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



Université Mouloud MAMMERRI de TIZI OUZOU

Faculté de Génie Electrique et informatique

Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du

diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Automatique et système

Présenté par :

TAHENNI YACINE

BOUDJEMIL HACENE

Thème

***Commande en vitesse d'un véhicule électrique par mode
glissant***

Membres du jury :

Président : SI AMMOUR

Promoteur : MELLAH RABAH

Examineur: MAIDI AHMMED

professeur UMMTO

professeur UMMTO

professeur UMMTO

Soutenu le 03 /10/2018

Promotion 2017-2018

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



Université Mouloud MAMMERY de TIZI OUZOU

Faculté de Génie Electrique et informatique

Département d'Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du ***diplôme de***

MASTER ACADEMIQUE

Automatique et système

Présenté par :

TAHENNI YACINE

BOUDJEMIL HACENE

Thème

***Commande en vitesse d'un véhicule électrique par mode
glissant***

Membres du jury :

Président : SI AMMOUR professeur UMMTO

Promoteur : MELLAH RABAH professeur UMMTO

Examineur: MAIDI AHMMED professeur UMMTO

Soutenu le 03 /10/2018

Promotion 2017-2018

Remerciements

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.

Je remercie M^rMELLAH Rabah, notre encadreur ainsi que tous les membres du jury.

Je remercie également tous les membres de ma famille et Tout L'ensemble des enseignants du département d'automatique et tous nos collègues de l'université pour leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

*Les deux personnes les plus chères à mon coeur, mon père
et ma mère, qui m'ont apporté soutien et confort tout au
long de mes études.*

Mon frère et Mes sœurs

Tous mes amis sans exception.

*Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant
Toutes mes années d'études.*

Sommaire

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

Chapitre I **Généralités sur le véhicule électrique**

1.1) Introduction.....	4
1.2) les problèmes de l'environnement et gaz à effet de serre	4
1.2.1) Problèmes énergétiques.....	5
1.2.2) Réchauffement climatique.....	5
1.3) Lutte contre l'effet de serre.....	6
1.3.1) Les progrès technologiques.....	6
1.4) L'électrification de la chaîne de traction	6
1.4.1) Véhicules hybrides	7
1.4.2) Véhicule tout électrique	10
1.5) Architecture du véhicule électrique	11
1.5.1) Motorisation de la chaîne de traction	12
1.5.2) Utilisation du moteur à roue	14
1.6) Systèmes de stockage d'énergie électrique	15
1.6.1) Batterie Plomb-acide	15
1.6.2) Batterie Nickel-cadmium.....	15
1.6.3) Batterie Lithium-ion	15
1.7) Convertisseurs électriques	16
1.8) Conclusion	16

Sommaire

Chapitre 2 :	Modélisation de véhicule électrique
2.1) Introduction	18
2.2) Modélisation du véhicule électrique	18
2.3) Mouvement longitudinal	19
2.3.1) dynamique de véhicule.....	19
2.3.2) Modèle intégré de véhicules électriques.....	19
2.4) Mouvement latéral.....	21
2.4.1) Modèle dynamique et cinématique	23
2.5) Les différents modes de tractions	24
2.5.1) : quatre roues motrices.....	25
2.5.2) Roues-avant motrices (ED avant).....	25
2.5.3) traction arrière (ED arrière).....	26
2.6) Conclusion.....	27
Chapitre 3 :	Modélisation et commande du MSAP
3.1 Introduction	29
3.2 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)	29
3.2.1 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	29
3.2.2 Avantages et Inconvénients	30
3.3 Modélisation de la MSAP	31
3.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	31
3.3.2 Les équations de la machine synchrone dans le référentiel (a, b, c)	31
3.3.3 La transformation de Park	32
3.3.3.1 Les équations de la machine synchrone dans le référentiel (d,q)	33

Sommaire

3.3.4 Equations générales d'état	35
3.4 L'autopilotage des Machines Synchrones.....	35
3.5 Modélisation de convertisseur statique	36
3.5.1 Modélisation de l'onduleur de tension	36
3.5.2 Stratégies de commande de l'onduleur	37
3.5.3 Contrôle par modulation de largeurs d'impulsions (MLI)	37
3.5.4 Commande vectorielle	40
3.5.4.1 Découplage	40
3.5.4.2 Découplage par compensation.....	41
3.5.4.3 Description du système global	42
3.5.5 Calcul des régulateurs PI	43
3.5.5.1 Régulation du courant i_q	44
3.5.5.2 Régulation du courant i_d	46
3.5.5.3 Régulation de vitesse.....	47
3.6 Généralités sur PSIM	49
3.6.1 Modules utilisés sur PSIM	50
3.7 Conclusion.....	53

Sommaire

Chapitre 4 : commande d'un véhicule électrique par le mode glissant

4.1 Introduction	55
4.2 Les différentes modes dans le plan de phase	56
4.2.1 Mode de convergence (MC)	56
4.2.2 Mode de glissement (MG).....	56
4.2.3 Mode du régime permanent (MRP).....	56
4.3 La condition d'existence du mode glissant	57
4.4 Différentes structures de contrôle par mode glissant	57
4.4.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	58
4.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état	59
4.4.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la Commande équivalente	60
4.5 Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement	60
4.5.1 Choix de la surface	61
4.5.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant	62
4.5.3 Fonction discrète de commutation	62
4.5.4 Fonction de Lyapunov	62
4.5.5 Détermination de la loi de commande	63
4.5.5.1 Commande équivalente	63

Sommaire

4.5.5.2 Commande discontinue de base	64
4.5.6 Le broutement	65
4.5.6.1 Suppression du phénomène de réticence	66
4.7 Les avantages de la commande par mode glissant	67
4.8 Application de la commande MG à la MSAP	68
4.8.1 Surface de régulation de la vitesse.....	69
4.8.2 Surface de régulation du courant quadrature (I_q).....	70
4.8.3 Surface de régulation du courant (I_d).....	71
4.8.4 Présentation de la simulation	73
4.9 Application de commande MG à la vitesse longitudinale de véhicule.....	76
4.9.1 Présentation de simulation	77
4.10 Conclusion	85
Conclusion générale.....	86

Listes des figures

Chapitre 1 : Généralité sur les véhicules électriques

Figure 1.1 : Véhicule électrique doté d'une batterie rechargeable.....	7
Figure 1.2: Véhicule électrique hybride de type série.....	8
Figure 1.3 : Véhicule électrique hybride de type parallèle.....	9
Figure 1.4 : Voiture tout électrique.....	10
Figure 1.5: Structure de la chaîne de traction.....	11
Figure 1.6: Motorisation multi moteur.....	14

Chapitre 2 : La modélisation du véhicule électrique

Figure 2.1 : Les forces agissant sur un véhicule.....	18
Figure 2.2 : Les forces agissants sur un véhicule.....	19
Figure 2.3 : Modèle de dynamique de véhicule.....	21
Figure 2.4 : Modelé dynamique et cinématique.....	23
Figure 2.5 : Configuration de la conception de modèle quatre roues motrices.....	24
Figure 2.6 : Configuration de l'ED avant.....	25
Figure 2.7 : configuration de ED arrière	26

Chapitre 3 : Commande et modélisation du la MSAP

Figure 3.1 : Schéma de la machine synchrone a aimant permanent.....	30
Figure 3.2: Représentation de la transformer de Park.....	33
Figure 3.3 : Schéma de l'onduleur triphasé.....	36
Figure 3.4 : Schéma équivalent de l'onduleur à MLI.....	38
Figure 3.5: Principe de la commande MLI.....	39
Figure 3.6 : Découplage par compensation.....	42

Listes des figures

Figure 3.7 : Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.....	43
Figure 3.8 : Régulateur PI.....	44
Figure 3.9 : Boucle de régulation du courant i_q	44
Figure 3.10 :Boucle de régulation du courant i_d	46
Figure 3.11 :Boucle de régulation de vitesse.....	47
Figure 3.12 : Représentation du système simulé	49
Figure 3.13 : Schéma globale de moteur synchrone sous PSIM.....	50
Figure 3.14 : la partie commande.....	50
Figure 3.15 : Composants de la partie électrotechnique.....	51
Figure 3.16 : Composants de la MSAP.....	52
Figure 3.17 : Bloc SimCoupler utilisé.....	52
Figure 3.18 : Entrée/sortie pour la liaison entre PSIM/Simulink	53

Chapitre 4 : commande d'un véhicule électrique par le mode glissant

Figure 4.1 : Convergence du système glissant.....	56
Figure 4.2 : Démonstration du mode de glissement.....	57
Figure 4.3 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de Commande.....	58
Figure 4.4 : Structure de régulation par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	59
Figure 4.5 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	60

Listes des figures

Figure 4.6 : Commande équivalente U_{eq}	64
Figure 4.7 : Représentation de la commande discontinue.....	65
Figure 4.8 : Phénomène de broutement.....	66
Figure 4.9: Fonction « SAT».....	66
Figure 4.10: Structure de commande de la vitesse pour la MSAP.....	68
Figure 4.11 :shema de simulation de la MSAP.....	73
Figure 4.12 :shema bloc de regulation.....	74
Figure 4.13 :résultat de simulation (W_m) obtunu avec régulateur MG.....	75
Figure 4.14 : résultat de simulation (W_m) obtunu avec régulateur PI.....	75
Figure 4.15 :shema de simulation de véhicule.....	77
Figure 4.16 : shema bloc de régulation.....	78
Figure 4.17 : résultat de simulation de (V_x) obtunu avec régulateur MG.....	79
Figure 4.18 : résultat de simulation de(V_x) obtunu avec régulateur MG avec Perturbation.....	79
Figure 4.19 :résultat de simulation de (V_x) obtunu avec régulateur MG Avec la valeur du K_{V_x} est plus importante	80
Figure 4.20 : résultat de simulation de (V_x) obtunu avec régulateurPI avc perturbation....	80
Figure 4.21 : résultat de simulation de (Cr) obtunu dans une route sans pente.....	82
Figure 4.22 : résultat de simulation de (Cr) obtunu sur une pente $\alpha = \frac{\pi}{6}$	82
Figure 4.23 : résultat de simulation de (V_x) obtunu sur une pente $\alpha = \frac{\pi}{6}$ En appliquant un régulateur	83
Figure 4.24 : résultat de simulation de (V_x) obtunu sur une pente $\alpha = \frac{\pi}{6}$. En appliquant un régulateur PI.....	84

Nomenclature

Modèle du véhicule électrique

m	Masse du véhicule(Kg)
r	Rayon des pneumatiques(m)
G_{total}	rapport totale de transmission
J_{total}	l'inertie totale de rotation
R_w	rayon de la roue(m)
μ_x	coefficient de résistance au roulement
W_m	vitesse de rotation (rad/s)
g	constante de gravité(m/s ²)
R_s	résistance de l'enroulement de stator (ohm)
P	nombre de pôles
a_1	Distance de CG à l'axe de la roue avant (m)
a_2	Distance de CG à l'axe de la roue arrière (m)
h	hauteur de CG à partir de sol (m)

Modélisation et commande du MSAP

MSAP	Machine synchrone a aimants permanents
[Vs]	Vecteur tension statorique
[Is]	Vecteur courant statorique
[Qs]	Vecteur flux statorique
[Rs]	Matrice résistance du stator
[Ls]	Matrice inductance du stator
[Qsf]	Vecteur flux engendré par l'aimant
θ	: Angle de charge
ω	: Pulsation électrique
Ω_r	: La vitesse de rotor
P	: Nombre de paire de pole
J	: Moment d'inertie
C_{em}	: Couple électromagnétique

Nomenclature

C_r : Couple résistant

$[p(\theta)]$: Matrice de passage (a,b,c) au (d,q)

V_d : Tension statorique sur l'axe d

V_q : Tension statorique sur l'axe q

I_d : Courant statorique sur l'axe d

I_d : Courant statorique sur l'axe q Inductance statorique sur l'axe d

L_d : Inductance statorique sur l'axe d

L_q : Inductance statorique sur l'axe d

f : Coefficient de frottement

Paramètres

$m=1500\text{kg}$ *Masse du véhicule*

$R_w=R_{\text{eff}}=0.43\text{ m}$ *Rayon de la roue*

$\mu_x=0.013$ *coefficient de résistance au roulement*

$J_t=5.209\text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ *L'inertie totale de rotation*

$G_t=8.75$ *Rapport totale de transmission*

$g=9.8\text{ m/s}^2$ *constante de Gravité*

$a_1=l_f=1.4\text{m}$ *Distance de CG à l'axe de la roue avant*

$a_2=l_r=1.4\text{m}$ *Distance de CG à l'axe de la roue arrière*

$h=0.5\text{m}$ *Hauteur de CG à partir de sol*

$L_d=0.00017\text{H}$ *Inductance statorique sur l'axe d*

$L_q=0.00029\text{ H}$ *Inductance statorique sur l'axe d*

$Q_f=0.071\text{Wb}$ *flux*

$P=8$ *Nombre de paire de pole J*

$J_w=J_t\cdot G_t$

$a=a_1+a_2\text{ m}$ *Distance de la roue arrière à la roue avant*

$I_z=2200\text{Kg/m}^2$ *Moment de lacet de l'inertie*

$C_{\alpha f}=45000$ *la rigidité en virage pour les pneus avant*

$C_{\alpha r}=75000$ *la rigidité en virage pour les pneus arrière*

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 [1]. Le véhicule électrique 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 [2].

