illustrés clairement les performances de la technique étudiée.

IV.1. Principe du contrôle direct du couple

La commande DTC d'une machine asynchrone est basée sur la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs de l'onduleur de tension, qui permet de sélectionner le vecteur spatial de la tension statorique. Les deux variables contrôlées sont : Le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des comparateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir les grandeurs de flux statorique et le couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. La sortie de ces contrôleurs détermine le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation [36].

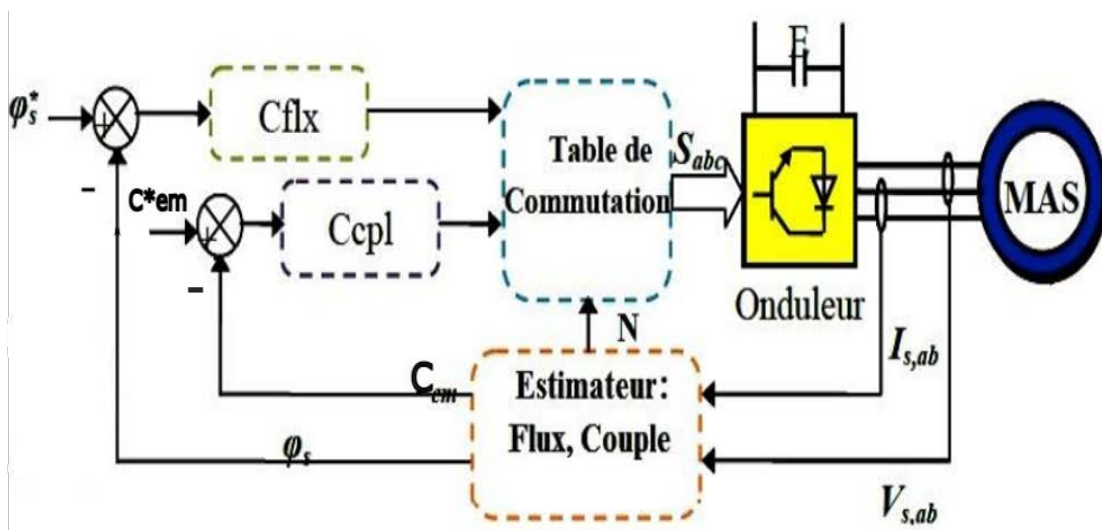


Figure IV. 1 : Schéma structurel du contrôle direct du couple [37].

IV.2. Estimateurs

IV.2.1. Estimation du flux statorique

- L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courants et tension de la machine. Comme suit [38] :

$$\frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} = V_s - R_s i_s \quad (IV.1)$$

- Le vecteur flux statorique est calculé à partir de ses deux composantes diphasées d'axe (α , β) du vecteur φ_s :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (IV.2)$$

- On écrit le module du flux statorique comme suit :

$$\varphi_s = \sqrt{(\varphi_{s\alpha})^2 + (\varphi_{s\beta})^2} \quad (IV.3)$$

- Les composantes $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$ permettent de déterminer l'angle indiquant le secteur i dans lequel se trouve le vecteur φ_s .

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (IV.4)$$

Ces équations représentent les étapes de calculs nécessaires à l'estimation de l'amplitude et la position du vecteur flux statorique.

- L'expression du flux statorique dans le référentiel lié au stator (α , β) de la machine est obtenue à partir de l'équation (IV.1) est [39] :

$$\varphi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s \cdot i_s) dt \quad (IV.5)$$

Entre deux commutations de l'onduleur, le vecteur tension est fixe et constant. Donc, le vecteur tension sélectionnée est toujours le même avec la résistance R_s considérée constante au cours du temps. L'évolution du vecteur flux à partir de l'instant initial est, comme suit :

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt \quad (IV.6)$$

- Sur un intervalle périodique de contrôle $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e , la commande des interrupteurs de l'onduleur est fixe. En négligeant le terme correspondant à la chute de tension ohmique dans le stator (ce qui est vérifié pour le fonctionnement en grandes vitesses), on aura : $V_s \gg R_s i_s$. L'équation du flux devient :

$$\varphi_s(t) = \varphi_{s0} + V_s T_e \implies \Delta\varphi_s = V_s T_e . \quad (IV.7)$$

Où : φ_{s0} : Le vecteur flux à $t=0$.

La relation (IV.7) montre que si on applique un vecteur de tension non nul, l'extrémité du vecteur flux statorique se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de tension appliqué. La figure (IV.2) illustre ce principe, en prenant comme exemple le vecteur de tension : $V_s = V_3$

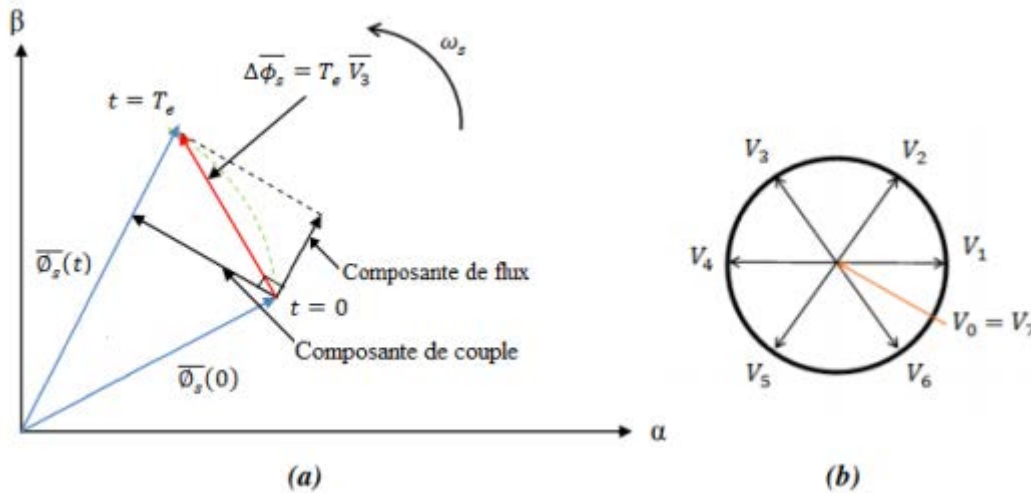


Figure IV. 2 : (a) Évolution de l'extrémité du flux statorique dans le plan α, β ; (b) Les huit vecteurs tensions générés par l'onduleur.

De la figure (IV.2), nous constatons que la composante radiale du vecteur tension "composante de flux" agit sur l'amplitude du vecteur flux et la composante tangentielle "composante de couple" agit sur la position du vecteur flux. En appliquant successivement et de manière appropriée les différentes vectrices tensions, l'extrémité du vecteur flux peut suivre correctement la trajectoire désirée pour fonctionner avec un module de flux pratiquement constant. Pour cela, il suffit de choisir une trajectoire presque circulaire pour l'extrémité du vecteur flux [39].

IV.2.2. Estimation du couple électromagnétique

A partir des flux statoriques $\varphi_{s\alpha}$ et $\varphi_{s\beta}$, et les courants statoriques $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, estimées. On peut mettre l'expression du moment du couple estimée sous la forme [36] :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(i_{s\beta}\varphi_{s\alpha} - i_{s\alpha}\varphi_{s\beta}) \quad (IV.8)$$

IV.3. Choix du vecteur de tension

Pour fixer l'amplitude du vecteur flux statorique, le choix du vecteur V_s dépend de [40] :

- La position de φ_s dans le référentiel fixe (α, β) ;
- La variation souhaitée pour le module de φ_s ;
- La variation souhaitée pour le couple et du sens de rotation de φ_s ;

L'extrémité du vecteur flux doit dessiner une trajectoire circulaire. L'espace d'évolution de φ_s dans le stator est décomposé en six zones symétriques i , avec $i = [1, 2, 3, 4, 5, 6]$ telle que représentée sur la figure (IV.3).

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

- Si V_{i+1} est sélectionné alors φ_s croît et C_e croît,
- Si V_{i-1} est sélectionné alors φ_s croît et C_e décroît,
- Si V_{i+2} est sélectionné alors φ_s décroît et C_e croît,
- Si V_{i-2} est sélectionné alors φ_s décroît et C_e décroît,
- Si V_0 ou V_7 sont sélectionnés, alors la rotation du flux φ_s est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux φ_s reste inchangée.

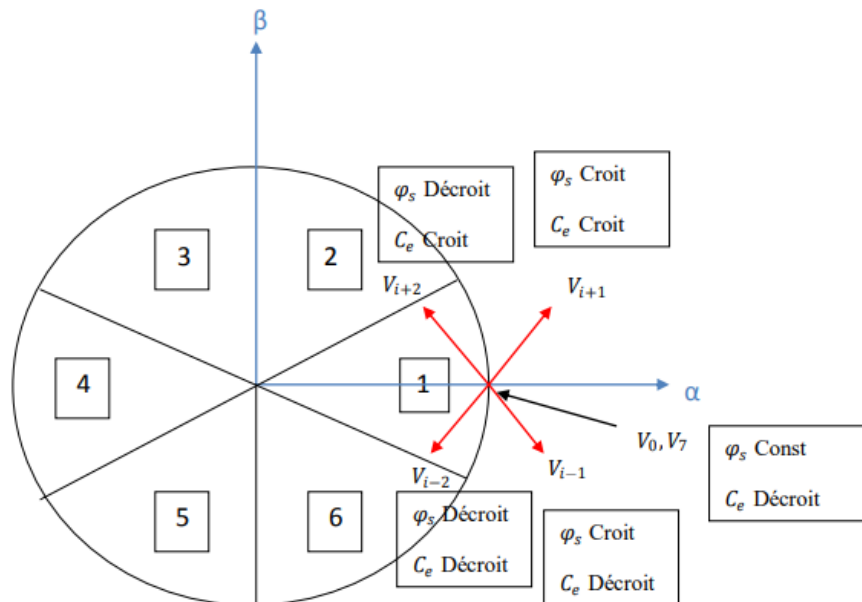


Figure IV. 3 : Choix du vecteur tension [29].

