



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Abbes La Ghrour Khenchela
Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie industriel



Mémoire Présenté Au Département De Génie Industriel En Vue De
L'obtention Du Grade De Master En Electrotechnique
Option: Commande Electrique

Présente par:

- Fahloul Islam
- Fertas Hamza

Thème

**Commande vectorielle appliquée à
un véhicule électrique**

Devant le jury :

Président : Dr. Menadi Abdelkarim
Encadreur : Dr. Boutaba Tarek
Examineur : Dr. Saidi Abdelkader

Université Khenchela
Université Khenchela
Université Khenchela

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, sans l'aide et l'encadrement de M. Boutaba, ce travail n'aurait pas pu atteindre une telle richesse et voir le jour.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers lui pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience, sa

rigueur et sa disponibilité pendant la préparation de ce mémoire. Nous

souhaitons également remercier chaleureusement tous nos professeurs pour leur générosité et leur grande patience, malgré leurs charges. Enfin,

nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide et leur soutien, que ce soit de près ou de loin.

Dédicaces

Nous dédions modeste travail à mes parents, mes amis et ma famille, qui ont été une source inépuisable de soutien, d'encouragement et de motivation tout au long de ce parcours. Votre amour, votre confiance et votre présence ont été nos piliers, nous aidant à surmonter les défis et à persévérer dans nos efforts. Nous vous remercions de nous faire confiance, de nous inspirer et de nous accompagner dans cette aventure. Ce mémoire est le résultat de notre coopération et de notre engagement mutuels, et nous vous en sommes très reconnaissants.

Resume

La voiture électrique est une avancée majeure dans la mobilité durable. Alimentée par des batteries rechargeables, elle offre des avantages tels que des émissions réduites et une efficacité énergétique accrue. Pour améliorer ses performances, nous utilisons la commande vectorielle. Cette technique permet de réguler le couple moteur de manière précise sur chaque roue, améliorant ainsi la traction, la stabilité et la maniabilité du véhicule. Grâce à la commande vectorielle, la puissance électrique est distribuée de manière dynamique entre les roues motrices, offrant une meilleure adhérence et une accélération plus rapide. Par exemple, lors d'une accélération intense ou sur une surface glissante, le système ajuste le couple sur chaque roue pour minimiser le patinage et optimiser les performances. En somme, l'application de la commande vectorielle dans les voitures électriques améliore la sécurité, l'efficacité et les performances globales de ces véhicules écologiques.

Abstract

In terms of environmentally friendly transportation, the electric automobile represents a significant advancement. It has advantages like lower pollution and more energy efficiency because it is powered by rechargeable batteries. We employ the vector command to increase its effectiveness. This method enables the exact regulation of engine torque on each wheel, enhancing the car's handling, stability, and traction. With the use of vector control, electric power is dynamically distributed across the drive wheels, improving traction and accelerating more quickly. For instance, to reduce wheel spin and improve performance under strong acceleration or on a slick surface, the system adjusts torque to each wheel. In conclusion, the use of vector control in electric vehicles enhances their overall performance, efficiency, and safety.

ملخص

تعتبر السيارة الكهربائية تقدمًا كبيرًا في التنقل المستدام. يعمل بطاريات قابلة لإعادة الشحن ، وهو يوفر مزايا مثل تقليل الانبعاثات وزيادة كفاءة الطاقة. لتحسين أدائها ، نستخدم التحكم في النواقل. هذه التقنية تجعل من الممكن تنظيم عزم دوران المحرك بدقة على كل عجلة ، وبالتالي تحسين الجر والثبات والتعامل مع السيارة. بفضل التحكم في القوة الموجهة ، يتم توزيع الطاقة الكهربائية ديناميكيًا بين عجلات القيادة ، مما يوفر قبضة أفضل وتسريعًا أسرع. على سبيل المثال ، أثناء التسارع الشديد أو على سطح زلق ، يقوم النظام بضبط عزم الدوران لكل عجلة لتقليل دوران العجلة وتحسين الأداء. باختصار ، يعمل تطبيق التحكم في ناقلات الأمراض في السيارات الكهربائية على تحسين السلامة والكفاءة والأداء العام لهذه المركبات الصديقة للبيئة.

Table des matières

Chapitre I État de l'art véhicule électrique

Introduction	3
I.1 L'histoire de Véhicule Electrique	4
I.2 Véhicule électrique aujourd'hui	6
I.3 Les types des véhicules électriques	7
I.3.1 Véhicules à batterie électrique	8
I.3.2 Véhicules Hybride électrique	8
I.3.3 Les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)	9
I.4 Architecture du Véhicule électrique	10
I.4.1 Moteur électrique	10
I.4.1.1 Les différents types de moteurs électriques	11
I.4.1.1.1 Moteur synchrone / asynchrone	11
I.4.1.1.2 Moteur électrique à balais / charbon (Synchrone)	12
I.4.1.1.3 Moteur électrique à aimant permanent (Synchrone)	13
I.4.1.1.4 Moteur électrique à induction (Asynchrone)	13
I.4.1.1.5 Moteur pas à pas à réluctance variable	15
I.4.2 La recharge (chargeur)	16
I.4.2.1 Principe de fonctionnement du chargeur	17
I.4.2.2 Modes de charge	18
I.4.3 Le convertisseur	19
I.4.4 La batterie	21
I.4.4.1 Types de batterie	21
I.4.4.1.1 Batteries au plomb-acide :	21
I.4.4.1.2 Batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) :	21
I.4.4.1.3 Batteries nickel-métal-hydrure (nimh) :	21
I.4.4.1.4 Batteries au lithium-ion (Li-ion) :	22
I.4.4.1.5 Batteries au lithium-polymère (Li-Po) :	22
I.4.5 Transmission	23
I.4.6 Le système de contrôle de freinage régénératif	23
I.5 Avantages et inconvénient des véhicules électriques	24
I.5.1 Avantages de la voiture électrique	24
I.5.2 Inconvénients de la voiture électrique	24
I.6 Conclusion	26

Chapitre II Modélisation de la machine asynchrone et la commande vectoriel

II.1 Introduction	27
II.2 Description et principe de fonctionnement :	27
II.3 Modélisation d'une machine asynchrone:	29
II.3.1 Hypothèses simplificatrices:	29
II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :	30
II.3.2.1 Equations électriques :	31
II.3.2.2 Equations magnétiques :	31
II.3.2.3 Equations mécaniques	33
II.3.2.4 Transformation de Park :	33
II.3.3 Modèle de la MAS dans le système biphasé :	35
II.3.3.1 Equations electriques :	35
II.3.3.2 Equations magnetiques:	35
II.3.3.3 Equations mecaniques :	36
II.3.3.4 Définitions des différents référentiels :	36
II.3.3.5 Différents repères biphasés	37
II.3.3.6 Choix du référentiel :	37
II.3.3.7 Référentiel lié au stator (α, β) :	37
II.3.3.8 Référentiel lié au rotor (x,y):	38
II.3.3.9 Référentiel lié au champ tournant (d, q) :	38
II.3.3.10 Expressions du couple électromagnétique et de la puissance:	39
II.3.3.11 Mise en équation d'état :	40
II.4 Résultats de simulation	42
II.4.1 Interprétation des résultats	45
II.4.2 Interprétation des résultats	47
II.5 Modélisation de l'alimentation de la machine :	49
II.5.1 Modélisation du redresseur triphase :	50
II.5.2 Modélisation du filtre :	52
II.5.3 Modelisation de l'onduleur	53
II.5.3.1 Techniques de commande de l'onduleur :	56
II.6 Résultats de simulation	58
II.6.1 Interprétation des résultats	60
II.7 Commande vectorielle de la machine asynchrone	61
II.7.1 Principe de la commande vectorielle	61
II.7.2 Types de la commande vectorielle :	61
II.7.2.1 Commande vectorielle directe:	61
II.7.2.2 Commande vectorielle indirecte:	62
II.7.3 Régulation	63
II.7.3.1 Régulateur du courant iqs :	64
II.7.3.2 Régulateur du courant ids	65
II.7.3.3 Calcul du régulateur de vitesse :	65
II.8 Résultats de simulation	67
II.8.1 Interprétation des résultats	70
II.9 Conclusion	71

Chapitre III Application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

Introduction	72
III.1 Les forces agissant sur un véhicule	72
III.1.1 Force de roulement	73
III.1.2 Force de glissement à l'accélération	74
III.1.3 Force de traînée aérodynamique	74
III.1.4 Force pour surmonter une pente	76
III.1.5 Force d'inertie du moteur	76
III.1.6 Force de glissement latéral (glissement)	79
III.2 Simulation d'une module de commande vectoriel de véhicule électrique	81
III.3 Résultat	89
III.4 Conclusion	94

List des figures

Chapitre 01: État de l'art véhicule électrique

Figure 1.1 : véhicule électrique	3
Figure 1.2 : Photographie De 1884 Qui Présenterait La Voiture Electrique De l'inventeur Britannique Thomas Parker. © Eastern Daily Press	4
Figure 1.3 : 1924 Ford model t brochure (national automotive history collection)	5
Figure 1.5 : last modèle Audi a6 e-tron	6
Figure 1.6 : Un Modèle De Batterie d'une BEV	8
Figure 1.7 : un modèle de véhicules hybride électrique	9
Figure 1.8 : un modèle de véhicules électriques a pile a combustible (fcev)	9
Figure 1.9 : moteur électrique simens pour véhicule électrique	10
Figure 1.10 Relation entre le temps et l'état de charge soc, selon le mode de charge, pour un Batterie haute énergie	19

Chapitre 02: modélisation de la machine asynchrone et la commande vectoriel

Figure 2.1 : Schéma représentant les différents éléments de la M.A.S	29
Figure 2.2 : Représentation schématique d'une M.A.S triphasé	30
Figure 2.3 : Représentation des deux systèmes triphasé et biphasé	34
Figure 2.4 : Orientation des axes (u, v) par rapport aux différents référentiels	36
Figure 2.5 : Bloc de simulation	42
Figure 2.6 : Courbe de La source	42
Figure 2.7 : Les courant I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} (A)	43
Figure 2.8 : Flux ϕ_{idr} et ϕ_{iqr} (Wb)	43
Figure 2.9 : Le couple électromagnétique (N.m)	44
Figure 2.10 : La vitesse de rotation mécanique (tr/min)	44
Figure 2.11: Les courant I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} (A)	46
Figure 2.12: Flux ϕ_{idr} et ϕ_{iqr} (Wb)	46
Figure 2.13: Le couple électromagnétique (N.m)	47
Figure 2.14: La vitesse de rotation mécanique (tr/min)	47
Figure 2.15 : Schéma de l'association convertisseur –machine	50
Figure 2.16 : Schéma d'un redresseur triphasé double alternance à diodes.	51
Figure 2.17 : Tensions d'entrée et tension redressée.	52
Figure 2.18 : Circuit du filtrage.	52
Figure 2.19 : Schéma de l'onduleur triphasé	54
Figure 2.20 : Bloc de simulation d'un moteur asynchrone avec un onduleur MLI	58
Figure 2.21 : La forme de la courbe vers l'extérieur de onduleur MLI	58
Figure 2.22 : Flux rotorique et statorique (Wb)	59
Figure 2.23 : Les courant rotorique et statorique (A)	59
Figure 2.24 : La vitesse de rotation mécanique (tr/min)	60
Figure 2.25 : Le couple électromagnétique (N.m)	60
Figure 2.26 : Schéma de principe de la commande vectoriel indirect	62
Figure 2.27 : Caractéristiques de la réponse des systèmes.	63
Figure 2.28 : Schéma de régulation du courant i_{qs}	64
Figure 2.29 : Schéma de régulation du la vitesse	65
Figure 2.30 : Bloc de simulation de la commande vectoriel indirect d'une MAS	67
Figure 2.31 : La Tension de sortie de l'onduleur (V_a , V_b , V_c)	67

Figure 2.32 : les graphes du courants I_{sd} et I_{sq}	68
Figure 2.33 : les graphes du courants I_{sa} et I_{sb}	68
Figure 2.34 : Flux rotorique direct et quadrature (ϕ_{ird} et ϕ_{irq})	69
Figure 2.35 : Le couple électromagnétique (N.m)	69
Figure 2.36 : La vitesse de rotation mecanique (tr/min)	70

Chapitre 03:

Figure 3.1 : Schéma des forces agissant sur un véhicule	72
Figure 3.2 : Variation du frottement de roulement en fonction de la vitesse et de la pression des pneus	73
Figure 3.3 : la zone frontale du véhicule électrique, à gauche photo prise à une distance d'environ 8 mètres, à droite photo prise à une distance d'environ 50 mètres (avec zoom).	75
Figure 3.4 : Comparaison entre la force de roulement (F_{rr}) et la force de traînée (F_{ad}) en fonction de la vitesse.	76
Figure 3.5 : Schéma de traction d'un véhicule	77
Figure 3.6 : Modèle complet de la simulation	81
Figure 3.7 : schéma qui illustre le block de puissance fournie par le moteur	82
Figure 3.8 : Bloc de la force de roulement	82
Figure 3.9 : Graph de la force de roulement F_{rr}	83
Figure 3.14 : Bloc de la force pour surmonter une pente F_{hc}	83
Figure 3.16 : Bloc de la force d'accélération F_{ax}	84
Figure 3.17 : Graph de la force d'accélération F_{ax}	84
Figure 3.18 : Bloc de la force de d'inertie du moteur F_{wa}	85
Figure 3.19 : Graph de la force de d'inertie du moteur F_{wa}	85
Figure 3.20 : Bloc de la force de glissement latéral (glissement) F_{sy}	86
Figure 3.21 : Graph de la force de glissement latéral (glissement) F_{sy}	87
Figure 3.22 : Touts les force F_{total}	88
Figure 3.23 : Graph de la somme de toutes les forces	88
Figure 3.24 : Graph de la régime moteur w pour un couple maximum	89
Figure 3.25 : Graph de couple appliqué au moteur	89
Figure 3.26 : Graph de Force de traction	90
Figure 3.27 : Graph de l'accélération de la voiture	91
Figure 3.28 : Graph de la vitesse de la voiture	91
Figure 3.29 : Graph la distance parcourue par la voiture	92
Figure 3.30 : Graph de la vitesse en terrains avec une pente 10%	93

List des tableau

Chapitre 01: État de l'art véhicule électrique

Tableau 1.1 : comparatif des caractéristiques de différents modèles de véhicule électriques	7
Tableau 1.2 : Les différents types de voiture électriques	7
Tableau 1.3 : Différents modèles des véhicules électriques	11
Tableau 1.4 : Comparaison des différents moteurs	16
Tableau 1.5 : les Avantages et les Inconvénients de chaque types de moteur	16
Tableau 1.6 : les types de chargeurs	17
Tableau 1.7 : Déférence De Types De Recharge d'un Véhicule Electrique	18
Tableau 1.8 : les types de convertisseur	20
Tableau 1.9 : Comparaison des différents types des batteries.	22

Notation et Symboles

MAS ou MI : Machine Asynchrone ou Machine à Induction ;

MCC : Machine à Courant Continu ;

MS : Moteur Asynchrone ;

PI : Proportionnel Intégrale ;

FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouvert ;

FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermé ;

MRAS : Model Reference Adaptive System (français : Système Adaptatif à Modèle Référence) ;

f.e.m : Force électromotrice ;

FMM : Force magnétomotrice.

R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique ;

L_s, L_r : Inductances propres respectivement d'une phase statorique et d'une phase rotorique ;

$[L_{ss}]$: Matrice des Inductances propres d'une phase statorique ;

$[L_{rr}]$: Matrice des Inductances propres d'une phase rotorique ;

$[M_{sr}] : [M_{sr}]^T$: Matrice des Inductances mutuelles du couplage entre stator et rotor ;

m_1, m_2, m_3 : Inductances mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phase rotorique ;

m_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

L_s, L_r : Inductances propres cyclique respectivement d'une phase statorique et d'une phase rotorique ;

M : Inductances mutuelles cyclique entre stator et rotor ;

T_s, T_r : Constante de temps statorique et rotorique ;

σ : Coefficient de dispersion (coefficient de Blondel) ;

C_{em} : Couple électromagnétique ;

C_r : Couple résistant ;

p : Nombre de pair de pole ;

J : Moment d'inertie ;

K_f : Coefficient de frottement visqueux.

s_a, s_b, s_c : Axes magnétique liés aux enroulements triphasés statorique ;

r_a, r_b, r_c : Axes magnétique liés aux enroulements triphasés rotorique ;

(α, β) : Axes de référentiel de Concordia ;

(d, q) : Axes de référentiel de Park ;

(x, y) : Repère lié au champ au rotor ;

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator ;

θ_r : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe d ;

θ_s : Position angulaire du stator par rapport à l'axe d.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions statoriques des phases a, b et c ;

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques des phases a, b et c ;

$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$: Tensions statoriques des phases α, β ;

$V_{r\alpha}, V_{r\beta}$: Tensions rotoriques des phases α, β ;

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques des phases d, q ;

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques des phases d, q ;

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants statoriques des phases a, b et c ;

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotoriques des phases a, b et c ;

$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$: Tensions statoriques des phases α, β ;

$I_{r\alpha}, I_{r\beta}$: Tensions rotoriques des phases α, β ;

I_{sd}, I_{sq} : Tensions statoriques des phases d, q ;

I_{rd}, I_{rq} : Tensions rotoriques des phases d, q .

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Flux statorique des phases a, b et c ;

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Flux rotoriques des phases a, b et c ;

$\phi_{s\alpha}, \phi_{s\beta}$: Flux statoriques des phases α, β ;

$\phi_{r\alpha}, \phi_{r\beta}$: Flux rotoriques des phases α, β ;

ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Flux statoriques des phases d, q ;

ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Flux rotoriques des phases d, q .

Ω : Vitesse mécanique de rotation ;

w_r : La pulsation électrique correspondant à la vitesse de rotation ;

w_r : La pulsation électrique des grandeurs statorique.

w^* : La valeur de référence de la vitesse de rotation ;

K_p : La composante proportionnelle du correcteur PI ;

K_i : La composante Intégrale du correcteur PI ;

\hat{w}_r : Estimation de la vitesse de rotation électrique ;

$\hat{I}_{s\alpha}, \hat{I}_{s\beta}$: Estimation du courant dans le repère α, β ;

K_{pwr} et K_{iwr} : gain des contrôleurs PI.

F_{rr} : Force de roulement

F_{sx} : Force de glissement à l'accélération

F_{ad} : Force de traînée aérodynamique

F_{hc} : Force pour surmonter une pente

$F_{\omega a}$: Force d'inertie du moteur

F_{sy} : Force de glissement latéral (glissement)

P_{mec} : la puissance mécanique

Introduction générale

Introduction générale

L'automobile est un élément essentiel de notre vie quotidienne dans le contexte de la pénurie et de la pollution des énergies fossiles. Les transports sont responsables de la principale partie de la pollution urbaine, soit sonore ou atmosphérique.

Les chercheurs et constructeurs automobiles ont pris conscience de la nécessité de créer de nouveaux moyens de transport individuels intégrant de nouveaux types de motorisation propres et économiques en énergie en raison de ces problèmes environnementaux ; la notion de véhicule électrique est introduite.

Les véhicules électriques sont une innovation majeure dans le domaine de la mobilité durable. Ils fonctionnent en utilisant des batteries rechargeables et des moteurs électriques pour leur propulsion, offrant ainsi une alternative propre aux véhicules traditionnels à combustion interne. L'introduction des véhicules électriques a eu un impact significatif sur l'environnement et l'industrie automobile.

Les véhicules électriques contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à lutter contre le changement climatique et à améliorer la qualité de l'air.

Un élément clé de la technologie des véhicules électriques est le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction. Ce type de moteur a joué un rôle essentiel dans l'industrie de la voiture électrique en raison de ses caractéristiques techniques favorables. Les moteurs asynchrones sont fiables, durables et relativement peu coûteux à produire. Ils sont capables de fournir un couple élevé, ce qui les rend adaptés à la propulsion des véhicules électriques, qu'il s'agisse de voitures, de camions ou d'autobus électriques.

La commande vectorielle est une technique de commande avancée qui a été introduite pour optimiser les performances des moteurs asynchrones dans les véhicules électriques. Elle permet un contrôle précis du couple et de la vitesse du moteur, offrant ainsi une meilleure dynamique de conduite et une efficacité énergétique accrue. La commande vectorielle a permis de surmonter certains des défis inhérents à la technologie des moteurs asynchrones, tels que le couple irrégulier à basse vitesse et les pertes énergétiques.

Grâce à l'introduction de la commande vectorielle, les véhicules électriques sont devenus plus performants et compétitifs sur le marché. La combinaison du moteur asynchrone et de la commande vectorielle a également ouvert la voie à de nouvelles possibilités d'innovation dans l'industrie automobile. L'amélioration des performances

et de l'efficacité des moteurs électriques a conduit à une demande croissante pour les véhicules électriques, incitant les fabricants à investir davantage dans la recherche et le développement de cette technologie.

L'adoption de la commande vectorielle dans les véhicules électriques a également ouvert la voie à de nouvelles fonctionnalités et caractéristiques. Par exemple, elle permet une gestion avancée du couple et de la traction, ce qui peut améliorer les performances de conduite sur différents types de terrains. De plus, la commande vectorielle facilite l'intégration de systèmes de récupération d'énergie avancés, tels que la récupération d'énergie au freinage et le stockage d'énergie inertielle, augmentant ainsi l'efficacité énergétique globale du véhicule.[1]

Dans ce travail nous étudierons la modélisation et la commande de la machine asynchrone et spécialement la commande vectorielle de cette machine appliquée au véhicule électrique.

Cette mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre de notre mémoire, nous allons présenter des généralités sur le véhicule électrique.

Le deuxième chapitre, concernera la modélisation et simulation de la machine asynchrone associée à l'onduleur MLI de tension, ainsi que la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier et modéliser les forces agissant sur un véhicule électrique pour pouvoir à la fin l'intégrer à notre system « véhicule électrique » en prenant en compte l'application de la commande proposé a ce système. Finalement, on terminera notre travaille par un conclusion générale

Chapitre 01

État de l'art

véhicule électrique

Introduction

L'avènement des véhicules électriques représente un tournant majeur dans l'histoire de l'automobile. Avec l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les voitures électriques ont émergé comme une alternative écologique et durable. Les avancées technologiques dans ce domaine ont permis de développer des véhicules électriques performants, confortables, et offrant une autonomie suffisante pour répondre aux besoins de la plupart des conducteurs. Dans cette optique, ce rapport a pour objectif de présenter un état de l'art sur les véhicules électriques, en abordant les avantages et les inconvénients de cette technologie, les différents éléments qui composent un véhicule électrique ainsi que leur fonctionnement. Nous discuterons également des défis à relever pour généraliser l'utilisation de ce type de véhicules et des perspectives d'avenir pour les voitures électriques.

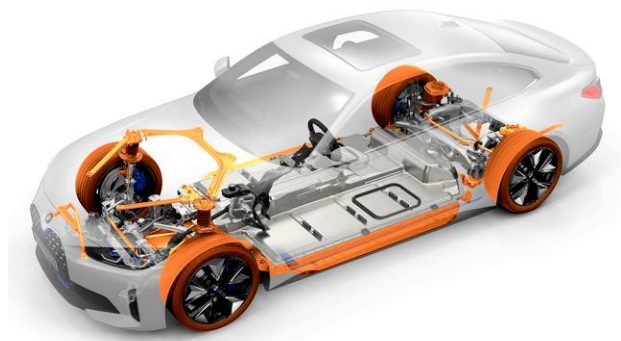


Figure 1.1 : véhicule électrique

I.1 L'histoire de Véhicule Electrique

Les débuts :

Les véhicules électriques ont été inventés bien avant les voitures à essence. En effet, dès la fin du 19ème siècle, les premiers modèles de voitures électriques ont été développés aux États-Unis et en Europe. L'un des premiers modèles de voiture électrique a été présenté en 1837 par un inventeur écossais nommé Robert Anderson. Cependant, la production de masse de voitures électriques n'a vraiment commencé qu'au début du 20ème siècle.

Les premiers modèles de voitures électriques :

La première voiture électrique de production était la "La Jamais Contente", qui a été construite en 1899 par l'ingénieur belge Camille Jenatzy. Cette voiture a établi le record de vitesse à 105 km/h en 1899. [2]



Figure 1.2 : Photographie De 1884 Qui Présenterait La Voiture Electrique De l'inventeur Britannique Thomas Parker. © Eastern Daily Press

En 1900, plus de 34% des voitures aux États-Unis étaient électriques, ce qui était plus que les voitures à essence et à vapeur. Les voitures électriques étaient populaires à l'époque en raison de leur silence, de leur propreté et de leur facilité d'utilisation.

- L'essor des voitures à essence :

Cependant, l'avènement de la production de masse de voitures à essence par Ford dans les années 1910 a commencé à faire diminuer la popularité des voitures électriques. Les

voitures à essence étaient moins chères à produire et avaient une autonomie plus élevée, ce qui a conduit à leur domination du marché de l'automobile au 20ème siècle.



Figure 1.3 : 1924 Ford model t brochure (national automotive history collection)

- La renaissance des voitures électriques :

C'est seulement dans les années 1970 et 1980 que les voitures électriques ont commencé à refaire leur apparition. Plusieurs constructeurs automobiles ont commencé à expérimenter avec des modèles de voitures électriques. Par exemple, General Motors a créé la voiture électrique "Impact" en 1990, qui a ensuite été commercialisée sous le nom de "EV1". La voiture électrique "EV1" a été louée à des conducteurs en Californie et en Arizona dans les années 1990, mais le programme a été annulé en 2003. [3]

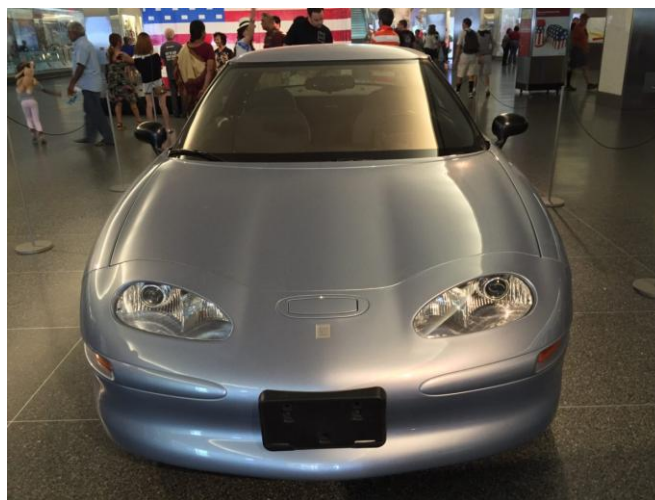


Figure 1.4: 1997 General Motors EV1 At Smithsonian National Museum Of American History

- L'ère moderne :

De nos jours, la technologie des voitures électriques a considérablement progressé, avec de nombreux constructeurs automobiles proposant des modèles de voitures électriques à des prix abordables. Des entreprises comme Tesla ont fait avancer la technologie des batteries, permettant aux voitures électriques de parcourir des distances plus longues sur une seule charge.

En outre, de plus en plus de pays et de villes ont adopté des politiques en faveur des véhicules électriques, avec des incitations pour les acheteurs de voitures électriques et des restrictions sur les voitures à essence dans les zones urbaines. [3]



Figure 1.5 : last modèle Audi a6 e-tron

I.2 Véhicule électrique aujourd'hui

Aujourd'hui, les véhicules électriques sont de plus en plus populaires et se développent rapidement. Les progrès technologiques ont permis d'améliorer la capacité des batteries et l'autonomie des véhicules électriques, ce qui les rend plus pratiques pour une utilisation quotidienne. De nombreux fabricants automobiles proposent maintenant des modèles électriques, allant des voitures citadines aux véhicules utilitaires sportifs (VUS).

