

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
De MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Automatique et informatique industriel**

Présenté par
**BOUGHANEM SAMIR
CHAOUCHI RABAH**

Mémoire dirigé par **MELLAH RABAH**

Thème
**Commande en vitesse d'un véhicule
électrique**

Mémoire soutenu publiquement le 18 septembre 2018 devant le jury composé de :

Mr. Said Guermah:
M.C.A, UMMTO, Président

Mr. Rabah Mellah:
Professeur, UMMTO, Rapporteur

Mr. Amar Si-ammour:
M.C.A, UMMTO, Examineur

Mr. Koussaila Mesbah:
M.A.B, UMMTO, Examineur

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, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr Mellah, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements aux laborantins et les laborantines pour leu aides précieux.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

A nos parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de nous combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A toute nos familles, et nos amis,

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à nos côtés, et qui nous ont accompagnaient durant nos chemins d'études supérieures, nos aimables amis, collègues d'étude et frères de cœur.

Dédicaces

A toi seigneur DIEU tout puissant créateur du ciel et de la terre.

*Je te remercie pour m'avoir donnée la volonté et surtout le
courage de mener dans de bonnes conditions ce travail.*

*A celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu
te garde dans son vaste paradis, À toi mon père.*

*A la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman et
mon père qui mon pas lâcher tout le long de ses études.*

A mes frères pour leurs appuis et leur encouragement.

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon
Sosso, lyes, mhenna, hcenne et tout l'équipage.*

*A tous ce qui de loin et de près n'ont pas cessé de m'apporter
leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,
et le fruit de votre soutien infaillible.*

Sam er

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I	Généralités sur le véhicule électrique
-------------------	---

Introduction.....	4
I-1) Historique.....	4
I-2) Architecture du Véhicule électrique	5
I-2-1) Batterie.....	6
I-2-2) Convertisseur statique.....	7
I-2-3) Motorisation de la chaîne de traction.....	7
I-2-4) Les moteurs roues	10
I-3) La source d'énergie.....	11
I-3-1) Les batteries	12
I-3-1-a) Types de batteries.....	12
I-3-1-b) Comparaison des types de batteries.....	13
I-3-2) Pile à combustion	16
I-4) Le chargeur.....	17
I-4-1) principe de fonctionnement du chargeur	17
I-4-2) Modes de connexion des chargeurs pour le Véhicule électrique.....	18
I-5) Inconvénients et Avantages des Véhicules électriques.....	20
Conclusion.....	21

Chapitre II	Modélisation du Moteur
--------------------	-------------------------------

Introduction.....	23
II-1) Modélisation du moteur de traction.....	23
II-1-1) Description du phénomène de moteur.....	23
II-1-2) Présentation de la Machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	24
II-1-3) Avantages et Inconvénients	25
II-1-4) Principe de fonctionnement d'une MSAP.....	27
II-1-5) Les hypothèses simplificatrices.....	27
II-1-6) Modélisation de la machine à aimant permanent	28

II-1-6-1) Les équations électriques.....	28
II-1-6-2) Les équations magnétiques	29
II-1-6-3) Les équations mécaniques.....	29
II-1-7) Mise en équation de la MSAP.....	30
II-1-7-1) Principe de la transformation de Park.....	30
II-1-7-2) Transformation de Concordia.....	31
II-1-8) Modélisation de moteur synchrone a aimant permanent dans le plan de Park.....	31
II-1-8-1) Equations électriques.....	32
II-1-8-2) Equations magnétiques.....	32
II-1-8-3) Expression du couple électromagnétique.....	32
II-2) Modélisation de convertisseur statique.....	33
II-2-1) Modélisation de l'onduleur de tension.....	33
II-2-1-1) Classification des Onduleurs.....	33
II-2-1-1-a) Onduleur autonome.....	34
II-2-1-1-b) Onduleur non autonome.....	34
II-2-1-2) Onduleur de tension.....	34
Conclusion.....	37

Chapitre III

Modélisation de véhicule électrique

Introduction.....	39
III-1) Modélisation de véhicule électrique.....	39
III-1-1) Model dynamique.....	39
III-1-1-1) les résistances de véhicule.....	40
III-1-1-1-a) Resistance au roulement	40
III-1-1-1-b) Trainée aérodynamique	43
III-2) Mouvement longitudinal.....	46
III-2-1) Dynamique de véhicule.....	46
III-2-2) Modelé intégré de véhicule électrique.....	47
III-3) Mouvement latéral.....	48
III-3-1) Modèle dynamique et cinématique.....	50
III-3-2) Les différents modes de tractions.....	51

III-3-2-a) ED. Quatre-roues motrice.....	51
III-3-2-b) Roues avant motrice (ED avant).....	52
III-3-2-c) traction arrière (ED arrière).....	53
Conclusion	55

Chapitre IV **commande d'un véhicule électrique**

Introduction.....	57
IV-1) généralité sur PSIM.....	57
IV-2) Architecture des modules utilisé sur PSIM.....	58
IV-2-1) partie commande	59
IV-2-2) partie Onduleur MLI.....	59
IV-2-3) partie moteur.....	60
IV-2-4) SimCoupler.....	61
IV-3) Commande vectorielle de la (MSAP).....	62
IV-3-1) Principe de la commande vectorielle	62
IV-4) Synthèse des régulateurs.....	63
IV-4-1) régulateur PI	63
IV-4-1-1) Dimensionnement du correcteur PI.....	64
IV-4-1-2) Régulateur des courants.....	65
IV-4-1-3) Régulateur de la vitesse.....	68
IV-4-2) La commande Neuro-Flou (ANFIS).....	69
IV-4-2-1) Modélisation d'un régulateur Neuro-Flou (ANFIS).....	70
IV-4-2-2) Architecture du régulateur Neuro-Flou (ANFIS).....	70
IV-4-2-3) Les avantages du régulateur Neuro-Flou (ANFIS).....	72
Conclusion	73

Chapitre V **Interprétation des résultats de simulation**

Introduction	75
V.1) schéma global de simulation	75
V.1.1) Bloc pour le moteur synchrone à aimant permanent.	76
V.1.2) Bloc de régulation	76
V.1.3) Bloc de modélisation de la vitesse longitudinale	76

V.1.4) Block de modélisation latéral.....	77
V.1.5) Block de la modélisation des vitesses de rotation.....	77
V.2) Simulations et Résultats.....	78
V.2.1) Application I : sans correcteur.....	78
V.2.2) Application II :simulation avec un correcteur PI.....	79
V.2.3) Application III : simlation avec un correcteur Neuro-Flou.....	81
V.2.3.a) simulation dans une pente de $\frac{\pi}{4}$	83
V.2.3.b) simulation avec une perturbation	84
Conclusion générale	84

Listes des figures

Chapitre I: Généralité sur le véhicule électrique	1
Figure I.1: Voiture tout électrique	4
Figure I.2: la fameuse voiture électrique : « La Jamais contente »	5
Figure I.3: Structure de la chaine de traction	6
Figure I.4: Motorisation multi moteur [8]	11
Figure I.5: le processus de décharge d'une batterie	14
Figure I.6: Le procès de charge de charge d'une batterie	15
Figure I.7: Principe et composent d une Piles à combustible	16
Figure I.8: Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur	17
Figure I.9: mode de connexion	20
 Chapitre II: Modélisation du la MSAP	23
Figure II.1: Phénomène d'entraînement du moteur électrique	23
Figure II.2:caractéristiques magnétiques de quelques matériaux.	25
Figure II.3: structure d'inducteur à aimant permanent dans la(MSAP)	26
Figure II.4: Schéma de la machine synchrone à aimant permanent	28
Figure II.5: schéma équivalent d'une MSAP dans un repère (d,q)	31
Figure II.6: schéma d'un onduleur triphasé alimentant la MSAP	34
Figure II.7: schéma d'un bras d'onduleur	35
Figure II.8: schéma équivalent d'onduleur	35
 Chapitre III: modélisation du véhicule électrique	39
Figure III.1: Les forces agissant sur un véhicule	39
Figure III.2: La distribution de la pression dans la zone de contact	40
FigureIII.3:Les forces agissant sur le pneu/déformation en chargement/déchargement	41
Figure III.4: Déformation de la surface du sol comme	42
Figure III.5: Trainée de la forme	44
Figure III.6: Les forces agissants sur un véhicule	47
Figure III.7: Modelé de dynamique de véhicule	49
Figure III.8: Modelé dynamique et cinématique	50
Figure III.9: Configuration de la conception de model quatre roues motrices	51
Figure III.10: Configuration de l'ED avant	53
Figure III.11: configuration de l'arrière ED	54

Listes des figures

Chapitre IV: La commande d'un véhicule électrique	57
Figure IV.1 : Représentation du système simulé	58
Figure IV.2 : Schéma globale de moteur synchrone sous PSIM	58
Figure IV.3 : la partie commande	59
Figure IV.4: Composent de la partie électrotechnique	60
Figure IV.5 : Composent de la MSAP	60
Figure IV.6 : Block SimCoupler utilisé	61
Figure IV.7 : Entrée/sortie pour la liaison entre PSIM/Simulink	61
Figure IV.8 : schéma de la commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension ..	62
Figure IV.9 : Schéma de commande utilisant la structure PI	63
Figure IV.10 : Boucle de régulation du courant Id	66
Figure IV.11 : Boucle de régulation du courant Iq	67
Figure IV.12 : la structure de la régulation vitesse avec un correcteur Neuro-Floues ...	69
Figure IV.13 : Le réseau Neuro-Floues (ANFIS)	70
 Chapitre V: Interprétation des résultats de simulation.....	 75
Figure V.1 : Modèle complet de la simulation.....	75
Figure V.2 : Schéma qui illustre le block de régulation	77
Figure V.3 : Block de vitesse latéral et l'angle de glissement du véhicule	77
Figure V.4: Block des vitesses de rotation	77
Figure V.5 : Résultat et simulation de la vitesse V_x	78
Figure V.6 : Résultat et simulation des vitesse de rotation	78
Figure V.7 : Résultat et simulation de l'angle de glissement	79
Figure V.8 : Résultat de simulation de la vitesse V_x	80
Figure V.9 : Résultat de la simulation des vitesses de rotation	80
Figure V.10 : Résultat de simulation de l'angle de glissement	81
Figure V.11 : Résultat de simulation du la vitesse V_x	82
Figure V.12 : Résultat de simlation des vitesses de rotation	82
Figure V.13 : Résultat de simulation de l'angle de glissement	83
Figure V.14 : Résultat de similation de la vitesse V_x sur une pente	84
Figure V.15 : Résultat de similation de la vitesse V_x en injectant une perturbation	85

Chapitre I: Généralité sur le véhicule électrique	4
Tableau I.1: Différents modèles des véhicules électriques	8
Tableau I.2: Comparaison des différents moteurs	10
Tableau I.3: Comparaison des différents types des batteries	13
Tableau I.4: différentes caractéristiques de la charge des batteries [16].....	18
Chapitre III: modélisation du véhicule électrique	39
Tableau III.1: Coefficients de résistance au roulement	43
Tableau III.2: Coefficients de traînée indicatif pour des différentes formes de véhicules	45

Paramètres

$$m=1500 \text{ kg};$$

$$s=2.711 \text{ m}^2;$$

$$R_w=0.43 \text{ m};$$

$$C_D=0.29;$$

$$\rho_{air}=1.204 \text{ kg/m}^3;$$

$$u_x=0.013;$$

$$J_t=5.209 \text{ kg.m}^2;$$

$$G_t=8.75;$$

$$g=9.8 \text{ m/s}^2;$$

$$a_1=1.4 \text{ m};$$

$$a_2=1.4 \text{ m};$$

$$h=0.5 \text{ m};$$

$$L_d=0.00017 \text{ H};$$

$$L_q=0.00029 \text{ H};$$

$$L_f=0.071 \text{ WB};$$

$$P=8;$$

$$J_w=J_t \cdot G_t = 0.089 \text{ kg.m}^2;$$

$$a=a_1+a_2;$$

$$I_z=2200 \text{ kg.m}^2;$$

$$l_f=1.4 \text{ m};$$

$$l_r=1.4 \text{ m};$$

$$C_{\alpha f}=45000 \text{ N/rad};$$

$$C_{\alpha r}=75000 \text{ N/rad};$$

$$R_{eff}=0.43 \text{ m};$$

Nomenclature

Modèle de la machine

$MSAP$	<i>Machine synchrone a aimants permanents</i>
(d,q)	<i>Indice du repère de Park lié au rotor</i>
(α,β)	<i>Indice du repère de conoordia lié au rotor</i>
R_s	<i>Résistance statorique</i>
L_d	<i>Inductance statorique directe</i>
L_q	<i>Inductance statorique quadratique</i>
Ψ_f	<i>Flux d'excitation des aimants permanents</i>
Ψ	<i>Flux statorique</i>
(Ψ_d,Ψ_q)	<i>Composantes du flux statorique</i>
(i_d,i_q)	<i>Composantes du courant statorique</i>
C_{em}	<i>couple électromagnétique</i>
C_r	<i>couple résistant</i>
P	<i>Nombre de paire de pôles</i>
J	<i>Moment d'inertie totale de la machine</i>
f	<i>Coefficient de frottement visqueux</i>
ω	<i>Pulsation électrique rotorique</i>
Ω	<i>Vitesse de rotation mécanique d rotor</i>

Modèle du véhicule électrique

m	<i>Masse du véhicule</i>
C_D	<i>Coefficient de pénétration dans l'air</i>
A	<i>Section frontal du véhicule</i>
ρ_{air}	<i>Densité volumique de l'air</i>
r	<i>Rayon des pneumatiques</i>
G_{total}	<i>rapport totale de transmission</i>
J_{total}	<i>l'inertie totale de rotation</i>
R_w	<i>rayon de la roue</i>
μ_x	<i>coefficient de résistance au roulement</i>
W_m	<i>vitesse de rotation</i>
g	<i>gravité</i>

Nomenclature

R_s	<i>résistance de l'enroulement de stator</i>
a_1	<i>Distance de CG à l'axe de la roue avant</i>
a_2	<i>Distance de CG à l'axe de la roue arrière</i>
h	<i>hauteur de CG à partir de sol</i>

Introduction Générale

Introduction générale

Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter les problèmes de pollution qui sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète. Le véhicule électrique (VE) est l'une des solutions préconisées par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche pour remplacer peu à peu les véhicules classiques. Le devenir de l'automobile moins polluant, dans les prochaines années est donc un sujet de recherche d'actualité.

Aujourd'hui, nous devons faire face à un autre problème lié au véhicule qui est la sécurité routière. Cette dernière a toujours été une grande préoccupation de tous les gouvernements à travers le monde. Le nombre d'accidents sur les routes et les congestions des autoroutes des grandes villes mondiales, causé par le nombre important de véhicules de transport et autres, ne cessent d'augmenter. De là, est née l'idée de développer les systèmes qui assurent le bon fonctionnement du véhicule et son intégrité afin de diminuer l'insécurité sur les routes. À ce titre, les systèmes de contrôle du VE ont fait des avancées significatives ces vingt dernières années. Ils assurent de manière efficace la tenue de route, et principalement la stabilité.

Le contenu de ce mémoire sera présenté en cinq chapitres, l'ordre suivante :

Le premier chapitre, présente quelle que généralités sur le véhicule tout électrique (VE) et nous discutons et définissons les principaux composants de la chaîne de traction (batterie, motorisation, changeur ...).

Dans le deuxième chapitre nous présenterons les structures de la machine synchrones à aimant permanent et son modèle mathématique dans les repère (abc) , (d, q) qui basé sur la transformation de Park et dans le repère (α, β) qui basé sur la transformation de Clarke, puis nous traiterons L'association convertisseur machine.

Dans la première partie du troisième chapitre nous présenterons la modalisation de la dynamique du véhicule Ce dernier est propulsé par un moteur de type synchrone a aimant permanent. Dans la deuxième partie nous allons décrire le modèle dynamique latéral du véhicule et enfin nous allons terminer ce chapitre avec une présentation et une modalisation des différents modes de tractions des roues.

La première partie du quatrième chapitre nous la consacrons à une brève présentation du logiciel utilisé, en suite nous allons présenter le modèle complet et les blocks de fonctions utilisés sous MATLAB/Simulink et la modalisation du véhicule électrique développé dans le

Introduction générale

chapitre quatre. Et Afin de caractériser le comportement des roues d'entraînement d'un véhicule électrique, nous avons appliqué dans la deuxième partie deux techniques de commande, qui sont la commande vectorielle avec le régulateur PI classique et la commande par correcteur Neuro-flou adaptatif de type ANFIS (Adaptive Neural Fuzzy Inference System).

Finalement, le cinquième chapitre, sera consacré à la validation et interprétation des résultats de simulation relatifs aux types de stratégies de commande proposées en vue tirer profit du point de vue robustesse et puis on termine par une conclusion général

Chapitre I

Généralités sur le véhicule électrique

Introduction

Avec une présence importante au début de l'histoire de l'automobile, le véhicule tout électrique est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule conventionnel. Même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers, il reste sans conteste une bonne solution en rapport à la disposition d'une source d'énergie embarquée performante.

Les véhicules autonomes tout électriques utilisent des batteries comme seule source d'énergie électrique. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction.

La figure 1.1 représente le schéma synoptique d'un véhicule électrique.

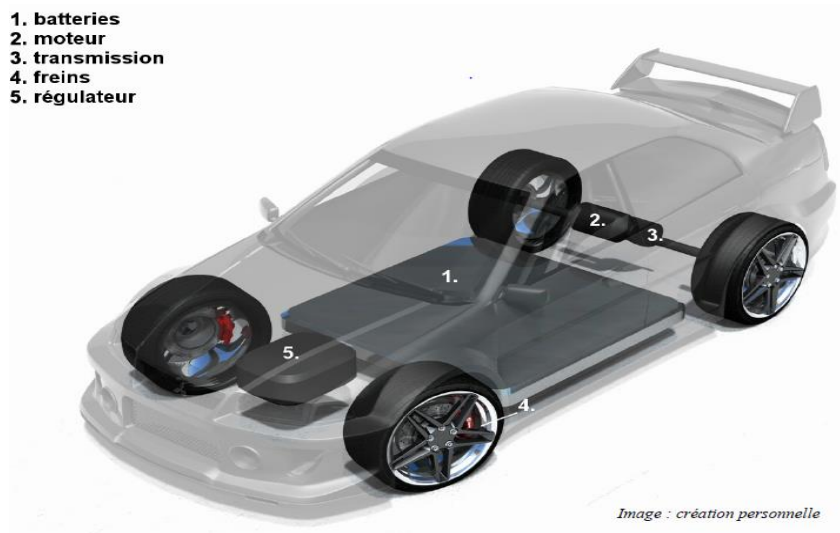


Figure I.1 Voiture toute électrique

I-1 Historique

L'histoire du véhicule électrique a commencé au XIX^e siècle par la conception des premiers prototypes, allant du train miniature à la carriole. En 1865, la batterie rechargeable découverte par Gaston Planté, puis améliorée par Camille Faure en 1881, ont permis l'essor des voitures électriques [1].

Depuis quelques années, un regain d'intérêt est porté au véhicule électrique. Ce n'est pas la première fois que celui-ci est vu comme alternative ou complément aux véhicules thermiques

(VTh). Ainsi, au cours des siècles derniers, le véhicule électrique n'a eu de cesse de concurrencer ses homologues thermiques, sans pour autant remporter de franc succès.

Pourtant, en 1897, un premier projet à grande échelle voit le jour à New-York concernant la flotte de taxis. Puis, deux ans après, à la suite des premiers records de « La Jamais contente » atteignant 100 km/h, de l'ingénieur belge Camille Jenatzy, les premières motorisations grandpublic auraient pu être électriques. Bien que, en 1900, sur 4200 véhicules fabriqués aux Etats-Unis, 22 % étaient à essence, 38 % électrique et 40 % à vapeur, les faibles performances d'autonomie face aux thermiques eurent tôt fait de mettre fin à ce développement [2].

Une situation conjoncturelle de restriction économique et énergétique pendant la Seconde Guerre mondiale a fait renaître l'intérêt pour les alimentations ou motorisations alternatives telles que les gazogènes ou les moteurs électriques. Ainsi, au cours de cette période, un constructeur automobile français (Peugeot) a fabriqué 20 000 exemplaires du « Véhicule Léger de Ville » et développé la 202 électrique. La fin du conflit mondial et le réapprovisionnement de l'Europe en combustible fossile ont mis un terme aux projets électriques. Il a fallu attendre le grand choc pétrolier de 1973 pour que le véhicule électrique réapparaisse de façon temporaire comme alternative, freiné par le peu de progrès technologiques sur les batteries et par des prix beaucoup trop élevés.



Figure I.2 la fameuse voiture électrique : « La Jamais contente »

I-2 Architecture du véhicule électrique

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique.

Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse.

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesses implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la figure I.3[3].

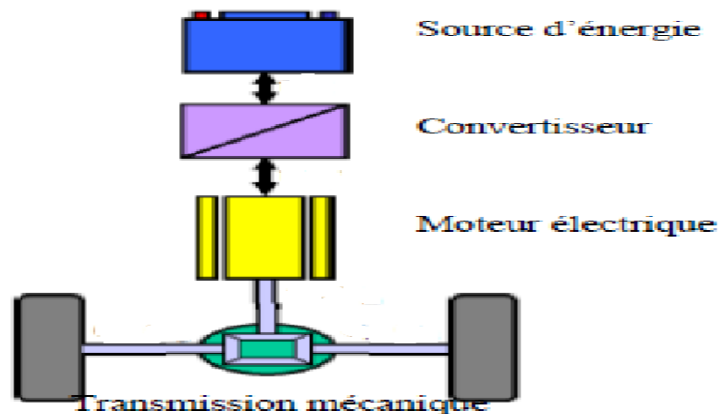


Figure I.3 Structure de la chaîne de traction

I-2-1 Batterie :

La batterie est un réservoir d'énergie électrique qui se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient. Une batterie de traction doit satisfaire les conditions suivantes [4] :

- Puissance massique élevée, afin de garantir de bonnes accélérations et reprises au véhicule
- Grand nombre de cycles charge/décharge sans dégradation importante des performances
- Faible coût de production,
- Sécurité d'emploi, pas de risque d'explosion ou de dégagement de gaz nocifs,
- Possibilité d'estimation précise de l'état de charge,
- Possibilité de recharge rapide,

I-2-2 Convertisseur statique :

L'actionneur peut être alimenté au moyen d'un onduleur de courant ou d'un onduleur de tension, mais pour une alimentation par batterie dans cette gamme de puissance, un onduleur de tension triphasé représente une bonne solution.

L'onduleur permet l'alimentation en courant à fréquence variable de la machine, de façon à régler son couple et sa vitesse. La commande électronique génère les signaux de commande de l'onduleur à partir de la position du rotor et de la mesure des courants dans la machine. Pour notre application, nous pouvons alimenter le moteur par un onduleur de tension contrôlé en courant par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [4] [5].

Le contrôle des courants s'effectue au moyen de régulateurs qui assurent le suivi d'une référence à fréquence et amplitude variables.

I-2-3 Motorisation de la chaîne de traction :

Les performances globales d'un VE dépendent amplement du type de moteur d'entraînement. Employer un moteur électrique au lieu d'un moteur thermique convient beaucoup mieux à la propulsion d'un véhicule, les voitures électriques pourraient donc avoir une meilleure efficacité au cours de la conversion d'énergie en plus de ne pas produire les émissions associées au processus de combustion avec un bruit inférieur. En revanche dès que le conducteur relâche l'accélérateur du véhicule électrique, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice pour recharger les batteries ainsi de manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes :

- Assurer un démarrage en côte du VE (couple élevé)
- Obtenir une vitesse maximale
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses)

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le moteur à courant continu (MCC), asynchrone (MAS), synchrone à aimant permanent (MSAP), reluctance

variable(MRV) etc. certains des modèles du VE utilisés par différentes compagnies sont énumérés ci-dessous avec le type du moteur.

Compagnie	Modèle du 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 à induction
Ford	Ford Think City	Moteur à induction

Table I.1 Différents modèles des véhicules électriques

➤ Moteurs à courant continu

Le fait que la source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en général, les 0,3 à 0,5 KW/kg ; alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre 0,75 à 1,1 KW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application. Ces raisons, ont conduit les différents industriels à s'orienter vers l'utilisation des machines alternatives triphasées [5] [6].

➤ Moteurs à courant alternatif

L'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant les moteurs à courant alternatif beaucoup plus préférables que les entraînements traditionnels avec des moteurs à courant continu. Car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé, une fiabilité plus grande, et ils nécessitent également moins d'entretien que les moteurs

à courant continu. Ces facteurs sont d'importance primordiale pour un système de propulsion de véhicule électrique. Quatre principaux types de moteurs peuvent se discerner :

— **Moteurs à induction :**

Ces moteurs sont peu coûteux en raison de leur construction simple, robuste, et ne demande pas d'entretien. De plus, ils supportent des surcharges qui peuvent aller de 5 à 7 fois le couple nominal. De bonnes performances dynamiques de contrôle du couple. En revanche, le fait que ses commandes sont assez complexes, ceci peut augmenter totalement le coût de revient de l'ensemble du système.

— **Moteurs synchrones :**

Le moteur à aimants permanents possède une puissance massique plus importante. Ceci mène à la réduction du poids et du volume d'une manière globale. Mais le coût des aimants est encore élevé. En outre, il ne présente pas de pertes joules au niveau de rotor ce qui engendre un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux moteurs à induction.

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

— **Moteurs linéaires :**

Principalement utilisés en traction électrique pour les trains à grande vitesse supérieure à 500 km/h, et ils sont associés à des systèmes de sustentation magnétique. En outre, ils sont développés au Japon à base de la très haute technologie.

— **Moteurs à reluctance :**

De construction similaire à celle d'un moteur asynchrone, mais avec un rapport puissance/poids très important. Néanmoins ils en demeurent bruyants (ondulation de couple).