En début de zone, les vecteurs V_{i+1} et V_{i-2} sont perpendiculaires à φ_s d'où une évolution rapide du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux φ_s , alors en fin de zone, l'évolution est inverse. Cependant, les vecteurs V_{i-1} et V_{i+2} , il correspond une évolution lente du couple et rapide de l' amplitude φ_s en début de zone, alors qu'en fin de zone c'est le cas contraire.

Les vecteurs V_i et V_{i+3} ne sont pas utilisés quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux car la composante du flux est très forte avec un couple nul en milieu de zone. Le vecteur de tension à la sortie de l'onduleur est déduit des écarts de couple et de flux, estimés par apport à leurs références, ainsi que la position du vecteur φ_s .

Un estimateur de flux en module et en position ainsi qu'un estimateur de couple sont donc nécessaires, pour une commande CDC [40].

IV.4. Comparateurs à hystérésis

La Commande Directe du Couple a pour objectif de maintenir le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine asynchrone à une valeur désirée en appliquant le vecteur tension approprié. Ce dernier est issu des sorties des deux comparateurs à hystérésis (flux et couple) [41].

IV.4.1. Comparateur du flux statorique

Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur φ_s dans une couronne circulaire comme le montre la « figure IV.4 » [29].

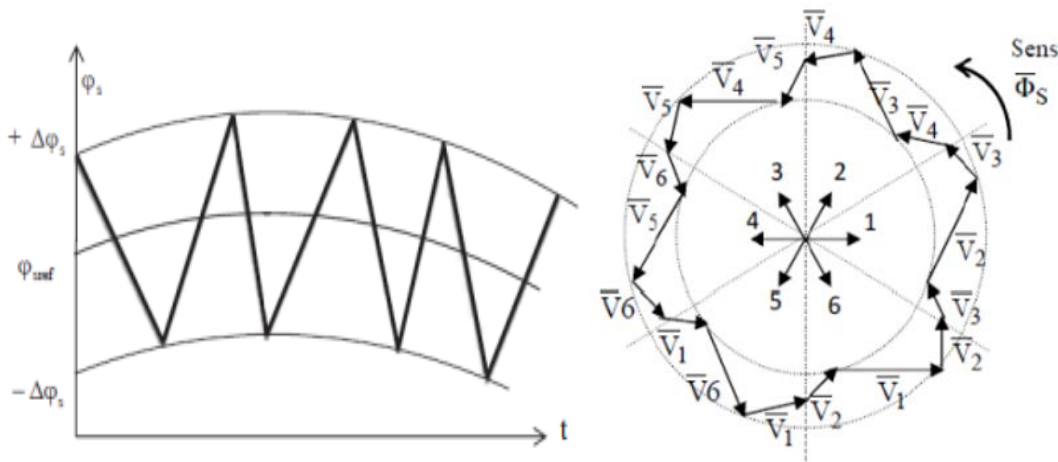


Figure IV. 4 : Évolution du flux statorique dans la bande à hystérésis.

- La sortie du comparateur doit indiquer le sens d'évolution de φ_s , afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela, un simple comparateur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques.

$$|\varphi_{sref} - \varphi_s| < |\Delta\varphi_s| \quad (IV.9)$$

C-à-d :

$$\begin{cases} cfx = 1 \text{ pour } \varepsilon_\varphi > |\Delta\varphi_s| \\ cfx = 0 \text{ pour } \varepsilon_\varphi < |\Delta\varphi_s| \end{cases} \quad (IV.10)$$

Avec :

$$\varepsilon_\varphi = |\varphi_{sref} - \varphi_s| \quad (IV.11)$$

$\Delta\varphi_s$: La bande d'hystérésis du comparateur.

La sortie du comparateur, représentée par une variable booléenne [cfx] « figure (IV.5) » indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée [cfx=1] ou diminuée [cfx=0] de façon à maintenir l'écart entre le flux et sa référence dans la bande à hystérésis :

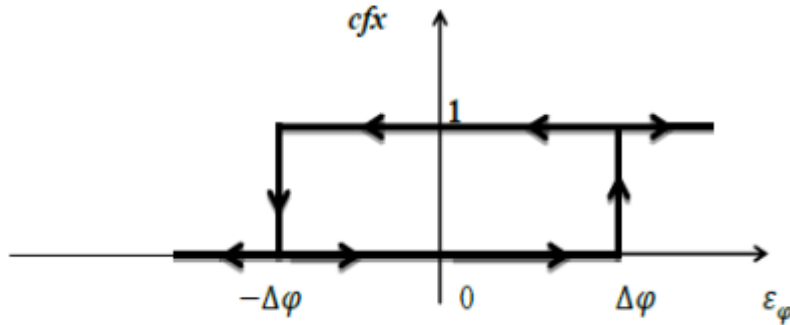


Figure IV. 5 : Comparateur à hystérésis à deux niveaux.

IV.4.2. Comparateur du couple électromagnétique

Le comparateur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites indiquées dans l'équation (IV.12) [29].

$$|C_{\text{eref}} - C_e| \leq \Delta C \tag{IV.12}$$

Avec : C_{eref} : Le couple de référence.

ΔC : La bande d'hystérésis du comparateur.

Cependant la différence avec le contrôle de flux est que le couple peut être positif ou négatif selon le sens de rotation de la machine. Et pour remédier à ce problème on utilise un comparateur à hystérésis à trois niveaux. La sortie du comparateur, représenté par trois variable booléenne [ccpl] (-1, 0, 1), « figure (IV.6) » indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée ([ccpl]=1] pour une consigne positive et [ccpl = -1] pour une consigne négative) ou diminuée [ccpl = 0].

C-à-d :

$$\begin{cases} ccpl = 1 \text{ pour } \varepsilon_c > |\Delta C| \\ ccpl = 0 \text{ pour } \varepsilon_c = |\Delta C| \\ ccpl = -1 \text{ pour } \varepsilon_c < |\Delta C| \end{cases} \tag{IV.13}$$

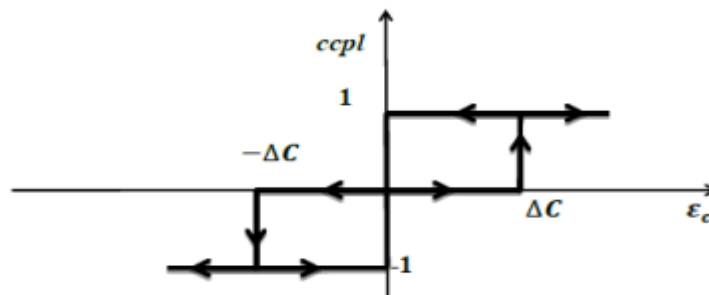


Figure IV. 6 : Comparateur à hystérésis à trois niveaux.

IV.5. Élaboration de la table de commutation

On élabore la table de vérité en se basant sur les erreurs du flux et du couple \mathcal{E}_φ et \mathcal{E}_{cem} , et selon la position du vecteur de flux statorique ($i=1\dots6$). Le partage du plan complexe en six secteurs angulaires selon la figure (IV.7 et IV.3) permet de déterminer, pour chaque secteur donné, la séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur qui correspond aux différents états des grandeurs de contrôle $\Delta\varphi_s$ et ΔC_{em} suivant la logique du comportement de flux et de couple vis-à-vis de l'application d'un vecteur de tension statorique [42].

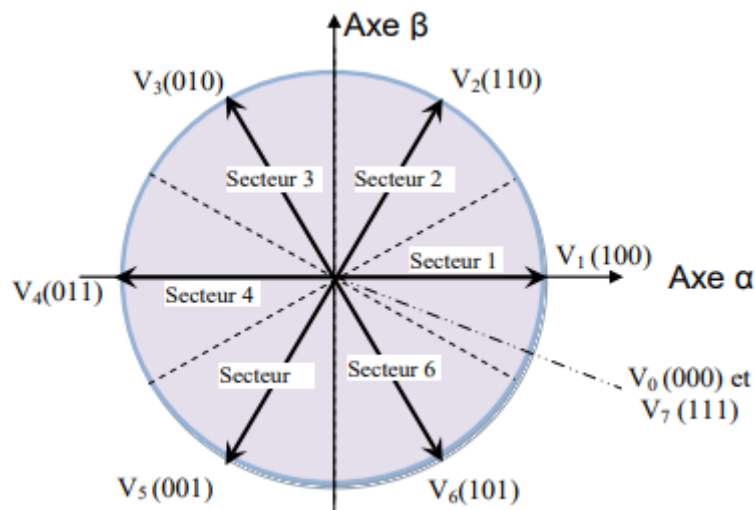


Figure IV. 7 : Vecteurs actifs des tensions statoriques et secteurs [43].