Les véhicules électriques offrent également des avantages environnementaux, car ils ne produisent pas d'émissions de gaz d'échappement nocifs et peuvent réduire la dépendance aux combustibles fossiles. De plus, les coûts de recharge sont souvent inférieurs à ceux de l'essence ou du diesel, ce qui peut représenter des économies à long terme pour les propriétaires de véhicules électriques.

En termes d'infrastructure, de nombreuses villes et pays ont investi dans des réseaux de recharge pour soutenir la croissance des véhicules électriques. Des bornes de recharge publiques sont désormais disponibles dans de nombreux endroits, et des entreprises privées proposent également des solutions de recharge à domicile.

Modèle de voiture	Autonomie maximale (km)	Vitesse de recharge (km/h)	Temps de recharge (heures)	Puissance (kW)	Prix (en euros)
Nissan Leaf	270	144	7.5	110	33 900
Hyundai Kona Electric	449	167	9.5	150	42 400
Tesla Model 3	580	261	11	283	49 990
Chevrolet Bolt	417	146	9.5	150	37 495
Audi e-tron	329	200	8.5	300	71350

Tableau 1.1 : comparatif des caractéristiques de différents modèles de véhicule électriques

I.3 Les types des véhicules électriques

Il existe plusieurs types de véhicules électriques sur le marché, chacun ayant des caractéristiques distinctes, offrant ainsi aux consommateurs un choix plus large de véhicules respectueux de l'environnement, tels que les voitures électriques, les hybrides rechargeables, les véhicules électriques à pile à combustible, les motos et scooters électriques, les camions électriques et les bus électriques.

Désignation	Type de moteur propulsant le véhicule	Source de l'énergie utilisée par le moteur
Voiture électromotrice	Électrique	Électricité stockée dans les batteries
Voiture hybride	Électrique, couplé au thermique	Carburant consommé par le moteur thermique Générateur pour les hybrides rechargeables Électricité stockée dans les batteries
Voiture à hydrogène	Moteur électrique	Électricité produite par la pile à combustible

Tableau 1.2 : Les différents types de voiture électriques

I.3.1 Véhicules à batterie électrique

Les véhicules à batterie électrique (BEV) sont des véhicules électriques alimentés exclusivement par des batteries rechargeables. Les BEV utilisent un moteur électrique pour propulser les roues, offrant ainsi une expérience de conduite silencieuse et respectueuse de l'environnement. Les BEV sont alimentées par une batterie rechargeable qui stocke de l'énergie électrique et permet au véhicule de se déplacer sur une certaine distance sans avoir besoin d'être rechargée. La durée de vie de la batterie dépend de la capacité de la batterie et de la consommation d'énergie du véhicule. Les véhicules à batterie électrique sont considérés comme une alternative plus propre et plus écologique aux véhicules à combustion interne traditionnels, car ils ne produisent pas d'émissions nocives pour l'environnement. Cependant, la durée de vie limitée de la batterie et le temps de recharge peuvent être des défis pour les conducteurs de BEV. [4]

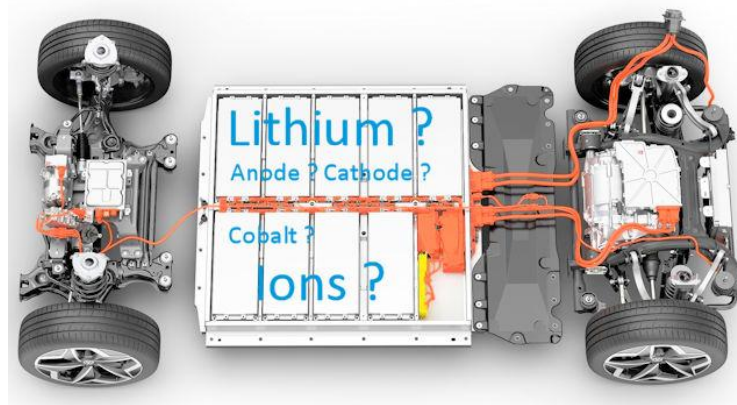


Figure 1.6 : Un Modèle De Batterie d'une BEV

I.3.2 Véhicules Hybride électrique

Un véhicule hybride électrique combine l'utilisation d'un moteur thermique et d'un moteur électrique pour propulser la voiture. Le moteur électrique est alimenté par une batterie rechargeable, tandis que le moteur thermique fonctionne avec du carburant. Le moteur électrique est principalement utilisé à basse vitesse et lors des phases d'accélération, tandis que le moteur thermique est activé à des vitesses plus élevées ou lorsqu'une puissance supplémentaire est requise. De plus, l'énergie cinétique générée lors de la décélération est récupérée et stockée dans la batterie grâce à un système de freinage régénératif. [5]

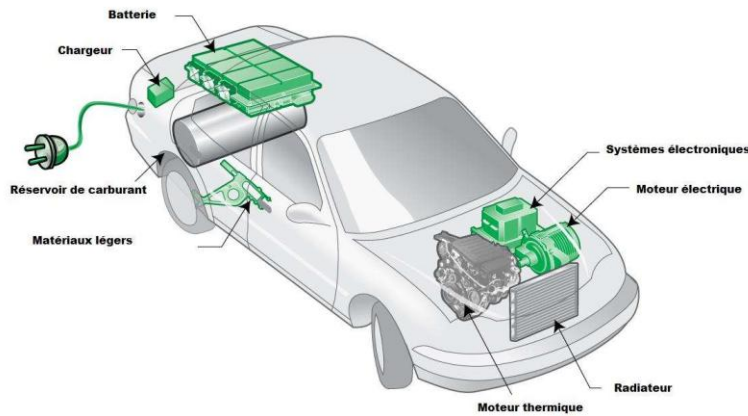


Figure 1.7 : un modèle de véhicules hybride électrique

I.3.3 Les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

Les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) sont des voitures électriques qui utilisent l'hydrogène comme combustible pour générer de l'électricité, qui est ensuite utilisée pour alimenter le moteur électrique. Lorsque l'hydrogène est combiné à l'oxygène de l'air, cela produit de l'eau, qui est le seul sous-produit de l'émission des FCEV. Les FCEV ont une autonomie similaire à celle des voitures électriques à batterie et peuvent être rechargés en quelques minutes seulement. Cependant, la disponibilité limitée des stations de recharge en hydrogène et les coûts élevés de production d'hydrogène sont des défis pour la diffusion à grande échelle de cette technologie. [2]

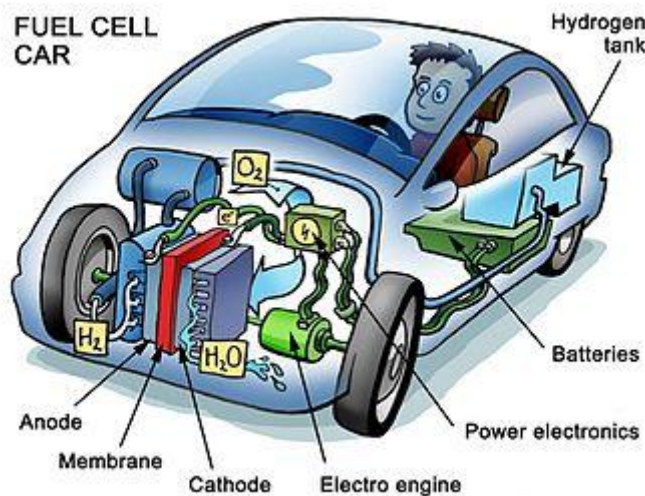


Figure 1.8 : un modèle de véhicules électriques à pile à combustible (fcev)

I.4 Architecture du Véhicule électrique

L'architecture d'un véhicule électrique repose sur plusieurs composants clés :

I.4.1 Moteur électrique

Le composant central de la voiture électrique est un élément très simple qui exploite les interactions entre un électroaimant et un aimant permanent pour convertir l'énergie électrique provenant de la source en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule lors de la phase de traction. De même, pendant la phase de freinage, le système convertit l'énergie mécanique en énergie électrique pour permettre la régénération de l'énergie. Lorsque le véhicule freine, la chaîne mécanique devient partiellement la source de puissance, tandis que la batterie devient le récepteur. Les moteurs électriques de propulsion fonctionnent en faisant tourner la transmission et les roues, car le contrôleur fournit de l'énergie électrique à partir de la batterie de traction. Certaines voitures électriques hybrides utilisent un générateur-moteur qui remplit les fonctions de propulsion et de régénération, mais en général, les moteurs électriques utilisés sont des moteurs BLDC (brushless DC).



Figure 1.9 : moteur électrique Siemens pour véhicule électrique

Généralement, les constructeurs de voitures électriques utilisent différents types de moteurs d'entraînement comme élément clé dans leur système de propulsion. Ces moteurs peuvent être de différents types tels que le moteur à courant continu (MCC), le moteur asynchrone (MAS), le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP), la reluctance variable (MRV), et d'autres encore. Certaines des versions de véhicules électriques

utilisées par différentes entreprises sont répertoriées ci-dessous, avec le type de moteur correspondant.

COMPAGNIE	MODELE DE VE	MOTEUR
Fiat	Fiat panda Electra	MCC a excitation Série
Fiat	Fiat Seicento	Moteur à induction
Honda	Honda EV plus	MSAP
Mazda	Mazda Bongo	MCC a excitation Shunt
Nissan	Nissan Altra	MSAP
Toyota	Toyota RAV 4	MSAP
General	GM EV1	Moteur induction
Ford	Ford Think City	Moteur induction

Tableau 1.3 : Différents modèles des véhicules électriques

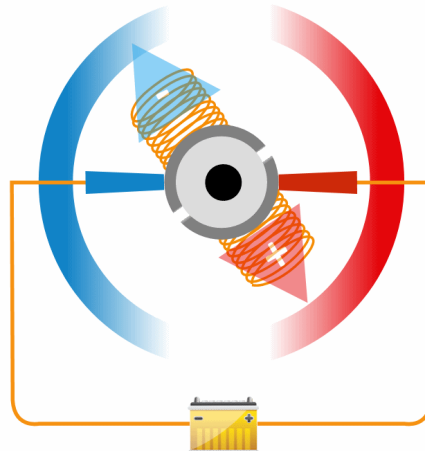
I.4.1.1 Les différents types de moteurs électriques

I.4.1.1.1 Moteur synchrone / asynchrone

Cet caractéristique permet de savoir si le rotor tourne à la même vitesse que le champs magnétique du stator ou pas.

Dans le cas d'un moteur à induction (rotor cage d'écureuil), on aura un décalage entre la vitesse de rotation du champ magnétique et la vitesse du rotor. Exemple : si le champ magnétique tourne à 1500 tours/minutes mon rotor sera plutôt vers les 1400 tours/min. On appelle cela un glissement.

I.4.1.1.2 Moteur électrique à balais / charbon (Synchrone)



Le moteur électrique à balais est un type de moteur électrique (ou génératrice si on exploite le mouvement pour créer du courant, ex : alternateur) dont le rotor est alimenté en électricité. Pour pouvoir connecter le rotor mobile à alimenter on a inventé les balais, une sorte de petit balais au premier sens du terme (à poils métalliques) qui frottent contre l'axe du rotor : cela permet le passage de l'électricité.

On a depuis abandonné ces balais pour utiliser des charbons en graphite, ces derniers sont utilisés de la même manière mais leur durabilité est meilleure.

Le problème ici est que ces dispositifs s'usent et à terme ils ne permettent plus d'alimenter le rotor. Dans certains cas les charbons sont usés et ne touchent plus le rotor et dans d'autres cas c'est la crasse qui vient s'intercaler entre le balais et le rotor (du généralement aux arcs électriques qui se produisent épisodiquement et qui génèrent des brûlures donnant lieu à des dépôts).

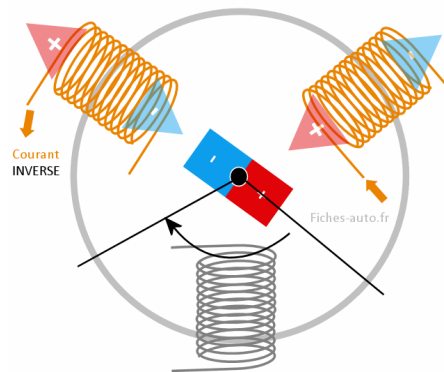
Ce type de moteur fonctionne "habituellement" avec un courant continu. Quand on l'adapte pour qu'il fonctionne en alternatif et continu (ce qui est assez simple à faire techniquement parlant) on dit alors qu'il s'agit d'un moteur électrique universel (il accepte soit du continu soit de l'alternatif sans préférence particulière).

Ce moteur a été utilisé sur les autos électriques des années 90 et n'est que rarement utilisé aujourd'hui sur les versions modernes. Il est aussi présent au niveau des démarreur et alternateur (c'est pourquoi donner un coup de masse peut le refaire marcher un temps si il est en panne : le coup permet de faire bouger la crasse sur les charbons, crasse qui a été générée par les brûlures liées aux arcs électriques). [6]

I.4.1.1.3 Moteur électrique à aimant permanent (Synchrone)

Ce moteur est très répandu sur les voitures électrique modernes ou même encore les trains. Il s'agit ici d'avoir un stator composé de plusieurs pôles (désignant des bobines) et un rotor fait à partir d'un aimant permanent.

On fait ensuite tourner l'aimant en lui donnant des impulsions grâce aux différents pôles / bobines. Les bobines sont traversées par un courant alternatif qui induit une inversion des pôles, le tout étant réglé pour pousser et attirer l'aimant du rotor (pour le faire tourner donc).



I.4.1.1.4 Moteur électrique à induction (Asynchrone)

Dans ce type de moteur il n'y a pas d'aimant permanent et le stator n'est pas assemblé de la même manière malgré qu'il soit quand même constitué de bobines de cuivre. Nikola Tesla a eu l'idée de ce procédé sans pouvoir bien l'exploiter (avec quelques ordinateurs et des puces programmables pour gérer les flux et commutations il aurait certainement pu aller plus loin).

Commençons donc par le stator, qui est constitué de plusieurs fils de cuivre : généralement 3 sections judicieusement réparties avec pour chacune d'entre elles un courant alternatif décalé d'un tiers de temps (sur un temps donné on a pour chaque fil un courant + et un courant - qui le traverse).

Quand on injecte du courant alternatif dans le stator, on aura alors la production d'un champ magnétique qui va tourner sur lui-même (grâce à la disposition astucieuse des fils ainsi que la stratégie de diffusion de courant dans ces dernières : courant alternatif et

temporisé). La manière dont est conçu le stator est très technique, il faut impérativement obtenir un champ magnétique tournant sur lui-même.

Le rotor est quand à lui formé de ce que l'on appelle une cage d'écureuil, car ça ressemble à une cage d'écureuil ...

Cette dernière n'est pas constituée d'un aimant mais de de tôles ferromagnétiques ainsi que de barres conductrices judicieusement positionnées.

Mais la manière dont a été faite cette pièce permet d'induire de l'électricité dans cette dernière si on lui soumet un champ magnétique tournant, et vous voyez certainement où je veux en venir maintenant.

Pour résumer, quand j'injecte un courant alternatif dans le stator j'obtiens un champs magnétique tournant. Ce champ magnétique tournant du stator va induire l'apparition de courant dans la cage d'écureuil du rotor, et le courant induit va lui aussi induire un champ magnétique autour du rotor. Le champ magnétique du rotor va influencer avec avec celui du stator comme le ferait un aimant permanent : résultat le rotor tourne et on a un moteur électrique. [7]



I.4.1.1.5 Moteur pas à pas à réluctance variable

C'est la toute dernière technologie sortie sur le marché, et c'est bien domestiqué par l'industrie que depuis les années 2010 grâce à l'apparition d'électronique de puissance de plus en plus perfectionné.

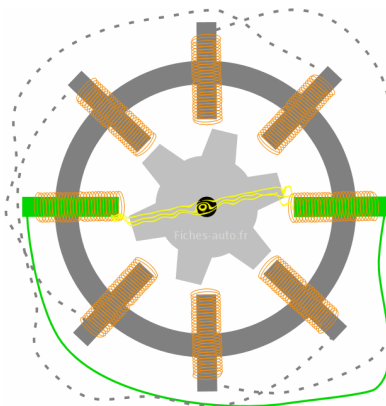
Ce moteur est encore différent de tous les autres.

Le stator est constitué de phases / bobines disposées par paires les une en face des autres. Quand j'active une phase, que je l'alimente, on va alors exciter deux bobines l'une en face de l'autre. On a alors un champs magnétique qui va se former et qui va essayer de former une boucle en tentant de faire un pont / lien entre les deux phases qui sont face à face.

Le rotor est quant à lui constitué de fer doux / carbure de silicium et il n'est pas aimanté du tout.

Le principe de fonctionnement est celui-ci, quand j'alimente une phase (qui a deux pôles de part et d'autre du moteur / rotor), le champ magnétique va vouloir connecter les deux bobines de cette phase. Et comme ce champ magnétique préfère le métal à l'air pour se propager, il va induire un mouvement sur le rotor : il va alors se positionner pour que l'espace entre le stator et le rotor soit le plus petit possible (qu'il y ait le moins d'air possible à traverser). Le rotor va alors se mettre dans cette position, avec donc les dents qui sont le plus rapprochées possible du stator.

C'est pour cela qu'on l'appelle moteur pas à pas, l'avancée / rotation du rotor s'effectue par pas, et chaque pas est réalisé par l'excitation d'une des phases. [6]



	MCC	MAS	MSAP
Rendement maximal	Bon	Passable	Très Bon
Rendement moyen	Moyen	Bon	Très Bon
Vitesse max	Passable	Bon	Bon
Cout électronique de puissance	Très Bon	Bon	Bon
Cout de moteur	Passable	Bon	Moyen
Espace couple/vitesse	Moyen	Moyen	

Tableau 1.4 : Comparaison des différents moteurs

Moteur	Avantages	Inconvénients
MCC	Faible coût, maintenance simple, faible consommation d'énergie, fonctionnement fiable	Faible puissance, faible efficacité énergétique, bruyant, nécessite un refroidissement externe
MAS	Haute puissance, haute efficacité énergétique, faible bruit, faible niveau de vibration	Coûteux, maintenance complexe, nécessite un système de refroidissement sophistiqué, faible fiabilité en cas de mauvaise qualité du carburant
MSAP	Faible coût, entretien facile, faible consommation d'énergie, faible niveau de bruit et de vibration, longue durée de vie	Faible puissance, faible efficacité énergétique, nécessite un système de refroidissement externe, pollution élevée
MRV	Haute efficacité énergétique, grande plage de puissance, faible niveau de bruit et de vibration, faibles émissions de gaz d'échappement	Coûteux, nécessite un entretien et une maintenance complexes, peut avoir des problèmes de fiabilité, nécessite un système de contrôle sophistiqué

Tableau 1.5 : les Avantages et les Inconvénients de chaque types de moteur

I.4.2 La recharge (chargeur)

Le processus de recharge est le point de départ de l'utilisation d'une voiture électrique. Pour effectuer cette opération, il est nécessaire de connecter la voiture à une prise ou à une borne de recharge, à l'aide d'un câble doté de connecteurs adaptés. Différents connecteurs sont disponibles en fonction du mode de recharge souhaité. Pour la recharge à domicile, sur le lieu de travail ou sur les petites bornes publiques, il est courant d'utiliser son propre câble équipé de connecteurs "type 2". Sur les bornes de recharge rapides, le câble est fixé et propose deux normes : le "Combo CCS" européen et

le "CHAdeMO" japonais. Bien que cela puisse sembler complexe au début, cela devient plus facile une fois que l'on s'y habitue. Il n'y a aucun risque d'erreur car les connecteurs ne peuvent pas être insérés dans la mauvaise prise en raison de leur forme différente.

Après avoir établi la connexion, le courant électrique alternatif (AC) circule le long du câble connecté à la voiture. Le véhicule effectue plusieurs vérifications via son ordinateur de bord pour s'assurer que le courant est de bonne qualité et bien configuré, et que la phase de terre est suffisante pour garantir une recharge en toute sécurité. Si les vérifications sont concluantes, la voiture autorise l'électricité à passer par le convertisseur, un élément intégré, pour commencer la recharge de la batterie. [8]

I.4.2.1 Principe de fonctionnement du chargeur

En fonction de leur alimentation électrique (monophasée ou triphasée), de leur emplacement (embarqués ou non dans le véhicule) et du mode de transmission d'énergie, les chargeurs de batteries pour les véhicules électriques sont spécifiques. Lorsque le courant alternatif est utilisé, le processus de charge se déroule en plusieurs types, et ils sont disposés dans ce tableau :

Type de chargeur	Lieu d'installation	Puissance de charge	Temps de recharge (selon la batterie du véhicule)
Chargeur domestique	Domicile	1,8 kW à 7,4 kW	Quelques heures à une nuit
Chargeur accéléré	Lieux publics (parkings, Centres commerciaux, etc.)	22 kW à 50 kW	Quelques heures à
Chargeur rapide	Stations de recharge rapide le long des autoroutes ou centres urbains	50 kW à 350 kW	Environ 30 minutes
Chargeur sans fil	Installé dans le sol	N/A (utilise la technologie de charge par induction)	Quelques heures à une nuit
Chargeur embarqué	Intégré au sein du véhicule	Varie en fonction de la prise de recharge	Quelques heures à une nuit

Tableau 1.6 : les types de chargeurs

I.4.2.2 Modes de charge

Il existe quatre modes de charge différents (selon la norme européenne IEC-6296) qui peuvent être effectués sur un véhicule électrique. Chacun obéit à une tension, un courant et un temps donnés nécessaires pour charger la batterie. Le tableau 5 donne une approche générale des caractéristiques de ces modes de charge. [9]



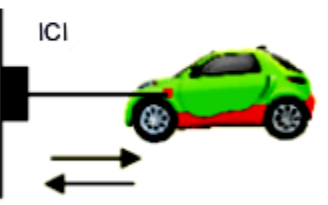
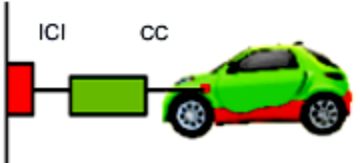
recharge	Courant (A)		Type de charge et schéma de connexion	type de connexion	
1	monophasé	16	Charge lente, avec câbles de boîtier domestique standard		UN B
	trois phases				
2	monophasé	32	Charge lente avec protection de câble		B
	trois phases				
3	monophasé	32	Charge lente ou rapide, avec contrôle et protection dans l'installation		A, B, C
	trois phases	250			c
4	monophasé	400	Chargeur externe		c
	trois phases				

Tableau 1.7 : Différence De Types De Recharge d'un Véhicule Electrique

CA - Courant alternatif

CC - Courant continu

A – Câble avec connexion permanente à la BT

B – Câble avec connexion non permanente à la BT

C – Câble connecté en permanence à la borne de recharge

Le conducteur d'un véhicule électrique pourra choisir un mode de charge qui lui est plus favorable, en tenant compte du temps disponible et de l'état de charge (SoC) qui lui garantit de parcourir le reste du trajet.

. La figure ci-dessous répertorie le temps de charge, le pourcentage de l'état de charge de la batterie, le mode de charge et l'alimentation fournie à la batterie.

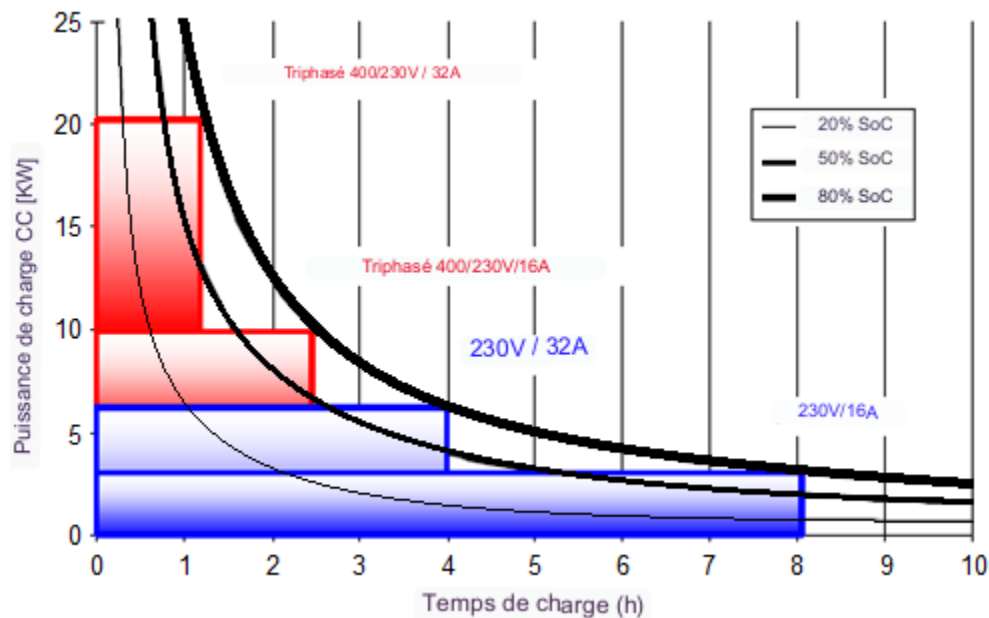


Figure 1.10 Relation entre le temps et l'état de charge soc, selon le mode de charge, pour un Batterie haute énergie

I.4.3 Le convertisseur

Le rôle de cet organe est de convertir le courant alternatif provenant du réseau électrique en courant continu (DC), car les batteries ne sont capables de stocker l'énergie qu'en courant continu. Afin d'accélérer le processus de recharge, certaines bornes électriques convertissent l'électricité elles-mêmes pour injecter directement du courant continu dans la batterie. Ces bornes, appelées « bornes de recharge rapide » et « ultra-rapides » DC, sont présentes sur les stations d'autoroute, mais leur coût élevé et leur encombrement les rendent impossibles à installer chez un particulier pour le moment.

Convertisseur	Fonction
AC/DC	Transformer le courant alternatif en courant continu pour charger la batterie ou alimenter le moteur électrique.
DC/AC	Transformer le courant continu de la batterie en courant alternatif pour alimenter les équipements électriques du véhicule.
DC/DC	Réguler la tension et le courant fournis par la batterie pour alimenter les équipements électriques du véhicule.
Chargeur embarqué	Convertir le courant alternatif de la prise de recharge en courant continu pour charger la batterie.
Chargeur externe	Convertir le courant alternatif de la prise de recharge en courant continu pour charger la batterie.
AC/AC	Transformer le courant alternatif en courant alternatif de tension et de fréquence différentes pour adapter la tension de la batterie à celle du réseau électrique ou réguler la vitesse du moteur électrique.

Tableau 1.8 : les types de convertisseur

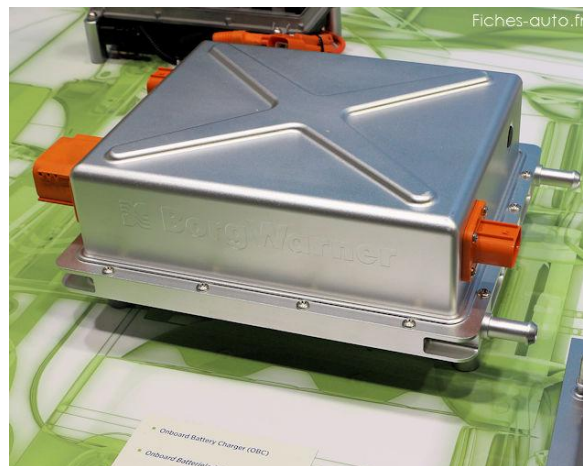


Figure 1.11 : convertisseur de véhicule électrique

I.4.4 La batterie

La batterie est composée de milliers de cellules qui agissent comme des piles et sont rassemblées pour permettre la distribution du courant. Sa capacité de stockage d'énergie est mesurée en kilowattheures (kWh), similaire à un réservoir de carburant mesuré en litres, et sa puissance électrique fournie est mesurée en kilowatts (kW). Pour une batterie de 50 kWh rechargée à une puissance de 10 kW, elle prendra environ 5 heures pour être rechargée complètement, mais la vitesse de recharge ralentira automatiquement au-delà de 80% pour éviter les dommages. Le courant stocké dans la batterie est ensuite dirigé vers un ou plusieurs moteurs électriques qui utilisent un champ magnétique généré dans le stator et du rotor pour faire tourner les roues directement ou via un réducteur à rapport unique pour optimiser sa vitesse de rotation. [9]

I.4.4.1 Types de batterie

Il existe plusieurs types de batteries, notamment :

I.4.4.1.1 Batteries au plomb-acide :

ces batteries sont les plus courantes et sont utilisées dans de nombreux véhicules conventionnels, ainsi que dans les systèmes d'énergie solaire et éolienne. Elles sont peu coûteuses, mais ont une durée de vie relativement courte et nécessitent un entretien régulier.