Aujourd'hui, nous devons faire face à un 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 [3]. 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 [4]. À ce titre, les systèmes de contrôle du véhicule électrique ont fait des avancées significatives ces vingt dernières années. Ils assurent de manière efficace la tenue de route, et principalement la stabilité.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail développé dans ce mémoire qui vise à améliorer la stabilité du véhicule dans différentes contraintes de la route. La recherche bibliographique montre que les stratégies de commande utilisées pour le contrôle des VE sont basées sur des lois de commande classiques [5], [6], [7], qui peuvent s'avérer insuffisants et particulièrement lorsque le véhicule est soumis à des fortes perturbations et à des variables temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commandes assurant la robustesse du comportement du véhicule vis-à-vis des incertitudes sur les perturbations extérieures et leur variations.

Le réglage par mode glissement fait partie de ces méthodes de commandes robustes. Il possède des avantages incontestables pour les systèmes mal identifiés ou à paramètres variables. Cependant, la nature commutante (discontinue) de cette technique peut provoquer l'effet de broutement. Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du véhicule reste insensible aux variations des paramètres, et certaines perturbations. Alors l'objectif principal de ce travail, est l'évaluation par simulation sous Matlab des performances de la commande mode glissant sur un véhicule électrique.

Ce mémoire peut être vu en quatre chapitres :

Le premier chapitre se focalise sur les problèmes de réchauffement climatique dû au gaz à effet de serre, la constitution d'un véhicule électrique, ainsi que l'importance de leurs

systèmes de propulsion. Puis, nous discutons les principaux composants de la chaîne de traction (batterie, motorisation . . .).

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le modèle dynamique de véhicule, et les différents types de résistance, en suite, on fait une analyse des modes longitudinal et latéral de véhicule.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, ainsi que sa stratégie de contrôle (contrôle vectoriel). Enfin nous allons terminer ce chapitre avec des généralités sur le logiciel de simulation psim.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la stratégie de contrôle par mode glissant, ainsi que son application sur la MSAP puis le véhicule électrique.

Les résultats de simulation obtenus avec le mode glissant sont comparés à celle de la commande classique PI.

Chapitre 1

***Généralités sur le
véhicule électrique***

1.1 Introduction :

Depuis plusieurs années, deux phénomènes tendent à faire évoluer le marché de l'automobile d'une part la prise de conscience sur l'environnement, et d'autre part l'augmentation de la consommation et du prix des carburants. C'est pourquoi, un moyen de transport propre indépendant des ressources fossiles et non émetteur de gaz à effet de serre est d'un enjeu mondial [9][10]. Cependant, l'utilisation des sources propres et renouvelables semble apporter une réponse convaincante.

Ce travail entre dans le cadre des véhicules électriques à 100% et s'intéresse à leurs chaînes de tractions ainsi que la commande des moteurs. La chaîne de traction électrique est généralement composée des sources d'énergies (batteries) et des récepteurs (moteur de traction). La gestion d'énergie entre ces deux derniers nécessite l'utilisation des convertisseurs électroniques de puissance pour conditionner le flux d'énergie entre eux.

Ce chapitre est donc constitué de deux parties. La première partie se focalise sur les problèmes de réchauffement climatique dû au gaz à effet de serre et des ressources fossiles limitées, qui imposent une évolution du comportement en termes de transport.

La deuxième partie présente, la constitution d'un véhicule électrique, ainsi que l'importance de leurs systèmes de propulsion. Puis, nous discutons les principaux composants de la chaîne de traction (batterie, motorisation . . .).

1.2 Les problèmes de l'environnement et gaz à effet de serre :

Les problèmes de l'environnement représentent aujourd'hui des enjeux importants que soit pour les gouvernements des pays industrialisés ou pour des grands organismes internationaux. Cependant, le développement industriel de secteur automobile est accompagné par des problèmes. Débutant avec la révolution industrielle, le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère a commencé à s'accroître avec l'utilisation à grande échelle du pétrole comme source principale d'énergie.

Au cours des dernières décennies, le rythme s'est accéléré avec l'industrialisation de nombreux pays et la multiplication des véhicules de transport individuel.

En effet, l'humanité consomme actuellement trente fois plus d'énergie qu'il y a un siècle [11].

Par ailleurs, l'utilisation de carburants d'origine fossile pose deux problèmes majeurs à savoir Prélèvement de ressources non renouvelables et rejet de CO₂ dans l'atmosphère, qui est un gaz à effet de serre. Ces deux problèmes représentent aujourd'hui des enjeux importants que soit pour les gouvernements des pays industrialisés ou pour des grands organismes internationaux. Cependant, le développement industriel et le succès qu'a connu le secteur automobile est accompagné par des problèmes énergétiques et environnementaux [12].

1.2.1 Problèmes énergétiques

Les hydrocarbures (pétrole et gaz) représentent un grade parti de l'approvisionnement mondial en énergie. Le transport domine le bilan énergétique et la majorité des carburants utilisés dans ce secteur sont des combustibles liquides issus du pétrole. Le transport routier, de personnes et de marchandises, affiche une dépendance totale au pétrole et représente 58% de la consommation mondiale. Les experts d'Exxon et de l'Agence Internationale de l'Energie prévoient une augmentation de 70% de la demande en énergie fossile par le secteur des transports routiers d'ici 2040 [13][14].

Par ailleurs le développement économique des pays comme la Chine et l'Inde, entrainera une amélioration du pouvoir d'achat de leurs populations et un accès plus large à l'automobile et aux déplacements en général. Dans ces pays, la demande d'énergie devrait presque doubler et la production mondiale de pétrole devrait passer de 93 à 170.6 millions de barils par jour sur la période allant de 2011 à 2020, [14].

Malgré une demande plus importante, la production du pétrole va finir par baisser à cause de la difficulté à trouver de nouveaux gisements.

1.2.2 Réchauffement climatique

Le 20ème siècle a connu le plus grand réchauffement jamais enregistré depuis au moins un millénaire. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration de CO₂ et des autres gaz dus à l'activité humaine dans l'atmosphère. [14]

1.3 Lutte contre l'effet de serre

Dès les années 70, la question de préserver l'environnement est devenue préoccupante. Les autorités internationales ont commencé à prendre des mesures concrètes afin de réduire les rejets de polluants. Le protocole de Kyoto adopté en 1997 est l'une de ces mesures. Il avait fixé pour objectif la réduction moyenne de 5.2% des émissions de GES des pays industrialisés. Et, bien que tous les secteurs d'activité soient concernés, les émissions dues au transport et à l'automobile en particulier, ont été la cible des mécanismes réglementaires mis en place par les gouvernements [15].

1.3.1 Les progrès technologiques

Pour diminuer l'impact environnemental des transports, et répondre aux pressions réglementaires, les constructeurs automobiles ont effectué des améliorations technologiques de leurs véhicules. Les moteurs à combustion interne (essence et diesel) sont les premiers concernés mais malgré les progrès techniques réalisés sur les voitures pour réduire la consommation d'énergie et les rejets de polluants soient significatifs, ils restent insuffisants, pour satisfaire les exigences d'une société de plus en plus dépendante de la voiture et consciente de l'impact environnemental. [14]

Afin de répondre à ces exigences contradictoires, une avancée vers l'électrification de la chaîne de traction du véhicule, s'avère nécessaire.

1.4 L'électrification de la chaîne de traction :

L'électrification des chaînes de traction consiste : d'une part à incorporer dans les véhicules thermiques traditionnels des composants électriques pour jouer un rôle plus ou moins important dans la traction du véhicule et la récupération d'énergie [2].

On parle dans ce cas des véhicules hybrides, qui réalisent des gains en consommation et en rejets de polluants variables selon le degré d'électrification.

D'autre part, les véhicules électriques utilisent la seule motorisation électrique pour la traction et parcourent des distances dites à zéro émission de CO₂. Nous allons détailler dans la partie ci-dessous le fonctionnement de ces véhicules électrifiés,[10],

1.4.1 Véhicules hybrides :

On introduit la notion de véhicule hybride lorsqu'un véhicule à moteur électrique embarque plusieurs sources d'énergies supplémentaires. L'hybridation est aussi l'association d'un moteur à combustion interne avec une machine électrique associée à un système de stockage. Cette dernière permet de diminuer la consommation d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre [10], On distingue alors deux principaux concepts de véhicule hybride à savoir :

Hybride série

Hybride parallèle.

La batterie d'un véhicule électrique doit être rechargeable, comme le montre ce schéma

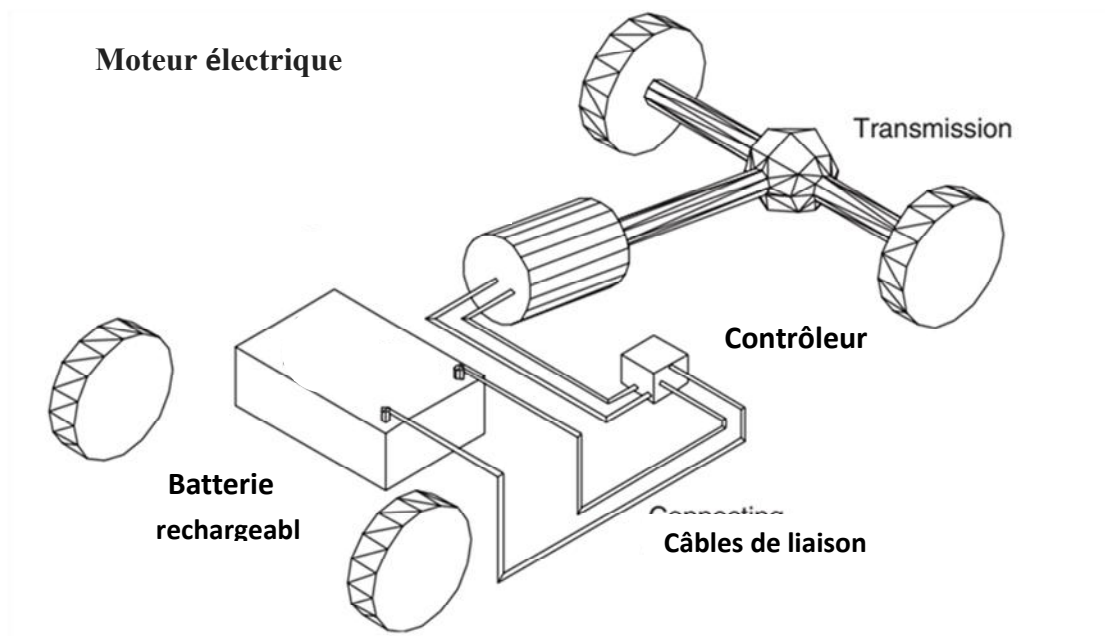


Figure1.1 : Véhicule électrique doté d'une batterie rechargeable.

a - Architecture série :

Dans la solution hybride série présentée à la figure 1.2. La batterie peut fournir un supplément de puissance ponctuel si nécessaire. La gestion des flux d'énergies se fait de manière que le moteur thermique ne subisse pas des changements trop brutaux de régimes. On peut ainsi faire fonctionner le moteur thermique dans la zone à rendement maximum dans son plan couple-vitesse. Par la suite, le moteur thermique consomme mieux et donc pollue moins. [16]:

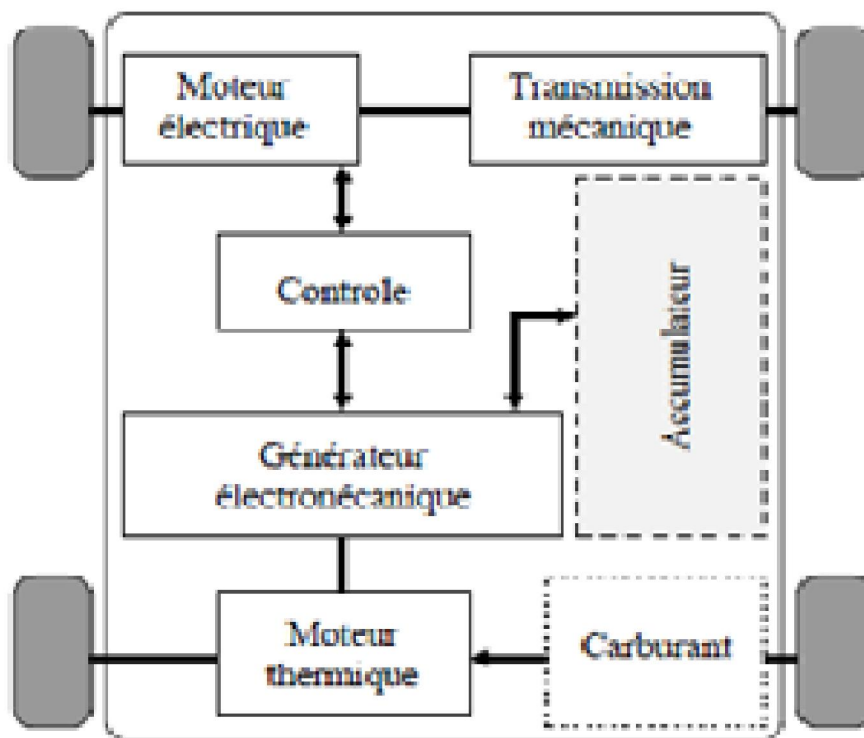


Figure 1.2: Véhicule électrique hybride de type série.

Avantages du VHS : cette configuration offre la possibilité d'une gestion globale de l'énergie présente dans le système (thermique et électrique) [11], [12].

La batterie, largement sous-dimensionnée par rapport au véhicule tout électrique, devient non limitative d'un point de vue énergétique mais aussi permet le mode de fonctionnement électrique à zéro émission.