Donc, à chaque application de propulsion électrique s'applique un type de moteur différent. Il n'y a pas de moteur universel, tout comme pour les batteries et les contrôleurs. Le spécifique donnant toujours un meilleur résultat que le standard. Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté relative à la commande qui s'affrontent.

La table I.2 ci-dessous résume bien, de manière qualitative, les avantages et les inconvénients des principaux types des moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

	Moteur à Courant continu	Moteur Asynchrone	Moteur Synchrone à Aimants permanents
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	Très bon

Table I.2 Comparaison des différents moteurs

I-2-4 Les moteurs roues :

La chaîne de traction toute électrique présentée à la figure 1.4, peut être encore simplifiée en utilisant des moteurs à roue. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte à vitesse et l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices. Dans ce cas deux configurations sont possibles [1], [7] :

- Soit les moteurs sont fixés sur les roues formant ainsi ce qui connut sous le nom Moteur-roue.
- Soit les moteurs sont associés à un réducteur.

Dans le premier cas schématisé par la figure I.4, les moteurs et les roues sont confondus, et la transmission est simplifiée. Mais pour réduire au minimum les masses non suspendues les moteurs-roues doivent avoir une forte puissance massique. A cause de ces contraintes, les moteurs-roues sont relativement Coûteux, limitant ainsi leur utilisation. Dans le deuxième cas représenté par la figure I.4 (b), les moteurs sont associés à un réducteur de rapport fixe pour accroître le couple massique. L'avantage de cette configuration est que le réducteur isole les roues de la masse du moteur, ce qui rend la conduite du véhicule plus facile,[8][9].

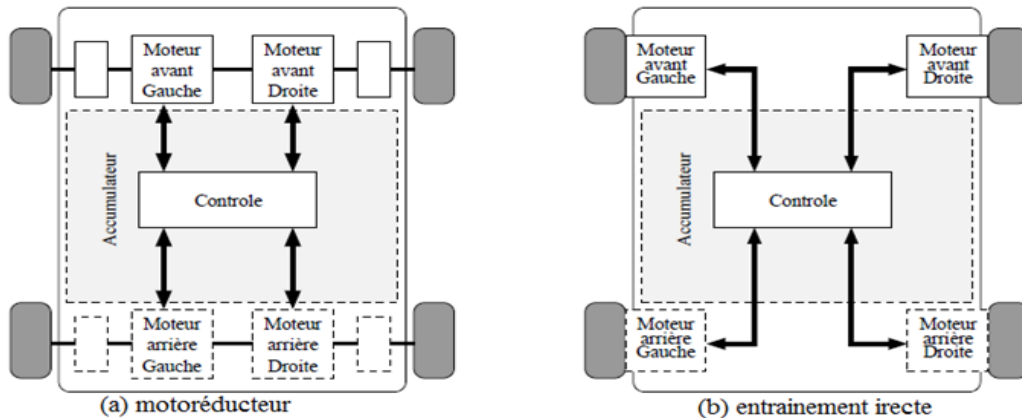


Figure I.4: Motorisation multi moteur

I-3La source d'énergie

Trois principales technologies des sources embarquées utilisées dans le domaine de la traction électrique (véhicule électrique). La première technologie est la batterie utilisée dans toutes les voitures électriques actuelles.

La seconde technologie est la pile à combustible, considérée comme étant une solution d'avenir d'après les spécialistes de ce domaine. Enfin, la dernière technologie est représentée par les super condensateurs, une source d'énergie d'appoint capable d'assurer les forts appels de puissance et la récupération d'énergie en cas de freinage.

I-3-1Les batteries

Le développement du Véhicule Électrique (VE) passe presque exclusivement par l'évolution de la batterie de voiture électrique. Voici tout ce qu'il faut savoir sur leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients et leurs possibles améliorations.

I-3-1-A Types de batteries :

Une batterie typique consiste en deux ou plusieurs cellules électrochimiques réunies. La batterie convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique. Une cellule de batterie unique est faite de deux électrodes dont l'une est négative et l'autre est positif, qui sont connectés par un électrolyte. La réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte génère de l'électricité. Cette batterie est Rechargeable

- **Plomb / acide**

Une batterie au plomb est un ensemble d'accumulateurs au plomb-acide sulfurique raccordés en série, afin d'obtenir la tension désirée, et réunis dans un même boîtier. Les plaques et grilles de plomb sont en réalité constituées de plomb durci (par exemple à l'aide d'étain, de cadmium et de strontium, à raison de quelques pourcent de l'alliage).[11]

- **Nickel-cadmium : Ni-Cd**

Une batterie au nickel-cadmium est une batterie rechargeable utilisée pour les appareils portatifs et autres petits appareils alimentés par batterie nécessitant une décharge de puissance uniforme. Les Ni-Cd utilisent des électrodes faites d'hydroxyde d'oxyde de nickel, de cadmium métallique et d'un électrolyte alcalin d'hydroxyde de potassium. [12]

- **Nickel-hydrure métallique : Ni-MH**

La technologie Ni-MH est extrêmement répandue dans les accumulateurs portables d'usage courant :

- les modèles AA/HR6 dont la capacité peut atteindre 2 900 Mah pour les plus performants.
- les modèles AAA/HR3 dont la capacité maximale est de 1 000 Mah. Hormis le nickel (sous forme d'oxy-hydroxyde) de l'électrode positive, les accumulateurs Ni-MH utilisent comme électrolyte une solution d'hydroxyde de potassium.

Ainsi qu'un alliage hydrurable à base de lanthane et de nickel de type LaNi_5 . [13]

- **Lithium**

Il existe trois sortes principales d'accumulateurs lithium :

- L'accumulateur lithium métal, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité) ;

- les accumulateurs lithium-ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer) ;
- Les accumulateurs lithium-polymère sont une variante et une alternative aux accumulateurs lithium-ion. Ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.

Contrairement aux autres accumulateurs, les accumulateurs lithium ion ne sont pas liés à un couple électrochimique. Tout matériau pouvant accueillir en son sein des ions lithium peut être à la base d'un accumulateur lithium ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes, face à la constance observée avec les autres couples. Il est donc délicat de tirer des règles générales à propos de cet accumulateur, les marchés de fort volume (électronique nomade) et de fortes énergies (automobile, aéronautique, etc.) n'ayant pas les mêmes besoins en termes de durée de vie, de coût ou de puissance [14].

I.3.1.B Comparaison des Types de batteries :

Le tableau suivant, donne les caractéristiques relatives aux différentes batteries les plus utilisées :

Type	Energie massique Wh/Kg	Energie volumique Wh/l	Tension d'un élément	Puissance en Pointe en W/kg	Durée de vie (nombre de recharges)	Autodécharge par mois
Plomb/acide	30-50	75-120	2.25V	700	400-800	5%
Ni-Cd	45-80	80-150	1.2V	-	1500-2000	>20%
Ni-MH	60-110	220-330	1.2V	900	800-1000	>30%
Li-ion	90-180	220-400	3.6V	1500	500-1000	2%
Li-Po	100-130	-	3.7	250	200-300	2%
Li-PO	120-140	190-220	3.2V	800	2000	5%
Li-Air	1500-2500	-	3.4V	200	-	-

Tableau I.3 Comparaison des différents types des batteries.

Ce tableau I.3 propose une comparaison entre les différentes technologies relatives aux batteries. L'accumulateur Li-polymère est moins performant que le Li-ion mais fabriqué

différemment. Il prend moins de place que le Li-ion. Par conséquent une batterie Li-Po de même taille qu'une batterie Li-ion possède une capacité plus importante. Comme aussi, le tableau précédent donne l'énergie massique. Or, une batterie Li-Po est plus dense qu'une Li-ion. [15]

— Le processus de décharge

Pendant la décharge, la batterie est génératrice et débite du courant dans le moteur de traction. Pour permettre l'apparition d'un courant électrique, il est nécessaire que les électrons et les ions puissent circuler. Ainsi, un récepteur va permettre la liaison entre la cathode (+) et l'anode (-).

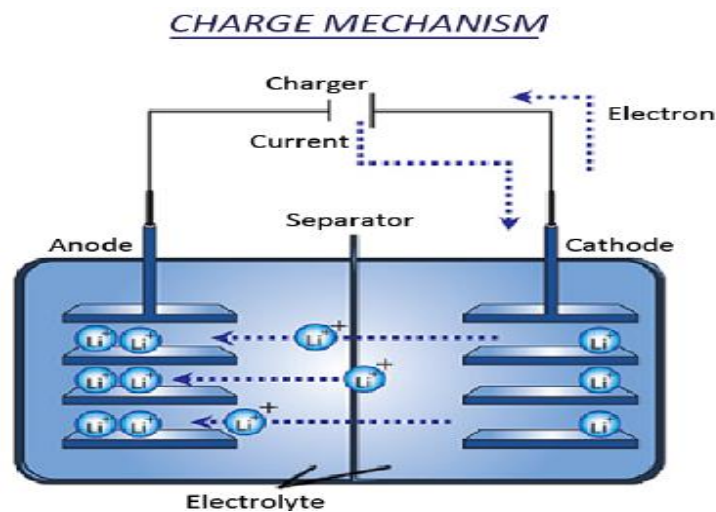


Figure I.5 le processus de décharge d'une batterie

Le principe de fonctionnement pendant la décharge est le suivant :

Le galvanomètre joue le rôle récepteur et le déplacement de son aiguille prouve le passage du courant

La batterie se décharge ...

Il est à rappeler que l'intensité du courant est proportionnelle à la quantité d'électrons déplacés et à la quantité de matière mise en œuvre

Une batterie chargée possède un excès d'électrons à sa plaque négative et un manque d'électrons à sa plaque positive.

Lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons, la batterie ne débite plus de courant (on dit qu'elle est « à plat »).

— Le processus de charge

Pendant la charge, la batterie est réceptrice du courant fourni par le secteur.

Le procédé est l'inverse de la décharge, ou un générateur de courant (dynamo, chargeur) est placé aux bornes des électrodes et débite en sens inverse dans le système.

Il va permettre de déplacer les électrons de la plaque positive vers la plaque négative et redonner à la batterie son état initial.

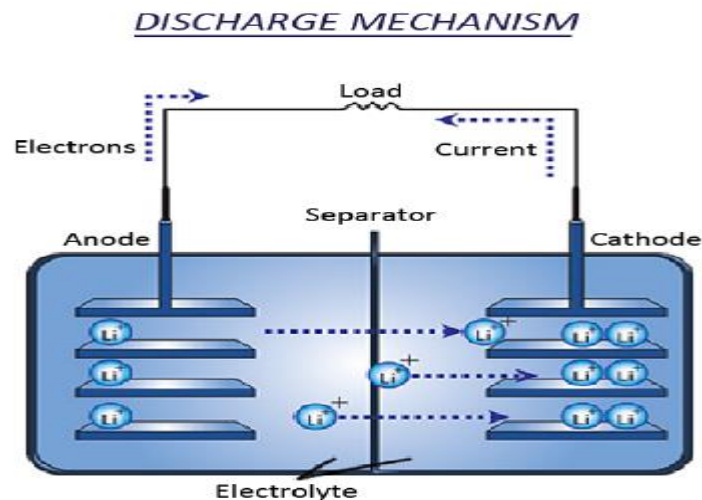


Figure I.6 Le procès de charge d'une batterie

Pendant la charge, le courant circule en sens inverse. Ainsi, le galvanomètre dévie dans le sens inverse à celui de recharge. L'intensité du courant et la quantité de matière déplacée est toujours proportionnelle au nombre d'électrons en mouvement.

Lorsque la plaque négative est en excès d'électrons, la batterie est rechargée. L'utilisation du générateur électrochimique s'effectue en deux phases, la charge et la décharge.

A l'intérieur de la batterie, l'énergie chimique se manifeste par un transfert de matière grâce à une circulation d'ions.

A l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se manifeste par un déplacement d'électrons.

La réaction chimique fait apparaître deux autres phénomènes qui gênent : un dégagement de gaz et une montée en température.

I.3.2 Piles à combustible :

Parmi l'ensemble des secteurs incriminés dans les problèmes d'environnement, l'automobile est régulièrement citée notamment que le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter et il a atteint de plus de 850 millions d'unité dans le monde en 2005. Les véhicules électriques à pile combustible présentent une solution prometteuse dans ce domaine avec la propulsion dite « zéro émission » qui est envisageable avec eux. En outre, le rendement des véhicules électriques est très élevé par rapport à celui des véhicules thermiques sans oublier de citer le silence aboutit avec eux surtout dans les zones urbaines

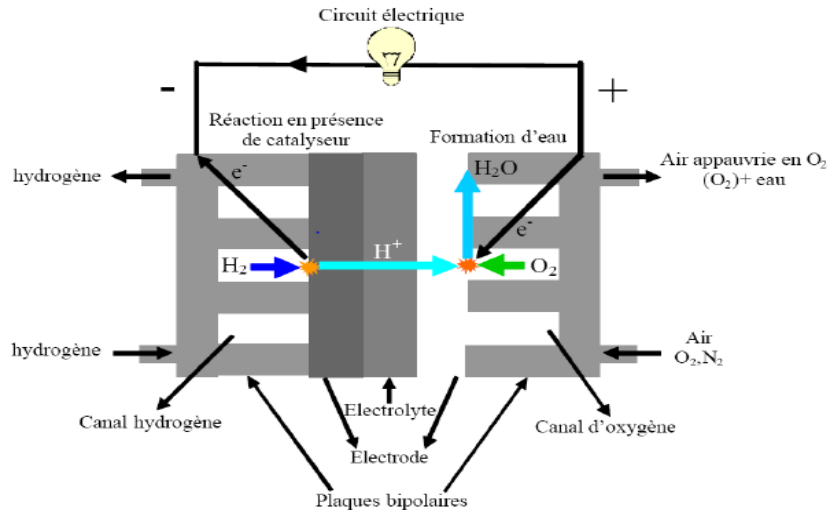


Figure I.7 Principe et composant d'une Piles à combustible

I-4 Le chargeur :

I-4-1 Principe de fonctionnement du chargeur :

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique, c'est-à-dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Dans le cas d'une alimentation par courant alternatif, la charge s'effectue généralement en deux étapes, illustrées par la figure suivante. [16]

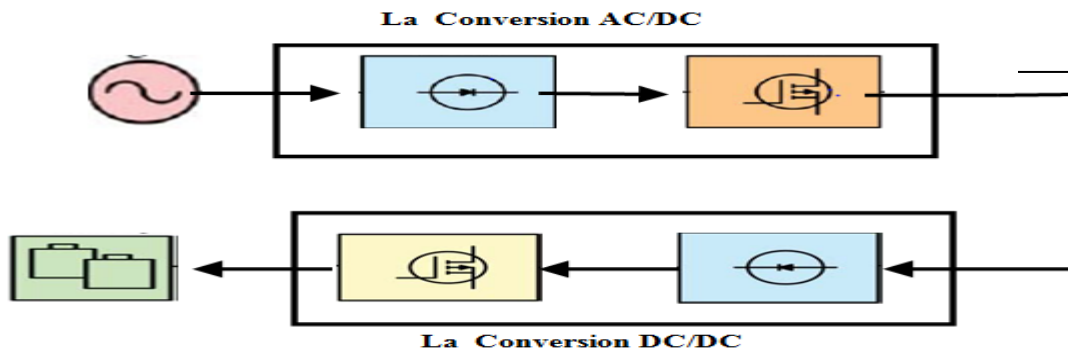


Figure I.8 Synoptique des étapes de conversion d'un chargeur

- **Conversion AC/DC :**

La transformation du courant alternatif délivré par le réseau de distribution en courant continu est réalisée soit par un pont redresseur à diodes, ou par d'autres systèmes tels que, un pont à thyristors ou un convertisseur à absorption sinusoïdale de courant.

- **Conversion DC/DC :**

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

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

- **Chargeur externe** : installé à l'extérieur du véhicule, l'énergie électrique adaptée aux caractéristiques de la batterie, est fournie directement au véhicule.
- **Chargeur embarqué** : intégré au sein du véhicule et l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule. Cette configuration ne nécessite pas de convertisseurs supplémentaires au sol.

En fonction de la puissance disponible et transmise à la batterie, la durée de recharge évolue. Le tableau donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation.

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

Tableau I.4différentes caractéristiques de la charge des batteries[16].

I-3-2Modes de connexion des chargeurs pour véhicule électrique [17]

➤ La recharge à domicile

La recharge à domicile constitue en général 95% des recharges effectuées par un utilisateur de voiture électrique. Elle a donc une importance toute particulière.

Si elle est relativement simple à mettre en place dans une résidence individuelle, elle peut devenir un vrai casse-tête, voire impossible, lorsqu'on habite en copropriété.

Il y a deux façons de recharger une voiture électrique chez soi : sur une prise domestique standard en utilisant le câble de recharge fourni (ou en option) avec le véhicule ou en utilisant une wallbox.

- **La recharge à l'aide du cordon de recharge**

Toutes les voitures électriques sont fournies avec un câble permettant la recharge sur une prise domestique standard. Il est possible d'utiliser ce câble pour recharger quotidiennement la voiture électrique.

Les câbles de recharge limitent volontairement l'intensité du courant à 8 à 10A, ce qui implique des temps de recharge longs. Toutefois, si vous rechargez votre voiture toutes les nuits, cette différence de temps de recharge peut s'avérer négligeable [17].

- **La recharge sur une wallbox**

L'utilisation d'une wallbox est recommandée par les grands constructeurs qui invoquent une recharge plus sécurisée. L'autre avantage d'une wallbox est qu'elle permet de recharger plus rapidement votre voiture grâce à un courant d'une intensité plus élevée (16A en dans la majorité des cas, mais cela peut être plus).

- **La recharge d'une voiture électrique sur les bornes publiques**

La recharge sur les bornes publiques constitue 5 à 10% des recharges effectuées par les utilisateurs de voitures électriques. Ce chiffre varie en fonction du taux d'équipement des régions en bornes de recharge.

Il en résulte différents types et différents modes de recharge qui sont illustrés sur cette la figure I.9.

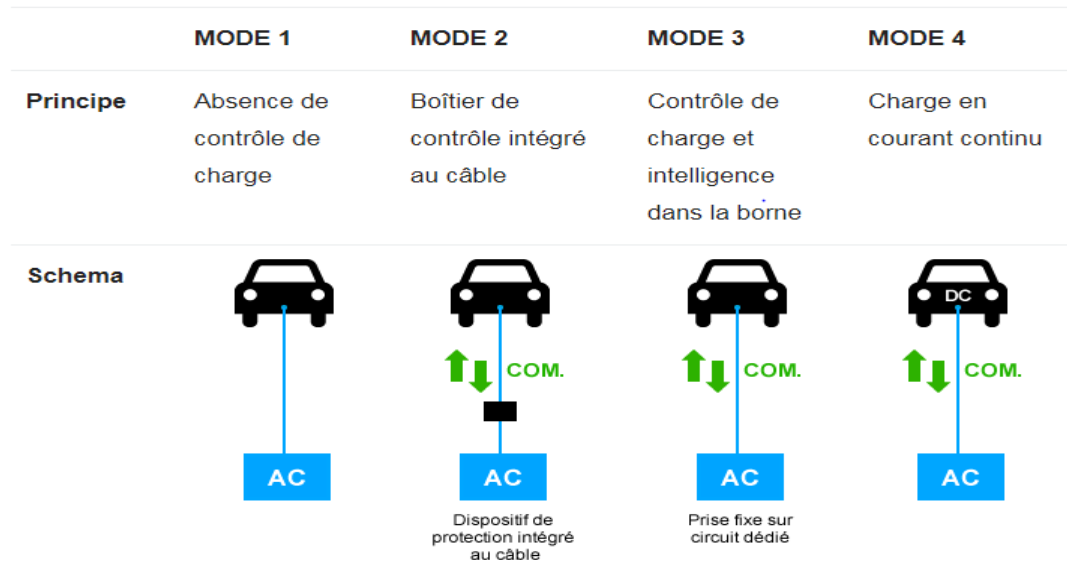


Figure I.9 Modede connexion

I-5 Inconvénients et avantages des véhicules électriques :

Depuis les premières réalisations de véhicules électriques, dans les années 1830, le frein essentiel à leur développement a été et reste encore de nos jours liés aux faibles performances des accumulateurs électriques dont l'énergie massique est comprise entre 30 et 120 Wh/kg, alors que les carburants pétroliers atteignent 12000 Wh/kg, soit cent fois plus que les meilleurs accumulateurs électrochimiques actuels.

Parmi les principaux freins à la présence significative des VE dans le trafic urbain, citons une autonomie limitée, l'absence d'infrastructures de recharge et un coût d'achat élevé.

Ainsi, deux inconvénients notables du VE liés à son système de stockage d'énergie, apparaissent d'une part, une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie. D'autre part, une longue durée de recharge ou une puissance excessive de charge (conditionnée par l'acceptabilité de l'accumulateur et par le coût d'infrastructure).

En revanche, ses deux principaux atouts sont l'absence de pollution atmosphérique locale et le faible bruit acoustique. Notons également qu'une telle chaîne de conversion est réversible et qu'elle peut permettre la récupération d'énergie dans les descentes ou lors des freinages [17].

Conclusion :

Dans ce chapitre, un aperçu et la présentation de tous les composants du véhicule tout électrique.

Et tout nous laisse à croire que la voiture électrique peut réellement devenir une alternative aux voitures actuelles. Bien sûr qu'il y a encore du chemin à parcourir, la capacité et le temps de chargement des batteries jouera un rôle très important, et les aspects pratiques tels un chauffage ou un dégivrage devront être correctement résolus.

Chapitre II

Modélisation de la MSAP

Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

La première étape de la synthèse d'une loi de commande appropriée au moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) est la modélisation de ce dernier. Le modèle établi doit être capable de représenter fidèlement les différentes dynamiques présentes, en termes d'équations différentielles. Cette modélisation est basée essentiellement sur la transformation de Park.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation du moteur synchrone à aimants permanents, ainsi le convertisseur statique.

II.1 Modélisation du moteur de traction

II.1.1 Description du phénomène de moteur

Le domaine technique au quel se rapporte l'invention est le contrôle des groupes motopropulseurs électriques qu'on trouve dans les véhicules électriques. Pour un tel véhicule, le contrôle du moteur électrique permet d'interpréter la volonté du conducteur à travers pédales d'accélérateur et de freins, en consigne de couple positive ou négative.

Cette consigne de couple moteur est ensuite transmise au bloc de l'électronique de puissance (onduleur) qui assure l'élaboration des grandeurs de consigne électrique (tension et courant) correspondantes. Le moteur électrique assure la conversion de la puissance électrique en puissance mécanique. Et enfin le couple du moteur électrique est transmis aux roues par l'intermédiaire d'un éventuel réducteur comme le montre le schéma suivant [18] :

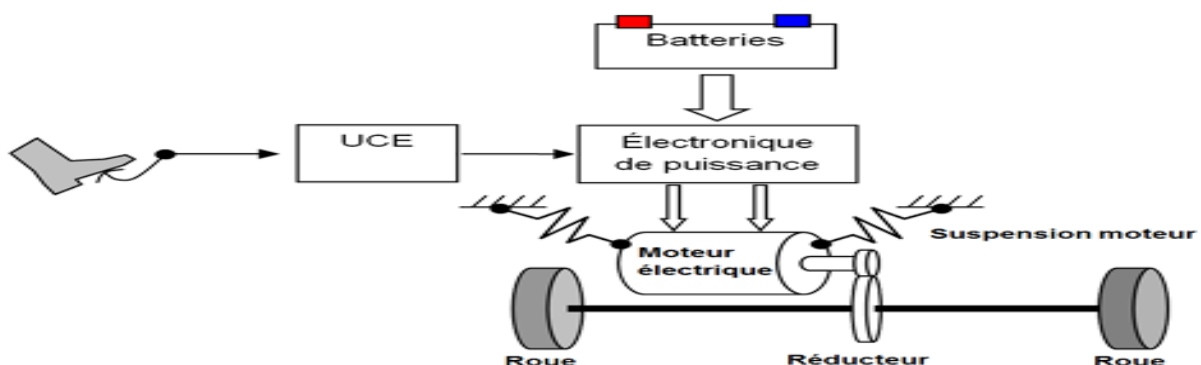


Figure II.1 Phénomène d'entraînement du moteur électrique

Cet ensemble d'organes électromécaniques, qui assure la transmission du couple de consigne conducteur aux roues est appelé chaîne de traction. Cette dernière comme tous les systèmes physiques, est définie par un ensemble de grandeurs caractéristiques en rapport avec des inerties qui peuvent être rencontrées et de l'électronique de puissance utilisée. Ces grandeurs décrivent le comportement dynamique de la chaîne de traction. Elles impactent le comportement du véhicule lors des variations de la consigne du couple (donnée par le conducteur). Néanmoins, certaines configurations de ces grandeurs peuvent générer des oscillations, même pour des consignes de couple stables [18].

II-1-2) Présentation de la Machine synchrone a aimant permanent

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) plus performant et plus compact grâce à sa puissance massique élevée. Les aimants permanents frittés en terres rares en samarium cobalt ou en néodyme-fer-bore ont fait de gros progrès et leur introduction en traction électrique est en plein essor depuis une dizaine d'années. Par exemple la dernière génération de trains à grande vitesse d'Alstom, l'AGV (automotrice grande vitesse) a fait appel à un moteur synchrone à aimant permanent très performant le fait qu'il développe plus de 800 kW pour 768 kg. C'est à dire moins de 1kg/kW.

Dans la MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation créé par les aimants permanents présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La MSAP est largement utilisée dans plusieurs applications telles que dans la traction électrique, la robotique ...

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents :

- Les aimants rigides ou durs qui sont bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.
- Les aimants peut rigide dont les caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes.