I.4.4.1.2 Batteries nickel-cadmium (Ni-Cd) :

ces batteries ont une densité d'énergie plus élevée que les batteries au plomb-acide, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker plus d'énergie dans le même espace. Elles ont également une durée de vie plus longue et sont moins sensibles aux températures extrêmes. Cependant, elles contiennent du cadmium, un métal toxique qui peut avoir un impact environnemental négatif s'il n'est pas correctement recyclé.

I.4.4.1.3 Batteries nickel-métal-hydrure (nimh) :

ces batteries ont une densité d'énergie plus élevée que les batteries au plomb-acide et sont plus respectueuses de l'environnement que les batteries Ni-Cd. Elles ont également une durée de vie plus longue et sont moins sensibles aux températures extrêmes. Elles sont souvent utilisées dans les véhicules hybrides et les appareils électroniques grand public.

I.4.4.1.4 Batteries au lithium-ion (Li-ion) :

ces batteries ont la plus grande densité d'énergie de tous les types de batteries et sont utilisées dans les véhicules électriques, les ordinateurs portables, les téléphones portables et d'autres appareils électroniques. Elles ont une durée de vie relativement longue et ne nécessitent pas d'entretien régulier. Cependant, elles sont plus coûteuses que les autres types de batteries et peuvent poser des problèmes de sécurité si elles sont mal utilisées ou mal entretenues. [9]

I.4.4.1.5 Batteries au lithium-polymère (Li-Po) :

ces batteries sont similaires aux batteries Li-ion, mais ont une forme plus plate et peuvent être fabriquées dans des tailles et des formes personnalisées. Elles ont une densité d'énergie plus élevée que les batteries Li-ion et sont souvent utilisées dans les drones, les appareils électroniques portables et les voitures télécommandées. Cependant, elles peuvent être plus sensibles aux températures extrêmes et peuvent poser des problèmes de sécurité si elles sont mal utilisées ou mal entretenues.

Comme nous l'avons vu, chacune de ces batteries a des caractéristiques différentes des autres dans ces deux tableaux, nous trouvons toutes les caractéristiques et les différences entre eux :

Type de batterie	Densité d'énergie (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Tension (V)	Cycle de vie	Taux d'auto-décharge (%/mois)
Plomb-acide	30-50	180-250	2	200-300	5-10
Nickel-cadmium	40-60	150-200	1,2	1500	10
Nickel-métal hydrure	60-120	300-600	1,2	500-1000	30
Lithium-Ion	100-265	300-2000	3,6-3,8	500-1000	5-10
Lithium-polymère	100-265	300-1500	3,6-3,8	300-500	5

Tableau 1.9 : Comparaison des différents types des batteries.

I.4.5 Transmission

Du fait que le moteur électrique d'une voiture est capable de fonctionner sans problème jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tours par minute, la voiture électrique ne nécessite pas de boîte de vitesses car le moteur fournit directement la rotation, contrairement à un moteur thermique qui doit convertir le mouvement rectiligne des pistons en mouvement circulaire. En conséquence, il y a beaucoup moins de pièces en mouvement dans une voiture électrique que dans un véhicule thermique, ce qui la rend moins sujette à l'usure et nécessite moins d'entretien, comme l'absence de besoin d'huile pour le moteur ou de courroie de distribution. [10]

I.4.6 Le système de contrôle de freinage régénératif

Les véhicules à batterie ont l'avantage supplémentaire de pouvoir générer de l'électricité lorsqu'un moteur électrique tourne sans être alimenté en courant, comme lorsque l'on retire le pied de la pédale d'accélérateur ou que l'on freine. Cette énergie récupérée est directement injectée dans la batterie, et certains modèles de voitures électriques récents proposent même des modes permettant de choisir la puissance de ce freinage régénératif. Réglé au maximum, il freine fortement le véhicule sans solliciter les disques et les plaquettes tout en économisant quelques kilomètres d'autonomie. À l'inverse, dans les voitures thermiques, cette énergie est simplement gaspillée et contribue à l'usure du système de freinage.

Nous pouvons résumer son fonctionnement dans les points suivants :

- Lorsque le conducteur appuie sur la pédale de frein, le système de freinage régénératif est activé.
- Les capteurs de pression détectent la pression exercée sur les freins et envoient un signal au système de contrôle électronique.
- Le système de contrôle électronique calcule la quantité d'énergie qui peut être récupérée grâce à la décélération du véhicule et envoie un signal aux moteurs électriques pour qu'ils ralentissent le véhicule.
- Les moteurs électriques agissent comme des générateurs pour convertir l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique, qui est ensuite stockée dans la batterie.
- Le système de contrôle électronique gère la répartition de l'énergie récupérée entre la recharge de la batterie et la dissipation de la chaleur produite par les freins.
- Le système de freinage régénératif permet donc de récupérer une partie de l'énergie dépensée pour accélérer le véhicule, ce qui améliore son autonomie et réduit l'usure des freins. [10]

I.5 Avantages et inconvénient des véhicules électriques

I.5.1 Avantages de la voiture électrique

La voiture électrique présente plusieurs avantages :

Écologique : la voiture électrique ne produit pas d'émissions polluantes, ce qui la rend respectueuse de l'environnement et contribue à la réduction de la pollution atmosphérique.

Économique : les coûts d'exploitation d'une voiture électrique sont souvent inférieurs à ceux d'une voiture thermique, notamment en termes de coût de carburant et d'entretien. De plus, les gouvernements offrent souvent des incitations fiscales pour l'achat de voitures électriques.

Silencieuse : le fonctionnement du moteur électrique est silencieux, ce qui contribue à réduire le bruit de la circulation.

Performante : les voitures électriques ont un couple plus élevé et une accélération plus rapide que les voitures thermiques, ce qui peut offrir une meilleure expérience de conduite.

Confortable : le moteur électrique ne vibre pas, ce qui offre une conduite plus douce et plus confortable.

Technologique : les voitures électriques intègrent souvent des fonctionnalités innovantes et avancées, telles que la conduite autonome et les systèmes de divertissement avancés.

Autonomie : les voitures électriques modernes ont une autonomie qui peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres sur une seule charge, ce qui les rend parfaitement adaptées pour les trajets quotidiens et les longs trajets.

I.5.2 Inconvénients de la voiture électrique

Autonomie limitée : bien que l'autonomie des voitures électriques modernes soit en constante amélioration, elle reste limitée par rapport aux voitures thermiques. Les conducteurs doivent donc planifier leurs trajets en conséquence et s'assurer qu'ils ont suffisamment de charge pour atteindre leur destination.

Temps de recharge : le temps de recharge des batteries de voitures électriques est souvent plus long que le temps qu'il faut pour faire le plein de carburant d'une voiture thermique. Cela peut limiter la flexibilité et la spontanéité des conducteurs lorsqu'ils doivent recharger leur voiture.

Coût initial élevé : le coût d'achat d'une voiture électrique est souvent plus élevé que celui d'une voiture thermique. Bien que les coûts d'exploitation soient souvent inférieurs, cela peut être un obstacle pour les acheteurs potentiels.

Infrastructures de recharge insuffisantes : les infrastructures de recharge pour les voitures électriques ne sont pas encore aussi développées que les stations-service pour les voitures thermiques. Cela peut rendre plus difficile la recharge de la voiture pour certains conducteurs.

Dépendance à l'électricité : la voiture électrique dépend de l'électricité pour fonctionner, ce qui signifie que la qualité et la fiabilité de l'alimentation électrique peuvent avoir un impact sur l'utilisation de la voiture. En outre, en l'absence de sources d'électricité renouvelable, la production d'électricité peut avoir des impacts environnementaux négatifs.

I.6 Conclusion

En fin dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les véhicules électriques, y compris un bref historique, la présentation des composants et de l'architecture d'un véhicule électrique, ainsi que les avantages et les inconvénients. Tout nous laisse à croire que la voiture électrique peut réellement devenir une alternative aux voitures actuelles, cependant, il y a encore des défis à surmonter, tels que la capacité et le temps de chargement des batteries, ainsi que des aspects pratiques tels que le chauffage et le dégivrage qui doivent être correctement résolus. Les indicateurs mondiaux dans le domaine des voitures électriques indiquent que l'avenir sera aux voitures électriques pour plusieurs raisons, notamment la préservation de l'environnement, l'exploitation des énergies renouvelables et l'élimination des énergies non renouvelables coûteuses. En somme, ce chapitre nous donne un aperçu complet de tous les composants du véhicule tout électrique et souligne l'importance de l'innovation continue dans ce domaine en pleine évolution.

Chapitre 02

**Modélisation de la
machine asynchrone et la
commande vectoriel**

II.1 Introduction

La modélisation de la machine asynchrone est une phase indispensable. Il est donc évident que cette étape est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse.

Cette modélisation nous permet de simuler la machine et déduire les lois de commande, en manipulant les équations qui, décrivent le comportement de la machine. Ainsi l'élaboration du modèle mathématique sous forme dynamique de la machine asynchrone est indispensable pour observer et analyser les différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part, et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire, s'il y a lieu pour pallier aux différents effets contraignants qui peuvent accompagner généralement, les opérations de démarrage, de variation de vitesse etc...

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Vérifier sa validité.

Dans ce chapitre, sera présentée la modélisation de PARK d'une machine asynchrone, suivi d'une vérification par simulation numérique du modèle de la machine, dont les paramètres sont donnés en annexe .

II.2 Description et principe de fonctionnement :

Le moteur asynchrone comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator (primaire), portant un bobinage triphasé logé dans les encoches, relié à la source d'alimentation, et l'autre mobile ou rotor (secondaire) qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer. [12]

Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction :
[12]

- La machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le secondaire (rotor) est en court-circuit.
- La vitesse de rotation Ω_s du champ tournant d'origine statorique, rigidement liée à la fréquence f_s de tension triphasée d'alimentation.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad (\text{II-1})$$

- Avec :
- ω_s : Pulsation statorique , liée à la fréquence du stator.
- P : nombre de pair de pôle de la force magnétomotrice résultante.
- Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court-circuit, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à Ω_s , et on note :
- g : Glissement de la vitesse de rotation par rapport à celle du champ tournant statorique.
- f_s : Fréquence de la vitesse statorique.
- f_r : Fréquence de la vitesse rotorique.
- On obtient les relations de glissement g
- $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{f_s - f}{f_s}$ (II-2)

Dans une machine asynchrone, la condition de fréquence, $\omega_s = \omega_g + \omega$ d'où $f_s = f_g + f$ est constamment satisfait. Quand la pulsation mécanique ω est égale à la pulsation du champ tournant ω_s , le phénomène d'induction électromagnétique disparaît.

- ω_g : Pulsation de glissement.

Dans les conditions nominales de fonctionnement de la machine en moteur, le glissement exprimé en pourcent est de quelques unités. Une augmentation de la charge mécanique provoque une augmentation du glissement et des pertes joules dans les enroulements statoriques et rotoriques.

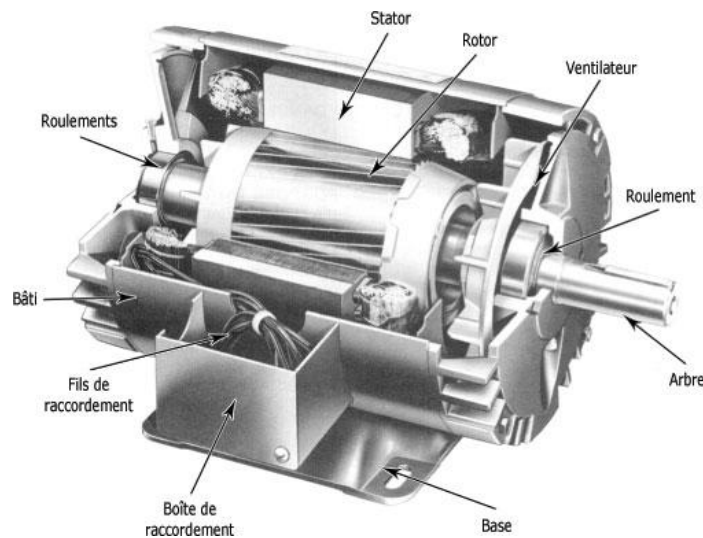


Figure 2.1 : Schéma représentant les différents éléments de la M.A.S

II.3 Modélisation d'une machine asynchrone:

II.3.1 Hypothèses simplificatrices:

Les hypothèses généralement admises dans le modèle de la machine asynchrone sont:

1. l'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables).
2. La parfaite symétrie de la machine.
3. La répartition spatiale sinusoïdale des différents champs magnétique le long de l'entrefer (l'entrefer est constant).

4. l'équivalence du rotor en court-circuit à un enroulement triphasé monté en étoile.
5. L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques.
6. Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

7. L'additivité du flux.
8. La constance des inductances propres.
9. La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques [15].

II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :

On a représenté au stator trois bobinages, dont les axes sont décalés de 120° , et trois autres au rotor, parcourus chaque fois par un système de courants triphasé. Par convention, les bobinages sont alimentés par un système de tensions triphasé sinusoïdal direct [14] .

On peut considérer la machine asynchrone triphasée comme représentée par les bobinages de la figure (I.4)

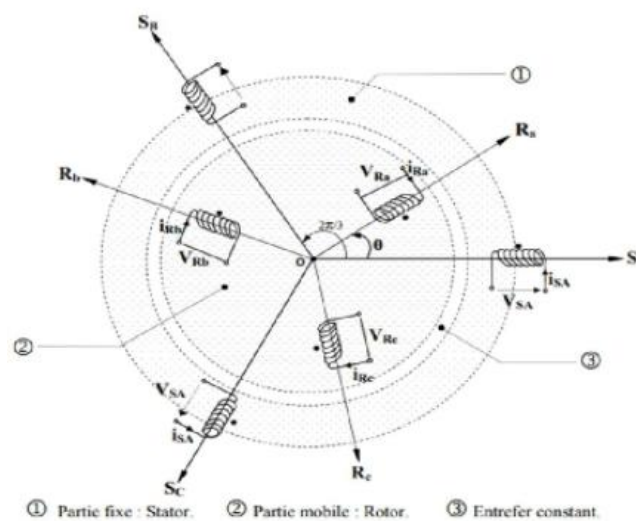


Figure 2.2 : Représentation schématique d'une M.A.S triphasé

II.3.2.1 Equations électriques :

Par l'application de la loi d'ohm à chaque phase (figureII-1), on peut écrire les deux équations statoriques et rotoriques comme suit :

- Pour l'ensemble des phases Statoriques :

$$[V_{Sabc}] = [Rs] [i_{Sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{Sabc}] \quad (II-3)$$

- Pour l'ensemble des phases Rotoriques :

$$[V_{rabc}] = [0] = [Rr] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (II-4)$$

Avec :

$[V_s abc] = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T$: Vecteur de tension statorique.

$[V_r abc] = [V_{ra} V_{rb} V_{rc}]^T$: Vecteur de tension rotorique.

$[i_s abc] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$: Vecteur du courant statorique.

$[i_r abc] = [i_{ra} i_{rb} i_{rc}]^T$: Vecteur du courant rotorique.

$$[Rs] = \begin{pmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{pmatrix}, \quad [Rr] = \begin{pmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{pmatrix}$$

Rs, Rr ; Les résistances par phase respectivement du stator, et du rotor.

II.3.2.2 Equations magnétiques :

Les conséquences importantes des hypothèses simplificatrices conduisent aux relations linéaires entre les flux et les courants :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \\ \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s M_s & M_s M_1 M_3 & M_2 \\ M_s l_s & M_s M_2 M_1 & M_3 \\ M_s M_s & l_s M_3 M_2 & M_1 \\ M_1 M_2 & M_3 l_r M_r & M_r \\ M_3 M_1 & M_2 M_r l_r & M_r \\ M_2 M_3 & M_1 M_r M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (II-5)$$

Les coefficients instantanés de mutuelle inductance entre le rotor et le stator s'expriment en fonction de M_{sr} et de θ :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_3 = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (II-6)$$

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances:

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] [M_{sr}] \\ [M_{rs}] [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

$$\text{Avec : } [L_s] = \begin{bmatrix} l_s M_s M_s \\ M_s l_s M_s \\ M_s M_s M_s \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

$$\text{Et } [L_r] = \begin{bmatrix} l_r M_r M_r \\ M_r l_r M_{sr} \\ M_r M_r M_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Telque :

M_{sr} : La valeur maximale d'inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

$[L_s]$: Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$: Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle entre stator et rotor.

θ : l'angle de rotation du rotor par rapport au stator.

En mettant (II.7) dans, (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II-11})$$

$$[V_r] = [0] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (\text{II-12})$$

II.3.2.3 Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) :

$$C_{em} = p [i_{sabc}]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{II-13})$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II-14})$$

$$\text{Où :} \quad \Omega = \frac{\omega}{p}$$

Avec :

J : moment d'inertie du rotor,

Ω : vitesse angulaire mécanique du rotor.

f : coefficient de frottement visqueux.

C_{em} : couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : couple résistant, ou de charge.

ω : vitesse angulaire électrique du rotor.

II.3.2.4 Transformation de Park :

La transformation de PARK permet le passage du système triphasé au système biphasé en

faisant correspondre aux variables réelles (a, b, c) leurs composantes homopolaire, directe et en quadrature (o, u, v) [2, 5].

Le passage du système triphasé vers le système biphasé revient à exprimer les composantes

«u, v» en fonction des anciens axes «xa, xb, xc» présentés dans la Figure (I-02). Les deux modèles sont identiques du point de vue électrique et magnétique

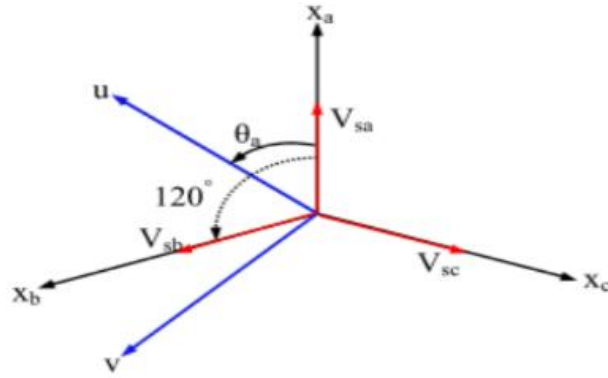


Figure 2.3 : Représentation des deux systèmes triphasé et biphasé

θ_a : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe x_a et l'axe u .

θ_a : Représente l'angle instantané entre la phase de l'axe x_a et l'axe u .

La transformation qui traduit ce passage du système triphasé au système biphasé (U, V) est dite transformation de Park et est donnée par [15]:

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta_{obs})] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

X : Tension, courant ou flux.

« o » : indice de l'axe homopolaire.

u : Indice de l'axe « u ».

v : Indice de l'axe « v ».

On ajoute la composante homopolaire pour équilibrer la transformation (cette composante est égale à zéro dans le cas d'un système triphasé équilibré).

$[P(\theta_{obs})]$: est la matrice de Park, définie par :

$$[P(\theta_{obs})] = k \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Où :

$$\theta_{obs} = \theta + \theta_r \text{ (II-17)}$$

θ : L'angle de rotation du rotor par rapport au stator.

θ_r : angle de rotation de (U,V) par rapport au rotor.

θ_{obs} : L'angle d'observation dans la matrice [P] (écart angulaire entre l'axe "a" du système triphasé et l'axe (U) du système biphasé.

k : est une constante qui peut prendre soit la valeur $(\sqrt{2/3})$ pour la conservation des puissances, soit la valeur $(2/3)$ pour la conservation des amplitudes

II.3.3 Modèle de la MAS dans le système biphasé :

La transformation de PARK consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe (u, v).

II.3.3.1 Equations électriques :

$$\begin{cases} V_{su} = R_s \cdot i_{su} + \frac{d\Phi_{su}}{dt} - \frac{d\theta_{obs}}{dt} \cdot \Phi_{sv} \\ V_{sv} = R_s \cdot i_{sv} + \frac{d\Phi_{sv}}{dt} + \frac{d\theta_{obs}}{dt} \cdot \Phi_{su} \\ 0 = R_r \cdot I_{ru} + \frac{d\Phi_{ru}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{ru} \\ 0 = R_r \cdot I_{rv} + \frac{d\Phi_{rv}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{ru} \end{cases} \quad \text{(II-18)}$$

II.3.3.2 Equations magnetiques:

$$\begin{cases} \Phi_{su} = L_s \cdot i_{su} + M \cdot i_{ru} \\ \Phi_{sv} = L_s \cdot i_{sv} + M \cdot i_{rv} \\ \Phi_{ru} = L_r \cdot i_{ru} + M \cdot i_{su} \\ \Phi_{rv} = L_r \cdot i_{rv} + M \cdot i_{sv} \end{cases} \quad \text{(II-19)}$$

II.3.3.3 Equations mecaniques :

$$\begin{cases} C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \\ C_e = \frac{M}{L_r} p (\phi_{ru} \cdot i_{sv} - \phi_{rv} \cdot i_{su}) \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

II.3.3.4 Définitions des différents référentiels :

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axe (u, v) qui dépendent généralement des objectifs de l'application [3]. On peut choisir le référentiel le mieux adapté aux problèmes posés. Le choix se ramène pratiquement à trois référentiels orthogonaux Figure (I.03).

- Référence des axes (α, β) système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = 0$)
- Référence des axes (x, y) système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = \theta_r$)
- Référence des axes (d, q) système biphasé à axes orthogonaux ($\theta_a = \theta_s$)
- Avec l'angle θ_a : est une position quelconque d'observation que l'on peut choisir de trois

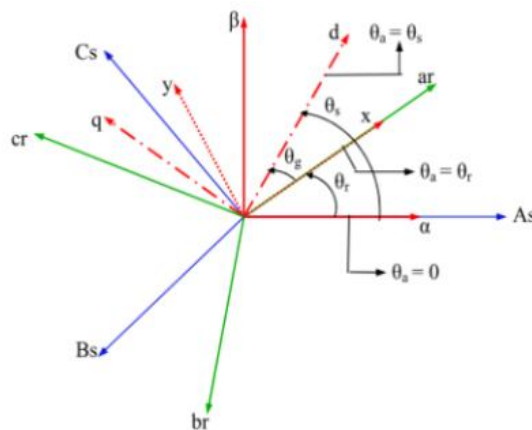


Figure 2.4 : Orientation des axes (u, v) par rapport aux différents référentiels

II.3.3.5 Différents repères biphasés

Le modèle de la machine a été présenté dans un repère biphasé (U, V) avec une orientation quelconque, cependant il existe différentes possibilités pour fixer l'orientation du repère et cela dépend généralement des objectifs de l'application, le choix du référentiel nous ramène pratiquement au trois cas possibles.

- Repère d'axes (α, β) : le système biphasé lié au stator ($\theta_{obs} = 0$).
- Repère d'axes (d, q) : le système biphasé lié au champ tournant ($\theta_{obs} = \theta_s$).
- Repère d'axes (x, y) : le système biphasé lié au rotor ($\theta_{obs} = \theta$).

Avec:

θ_s : Angle électrique de rotation du champ tournant.

II.3.3.6 Choix du référentiel :

L'étude analytique du moteur asynchrone à l'aide de la transformation de Park, nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les équations analytiques. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes (u, v) qui se fait en fonction du régime de fonctionnement (régime transitoire ou permanent) d'une part et d'autre part à la technique de commande.

II.3.3.7 Référentiel lié au stator (α, β) :

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (α, β) lié au stator prennent la forme suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\phi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\phi_{s\beta}}{dt} \\ 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\phi_{r\alpha}}{dt} + \omega \phi_{r\beta} \\ 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\phi_{r\beta}}{dt} - \omega \phi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (\text{II-21})$$

Ce référentiel possède des tensions et des courants réelles et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

II.3.3.8 Référentiel lié au rotor (x, y):

Ce référentiel utilisé pour l'étude des régimes transitoires dans les machines asynchrones et synchrones. Le système d'équations (II.18) devient alors:

$$\begin{aligned} V_{sx} &= R_s \cdot I_{sx} + \frac{d\Phi_{sx}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{sy} \\ V_{sy} &= R_s \cdot I_{sy} + \frac{d\Phi_{sy}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{sx} \\ V_{rx} &= 0 = R_r \cdot I_{rx} + \frac{d\Phi_{rx}}{dt} \\ V_{ry} &= 0 = R_r \cdot I_{ry} + \frac{d\Phi_{ry}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II-22})$$

II.3.3.9 Référentiel lié au champ tournant (d, q) :

Le système d'équations (II-18) devient alors:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - p\Omega) \cdot \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - p\Omega) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus facile de faire la régulation de ces grandeurs.

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, raison pour laquelle ce référentiel est utilisé pour la commande des machines asynchrone.

II.3.3.10 Expressions du couple électromagnétique et de la puissance:

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (d-q) est donnée par l'expression suivante:

$$P_e = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} + V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \quad (\text{II-24})$$

Elle se décompose en trois termes :

- Puissance dissipée en pertes joules:

$$R_s \cdot (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + R_r \cdot (I_{rd}^2 + I_{rq}^2) \quad (\text{II-25})$$

- Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source:

$$P_{em} = I_{sd} \cdot \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + I_{sq} \cdot \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + I_{rd} \cdot \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + I_{rq} \cdot \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad (\text{II-26})$$

- Puissance mécanique:

$$P_{mec} = \omega(I_{rd}\Phi_{rq} - I_{rq}\Phi_{rd}) \quad (\text{II-27})$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{P_{mec}}{\Omega} = p \frac{P_{mec}}{\omega} \text{ telque } : \Omega = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II-28})$$

Ω : la vitesse de rotation mécanique du rotor [rad/s]

ω : la vitesse de rotation électrique du rotor [rad/s]

En tenant compte des expressions (II.19), (II.27) et (II.28), nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P. (\Phi_{rq} \cdot I_{rd} - \Phi_{rd} \cdot I_{rq}) \\ C_e = P. (\Phi_{sd} \cdot I_{sq} - \Phi_{sq} \cdot I_{sd}) \\ C_e = P. L_m. (I_{rd} \cdot I_{sq} - I_{sd} \cdot I_{rq}) \\ C_e = P. \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

II.3.3.11 Mise en équation d'état :

Une machine asynchrone alimentée en tension, a comme variables de commande, les tensions statoriques $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$ et comme perturbation le couple résistant C_r . Dans notre étude le vecteur d'état est constitué par les courants statoriques et les flux rotoriques $(i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta})$.