Inconvénients du VHS : l'inconvénient majeur de cette configuration est l'importance du système de motorisation qui engendre par conséquent l'augmentation de la masse et du coût.

b - Architecture parallèle :

Pour l'hybride parallèle la propulsion peut être électrique, thermique, ou les deux en même temps (voir la figure 1.3). La puissance est entièrement transmise aux roues par une transmission mécanique. [11], [12].

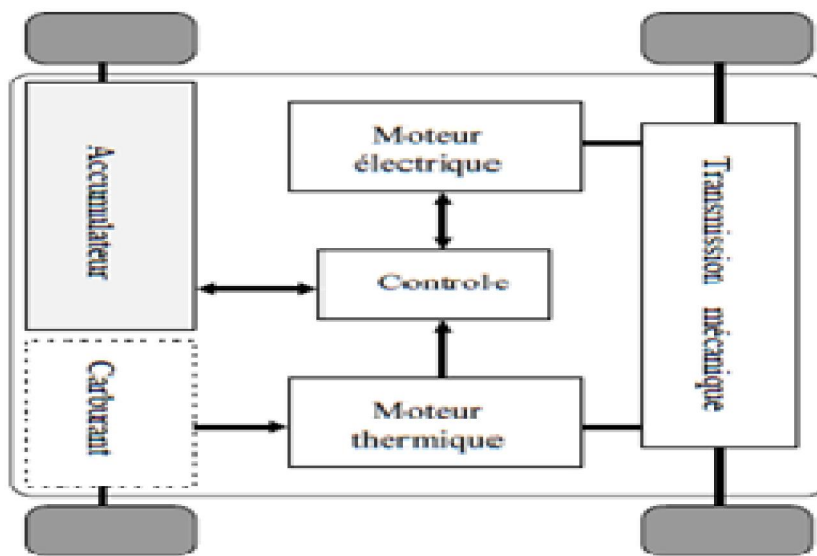


Figure 1.3 : Véhicule électrique hybride de type parallèle.

Avantages du VHP : parmi lesquels on cite ses performances et son autonomie qui sont comparables à celles d'un véhicule thermique mais surtout son taux d'émission zéro en mode électrique.

Inconvénients du VHP : il présente des inconvénients majeurs à savoir d'une part le poids et l'encombrement élevé de son système de motorisation et d'autre part, la redondance de fonctionnalités entre ses deux moteurs [17].

Les constructeurs automobiles ont rapidement réalisé l'utilité de fusionner ces deux configurations dans une architecture combinée, dite hybride série/parallèle. L'idée principale est d'utiliser le véhicule en tout électrique, et ainsi éviter le fonctionnement du moteur thermique dans ses mauvaises zones de rendement. Le moteur thermique est allumé et participe à la traction dans le cas des vitesses élevées (ex. autoroute) ou dans le cas d'une forte demande de puissance (ex. pente).

1.4.2 Véhicule tout électrique :

Un véhicule tout électrique (VTE) est défini comme étant un automobile entraîné par un moteur fonctionnant exclusivement par l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [2]. La solution électrique répond doublement aux exigences de la circulation urbaine, par son absence de pollution gazeuse et de nuisance sonore. Compte tenu des progrès : scientifique et technologique, accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, (les thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées), [18].

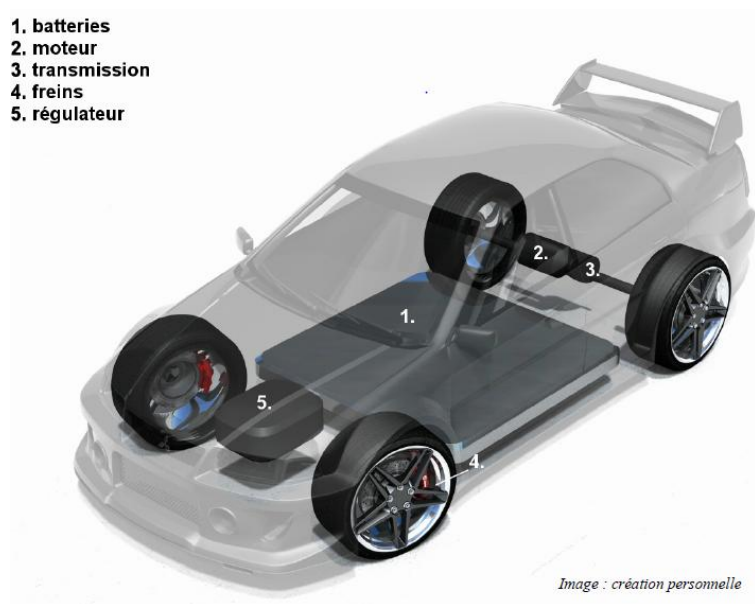


Figure 1.4 : Voiture toute électrique

Inconvénients du VE : parmi les principaux freins à la présence significative des VE dans le Trafic urbain, citons une autonomie limitée, l'absence d'infrastructures de recharge et un coût D'achat élevé. Ainsi, deux inconvénients notables du VE liés à son système de stockage d'énergie, apparaissent : d'une part, une masse trop élevée d'accumulateurs ou une faible autonomie, d'autre part, une longue durée de recharge.

Avantages du VE : absence totale d'émission gazeuse, ce qui rend localement le véhicule très écologique ; pour le faible niveau sonore du véhicule, uniquement provoqué par le roulement de ses roues. [20]..

1.5 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 chaîne de traction 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 1.5) [11] [21].

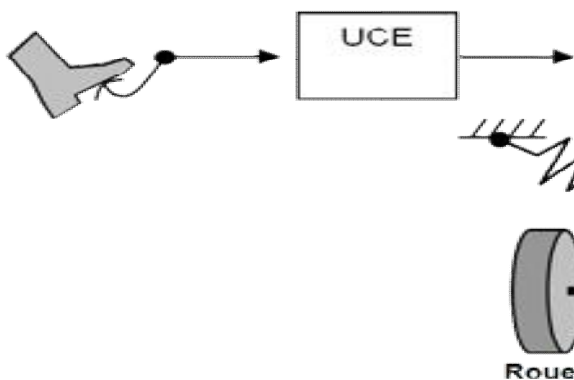


Figure 1.5 Structure de la chaîne de traction

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,

1.5.1 Motorisation de la chaîne de traction :

La motorisation des véhicules a connu l'introduction de l'actionneur électrique sous plusieurs Configurations : moteur à courant continu, moteur synchrone et moteur asynchrone. En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu. Mais l'évolution de l'électronique de puissance conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations à courant alternatif [1], [9].

a - Moteur à courant continu (MCC) :

Parmi les différents types de moteurs à courant continu, c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et un hacheur d'inducteur de plus faible puissance.

b- Moteur asynchrones (MAS) : Le moteur asynchrone est la solution envisagée par de nombreux constructeurs. On peut distinguer deux types : les moteur à bagues et à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est robuste. Il a une puissance massique assez élevée, ce qui conduit à un bon rendement pour la chaîne de traction.

c- Moteur synchrones (MS) : 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 asynchrones.

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 à son rendement.

Le tableau 1.2 présente une comparaison entre les différentes technologies des moteurs électriques.

Notre choix s'est porté sur le moteur synchrone, pour le fait que cette machine est la plus utilisée.

Choix

	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 1.1 Comparaison des différents moteurs

1.5.2 Utilisation du moteur à roue :

La chaîne de traction toute électrique présentée à la figure 1.10 , peut être encore simplifiée en utilisant des moteurs à roue. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de 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 [12], [22] :

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

Dans le premier cas donné par la figure 1.6.b, les moteurs et les roues sont confondus, la transmission est simplifiée. Mais pour réduire au minimum les masses nonsuspendues les moteur-roue doivent avoir une forte puissance massique. A cause de ces contraintes, ces derniers sont relativement Coûteux, limitant ainsi leur utilisation. Dans le deuxième cas représenté par la figure 1.6.a, 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 du moteur, ce qui rend la conduite du véhicule plus facile [1].

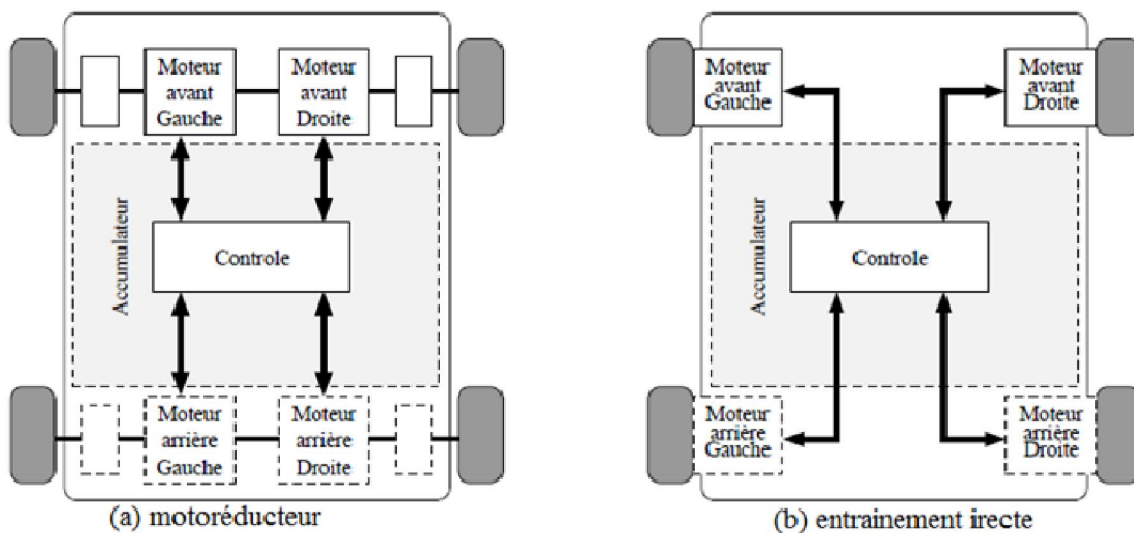


Figure 1.6: Motorisation multi moteur [31]

1.6 Systèmes de stockage d'énergie électrique :

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. On distingue plusieurs types de batteries, mais pour les véhicules électriques actuels on utilise fréquemment, les batteries Lithium-ion, Plomb-Acide et Nickel Cadmium [2].

1.6.1 Batterie Plomb-acide :

est la batterie la plus ancienne et la plus utilisée des accumulateurs électrochimiques. Sa tension par élément est de 2V. Sa version pour automobile, beaucoup plus récente [40]. Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse et la plus facile à recycler [23]. Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable. Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques.

1.6.2 Batterie Nickel-cadmium :

Cette batterie est la plus performante des batteries électrochimiques et la plus largement commercialisée. Sa tension par élément est de 1.2 V. Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd sont très polluantes à cause de sa composante Cadmium [24].[23].

1.6.3 Batterie Lithium-ion :

Actuellement les batteries qui appartiennent à la famille Lithium sont parmi les solutions les plus répandues pour alimenter en électricité de nombreux produits de consommation disponibles sur le marché. Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité.

1.7 Convertisseurs électriques :

L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans un véhicule à la présence d'une source d'énergie électrique qui est une batterie de capacité appropriée à l'autonomie souhaitée du véhicule. Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur de même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques des convertisseurs électriques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement. De ce fait on peut trouver à bord des véhicules [25] :

- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), que l'on appelle redresseurs ;
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC-DC), que l'on appelle hacheurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC), que l'on appelle onduleurs.

Dans un VE équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le moteur de traction, un dispositif de conversion qu'on appelle onduleur.

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présentés, les problèmes de réchauffement climatique dû aux rejets des GES provenant de l'activité humaine. Puis en a fait un aperçu et la présentation de tous les composants du véhicule tout électrique. Les VE semblent être la bonne solution en termes de transport au problème d'émission des GES et de puisement de ressources fossiles. Au deuxième chapitre, nous exposerons le comportement dynamique d'un véhicule électrique et sa modélisation à deux roues motrices.

Chapitre 2

La modélisation du véhicule électrique

2.1 Introduction :

La modélisation est le processus d'élaboration d'un modèle, qui est une représentation de l'architecture et du fonctionnement du système (véhicule). Un des buts de ce modèle est la possibilité de prédire l'effet de changement sur le système. D'une part un modèle devrait être une approximation proche du système réel, et intégrer la plupart de ses caractéristiques notables. D'autre part, il ne devrait pas être trop complexe à fin d'être traitable mathématiquement ou numériquement [27].

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle dynamique de véhicule, et les différents types des forces qui agissent sur système, en suite on fait une analyse du mouvement longitudinal et latéral de véhicule, et nous terminerons par la présentation de différents modes de traction.