Et on peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants permanents comme la montre la figure suivante

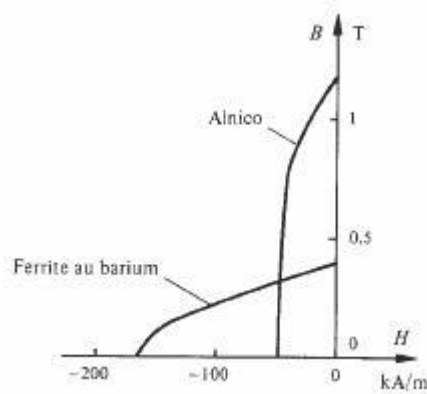


Figure II.2 caractéristiques magnétiques de quelques matériaux

1-Les Alnicos : Sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible, sensible aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur cout est moyen.

2-Les ferrites : Sont des composés d'oxyde ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum, leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. En raison de leur faible cout fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.

3-Les composés : Sont de cobalt et de terres rares comme le samarium qui ont d'excellentes performances techniques. Leur champ ramenant et leur excitation coercitive sont élevés. En revanche leur inconvénient reste le cout important [19][20].

II-1-3) Avantages et Inconvénients

L'utilisation des aimants comme inducteur dans les machines synchrones, offre par rapport aux autres types de la machine, beaucoup d'avantages, notamment :

- Un facteur de puissance et un rendement élevé,
- Une plus grande robustesse par rapport au moteur à courant continu,
- Une puissance massique élevée,
- Un développement technologique des composants de l'électronique de puissance et l'apparition des processeurs numériques à grande fréquence de calcul ont porté des solutions au problème de l'implantation d'algorithmes de commande de l'onduleur assurant ainsi l'autopilotage de la MSAP,
- Une amélioration de la fiabilité due à l'absence de contacte balais-bagues

- Une absence de pertes résistives au rotor,
- Une possibilité d'obtenir une excitation sans pertes joules,

Cependant, ils possèdent quelques inconvénients dont les plus importants sont :

- Une électronique de commande assez compliquée (nécessite d'un capteur de position)
- Un coût élevé en raison du prix élevé des aimants,
- Une structure complexe d'alimentation et de régulation,
- Des ondulations de couple dues aux harmoniques en régime des basses vitesses

Les caractéristiques principales des machines à aimants permanents dépendent directement de la qualité de l'aimant permanent utilisé, la puissance électronique est directement proportionnelle à la densité d'énergie dans l'entrefer.

Dans la MSAP, le champ du flux rotorique Ψ_{rest} considéré comme constant, et l'effet de saturation est négligeable, suite aux propriétés physique de l'aimant.

Suivant la position géométrique de l'aimant dans la machine, on distingue deux types de machines [19][20] :

A). La machine à pôles lisses ou l'aimant est monté sur la surface du rotor, l'entrefer effectif large obtenu a pour conséquences d'atténuer les effets de saillance et de réaction d'armature

B). La machine à pôles saillants ou l'aimant est inséré dans la matière du rotor

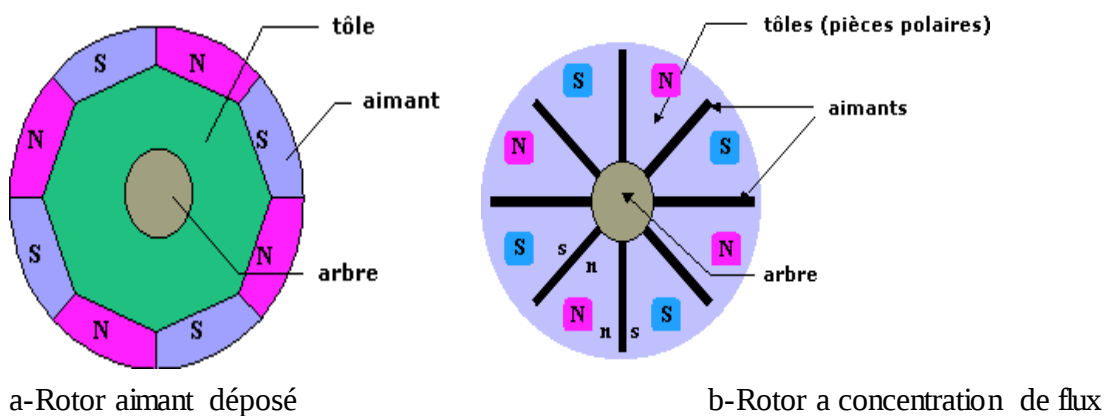


Figure II.3 Structures d'inducteur à aimant permanent dans les machines synchrones

Le moteur synchrone à aimant permanent comporte, tout comme la machine asynchrone, un stator bobiné dont l'alimentation donne naissance à une force magnétomotrice tournant à la vitesse angulaire ω_s .

Le rotor, dont le nombre de pôles est égal à celui du stator est excité par des aimants pour produire une force magnétomotrice d'excitation. La présence des aimants permanents élimine la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler le flux [21].

II-1-4) Principe de fonctionnement d'une MSAP

Le stator est alimenté par une tension triphasée équilibrée créant ainsi, dans l'entrefer un champ tournant. Ce dernier a tendance d'attirer le rotor, qui est constitué d'aimants permanents produisant un champ tournant d'induction. Les champs d'induction créés par le rotor et le stator ont tendance à s'aligner grâce à la création du couple d'origine électromagnétique. Le rotor se met alors à tourner à une vitesse angulaire (Ω). Cette dernière est liée au nombre de paires de pôles (p) et à la pulsation (ω) qui est égale à celle du champ tournant, ce qui justifie la nomination de machine synchrone.

II-1-5) Les hypothèses de simplification

L'étude du fonctionnement de la machine s'avère délicate et complexe à cause de la description par formalisme mathématique non linéaire et complexe de certains phénomènes (saturation, courant de Foucault, hystérésis...ets.) D'où la nécessité de les négliger en adoptant des hypothèses simplificatrices :

- ▶ Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté. Donc cela permet de négliger les courants de Foucault.
- ▶ La distribution de la f.e.m est sinusoïdale, le long de l'entrefer.
- ▶ Le système électrique d'alimentation est assimilé à une source triphasée délivrant des tensions symétriques et équilibrée.
- ▶ La machine est considérée comme une charge équilibrée.
- ▶ La densité du courant dans les sections des conducteurs est uniforme.
- ▶ Les inductances propres sont constantes.

► Les flux sont additifs

II-1-6) Modalisation de la machine a aimant permanent

La représentation de la machine synchrone a aimant permanent dans le repère de Park (d,q) lié au rotor est indiqué sur la figure II.4

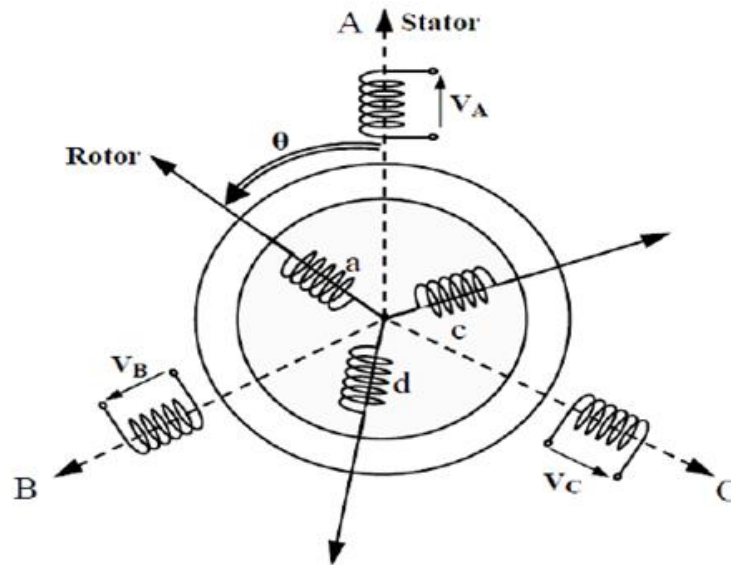


Figure II.4 Schéma de la machine synchrone a aimant permanent

II-1-6-1) Les équations électriques

De la figure précédente les équations électriques du modèle approprié à la machine synchrone triphasée s'écrivent comme suit :

$$[V_s] = R_s[I_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s] \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

R_s : résistance par phase statorique ;

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ Vecteur tension des phases statoriques ;

$[\Psi_s] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ Vecteur flux des phases statoriques ;

$[I_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ courants des phases statoriques ;

II-1-6-2) Les équations magnétiques

$$\Psi_s = [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] ; \quad (II.2)$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} ;$$

L_{ss} : Inductance mutuelle du stator sous forme matriciel.

$[\Psi_{sf}] = [\Psi_{af} \ \Psi_{bf} \ \Psi_{cf}]^T$; vecteur des flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique ;

$$[M_{sf}] = [M_f] * \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} ; \quad [M_{sf}] = [M_{fs}]^T ;$$

$[M_{sf}]$: est la matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.

II-1-6-3) Les équations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine synchrone à aimant permanent fait introduire de la variation non seulement les paramètres, mais aussi des paramètres mécaniques (couple et vitesse).

L'équation du couple utile de la machine s'écrit comme suit :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f \omega_r \quad (II-3)$$

ω_r : la vitesse de rotation mécanique de la MSAP

J : le moment d'inertie du moteur

f : le coefficient de frottement visqueux

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

Cr : le couple résistant ou charge

II-1-7) Mise en équation de la MSAP

II-1-7-1) Principe de la transformation de Park

Les modèles appropriés aux machines électriques les plus utilisées, sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapport les équations électriques et rotoriques à un système cartésien d'axes (d,q).

Dans le repère classique il y a trois axes (a_s , b_s , c_s) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe a_s est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (f correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrone à aimant permanent θ donne la position du rotor par rapport au stator [22][23].

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à $\Pi/2$ dans l'espace et alimentés par des courants à $\Pi/2$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes d et q, ou dans le cas de la MSAP l'axe d est orienté suivant le rotor, c'est-à-dire suivant la direction de l'aimantation. Pour passer du système triphasé, abc, au système biphasé (d, q), (réciproquement) il faut utiliser les transformations suivantes :

$$[V_{abc}] = [p(\theta)] [V_{dqo}] \quad (\text{II-4})$$

$$[V_{dqo}] = [p(\theta)]^{-1} [V_{abc}] \quad (\text{II-5})$$

$[p(\theta)]$, $[p(\theta)]^{-1}$: sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

Le système dq sera utilisé dans la commande vectorielle des machines électriques. Dans le système dq, les grandeurs électriques sont de type continu, ce qui donne la possibilité de faire une commande similaire à celle des machines à courant continu.

II-1-7-2) Transformation de Concordia

Si on pose $\theta = 0$ dans les équations (II-6 et II-7), les matrices de park deviennent les matrices de Concordia :

$$[C] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad [C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & +\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix};$$

Les transformations de Concordia sont utilisées pour faire le passage entre le système triphasé, abc, et un système biphasé (dq).

$$[V_{abc}] = [p(\theta)] * [V_{dq}];$$

$$[V_{dq}] = [C]^{-1} * [V_{abc}];$$

II-1-8) Modélisation de moteur synchrone à aimant permanent dans le plan de Park

L'application de la transformation de Park au formalisme mathématique approprié au moteur synchrone, permet d'exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor.

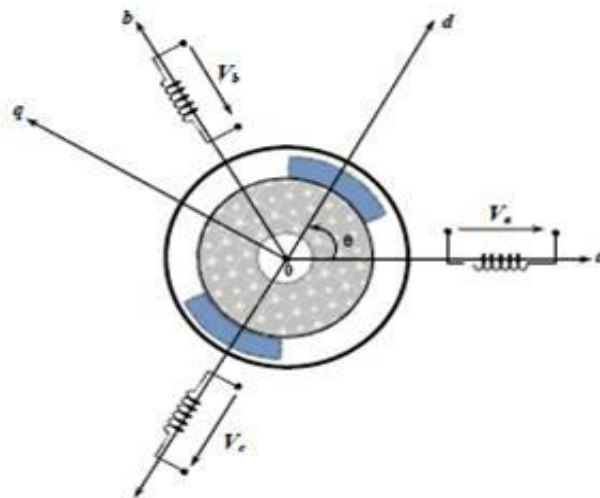


Figure II.5 schéma équivalent d'une MSAP dans un repère (d,q)

D'après le schéma on obtient les équations suivantes :

II-1-8-1) Equations électriques

$$V_d = R_s * I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - W_r * \Psi_q \quad (\text{II-8})$$

$$V_q = R_s * I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - W_r * \Psi_d \quad (\text{II-9})$$

II-1-8-2) Equation magnétiques

Les équations de flux peuvent s'écrire comme suite :

$$\Psi_d = L_d * I_d + \Psi_f \quad (\text{II-10})$$

$$\Psi_q = L_q * I_q \quad (\text{II-11})$$

Ψ_d : constant indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor sur l'axe q :

Après le remplacement des deux équations des flux dans (II-8 et II-9) le modèle de la MSAP peut s'écrire sous la forme :

$$V_d = R_s * I_d + L_d * \frac{dI_d}{dt} - W_r * L_q * I_q \quad (\text{II-12})$$

$$V_q = R_s * I_q + L_q * \frac{dI_q}{dt} - W_r * (L_d * I_d + \psi_f) \quad (\text{II-13})$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s * I_d + W_r * L_q * I_q) \quad (\text{II-14})$$

$$\frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_q - R_s * I_d - W_r * L_d * I_d - W_r * \psi_f) \quad (\text{II-15})$$

II-1-8-3) Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par la f.e.m dans l'entrefer généré par les courants statoriques. Et selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} * (V_d * I_d + V_q * I_q) \quad (\text{II-16})$$

On remplace V_d et V_q par leurs équations, on obtient :

$$P(t) = \frac{3}{2} * [R_s(I_d^2 + I_q^2) + I_d \frac{d\Psi_d}{dt} + I_q \frac{d\Psi_q}{dt}] + \frac{d\theta}{dt} (\Psi_d * I_q - \Psi_q * I_d) \quad (\text{II-17})$$

$\frac{3}{2} * R_s (I_d^2 + I_q^2)$ Représente la puissance dissipée en pertes joules dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} * (I_d \frac{d\psi_d}{dt} + I_q \frac{d\psi_q}{dt})$ Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$3/2 * \frac{d\theta}{dt} (\Psi_d * I_q - \Psi_q * I_d)$ Représente la puissance électromagnétique.

On sait que $P\Omega = \omega$ et $P_{em} = C_{em}\Omega$

$$C_{em} = \frac{3}{2} * P (V_d * I_d + V_q * I_q) \quad (II-18)$$

Donc on peut écrire

$$C_{em} = \frac{3}{2} * P [(L_d - L_q) * I_d * I_q + \Psi_f * I_q] \quad (II-19)$$

Dans le cas de $(L_d - L_q)$, ce qui correspond à une machine dite à pôles lisses et l'équation du couple C_{em} sera : $C_{em} = \frac{3}{2} * P (\Psi_q * I_q)$ (II-20)

Les équations (II-14 et II-15) peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & W_r * \frac{L_q}{L_d} \\ -W_r * \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_d}{L_q} \\ \frac{V_q - W_r * \Psi_f}{L_d} \end{bmatrix} \quad (II-21)$$

II-2) modélisation de convertisseur statique

II-2-1) Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglable à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances [24].

II-2-1-1) Classification des Onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, dont chacun soit correspond à un type d'application déterminé ou soit permet des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

II-2-1-1-a) Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés en fermeture et en ouverture, par une fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes pour une charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

II-2-1-1-b) Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simple thyristor commandés uniquement à la fermeture et la commutation est <<naturelle>> contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont les seuls composants utilisables.

II-2-1-2) Onduleur de tension

Lorsqu'il fonctionne en source de tension, le redresseur fournit une tension constante à l'onduleur à partir de la batterie du véhicule. La présence d'un condensateur dans le circuit de liaison aide alors à maintenir une tension constante à l'entrée de l'onduleur. Pour réaliser des onduleurs destinés à alimenter une charge ordinaire d'impédance très variable à partir d'un redresseur, on choisit des onduleurs de tension, figure II.6

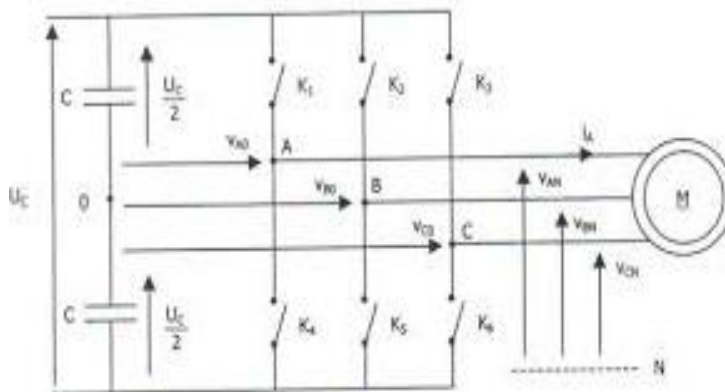


Figure II.6 Schéma d'un onduleur triphasé alimentant le MSAP

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistor. Chaque bras est composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux [24][25].

En mode commandable, le bras est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.7)

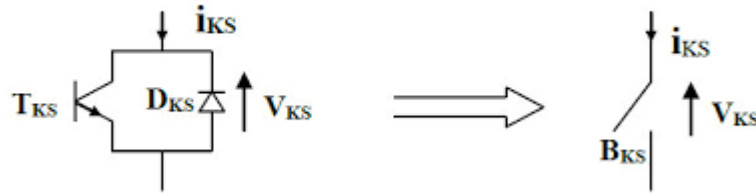


Figure II.7 schéma d'un bras d'onduleur

Le schéma équivalent de l'onduleur est représenté par la figure II.8

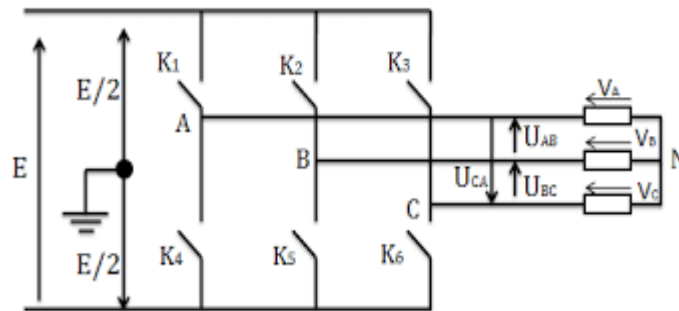


Figure II.8 schéma équivalent d'onduleur

L'onduleur se modélise en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine sont états de conduction :

$$F1 = \begin{cases} 1 & \text{si } K1 \text{ fermé et } K'1 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K1 \text{ ouvert et } K'1 \text{ est fermé} \end{cases}$$

$$F2 = \begin{cases} 1 & \text{si } K2 \text{ fermé et } K'2 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K2 \text{ ouvert et } K'2 \text{ est fermé} \end{cases}$$

$$F3 = \begin{cases} 1 & \text{si } K3 \text{ fermé et } K'3 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } K3 \text{ ouvert et } K'3 \text{ est fermé} \end{cases}$$

Avec $(K1, K'1)$, $(K2, K'2)$, $(K3, K'3)$ sont des commandes complémentaires

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = f(E, F1, F2, F3)$$

$$F1 = \begin{cases} 1 & V_{k1} = 0 \\ 0 & V_{k1} = E \end{cases}$$

$$F2 = \begin{cases} 1 & V_{k2} = 0 \\ 0 & V_{k2} = E \end{cases}$$

$$F3 = \begin{cases} 1 & V_{k3} = 0 \\ 0 & V_{k3} = E \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{k1} = E(1 - F1) \\ V_{k2} = E(1 - F2) \\ V_{k3} = E(1 - F3) \end{cases} \quad \text{ET} \quad \begin{cases} V_{ab} = V_{k2} - V_{k1} \Rightarrow V_{ab} = E(F1 - F2) \\ V_{bc} = V_{k3} - V_{k2} \Rightarrow V_{bc} = E(F2 - F3) \\ V_{ca} = V_{k1} - V_{k3} \Rightarrow V_{ca} = E(F3 - F1) \end{cases}$$

On peut les écrire sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \end{bmatrix} \quad (S1)$$

Les tensions de lignes sont données par :

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (1)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (2)$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (3)$$

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (4)$$

$$(1) - (3) \Rightarrow V_{an} = \frac{1}{3} (V_{ab} - V_{ca})$$

$$(2) - (1) \Rightarrow V_{bn} = \frac{1}{3} (V_{bc} - V_{ab})$$

$$(3) - (2) \Rightarrow V_{cn} = \frac{1}{3} (V_{ca} - V_{bc})$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (S2)$$

(S1) dans (S2)

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} * \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \end{bmatrix}$$

Avec E : est la tension d'alimentation continue de l'onduleur.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle dynamique du moteur synchrone à aimants permanents. Le modèle triphasé est de nos jours rarement utilisé à cause de sa complexité et du fort couplage de ses équations. On y montre qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites au nombre de trois. Par conséquent, les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles.

Chapitre III

La modélisation du véhicule électrique

Introduction

Le modèle décrivant les dynamiques du véhicule est très complexe et fortement non linéaire. Il fait intervenir un grand nombre de paramètres en rapport aux variables d'entrées et de perturbations qui sont difficiles à caractériser. En outre différents mouvements interagissant ensemble répercute négativement sur la description de la dynamique d'un véhicule par un formalisme mathématique plus fiable. Malgré cela, pour des raisons de sécurité, les performances du système véhicule doivent être garanties. A cet effet, la phase de modélisation est une étape importante visant à obtenir une représentation la plus fidèle possible du comportement du véhicule électrique.

III-1) modélisation du véhicule électrique

III-1-1) Model dynamique du véhicule

Le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié qui ne tient pas compte des forces de roulis et de tangage. Par conséquent le véhicule est modélisé comme une masse en mouvement soumise à la force motrice F développée par le groupe motopropulseur et à différents efforts liés à l'environnement F_R , tels que [26] :

$$F_R = F_{roul} + F_{aéro} + F_{grav} \quad (III-1)$$

La figure suivante montre les différentes forces à lesquelles est soumis le véhicule.

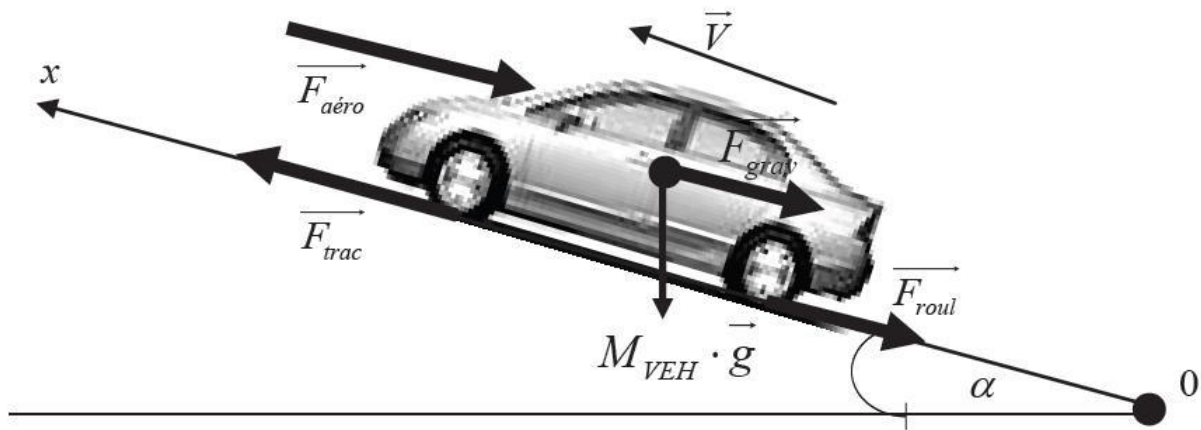


Figure III.1 Les forces agissant sur un véhicule

Selon la deuxième loi de Newton, l'accélération du véhicule peut être écrite comme :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (III-2)$$

Où V est la vitesse du véhicule, ΣFt est l'effort de traction totale du véhicule, ΣFr est la résistance totale, M est la masse totale du véhicule, et δ est le facteur de masse qui aide à convertir les inerties rotationnelles des éléments de rotation en translation.

III-1-1-1) Les résistances du véhicule

On distingue différents types de résistance :

III-1-1-1-a) Résistance au roulement

La résistance au roulement des pneus sur les surfaces dures est principalement due à l'hystérésis dans les matériaux des pneus. En effet, la pression dans la zone de contact entre les pneumatiques et le sol est répartie symétriquement par rapport à la ligne centrale et la force résultante de réaction est montrée dans la figure III.2, où P_z est aligné à P . La déformation, z , par rapport à la charge, P , dans le processus de chargement et de déchargement est illustrée par la figure III.3. [26]

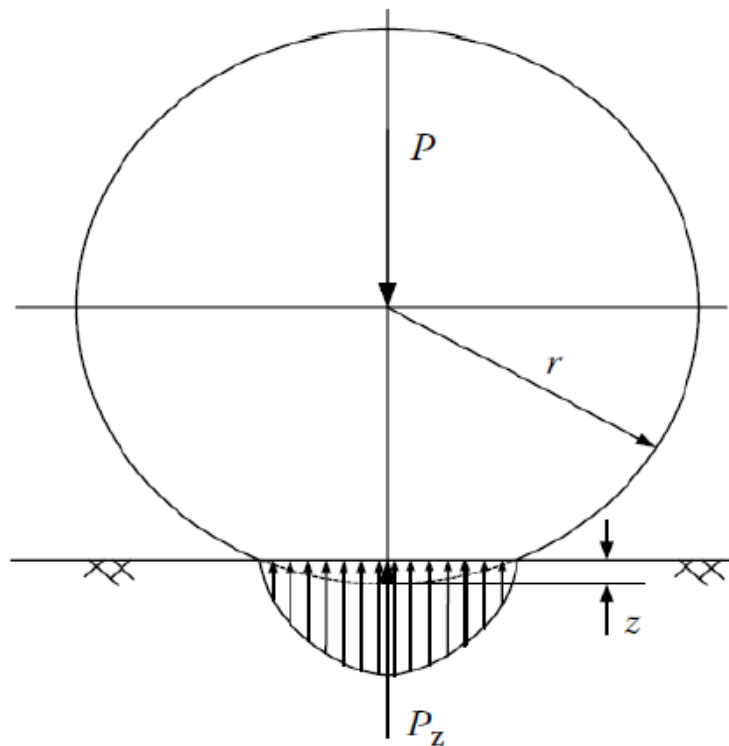


Figure III.2 : La distribution de la pression dans la zone de contact

Lorsque le pneu roule, comme le montre la figure III.4.a, la moitié principale de la zone de contact est en chargement et la moitié arrière est en déchargement. Par conséquent, l'hystérésis cause une distribution asymétrique des forces de réaction du sol.