Le vecteur de sortie $[X]$, peut avoir une des formes des différentes expressions :

$$[X] = [i_{sd} i_{sq} i_{rd} i_{rq}]^T$$

$$[X] = [\Phi_{sd} \Phi_{sq} \Phi_{rd} \Phi_{rq}]^T$$

$$[X] = [\Phi_{sd} \Phi_{sq} i_{rd} i_{rq}]^T$$

$$[X] = [i_{sd} i_{sq} \Phi_{rd} \Phi_{rq}]^T$$

Ainsi, notre choix est porté sur le vecteur $[X] = [i_{sd} i_{sq} \Phi_{rd} \Phi_{rq}]^T$.

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II-30})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} [X] = [i_{sd} i_{sq} \Phi_{rd} \Phi_{rq}]^T \\ [U] = [V_{sd} V_{sq}]^T \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

Pour le référentielle lié au champ tournant (d, q) , on a :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & \omega_s & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{pM}{\sigma L_s L_r} \Omega \\ -\omega_s & -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & -\frac{pM}{\sigma L_s L_r} \Omega & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s - \omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -(\omega_s - \omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(II-32)

Pour le référentiel lié au stator ($\alpha - \beta$), le système devient :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & 0 & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{pM}{\sigma L_s L_r} \Omega \\ 0 & -\frac{1}{L_s\sigma} \left(R_s + \frac{M^2}{T_r L_r} \right) & -\frac{pM}{\sigma L_s L_r} \Omega & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -p\Omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & p\Omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(II-33)

II.4 Résultats de simulation

Sur cette partie on va simuler une machine asynchrone a vide et pour un couple résistant $C_r=8$ N.m et dans la figure 2.5 le schéma nous utilisons pour simuler sur MATLAB/SIMLUNK :

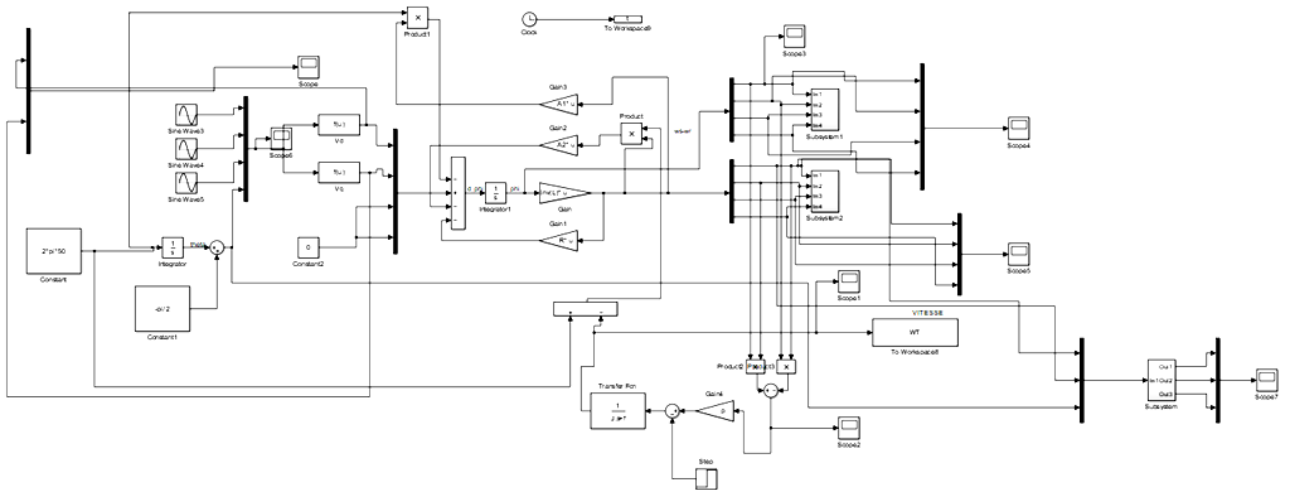


Figure 2.5 : Bloc de simulation

Pour $C_r=0$ N.m :

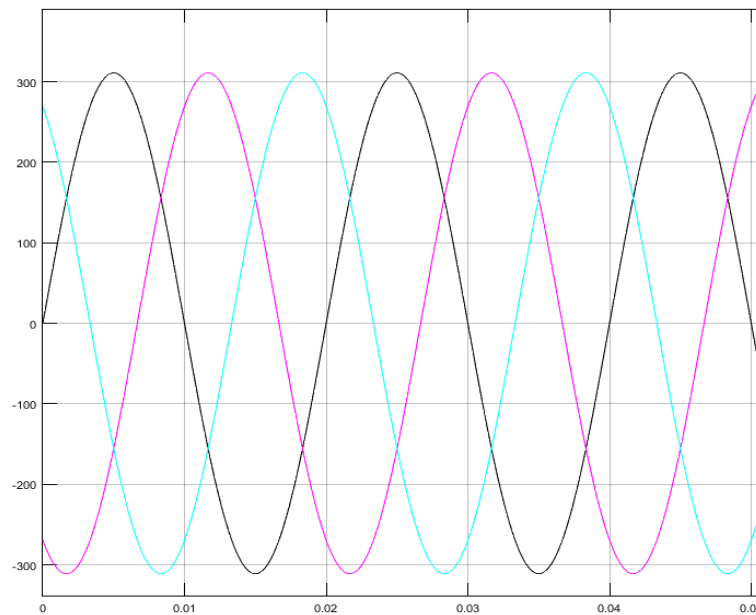


Figure 2.6 : Courbe de La source

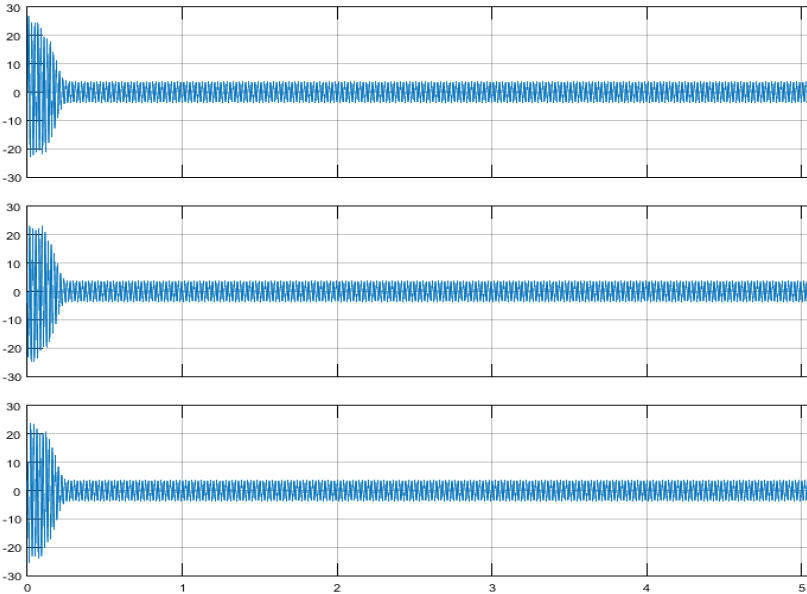


Figure 2.7 : Les courant Isa, Isb, Isc (A)

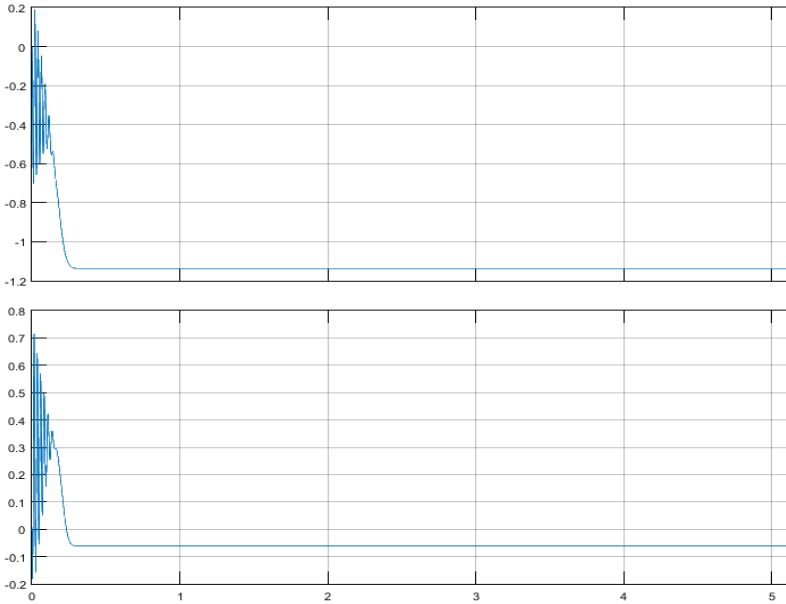


Figure 2.8 : Flux phidr et phiqr (Wb)

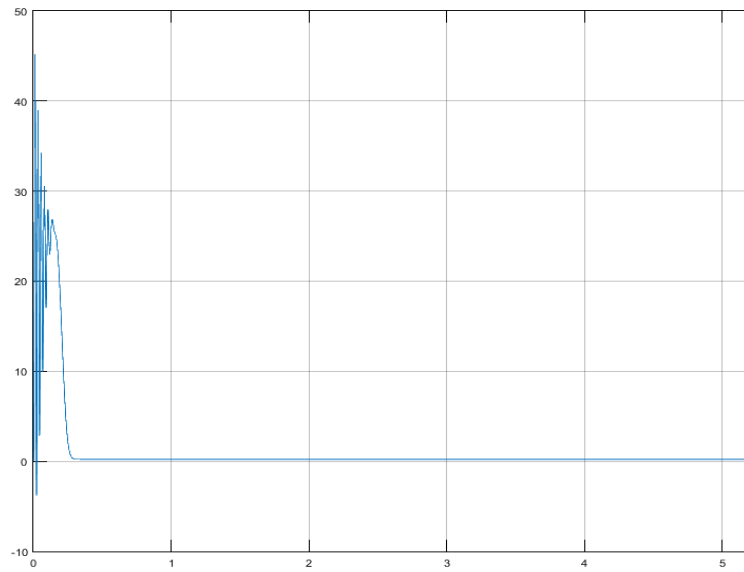


Figure 2.9 : Le couple électromagnétique (N.m)

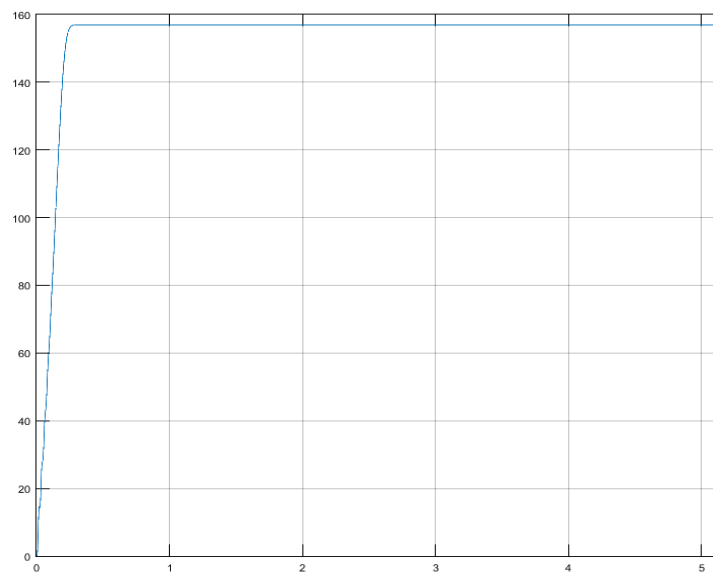


Figure 2.10 : La vitesse de rotation mecanique (tr/min)

II.4.1 Interprétation des résultats

Courant et de flux statorique et rotorique

Nous remarquons que le courant au démarrage est environ cinq fois supérieur au courant nominal de la machine. Cette surintensité est généralement observée au début du fonctionnement et est de courte durée.

Au démarrage, lorsque la machine est mise sous tension, il peut y avoir une demande de courant élevée pour surmonter l'inertie et l'effet de charge initiale. Cette surintensité transitoire est souvent appelée "appel de courant au démarrage". Cela peut se produire en raison de la faible résistance du circuit statorique ou d'autres facteurs liés à la charge. Cependant, cette surintensité disparaît au bout de quelques alternances, ce qui signifie qu'elle diminue rapidement avec le temps. Cela est dû au fait que la machine électrique atteint progressivement une vitesse de fonctionnement stable et que les conditions de charge deviennent plus équilibrées.

Il est important de noter que cette surintensité transitoire est normale et acceptable, car elle est de courte durée. Les machines électriques sont conçues pour résister à ces surintensités momentanées sans risque de surchauffe dangereuse. Cependant, il est toujours recommandé de surveiller et de contrôler les paramètres de fonctionnement pour assurer un fonctionnement sûr et efficace de la machine à long terme.

La vitesse

La figure montre l'évolution de la vitesse de rotation d'une machine asynchrone (MAS) lors du démarrage. Au début, la vitesse augmente progressivement en réponse à l'application du couple moteur. Il peut y avoir des oscillations initiales causées par l'inertie du rotor et d'autres facteurs. Pendant ces oscillations, l'énergie cinétique du rotor est convertie en énergie électromagnétique et vice versa. Finalement, la vitesse se stabilise autour de 156 tr/min, correspondant à la vitesse de régime pour une MAS avec 2 paires de pôles. Cependant, les caractéristiques spécifiques de chaque machine peuvent influencer ces observations.

Le couple électromagnétique

La figure décrit l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps. Au premier instant du démarrage le couple électromagnétique est fortement

pulsatoire contenant un pic presque 45.2 N.m avant qu'il soit amorti et tend vers le régime de fonctionnement à vide.

Pour $C_r = 8 \text{ N.m}$:

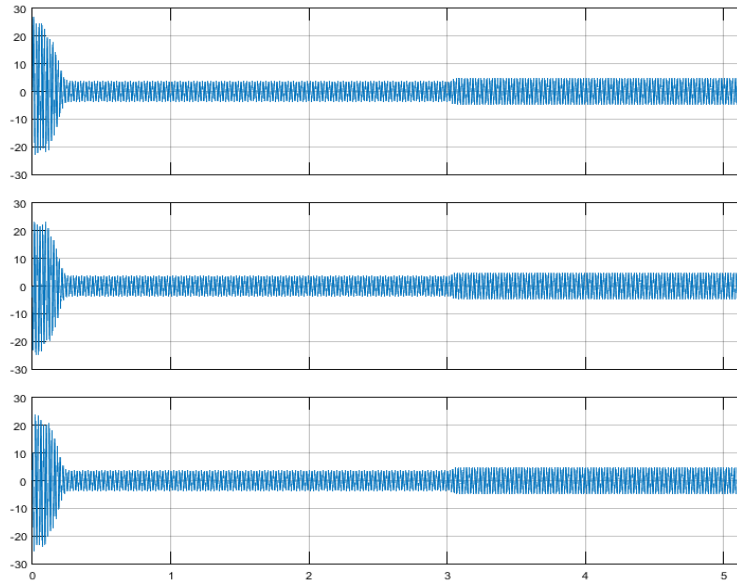


Figure 2.11: Les courant I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} (A)

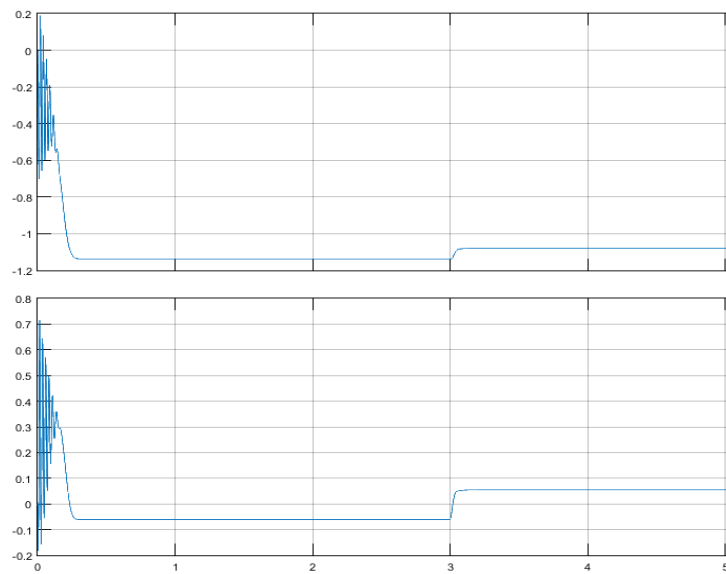


Figure 2.12: Flux ϕ_{idr} et ϕ_{iqr} (Wb)

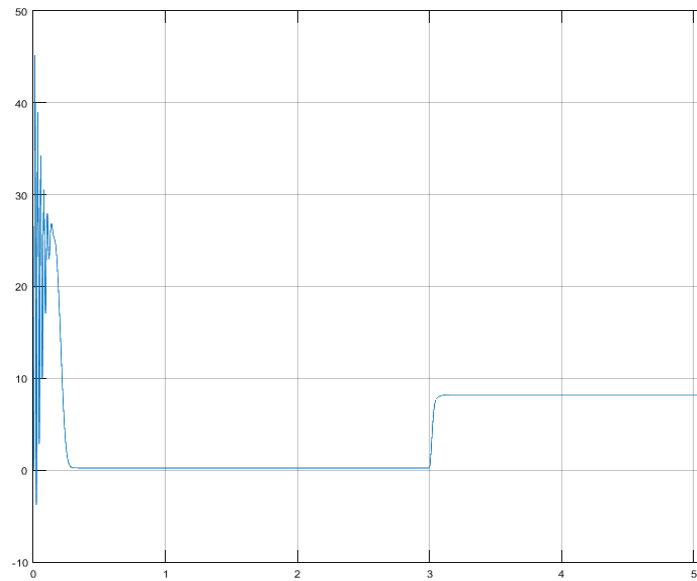


Figure 2.13: Le couple électromagnétique (N.m)

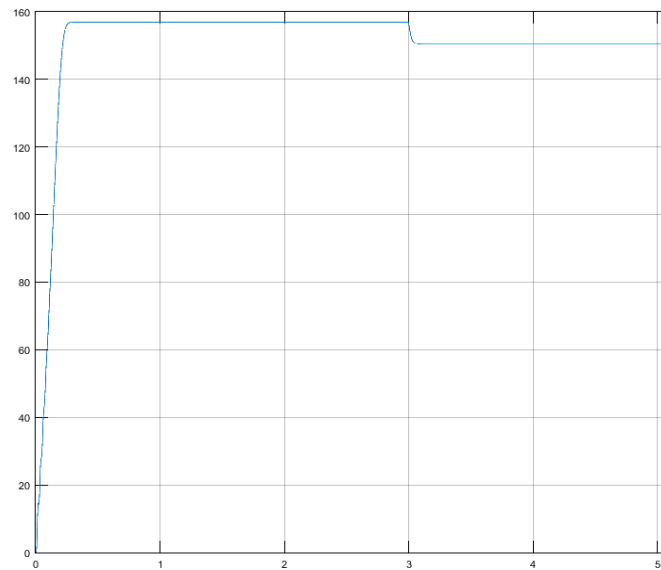


Figure 2.14: La vitesse de rotation mecanique (tr/min)

II.4.2 Interprétation des résultats

Courant et de flux statorique et rotorique

Identique à la note précédente, cependant a l'instant $t=3\text{sec}$, on charge la machine avec un couple $C_r=8\text{N.m}$, on remarque une augmentation dans le courant statorique accompagné par une faible diminution du flux statorique.

La vitesse

Identique à la note précédente, cependant quand on charge la machine à l'instant $t=3\text{sec}$, on constate une diminution de la vitesse.

Le couple électromagnétique

Identique à la note précédente, cependant au moment du chargement de la machine ($C_r=8\text{ N.m}$), le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant

II.5 Modélisation de l'alimentation de la machine :

Le moteur asynchrone utilisé dans les systèmes d'entraînement à vitesses variables, nécessite une alimentation qui doit fournir l'énergie électrique et la récupérer en cas de freinage. Cette alimentation est assurée par un onduleur de tension. L'onduleur de tension est un convertisseur statique permettant la transformation d'une tension continue en une ou des tensions alternatives, il est tributaire des caractéristiques de la source continue et de la charge entre lesquelles il est inséré [16].

Les caractéristiques exigées de l'actionneur électrique dépendent à la fois de la machine, de son alimentation et de la commande de l'ensemble. Ces caractéristiques sont :

- Un couple avec le minimum d'ondulation possible, contrôlable par le plus petit nombre de variable, en régime dynamique comme en régime permanent.
- Une large plage de variation de vitesse.
- Des constantes de temps électrique et mécanique faible.
- La source d'alimentation triphasée est supposée symétrique, de fréquence et d'amplitude de tension constante.

Ces caractéristiques guident les concepteurs au choix convenable des semi-conducteurs à employer et leurs commandes. Dans cette partie, nous allons présenter la MAS associée à son alimentation qui est un onduleur de tension à MLI triphasé [17].

L'alimentation de l'onduleur est constituée d'un pont redresseur triphasé à diodes, un filtre

($L_f C_f$), et un circuit de freinage. Comme illustre la Figure(II-4):

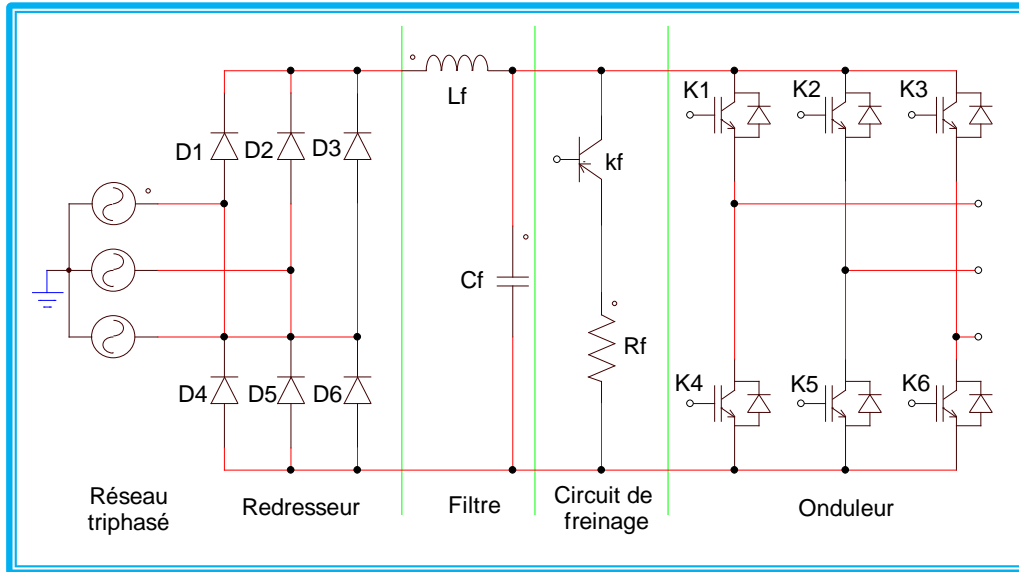


Figure 2.15 : Schéma de l'association convertisseur –machine

II.5.1 Modélisation du redresseur triphase :

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu. Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. La figure II.5 représente le schéma de principe du redresseur triphasé double alternance à diodes. Le redresseur est alimenté par un système de tension triphasé exprimé par :

$$\begin{cases} V_1(t) = V_{max} \sin(2\pi ft) \\ V_2(t) = V_{max} \sin(2\pi ft - 2\pi/3) \\ V_3(t) = V_{max} \sin(2\pi ft + 2\pi/3) \end{cases} \quad (II-34)$$

Chacune des trois diodes D1, D2, D3 à cathode commune conduit lorsque le potentiel de son anode est le plus positif, donc :

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Max}(V_j); i = 1,2,3; j = 1,2,3.$$

Chacune des trois diodes D4, D5, D6 à anode commune, conduit lorsque le potentiel de sa

cathode est le plus négatif, donc :

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Min}(V_j); i = 4,5,6; j = 1,2,3.$$

Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque D1 conduit,

l'une des deux diodes D5 et D6 conduit également.

La valeur instantanée de la tension redressée est donnée par :

$$U_d = \text{Max}(V_1(t), V_2(t), V_3(t)) - \text{Min}(V_4(t), V_5(t), V_6(t)) \quad (\text{II-35})$$

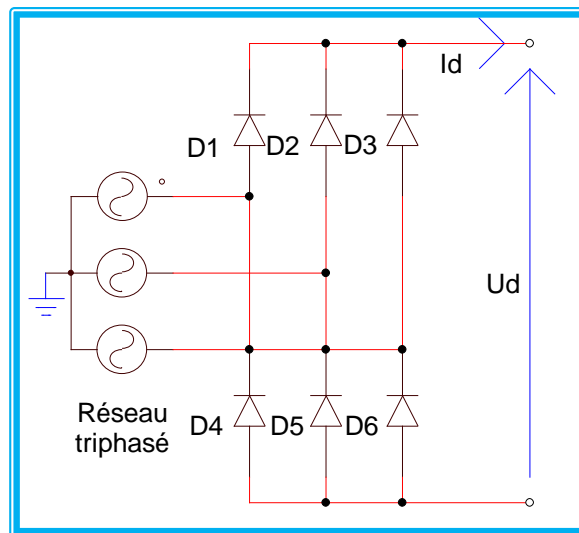


Figure 2.16 : Schéma d'un redresseur triphasé double alternance à diodes.

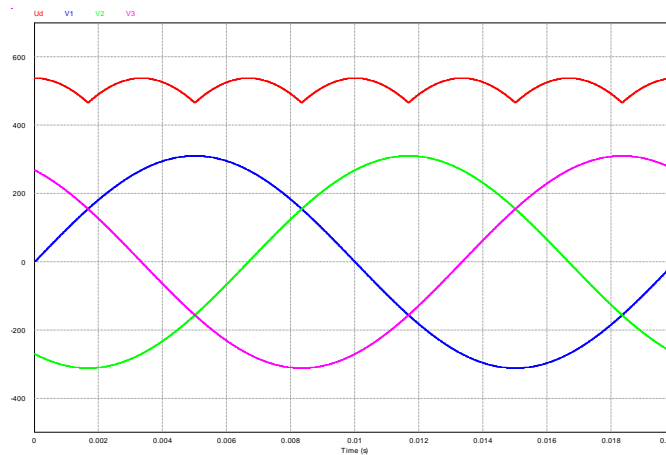


Figure 2.17 : Tensions d'entrée et tension redressée.

La tension redressée instantanée obtenue par ce redresseur (figure(II.6)) présente des ondulations importantes, ce qui nécessite un filtrage.

II.5.2 Modélisation du filtre :

Afin de réduire le taux d'ondulation de cette tension redressée, on utilise un filtre passe bas ($L_f C_f$), schématisé par la (Fig. II.7):

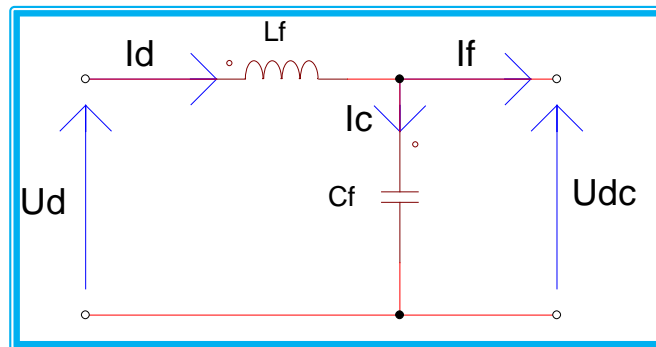


Figure 2.18 : Circuit du filtrage.

On peut modéliser ce circuit par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI_d(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} (U_d(t) - U_{dc}(t)) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I_f(t)) \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

Où :

$U_d(t)$: tension redressée .

$U_{dc}(t)$: tension à la sortie du filtre.

D'où la fonction de transfert du filtre ($I_f = 0$):

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{1+(s\sqrt{L_f C_f})^2} \quad (\text{II-37})$$

C'est un filtre de deuxième ordre dont la pulsation de coupure est:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} [\text{rad/s}] \quad (\text{II-38})$$

La détermination de L_f et C_f , se fait en imposant une fréquence de coupure inférieure à la fréquence de la première harmonique à éliminer de $U_d(t)$.