2.2 Modélisation du véhicule électrique :

Le modèle dynamique choisi est un modèle simplifié. 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 [27] :

$$F_R = F_{roul} + F_{aéro} + F_{grav} \quad (2.1)$$

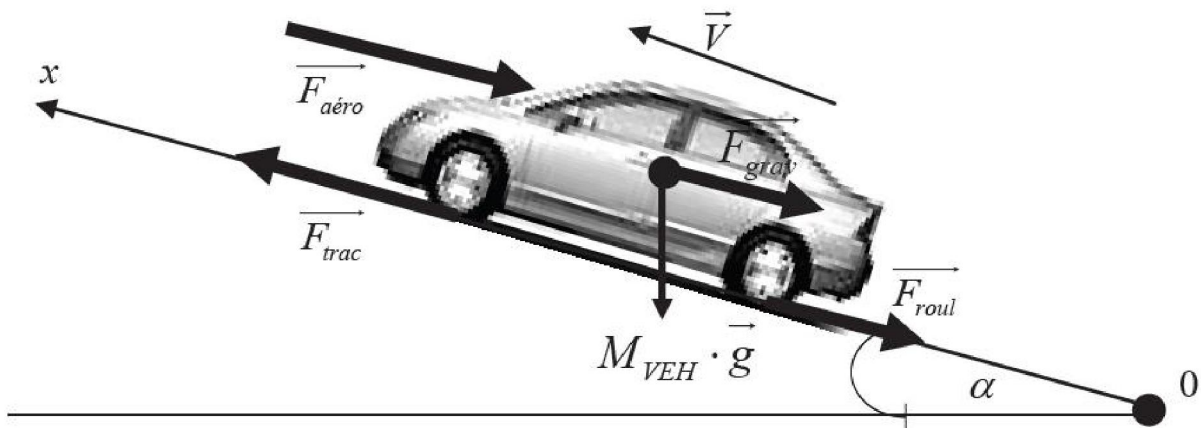


Figure 2.1 : Les forces agissant sur un véhicule

2.3 Mouvement longitudinal :

2.3.1 dynamique de véhicule :

Les différentes forces aux quelles le véhicule en mouvement est soumis sont représentées sur la figure 2.2 [28]

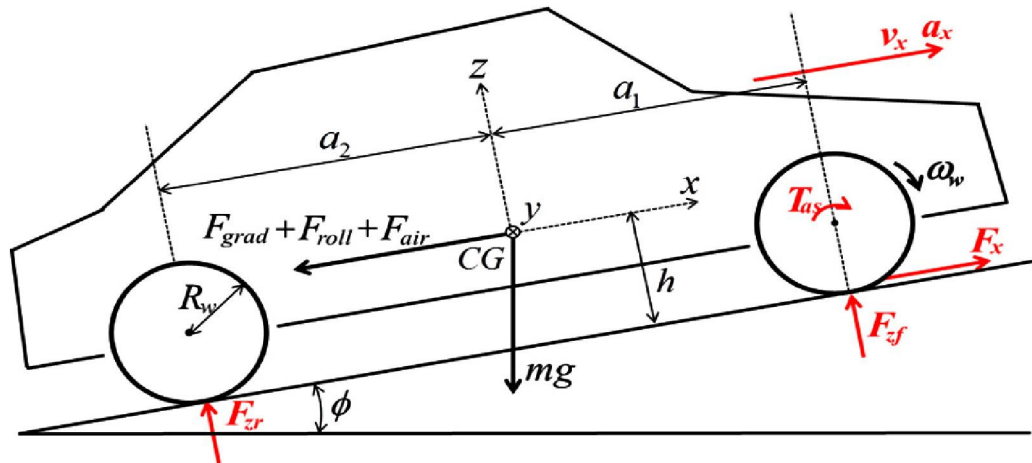


Figure 2.2 :Les forces agissants sur un véhicule

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

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

2.3.2 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 [29][30] :

$$T_{as} = \left(\frac{3PG_{total}\eta_{total}}{4} \right) \left(1 + \left(J_{as} - J_{total}^* \frac{G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [Q_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \right) + \left(\frac{K_{air} R_w (J_{total}^* G_{total} - J_{as}) W_m^2}{G_{total}^2 (m+\Delta m)} \right) + C_{Tas} \quad (2.2)$$

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

$$F_x = \left(\frac{3PG_{total}\eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \left(\frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [Q_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \right) + \left(\frac{J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) W_m^2 C_{Fx} \quad (2.3)$$

Avec :

$$C_{Fx} = mg J_{total} G_{total} (\sin\phi + \mu_x) / R_w^2 (m + \Delta m) \quad (2.4)$$

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

$$F_{zf} = \left(\frac{1}{a_1 + a_2} \right) \left[\left(- \frac{3PG_{total}\eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [Q_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \right] + \left(\frac{J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) W_m^2 - C_{Fx} + C_{Fzf} \quad (2.5)$$

$$F_{zr} = \left(\frac{1}{a_1 + a_2} \right) \left[\left(\frac{3PG_{total}\eta_{total}}{4 R_w} \right) \left(1 - \frac{J_{total} G_{total}}{R_w^2(m+\Delta m)} \right) [Q_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \right] + \left(\frac{J_{total} K_{air}}{G_{total}(m+\Delta m)} \right) W_m^2 + C_{Fx} + C_{Fzr} \quad (2.6)$$

Où

$$\begin{cases} C_{Fzr} = a_2 mg \cos \phi \\ C_{Fzf} = a_1 mg \cos \phi \end{cases} \quad (2.7)$$

La force verticale sur les roues arrière dans (2.6) peut être liée avec la force verticale sur les roues avant en (2.5) comme suit :

$$F_{zr} = F_{zf} + mg \cos \phi \quad (2.8)$$

L'accélération du véhicule A_x dans le sens de traction peut être exprimée comme suite :

$$A_x = \frac{1}{m+\Delta m} \left[\left(\frac{3PG_{total} \eta_{total}}{4 R_w} \right) [Q_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \frac{K_{air} R_w^2}{G_{total}^2} W_m^2 - C_{ax} \right] \quad (2.9)$$

Avec : $C_{ax} = mg(\sin \theta + \mu_x)$ (2.10)

2.4 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 2.3, ce modèle est simplifié en négligeant 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 F_{yf} et F_{yr} qui dépend respectivement des angles de glissement a_f et , a_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_x et de lacet r [30] :

$$\begin{cases} m \left(V_y \dot{}(t) + V_x r(t) \right) = F_{yf}(t) + F_{yr}(t) \\ I_z r \dot{}(t) = l_f F_{yf}(t) - l_r F_{yr}(t) + M_z(t) \end{cases} \quad (2.11)$$

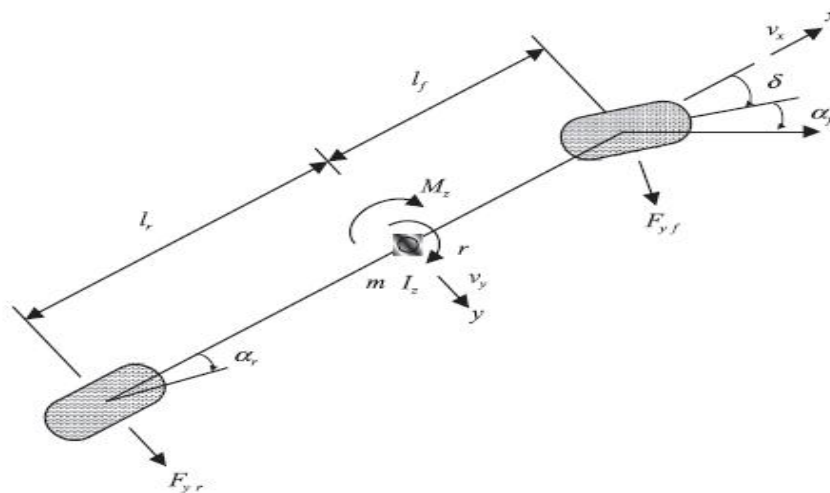


Figure 2.3 :Modèle de dynamique de véhicule

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 [32] :

$$\begin{cases} F_{yf}(t) = -C_{\alpha f} \alpha_f(t) \\ F_{yr}(t) = -C_{\alpha r} \alpha_r(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

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]:

$$\begin{cases} \alpha_f(t) = \frac{v_y(t)}{v_x} + \frac{l_f}{v_x} r(t) - \delta(t) \\ \alpha_r(t) = \frac{v_y(t)}{v_x} - \frac{l_r}{v_x} r(t) \end{cases} \quad (2.13)$$

Substituer (2.12) et (2.13) dans, équation (2.11) est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{1}{m} \left(-\frac{a_1}{v_x} C_{\alpha f} + \frac{a_2}{v_x} C_{\alpha r} \right) r - \frac{1}{m} (C_{\alpha f} + C_{\alpha r}) \beta + \frac{1}{m} C_{\alpha f} \delta - r v_x \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \left(-\frac{a_1^2}{v_x} C_{\alpha f} + \frac{a_2^2}{v_x} C_{\alpha r} \right) r - \frac{1}{I_z} (a_1 C_{\alpha f} - a_2 C_{\alpha r}) \beta + \frac{1}{I_z} a_1 C_{\alpha f} \delta \end{cases} \quad (2.14)$$

2.4.1 Modèle dynamique et cinématique

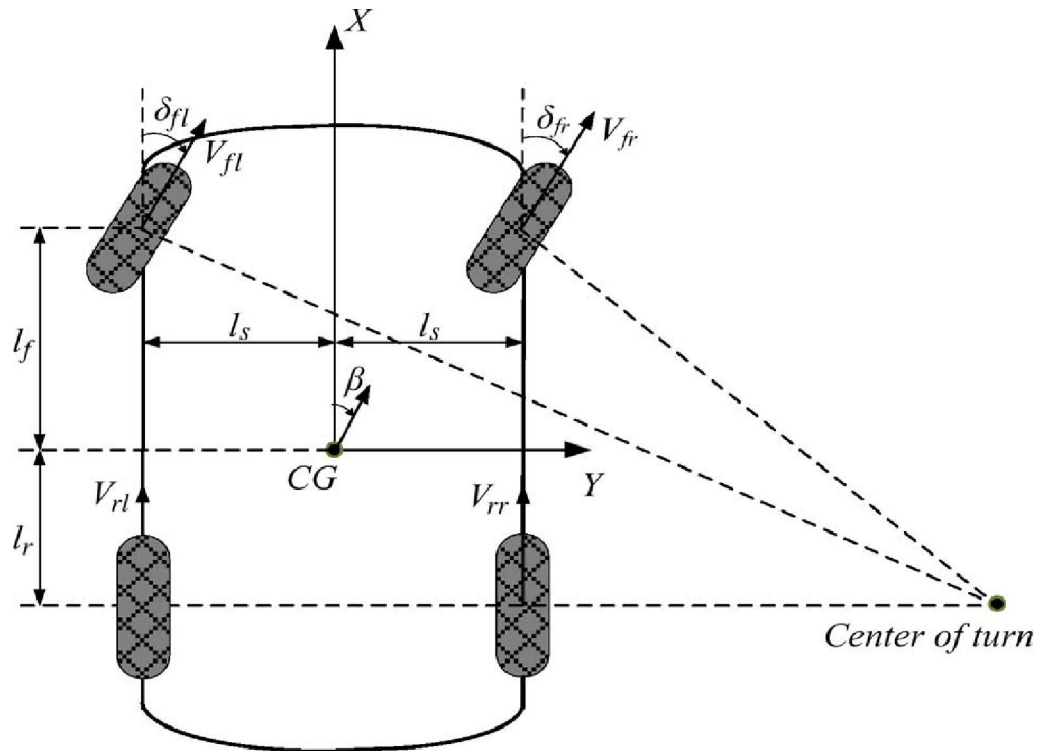


Figure 2.4 : Modelé dynamique et cinématique

Comme montré dans la figure 2.4, 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 2.4, les vitesses des quatre roues sont décrites comme suit [33] [34] :

$$\begin{cases} V_{fl} = (V_x + rl_s)\cos\delta_{fl} + (V_y + rl_f)\sin\delta_{fl} \\ V_{fr} = (V_x - rl_s)\cos\delta_{fr} + (V_y + rl_f)\sin\delta_{fr} \\ V_{rl} = V_x + rl_s \\ V_{rr} = V_x - rl_s \end{cases} \quad (2.15)$$

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 [33] [34] :

$$\begin{cases} \omega_{fl} = \frac{v_{fL}}{R_{eff}} \\ \omega_{fr} = \frac{v_{fr}}{R_{eff}} \\ \omega_{rl} = \frac{v_{rl}}{R_{eff}} \\ \omega_{rr} = \frac{v_{rr}}{R_{eff}} \end{cases} \quad (2.16)$$

2.5 : 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 [35].

2.5.1 : quatre roues motrices

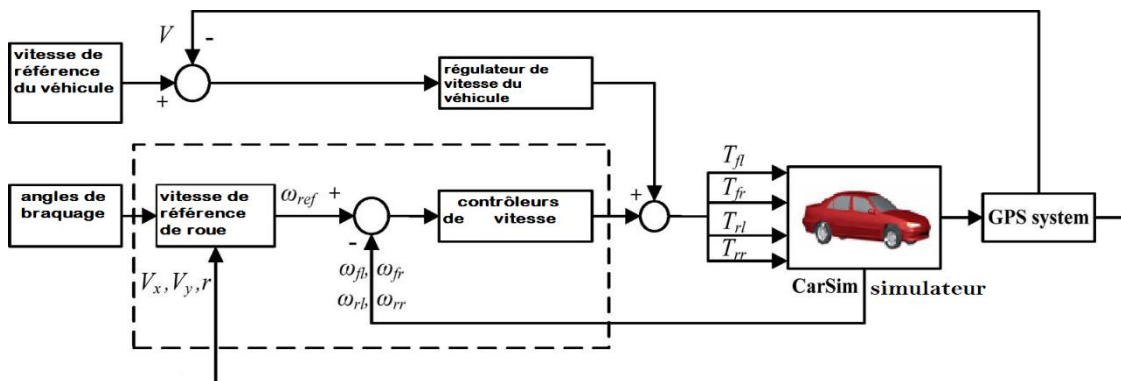


Figure 2.5 : Configuration de la conception de modèle quatre roues motrices.

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 2.5, 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 [35].

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 (2.15) et (2.16).

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 [35].