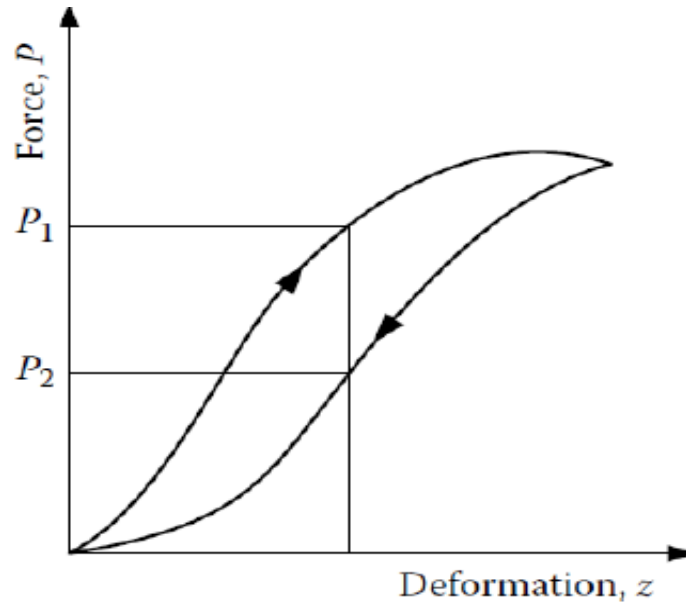


Figure III.3 : Les forces agissant sur le pneu / déformation en chargement et déchargement

La pression dans la moitié principale de la surface de contact est plus importante que dans la moitié arrière, comme le montre Figure III.4.a. Ce phénomène résulte d'un décalage légèrement en avant de la force de réaction du sol. Ce déplacement vers l'avant de la force de réaction du sol, avec la charge normale agissant sur le centre de la roue, crée un moment, qui s'oppose au roulement des roues.

Sur les surfaces douces la résistance au roulement est principalement due à la déformation de la surface du sol comme le montre la Figure III.4.b. La force de réaction du sol se décale presque complètement par rapport à la moitié principale.

Le moment produit par le décalage vers l'avant de la force de réaction du sol qui en résulte est appelé moment résistant de roulement, comme le montre la figure III.4.a, et peut être exprimé comme suite [26] :

$$Tr = Pa \quad (III.3)$$

Pour garder le roulement des roues, une force, F , agissant sur le centre de la roue est nécessaire pour équilibrer ce moment roulant résistant. Cette force est exprimée :

$$F = \frac{T_r}{r_r} = \frac{P_a}{r_d} = Pf_r \quad (III.4)$$

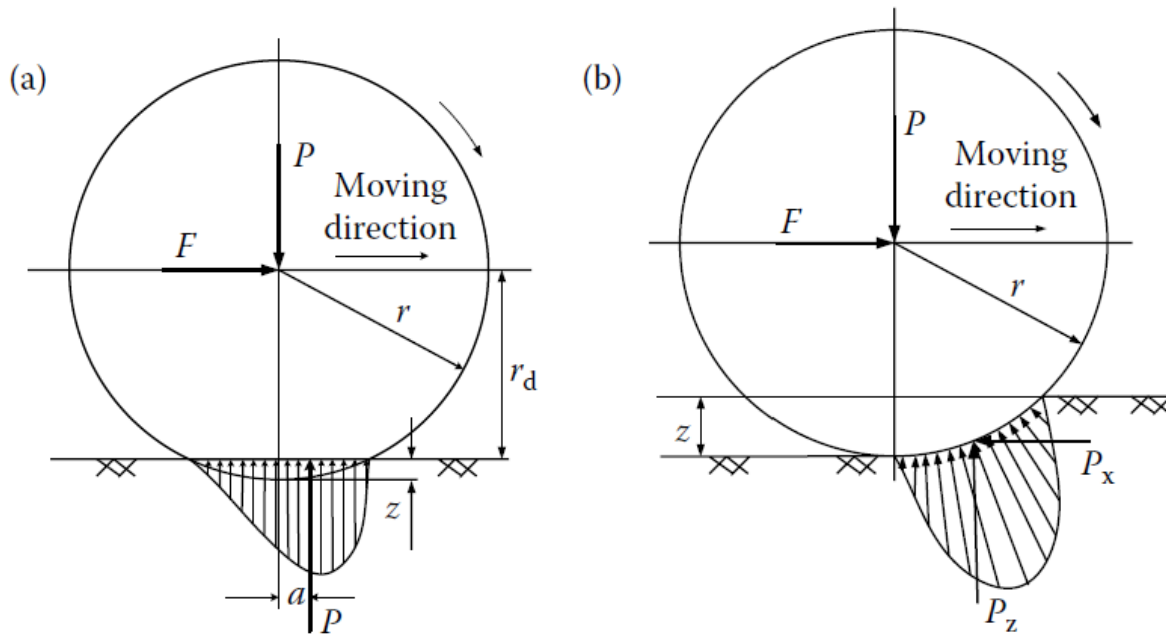


Figure III.4 Déformation de la surface du sol .

Où r_d est le rayon efficace du pneu et $Fr = \frac{a}{r_d}$ est appelé coefficient de résistance au roulement. De cette façon, le moment de résistance au roulement peut être remplacé par une force horizontale agissant sur le centre de la roue dans la direction du mouvement inverse de la roue. Cette force équivalente est appelée la résistance au roulement d'une magnitude de [26] :

$$Fr = Pfr \quad (III.5)$$

Où P est la charge normale agissant sur le centre de la roue qui tourne. Quand un véhicule roule sur une route en pente, la charge normale, P , devrait être remplacée par la composante qui est perpendiculaire à la surface de la route. C'est :

$$Fr = Pfr \cos \alpha \quad (III.6)$$

Où α est l'angle de route, Fr le coefficient de résistance au roulement, varie en fonction du matériau des pneus, structure et température du pneumatique, la pression de gonflage du pneu, la géométrie de la route, les matériaux routiers, et la présence ou non de liquide sur la route. Les valeurs typiques des coefficients de résistance au roulement sur différentes routes sont indiquées dans le tableau (III.1). Ces dernières années pour des raisons économiques du carburant, des pneus à faible résistance pour les voitures particulières ont été développés. Leur coefficient de résistance au roulement est inférieur à 0,01.

Les valeurs indiquées dans le tableau (III.2) ne tiennent pas compte de leurs variations par rapport à la vitesse. A base des résultats expérimentaux, beaucoup de formules ont été

proposé dans la littérature pour calculer la résistance de roulement sur une surface dure. Par exemple, le coefficient de résistance de roulement d'un véhicule touristique sur une route bétonnée peut être calculé à partir de l'équation suivante [26] :

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^2 \quad (\text{III.7})$$

Tableau III.1 : Coefficients de résistance au roulement

Conditions	Coefficient de résistance au roulement
Pneus de voiture sur un béton ou une route goudronnée	0.013
Pneus de voiture sur une route roulée de gravier	0.02
Route en goudron	0.025
Route non pavée	0.05
Piste	0.1-0.35

Où V est la vitesse en km/h, et f_0 et f_s dépendent de la pression de l'inflation du pneu.

Dans le calcul des performances du véhicule, il suffit de considérer le coefficient de résistance de roulement comme une fonction linéaire de la vitesse. Pour la plupart des valeurs de pression d'inflation, l'équation suivante peut être utilisée pour une voiture touristique :

$$f_r = 0.01 \left(\frac{V}{160} \right) \quad (\text{III-8})$$

Cette équation prédit les valeurs de f_r avec une précision acceptable pour des vitesses allant jusqu'à 128 km/h.

III-1-1-1-b Traînée aérodynamique

Un véhicule voyageant à une vitesse donnée dans l'air rencontre une force résistante à son mouvement. Cette force est appelée la traînée aérodynamique. Elle résulte principalement de deux composantes : Trainée de la forme et friction de la forme

Trainée de la forme : Le mouvement vers l'avant du véhicule pousse l'air devant lui. Toutefois, l'air ne peut pas se déplacer instantanément de la route, donc sa pression est augmentée, entraînant une pression élevée de l'air. En outre, l'air derrière le véhicule ne peut pas instantanément remplir l'espace laissé par son mouvement vers l'avant. Cela crée une zone de basse pression atmosphérique. Le mouvement du véhicule, par conséquent, crée deux zones de

pression qui s'opposent au mouvement en poussant (à haute pression à l'avant) et en le tirant vers l'arrière (à basse pression en arrière) comme le montre la figure (II.6). La force résultante sur le véhicule est la Trainée de la forme. Le nom « Trainée de la forme » vient du fait que cette résistance est complètement déterminée par la forme de la carrosserie du véhicule.

Friction de la forme : L'air proche de la tôle du véhicule se déplace presque à la vitesse de ce dernier tandis que l'air loin du véhicule ne l'a pas. Entre-temps, les molécules de l'air se déplacent à une large gamme de vitesses. La différence de vitesse entre les deux molécules de l'air produit un frottement qui en résulte dans la deuxième composante de la traînée aérodynamique. [26]

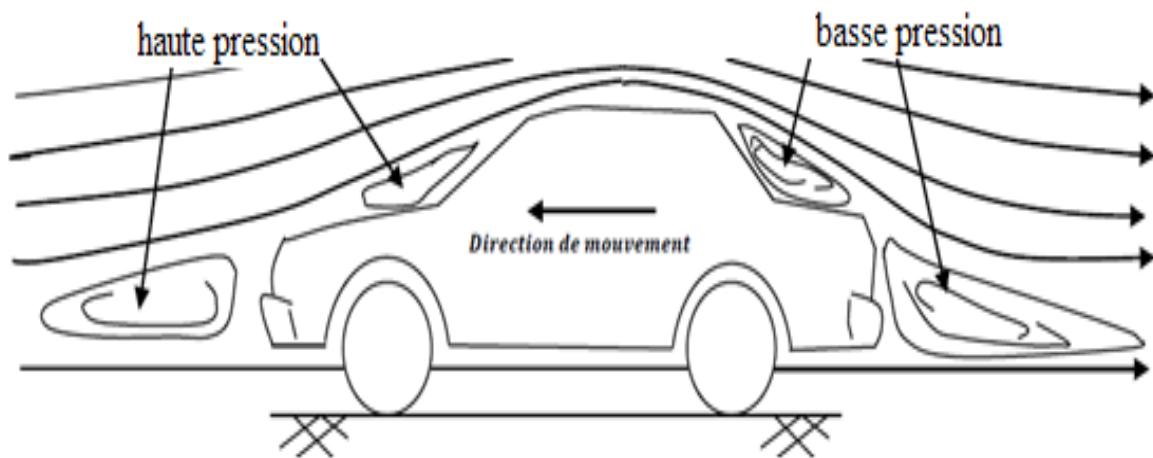


Figure III.5 : Trainée de la forme

La traînée aérodynamique est fonction de la vitesse du véhicule V , la surface frontale du véhicule, A_f , la forme de la carrosserie du véhicule, et la densité de l'air ρ :

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (\text{III.9})$$

Où C_D est le coefficient de traînée aérodynamique qui caractérise la forme de la carrosserie du véhicule et V_w est la composante de la vitesse du vent sur la direction du mouvement du véhicule, qui porte un signe positif lorsque cette composante est dans la même direction du véhicule en mouvement et un signe négatif quand elle est opposée à la vitesse du véhicule. Les coefficients de traînée aérodynamique pour des formes typiques de véhicules sont donnés dans le tableau III.2.

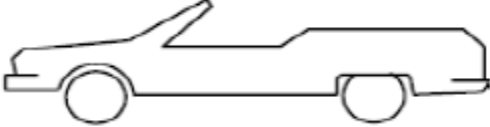
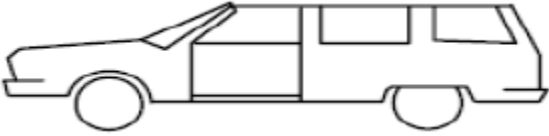
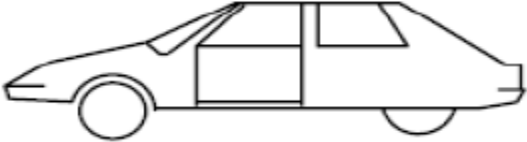
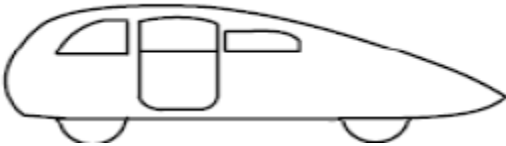
Type du Véhicule	Coefficient de la Résistance Aérodynamique
	0.5 ... 0.70
	0.5 ... 0.70
	0.4 ... 0.55
	0.3 ... 0.4
	0.2 ... 0.25
	0.23
	0.15 ... 0.20

Tableau III.2 : Coefficients de traînée indicatif pour des différentes formes de véhicules.

La résultante des forces projetées sur l'axe ox s'écrit :

$F_{trac}(t)$: force de traction du véhicule. C'est la force développée par le pneumatique sous l'action du groupe motopropulseur. C'est elle qui fait avancer le véhicule.

-Les quatre autres forces sont résistantes à l'avancement du véhicule :

- $F_{roul}(t)$ = force de roulement.

Il s'agit de la résistance au roulement du véhicule due au contact pneus/chaussée. Ce dernier peut varier en fonction de plusieurs paramètres : vitesse du véhicule, pression des pneus, état et type de la chaussée (sèche, humide, sable) considérons l'équation suivante [26] :

$$F_{roul}(t) = M_{VEH}.g. (a+b.V^2_{VEH}).\cos(\alpha(t)) \quad (III.10)$$

Avec : a et b : des coefficients de résistance au roulement,

g : l'accélération de la gravité en m/s^2 ,

M_{VEH} : la masse totale du véhicule donnée en kg

α : la pente en rad

$F_{gra}(t)$: Force de gravité quand le véhicule circule sur une route non horizontale

$$F_{gra}(t) = M_{VEH}.g.\sin(\alpha(t)) \quad (III.11)$$

$F_{aéro}(t)$: force aérodynamique. C'est la force exercée par l'air selon l'axe du mouvement sur le véhicule. Elle est proportionnelle à la masse volumique de l'air ρ_{air} en $3\ kg\ m$ (elle dépend de la pression et de la température atmosphérique), à la surface frontale du véhicule A en m^2 et au coefficient de trainée C_D du véhicule et au carré de la vitesse du véhicule V_{veh} :

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_D V_{veh}^2 \quad (III.12)$$

III-2 Mouvement longitudinal

III-2-1 dynamique de véhicule

Les différentes forces auxquelles le véhicule en mouvement est soumis sont représentées sur la figure III.6 [27]

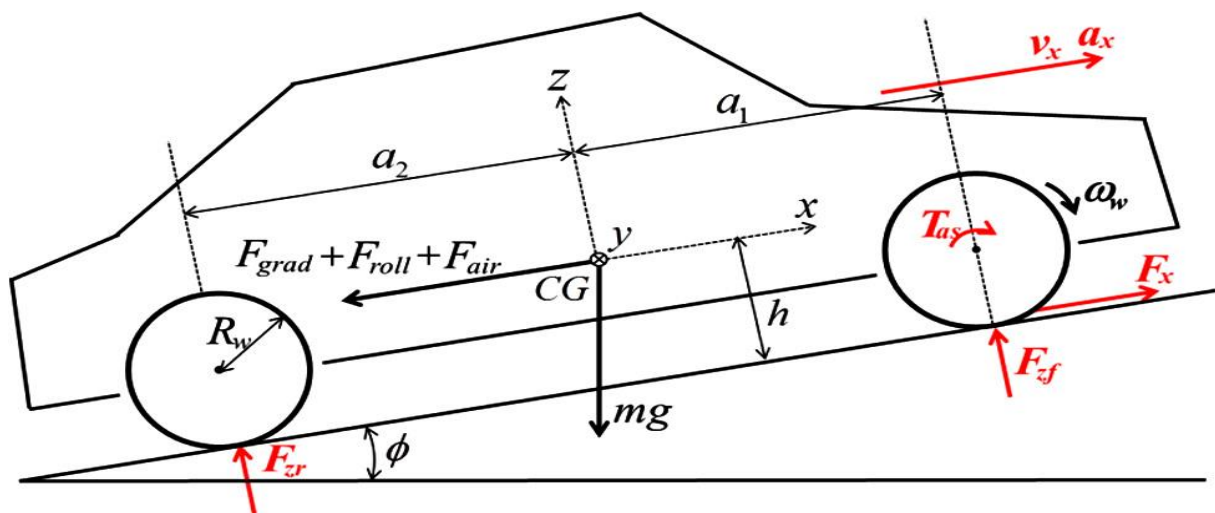


Figure III.6 Les forces agissants sur un véhicule

Et en se basant sur la loi de Newton on déduit ceci :

$$\Sigma F_x = F_x - (F_{gr} + F_{roul} + F_{aéro}) = F_x - (mg \sin \phi + \mu_x mg + K_{air} V_x^2)$$

III-2-2 Modèle intégré de véhicules électriques

Les sorties dynamiques du véhicule peuvent être clairement quantifiées en fonction des grandeurs électriques en utilisant des modèles de comportement obtenus à partir des sous-systèmes électriques et mécaniques. En conclusion, on retrouve dans la dynamique du véhicule, les grandeurs physiques à savoir : la force de traction F_x , les forces verticales F_{zr} et F_{zf} , et l'accélération A_x dans la direction de traction du véhicule, la vitesse V_x .

En intégrant les modèles de comportement déterminés dans les respectives sous-systèmes mécaniques et électriques, les sorties dynamiques du véhicule décrivant des comportements de véhicules peuvent être dérivés, en fonction des grandeurs électriques telles que les axes d, q des courants et la vitesse du rotor de MSAP ω_m . Notez que Le couple de rotation de l'arbre d'essieu T_{as} comme produit une force de rotation de la roue d'entraînement, qui se transforme en forces de propulsion du véhicule. Le couple de l'arbre d'essieu, qui fonctionne comme un facteur important pour la dynamique du véhicule peut être calculé comme suit [28][29] :

$$T_{as} = \left(\frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4} \right) \left(1 + \left(J_{as} - J_{total}^* \frac{G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + \right. \\ \left. \left(\frac{K_{air} R_w (J_{total}^* G_{total} - J_{as}) \omega_m^2}{G_{total}^2(m+\Delta m)} \right) + C_{Tas} \right. \quad (III-13)$$

La force de traction du véhicule F_x est exprimé aussi avec les variables électriques comme :

$$F_x = \left(\frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \left(\frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + \right. \\ \left. \left(\frac{J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) \omega_m^2 + C_{Fx} \right. \quad (III-14)$$

Avec

$$C_{Fx} = mg J_{total} G_{total} (\sin \phi + \mu_x) / R_w^2 (m + \Delta m) \quad (III-15)$$

Les forces verticales sur les roues avant et arrière, F_{zf} et F_{zr} sont :

$$F_{zf} = \left(\frac{1}{a_1 + a_2} \right) \left[\left(- \frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + \right. \\ \left. \left(\frac{J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) \omega_m^2 - h C_{Fx} + C_{Fzf} \right] \quad (III-16)$$

$$F_{zr} = \left(\frac{1}{a_1 + a_2} \right) \left[\left(\frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + \right. \\ \left. \left(\frac{h J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) \omega_m^2 + h C_{Fx} + C_{Fzr} \right] \quad (III-17)$$

$$\text{Où, } C_{Fzr} = a_2 mg \cos \phi \text{ et } C_{Fzf} = a_1 mg \cos \phi \quad (III-18)$$

La force verticale sur les roues arrière dans (III-17) peut être liée avec la force verticale sur les roues avant en (III-16) comme suit :

$$F_{zr} = F_{zf} + mg \cos \phi \quad (\text{III-19})$$

L'accélération du véhicule A_x dans le sens de traction peut être exprimée en

$$A_x = \frac{1}{m + \Delta m} \left[\left(\frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4 R_w} \right) [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \frac{K_{air} R_w^2}{G_{total}^2} W_m^2 - C_{ax} \right] \quad (\text{III-20})$$

Avec :

$$C_{ax} = mg (\sin \theta + \mu_x) \quad (\text{III-21})$$

III-3 Mouvement latéral

Dans ce qui suit, un modèle de la dynamique latérale du véhicule est utilisé pour la conception du contrôleur. Comme le montre la figure III.7, ce modèle est simplifié en négligeant le rebond, le tangage, le roulis, la course de la suspension, le transfert de la charge latérale, les charges aérodynamiques et la géométrie de la direction.

Le véhicule a une masse m et un moment d'inertie I_z autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité (CG). Le devant et les essieux arrières sont situés aux distances l_f et l_r , respectivement, du véhicule CG. Les pneus latéraux à l'avant et l'arrière sont soumis à des forces V_{yf} et V_{yr} qui dépendent respectivement des angles de glissement α_f et α_r , et l'angle de braquage δ change le cap des pneus à l'avant.

La dynamique de manipulation du véhicule dans le plan de lacet peut être représentée par des états de vitesse latérale v_y et de lacet r [30] :

$$\begin{cases} m (\dot{v}_y(t) + v_x r(t)) = F_{yf}(t) + F_{yr}(t) \\ I_z \dot{r}(t) = l_f F_{yf}(t) - l_r F_{yr}(t) + M_z(t) \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

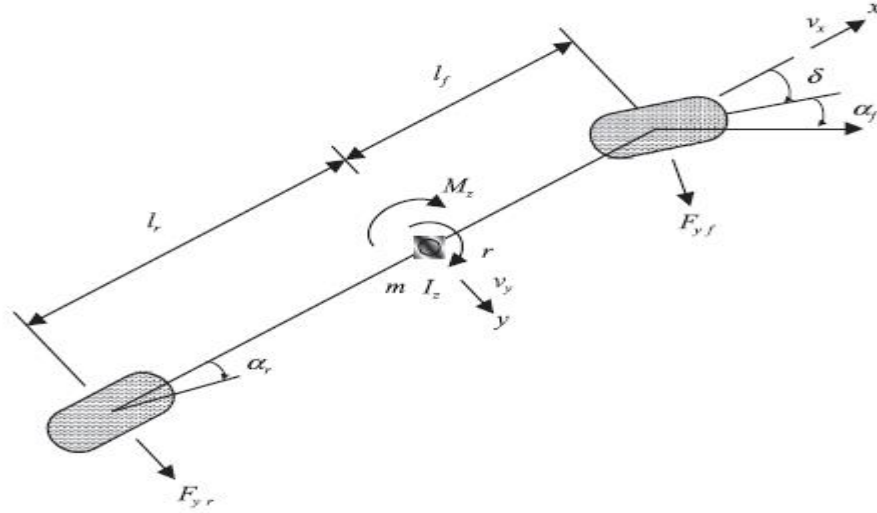


Figure III-7 Modèle de dynamique de véhicule

Où $M_z(t)$ est le moment de lacet externe et v_x est la vitesse d'avancement du véhicule qui est supposée constante dans une plage de manœuvre spécifiée. Lorsque l'accélération latérale est nul, les pneus du véhicule fonctionnent dans la région linéaire et les forces latérales à l'avant et l'arrière sont liées aux angles de dérapage par les raideurs des pneus avant et arrière comme suit [31] :

$$\begin{cases} F_{yf}(t) = -C_{\alpha f} \alpha_f(t) \\ F_{yr}(t) = -C_{\alpha r} \alpha_r(t) \end{cases} \quad (\text{III-23})$$

Où $C_{\alpha f}$ et $C_{\alpha r}$ sont la rigidité en virage pour les pneus avant et arrière, respectivement, et les angles de dérapage sont définis comme suit [31]:

$$\begin{cases} \alpha_f(t) = \frac{v_y(t)}{v_x} + \frac{l_f}{v_x} r(t) - \delta(t) \\ \alpha_r(t) = \frac{v_y(t)}{v_x} - \frac{l_r}{v_x} r(t) \end{cases} \quad (\text{III-24})$$

Substituer (III-23) et (III-24) dans (III-22), Eq. (III-22) est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{1}{m} \left(-\frac{a_1}{v_x} C_{\alpha f} + \frac{a_2}{v_x} C_{\alpha r} \right) r - \frac{1}{m} (C_{\alpha f} + C_{\alpha r}) \beta + \frac{1}{m} C_{\alpha f} \delta - r v_x \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \left(-\frac{a_1^2}{v_x} C_{\alpha f} + \frac{a_2^2}{v_x} C_{\alpha r} \right) r - \frac{1}{I_z} (a_1 C_{\alpha f} - a_2 C_{\alpha r}) \beta + \frac{1}{I_z} a_1 C_{\alpha f} \delta \end{cases} \quad (\text{III-25})$$