II.5.3 Modelisation de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue-alternative. Il fonctionne en commutation forcée et il est généralement conçu à base de transistors. Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI).

L'onduleur de tension transforme un signal continu à son entrée en un signal alternatif à sa sortie, tout en contrôlant l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie. Le réglage de la vitesse d'une machine asynchrone se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de tension.

Le schéma de l'onduleur est représenté par la figure II.8. Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras est composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous les éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux [18]:

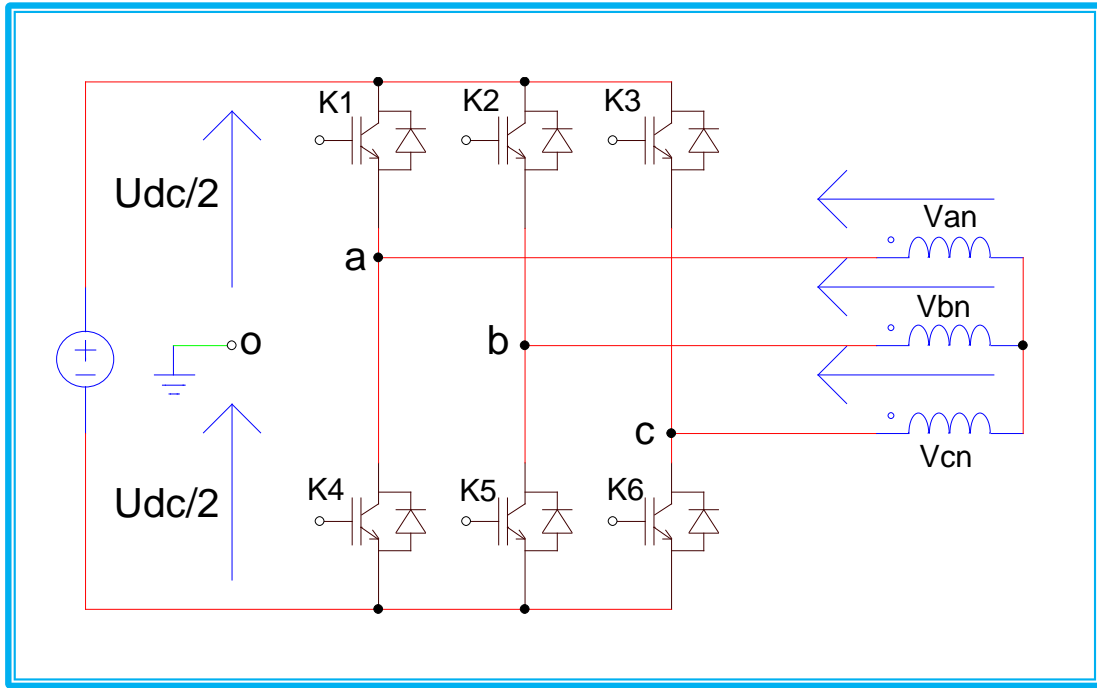


Figure 2.19 : Schéma de l'onduleur triphasé

Les tensions des phases a , b , c par rapport au point milieu « o » de la source sont données

comme suit :

$$\text{Pour la phase a : } \begin{cases} V_{ao} = \frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_1 \text{ est fermé} ; S_a = 1 \\ V_{ao} = -\frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_4 \text{ est fermé} ; S_a = 0 \end{cases}$$

$$\text{Pour la phase b : } \begin{cases} V_{bo} = \frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_2 \text{ est fermé} ; S_b = 1 \\ V_{bo} = -\frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_5 \text{ est fermé} ; S_b = 0 \end{cases}$$

$$\text{Pour la phase c : } \begin{cases} V_{co} = \frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_3 \text{ est fermé} ; S_c = 1 \\ V_{co} = -\frac{U_{dc}}{2} ; \text{Si } K_6 \text{ est fermé} ; S_c = 0 \end{cases}$$

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

Pour les tensions simples, on peut écrire les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} - V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} - V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} - V_{no} \end{cases} \quad (\text{II-40})$$

Avec :

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : les tensions simples ,et V_{no} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif « o ».

Le système V_{an}, V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{et} \quad i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \quad (\text{II-41})$$

Alors :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) \quad (\text{II-42})$$

En remplaçant (II-42) dans (II-40), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II-43})$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix}; \text{ Soit } [V_{jn}] = [T][V_{jo}] \quad (\text{II-44})$$

Donc, notre onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu- alternatif.

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II-45})$$

En substituant les valeurs de V_{jo} de chaque phase $a, b, et c$ dans le système (II.44) on obtient les tensions aux bornes de la charge en fonction des valeurs booléennes des états des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} ; \quad [Vjn] = U_{dc}[T][S_j] \quad (\text{II-46})$$

II.5.3.1 Techniques de commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande de l'onduleur de tension consiste, à envoyer des séquences d'amorçage et de blocage aux semi-conducteurs de l'onduleur. Les modalités d'implantation et les principes utilisés pour déterminer les instants de commande sont très variés. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont [19]:

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques .

Il existe différentes structures de Modulation de Largeur d'Impulsion permettant de gérer les trois courants d'alimentation de la machine asynchrone à partir des courants de référence calculés au niveau de la commande. Trois types de MLI sont généralement utilisés

a) La MLI pré calculée : consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de puissance de manière à éliminer certaines harmoniques non désirables. Ces séquences sont alors enregistrées dans une mémoire et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs.

L'implantation de cette technique de MLI sur circuit intégré spécifique est alors envisageable.

b) *La MLI sinus-triangle* : est basée sur la comparaison entre une onde modulante, de forme sinusoïdale à faible fréquence, et une autre onde porteuse de forme triangulaire à fréquence plus élevée. Les points d'intersection entre la porteuse et la modulante déterminent les instants de commutation .

c) *La MLI vectorielle* : utilisée dans les commandes modernes des machines asynchrones pour obtenir des formes d' ondes arbitraires non nécessairement sinusoïdales. Le principe de la *MLI vectorielle* consiste à reconstruire le vecteur tension statorique V_s à partir de huit vecteurs tension. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, Cette méthode de MLI peut désormais être implantée dans des circuits intégrés numériques. Elle nécessite toutefois des calculs numériques rapides et précis.

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI sinus-triangle [20].

II.6 Résultats de simulation

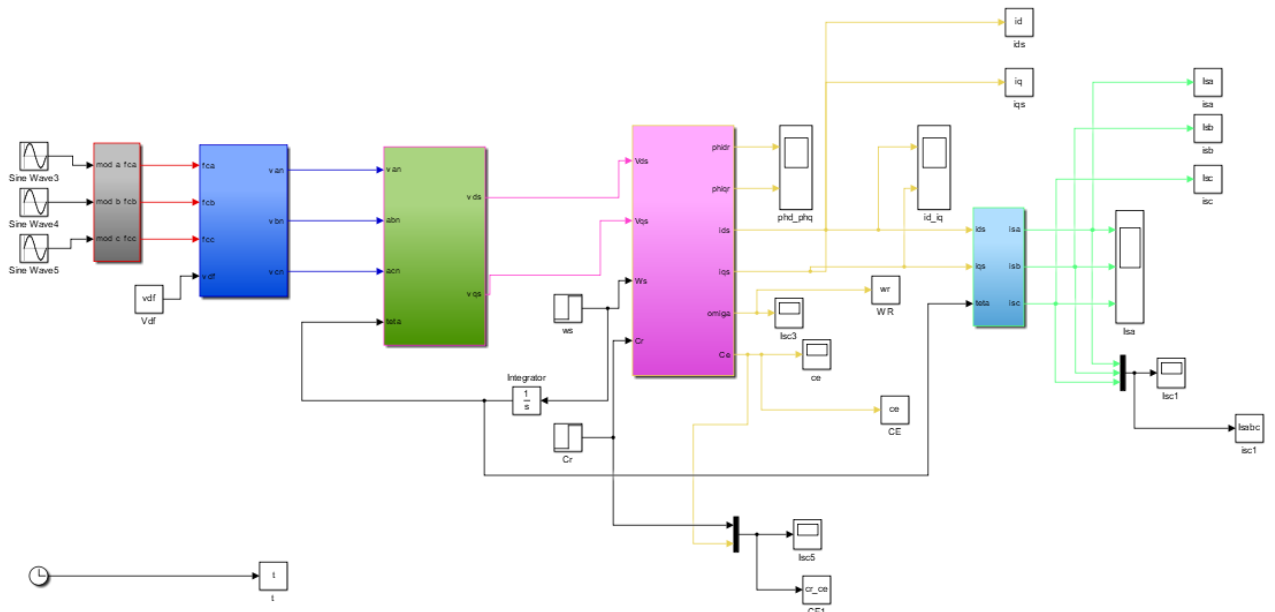


Figure 2.20 : Bloc de simulation d'un moteur asynchrone avec un onduleur MLI

Cr=8 N.m

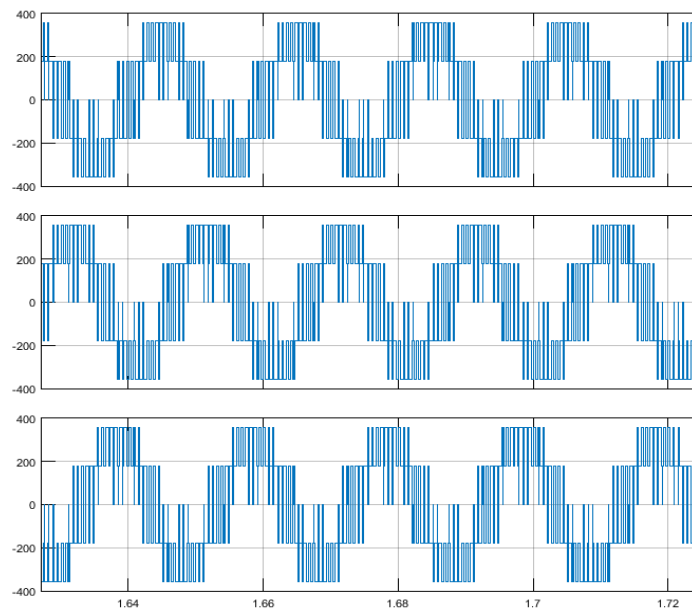


Figure 2.21 : La forme de la courbe vers l'extérieur de onduleur MLI

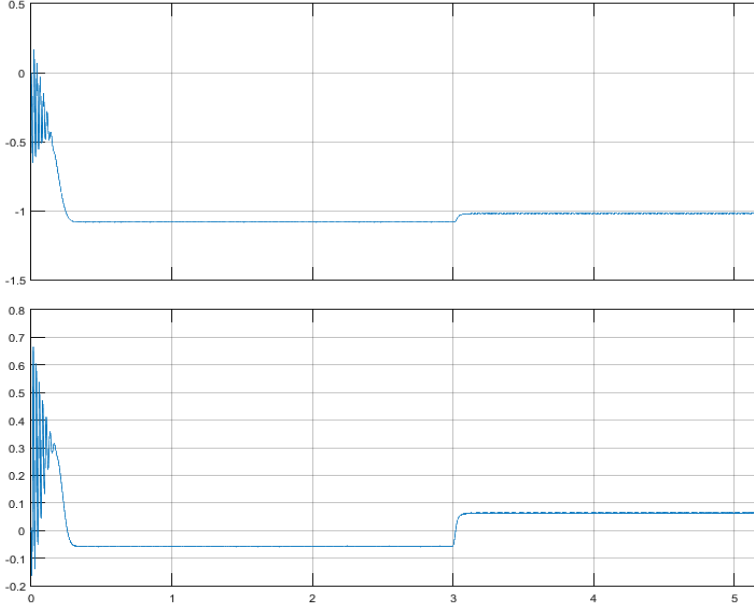


Figure 2.22 : Flux rotorique et statorique (Wb)

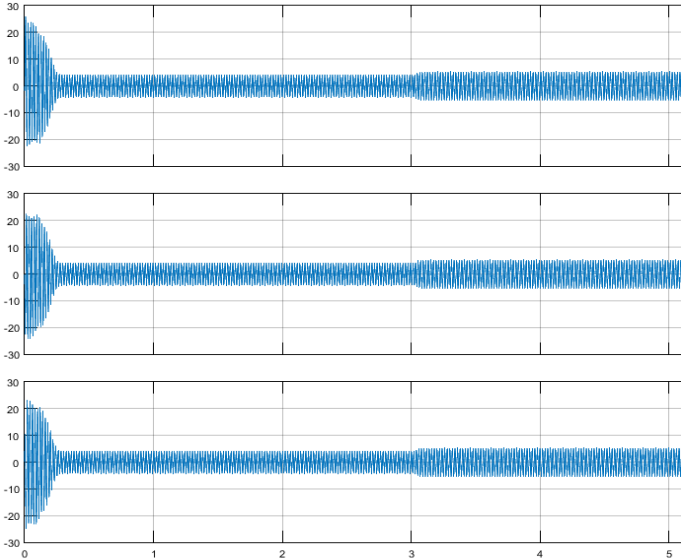


Figure 2.23 : Les courant rotorique et statorique (A)

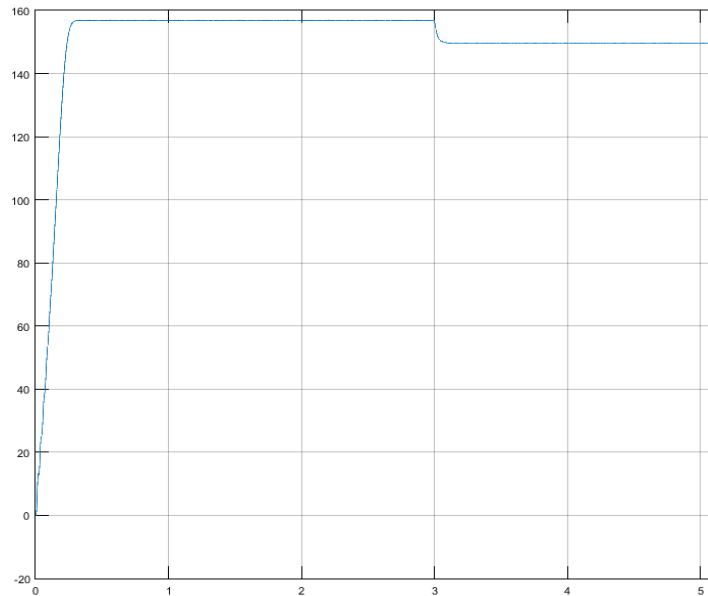


Figure 2.24 : La vitesse de rotation mecanique (tr/min)

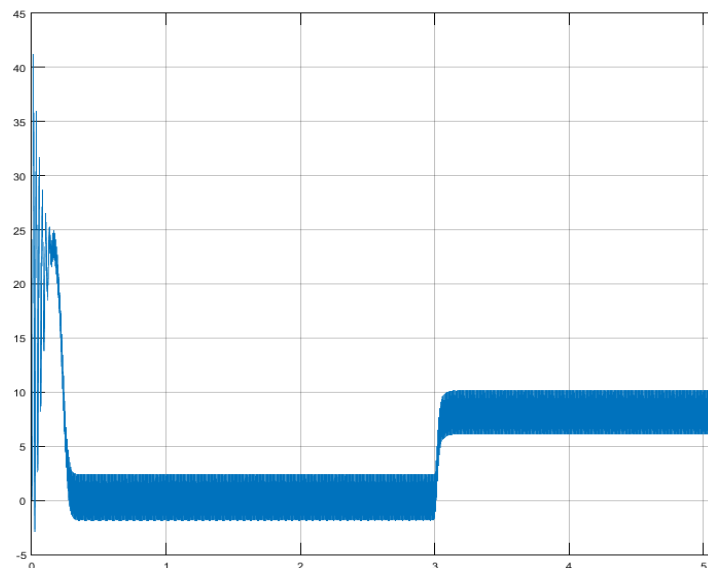


Figure 2.25 : Le couple électromagnétique (N.m)

II.6.1 Interprétation des résultats

Lors du démarrage, on constate des pics de courants importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire, ainsi que lors du démarrage à vide, la courbe de la vitesse présente des oscillations dans le premier instant avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.2 sec la vitesse stabilise à une valeur constante (157 rad/s) puisque le moteur possédé 2 pôles. cependant quand on charge la machine à l'instant $t= 3\text{sec}$, on constate une diminution de la vitesse et le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant.

II.7 Commande vectorielle de la machine asynchrone

II.7.1 Principe de la commande vectorielle

La commande par flux orienté est une technique qui apparaît de nos jours dans la littérature traitent les méthodes de contrôle des machines électriques à courant alternatif, dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire très importante de l'électromagnétique. [21]

La force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique, est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Elle donc sera maximale quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Le principe d'orientation du flux est apparu par les travaux de Blaschke au début des années. Il consiste à placer dans le repère (d-q) tel que l'axe (d) avec la direction du flux ou le courant a fin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le flux est donc contrôlé par le courant inducteur et le couple par le courant induit. Le but de cette commande est d'éliminer le couplage entre l'induit et l'inducteur et de ramener son fonctionnement comparable à celui d'une MCC en décomposant le courant statorique en deux composantes, dont l'une contrôle le flux et l'autre contrôle le couple.

II.7.2 Types de la commande vectorielle :

Les travaux de recherche sur ce sujet utilisent deux méthodes principales : la méthode directe inventée par F.Blaschke et la méthode indirecte inventée par K.Hasse.

II.7.2.1 Commande vectorielle directe:

Les capteurs à effet HALL doivent être placés sur les dents du stator pour déterminer le position et la norme du flux (contrôle par contre réaction). Ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas fonctionner dans des conditions sévères telles que les vibrations et. Des échauffements excessifs et des échauffements dont la fréquence augmente avec la vitesse nécessitent des filtres ajustables. Il existe plusieurs inconvénients liés à l'utilisation de cette méthode :

- La non fiabilité de la mesure du flux
- problème de filtrage du signal mesuré.

- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs + filtre) Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux.
- Nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimentée en tension avec convertisseur.

II.7.2.2 Commande vectorielle indirecte:

La stratégie appliquée dans ce travail est la commande vectorielle indirecte. Le principe de cette méthode de commande est de négliger l'utilisation de l'amplitude du flux rotorique et considère uniquement sa position calculée en fonction des grandeurs de référence. Cette méthode présente l'avantage que l'emploi d'un capteur de flux (capteur physique ou modèle dynamique) n'est pas nécessaire. Cependant l'utilisation d'un capteur de position du rotor est inévitable.

Cette méthode consiste à générer à l'aide d'un bloc IFOC (Indirect Field Oriented Control), les tensions d'alimentation afin d'obtenir un flux et un couple désirés. [22]

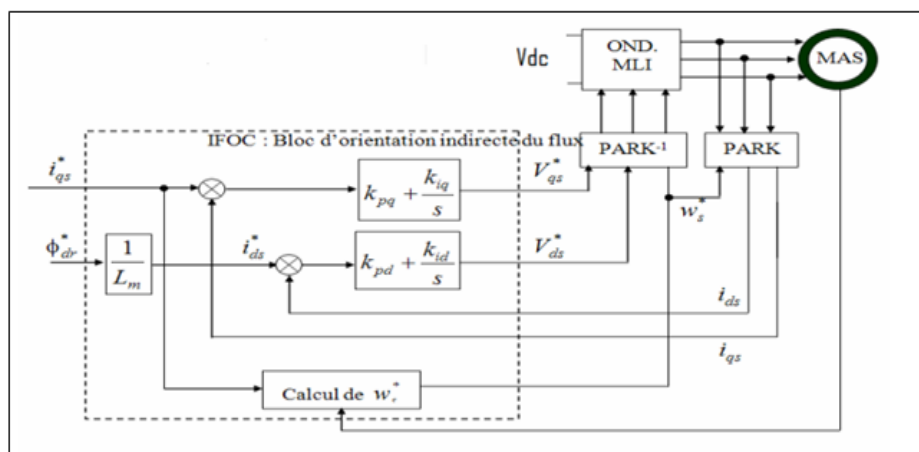


Figure 2.26 : Schéma de principe de la commande vectoriel indirect

Ces grandeurs de commande générées par le IFOC sont utilisées pour contrôler les composants directs i_{ds} et quadratiques i_{qs} du courant statorique de

façon à obtenir des courants identiques aux courants de référence, et par conséquent, le flux et le couple maintenus à leurs valeurs de référence. Le calcul des régulateurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles.

II.7.3 Régulation

L'objectif de la commande, en général, est d'avoir un système de hautes performances.

Nous pouvons le définir dans les points suivants:

- Précision en poursuite.
- Précision en régulation :
 - Temps de montée.
 - Temps de réponse.
 - Dépassement.
 - Stabilité.
- Robustesse vis-à-vis des perturbations (charge, moment d'inertie)
- Sensibilité à la variation de paramètres.

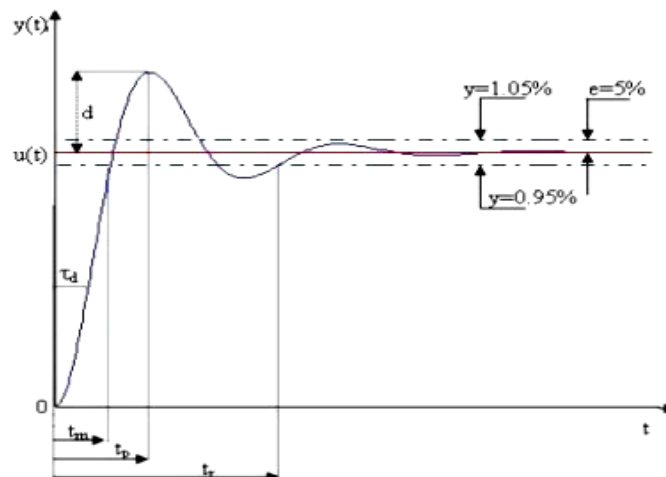


Figure 2.27 : Caractéristiques de la réponse des systèmes.

À partir de ce moment, des techniques de commande classiques ou avancées sont utilisées pour remplir le cahier des charges de commande. L'utilisation de régulateurs proportionnels et intégraux PI, dont les coefficients sont déterminés

à partir des paramètres de la machine à commander, est l'une des méthodes courantes.

II.7.3.1 Régulateur du courant i_{qs} :

Le régulateur du courant en quadrature fournit la tension v_{qs}^r nécessaire pour maintenir le couple à sa valeur de référence. La fonction de transfert i_{qs}/v_{qs}^r est donnée par :

$$\frac{i_{qs}}{v_{qs}^r} = \frac{1}{s + \rho_s} \quad (\text{II-47})$$

Avec :

$$\rho_s = R_s / \sigma L_s$$

La boucle de régulation du courant est représentée par la figure ci-dessus :

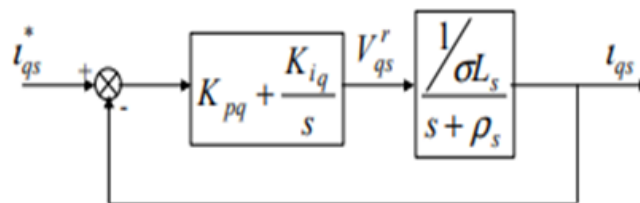


Figure 2.28 : Schéma de régulation du courant i_{qs}

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*} = \frac{(K_{pq} \cdot K_{iq}) \left(\frac{1}{\sigma L_s} \right)}{s^2 + \frac{R_s + K_{pq}}{\sigma L_s} \cdot s + \frac{K_{iq}}{\sigma L_s}} \quad (\text{II-48})$$

L'équation caractéristique est du deuxième ordre, donc en imposant deux pôles complexes conjugués à partir d'une réelle négative.

$$s_{1,2} = -\rho \pm j \cdot \rho \text{ d'où}$$

$$\rho(s) = s^2 + 2\rho_s s + 2\rho^2 \quad (\text{II-49})$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$K_{iq} = 2. \sigma L_s \rho^2 \quad \text{et} \quad K_{pq} = 2. \sigma L_s - R_s \quad (\text{II-50})$$

II.7.3.2 Régulateur du courant ids

Le régulateur du courant direct fournit la tension V_{ds}^r nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur de référence.

La fonction de transfert I_{ds}/V_{ds}^r est donnée par :

$$\frac{I_{ds}}{V_{ds}^r} = \frac{1}{s + \rho_s} \quad (\text{II-51})$$

Avec $\rho_s = R_s / \sigma L_s$

Les mêmes calculs effectués pour le régulateur du courant i_{qs} sont appliqués à ce régulateur.

Les paramètres du régulateur sont donc les mêmes. Il sont donnés par :

$$K_{id} = 2\sigma L_s \cdot \rho^2 \quad \text{et} \quad K_{pq} = 2. \sigma L_s - R_s$$

II.7.3.3 Calcul du régulateur de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, a fin de maintenir la vitesse correspondante. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit trèsrapide par rapport à celle de la vitesse.