2.5.2 Roues-avant motrices (ED avant)

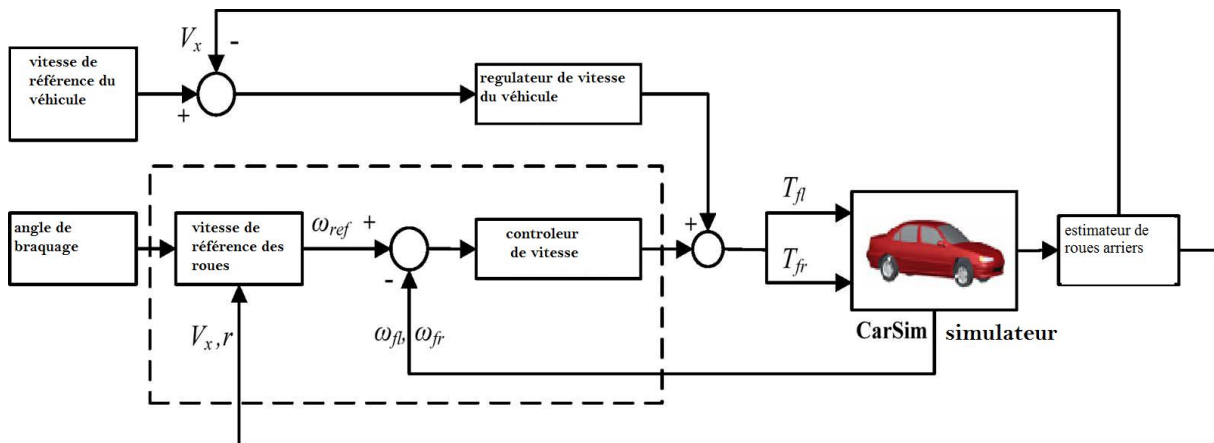


Figure 2.6 : Configuration de l'ED avant

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 (2.15) et (2.16) sont combinées pour déduire les relations (2.17) et (2.18) 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 [35] :

$$\begin{cases} \omega_{fl} = \frac{\cos \delta_{fl}}{R_{eff}} V_x + \frac{(l_f \sin \delta_{fl} + l_s \cos \delta_{fl})}{R_{eff}} r \\ \omega_{fr} = \frac{\cos \delta_{fr}}{R_{eff}} V_x + \frac{(l_f \sin \delta_{fr} + l_s \cos \delta_{fr})}{R_{eff}} r \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} \omega_{rl} = \frac{1}{R_{eff}} V_x + \frac{l_s}{R_{eff}} r \\ \omega_{rr} = \frac{1}{R_{eff}} V_x - \frac{l_s}{R_{eff}} r \end{cases} \quad (2.18)$$

Comme indiqué en (2.17) et (2.18), 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 (2.18)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{eff}}{2} & \frac{R_{eff}}{2} \\ \frac{R_{eff}}{2l_s} & -\frac{R_{eff}}{2l_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rl} \\ \omega_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Différent de la configuration de l'ED quatre roues montrée dans la Figure (2.5), 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 [35].

2.5.3 traction arrière (ED arrière)

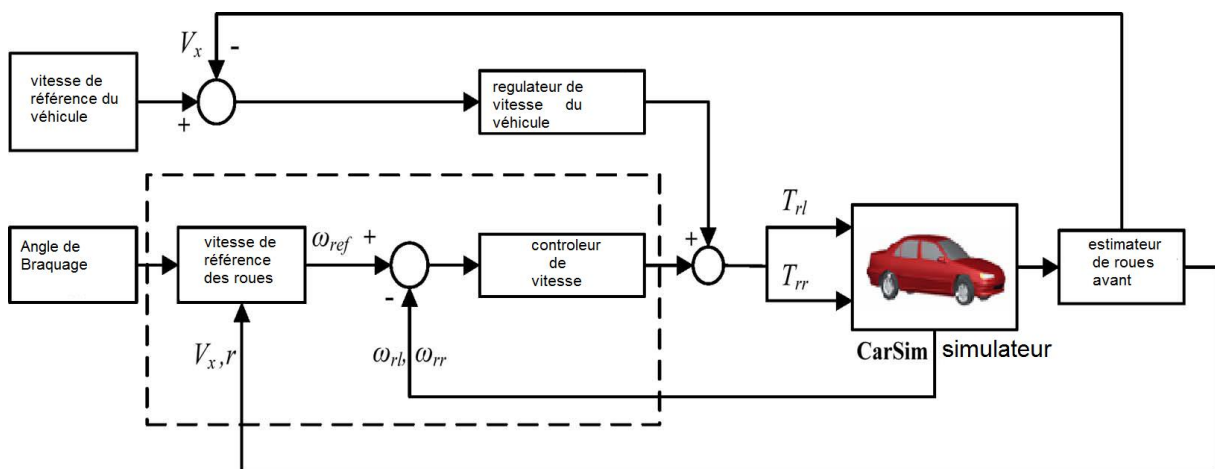


Figure 2.7 : configuration de ED arrière

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 (2.17)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(ls \cos \delta - lf \sin \delta) R_{eff}}{2ls(\cos \delta)^2} & \frac{(ls \cos \delta + lf \sin \delta) R_{eff}}{2ls(\cos \delta)^2} \\ \frac{R_{eff}}{2ls \cos \delta} & -\frac{R_{eff}}{2ls \cos \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{rl} \\ \omega_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Différent de la configuration appropriée à ED quatre-roues et l'ED avant, représentés sur les figures 2.5 et 2.6, 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 [35].

2.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation du comportement d'un véhicule électrique à deux roues motrices.

Le choix de modèle a été réalisé en fonction de l'utilisation envisagée. Le modèle simplifié obtenu sera utilisé pour la synthèse des lois de commandes.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons la modélisation de système de propulsion. Nous nous attardons en particulier sur la commande vectorielle à flux rotorique en utilisant le régulateur PI classique.

Chapitre 3

***Modélisation et
commande du la
MSAP***

3.1 Introduction :

Les machines électriques équipent la majeure partie des systèmes d'entraînement industriels. Les applications vont de la robotique (servomoteurs) jusqu'au domaine des transports.

La machine à courant continu est restée longtemps l'actionneur le plus utilisé pour réaliser ces systèmes. Cette machine présente l'avantage d'être simple à commander le couple étant directement proportionnel au courant d'induit. Mais elle présente des inconvénients liés à sa structure. La présence du système balais-collecteur nécessite un entretien constant et limitation de la vitesse de rotation.

Le développement des semi-conducteurs de puissance a permis de réaliser des onduleurs de tension ou de courant, ouvrant la voie de la vitesse variable aux machines alternatives (synchrone et asynchrone). Et les machines synchrones à aimants permanents possèdent de nombreux avantages par rapport aux autres machines dû à leurs excellentes caractéristiques dynamiques, à ses faibles pertes ainsi qu'à son important couple massique, qui le rend mieux adapté aux applications industrielles et faciliter de commandes en position ou en vitesse.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle simple et fiable pour la simulation numérique.

3.2 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) :

3.2.1 Principe de fonctionnement de la MSAP :

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [36].

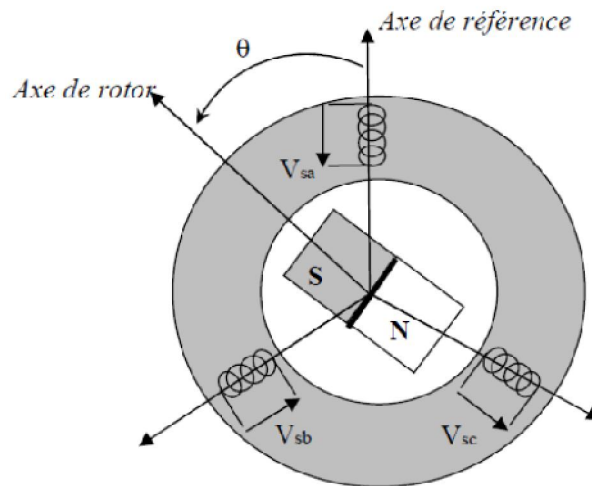


Figure 3.1 Schéma de la machine synchrone à aimant permanent

Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [37].

Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [38].

3.2.2 Avantages et Inconvénients :

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- Puissances massiques élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Un bon rendement.
- Absence des balais et d'alimentation continue.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Fonctionnement en survitesse.

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

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Ondulations de couple

3.3 Modélisation de la MSAP :

La modélisation d'une MSAP est identique à celle d'un moteur synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu placée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant.

3.3.1 Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle mathématique nous nous imposons quelques hypothèses :

- ❖ Les enroulements statoriques sont le plus souvent connectés en étoile à neutre isolé.
- ❖ On néglige la saturation de circuit magnétique.
- ❖ On néglige les courants de Foucault et le phénomène d'hystérésis.
- ❖ On suppose les FEM à répartition sinusoïdale.

3.3.2 Les équations de la machine synchrone dans le référentiel (a, b, c) :

La modélisation d'une MSAP comprend trois types d'équations : électrique, mécanique et électromagnétique [39]

a) Equations électriques :

Les équations triphasées des tensions et des flux statoriques sont écrit respectivement comme suit :

$$\diamond \quad V_s = R_s \cdot I_s + \frac{dQ_s}{dt} \quad (3.1)$$

$$\diamond \quad Q_s = L_s \cdot I_s + Q_{sf} \quad (3.2)$$

Avec :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad I_s = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad Q_s = \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix}$$

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad L_s = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

$$Q_{sf} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

V_s : Vecteur tension

I_s : Vecteur courant statorique

Q_s : Vecteur flux statorique

L_s : Matrice inductance du stator

R_s : Matrice résistance du stator

Q_{sf} : Vecteur flux engendré par l'aimant

- ♦ Position de rotor défini par :

$$\theta(t) = \int_0^t W(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

- ♦ Pulsation électrique :

$$W = P \cdot \Omega_r \quad (3.5)$$

Ω_r : La vitesse de rotor.

p : Nombre de paire de pôle.

b) Equations mécanique :

On appliquant la 2ème loi de Newton donne l'équation de mouvement:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (c_{em} - c_r - f\Omega_r) \quad (3.6)$$

J : Moment d'inertie

c_{em} : *Couple* électromagnétique

c_r : Couple résistant

f : Coefficient de frottement

c) Equation électromagnétique :

L'équation de couple électromagnétique est donnée sur la forme suivant :

$$C_{em} = [I_s] \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{d[L_s]}{d\theta} [I_s] + \frac{1}{2} \frac{d[Q_{sf}]}{d\theta} \right] \quad (3.7)$$

3.3.3 La transformation de Park :

Le modèle d'un moteur synchrone dans le référentiel (a, b, c) est très complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est d'éliminer complexité et réduisant l'ordre de système.

Cette transformation est un outil mathématique consiste de passer de système triphasé (a,b,c) en un système diphasé (d,q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor, l'aimant se situe sur l'axe direct(d), l'angle θ entre les deux repères est appelé angle Park.[27]

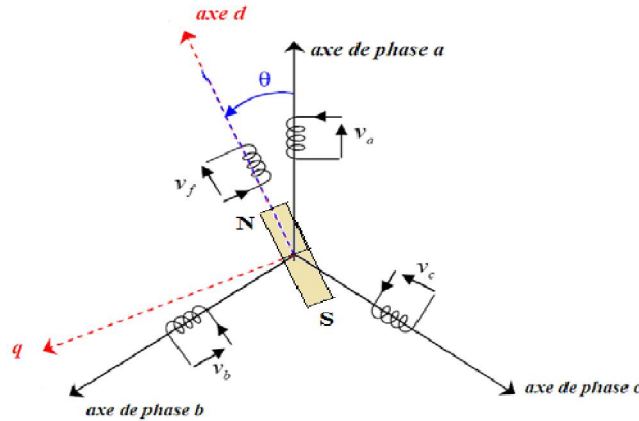


Figure3.2: Représentation de la transformer de Park

La transformation de Park est définie par :

$$[Vdq] = [P(\theta)] * [Vabc] \tag{3.8}$$

$$[Vabc] = [P(\theta)]^{-1} * [Vdq]$$

Avec $[P(\theta)]^{-1}$ et $[P(\theta)]$ est la matrice du transformation de Park et Park inverse :

$$[p(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

3.3.3.1 Les équations de la machine synchrone dans le référentiel (d,q) :

a) les équations électriques:

Le modèle de Park de la machine synchrone à aimants permanents est défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} Vd = Rs.Id + Ld \frac{di_d}{dt} - w.Lq.Iq \\ Vq = Rs.Iq + Lq \frac{di_q}{dt} + w(L_d.I_d + Qf) \end{cases} \tag{3.11}$$

Vd : Tension statorique sur l'axe d

Vq : Tension statorique sur l'axe q

Id : Courant statorique sur l'axe d

Iq : Courant statorique sur l'axe q

Ld : Inductance statorique sur l'axe d

Lq : Inductance statorique sur l'axe q

b) Equations mécanique :

L'équation de mouvement reste toujours la même :

$$\frac{d\Omega r}{dt} = \frac{1}{j} (cem - cr - f\Omega r) \quad (3.12)$$

c) Equation électromagnétique :

La puissance instantanée absorbée par la machine dans le système équilibré représenté par l'expression suivante :

$$Pa = V_a \cdot I_a + V_b \cdot I_b + V_c \cdot I_c \quad (3.13)$$

Dans le plan de Park cette puissance s'écrit :

$$P_e = (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3.14)$$

On remplaçant V_d et V_q par leur expression , on obtient :

$$P_e = \left[(R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - p\Omega L_q I_q) I_d + (R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + p\omega L_d I_d + p\Omega Q_f) I_q \right] \quad (3.15)$$

$$P_e = \left[p\Omega ((L_d - L_q) I_d I_q + Q_f I_q) + R_s (I_d^2 + I_q^2) (L_d I_d \frac{dI_d}{dt} + L_q I_q \frac{dI_q}{dt}) I_d \right] \quad (3.16)$$

Cette puissance est composée de :

- ♦ Les pertes de joule :

$$P_j = R_s (I_d^2 + I_q^2)$$

- ♦ La variation d'énergie magnétique emmagasinée :

$$E_{me} = (L_d I_d \frac{dI_d}{dt} + L_q I_q \frac{dI_q}{dt})$$

♦ Puissance électromagnétique :

$$P_{em} = p\Omega [(L_d - L_q)I_d I_q + Q_f I_q]$$

Alors le couple généré par le moteur est donné comme suit :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad C_{em} = p [(L_d - L_q)I_d I_q + Q_f I_q] \quad (3.17)$$

3.3.4 Equations générales d'état :

En développant le système d'équations (3.11) on peut déduire la forme finale des équations du MSAP dans le référentiel (d-q).