Le tableau (IV.1) résume l'action combinée de chaque configuration sur le flux statorique et le couple électromagnétique.

Tableau IV.1 : Table de commutation.

	Augmentation	Diminution
φ_s	V_{i-1}, V_i, V_{i+1}	V_{i+2}, V_{i-2}
C_{em}	V_{i+1}, V_{i+2}	V_{i-1}, V_{i-2}

Les tableaux ci-dessous résument, de façon générale, les séquences de tension actives à appliquer pour augmenter ou diminuer le module du flux statorique et le couple électromagnétique en fonction du secteur [42].

Les vecteurs (V_1, V_2, V_6) contribuent à augmenter le module du flux, et les vecteurs (V_2, V_3) contribuent à augmenter le couple. Donc seul le vecteur V_2 est applicable pour répondre aux exigences demandées. Ce même raisonnement s'applique à tous les cas de figure (IV.3) ce qui donne naissance aux tables de commande du flux et du couple [38].

Tableau IV.2 : Table de commande de flux.

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
$\varphi_s \uparrow$	V_6, V_1, V_2	V_1, V_2, V_3	V_2, V_3, V_4	V_3, V_4, V_5	V_4, V_5, V_6	V_5, V_6, V_1
$\varphi_s \downarrow$	V_3, V_4, V_5	V_4, V_5, V_6	V_5, V_6, V_1	V_6, V_1, V_2	V_1, V_2, V_3	V_2, V_3, V_4

Tableau IV.3 : Table de commande du couple.

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6
$C_{em} \uparrow$	V_2, V_3	V_3, V_4	V_4, V_5	V_5, V_6	V_6, V_1	V_1, V_2
$C_{em} \downarrow$	V_5, V_6	V_6, V_1	V_1, V_2	V_2, V_3	V_3, V_4	V_4, V_5

Finalement, la comparaison des tables de commande du module du flux statorique et du couple électromagnétique permet la synthèse finale d’une seule table de commande :

Tableau IV.4 : Stratégie de contrôle avec comparateur à hystérésis à trois niveaux avec les vecteurs de tensions nuls

Flux	Couple	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	Correcteur
$C_{flx} = 1$	$C_{cpl} = 1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	2
	$C_{cpl} = 0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	Niveaux
	$C_{cpl} = -1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	3 Niveaux
$C_{flx} = 0$	$C_{cpl} = 1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	2
	$C_{cpl} = 0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	Niveaux
	$C_{cpl} = -1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	3 Niveaux

En sélectionnant l’un des vecteurs nuls, la rotation du flux statorique est arrêtée et entraîne aussi une décroissance du couple, nous choisissons V_0 ou V_7 de manière à minimiser le nombre de commutation d’un même interrupteur de l’onduleur [42].

IV.6. Avantages et inconvénients de la commande directe du couple

IV.6.1. Avantages de la CDC [44]

- Absence du bloc (MLI).
- Il n’est pas nécessaire de connaître avec précision l’angle de position rotorique, car seule l’information de secteur dans lequel se trouve le vecteur de flux statorique est nécessaire.

- La réponse dynamique du couple est rapide.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

IV.6.2. Inconvénients de la CDC [44]

- Existence de problèmes à basse vitesse (influence du terme résistif).
- Nécessité de disposer des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation n'est pas constante.

IV.7. Structure générale de la commande CDC

La structure générale d'une commande CDC appliquée à la MAS liée au repère fixe (α, β) associé à un véhicule électrique est représentée sur la figure (IV.8).

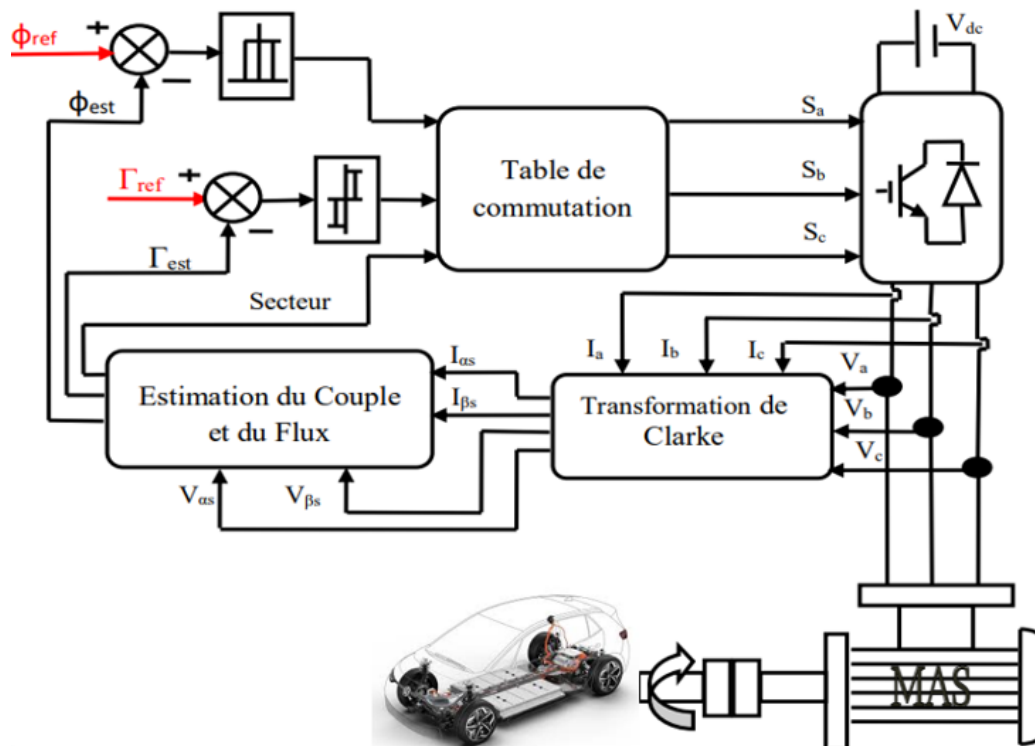


Figure IV. 8 : Structure générale d'une commande CDC associée à un véhicule électrique.

IV.8. Simulation de l'application de la commande directe du couple au véhicule électrique

Dans cette partie, On procède à la simulation de la CDC appliqué à une chaîne de traction sous Matlab/ Simulink, afin de valider les performances de cette commande.

On va visualiser les différentes allures. On insère un couple résistant de 5 N.m à l'instant $t= 1s$, avec un couple électromagnétique de référence égale à 15 N.m et le flux de référence est maintenu constant et égal à sa valeur nominale de 1 Wb.

IV.8.1. Résultat de Simulation de la commande directe du couple

Ces résultats sont issus de la simulation de la commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone de 3KW sans présence d'une boucle de régulation de la vitesse.

Les différentes équations ont permis d'établir la modélisation de chaque élément de la chaîne de traction du véhicule électrique.