L'équation mécanique donne :

$$\frac{W_m}{C_{em}} = \frac{P}{f_c + j.s} \quad (\text{II-52})$$

Le schéma bloc de régulation de la vitesse est donc réalisé comme indiqué par la figure ci-dessus :

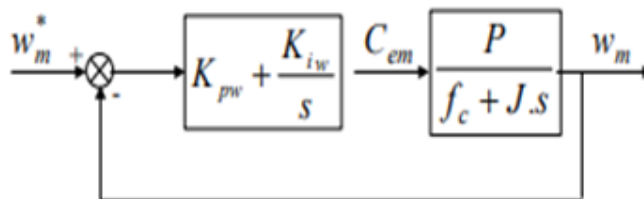


Figure 2.29 : Schéma de régulation du la vitesse

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{W_m}{W_m^*} = \frac{(K_{pw} \cdot S + K_{iw})^P}{\rho(s)} \quad (\text{II-53})$$

L'équation caractéristique $\rho(s)$ est :

$$\rho(s) = s^2 + \frac{f_c + K_{pw}P}{J} \cdot s + \frac{K_{iw} \cdot P}{J} = 0 \quad (\text{II-54})$$

Par imposition de deux pôles complexes conjugués $S_{1,2} = \rho \pm j\rho$ en boucle fermée et par identification, on obtient les paramètres du régulateur PI :

$$K_{iw} = \frac{2J \cdot \rho^2}{P} \quad \text{et} \quad K_{pw} = \frac{2J \cdot \rho - f_c}{P}$$

II.8 Résultats de simulation

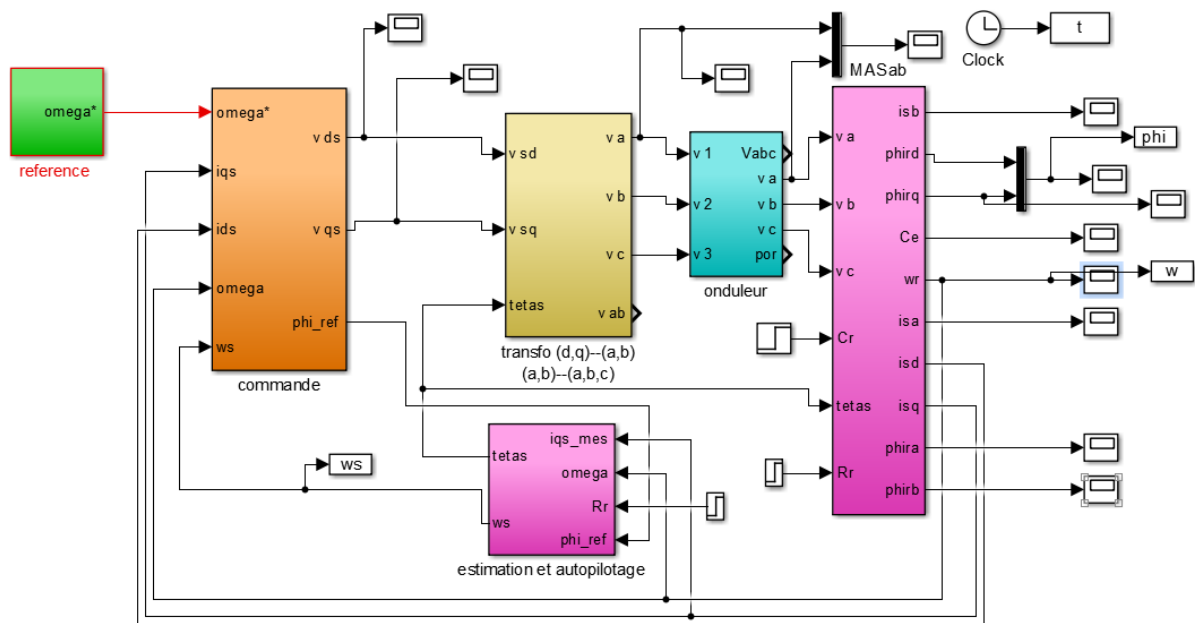


Figure 2.30 : Bloc de simulation de la commande vectoriel indirect d'une MAS

$C_r = 8 \text{ N.m}$

Vitesse référence = 100 tr/min

Valeur initial = 100

Valeur finale = 100

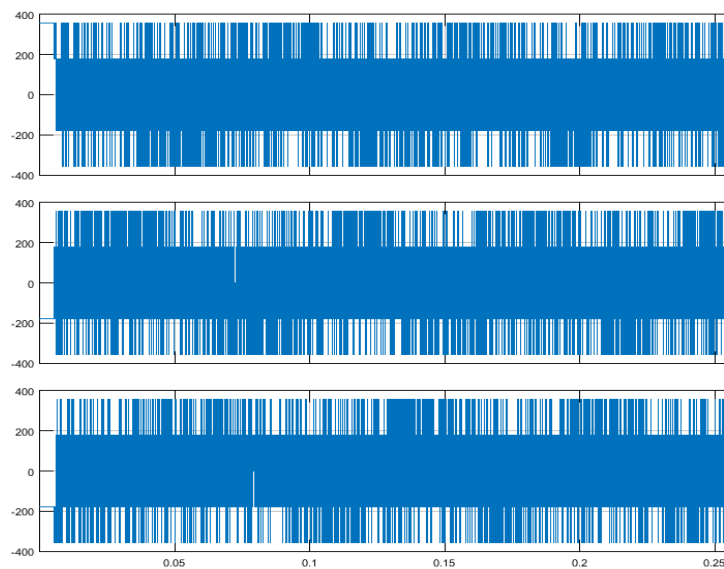


Figure 2.31 : La Tension de sortie de l'onduleur (Va, Vb, Vc)

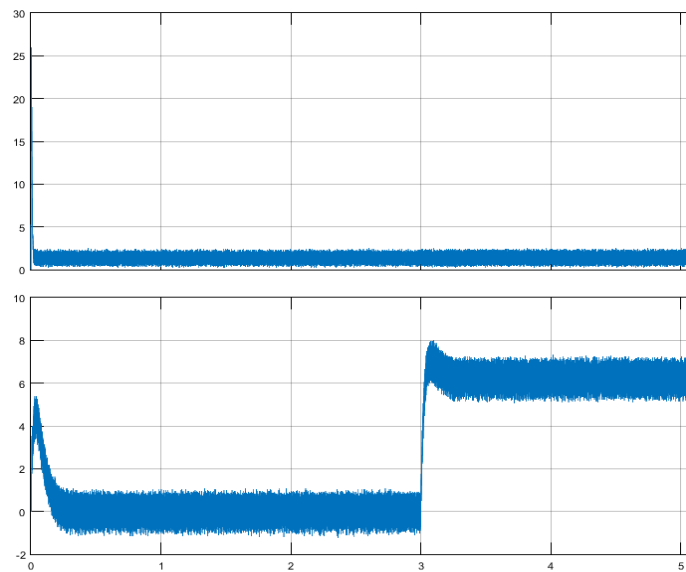


Figure 2.32 : les graphes du courants I_{sd} et I_{sq}

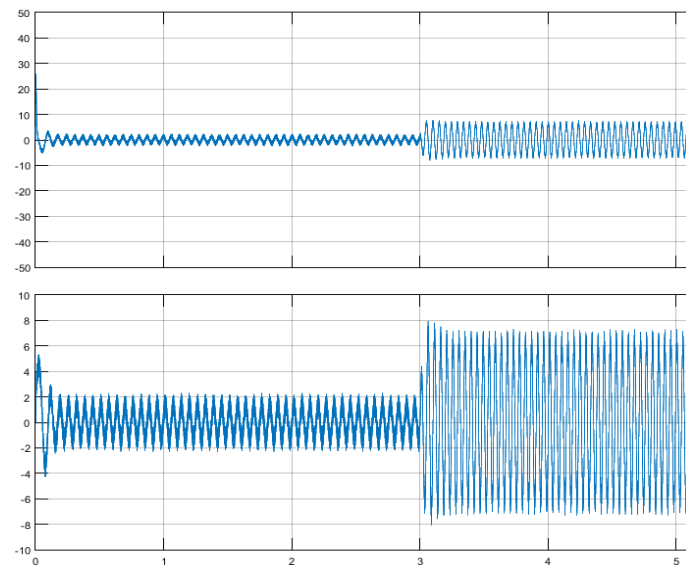


Figure 2.33 : les graphes du courants I_{sa} et I_{sb}

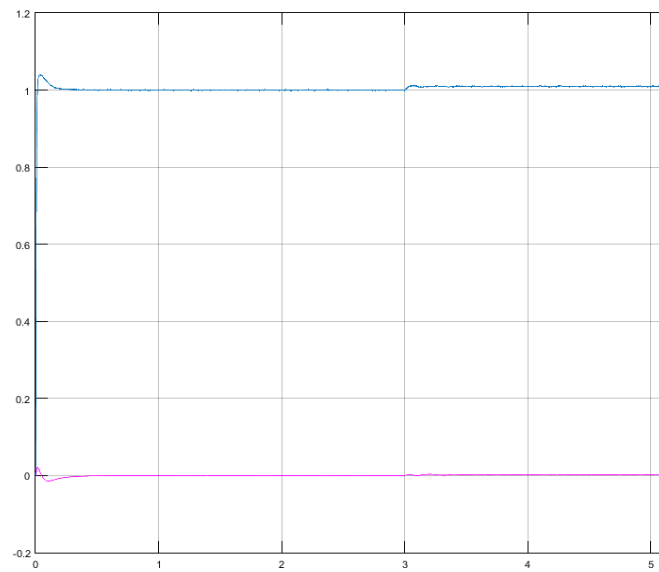


Figure 2.34 : Flux rotorique direct et quadrature (phird et phirq)

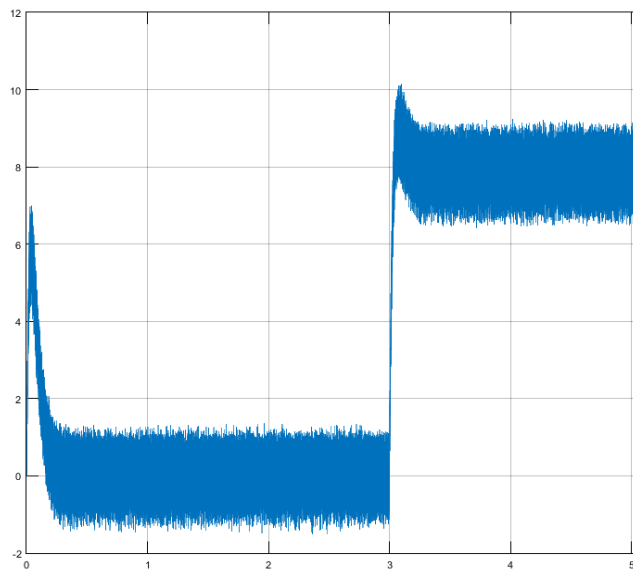


Figure 2.35 : Le couple électromagnétique (N.m)

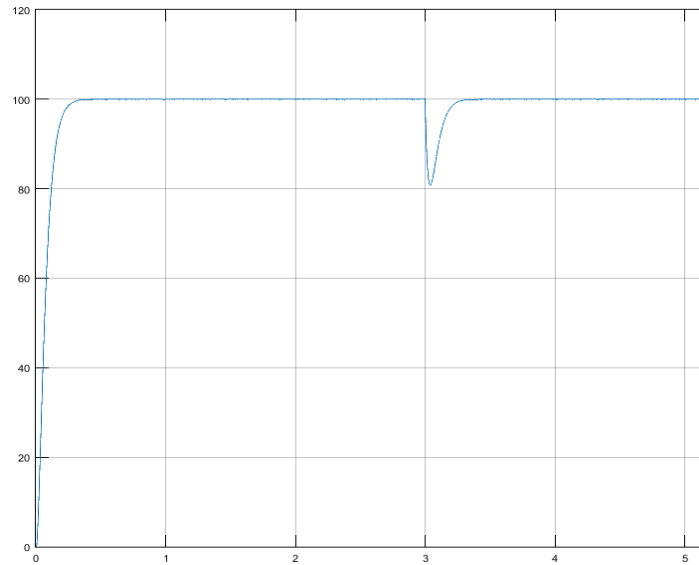


Figure 2.36 : La vitesse de rotation mecanique (tr/min)

II.8.1 Interprétation des résultats

Les résultats de cette simulation montrent que les grandeurs telles que la vitesse, le couple, les flux et les courants sont influencés par cette variation d'où le système est parfaitement commandé. La courbe des flux montre également un découplage entre le couple électromagnétique et le flux rotorique, le couple électromagnétique a la même allure que le courant à un coefficient près ce qui prouve que le découplage est parfaitement réalisé ($\phi_{rd} = 0$). Nous constatons également que le couple électromagnétique suit la consigne, le courant de phase statorique suit parfaitement la variation de la charge.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone et la commande vectoriel de cette machine

En premier partie, nous avons présenté une description succincte de la machine asynchrone. Puits on a pu établir une modélisation de la machine asynchrone, et nous avons fait une simulation sur le comportement du moteur à vide et avec un charge.

En deuxième et troisième partie, nous avons étudié l'ensemble convertisseur machine et par la suit l'intégration de la commande pour contrôler la machine par le control appeler contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotoriques.

Dans le chapitre qui suit on va intégrez cette commande dans le system de control d'une vehicule électriques .

Chapitre 03

**application de la
commande vectoriel sur
d'une véhicule électrique**

Introduction

De ce chapitre, nous appliquerons la commande vectoriel sur une véhicule électrique, où nous parlerons d'abord des différentes forces affectant la voiture électrique, telles que force de roulement et force de glissement à l'accélération et force de traînée aérodynamique et force d'inertie du moteur....etc, Ces forces jouent un rôle crucial dans le mouvement et les performances globales d'un véhicule électrique, et leur compréhension est essentielle pour optimiser son fonctionnement.

III.1 Les forces agissant sur un véhicule

Le moteur du véhicule doit avoir un couple suffisant pour surmonter la résistance au roulement, la traînée aérodynamique et la pente des parcours auxquels la voiture est destinée. Ces forces peuvent être représentées par le schéma de dans la figure 3.1, dont les équations sont discutées ci-dessous. De plus, le moteur doit correspondre aux spécifications prévues par les clients potentiels, telles que l'accélération et la vitesse de pointe.

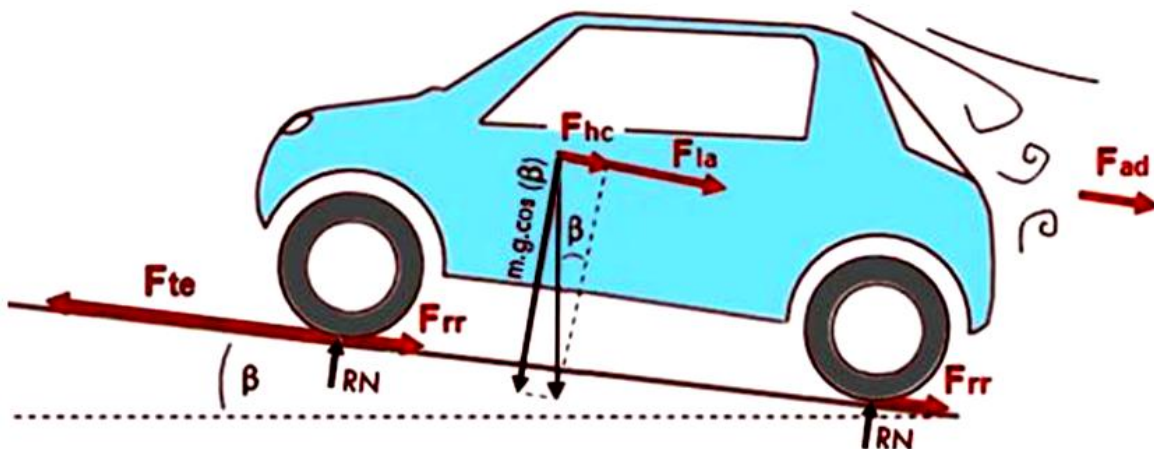


Figure 3.1 : Schéma des forces agissant sur un véhicule

III.1.1 Force de roulement

La force causée par la résistance au roulement est directement liée au poids de la voiture, au type et à la pression des pneus, au sol et à la température. Cette force augmente avec une chaussée mouillée en raison du ruissellement de l'eau. Sur un plan horizontal, la faible vitesse est la principale force s'opposant au roulage de la voiture. La résistance au roulement peut être calculée à l'aide de l'équation :

$$F_{rr} = \mu_{rr} m \times g \times \cos(\beta) \quad (3.1)$$

La force F_{rr} s'exprime en (N), le coefficient de frottement de roulement μ_{rr} cela dépend du type de pneu, de la pression utilisée et de la rugosité de la chaussée, les variables restantes sont la masse et la gravité. La valeur de μ_{rr} pour les routes asphaltées peut prendre 0,015 pour les pneus normaux et 0,005 pour les pneus spéciaux pour véhicules électriques.

Une autre équation du frottement de roulement, à laquelle fait référence Jazar , tient compte de la vitesse et de la pression des pneus :

$$u_{rr} = \frac{k}{1000} \left(5.1 + \frac{5.5+9+10^{-4} \times m \times g}{P_p} + \frac{0.011+3.8 \times 10^{-7} \times m \times g}{P_p} \times V_v^2 \right) \quad (3.2)$$

Pour les pneus radiaux $K=0,8$, pour les non radiaux $K=1$; m est la masse du véhicule (kg), g est l'accélération gravitationnelle (m/s^2), V_v est la vitesse (m/s) et P_p est la pression des pneus en bar. Dans la Figure 3.2, vous pouvez voir la variation qualitative du frottement de roulement en fonction de la vitesse et de la pression des pneus.

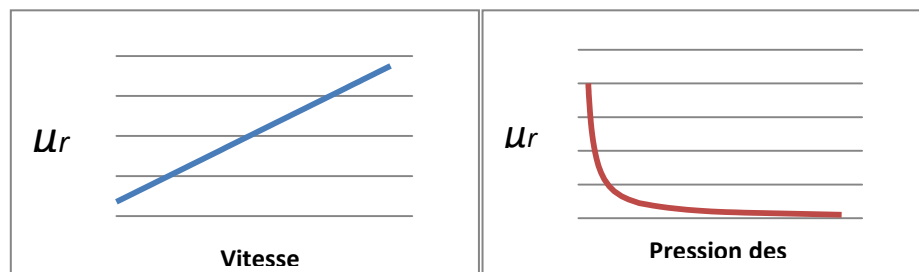


Figure 3.2 : Variation du frottement de roulement en fonction de la vitesse et de la pression des pneus

III.1.2 Force de glissement à l'accélération

Il existe une force de glissement longitudinale supplémentaire F_{sx} lorsque la voiture accélère ou freine.

D'après Brito elle est donnée par l'équation :

$$F_{sx} = k_x \times \frac{F_{rr}^2}{m \times g} \quad (3.3)$$

La constante K_x peut, selon le même auteur, prendre une valeur limite de 0,15 (correspond à une accélération et un freinage maximum de 1 G). Cette force est faible et peut être négligée.

III.1.3 Force de traînée aérodynamique

La force de traînée est due à l'aérodynamique, elle a à voir avec la résistance à la voiture se déplaçant dans l'air. Pour les basses vitesses, cette force n'est pas significative, mais à mesure que la vitesse augmente, la force de traînée augmente de manière quadratique.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho \times A \times C_d \times (V - V_w)^2 \quad (3.4)$$

Où ρ est la densité de l'air ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$), A est la surface frontale du véhicule (m^2), C_d est le coefficient de traînée, V est la vitesse de la voiture (m/s) et V_w est la vitesse de la voiture vent (additif si dans la direction opposée au véhicule et soustractif si en faveur). Rappelez-vous que la densité de l'air varie avec la température et l'altitude.

La zone frontale du véhicule est celle qui expose le véhicule vu de face, comme le montre la bordure des images (en rouge sur la Figure 67). La zone frontale peut être estimée à partir d'une photographie de la voiture. La photographie est importée dans un programme de CAO, une ligne de contour est placée autour de l'image et l'échelle du dessin est ajustée à l'échelle réelle du véhicule (à une distance connue du véhicule).

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

Cette méthode est fiable pour des surfaces contenues dans le même champ de profondeur (distance entre la caméra et l'objet). Comme la zone frontale présente des surfaces de profondeurs différentes (la zone du pare-brise est plus éloignée de l'objectif que la zone des phares), il y a toujours une marge d'erreur associée à cette méthode. La solution pour minimiser cette erreur est de reculer beaucoup la caméra et de zoomer, comme le montre l'image de droite de la Figure ci-3.3. Ainsi, les différences de profondeur relative sont beaucoup plus petites.

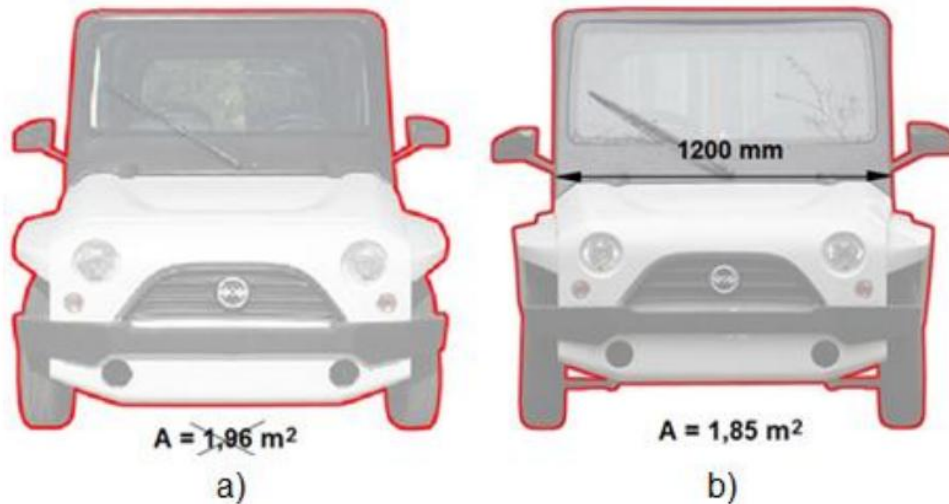


Figure 3.3 : la zone frontale du véhicule électrique, à gauche photo prise à une distance d'environ 8 mètres, à droite photo prise à une distance d'environ 50 mètres (avec zoom).

Dans les voitures modernes, le coefficient C_d est de l'ordre de 0,3. Pour les voitures électriques à l'aérodynamisme plus soigné, il peut être compris entre 0,15 et 0,25. Pour les véhicules tout-terrain, 0,45 est une valeur raisonnable. La force de traînée F_{ad} augmente quadratiquement avec la vitesse et peut vaincre la force de roulement F_r à partir de vitesses relativement faibles, comme c'est le cas de la voiture simulé sur la figure 3.4, ayant comme caractéristiques une masse de 680 kg, $C_d=0,45$, aire avant de 1,85 m² et une pression des pneus de 1,5 bar (pression recommandée par le constructeur).

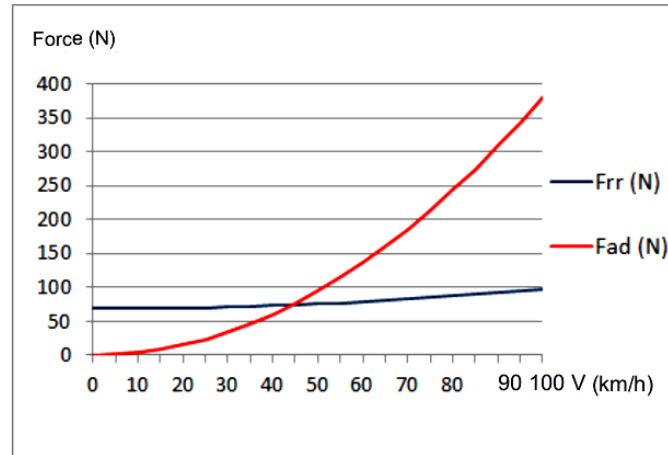


Figure 3.4 : Comparaison entre la force de roulement (F_{rr}) et la force de traînée (F_{ad}) en fonction de la vitesse.

III.1.4 Force pour surmonter une pente

La force nécessaire pour surmonter une pente ou surmonter un trou (de repos) n'est pas supérieure à la force exercée par le poids de la voiture, affectée par l'angle d'inclinaison de la chaussée avec le plan horizontal adjacent :

$$F_{hc} = m \times g \times \sin(\beta) \quad (3.5)$$

III.1.5 Force d'inertie du moteur

En accélération, compte tenu de la deuxième loi de Newton, la force nécessaire pour une accélération constante dans un véhicule, de façon simpliste est :

$$F_{la} = m \times a \quad (3.6)$$

Mais en plus d'accélérer la masse de la voiture le long d'une route, il faut également accélérer angulairement la masse du moteur, des éléments de transmission et des roues du véhicule. Tous ces composants en rotation autour d'un axe ont un moment d'inertie. Cependant, les auteurs consultés ne tiennent pas compte de l'inertie des engrenages et des roues dans leurs calculs. La figure ci-dessus montre le schéma généralisé d'une traction automobile.

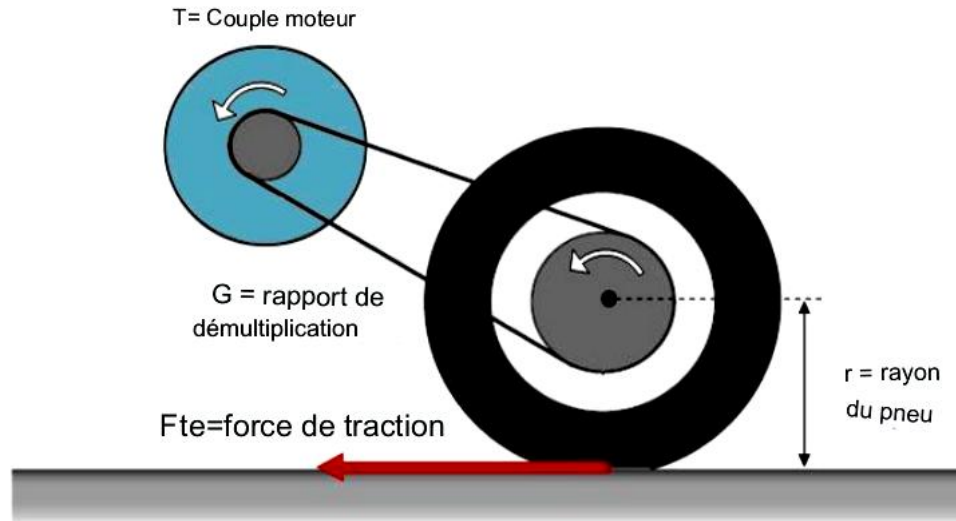


Figure 3.5 : Schéma de traction d'un véhicule

En partant du diamètre du pneu, tel qu'il sera nécessaire pour les calculs ci-dessous, en passant par le repère d'identification présent sur le flanc du pneu, par rapport à ses dimensions, xxx/yy Rtt, son rayon peut être calculé. Selon le manufacturier de pneus Dunlop, on sait que xxx représente la largeur du pneu en millimètres, yy représente le rapport entre la largeur et la hauteur (en %), ce qui signifie que la hauteur du pneu (la différence entre son rayon intérieur et extérieur) est yy (%) de sa largeur. La lettre R signifie que le pneu est radial (les nappes du pneu sont disposées radialement d'un flanc à l'autre) et tt est le diamètre de la jante en pouces. Ainsi, l'équation suivante peut être facilement déduite :

$$r = \frac{xx}{1000} \times \frac{yy}{100} + tt \times \frac{0.0254}{2} \quad (3.7)$$

Dans le cas de la voiture qui simule le pneu 135/80 R13, il y a un rayon de :

$$r = \frac{135}{1000} \times \frac{80}{100} + 13 \times \frac{0.0254}{2} = 0.273m \quad (3.8)$$

Le couple du moteur T (Nm) est donné par la relation :

$$T = \frac{F_{te} \times r}{G} \quad (3.9)$$

En réarrangeant, cela devient :

$$F_{te} = \frac{G}{r} \times T \quad (3.10)$$

La vitesse angulaire du moteur ($\text{rad} \times \text{s}^{-1}$) est :

$$\omega = G \frac{v}{r} \quad (3.11)$$

Et l'accélération angulaire du moteur (en $\text{rad} \times \text{s}^{-2}$), vient :

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \quad (3.12)$$

Le couple imposé par cette accélération angulaire est :

$$T = I_R \times G \frac{a}{r} \quad (3.13)$$

Ici le I est le moment d'inertie du rotor du moteur (en kg/m^2) est donné par l'équation :

$$I_R = \frac{1}{2} m \times r^2 \quad (3.14)$$

Où m est la masse et r est le rayon du rotor. Pour le moteur à induction de 4 kW, le moment d'inertie est d'environ 0,015 kg/m^2 .

Selon Larminie et al. (3.6), l'accélération angulaire du moteur exerce une force $F_{\omega a}$ sur les roues, que l'on trouve en combinant les équations (3.13) et (3.10) :

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} I_R G \frac{a}{r} \quad (3.15)$$

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

En réarrangeant l'équation et en introduisant le rendement de transmission, on obtient :

$$F_{\omega a} = \frac{I_R \times G^2}{\eta_{tr} \times r^2} \quad (3.16)$$

III.1.6 Force de glissement latéral (glissement)

Lorsque la voiture décrit une courbe, il y a une autre force F_{sy} , associé à l'angle de glissement latéral α du pneumatique. L'équation générale de cette force est :

$$F_{sy} = F_y \times \sin a \quad (3.17)$$

F_y est la force centrifuge :

$$F_y = \frac{m \times v^2}{r_c} \quad (3.18)$$

Où V est la vitesse (m/s) et r_c est le rayon de la courbe que la voiture prend (m).
Ou bien, selon Brito cela peut prendre une autre forme :

$$F_y = C_a \times a \times m \times g \quad (3.19)$$

L'équation est valable pour des angles $\alpha > 5^\circ$, où la constante de raideur de courbe C_a peut prendre une valeur de 0,2 par degré.

En mettant en équation les équations (3.18) et (3.19) et en résolvant pour α , nous obtenons :

$$a = \frac{v^2}{C_a \times g \times r_c} \quad (3.20)$$

En substituant les équations (3.18) et (3.20) dans (3.17) on obtient :

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

$$F_{sy} = \frac{m \times V^2}{r_c} \times \sin\left(\frac{V^2}{C_a \times g \times r_c}\right) \quad (3.21)$$

Ainsi, la force de traction totale F_{te} est donnée par la somme des équations déjà présentées :

$$F_{te} = F_{rr} + F_{sx} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} + F_{sy} \quad (3.22)$$

Pour obtenir la puissance mécanique, multipliez la force totale par la vitesse (m/s) :

$$P_{mec} = F_{te} \times V \quad (3.23)$$

Une autre forme, plus simple mais très proche de la puissance nécessaire au moteur, est évoquée par Duke qui présente l'équation suivante :

$$P_{mec} = \frac{C_d \times A \times \rho \times V^3}{2} + m \times g \times \mu_{rr} \times V \quad (3.24)$$

Où les unités sont les mêmes que celles supposées dans les équations précédentes.