Selon l'expression (3.12) et (3.17), on aboutit à la représentation sous la forme d'équation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{\omega L_q}{L_d} I_q \\ -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{\omega L_d}{L_q} I_d - \frac{\omega Q_f}{L_q} \\ \frac{pQ_f}{j} I_q - \frac{p(L_q - L_d)}{j} I_d I_q - \frac{f}{j} \Omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ Cr \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.4 L'autopilotage des Machines Synchrones

La fréquence des courants au stator est asservie à la rotation du rotor de manière à maintenir le synchronisme entre le champ créé par les courants du stator et le moment magnétique du rotor.

A l'arrêt du rotor le champ statorique est immobile, c'est le principe de l'autopilotage. Un moteur synchrone fonctionnant en mode non autopiloté est fortement instable.

L'autopilotage d'une machine synchrone consiste à maintenir constant ou peu variable le décalage angulaire entre les FEM (forces électromotrices) de celle-ci et les courants statoriques.

Avec cette condition le couple électromagnétique développé par la machine peut être contrôlé et une boucle d'asservissement de position ou de vitesse peut être réalisée autour de la boucle de commande du couple de la machine.

Pour réaliser cette tâche, le synchronisme de la machine doit être contrôlé par un capteur de position lié au rotor. Cela permet d'imposer le courant ou la tension qu'il faut afin d'assurer le contrôle du couple de la machine.

3.5 Modélisation de convertisseur statique :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif, alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie alors ils permettent d'imposer aux bornes de la machine des tensions et courant alternatifs d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. [25]

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- *onduleurs de tension.
- * onduleurs de courant

3.5.1 Modélisation de l'onduleur de tension :

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras il y a donc deux états indépendants.

La figure suivante montre le schéma d'un onduleur triphasé avec sa charge :

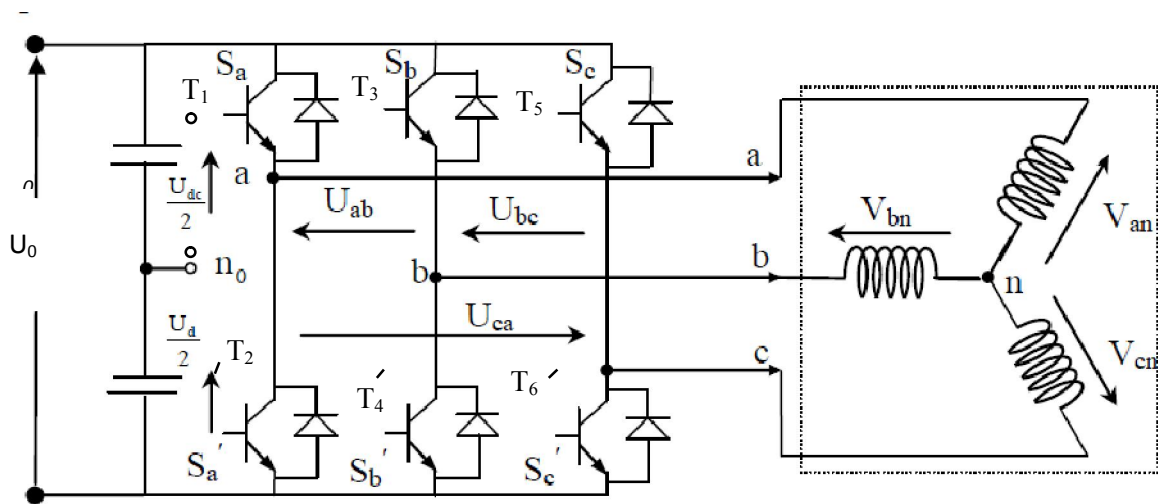


Figure 3.3 : Schéma de l'onduleur triphasé

Les tensions délivrées par l'onduleur sont données comme suit:

$$\begin{cases} U_{ab} = v_{an} - v_{bn} = U_0 (S_a - S_b) \\ U_{bc} = v_{bn} - v_{cn} = U_0 (S_b - S_c) \\ U_{ca} = v_{cn} - v_{an} = U_0 (S_c - S_a) \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\text{On a:} \quad V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.20)$$

de (3.19) et (3.20) :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{U_0}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = \frac{U_0}{3} (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cn} = \frac{U_0}{3} (2S_c - S_a - S_b) \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Il reste à déterminer les fonctions « Si », celles-ci dépendent de la stratégie de commande de l'onduleur.

3.5.2 Stratégies de commande de l'onduleur :

Afin de découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir à la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur. Cette dernière a une très grande importance, car c'est elle qui détermine le type de la tension de sortie.

3.5.3 Contrôle par modulation de largeurs d'impulsions (MLI) :

La technique de modulation de largeur d'impulsions permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

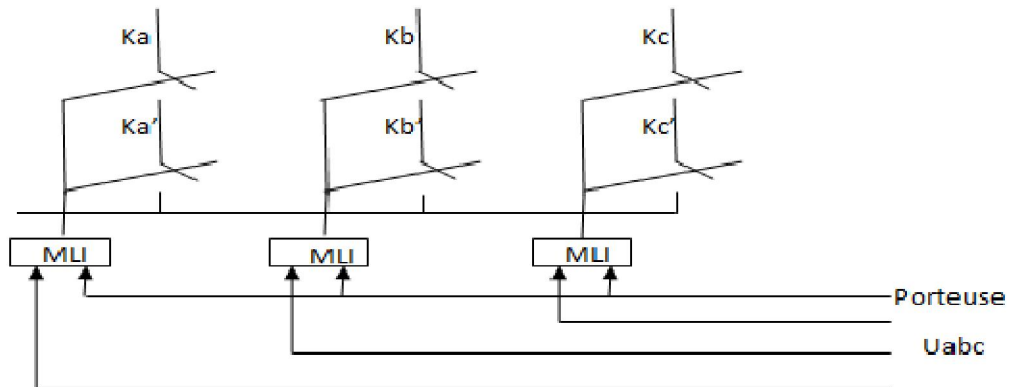


Figure3.4 : Schéma équivalent de l'onduleur à MLI

Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les rapports cycliques. Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples :

- * Les modulations sinus-triangle : effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse en général triangulaire, pour notre travail on utilise cette méthode.
- * MLI vectorielles : dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

Modulation naturelle (sinus -triangle) .

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- 1- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- 2- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- 3- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs des Sorties de l'onduleur.

Telle que lorsque le signal de référence est au-dessus du signal de la porteuse, l'impulsion de sortie est 1, et lorsqu'il est au-dessous de la porteuse, l'impulsion de sortie est égale à 0.

Deux paramètres caractérisent cette commande :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad ; \quad r = \frac{V_r}{V_p}$$

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence.

r: Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante v_r à la valeur crête v_p de la porteuse.

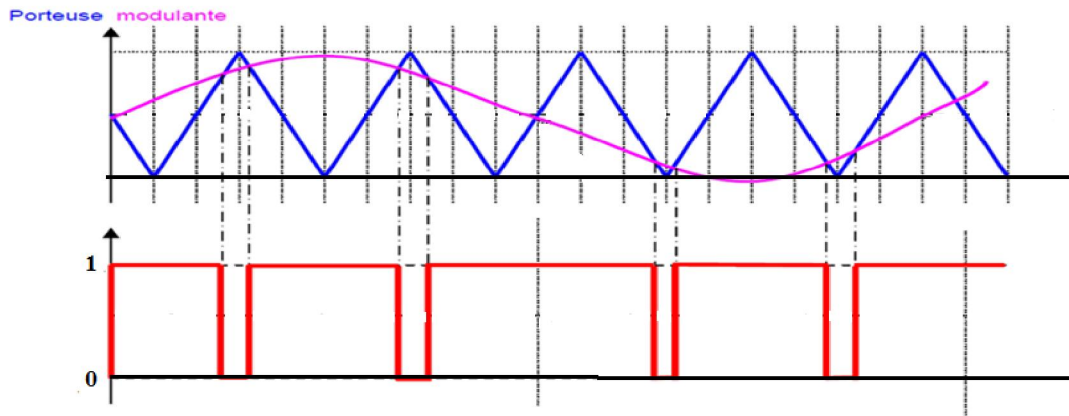


Figure 3.5: Principe de la commande MLI

Les différents états possibles sont donnés par le tableau suivant :

<i>Etats</i>	<i>Transistors fermes</i>	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0	T_2, T_4, T_6	0	0	0
1	T_1, T_4, T_6	$\frac{2}{3} U_0$	$\frac{-1}{3} U_0$	$\frac{-1}{3} U_0$
2	T_1, T_3, T_6	$\frac{1}{3} U_0$	$\frac{1}{3} U_0$	$\frac{-2}{3} U_0$
3	T_2, T_3, T_6	$\frac{-1}{3} U_0$	$\frac{2}{3} U_0$	$\frac{-1}{3} U_0$
4	T_2, T_3, T_5	$\frac{-2}{3} U_0$	$\frac{1}{3} U_0$	$\frac{1}{3} U_0$
5	T_2, T_4, T_5	$\frac{-1}{3} U_0$	$\frac{-1}{3} U_0$	$\frac{2}{3} U_0$
6	T_1, T_4, T_5	$\frac{1}{3} U_0$	$\frac{-2}{3} U_0$	$\frac{1}{3} U_0$
7	T_1, T_3, T_5	0	0	0

3.5.4 Commande vectorielle :

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique. [41][42].

L'équation (3.17), donnant le couple, montre que celui-ci dépend de deux variables, I_d, I_q

$$C_{em} = p [(L_d - L_q)I_d I_q + Q_f I_q] \quad (4.1)$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante i_d nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = p Q_f I_q \quad (4.2)$$

Comme le flux Q_f est constant, le couple est directement proportionnel à I_q .

Donc :

$$C_{em} = K_t I_q \quad (4.3)$$

$$k_t = p Q_f \quad (4.4)$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle du couple de la machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi.

3.5.4.1 Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants i_d, i_q ne sont pas indépendants l'un de l'autre :

$$\begin{cases} V_d = (R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt}) - \omega L_q I_q \\ V_q = (R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt}) + \omega (L_d I_d + Q_f) \end{cases} \quad (4.5)$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [40]. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

3.5.4.2 Découplage par compensation

La compensation donc, à pour but de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d , e_q . Représenté dans la Figure (3.6) telle que:[43]

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} - e_q \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \\ V_{q1} = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (4.7)$$

ET :

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q I_q \\ e_q = \omega (L_d I_d + Q_f) \end{cases} \quad (4.8)$$

On a donc les courants i_d et i_q sont découplés. Le courant i_d ne dépend que de V_{d1} et i_q ne dépend que V_{q1} , à partir de l'équation (4.7) les courant i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante:

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + pL_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + pL_q} \end{cases} \quad (4.9)$$

p : Opérateur de Laplace.

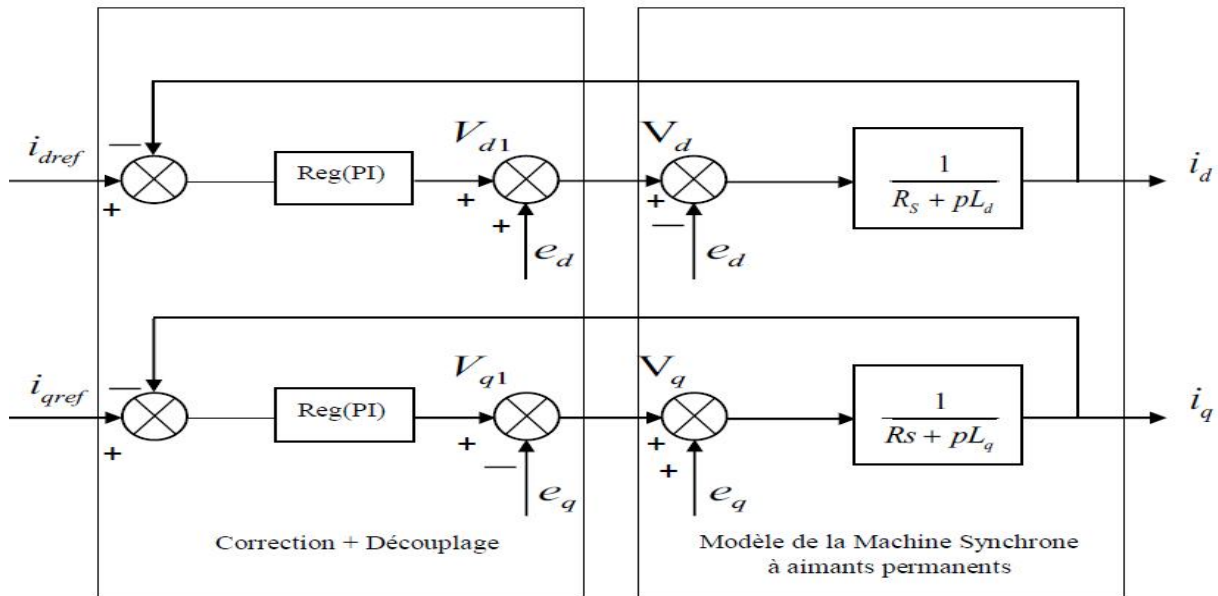


Figure 3.6 : Découplage par compensation

3.5.4.3 Description du système global :

La machine étant découplée selon deux axes (d , q) , la régulation sur l'axe d est faite par une seule boucle, tandis que la régulation sur l'axe q est faite par deux boucles en cascades l'une interne pour réguler le courant et l'autre externe pour réguler la vitesse.