III-3-1) Modèle dynamique et cinématique

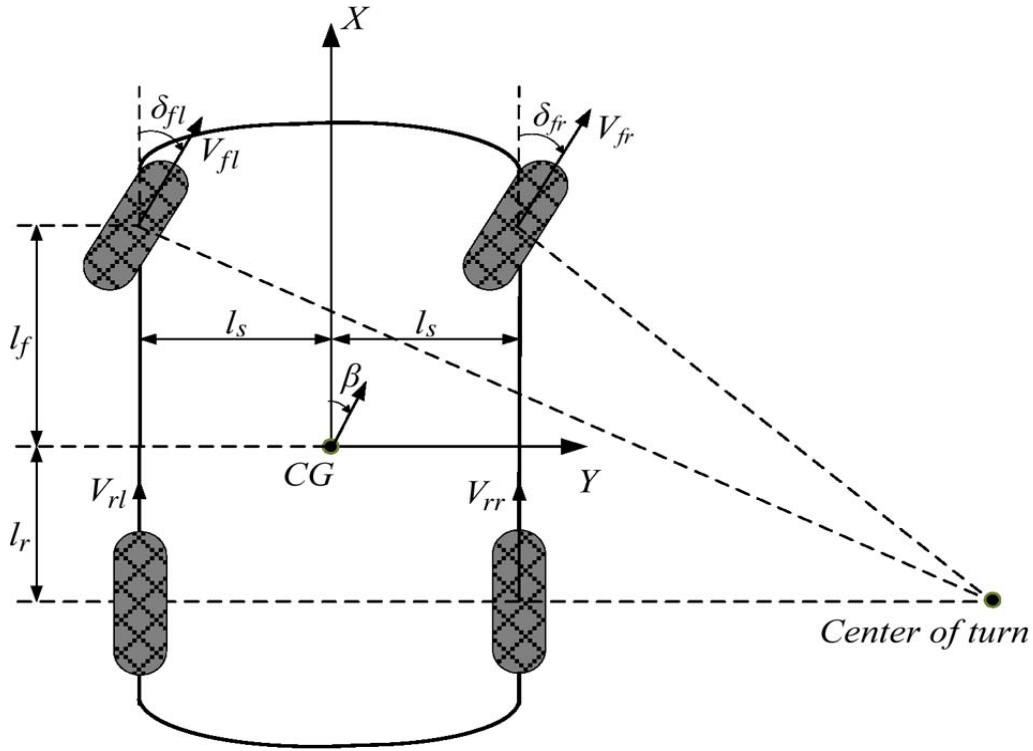


Figure III.8 : Modelé dynamique et cinématique

Comme montré dans la figure III.8, les vitesses des quatre roues sont représentées par V_{fl} , V_{fr} , V_{rl} et le V_{rr} respectivement. Les angles de direction des roues avant sont donnés par δ_{fl} et δ_{fr} . Les distances des roues avant et arrière par rapport au centre de gravité sont l_f et l_r et l_s c'est La moitié de la voie de véhicule. En se basant sur le modèle cinématique du véhicule illustré par la figure III.8, les vitesses des quatre roues sont décrites comme suit [32] [33] :

$$\begin{cases} V_{fl} = (V_x + rl_s) \cos \delta_{fl} + (V_y + rl_f) \sin \delta_{fl} \\ V_{fr} = (V_x - rl_s) \cos \delta_{fr} + (V_y + rl_f) \sin \delta_{fr} \\ V_{rl} = V_x + rl_s \\ V_{rr} = V_x - rl_s \end{cases} \quad (III-26)$$

Où V_x et V_y et r sont vitesse longitudinale de véhicule, vitesse latérale, et taux de lacet, respectivement. Supposée que tous les pneus ayez le même rayon de référence R_{EFF} . Les vitesses de rotation appropriées aux roues du véhicule sont données par ces relations [32] [33] :

$$\begin{cases} \omega_{fl} = \frac{v_{fl}}{R_{eff}} \\ \omega_{fr} = \frac{v_{fr}}{R_{eff}} \\ \omega_{rl} = \frac{v_{rl}}{R_{eff}} \\ \omega_{rr} = \frac{v_{rr}}{R_{eff}} \end{cases} \quad (III-27)$$

III-3-2 les différents modes de tractions

Pour surexciter le véhicule électrique avec quatre roues- moteurs indépendantes, la conception des différentiels électriques (ED) peuvent être appliqués aux deux roues de l'avant, deux roues d'arrière, ou chacune des quatre roues puisque le véhicule électrique peut être enclenché dans la commande à roues avant motrices, la commande de roue-arrière, ou les modes tous les roues d'entraînement [34].

a) quatre roues motrices

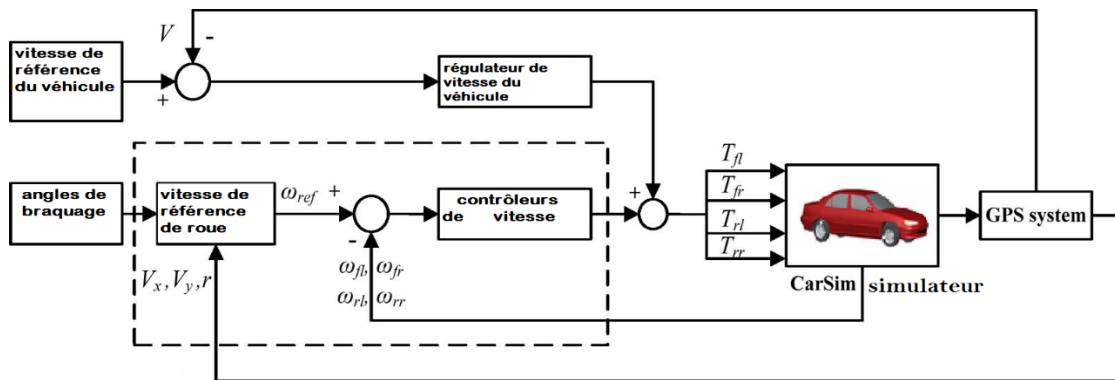


Figure III.9 : Configuration de la conception de modèle quatre roues motrices.

Lorsque le véhicule électrique est conduit par les quatre roues dans un virage, les deux roues intérieures et extérieures auront deux vitesses de rotation. Ainsi, un ED pour les deux roues avant et l'autre pour les deux roues arrière doivent être conçus

Comme le montre la figure III.9, la configuration ED à quatre roues est composée de trois parties principales.

1-la première partie est une régulation de vitesse de haut niveau par un contrôleur pour maintenir une vitesse constante du véhicule pendant le virage. Notez que le régulateur de vitesse du véhicule est appliqué pour aider et comparer les trois conceptions ED, et il réalise la même vitesse du véhicule pour des conceptions différentes [34].

2- la deuxième partie se compose de deux ED pour les roues avant et arrière, respectivement. Les ED sont réalisés à quatre vitesses de roue par des contrôleurs de suivi. Les vitesses des roues de référence sont indiquées les relations (III-27) et (III-28).

3-La troisième partie est le système de détection GPS, qui donne la vitesse longitudinale du véhicule en temps réel, la vitesse latérale, et taux de lacet pour la régulation de vitesse du véhicule de haut niveau et générer les vitesses de référence des roues. Les signaux GPS pour Les simulations intégrées CarSim sont directement obtenues par Les sorties CarSim, qui représentent des signaux précis similaires mesuré par un GPS [34].

b) Roues-avant motrices (ED avant)

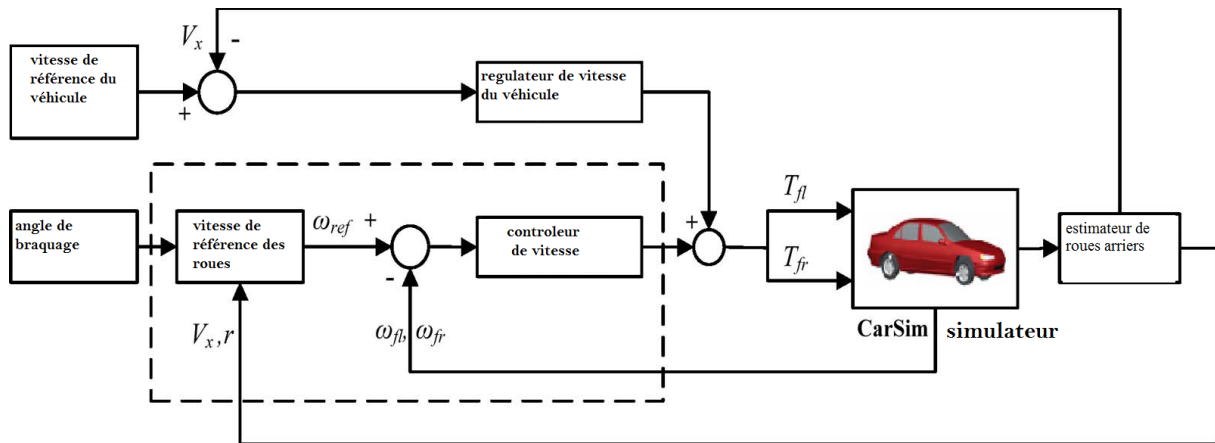


Figure III.10 : Configuration de l'ED avant

Dans la conception ED front, la synchronisation de rotation des vitesses pour les deux roues avant est considérée comme seules les roues qui sont actionnées. En revanche, les roues arrière sont passives, ainsi sont utilisées comme estimateur pour générer les états du véhicule requis pour le design avant ED. Avant l'introduction de la configuration frontale ED, les relations données en (III-27) et (III-28) sont combinées pour déduire les relations (III-29) et (III-30) en ignorant le produit de la vitesse latérale du véhicule et de l'angle de braquage des roues avant. Ces termes sont généralement négligeables pendant les manœuvres normales de virage[34] :

$$\begin{cases} \omega_{fl} = \frac{\cos \delta_{fl}}{R_{eff}} V_x + \frac{(l_f \sin \delta_{fl} + l_s \cos \delta_{fl})}{R_{eff}} r \\ \omega_{fr} = \frac{\cos \delta_{fr}}{R_{eff}} V_x + \frac{(l_f \sin \delta_{fr} + l_s \cos \delta_{fr})}{R_{eff}} r \end{cases} \quad (III-29)$$

$$\begin{cases} \omega_{rl} = \frac{1}{R_{eff}} V_x + \frac{l_s}{R_{eff}} r \\ \omega_{rr} = \frac{1}{R_{eff}} V_x - \frac{l_s}{R_{eff}} r \end{cases} \quad (III-30)$$

Comme indiqué en (III-29) et (III-30), les vitesses de rotation des quatre roues sont représentées en fonction de la vitesse longitudinale du véhicule et taux de lacet. Lorsque les roues avant sont actionnées comme les roues motrices, la vitesse longitudinale du véhicule et le taux de lacet peuvent être représentés par les vitesses de rotation des roues arrière passives en résolvant V_x et r de (III-30)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{eff}}{2} & \frac{R_{eff}}{2} \\ \frac{R_{eff}}{2l_s} & -\frac{R_{eff}}{2l_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rl} \\ \omega_{rr} \end{bmatrix} \quad (III-31)$$

Différent de la configuration de l'ED quatre roues montrée dans la Figure (III-10), l'estimateur de roue arrière est adopté au lieu d'un GPS. En outre, le cheminement de vitesse de roue est seulement pour les deux roues avant d'entraînement. Par conséquent, le contrôleur réglementaire de vitesse à niveau élevé pour le maintien d'une vitesse constante du véhicule comme dans le cas d'ED quatre roues [34].

c) traction arrière (ED arrière)

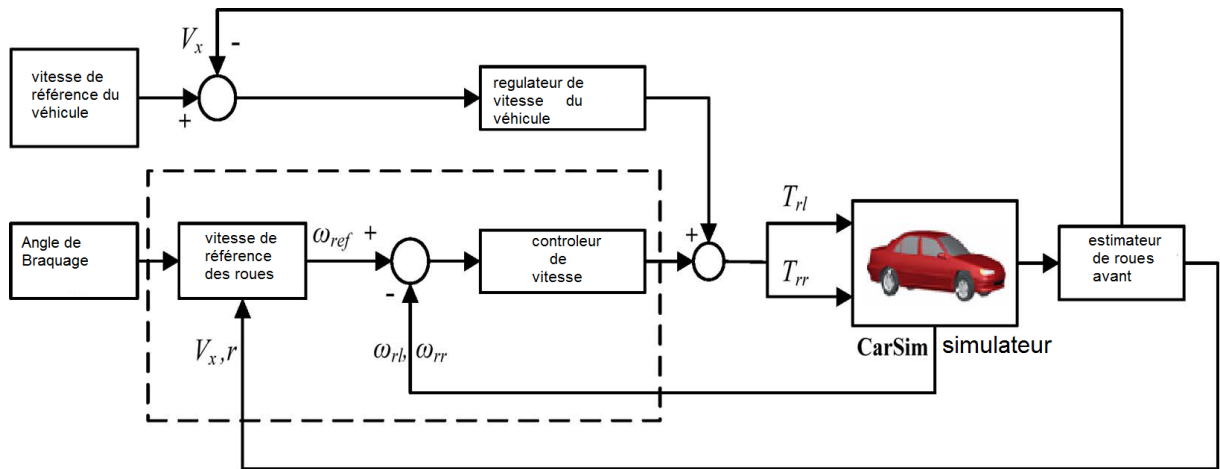


Figure III-11 : configuration de ED arrière

Semblable à la conception d'ED front, la synchronisation de la vitesse de rotation pour les deux roues arrière est seulement considérée dans la conception ED arrière puisque seules les roues arrière sont actionnées. En revanche, les roues avant sont passives, et sont utilisées comme un estimateur pour générer les états de véhicule requis pour la conception ED arrière. En supposant que les angles de braquage pour l'avant droit et les roues gauches sont les mêmes, à savoir $\delta_{fl} = \delta_{fr} = \delta$, la vitesse longitudinale du véhicule et le taux de lacet peuvent être représentés par les vitesses de rotation des roues avant passives en résolvant V_x et r de (III-29)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(ls \cos \delta - lf \sin \delta) R_{eff}}{2ls (\cos \delta)^2} & \frac{(ls \cos \delta + lf \sin \delta) R_{eff}}{2ls (\cos \delta)^2} \\ \frac{R_{eff}}{2ls \cos \delta} & -\frac{R_{eff}}{2ls \cos \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rl} \\ \omega_{rr} \end{bmatrix} \quad (III-32)$$

Différent de la configuration appropriée à ED quatre-roues et l'ED avant, représentés sur les figures III.9 et III.10, respectivement, l'estimateur de la roue avant est adopté à la place de l'estimateur GPS et de la roue arrière. De plus, le suivi de la vitesse des roues ne concerne que les deux roues motrices arrière. Le contrôleur de régulation de vitesse de haut niveau pour maintenir une vitesse constante du véhicule pendant les virages comme dans le cas de ED quatre roues ou le cas d'ED avant [34].

Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle qui régit le comportement couplé latéral et longitudinal du véhicule a été établi en appliquant les principes fondamentaux de la dynamique. Dans un premier temps, pour exprimer les efforts qui s'appliquent sur le véhicule, nous avons été amenés à décrire le modèle du pneumatique. Dans un second temps, nous avons fait une analyse des modes longitudinal et latéral. Le modèle simplifié obtenu sera utilisé pour la synthèse des lois de commandes. Pour clôturer ce chapitre, nous avons présentés les différents modèles de traction du véhicule électrique.

Chapitre IV

La commande d'un véhicule électrique

Introduction

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant des hautes performances dynamiques. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux moteurs synchrones à aimants permanents d'atteindre ces performances.

Cependant le contrôle vectoriel, qui permet un découplage entre les variables de commande, reste le plus utilisé en raison des performances dynamiques élevées qu'il offre pour une large gamme d'applications.

Pour l'obtention de performances exigées dans un système de commande, nous avons amené à adjoindre au système à commander des organes extérieurs appelés régulateurs (PI), qui ont pour rôle de maintenir la grandeur régulée à une valeur de la consigne malgré la présence des perturbations dans le fonctionnement en régulation ou de suivre la variation d'une consigne dans le fonctionnement en asservissement. Au moyen du choix des actions et de leurs paramètres, il est possible d'obtenir un comportement désiré en boucle fermée, caractérisant les performances du système.

Alors que les techniques de commande ne cessent de se développer nous avons opté à intégrer la commande Neuro-Floue afin d'améliorer la robustesse de notre système, en raison de ses caractéristiques telles que : rapidité, l'apprentissage précis et la capacité de gestion des données.

Les Réseaux Neuro-Flous apprennent des rapports et des modèles en utilisant un algorithme d'apprentissage supervisé qui examine les données à travers les couples représentés par les entrées et les sorties associées du système. Pendant la phase d'apprentissage, un Réseau Neuro-Floue modifie sa structure interne pour refléter le rapport entre les entrées et les sorties dans l'ensemble de la formation (base de connaissance). L'exactitude d'un Réseau Neuro-Flou est vérifiée après que le cycle de d'apprentissage soit complet en utilisant un ensemble séparé d'entrées et sorties appeler l'ensemble de la validation.

IV.1 Généralités sur PSIM :

Il existe de nombreux logiciels de simulation électrique. Certains sont conçus tout particulièrement pour les circuits d'électronique de puissance. Le logiciel mis à notre disposition, PSIM, fait partie de cette dernière catégorie. Il s'agit d'un ensemble logiciel formé de trois modules liés :

- Un éditeur de schéma, SIMCAD, servant à décrire l'ensemble du système à simuler.
- Le simulateur électrique proprement dit, PSIM.

- Un programme d'affichage graphique des résultats de simulation, SIMVIEW.

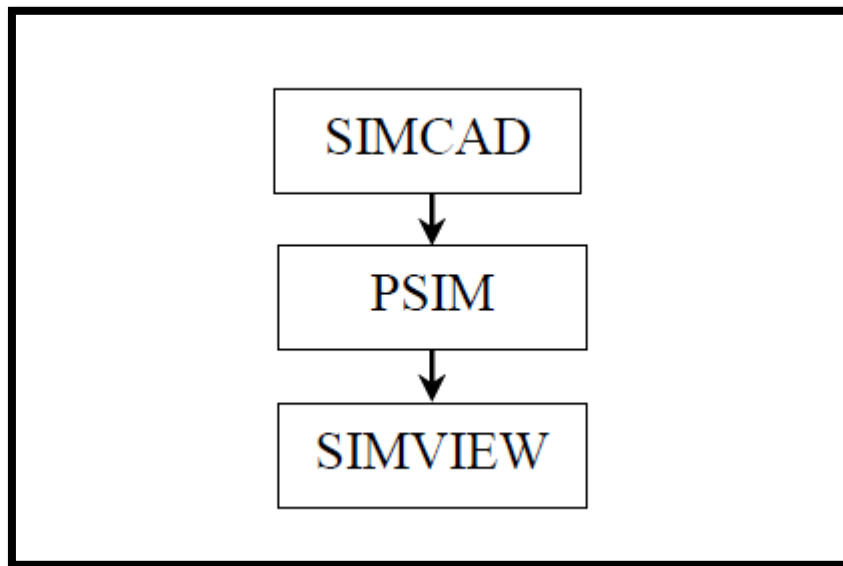


Figure IV. 1 : Représentation du système simulé

IV.2 Architecture des modules utilisés sur PSIM

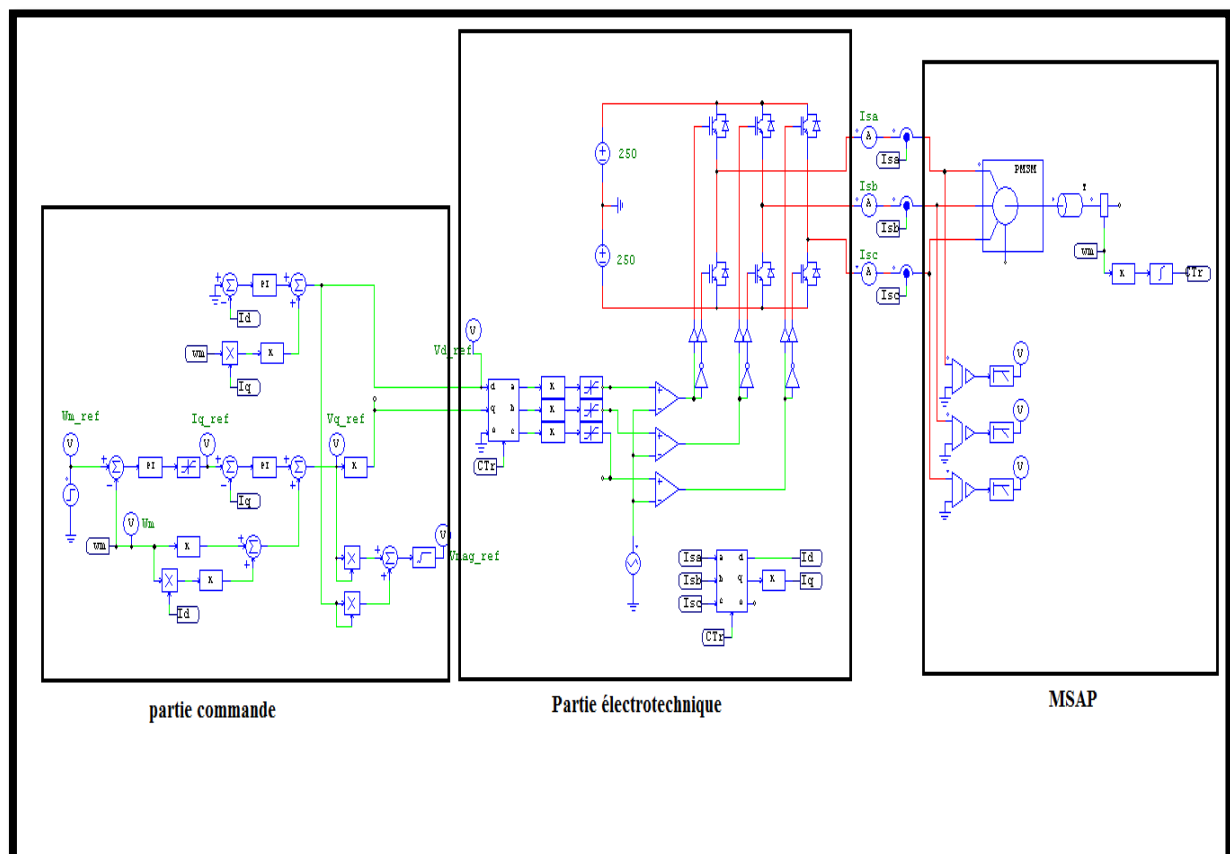


Figure IV.2 Schéma globale de moteur synchrone sous PSIM

IV.2.1 Partie commande :

Pour la partie commande qui est sous la figure (IV.3) on la reprogrammer sous Matlab afin de mieux contrôler les performances des régulateur PI (reg des courant I_d , I_q et vitesse w_r) et la configuration de toutes les équations mathématiques et tous les gains.

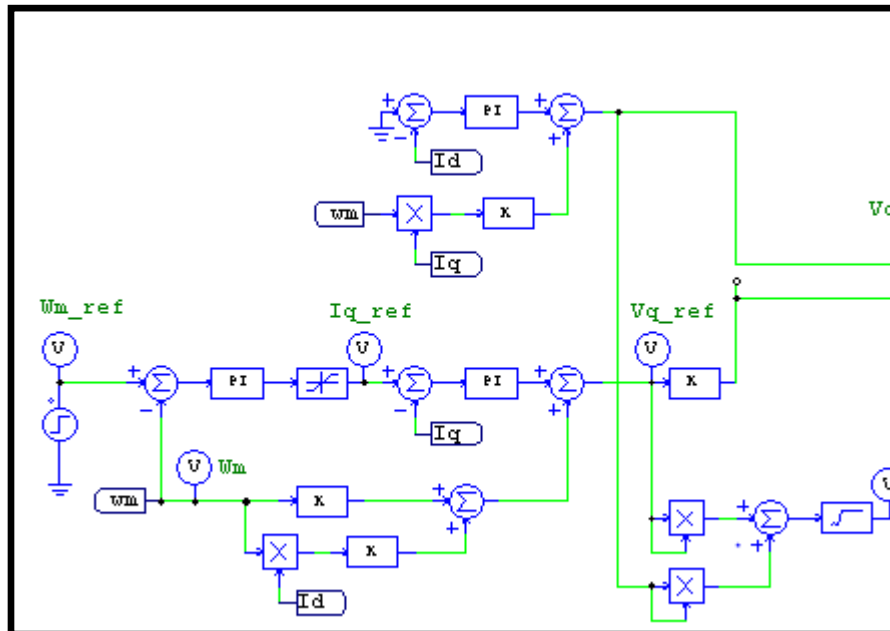


Figure IV.3 la partie commande

IV.2.2 Partie onduleur / MLI

Cette partie es composé de :

- Bloc de la transformation de PARK
- Bloc de la transformation de Concordia
- IGBT
- Inverseurs et comparateurs.

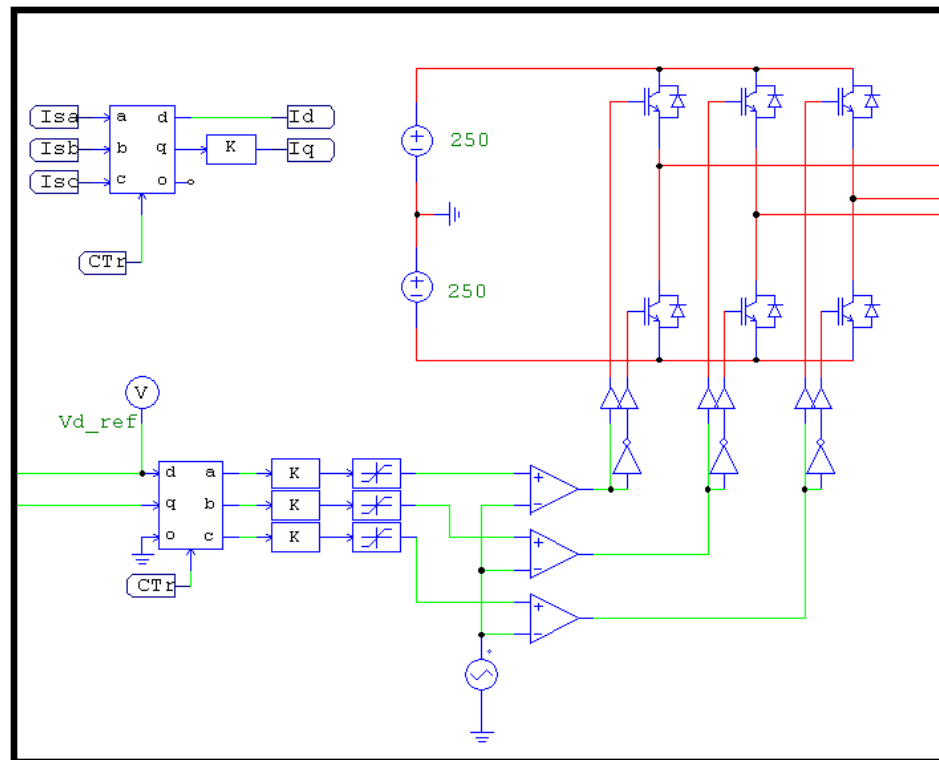


Figure IV.4 Composants de la partie électrotechnique

IV.2.3 Partie moteur

Composée par un moteur synchrone a aimant permanent et des capteurs (vitesse (wm) et position (ctr)) et muni par un couple charge (r).