La puissance mécanique (W) permet de sélectionner le moteur, c'est-à-dire qu'il s'agit de celui indiqué sur la plaque signalétique du moteur. Il faut vérifier si le couple du moteur sélectionné est suffisant à bas régime pour les terrains en pente, afin de considérer l'existence d'une boîte de vitesses ainsi que son rapport de transmission.

III.2 Simulation d'une module de commande vectoriel de véhicule électrique

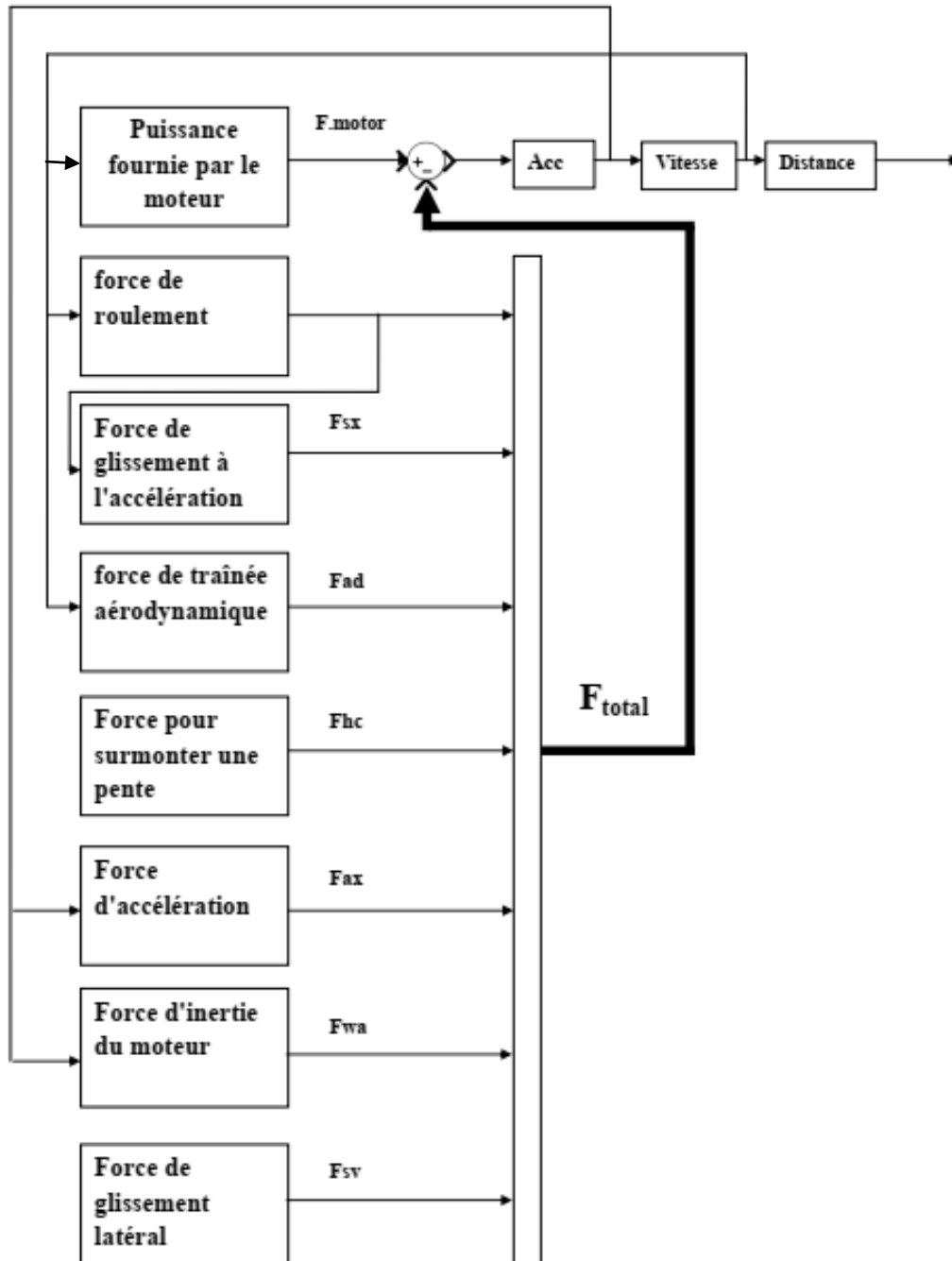


Figure 3.6 : Modèle complet de la simulation

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

Ce schéma illustre le modèle du la commande vectoriel de véhicule électrique approprié à notre projet et pour estimer la vitesse et l'accélération maximales de la voiture.

Dans ce projet, nous avons plusieurs blocs et nous vous expliquerons chacun et son rôle

1. Puissance fournie par le moteur

Dans ce bloc représente la quantité d'énergie que le moteur peut produire pour propulser le véhicule électrique et il contient le modèle de la commande vectorielle du moteur asynchrone ce que nous avons simulé plus tôt dans le chapitre II.

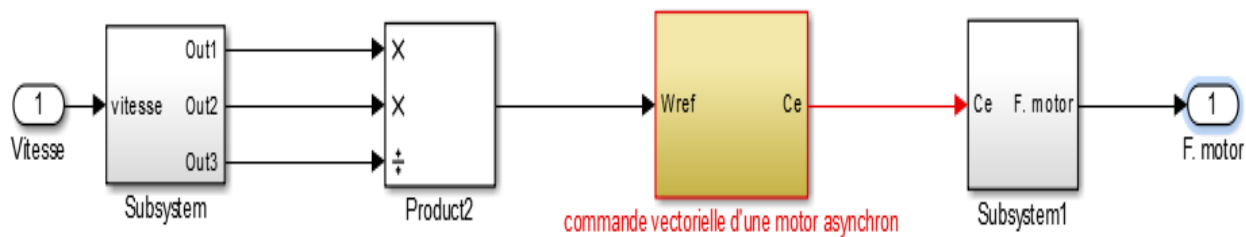


Figure 3.7 : schéma qui illustre le block de puissance fournie par le moteur

2. Force de roulement

La figure 3.8 représente la force de roulement où l'entrée est la vitesse de la voiture et la sortie est la force F_{rr} telle qu'elle est montrée dans l'équation (3.1), d'après ce résultat on constate que la force obtenue et constante est égale à 78.35 N et invariante dans le temps.

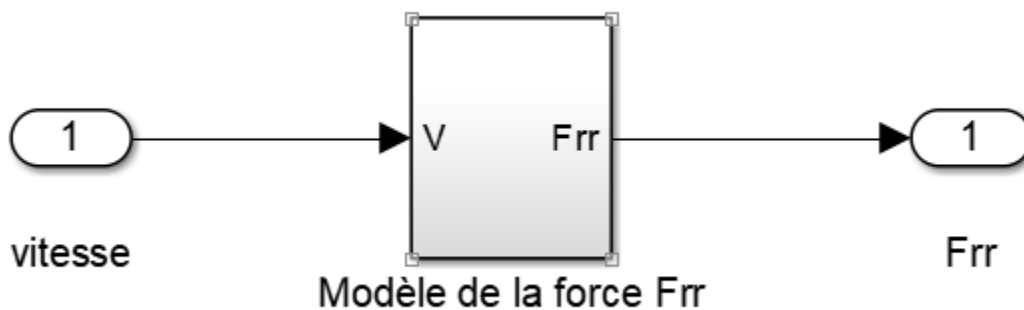


Figure 3.8 : Bloc de la force de roulement

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

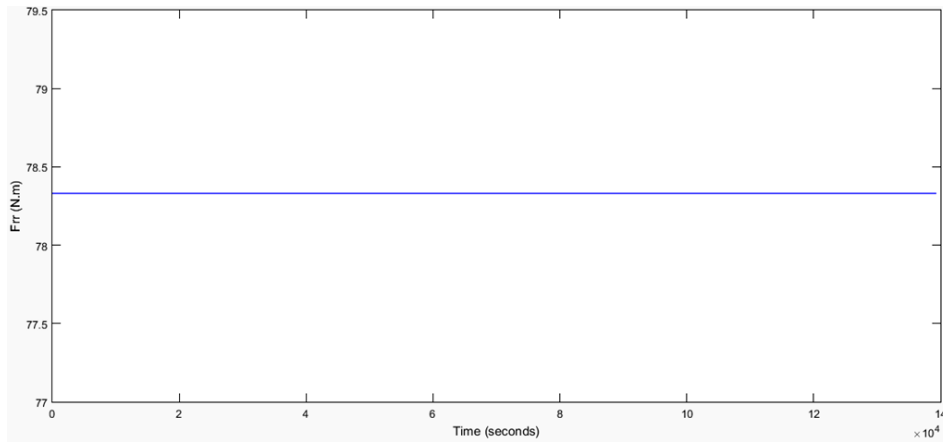


Figure 3.9 : Graph de la force de roulement F_{rr}

3. force de glissement à l'accélération

Dans ce bloc représente la force de glissement à l'accélération F_{sx} la même chose pour ici, la seule différence est que l'entrée est F_{rr}

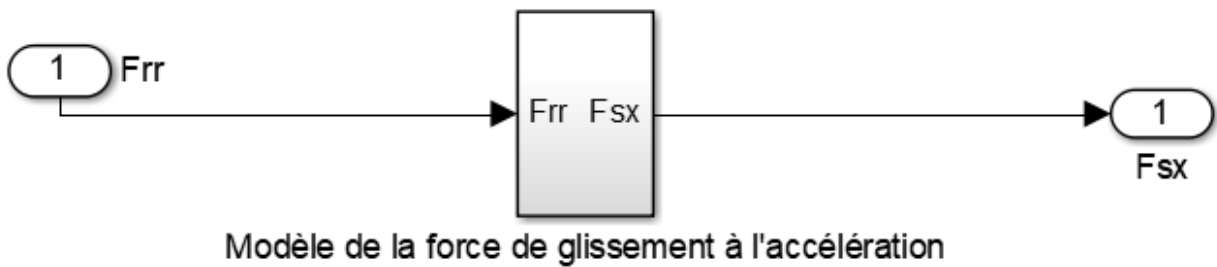


Figure 3.10 : Bloc de la force de glissement à l'accélération

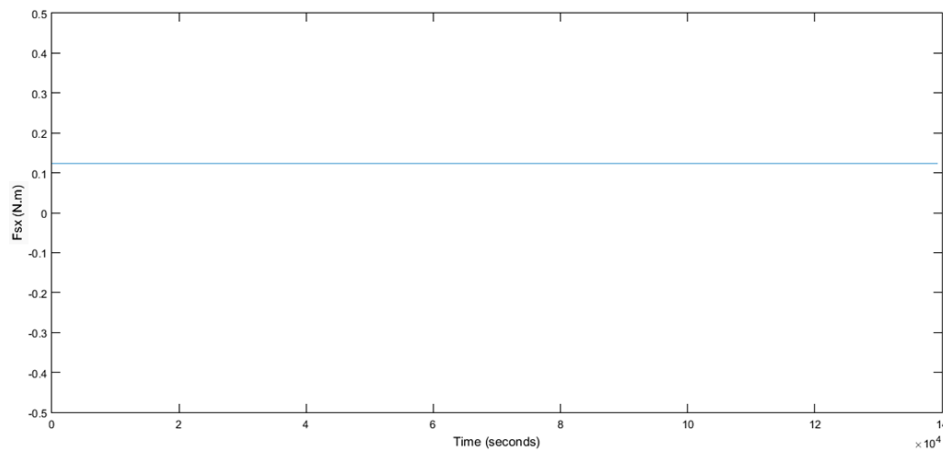


Figure 3.11 : Graph la force de glissement à l'accélération

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

La figure 3.11 représente la force de glissement à l'accélération où l'entrée est la force F_{rr} et la sortie est la force F_{sx} telle qu'elle est montrée dans l'équation (3.3), d'après ce résultat on constate que la force obtenue et constante est égale à 0.125 N et invariante dans le temps. (3.3)

4. force de traînée aérodynamique

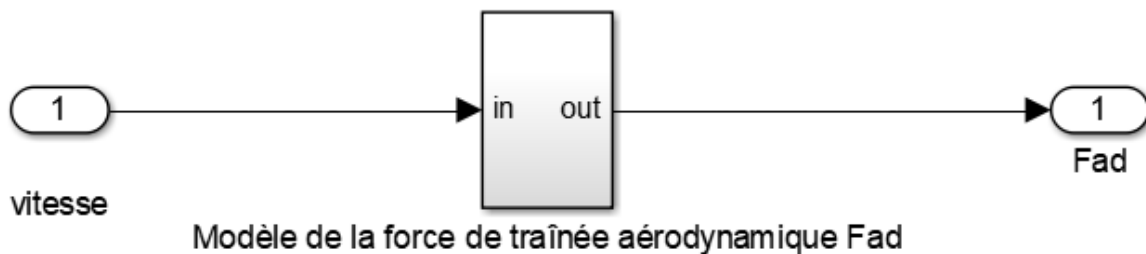


Figure 3.12 : Bloc de la force de traînée aérodynamique F_{ad}

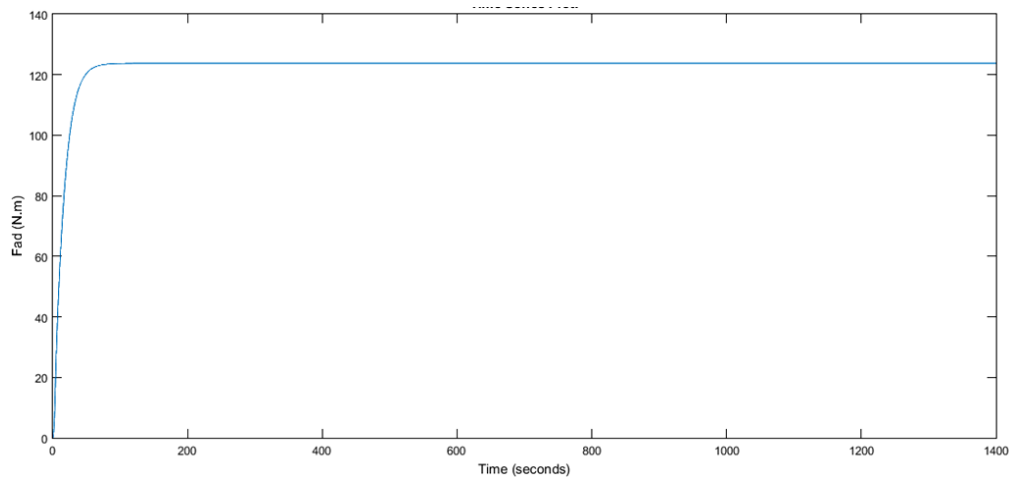


Figure 3.13 : Graph de la force de traînée aérodynamique F_{ad}

Dans la figure 3.13, nous remarquons une augmentation rapide de la force, et c'est parce que cette force est très attachée à la vitesse, donc plus la vitesse est élevée, plus cette force est grande jusqu'à ce que la vitesse se stabilise à une certaine valeur où $F_{ad}=122\text{N}$.

5. Force pour surmonter une pente

Dans ce bloc représente la force pour surmonter une pente F_{hc}

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

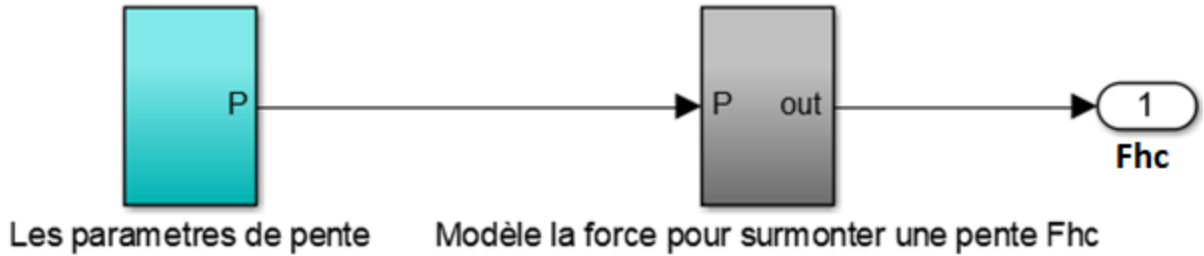


Figure 3.14 : Bloc de la force pour surmonter une pente F_{hc}

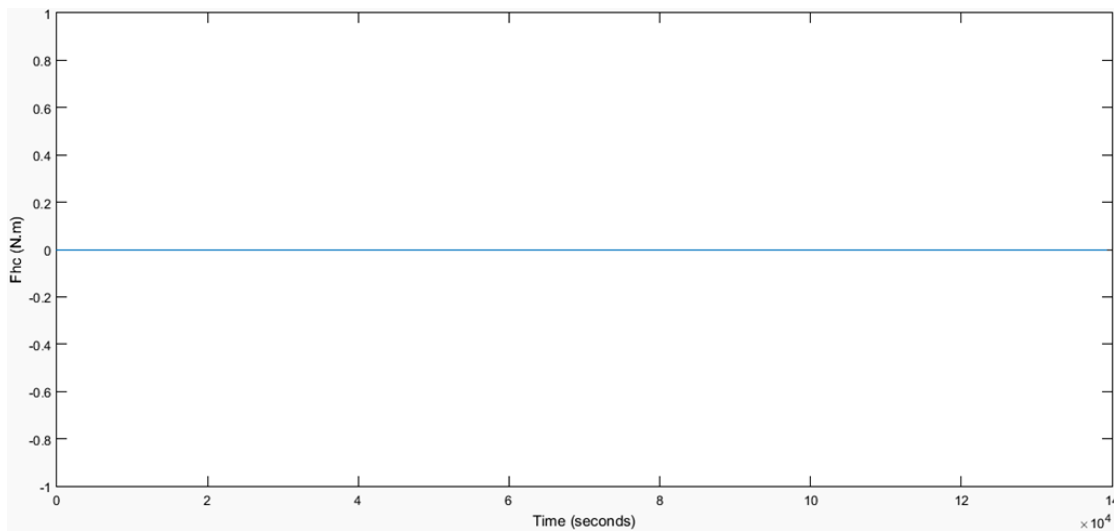


Figure 3.15 : Graph de la force pour surmonter une pente F_{hc}

Puisque la force F_{hc} est liée à l'angle de la pente et que nous avons une pente droite $\beta = 0^\circ$ alors $\sin \beta = 0$ alors F_{hc} est nulle.

6. force d'accélération

Dans ce bloc représente la force d'accélération F_{ax}

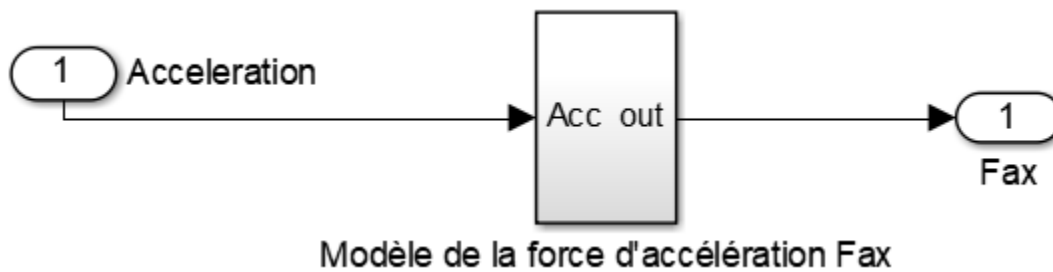


Figure 3.16 : Bloc de la force d'accélération F_{ax}

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

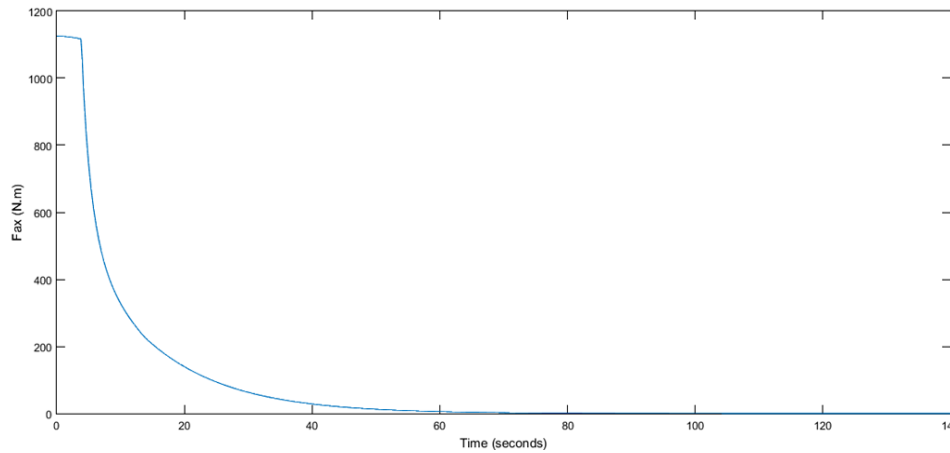


Figure 3.17 : Graph de la force d'accélération F_{ax}

La grande valeur initiale de la force d'accélération dans une voiture en mouvement où $F_{ax}=1150$ N est due à la nécessité de surmonter les forces de résistance au démarrage. Une fois en mouvement, la force d'accélération diminue rapidement jusqu'à zéro ou une valeur constante, équilibrant les forces de résistance pour maintenir une vitesse constante.

7. Force d'inertie du moteur

Dans ce bloc représente la force de d'inertie du moteur F_{wa}

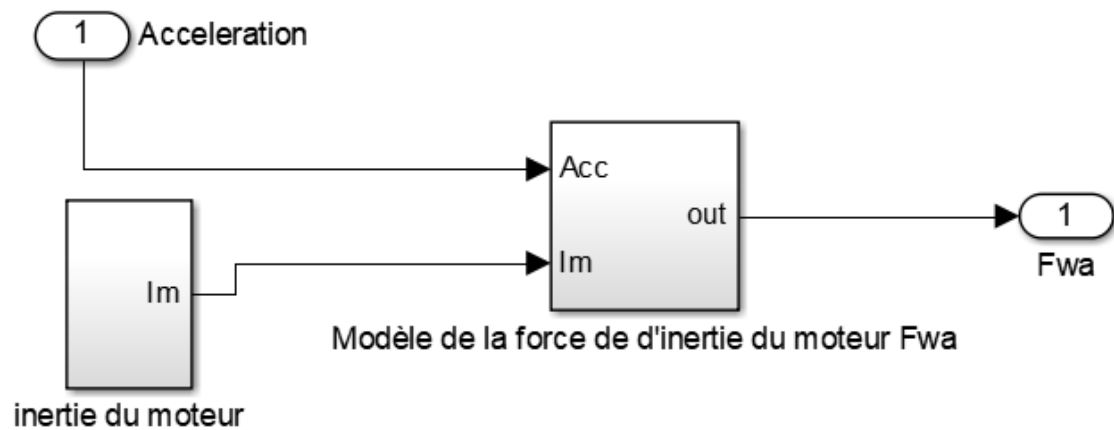


Figure 3.18 : Bloc de la force de d'inertie du moteur F_{wa}

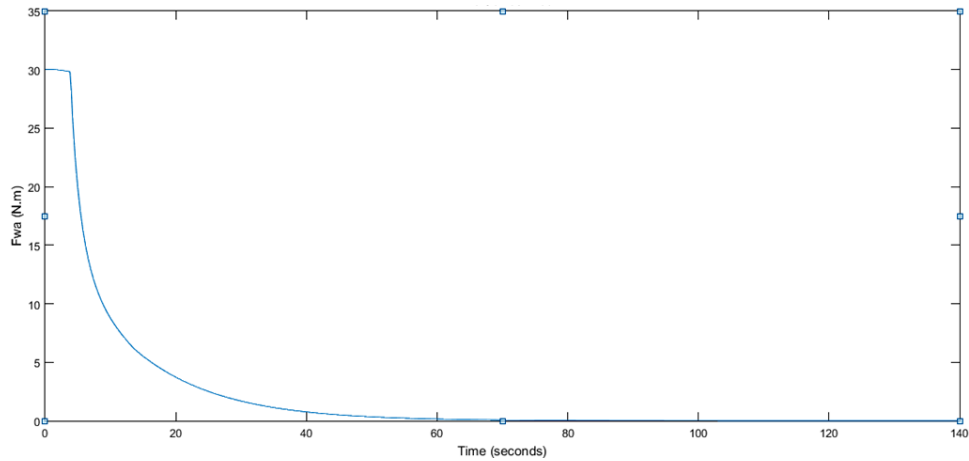


Figure 3.19 : Graph de la force de d'inertie du moteur F_{wa}

Notez da,s la figure 3.19 la similitude dans la forme de la courbe entre F_{wa} et F_{ax} c'est parce qu'ils ont le même principe de fonctionnement où $F_{wa}=30N$.