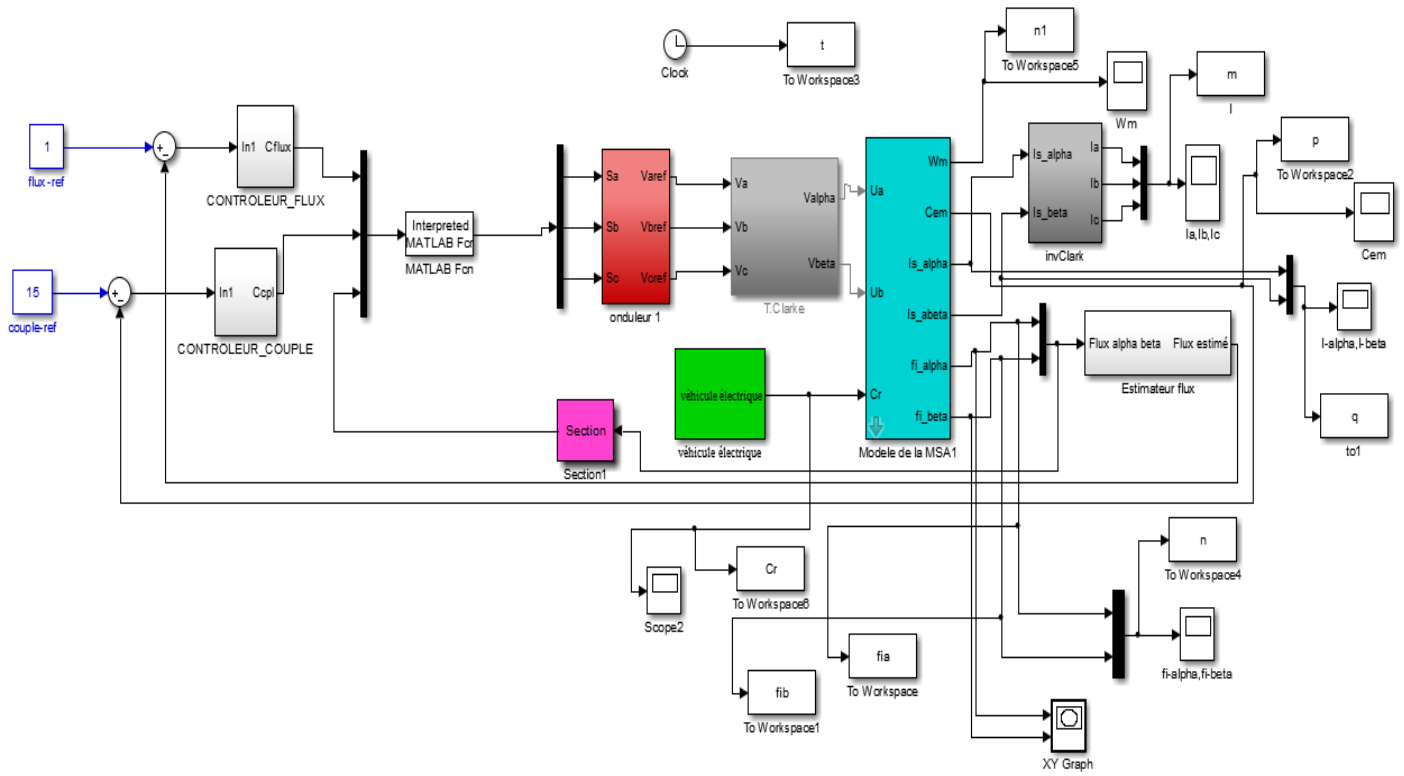


Figure IV. 9 : Schéma bloc de la CDC associé au véhicule électrique.

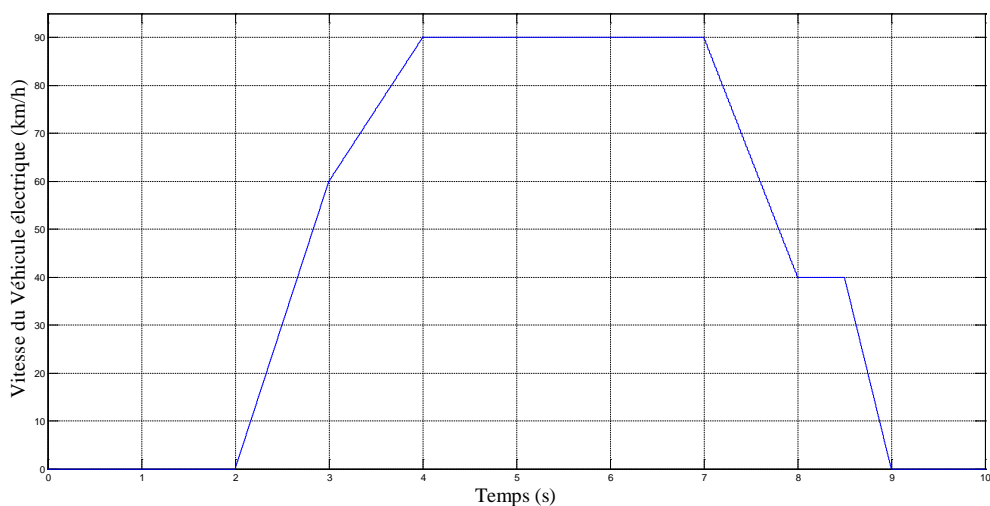


Figure IV. 10 : Profil de la vitesse du véhicule électrique.

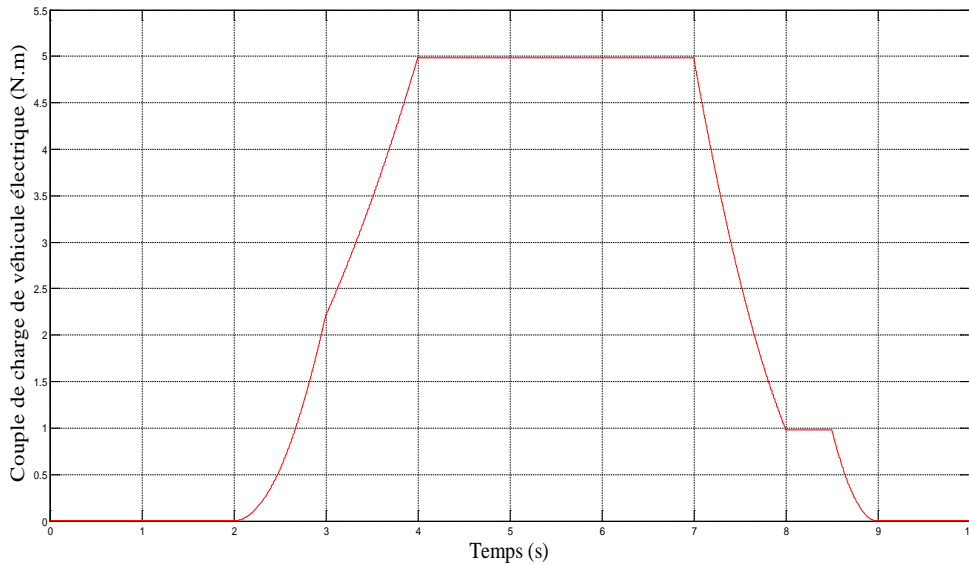


Figure IV. 11 : Profil du couple de charge du véhicule électrique.

Un profil de vitesse est appliqué au système global du véhicule électrique sur une durée de 10s, qui montre le déroulement des cycles d'accélération, décélération et arrêt du VE.

A l'instant $t=2s$ la vitesse augmente pour atteindre la valeur 90km/h. La vitesse est constante sur une durée de [4s :7s], puis elle diminue de l'instant $t=7s$ jusqu'à l'annulation.

On remarque que le couple de charge du VE suit le profil de vitesse imposée où la tension de bus continu est fixée à 400V.

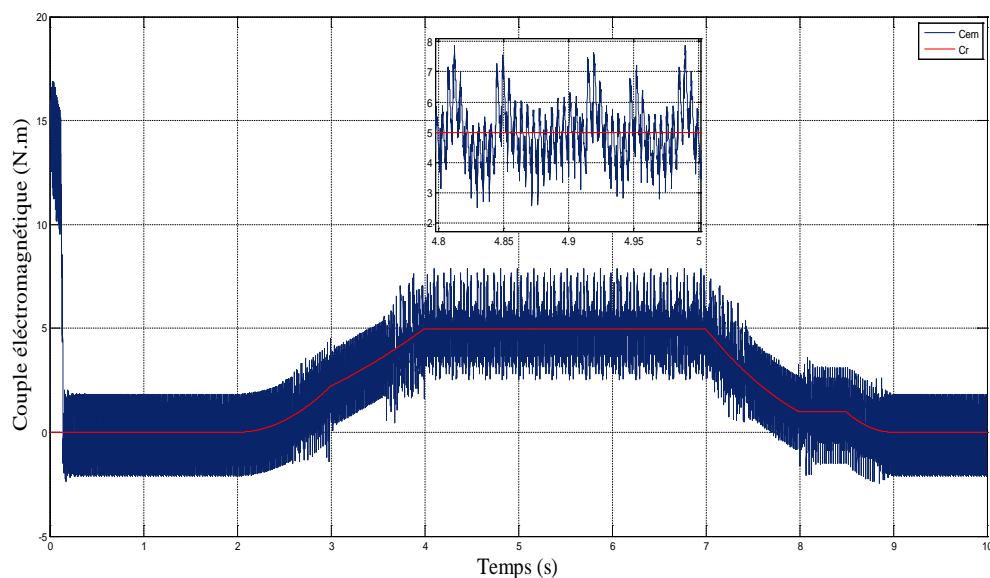


Figure IV. 12 : Allure du couple électromagnétique et du couple charge.

A partir de la figure (IV.12), on voit que le couple électromagnétique (C_{em}) suit parfaitement le couple charge (C_r) développé par le véhicule électrique.

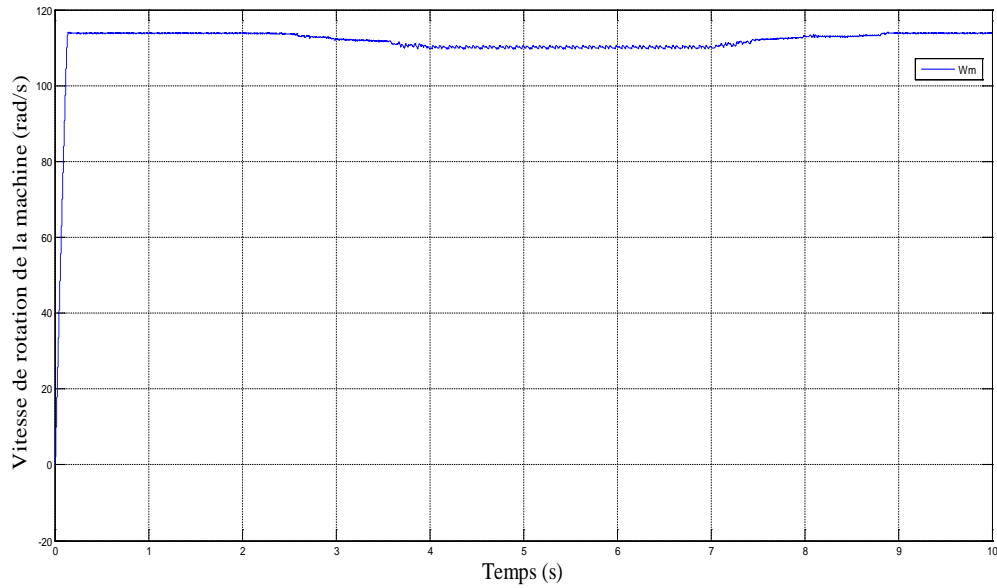


Figure IV. 13 : Allure de la vitesse de rotation de la machine électrique.