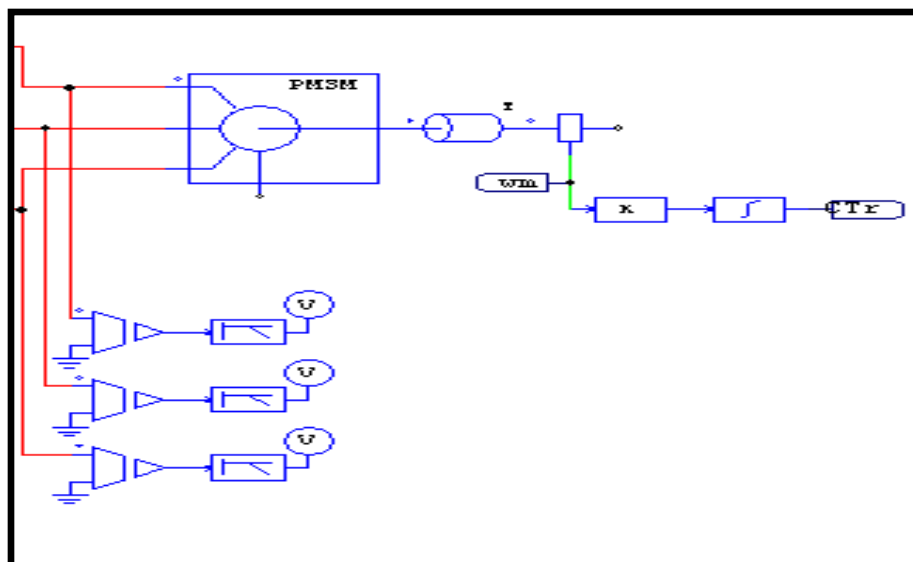


Figure IV.5 Composants de la MSAP

IV.2.4 SimCoupler

Le module SimCoupler fournit le lien entre PSIM et Matlab / Simulink pour la cosimulation comme l'illustre la figure (IV.4)

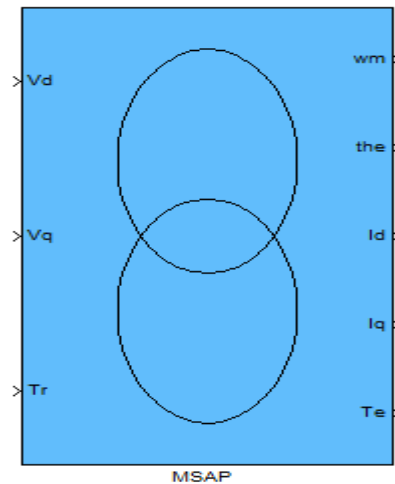


Figure IV.6 Bloc SimCoupler utilisé

Plusieurs nœuds de liaison In / Out peuvent être utilisés dans un circuit pour échanger des valeurs entre PSIM et Simulink.

Le module SimCoupler utilise les nœuds SLink pour établir l'interface entre PSIM et Simulink. Les nœuds rentrant de liaison reçoivent les valeurs de Simulink et les nœuds sortant de la liaison envoient les valeurs à Simulink.

Ces liaisons sont illustrées sous la figure (IV.7)

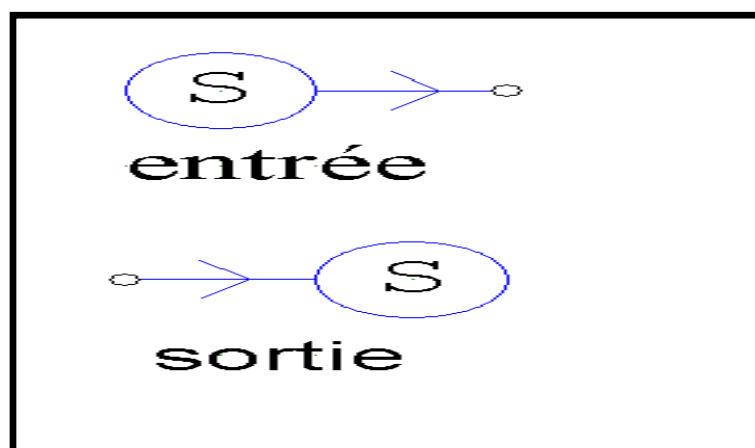


Figure IV.7 Entrée/sortie pour la liaison entre PSIM/Simulink

IV.3 Commande vectorielle de (MSAP)

IV.3.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle porte en générale sur des machines aimantées en tension et régulées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant l'inconvénient d'une alimentation du courant.

La figure (IV.8) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension [35].

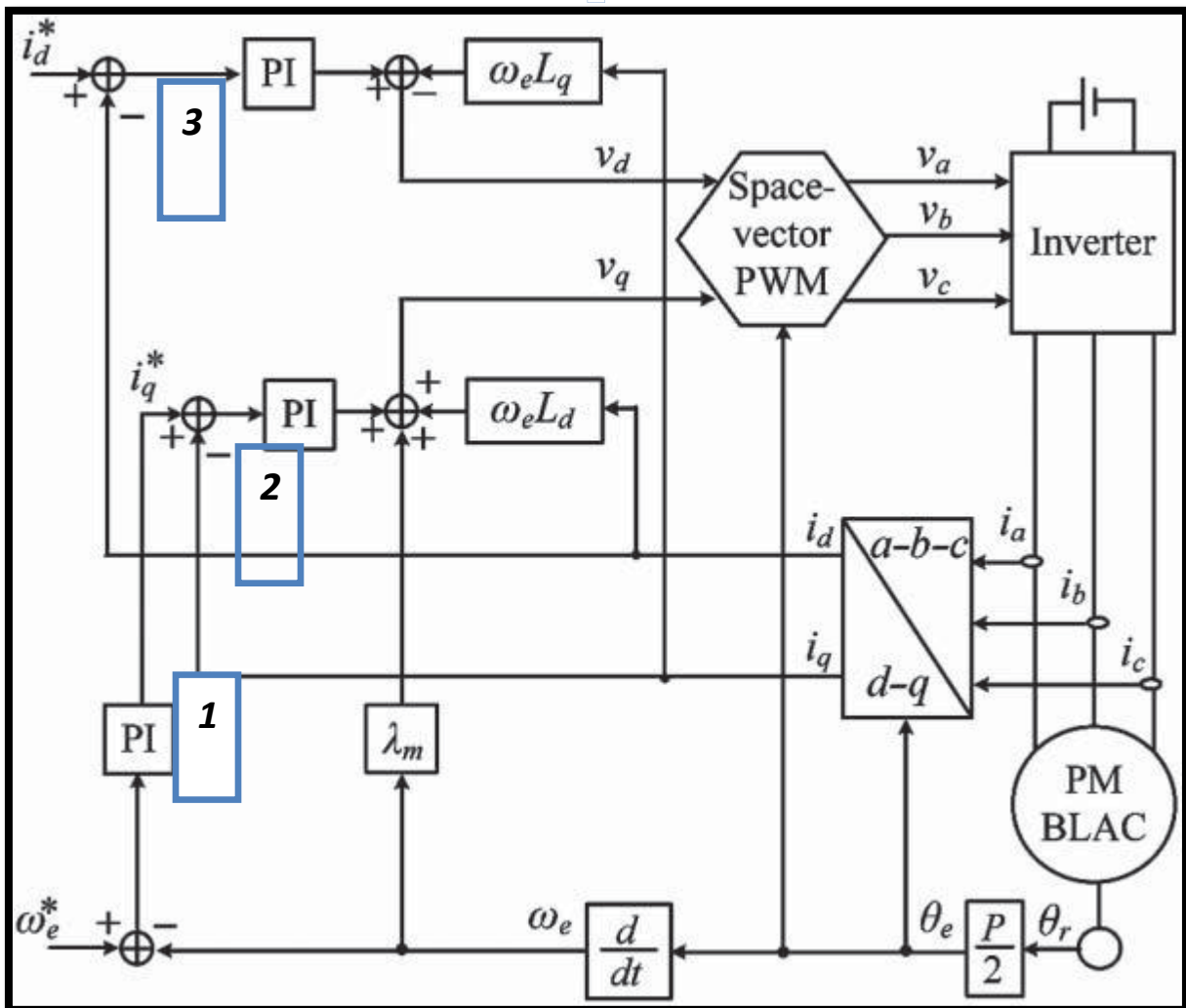


Figure IV.8 Schémas de la commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

Les principaux constituants dans la commande vectorielle sont la boucle de régulation de vitesse, celle des courant i_d et i_q et transformation de park et concordia.

La vitesse est régulée à travers la boucle (1) du bloc, la sortie de son régulateur est le courant de référence I_q^* . Il est limite de manier à tenir compte des caractéristiques de l'onduleur et de la surcharge de la machine. Le courant I_q^* est comparé à la valeur I_q issue de la mesure des courants réels. L'erreur sollicite l'entrée du régulateur de référence V_q dans la boucle (2).

En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation (3) de I_d . Le courant I_d^* référence est maintenu à zéro.

La sortie des régulateurs de I_d et I_q donnent des tensions de références V_d^* et V_q^* et par la transformer de Park, nous aurons les tensions de référence V_a^*, V_b^*, V_c^* qui sont les tensions de commande MLI appropriées à l'onduleur.

IV.4 Synthèse des régulateurs :

IV.4.1 régulateur PI

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la figure IV.9. Il comporte une action proportionnelle (K_p) qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale (K_i) qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur réglée et sa propre consigne [37].

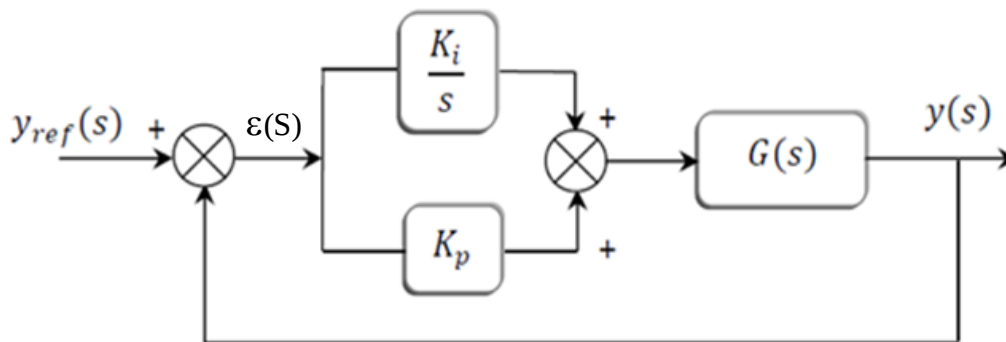


Figure IV.9 Schéma de commande utilisant la structure PI

Soit $G(s)$ la fonction de transfert d'un système de premier ordre donnée par

$$G(s) = \frac{G_0}{1 + \tau_s s} \quad (\text{IV-1})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$T_{bf}(S) = \frac{G_0 k_i \left(\frac{k_p}{k_i} S + 1 \right)}{(1 + \tau_s) \left(S + \left(k_p S + k_i \right) \frac{G_0}{1 + \tau_s} \right)} \quad (\text{IV-2})$$

Parmi les approches qui nous permet de constituer un correcteur PI, nous pouvons cite une Approche :

- **Méthode de compensations de pôles :**

La méthode de compensations de pôles consiste à égaliser le zéro du régulateur avec le pôle de fonction de transfert du système à réguler, cela permet d'avoir une première équation. Par la suite on fixe les dynamiques de poursuite (constante de temps T_{bf} en boucle ferme) ce qui donne une deuxième équation ainsi, le système à deux équations permet de calculer les deux coefficients du régulateur. Le principe de cette méthode est illustré par les relations de l'équation suivante [36] :

$$\begin{cases} \frac{k_p}{k_i} S + 1 = (1 + \tau_s) \rightarrow \tau = \frac{k_p}{k_i} \\ FT_{bf} = \frac{G_0 k_i}{S + G_0 k_i} \rightarrow T_{bf} = \frac{1}{G_0 k_i} \end{cases} \quad (\text{IV-3})$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{G_0 T_{bf}} \\ K_p = \frac{\pi}{G_0 T_{bf}} \end{cases} \quad (\text{IV-4})$$

Cette méthode calcule les paramètres du régulateurs PI à partir de la spécification des pôles désirés en boucle fermée, connaissant le modèle du procédé.

IV.4.1.1 Dimensionnement du correcteur PI

Les comparaisons entre les grandeurs de référence et celles de calcul donnent des erreurs de poursuite. La correction ou la compensation de ces erreurs nécessite l'addition d'un bloc appelé correcteur ou compensateur.

Il existe plusieurs types de correcteurs, dans ce qui suit, on développera le correcteur de type Proportionnelle Intégral (PI). Par son action Proportionnelle, il convient pour l'annulation de l'erreur et il est aussi réalisable physiquement. Néanmoins, il présente l'inconvénient de

saturer éventuellement l'entrée du système à cause de son action intégrale. Ceci, nécessite de l'associer à un dispositif anti saturation.

Les 3 boucles introduites (1,2,3) dont l'une pour la vitesse, et deux autres pour les courants I_q et I_d respectivement.

A partir des relations des tensions on a :

$$\begin{cases} V_d = r_s i_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_q = r_s i_q + L_d \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r + \phi_f \end{cases} \quad (\text{IV-5})$$

En appliquant la transformer de Laplace, on obtient :

$$\begin{cases} V_d(s) = (r_s + sL_d)I_d(s) - E_q \\ V_q(s) = (r_s + sL_q)I_q(s) - E_d \end{cases} \quad (\text{IV-6})$$

Avec :

$$\begin{cases} E_q = \omega_r L_q i_q(s) \\ E_d = -(\omega_r L_d i_d + \omega_r + \phi_f) \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

s : l'opérateur de Laplace.

IV.4.1.2 Régulateur des courants

- Régulateur du courant I_d

La commande de la MSAP s'accomplit en contrôlant les courants I_d et I_q à partir de la boucle de régulation de la vitesse qui entre dans la composition du système de telle manière à imposer le courant de référence I_{qref} , et garder le courant I_d nul. La commande est effectuée par les régulateurs (PI) qui maintiennent la grandeur de sortie égale à la grandeur de référence imposée afin d'annuler l'erreur statique ($\mathcal{E} = 0$).

Sachant que :

$$I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + s.L_d} \quad (\text{IV-8})$$

Et que la forme générale du régulateur (PI) est :

$$Reg (PI) = k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} = k_{pd} \cdot \frac{(1+T_{id} \cdot s)}{(T_{id} \cdot s)} \quad (IV-9)$$

Avec :

$$k_{id} = \frac{k_{pd}}{T_{id}} \quad (IV-10)$$

Tel que :

- K_{pd} : est le gain de l'action proportionnelle du correcteur Id
- K_{id} : est le gain de l'action intégral.

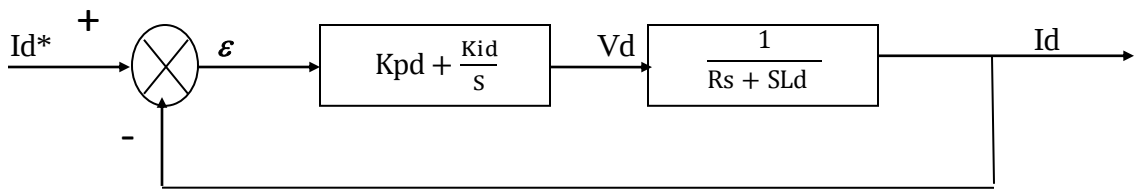


Figure IV.10 Boucle de régulation du courant Id

- T_{id} : est la constante du temps d'intégration.

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

$$\frac{1}{(R_s + s \cdot L_d)} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{(1 + T_{ed} s)} \quad (IV - 11)$$

Avec :

$$T_{ed} = \frac{L_d}{R_s} \quad (IV - 12)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \frac{1}{(R_s + sL_d)} = K_{pd} \frac{1 + T_{id}s}{(T_{id}s)} \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{L_d}{R_s}s} \quad (IV - 13)$$

Compensons le pôle T_{ed} par T_{id} , ce qui se traduit par la condition :

$$T_{ed} = T_{id}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant :

$$FTBO = K_{pd} \frac{\frac{1}{R_s}}{T_{id}s} = \frac{K_{id}}{R_s s} \quad (IV - 14)$$

Pour la fonction de Transfert en boucle ferme (FTBF) :

$$FTBF = \frac{FTBO}{(1 + FTBO)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{FTBO}} \quad (IV - 15)$$

- **Régulateur du courant I_q :**

De la même façon que le calcul de régulateur du courant I_d , on détermine le régulateur du courant I_q avec :

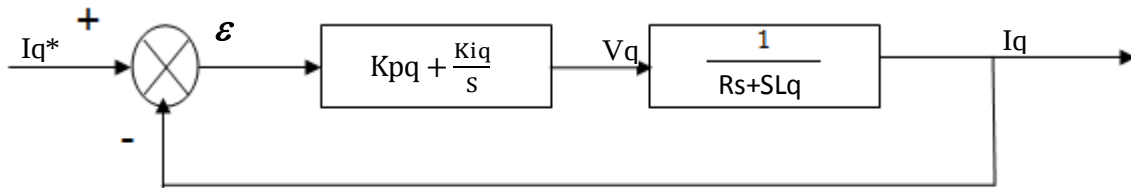


Figure IV.11 Boucle de régulation du courant I_q

$$\begin{cases} T_r = 3 \frac{R_s}{K_{iq}} \rightarrow K_{iq} = 3 \cdot \frac{R_s}{T_r} \\ K_{pq} = \frac{L_q K_{iq}}{R_s} = \frac{3 L_q}{T_r} \end{cases} \quad (IV-16)$$

IV.4.1.3 Régulateur de la vitesse :

En supposant le couple résistant nul ($C_r=0$), le courant sur l'axe q a atteint son régime permanent, et sa valeur final est I_q^* .

La fonction de transfert est :

$$\frac{\Omega_r(s)}{I_{qref}} = \frac{3}{2} p \phi_f \frac{1}{J_s + f_r} \quad (IV-17)$$

En ajoutant un régulateur PI, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F_w(s) = \left[K_{pw} * \frac{s + \frac{K_{iw}}{K_{pw}}}{s} \right] * \left[\frac{3}{2} p * \frac{\phi_f}{f_r} \frac{1}{\frac{J}{f_r} s + 1} \right] = \left[K_{pw} * \frac{s + \frac{K_{iw}}{K_{pw}}}{s} \frac{K_0}{T_w s + 1} \right] \quad (\text{IV-18})$$

En utilisant le principe de la compensation de pôles on aura :

$$\frac{K_{iw}}{K_{pw}} = \frac{1}{T_w} \quad (\text{IV-19})$$

La fonction de transfert devient :

$$F_w(s) = K_{pw} \frac{K_0}{T_w} \quad (\text{IV-20})$$

Avec :

$$K_0 = \frac{3}{2} p \frac{\phi_f}{f_r} \quad (\text{IV-21})$$

$$T_w = \frac{J}{f_r}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_w(s) = \frac{\frac{K_{pw} K_0}{T_w s}}{1 + \frac{K_{pw} K_0}{T_w s}} = \frac{1}{\frac{T_w s}{K_{pw} K_0} s + 1} \quad (\text{IV-22})$$

Avec :

$$t_w = \frac{T_w}{K_{pw} K_0}$$

Alors :

$$\begin{cases} K_{pw} = \frac{T_w}{t_w K_0} \\ K_{iw} = \frac{1}{t_w K_0} \end{cases} \quad (\text{IV-23})$$

IV 4 .2 La commande Neuro-Floue (ANFIS)

Le système de contrôle vectoriel indirect traditionnel utilise un contrôleur PI classique dans la boucle de vitesse en raison de la simplicité et de la stabilité. Dans ce travail nous avons opté pour une autre approche qui est contrôleur Neuro-Flou.

Ce dernier est utilisé à la place du régulateur de vitesse, conformément à la stratégie de commande présentée sur la figure IV.12

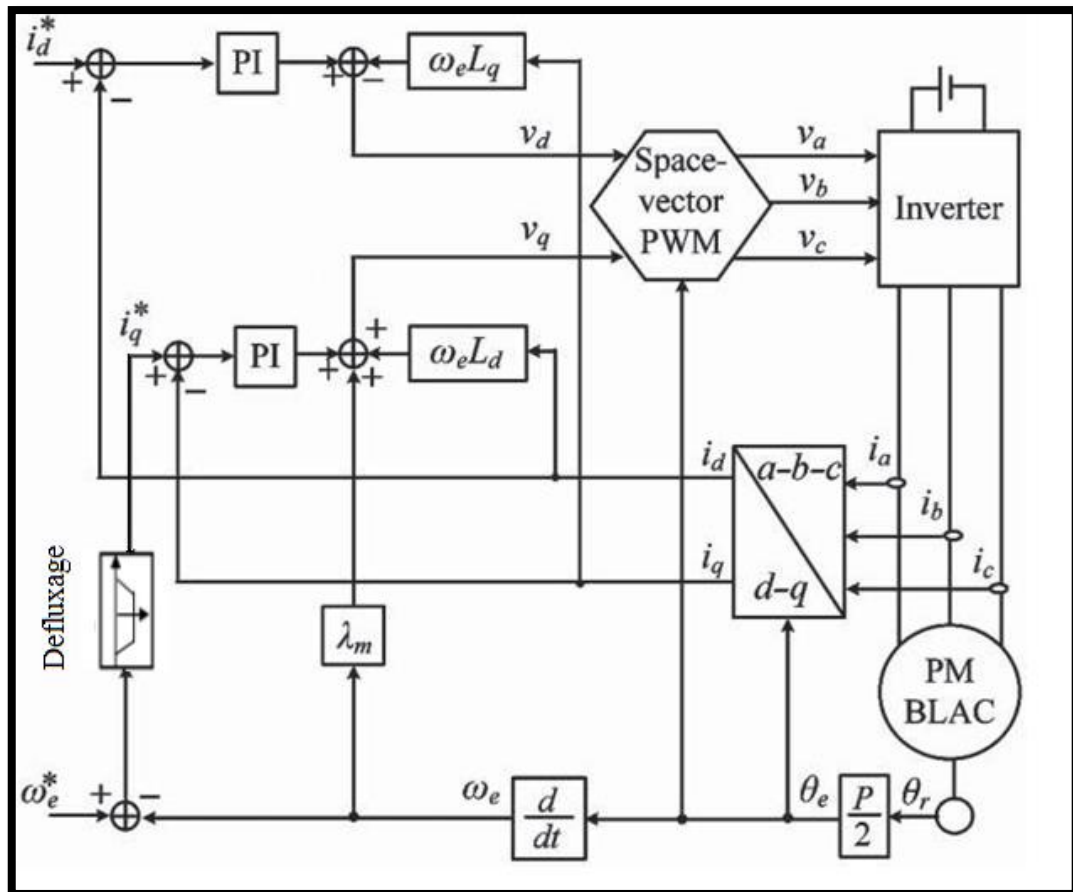


Figure IV.12 la structure de la régulation de la vitesse avec un correcteur Neuro-Floues

IV.4.2.1 Modélisation d'un régulateur Neuro-Flou (ANFIS) :

Nous pouvons le définir par les trois éléments suivants :

- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées qui est la Fuzzification.
- La fonction d'activation (ou d'état) du réseau qui définit son état interne en fonction de son entrée totale (inference).

c. La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation (défuzzification).

Et ces trois éléments sont illustrés par la figure (IV.13)

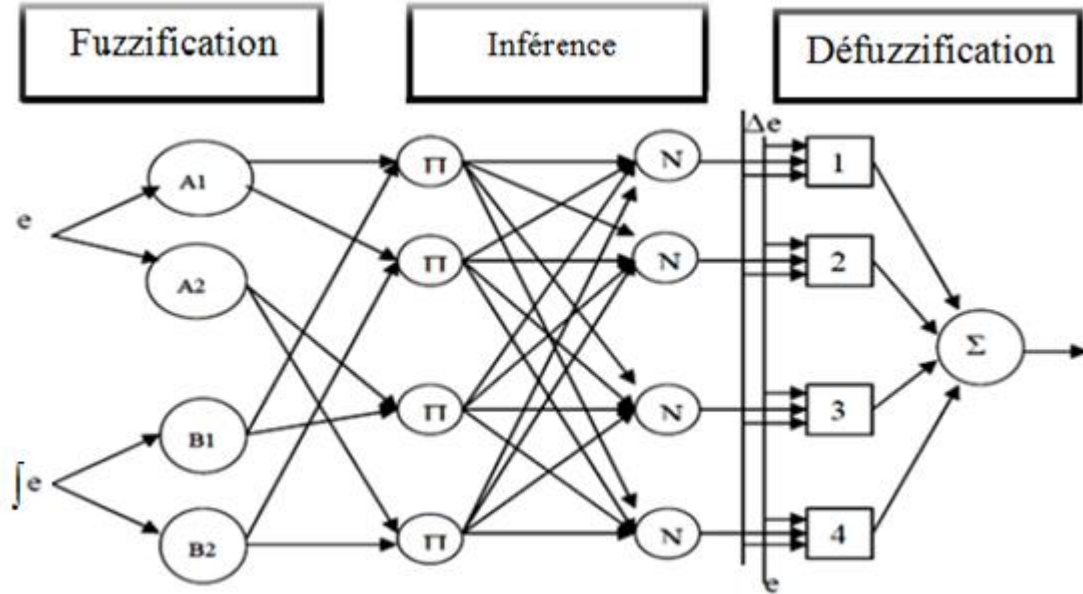


Figure IV.13 Le réseau Neuro-Flou (ANFIS)

IV.4.2.2 Architecture du régulateur Neuro-Floues (ANFIS) :

ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) c'est un système d'inférence adaptatif Neuro-Flou qui a 5 couches pour laquelle chaque couche correspond à la réalisation d'une étape appropriée au système d'inférence flou de type Takagi Sugeno. Pour des raisons de simplicité, nous supposons que le système d'inférence flou à deux entrées X et Y, et une sortie S [38].