La vitesse est régulée à travers la boucle externe, la sortie de son régulateur est permet de générer le courant de référence I_{qref} qui est comparé à la valeur du courant I_q issue de la mesure des courants réels et leur erreur appliqué à l'entrée du régulateur du courant I_q . En parallèle avec cette boucle, on trouve une boucle de régulation du courant I_d qui est maintenu à zéro.

Les sorties des régulateurs de courant I_d et I_q sont appliquées à un bloc de découplage qui permet de générer les tensions de référence V_{dref} , V_{qref} et par passage du repère (d ,q) au repère (a,b,c) qui nous donne les deux tensions de référence V_a , V_b , V_c de la commande MLI de l'onduleur de tension .

La Figure (3.7) représente le schéma global de la commande vectorielle en vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d ,q).

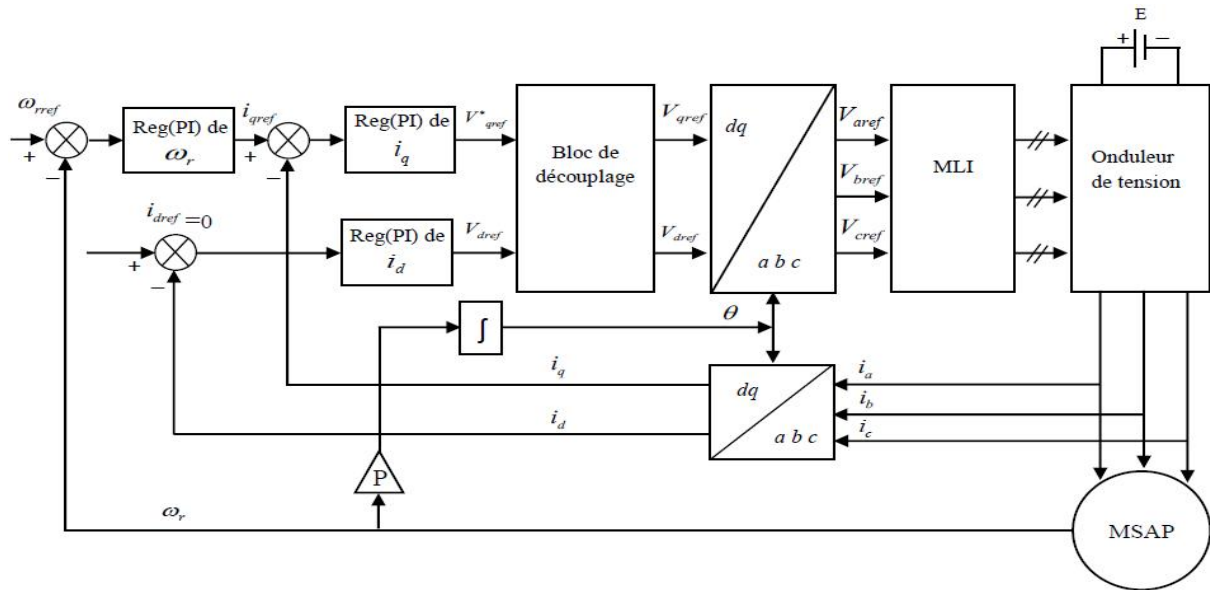


Figure 3.7 : Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP.

3.5.5 Calcul des régulateurs PI :

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale a la grandeur de référence impose malgré la présence des perturbations internes ou externes.

Lorsque le découplage entre l'axe d et l'axe q est réalisé, la régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type proportionnel – intégral (PI). L'action intégrale a pour effet de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée. L'action proportionnelle permet le réglage de la rapidité du système.

Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, figure (3.8).

La relation entre la sortie et le signal d'erreur est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{U}_r(\mathbf{t}) = k_p \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{t}) + k_i \int_0^t \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{t}) . dt \tag{4.10}$$

C'est à dire :

$$\frac{U_r(p)}{\varepsilon(p)} = k_p(t) + \frac{k_i}{p} \tag{4.11}$$

On :

k_p : Gain proportionnel.

k_i : : Gain intégral.

Le régulateur PI est donné par la figure suivante :

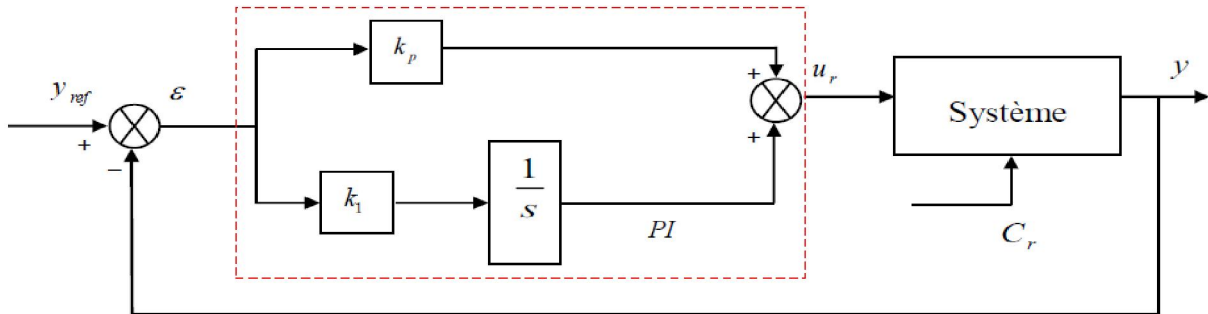


Figure 3.8 : Régulateur PI

La fonction de transfert sera :

$$U_r = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \varepsilon \tag{4.12}$$

On peut aussi écrire le régulateur sous la forme suivante :

$$PI \Rightarrow \frac{U_r}{\varepsilon} = \frac{1+sT_1}{sT_2} \tag{4.13}$$

Avec
$$\begin{cases} k_p = \frac{T_1}{T_2} \\ k_i = \frac{1}{T_2} \end{cases} \tag{4.14}$$

3.5.5.1 Régulation du courant i_q

Selon l'équation (4.9) et (4.13), on aboutit au schéma de la Figure (4.5).

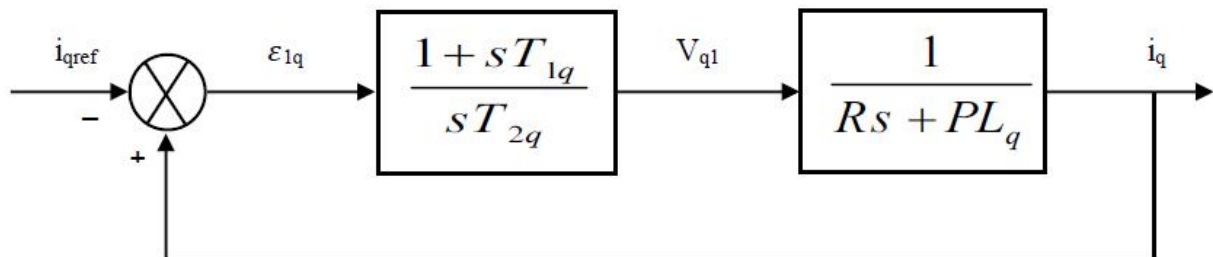


Figure 3.9 : Boucle de régulation du courant i_q .

La fonction de Transfer en boucle ouvert (FTBO) de la Figure (4.5) est

$$FTBO = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s+sL_q)} = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}R_s\left(1+s\frac{L_q}{R_s}\right)} \quad (4.15)$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$1 + sT_{1q} = 1 + s\frac{L_q}{R_s} \quad (4.16)$$

Ce qui se traduit par la condition :

$$T_{1q} = \frac{L_q}{R_s} \quad (4.17)$$

Avec :

$$\tau_q = \frac{L_q}{R_s} \quad \text{Constante de temps électrique de l'axe q.}$$

Après compensation l'équation (3.15), se réduit à

$$FTBO = \frac{1}{sR_sT_{2q}} \quad (4.18)$$

La fonction de Transfer en boucle fermé (FTBF) est donnée par

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FTBO} \quad (4.19)$$

$$FTBF = \frac{1}{1+sR_sT_{2q}} \quad (4.20)$$

L'équation (4.20) peut être imposée de la forme $\frac{1}{1+s\tau_q}$ par identifications on trouve :

$$\tau_q = R_sT_{2q} \quad \Rightarrow \quad T_{2q} = \frac{\tau_q}{R_s} \quad (4.21)$$

En imposant le temps de réponse :

$$Tr = 3\tau_q \quad (\text{critere de 5\%}) \quad (4.22)$$

Donc :

$$T_{2q} = \frac{Tr}{3R_s} \quad (4.23)$$

T_r : Temps de réponse imposé.

En remplace l'équation (4.21) dans (4.14), On obtient $\frac{3L_q}{T_r} \frac{3R_s}{T_r}$

$$K_{iq} = \frac{R_s}{\tau_q} \quad (4.24)$$

Si on remplace l'équation (4.22) dans (4.24), on obtient finalement :

$$\begin{cases} K_{pq} = \frac{3L_q}{T_r} \\ K_{iq} = \frac{3R_s}{T_r} \end{cases} \quad (3.25)$$

3.5.5.2 Régulation du courant i_d :

La boucle de régulation sur l'axe d est présentée par la figure suivant :

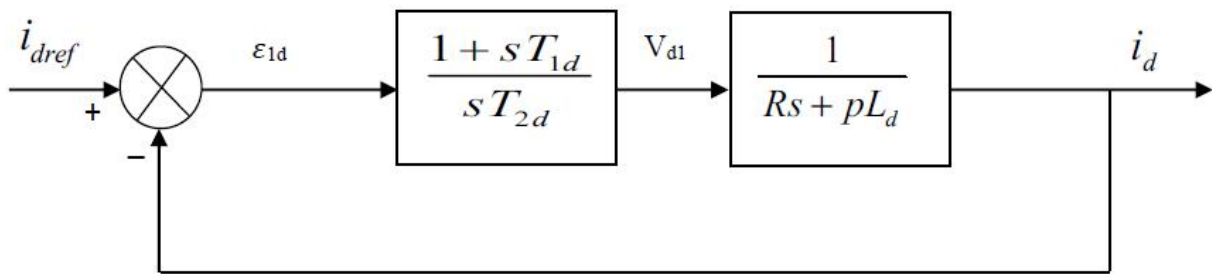


Figure 3.10 :Boucle de régulation du courant i_d .

Pour la régulation du courant i_d , on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant i_q . La FTBO est exprimée par :

$$FTBO = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s+sL_q)} = \frac{1+sT_{1q}}{sT_{2q}R_s(1+s\frac{L_q}{R_s})} \quad (5.26)$$

$$T_{1d} = \frac{L_s}{R_s} \quad (5.27)$$

On remplace l'équation (4.27) dans (4.26). La FTBF devient :

$$FTBF = \frac{1}{1+sR_sT_{2d}} = \frac{1}{1+s\tau_d} \quad (5.28)$$

Par identifications on trouve :

$$\tau_d = R_sT_{2d} \implies T_{2d} = \frac{\tau_d}{R_s} \quad (5.29)$$

En imposant le temps de réponse en boucle fermée $T_r = 3\tau_d$ il vient :

$$T_{2d} = \frac{T_r}{3R_s} \quad (5.30)$$

$\tau_d = \frac{L_d}{R_s}$: Constante de temps électrique de l'axe d du machine.

3.5.5.3 Régulation de vitesse :

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

- Sous système du réglage de courant i_q donc du couple aussi .
- Sous système de la partie mécanique.

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure ci-dessous :

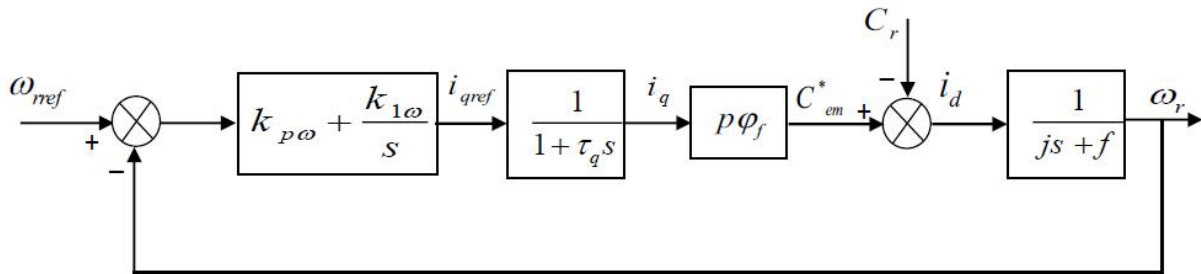


Figure 3.11 :Boucle de régulation de vitesse

$F_W(s)$:La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F_W(s) = K_{pW} + \frac{K_{iW}}{s} = \frac{1+sT_{1W}}{sT_{2W}} \quad (5.31)$$

Ou :

$$\begin{cases} K_{pW} = \frac{T_{1W}}{T_{2W}} \\ K_{iW} = \frac{1}{T_{2W}} \end{cases} \quad (5.32)$$

$F_0(S)$: La fonction de transfert en boucle ouverte pour $C_r = 0$, est donnée par :

$$F_0(s) = \frac{PQf}{f(1+s\tau_q)(1+s\tau_m)} \quad (5.33)$$

$\tau_m = \frac{J}{f}$: Constant mécanique de la machine.