La vitesse de rotation de la machine diminue avec l'augmentation de couple de charge avec une boucle ouverte (sans régulation).

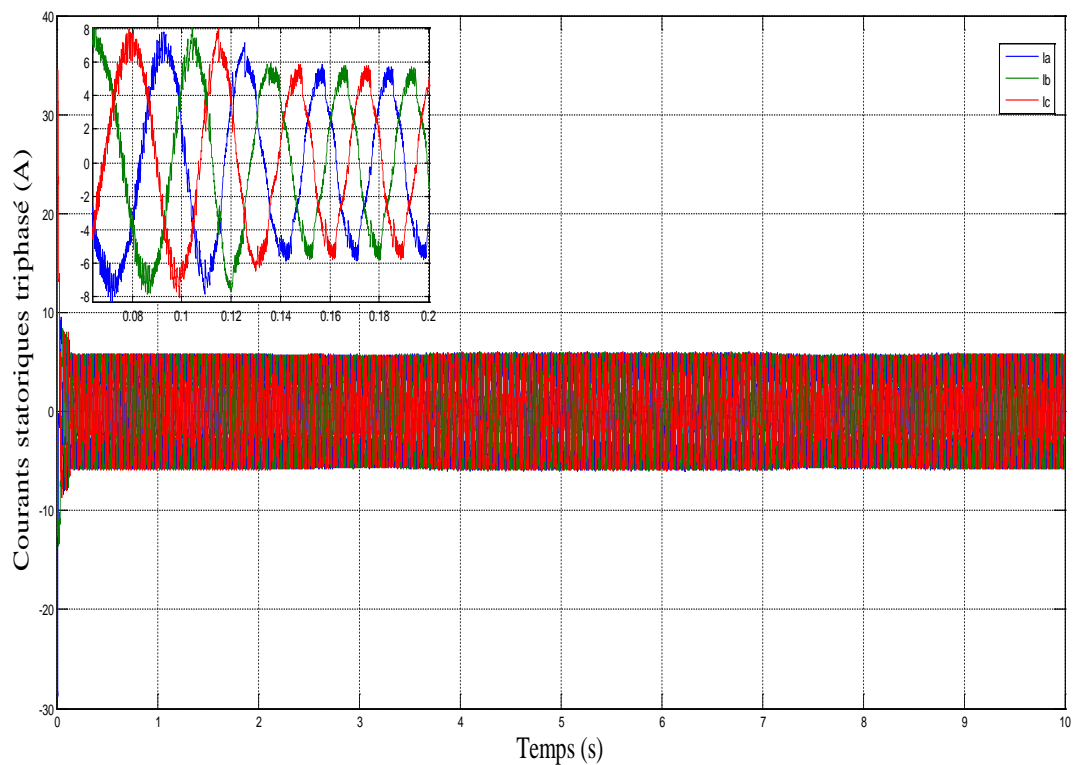


Figure IV. 14 : Allure du courant statoriques dans le repère triphasé.

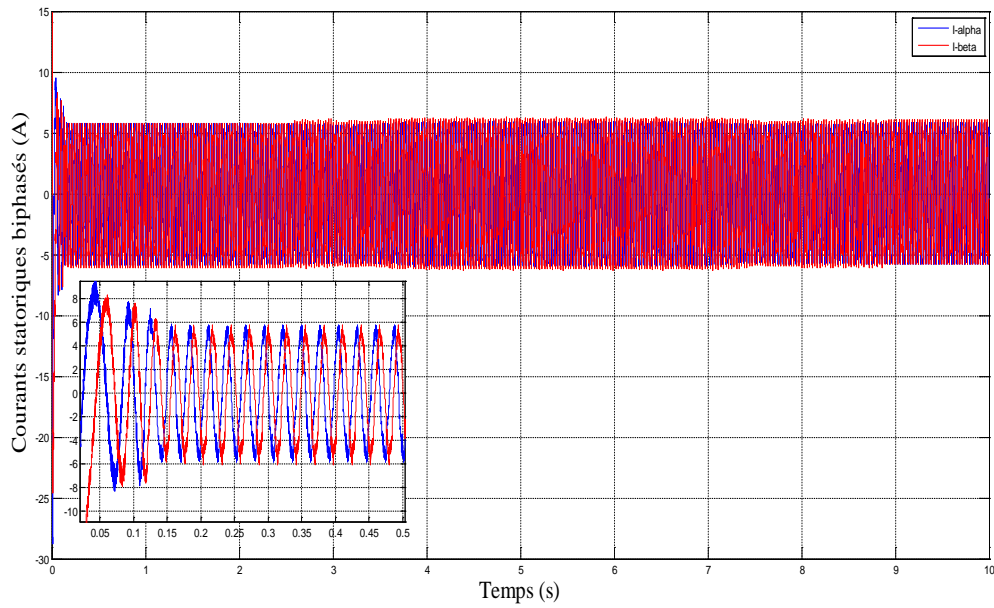


Figure IV. 15 : Allure du courant statoriques dans le repère biphasé.

Les allures du courant statorique triphasé ont une forme sinusoïdale déphasé de $2\pi/3$ entre eux avec des petites déformations sur les crêtes, elles suivent le profil de vitesse, c-à-dire que le courant est proportionnel au couple électromagnétique. Pour les courant biphasés sont en quadrature.

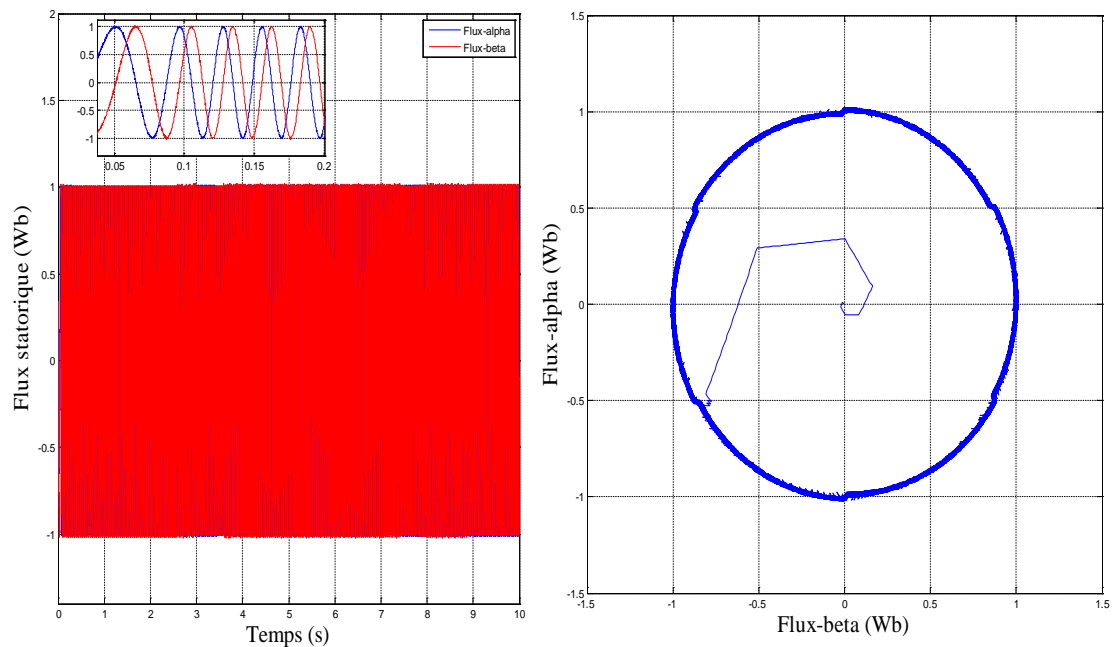


Figure IV. 16 : Allure de flux statoriques et sa trajectoire circulaire.

L'évolution du flux statorique dans le repère biphasé (α, β) est maintenue constante à sa valeur nominale de 1Wb qui suit une trajectoire presque circulaire.

IV.9. Robustesse de la commande CDC vis-à-vis de la variation du sens de rotation et à l'application d'une charge

Afin de tester la robustesse du contrôle directe du couple par-rapport aux variations brusques, on introduit un changement de consigne du couple de charge de [-5 : 5] et on applique un couple de référence [-10 : 10] à l'instant t= 3s.