- **Couche 1**

La fonction du nœud à cette couche est identique à la fonction d'appartenance dans les processus de fuzzification :

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(e) \text{ pour } i=1;2 \quad (\text{IV-24})$$

$$O_{2,i} = \mu_{B_{i-2}}(\int e) \text{ pour } i=3;4 \quad (\text{IV-25})$$

Où e et Δe sont l'entrée des nœuds respectifs (1,2) et (3,4) A_i, B_{i-2} sont les termes pour changer les fonctions d'appartenance $\mu_{A_i}, \mu_{B_{i-2}}$.

O_j : La sortie représente donc les degrés d'appartenance de variable d'entrée e et Δe

- **Couche 2**

Sert à calculer le degré d'activation des prémisses. Les neurones de cette couche représentent chacun la prémisse d'une règle [39]. Ils reçoivent en entrée le degré de vérité des différents sous-ensembles flous composant cette prémisse et ont en charge le calcul de son propre degré de vérité. Les fonctions d'activation utilisées pour ces neurones dépendant des opérateurs présents dans les règles (ET ou OU).

La fonction d'activation des neurones :

$$\begin{cases} O_{1,2} = O_{1,1} * O_{1,3} = W_1 \\ O_{2,2} = O_{1,1} * O_{1,4} = W_2 \\ O_{2,3} = O_{1,2} * O_{1,3} = W_3 \\ O_{2,4} = O_{1,2} * O_{1,4} = W_4 \end{cases} \quad (IV-26)$$

- **Couche 3**

Normalise de degré d'activation des règles.

Chaque neurone dans cette couche est un neurone de cercle noté N. L'iem neurone calcule le rapport entre l'iem *poids* de règles et la somme de tous les poids des règles. Cette opération est appelée la normalisation des poids

$$O_{3,i} = \frac{W_i}{\sum_{k=1}^4 W_K} \text{ Avec } i = 1,4 \quad (IV-27)$$

L'ensemble des sorties de cette couche seront appelées les poids normalisés.

- **Couche 4**

Chaque nœud de cette couche est un nœud carré avec une fonction décrite comme suit :

$$O_{4,i} = O_{3,i} f_i = v_i(a_i e + b_i \Delta e + c_i) \quad (IV-28)$$

v_i est la sortie de la troisième couche, et $(a_i \ b_i \ c_i)$ sont l'ensemble des paramètres désignés sous le nom conséquents

- **Couche 5**

La couche de sortie contient un seul neurone de type cercle noté S qui calcule la sortie globale comme addition de tous les signaux entrants, c'est-à-dire :

$$O_{5,i} = \sum_i O_{4,i} f_i \text{ Avec } i = 1.4 \quad (\text{IV-29})$$

- **Algorithme d'apprentissage**

Afin de limiter le temps de calcul, nous avons ajusté au mieux les seuls centres d'adhésion de sortie, réduisant au minimum la fonction objective suivant :

$$e(k) = \frac{1}{2} (h_d(k) - h(k))^2 \quad (\text{IV-30})$$

Avec $h(k)$ est la sortie réelle et $h_d(k)$ est la sortie désirée.

IV.4.2.3 Les avantages du régulateur Neuro-Flou (ANFIS)

Les avantages de cette technique de commande à base du régulateur Neuro-flou sont :

- Exploitation de la connaissance disponible, grâce à la base de règles.
- Réduction de la taille de base des règles floues : il suffit d'avoir des règles générales, les détails seront fournis par le réseau de neurones (RN).
- Réduction de la complexité de l'apprentissage : le RN doit simplement apprendre les cas particuliers ou les exceptions, pas le problème complet.
- Efficacité immédiate dès le début de l'apprentissage et possibilité d'éviter des comportements initiaux erratiques [40].

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation du logiciel utilisé dans la première partie qui est consacré à la modélisation du moteur synchrone à aimant permanent.

Dans la deuxième partie nous avons présenté la commande vectorielle de la (MSAP) ainsi les grandeurs de la machine, à savoir le couple, la vitesse et les courants, ces derniers sont contrôlés via des correcteurs de type Proportionnel Intégral (PI) dont le dimensionnement est basé sur la méthode de compensation de pôles.

Dans la troisième partie nous avons remplacé le régulateur de vitesse (PI) par un régulateur Neuro-Floue (ANFIS). Afin d'atteindre un bon état d'équilibre et de bonnes performances de la dynamique de poursuite.

Dans le chapitre suivant nous allons mener une étude comparative qui va nous permettre de classer les deux contrôleurs selon leurs performances.

Chapitre V

Interprétation des résultats de simulation

Introduction

Le système de contrôle vectoriel utilise un contrôleur PI classique dans la boucle de vitesse en raison de la simplicité et de la stabilité. Dans ce chapitre, un contrôleur Neuro-Fou (ANFIS) est utilisé à la place du régulateur PI en vue d'améliorer les performances de poursuite.

La structure des travaux présentés dans ce chapitre est organisée conformément à la séquence suivante :

Un moteur synchrone à aimant permanent est utilisé. Le contrôle vectoriel spécifique pour l'entraînement de moteur à induction en vue d'attraction du véhicule électrique, et ainsi que des interprétations des formalismes mathématiques utilisés sous des blocks.

Les résultats de simulation obtenus par la plateforme de simulation qui combine les deux logiciels à savoir le PSIM pour simuler le moteur synchrone à aimant permanent et partie puissance, et logiciel simulink/Matlab pour simuler les stratégies de commande relative à l'utilisation des régulateurs de type PI et contrôleur Neuro-flou, sont présentés à la dernière partie de ce chapitre.

V.1 Schéma globale de simulation

Le schéma global de la simulation sur Matlab est illustré par cette figure :

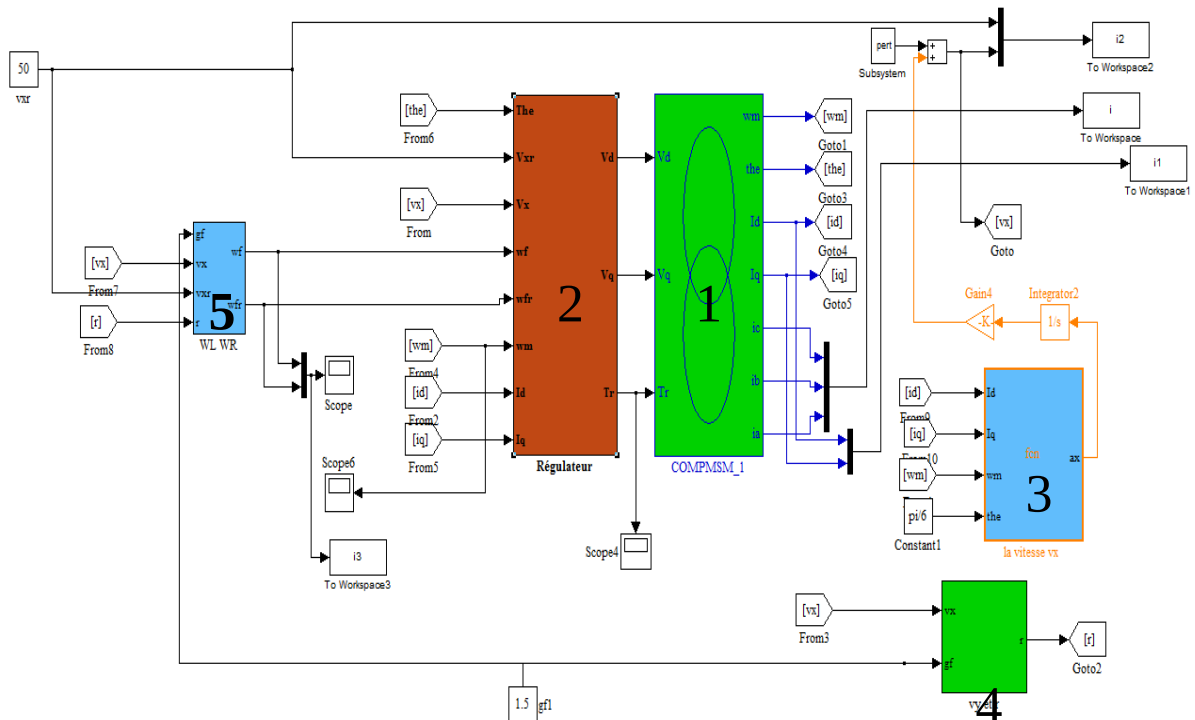


Figure V.1 Modèle complet de la simulation

Ce schéma illustre le modèle du véhicule électrique approprié à notre projet. Il est doté de plusieurs blocks insérés sous forme (Subsystem) numérotés de (1 à 5) et on peut les définir comme suit :

1. Block pour le moteur synchrone à aimant permanent :

La partie moteur (MSAP) est introduite à partir de PSIM et avec la mise en relation du block SimCoupleur qui nous permis de faire la liaison avec MATLAB.

2. Block de régulation :

Dans ce block nous avons démontré la stratégie de commande et ainsi la régulation à base de correcteur PI pour le contrôle des courants I_d, I_q et le correcteur Neuro-Flou (ANFIS) pour la régulation de la vitesse. Comme nous la montre la figure V.2.

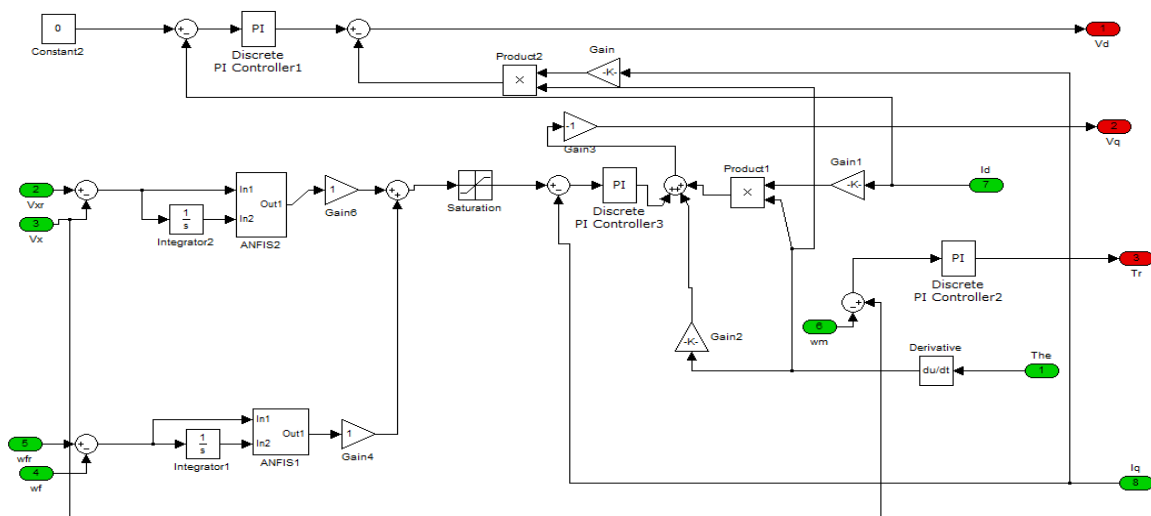


Figure V.2 schéma qui illustre le block de régulation

3. Block de modélisation de la vitesse longitudinal :

nous avons implémenter dans ce block toutes les équations qui décrivent la dynamique longitudinale du véhicule (les équations sont cités dans le chapitre III ,a partir de III.13 jusqu'à III.20)

4. Block de modélisation latéral

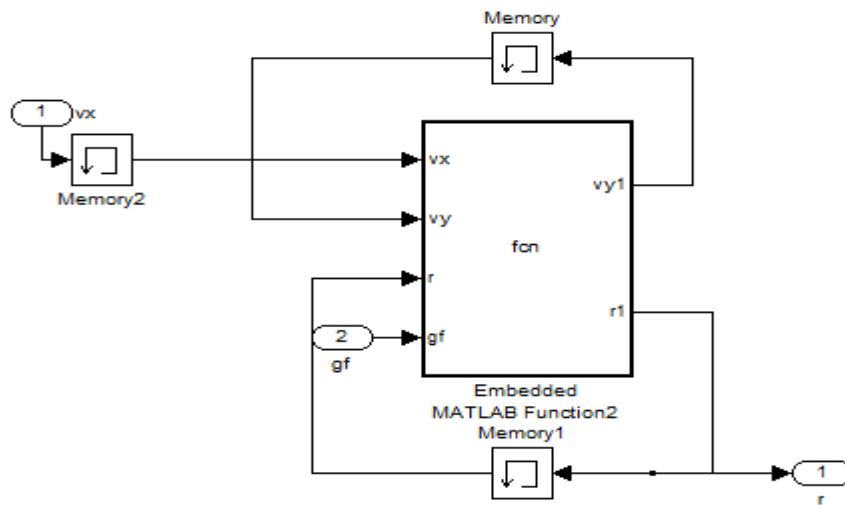


Figure V.3 block de vitesse latéral et l'angle de glissement du véhicule

Nous avons implémenté dans ce block les équations qui décrivent la dynamique latérale du véhicule (les équations sont citées dans le chapitre III, l'équation III.25).

5. Block de la modélisation des vitesses de rotation

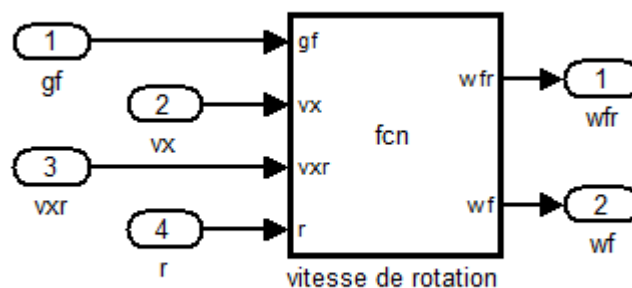


Figure V.4 block des vitesses de rotation

Nous avons implémentés dans ce block toutes les équations qui décrivent la dynamique latérale du véhicule (les équations sont citées dans le chapitre III, les équations III.29, 30)

V.2 Simulations et Résultats

V.2.1 Application I : sans correcteur

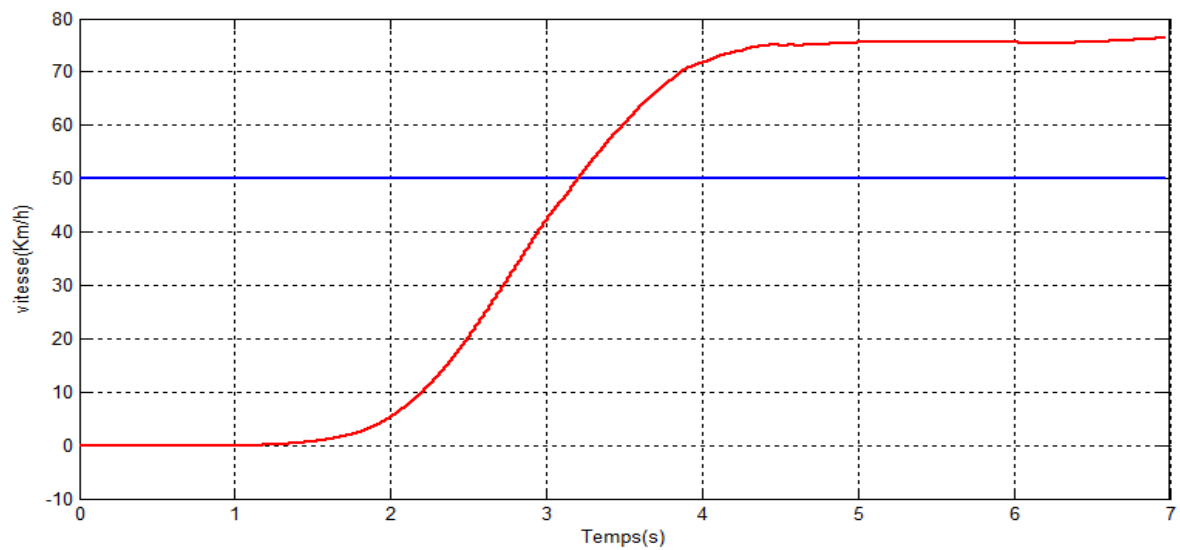


Figure V.5 Résultat et simulation de la vitesse V_x

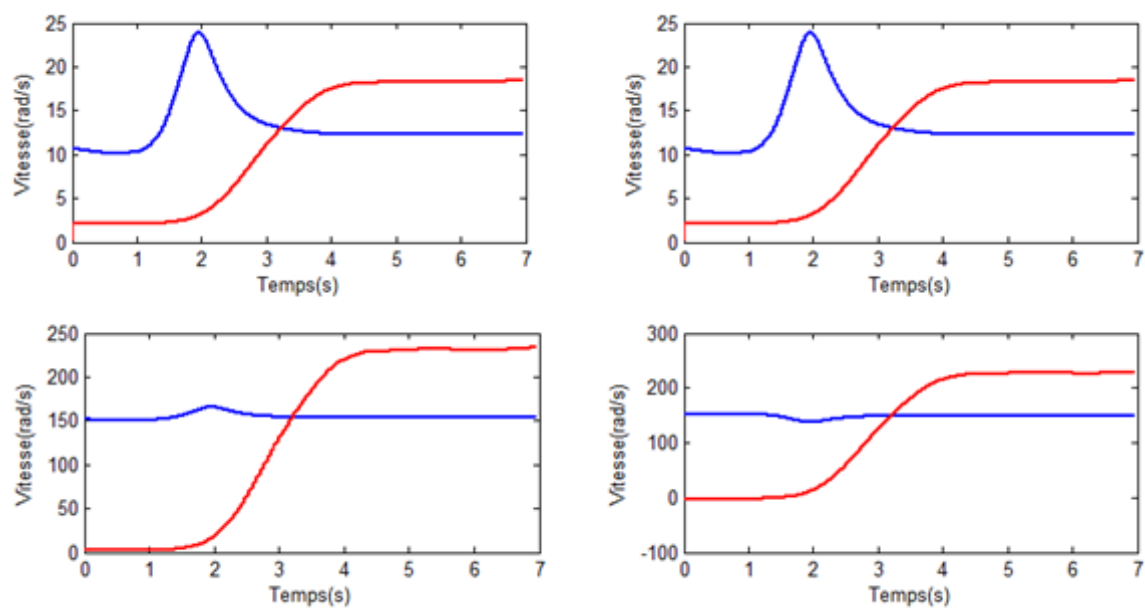


Figure V.6 Résultat de simulation des vitesse de rotation

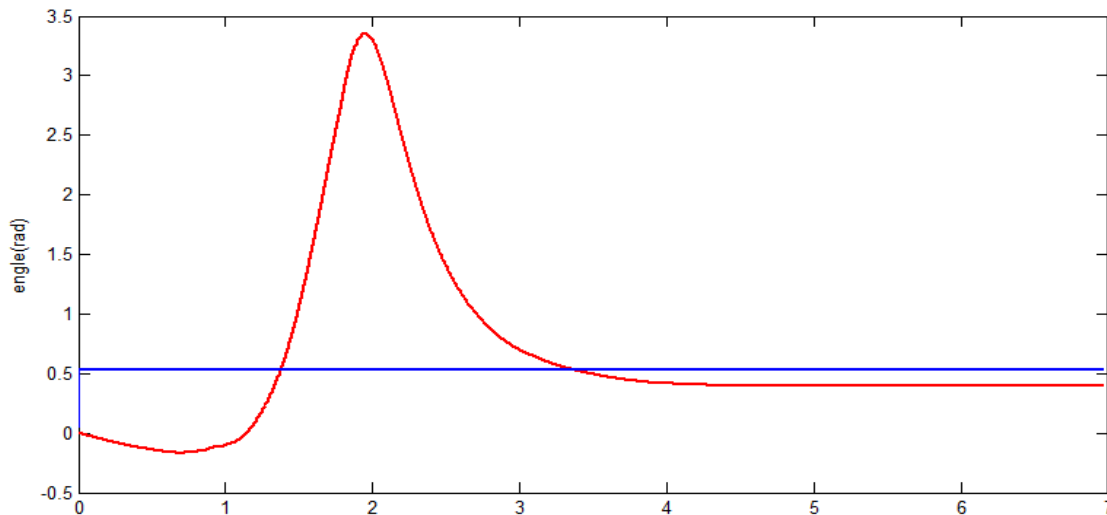


Figure V.7 Résultat et simulation de l'angle de glissement

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de la simulation sans correcteur ne reflète pas les résultats désirés. Les figures V.5 et V.6 représentent respectivement la vitesse du véhicule et les vitesses de rotation. A partir de ces résultats on constate clairement qu'il y a une erreur statique comprise entre $420 < \varepsilon < 450$, et un retard de 2s. Néanmoins on remarque que le système est stable.