8. Force de glissement latéral (glissement)

Dans ce bloc représente la force de glissement latéral (glissement) F_{sy}

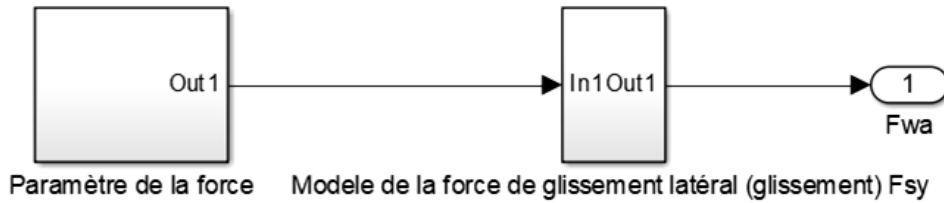


Figure 3.20 : Bloc de la force de glissement latéral (glissement) F_{sy}

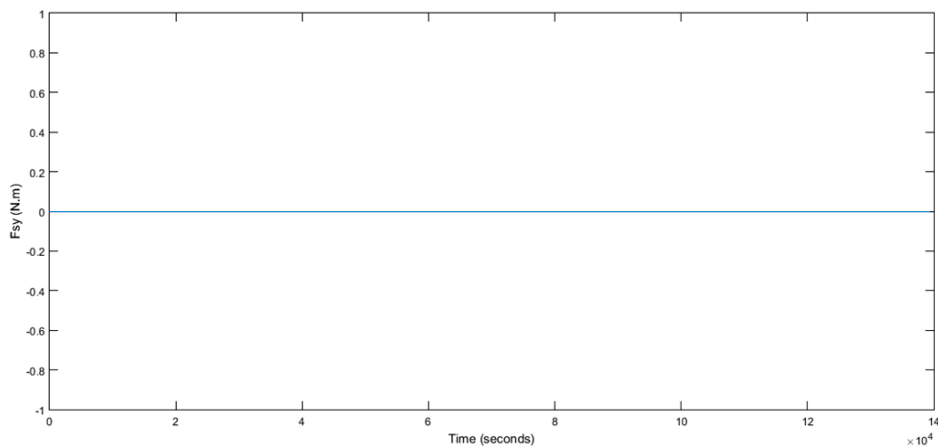


Figure 3.21 : Graph de la force de glissement latéral (glissement) F_{sy}

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

Lorsque la voiture se déplace sur une route droite sans courbes, il n'y a pas d'angle de glissement latéral (α)=0 car la trajectoire de la voiture est rectiligne. Donc ce cas $F_{sy}=0$

Et maintenant, nous allons voir toutes ces forces dans une seule graph:

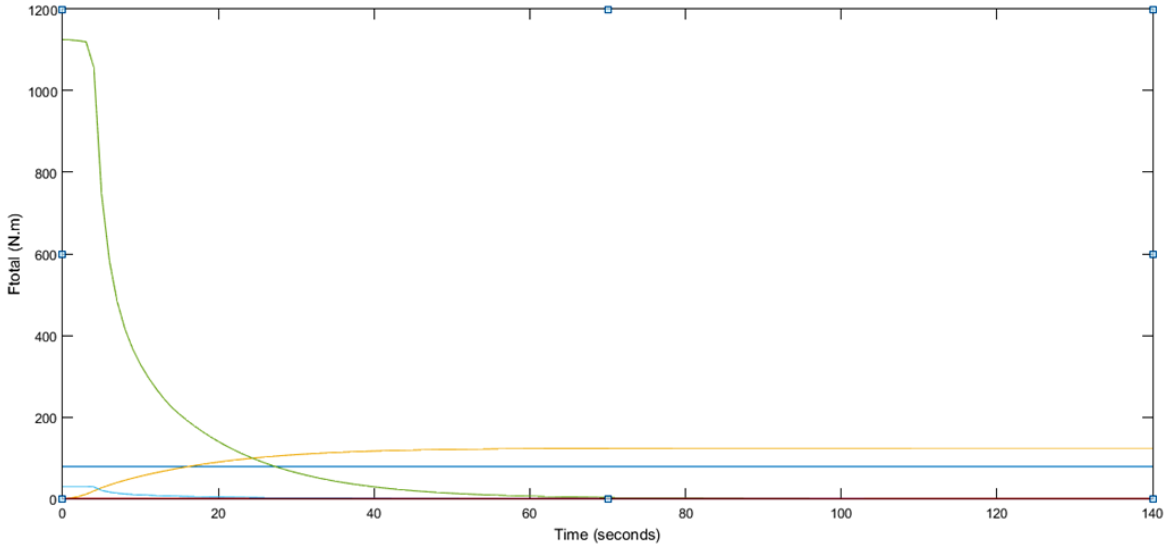


Figure 3.22 : Touts les force F_{total}

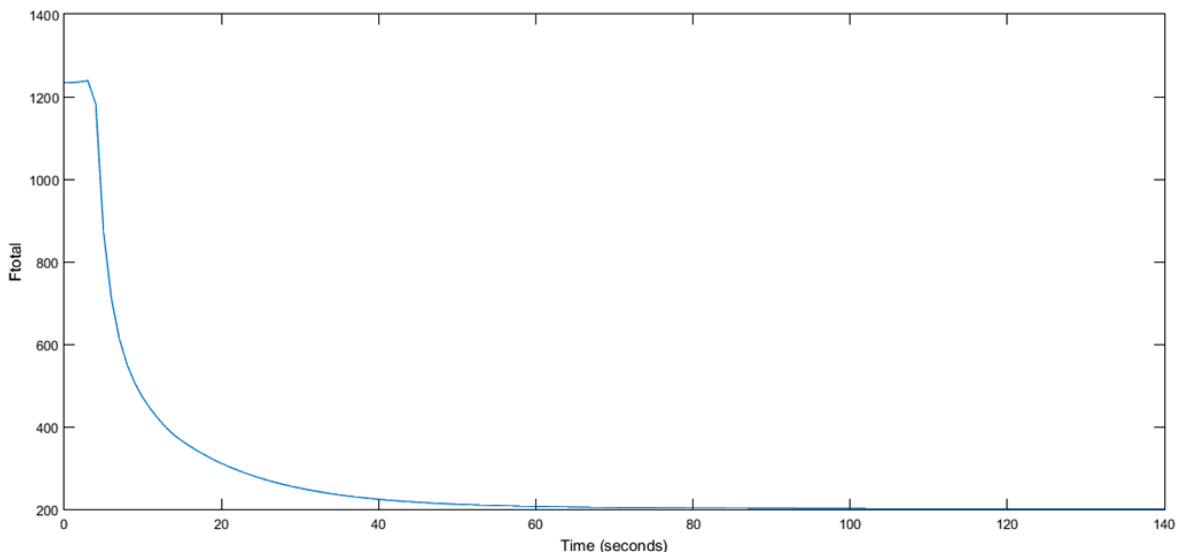


Figure 3.23 : Graph de la somme de toutes les forces

III.3 Résultat

En suite, nous verrons le graph de puissance fournie par le moteur sans aucune force d'influence externe appliqué avec un couple maximum pour vaincre l'inertie initiale et permettre au moteur de prendre rapidement de la vitesse. Cela permet de surmonter la résistance de l'inertie, d'empêcher le patinage des roues ou des éléments d'entraînement et d'assurer un démarrage sûr et efficace du moteur. En fournissant un couple maximal, le moteur a le pouvoir de surmonter les obstacles au démarrage et d'entrer dans son mode de fonctionnement normal:

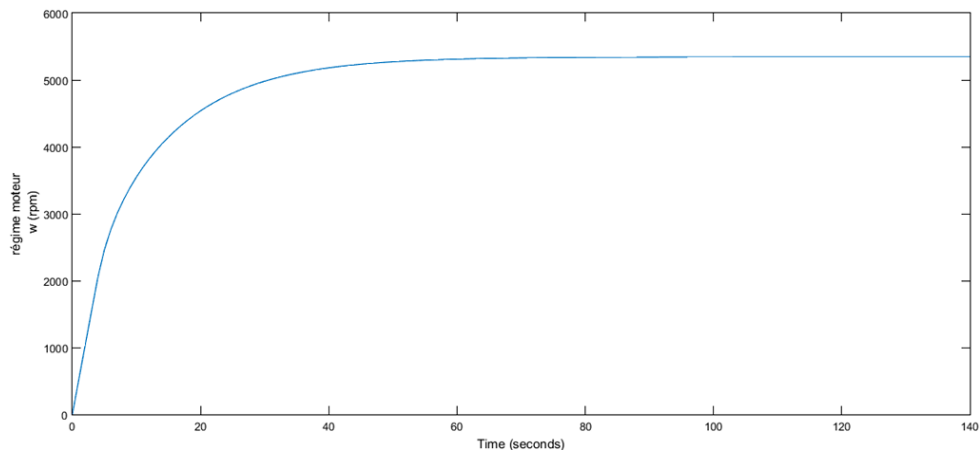


Figure 3.24 : Graph de la régime moteur w pour un couple maximum

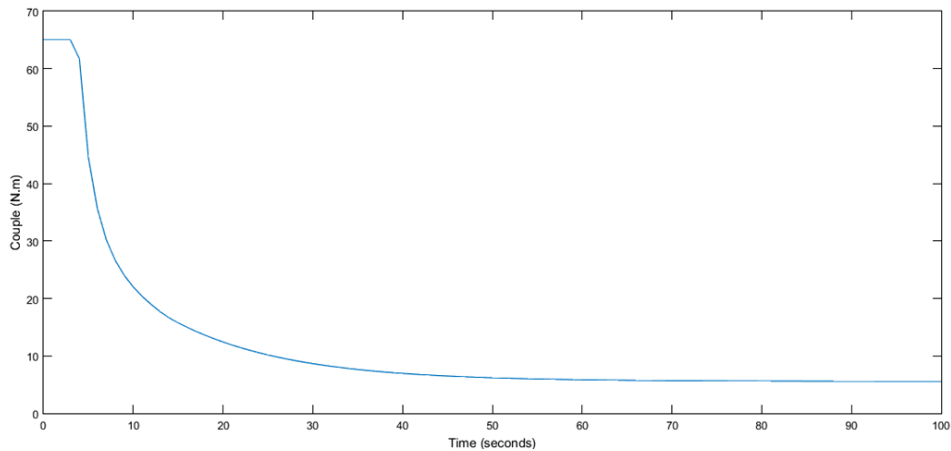


Figure 3.25 : Graph de couple appliqué au moteur

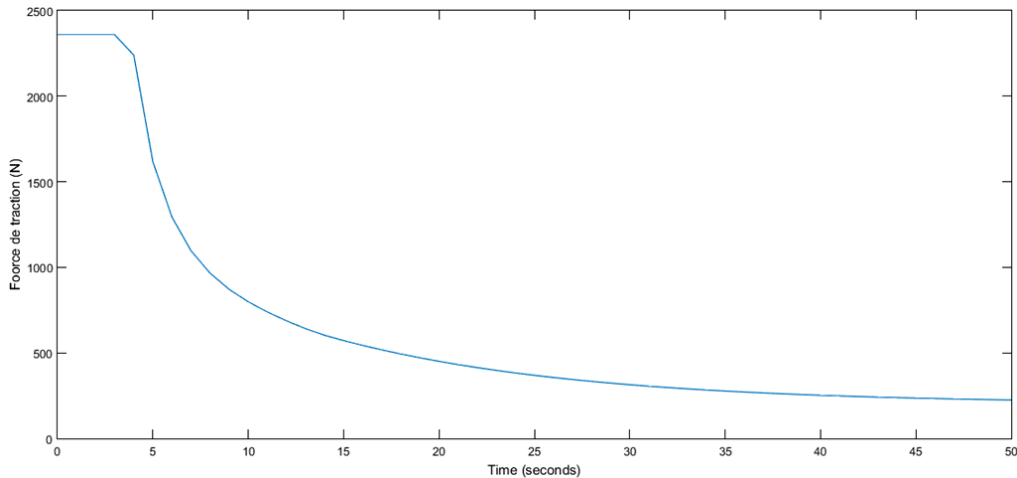


Figure 3.26 : Graph de Force de traction

Lorsque le couple maximum est appliqué au démarrage du moteur, on observe que la courbe de régime moteur augmente. Cela se produit parce que le couple maximal fournit la force nécessaire pour surmonter l'inertie initiale et faire tourner le moteur. À mesure que la vitesse augmente, la charge mécanique sur le moteur peut également diminuer, entraînant une diminution progressive du couple requis.

Lorsque l'on diminue progressivement le couple appliqué au moteur, on constate que la vitesse du moteur continue d'augmenter jusqu'à ce que le couple se stabilise. Cela indique que le moteur atteint son point d'équilibre où la puissance délivrée par le couple est équilibrée par les pertes et la résistance à la charge mécanique. À ce stade, le moteur tourne de manière stable et la vitesse se stabilise également.

Ceci peut être illustré par la courbe de régime moteur, dans laquelle le régime augmente d'abord plus brusquement au démarrage avec un couple maximal, puis augmente plus progressivement lorsque le couple diminue. Une fois que le couple et la vitesse sont stables, la courbe de vitesse devient plus horizontale, indiquant un régime de fonctionnement stable du moteur.

On note la similitude de la forme de la courbe entre le couple et la force de traction, et cela peut s'expliquer par la relation physique entre ces deux grandeurs.

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

Le couple moteur est directement lié à la force de traction exercée par les roues du véhicule.

Lorsque le couple moteur augmente, la force de traction exercée par les roues augmente également. Cela signifie que le véhicule est capable de fournir une plus grande traction pour surmonter la résistance au roulement, la traînée aérodynamique et d'autres forces qui s'opposent à son mouvement. Par conséquent, la courbe de couple et la courbe de force de traction peuvent avoir une forme similaire, avec une augmentation proportionnelle à l'augmentation du couple.

Et maintenant, nous allons entrer toutes les forces qui sont appliquées à la voiture:

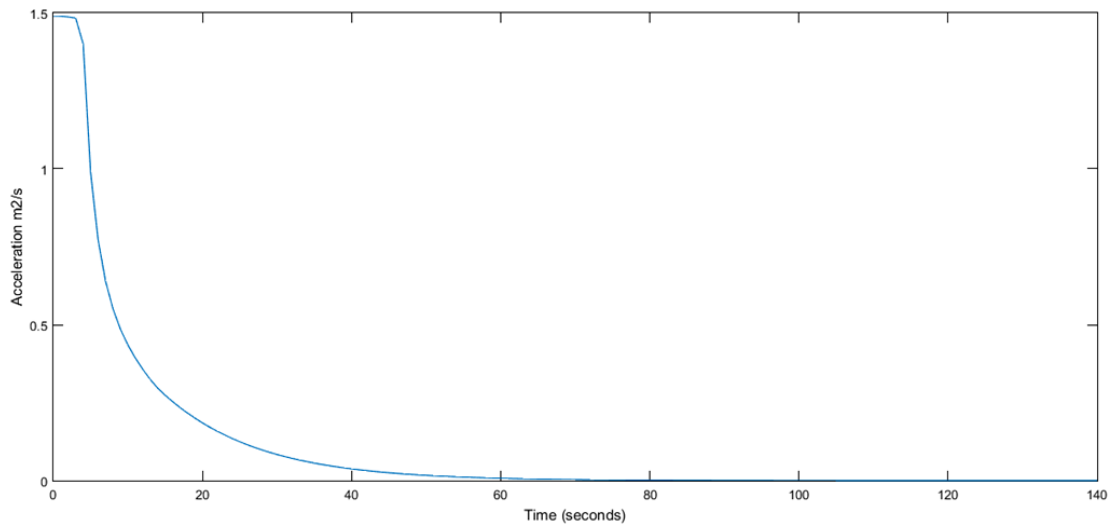


Figure 3.27 : Graph de l'accélération de la voiture

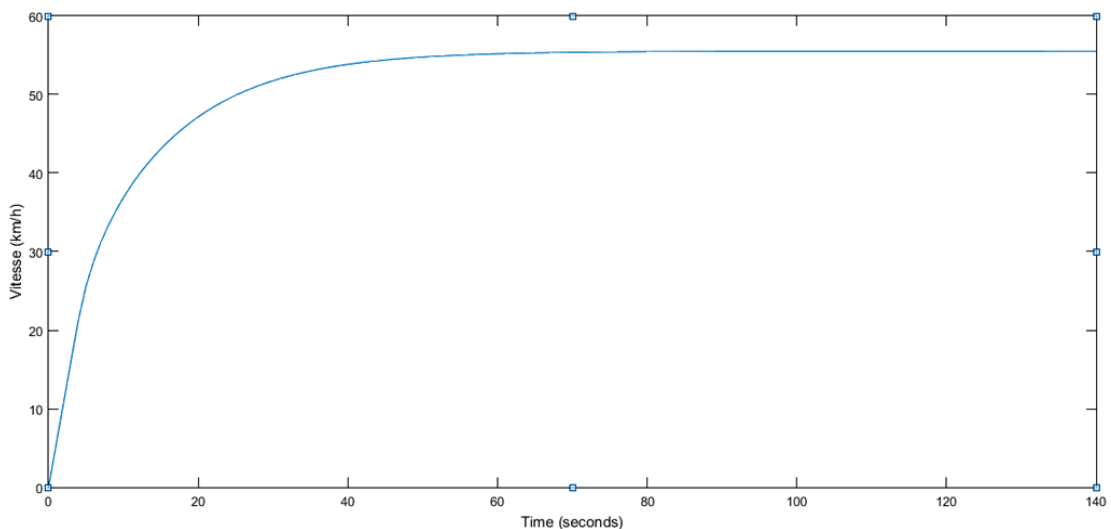


Figure 3.28 : Graph de la vitesse de la voiture

Chapitre 03 application de la commande vectoriel sur d'une véhicule électrique

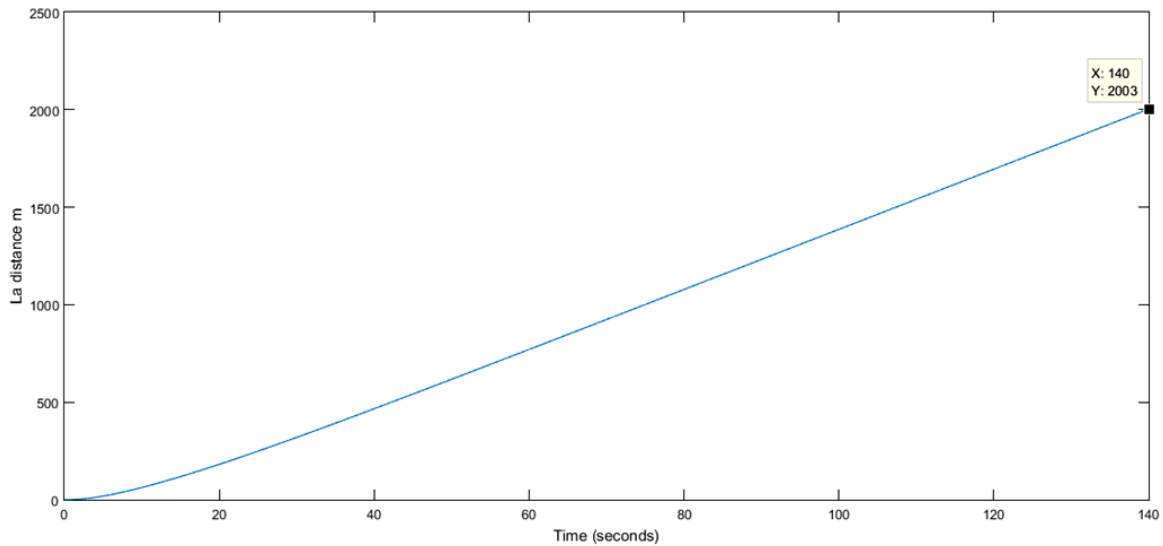


Figure 3.29 : Graph la distance parcourue par la voiture

On remarque que les courbes de vitesse du véhicule atteignent progressivement une valeur maximale, après quoi la vitesse ne peut plus augmenter. Cela se produit lorsque la force motrice fournie par le moteur est équilibrée par toutes les forces s'opposant au mouvement, telles que la traînée aérodynamique et le frottement de rotation.

En d'autres termes, à mesure que la vitesse augmente, les forces de traînée augmentent également, ce qui limite la capacité du moteur à accélérer davantage. Lorsque ces forces s'équilibrent avec la force motrice, la vitesse du véhicule atteint un niveau constant et ne peut dépasser cette valeur maximale.

Sur terrain plat, la vitesse maximale qu'une voiture peut atteindre avec un couple maximal est d'environ 55 km/h. Cela signifie que lorsque le moteur fonctionne à son niveau de couple maximal, le véhicule atteint une vitesse maximale d'environ 55 km/h, après quoi les forces de traînée annulent la force motrice, limitant ainsi l'augmentation de la vitesse.

De plus, on note que l'accélération de 0 à 50 km/h prend environ 28 secondes. Cela indique le temps qu'il faut au véhicule pour atteindre la vitesse définie à partir d'un arrêt complet.

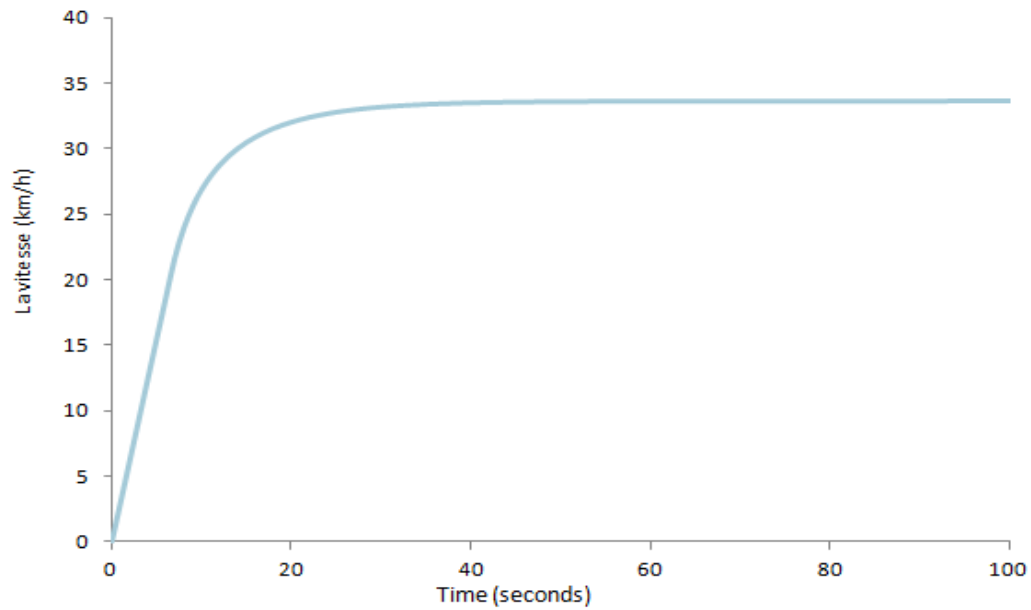


Figure 3.30 : Graph de la vitesse en terrains avec une pente 10%

Concernant les terrains avec une pente de 10%, on note que la vitesse maximale ne dépasse pas environ 34 km/h. Cela indique que sur des pentes plus élevées avec une pente de 10%, la force motrice du moteur n'est pas suffisante pour contrer les forces de traînée, ce qui limite la vitesse maximale à environ 34 km/h.

III.4 Conclusion

En conclusion, l'étude de la force agissant sur une voiture électrique met en évidence l'importance de prendre en compte les différentes forces qui s'opposent au mouvement lors de la conception du moteur. La résistance au roulement, la traînée aérodynamique et la pente des itinéraires jouent tous un rôle crucial dans les performances et les limites de vitesse d'un véhicule électrique.

Pour surmonter ces forces, le moteur doit être capable de fournir un couple adéquat afin de propulser efficacement le véhicule. La conception du moteur doit donc être optimisée pour minimiser la résistance au roulement, réduire la traînée aérodynamique et fournir une puissance suffisante pour faire face aux conditions de conduite variées.

D'où, une conception soignée du moteur en prenant en compte les forces de résistance au roulement, de traînée aérodynamique et de pente des itinéraires, est essentielle pour optimiser les performances et l'efficacité d'une voiture électrique. Cette recherche permet de mieux comprendre les limites de vitesse d'un véhicule électrique et fournit des indications précieuses pour l'amélioration continue des moteurs et des performances des voitures électriques dans le futur.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de créer un modèle de véhicule électrique décrivant son comportement, puis de concevoir une commande vectorielle à flux orienté qui commande le système tout en réduisant sa complexité.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les véhicules électriques, leurs types et les différentes architectures existantes, ainsi que leurs avantages et inconvénients de ces configurations.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons la modélisation de la machine, en se basant sur la transformation de Park, puis on a étudié et appliqué les principes de la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique sur moteur asynchrone qui alimente par onduleur MLI, avec un calcul des différents gains des régulateurs classiques (PI) utilisés dans la commande.

Dans le dernier chapitre, on a fait l'étude des forces agissant sur une voiture électrique mettant en évidence l'importance et l'influence de ces les différentes forces qui s'opposent au mouvement du véhicule électrique. ces forces sont; La résistance au roulement, la traînée aérodynamique et la pente des itinéraires jouent tous un rôle crucial dans les performances et les limites de vitesse d'un véhicule électrique.

Pour surmonter ces forces, le moteur doit être capable de fournir un couple adéquat afin de propulser efficacement le véhicule. La conception et le contrôle du moteur doit donc être optimisée pour minimiser la résistance au roulement, réduire la traînée aérodynamique et fournir une puissance suffisante pour faire face aux conditions de conduite variées.

Cette recherche permet de mieux comprendre les limites de vitesse d'un véhicule électrique et fournit des indications précieuses pour l'amélioration continue des moteurs et des performances des voitures électriques dans le futur.

References bibliographique

- [1] HASSAINE Si Mohamed. Introduction à La Commande En Vitesse D'un Véhicule Electrique Entraîné Par Un Moteur Asynchrone. Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.
- [2] MARIF Ismail & ABDAT Hichem. La commande en vitesse d'un véhicule Electrique. Université de Tlemcen
- [3] Limam Asmaa. Mebarek Kelthoum. Contribution à la Commande vectorielle de la machine asynchrone Appliquée au véhicule électrique série. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [4] <https://beqtechnology.com/blog/histoire-voiture-electrique-evolution-impressionnante>
- [5] KASRI Maissa ZIRI Nassim. Commande vectorielle et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique. Université Abderrahmane Mira
- [6] BELGUESSOUM Amokrane. Conception d'un moteur électrique triphasé de puissance 18,5KW. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [7] <https://fr.demotor.net/moteurs-electriques/types>
- [8] BADI AKRAM. Étude et simulation de convertisseurs DC/DC pour véhicule électrique. UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA
- [9] Joaquim Carlos Novais. Conception et analyse pour fonctionnement de la voiture électrique. Université du Minho Guimarães.
- [10] Réalisation d'un véhicule électrique. MASTER ELECTROMECHANIQUE. Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued.
- [11]:J.P. Caron, J. P. Hautier, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Edition Technip, Paris1995
- [12]:A. Chebbi, « Commande backstepping d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse », Thèse de Magister. Université de Batna2011.

- [13]:S.Damkhi, « Commande sans capteur de vitesse d'un moteur asynchrone par la SFG (SIGNAL FLOW GRAPHS) de Holtz », Thèse de Magistère, université de Batna.2007.
- [14]: Tarek Benmiloud.Commande Du Moteur Asynchrone Avec Compensation Des Effets Des Variations Parametriques. Sujet De Doctorat, Université Mohamed Boudiaf De Oran,13 Décembre 2012.
- [15]: HADDAD Salah, CHARIF Mourad.Etude comparative de la commande vectorielle et celle par mode de glissement d'un moteur asynchrone. Diplôme d'ingénieur , UNIVERSITE DE M'SILA, 2006.
- [16]: Michel Pinard, « Convertisseurs et électronique de puissance : Commande, Description Mise en œuvre ». Dunod, Paris, 2007.
- [17]: [Rez, 09] REZGUI SALAH EDDINE, «Commande de machine électrique en environnement : Matlab/Simulink et Temps Réel. Application à la machine asynchrone: Commande Vectorielle Sans Capteurs Mécaniques SVPWM, Mode Glissant, MRAS», Magister, Université Mentouri de Constantine, algérie, 2009
- [18]: Nabil EZZIANI, « commande adaptative floue backstepping d'une MAS avec et sans capteur mecanique», thèse de doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2010
- [19]: MERABET Kamel, « commande MLI d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée ».thèse de doctorat à l'université du Québec, canada 2011.
- [20]: Tao, Gang. (2003), «Adaptative Design and Analysis », Adaptative and Learning Systems for Signal Processing, Communication, and Control, ISBN 0-471-24752-6.
- [21]: Victor Mester, « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, mai 2007.
- [22]: Nicolas Romani, « Modélisation et Commande du Système d'Alimentation en Air pour le Module de Puissance d'un Véhicule à Pile à Combustible avec Reformeur Embarqué », thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 24 Septembre 2007
- [23]: M.SAAIDIA Ali. Modélisation d'un véhicule électrique. UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET.
- [24]:David Ramsey Herrera. Simulation d'un Véhicule Électrique et son Environnementpour

Étudier la Consommation d'Énergie sous Différentes Conditions Climatiques .Université du Québec À Trois-Rivières.

[25]:MEDHIA Alaeddine. Simulation aérodynamique d'une voiture par Solidworks.
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT.

Annexes

Les paramètres qui sont utilisés pour la simulation:

Puissance nominale : $P= 1.5\text{kw}$

Vitesse nominale : $\Omega n= 160\text{rd/s}= 1527,89 \text{ tr/min}$

Tension nominale : $V= 380/220 \text{ v}$

Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor : $M=0.091 \text{ H}$

Inductance cyclique propre au stator : $Ls= 0.274\text{H}$

Inductance cyclique propre au rotor : $Lr= 0.274\text{H}$

Résistance statorique : $Rs= 4.85 \text{ Ohm}$

Résistance rotorique : $Rr= 3.805 \text{ Ohm}$

Le coefficient de frottement visqueux : $Kf= 0.001136 \text{ kg.m}^2/\text{s}$

Le moment d'inertie : $J= 00.031 \text{ kg.m}^2$

Le nombre de pair de pole : $p=2$

Fréquence : $f=50\text{hz}$