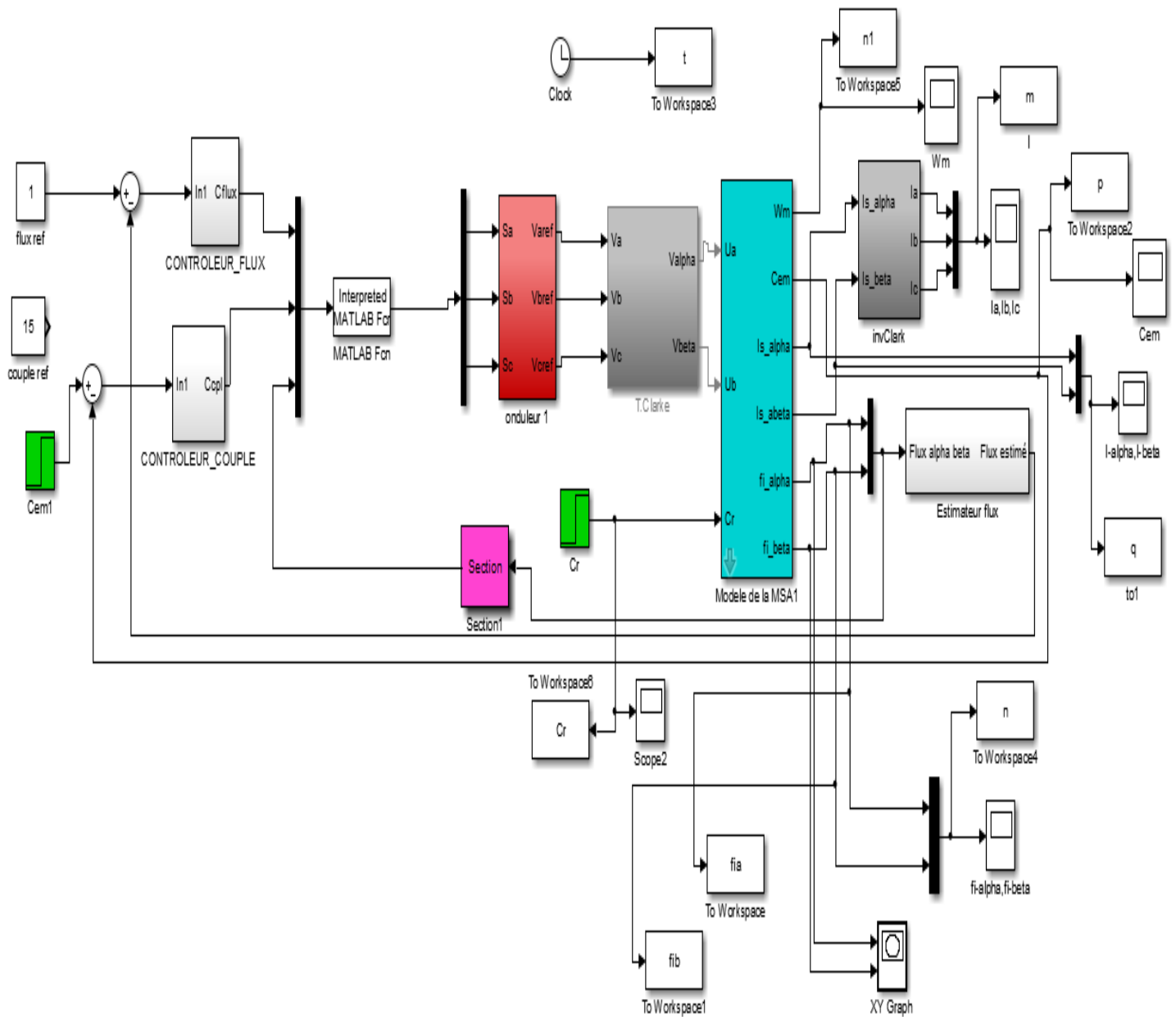


Figure IV. 17 : Schéma bloc du test de robustesse du la CDC.

À l'inversion du couple, on remarque sur la « figure (IV.18, 19) » que la poursuite en vitesse s'effectue normalement et de même pour le couple avec un régime transitoire lent pour la vitesse. D'après la « figure (IV.20, 21, 22) », on peut noter que les allures du courant et du flux statoriques présentent une déformation au moment de l'inversion de la vitesse (les phases s'inversent).

Enfin, on constate que la trajectoire du flux statorique est presque circulaire. Le flux atteint sa référence sans dépasser la consigne de 1Wb.

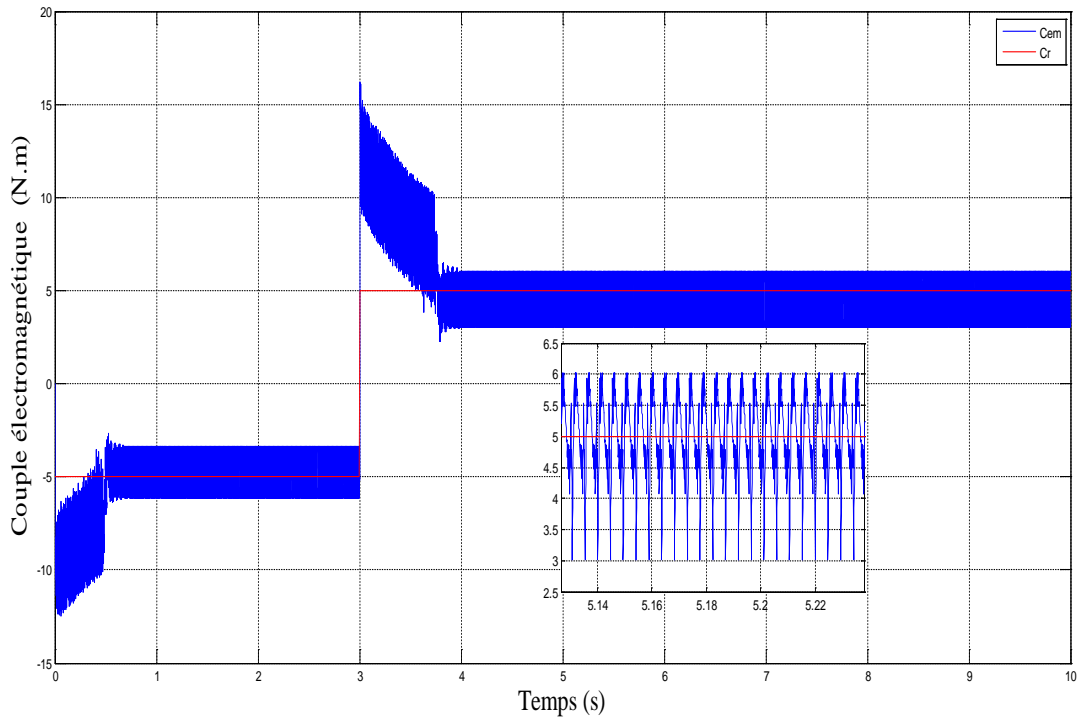


Figure IV. 18 : Allure du couple électromagnétique et du couple de charge.

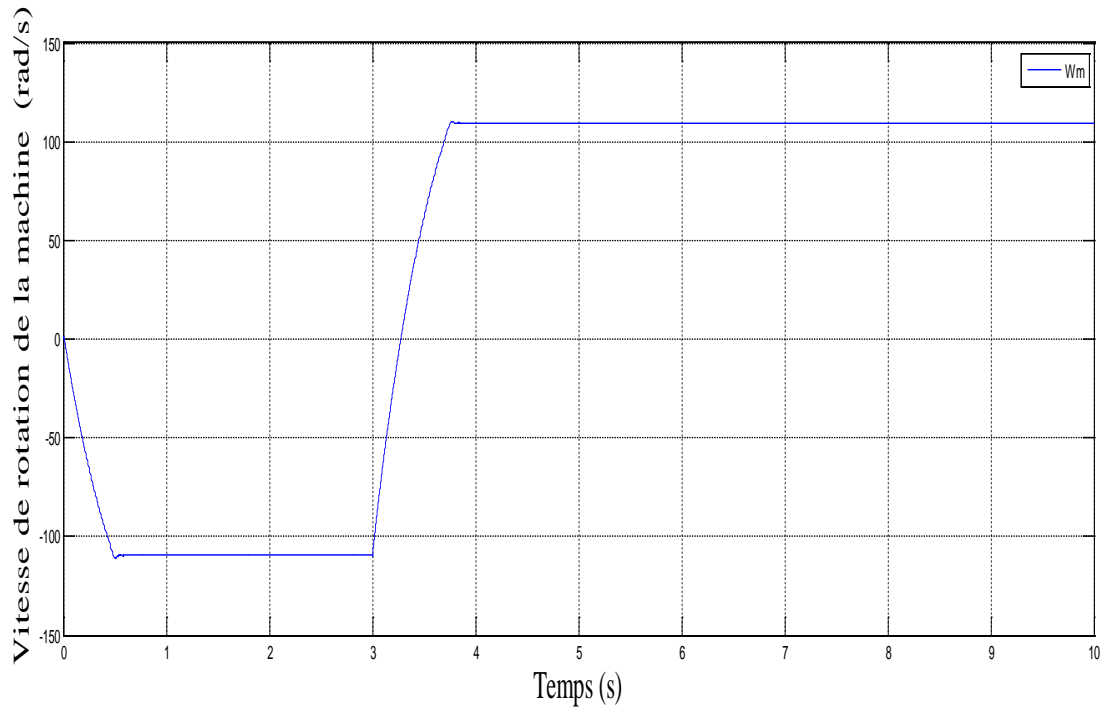


Figure IV. 19 : Allure de la vitesse de rotation de la machine électrique.