V.2.2 Application II :simulation avec un correcteur PI

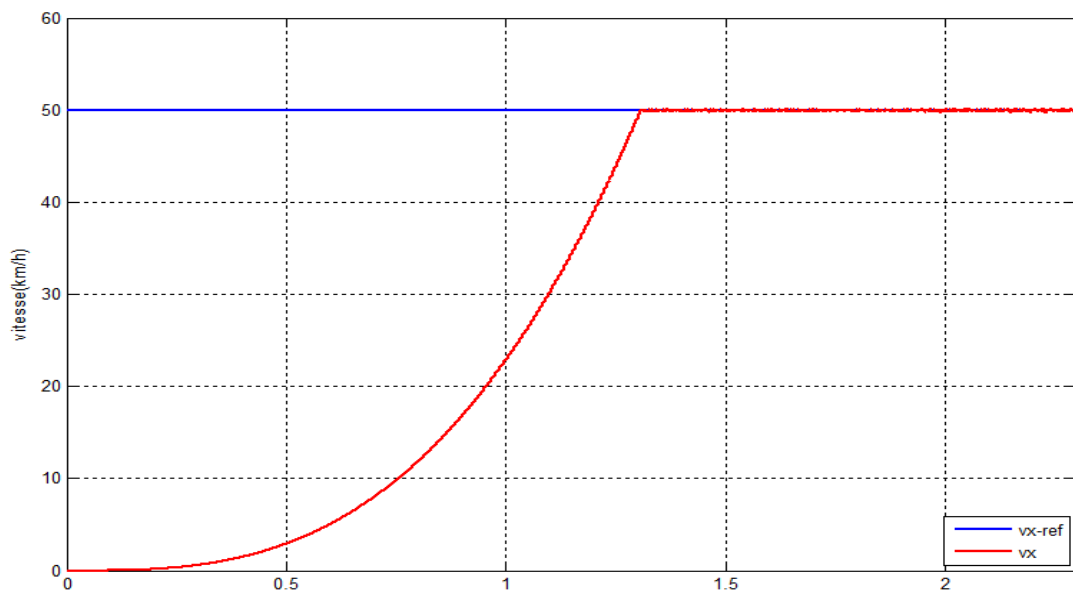


Figure V.8 Résultat de simulation de la vitesse V_x

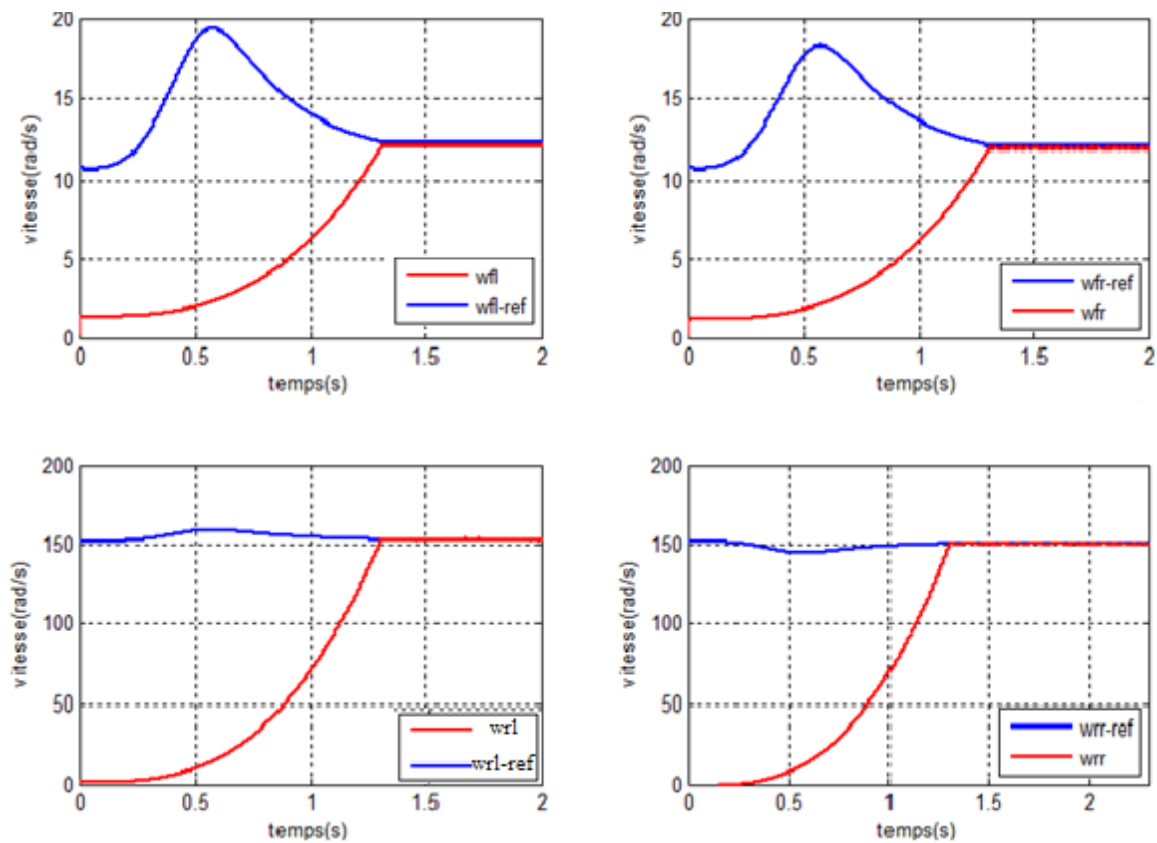


Figure V.9 Résultat de la simulation des vitesses de rotation

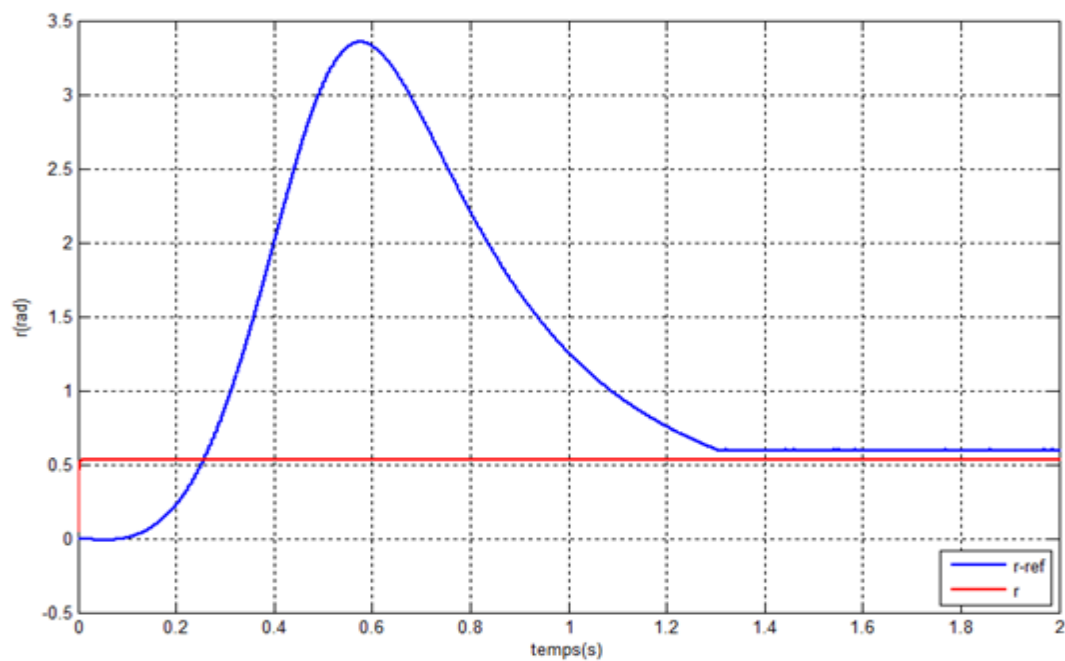


Figure V.10 Résultat de simulation de l'angle de glissement

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour la vitesse V_x et la vitesse rotationnelle des roues avec correcteur PI sont illustrées sur les figures V.8 et V.9. Ces résultats présentent une réponse satisfaisante en termes de stabilité. Le système est plus rapide grâce à l'action proportionnelle du correcteur qui accélère le système (diminution en temps de réponse) avec élimination de l'écart statique (système précis).

Les résultats de simulation obtenus en employant des régulateurs PI montrent un bon suivi des différentes grandeurs contrôlées par rapport aux grandeurs de consigne et prouve que le modèle utilisé est suffisamment précis.

V.2.3 Application III : simulation avec un correcteur Neuro-Flou

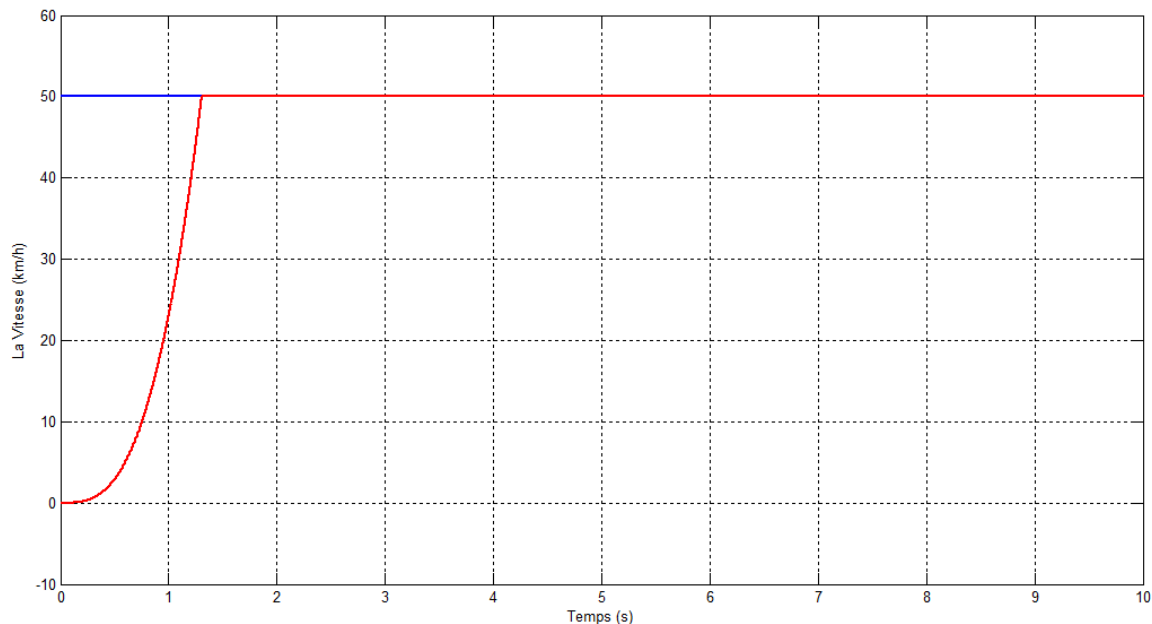


Figure V.11 Résultat de simulation du la vitesse V_x

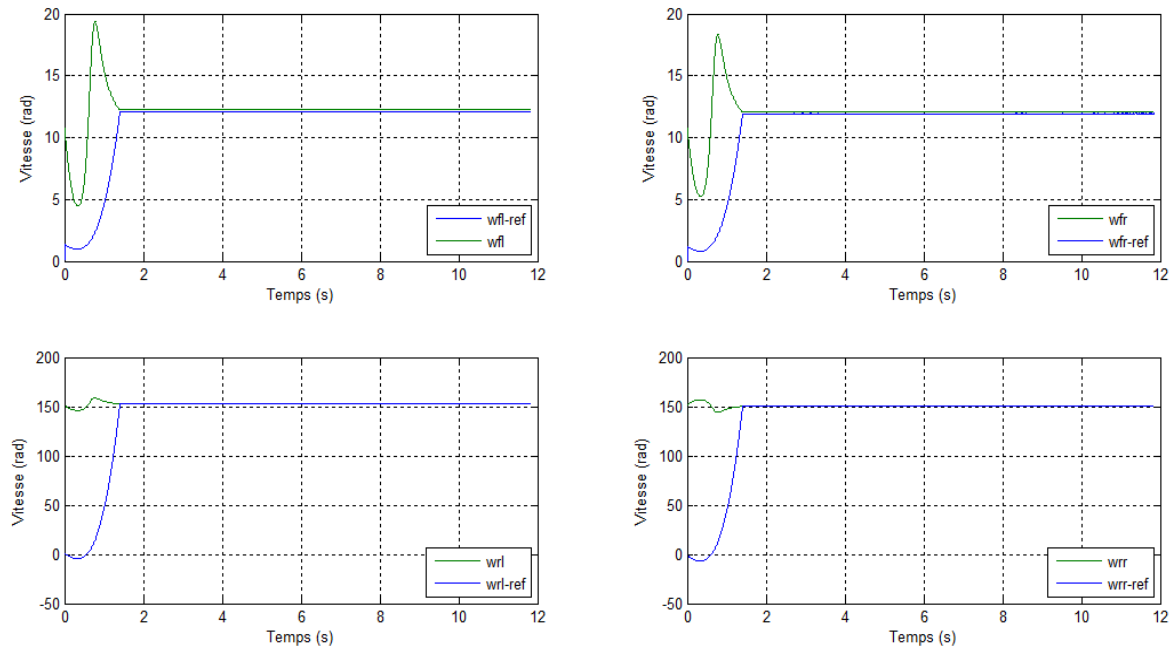


Figure V.12 Résultat de simulation des vitesses de rotation

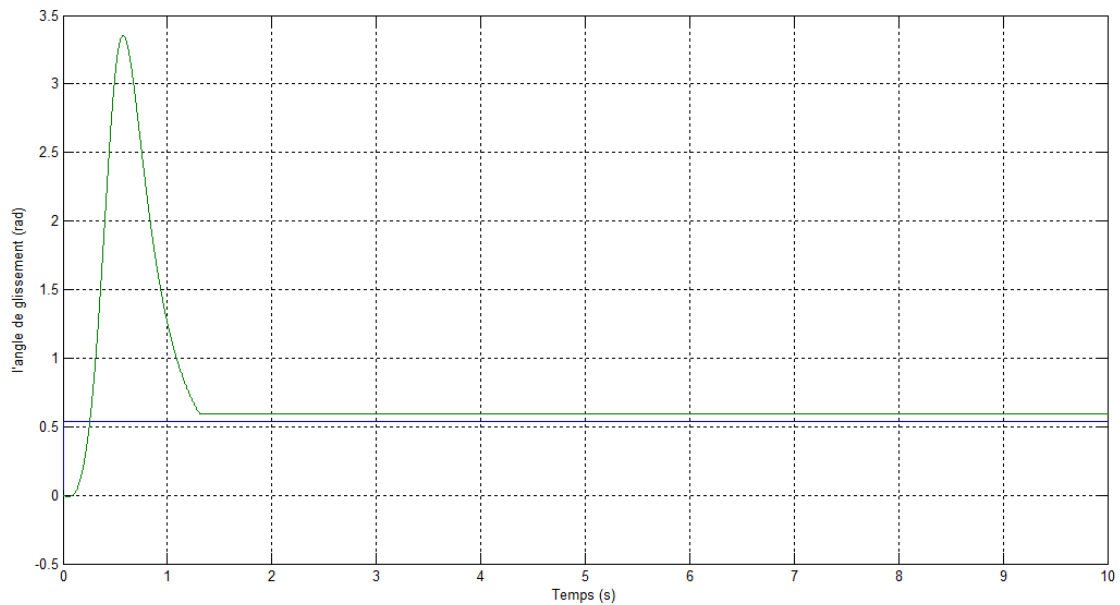


Figure V.13 Résultat de simulation de l'angle de glissement

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus avec le correcteur Neuro-flou présentent des avantages en terme de robustesse représentée par un temps de réponse diminué, comparativement aux résultats obtenus avec des correcteur de type PI.A partir des figure V.11 et V.12 qui illustrent

respectivement la vitesse V_x et les vitesses de rotation des roues, on peut constater que l'évaluation du système est améliorée dans la diminution de temps de réponse et la rapidité.

V.2.3.a simulation dans une pente de $\frac{\pi}{4}$:

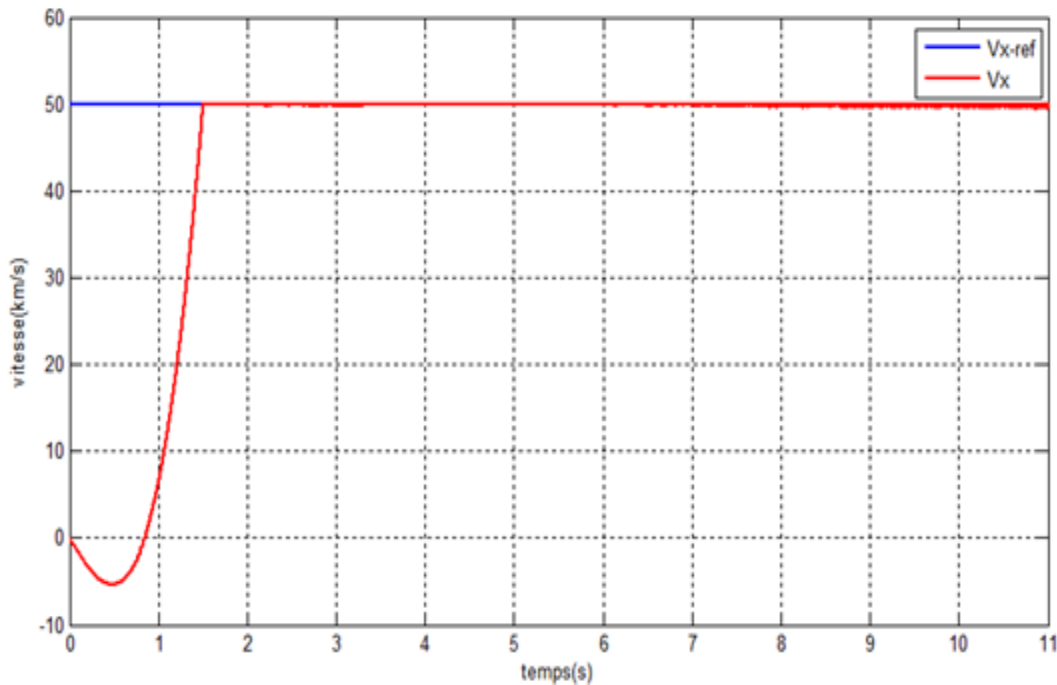


Figure V.14 : Résultat de simulation de la vitesse V_x sur une pente

Avec une simulation sur une pente de $\pi/4$ illustrée dans la figure V.14. La comparaison de ces résultats avec ceux donnés en figure V.11 nous pouvons constater une chute de vitesse qui est due au recule de véhicule sur cette pente. En revanche, après un court temps de 0.5s nous remarquons l'augmentation de la vitesse, pour se stabiliser au régime permanent à des valeurs imposées.

V.2.3. simulation avec une perturbation

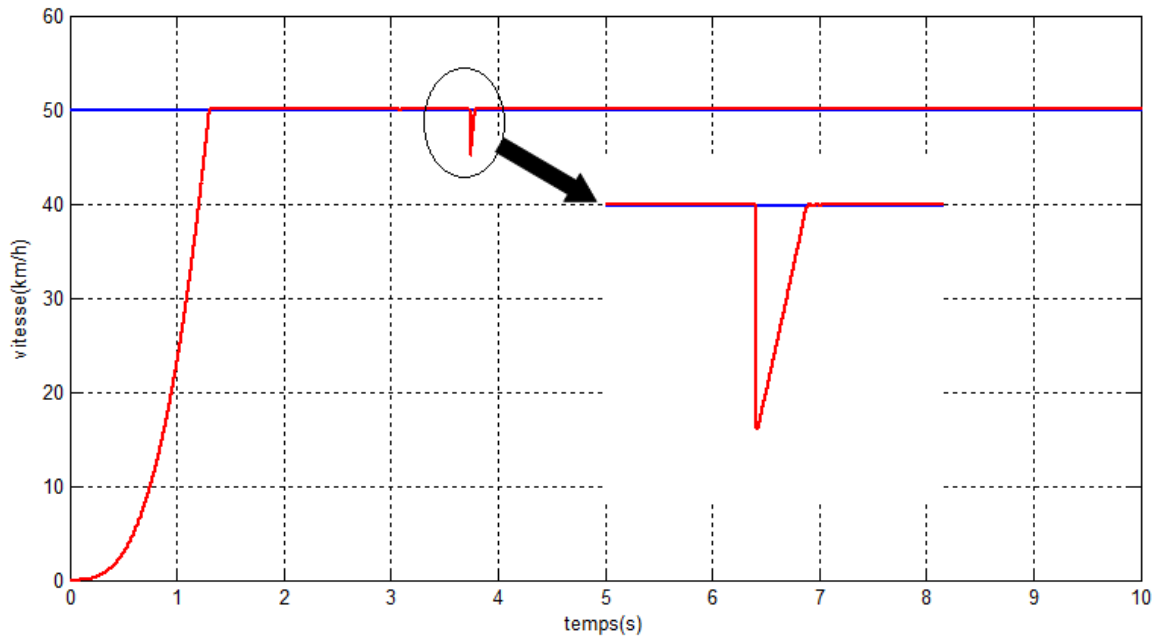


Figure V.15 : Résultat de simulation de la vitesse V_x en injectant une perturbation

Afin de tester la capacité de notre contrôleur à rejeter la perturbation, nous avons injecté un signal perturbateur sous forme d'échelon à l'instant $t=3.75s$ qui cause une erreur de poursuite.

Nous avons alors constaté que le contrôleur Neuro-flou arrive à éliminer l'effet des perturbations en temps relativement petits.

Conclusion

Le but de ce chapitre est de valider la stratégie de régulations de la vitesse longitudinale et la vitesse de rotation des quatre roues par simulation. Elle va être appliquée à deux profils de mission c'est à dire deux type de correcteurs :

- Technique de régulations par Correcteur (Proportionnel Intégral).
- Technique de régulations par Correcteur Neuro-Flou(ANFIS).

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté le programme simulé sous MATLAB ainsi que tous les blocks utilisés pour la modélisation du véhicule électrique.

Dans la deuxième partie nous avons exploité la simulation avec une commande sans correcteur afin de voir les défauts à corriger avec les correcteurs PI et Neuro-Flou (ANFIS).

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du contrôleur Neuro-Flou a donné une amélioration des performances dynamiques comparées au correcteur PI.

Dans la dernière partie nous avons simulé une pente et on a pu constater une chute de vitesse dû au recule du véhicule en arrière. Néanmoins le véhicule se reprend pour augmenter la vitesse et se stabiliser à une valeur désiré.

Nous avons aussi injecté un signal perturbateur afin d'exploiter les performances et la robustesse du correcteur Neuro-Flou qui rejette l'effet de la perturbation en un temps court.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La modélisation et la simulation de la dynamique des véhicules constituent un outil indispensable pour la réduction des coûts de développement et la limitation des essais expérimentaux pour développer des véhicules sûrs et confortables.

La conception de véhicules innovants fiables et sans danger nécessite d'un côté une modélisation précise de la dynamique appropriée au mouvement du véhicule afin de lui assurer une mobilité stable, et une bonne performance au niveau du moteur.

L'objectif de ce travail, été d'établir le modèle représentant la dynamique latérale du véhicule électrique. Pour cela, nous avons proposé un modèle détaillé en tenir compte des forces extérieures et les résistances du véhicule.

Dans un sens, une partie de ce travail est d'étudier et exprimer la vitesse longitudinale avec les forces de traction du véhicule qui sont exprimées aussi avec les variables électriques. Nous avons pris part aux différents modes de tractions afin de mieux valider les résultats obtenus.

En vue d'améliorer notre technique d'approche nous avons pris part à la compensation de la commande vectorielle qui s'impose, et le principal avantage du contrôleurs proposé réside dans les paramètres de la machine afin d'avoir une bonne poursuite en vitesse et de satisfaisantes performances dynamiques, grâce à la compensation de l'effet des perturbations qui peuvent avoir lieu sur la chaîne de régulation, en utilisant des régulateurs Neuro-flous (ANFIS) appréciés en raison de ses bonnes propriétés, surtout de robustesse pour une éventuelle variation des paramètres du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) .

Perspective

Pour une éventuelle continuité de ce projet il serait intéressant :

- D'étudier d'autres types de contrôleurs, afin d'assurer une meilleure stabilité du véhicule.
- D'ajouter un système de freinage autonome.
- D'ajouter un système embarquer avec carte arduino pour le contrôle des différents options (de confort, climatisation...etc.)
- D'envisager un système de freinage récursif qui va permettre le chargement de la batterie.

Bibliographie

- [1] V. Mester, <<Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique>>. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, mai 2007.
- [2] J. Syrota, P. Hirtzman, D. Auverlot, <<La voiture de demain : carburants et électricité>>, Centre d'analyse stratégique, Rapport & Document, p. 25, juin 2011.
- [3] Jérôme BERNARD, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande », thèse de doctorat, l'université de valenciennes et du hainaut-cambresis, 03 décembre 2007.
- [4] International Conferance on Green Energy and Environemental Engineering (GEEE-2014) ISSN:2356-5608 Sousse, Tunisia_2014<<Dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicule électrique>>.
- [5] Djamel Benoudhit<<contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion>> thèse doctorat en science en génie électrique
- [6] Chibani Aziz<<étude pour la conception d'une machine synchrone à rotor externe>> thèse magister en électrotechnique.
- [7] Zulkiflie I., Nurazlin M.Y., Marizan S., Jurifa M.L., Ahmad Shukri A.H., Fizatul A.P., (2012), Electric differential with SVPWM direct torque control using five-leg inverter for electric vehicles. Journal of Theoretical and Applied Information Technology.
- [8]. Multon B., Hirsinger L. (1996), Problème de la motorisation d'un véhicule électrique. Revue 3EI, pp. 55-64.
- [9]. Espanet C., (1999), Contribution à Modélisation et conception optimal de moteur sans balais à structure inversée application au moteur-roue. Thèse de doctorat, université de Franche-Comté.
- [10] Ahman,M. (2001)<< Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles Energy>> 973-989.
- [11] Burke,A. Jungers, B., Yang, C. and Ogden, J. (2007). Battery Electric Vehicles: <<An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness. Public Interest Energy Research (PIER) Program California Energy Commission.>>.
- [12] Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B. (2007). <<Recent advances in NiMH battery technology. Journal of Power Sources >>165 544–551.
- [13] Linden, D. and Reddy, T. B. (2002). <<Handbook of batteries. Third edition. McGraw-Hill.>>

Bibliographie

[14] Hadjipaschalis,I,Poullikkas,A. and Efthimiou,V.(2009).<<Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews >>13 1513–1522.

[15] Loukakou Bounzeki Mbemba.Thèse de Doctorat << Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains>> 21 Décembre 2012.

[16].Samah Saker<<Modélisation et contrôle du système, Pile a combustible, convertisseurs et super condensateur>>.

[17].Samantha Lacroix<<Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries>> thèse de doctorat 2013

[18] – J.Bertta, « Le génie électrique automobile, la traction électrique »,H. Science, éd.

LA VOISIER. (2005)

[19] – Multon B. « application des aimants aux machines électriques » note de cours version 2006 Ecole Normal Supérieur de Cachan, Antenne de Bretagne, Département de Mécatronique.

[20] – Kant M. « Actionneur à collecteur à aimants permanents » Technique de l'ingénieur, traité électrique D3 695.

[21] – Rachid Abdessemed « modélisation et simulation des machines électrique » Livre technosup spécialité électrotechnique version mai 2011.

[22] – A. Said « commande à structure variable d'un système d'entraînement électrique » Mémoire de magister, université de batna,2002.

[23] – F.benchabane « Commande en position et en vitesse d'un par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering » Mémoire de magister, université de biskra, 2005.

[24] -Ahmed Boucherit « Conception d'un Contrôle d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multi-sources » thèse doctorat.

[25] -Aiman NOUH « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers » thèse doctorat 2008université de Franche-Comté.

[26] –Henni Gharbi << Modélisation et commande d'un véhicule électrique hybride >>

Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali chlef.2015

Bibliographie

- [27] -GwangminPark ,Seonghun Lee , SunghoJin , Sangshin Kwak<<Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehiclepowertrains>>2013 Elsevier
- [28] – Fujii. K.,& Fujimoto, H. (2007).Traction control based on slip ratio estimation without detecting vehicle speed for electric vehicle. In Power conversion conference (pp. 688-693).
- [29] – Yin , D., Oh,S.,&Hori,Y.(2009). A nouvel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56,2086-2094.
- [30] – BoyuanLi, HaipingDu, WeihuaLi<< Fault-tolerant control of electric vehicles with in-wheel motors using actuator-grouping sliding mode controllers>>2015 Elsevier.
- [31] – Reza N. Jazar<< Vehicle Dynamics: Theory and Applications>> Manhattan College Riverdale, NY 10471,2008
- [32] -R.Rajamani, Vehicle Dynamics and Control. New York: Springer-Verlag, 2006.
- [33]- J. Y. Wong, Theory of Ground Vehicles. Hoboken, NJ: Wiley, 2008.
- [34]-Yan Chen and Junmin Wang, Member, IEEE<<Design and Evaluation on Electric Differentials for Overactuated Electric Ground Vehicles With Four Independent In-Wheel Motors>>IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 61, NO. 4, MAY 2012
- [35] K.T.Chau <<Electric Vehicle Machines and Drives Design, Analysis and Application>> International Research Centre for Electric Vehicles The University of Hong Kong,2015
- [36] Purwanto E., Soebagio I., Mauridhi H., (2012),<<Application of vector control method for Developing anfis observer as speed sensor for Induction motor speed control in electric vehicle>>. SAVAP International.
- [37] Benderradji.D (2010), <<Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction >>Thèse de doctorat, université de Batna.
- [38] Mellah.R , Houassine.K <<Neuro-Fuzzy Control of Induction Motor drive for Electric Vehicle>>ICMS'2014 - ETB Blida.
- [39] "Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", Jyh-Shing Roger Jang.
- [40]. livre: "Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue", Pierre Yves Glorennec Département d'Informatique INSA de Rennes / IRISA.