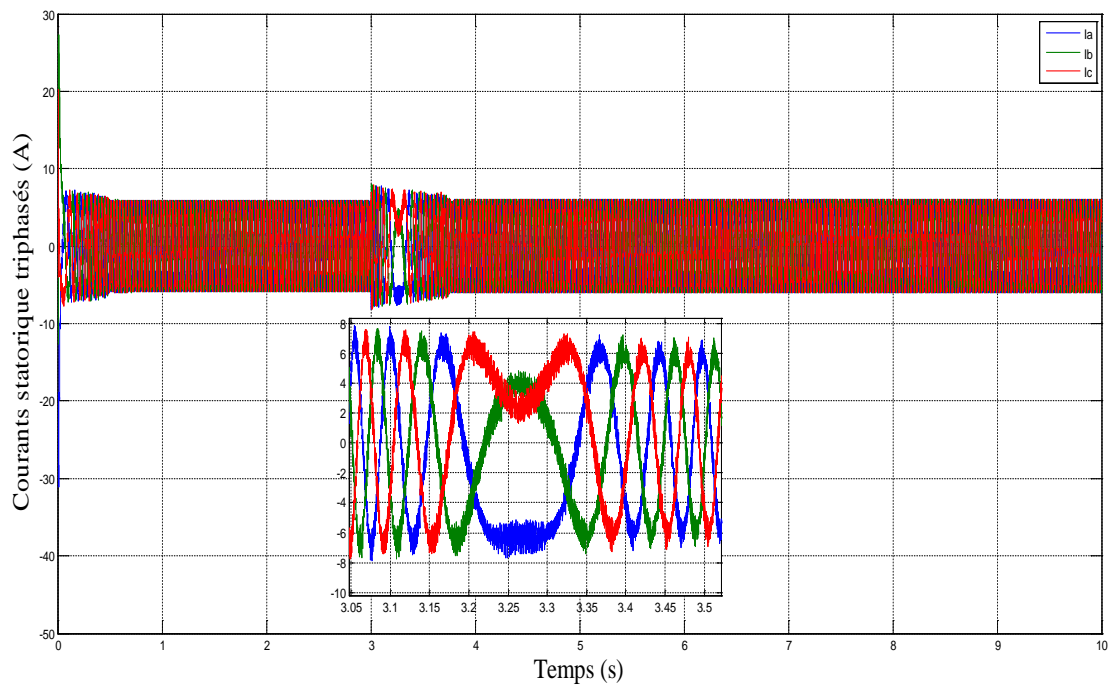


Figure IV. 20 : Allure du courant statorique dans le repère triphasé.

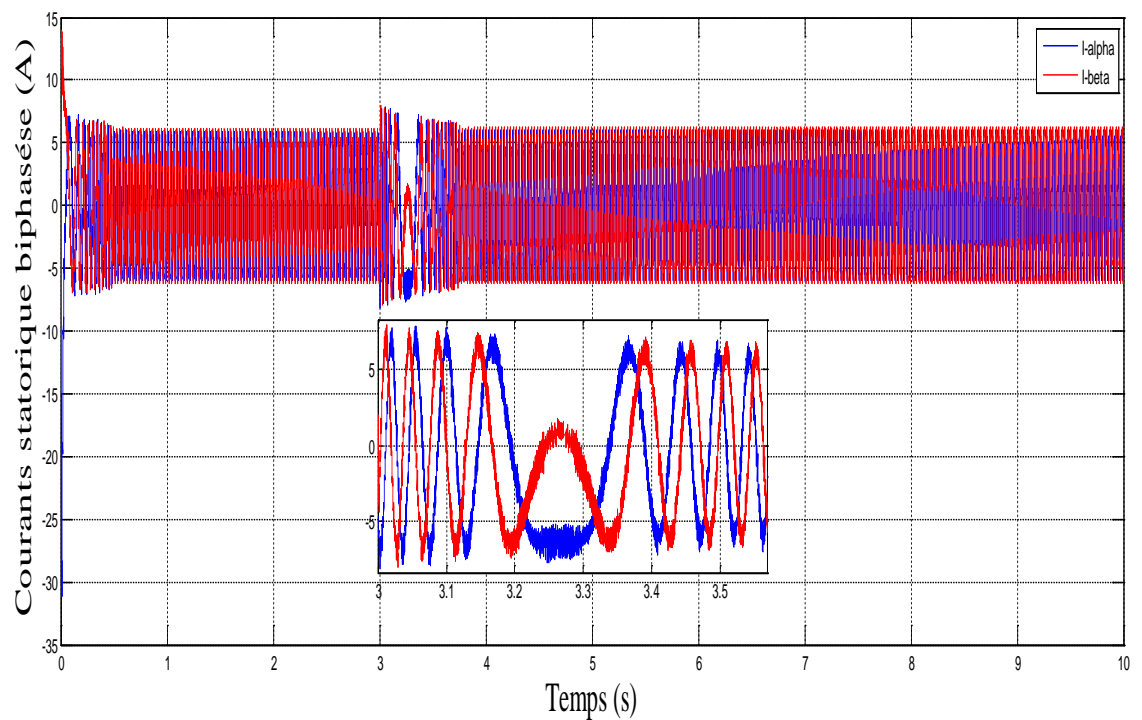


Figure IV. 21 : Allure du courant statorique dans le repère biphase.

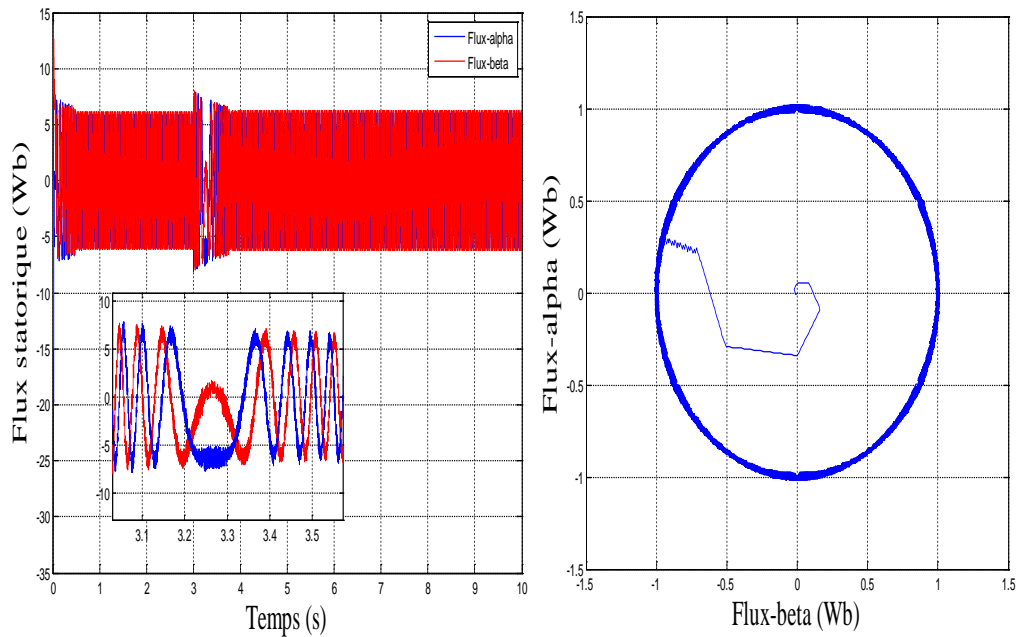


Figure IV. 22 : Allure du flux statorique dans le domaine temporel et sa trajectoire circulaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, les principaux concepts de base de la commande directe du couple (CDC) ont été présentés. La CDC, appliquée sur l'ensemble convertisseur - machine a été élaboré dans l'environnement MATLAB /Simulink afin de valider les notions traitées en théorie.

Les résultats de simulation permettent d'apporter une solution très prometteuse aux problèmes de robustesse vis-à-vis de la variation du couple de charge et de la dynamique sur le couple électromagnétique. De plus, ce type de commande ne nécessite pas de capteur mécanique pour connaître la position du rotor ou la vitesse de la machine. Néanmoins, cette commande présente des oscillations au niveau du couple, dû à une fréquence de commutation variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis. Ce point constitue l'un des inconvénients majeurs de la CDC.

En outre, La simulation a montré que la commande directe de couple offre un découplage naturel entre le couple et le flux.

Conclusion Générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude et la commande d'un véhicule électrique, dans le contexte d'une solution stratégique pour affronter l'un des plus grands défis de notre avenir énergétique : l'impact des transports sur l'environnement.

On a tout d'abord entamé le premier chapitre par une présentation générale de quelques généralités sur le véhicule électrique notamment du côté structure et principe de fonctionnement.

Afin de mieux maîtriser cette étude, dans le second chapitre, on a traité les différents types de machines existants en mettant en évidence leur avantages et inconvénients afin de justifier notre choix qui s'est porté sur la machine asynchrone à cage d'écurie dédiée à la traction électrique.

Dans le troisième chapitre, on a modélisé les différents composants de la chaîne de traction, à savoir l'onduleur triphasé à deux niveaux, la machine asynchrone triphasé et enfin le couple de charge issu des forces résistives appliquées au véhicule électrique.

Pour une adaptation meilleure du véhicule aux diverses applications qu'exigent les utilisateurs, on a appliqué la commande directe du couple pour tous ses avantages cités.

Après discussions et analyses des résultats de simulation obtenus, on a pu conclure qu'une commande CDC apporte une solution très intéressante aux problèmes rencontrés en termes de robustesse et dynamique, sauf qu'elle a un inconvénient par rapport aux correcteurs à hystérésis engendrant des oscillations au niveau des grandeurs électrique et mécanique suite à la variation de la fréquence de commutation.

En perspectives, on envisage d'élargir ces travaux, dans le but d'améliorer d'avantage le fonctionnement du véhicule électrique, on se propose de :

- Minimiser les pertes par oscillation du couple électromagnétique.
- Introduire des boucles de régulation basées sur des techniques de commande avancée (Logique floue, réseau de neurone, mode glissant...) à la chaîne de traction.
- Compléter la chaîne de traction par l'insertion de la partie alimentation et gestion de puissance.
- S'initier à l'implémentation en temps réel.

Liste Bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Aïman nouh « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers » Thèse de doctorat par l'université de Belfort-Montbéliard et Franche-Comté, 2008.
- [2] VU Ngoc-Tuan « Dynamique régénérative du véhicule : Transfert de puissance optimal par la maîtrise des comportements du véhicule de distribution » Thèse de doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2014.
- [3] Pierre Caillard « Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique » Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2015.
- [4] Beniken Anis, Guezoul L'Azhar « Modélisation et commande d'un quad électrique » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2020.
- [5] N. Brahim, Z. Chanoun « Introduction des machines asynchrones à double alimentation dans les véhicules électriques » Mémoire de master, Université A/Mira – Bejaïa, 2012.
- [6] Boukela Amar, Aïssiouene Sabrina « Etude des sources d'énergies associées au véhicule électrique » Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [7] Bouhra Abedallah « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué » Mémoire de magister, Université et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [8] Miloudi Saleh, Derradji Azeddine, Bouhhal Aïssa « Simulation numérique d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique » Mémoire de master, Université de M'SILA, 2012.
- [9] Hassaine Si Mohamed « Introduction à la commande en vitesse d'un véhicule électrique entraîné par un moteur asynchrone » Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [10] Multon. B « Motorisation de véhicule électrique, Technique d'ingénieur, Traité électronique, E3996, 2001.
- [11] Kermani. S « Gestion énergétique de véhicule hybride de la simulation à la commande temps réel » Thèse de doctorat, Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.
- [12] Espanet .C « Contribution à modélisation et conception optimale de moteur sans balais à structure inversée application au moteur-roue » Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 1999.
- [13] Zaouzaou Sabrina, Meziani Sabrina « Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2017.
- [14] L. Cuif, E. Gandon, E. Kunzinger, A. Mercier, N. Nabeebaccus, K. Soucova, « Matériaux écoresponsables et durables pour le développement de véhicules électriques » Projet 3A, 2016.

[15] Djerroud Lamia, Ait Braham Lyna « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2020.

[16] Jean Duclos, Jean-Henri Pierrard ; Vers une deuxième génération de véhicules ? La Documentation Française, Paris — 1974.

[17] Marif Ismail, Abdat Hichem « La commande en vitesse d'un véhicule électrique » Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2019.

[18] Djerroud Lamia, Ait Braham Lysa « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique » Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2020.

[19] Houacine Karima « Commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule électrique » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

[20] Belabes Djouher, Belkada CHabha « Conception optimale d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence » Mémoire de fin d'étude, Université de Tizi-Ouzou, 2010/2011.

[21] Saih khale, Merbouti Hamid « Etude et réalisation d'un variateur de vitesse pour des machines asynchrones triphasés à cage d'écureuil » Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010/2011.

[22] Akkou Djamel- Meziane Boumediene « Optimisation d'une série de moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil » Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2008.

[23] Ammar Kamal-Mellal Makhlof « Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil » Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, promotion 2012/2013.

[24] Mesrouk Mehdi, Mihoubi Samir « Etude et réalisation d'un variateur de vitesse pour moteur asynchrone à cage d'écureuil à partir d'un micromaster » Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

[25] kachtoun Abdallah « La commande vectorielle de mas triphasé à cage d'écureuil » Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

[26] N. Benamrouche « Machines électriques II » Cours de 4^{ème} année électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.

[27] Dominique. Bareille, Jean-Pierre Daunis « Transformateurs et machines tournantes » Cours et exercices corrigés, 2005.

- [28] Toufouti Riad « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone » Thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, Université Mentouri Constantine.
- [29] Allaoua Hakim, Allaoua Bilal « Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue » Mémoire de fin de cycle, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2013/2014.
- [30] Benaouicha Mounir, Guerrou Youcef « Réalisation d'un onduleur de tension commandé par la carte dspace 1104 » Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [31] Ainseri Tarik, Bouhoui Lotfi « Commande DTC-prédictive d'un moteur asynchrone triphasé » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2019/2020.
- [32] Roudjali Imene, Rezki Abdelaziz « Design and implementation of direct torque control of induction motor drive » Final year project for the degree of master, University M'Hamed Bougara – Boumerdes, 2018.
- [33] Video, Modélisation de la MAS dans le repère (alpha, beta) lié au stator - Chunja Tech 춘자기술).
- [34] Slimanou Marouane, Chelghoum Idir « Étude d'un système de pompage éolien à base de deux machine synchrone à aimants permanents » Mémoire de fin d'études, Université A. Mira, 2020.
- [35] Akkouchi Kamel « Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone » Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2007.
- [36] Aissat Radia, Belkasmi Zoulikha « Commande directe du couple de la machine asynchrone sans capteurs à courant alternatif » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2020.
- [37] H. Benbouhenni, "Utilisation du contrôleur à hystérésis à trois niveaux pour le flux statorique dans la commande DTC neuronale d'un moteur asynchrone de forte puissance," vol. 22, pp. 179–188, 2019.
- [38] Righi Youcef « Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone sans encodeur de vitesse » Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [39] Boukhit Yasmine, Hadjout Yasmine « Etude par simulation de la DTC-SVM floue d'une machine triphasée asynchrone » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira-Bejaia, 2020.
- [40] Hassen Reghioui « Amélioration des performances de la commande directe de couple (DTC) appliquée à une machine asynchrone triphasée » Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.

[41] R. Toufouti, S. Meziane, H. Benalla « Contrôle direct du couple pour moteur à induction utilisant la logique floue » Journal ACSE, vol (6), no (2), juin 2006.

[42] Hebbache Nacer-eddine « Commande directe du couple d'une machine synchrone à aimants permanents appliquée à un véhicule électrique : Implémentation sur arduino » Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira – Bejaia, 2020.

[43] Soufien Gdaim « Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes » Thèse docteur, Université de Monastir, 2013.

[44] Marcinze lechowskin, "Space vector modulated-direct torque controlled (DTC-SVM) inverter-fed induction motor drive", These de doctorat, faculty of electrical engineering warsaw – Pologne, 2005.

[45] Laboratoire L.T.I.I.

ANNEXES

ANNEXES [45]

Les Paramètres de la Machine asynchrone triphasée [45]

Paramètres	Symboles	Valeurs
Puissance	P_u	3Kw
Nombre de pair de pole	P	2
Résistance Statorique	R_s	1.76 Ω
Résistance Rotorique	R_r	1.95 Ω
Inductance Mutuelle	M	0.183H
Inductance Statorique et Rotorique	$L_s=L_r$	0.194H
Moment Inertie	J	0.02 kg.m ²
Frottement	F	0.0001 N.m.s ²

Les paramètres du Véhicule Électrique [45]

Paramètres	Symboles	Valeurs
Masse du véhicule	m	1300kg
le rayon effectif de la roue	r_w	0.32m
Surface frontale du véhicule	A_f	2.6 m ²
Constante de la résistance au roulement	μ	0.01
Densité de l'air	ρ_{air}	1.2 kg/m ³
Coefficient de trainée aérodynamique	C_d	0.32

Résumé :

Le véhicule électrique (VE), dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique, est l'une des solutions préconisées par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche pour remplacer progressivement les véhicules classiques. Ce travail est orienté en premier lieu vers une étude générale de la chaîne de traction du VE, ainsi que la modélisation de la machine asynchrone qui propulse le véhicule. Cette motorisation est alimentée par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux. Dans le véhicule électrique, l'objectif est de concevoir une commande directe du couple (classique) pour contrôler le comportement du flux et du couple de la machine à l'aide des comparateurs à hystérésis, afin d'assurer le bon fonctionnement du véhicule électrique.

Mots clés : Véhicule Électrique (VE), Machine Asynchrone (MAS), Onduleur de tension, Comparateurs à hystérésis, Commande directe du couple (CDC).

Abstract

The electric vehicle (EV), whose propulsion is ensured by a motor running exclusively on electric energy, is one of the solutions recommended by car manufacturers and research organizations to gradually replace conventional vehicles. This work is oriented firstly towards a general study of the EV drive train, as well as the modeling of the asynchronous machine which propels the vehicle. This motorization is fed by a three-phase voltage inverter at two levels. In the electric vehicle, the objective is to design a direct torque control (classical) to control the flow and torque behavior of the machine using hysteresis comparators, in order to ensure the proper operation of the electric vehicle.

Keywords : Electric vehicle (EV), Asynchronous machine (AM), Voltage inverter, Hysteresis comparators, Direct torque control (DTC).