La FTBF est donnée par :

$$FTBF = \frac{F_w F_0}{1 + F_w F_0} \quad (5.34)$$

Après les calculs on trouve :

$$FTBF = \frac{PQf(K_{pw}s + K_{iw})}{J\tau_q s^3 + (J + f\tau_q)s^2 + (PQK_{pw} + f)s + PQK_{iw}} \quad (5.35)$$

Si on néglige $(J\tau_q)$ et $(f\tau_q)$ devant (J) le polynôme caractéristique de cette fonction devient :

$$P(s) = JS^3 + (f + PQfK_{pw})s + PQfK_{iw} \quad (5.36)$$

La FTBF possède une dynamique de 2ème ordre, par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{w_0^2} P^2 \left(\frac{2S}{w_0} \right) P + 1 = 0 \quad (5.37)$$

Où :

w_0 : Pulsation propre du système,

S : Facteur d'amortissement.

Par identification terme à terme entre l'équation (5.36) et (5.37) on trouve :

$$\begin{cases} K_{pw} = \frac{2Jsw_0 - f}{PQf} \\ K_{iw} = \frac{w_0^2 J}{PQf} \end{cases} \quad (5.38)$$

Pour la détermination des caractéristiques du régulateur, on choisit un facteur d'amortissement égal à 0.7 et on définit la pulsation des oscillations non amorties à partir de la dynamique souhaitée.

3.6 Généralités sur PSIM :

PSIM est un logiciel basé sur un langage de programmation graphique dédié à l'électronique et l'électronique de puissance on utilise des icônes et des éléments de la bibliothèque (machines, transformateurs, interrupteurs électroniques, éléments de commande et de contrôle...), Contrairement aux langages de programmation textuels où les instructions déterminent l'exécution du programme

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.

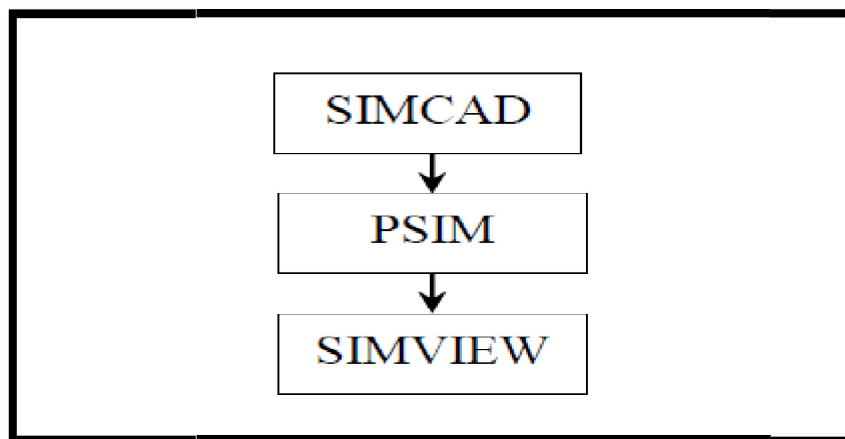


Figure 3.9 : Représentation du système simulé

3.6.1 Modules utilisés sur PSIM :

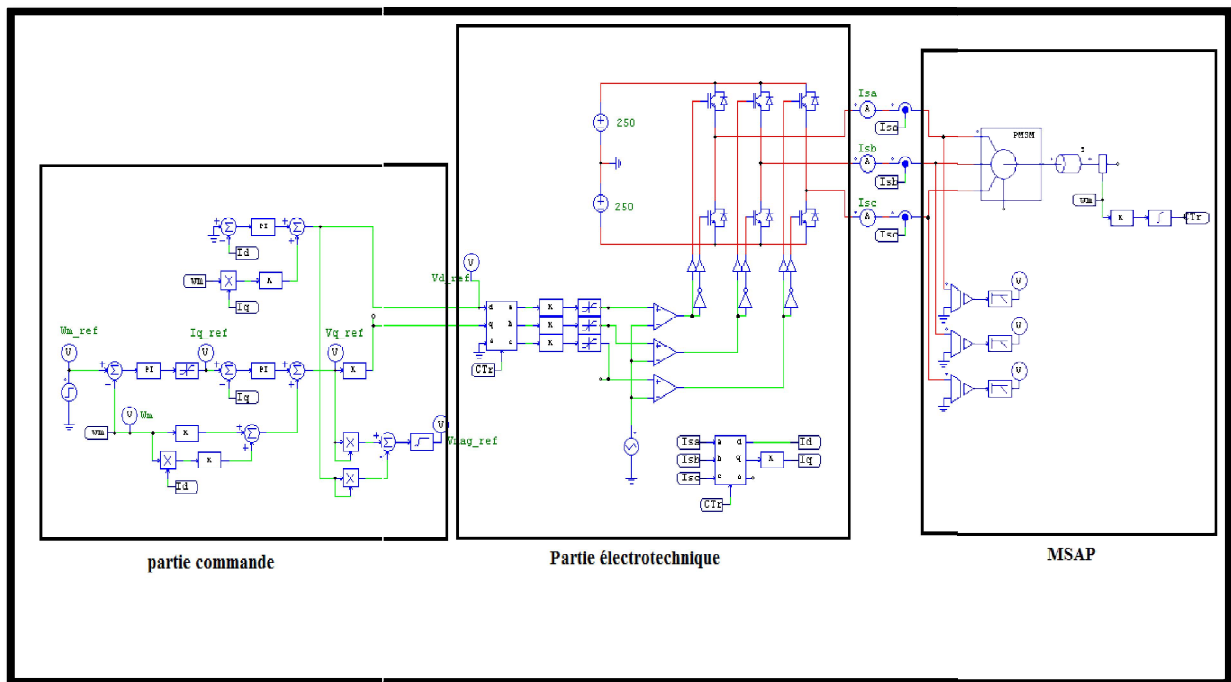


Figure 3.10 Schéma globale de moteur synchrone sous PSIM

a) Partie commande :

Pour la partie commande qui est sous la figure (3.11) on la reprogrammer sous Matlab afin de mieux contrôler les performances des régulateur PI (reg des courant Id, Iq et vitesse wr) et la configuration de toutes les équations mathématiques et tous les gains.

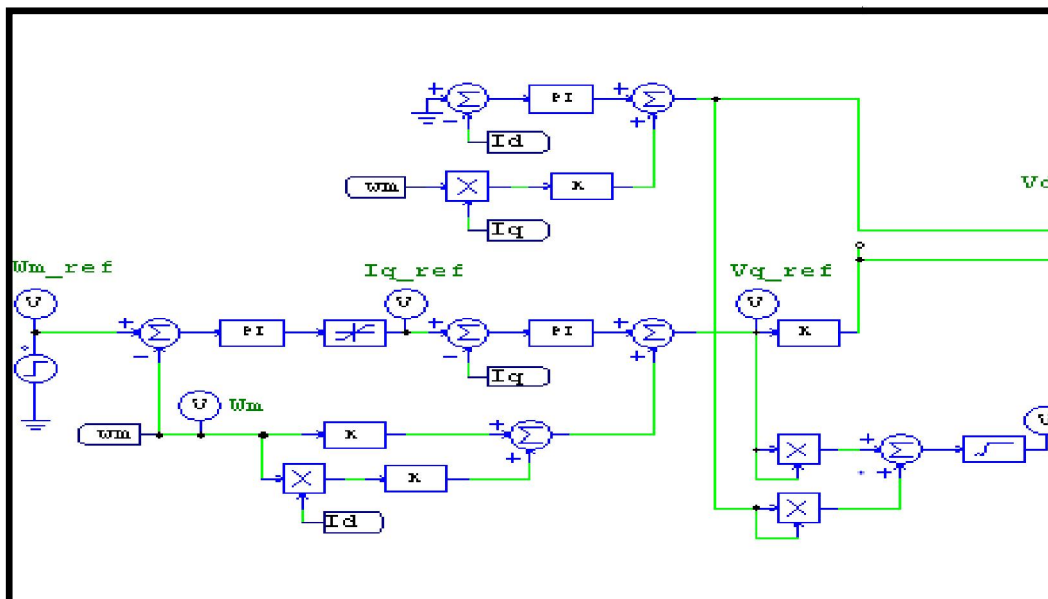


Figure 3.11 : la partie commande

b) Partie onduleur / MLI

Cette partie es composé de :

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

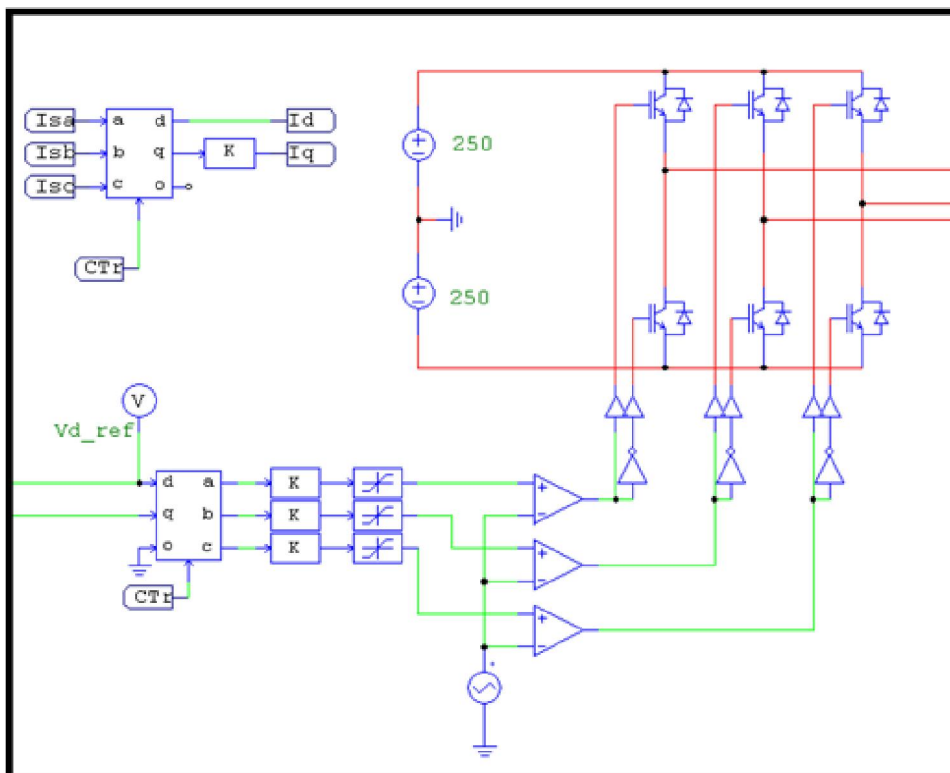


Figure 3.12 Composants de la partie électrotechnique

c) Partie moteur

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

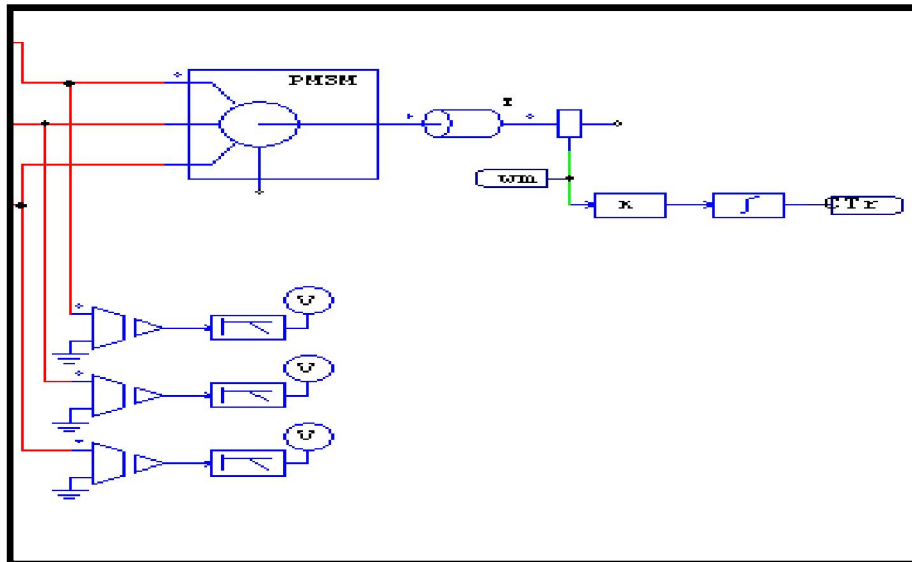


Figure 3.13 Composants de la MSAP

d) Sim Coupler :

Le module Sim Coupler fournit le lien entre PSIM et Matlab / Simulink pour la simulation comme l'illustre la figure (3.14)

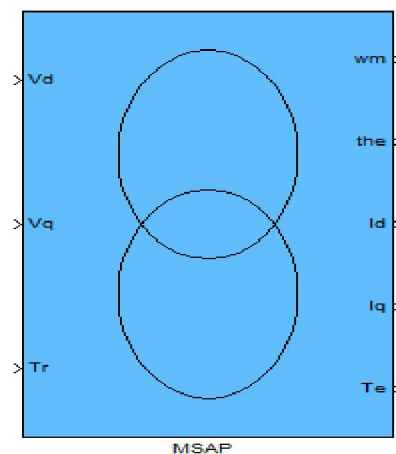


Figure 3.14 Bloc Sim Coupler utilisé

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

Le module Sim Coupler 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 (3.15)

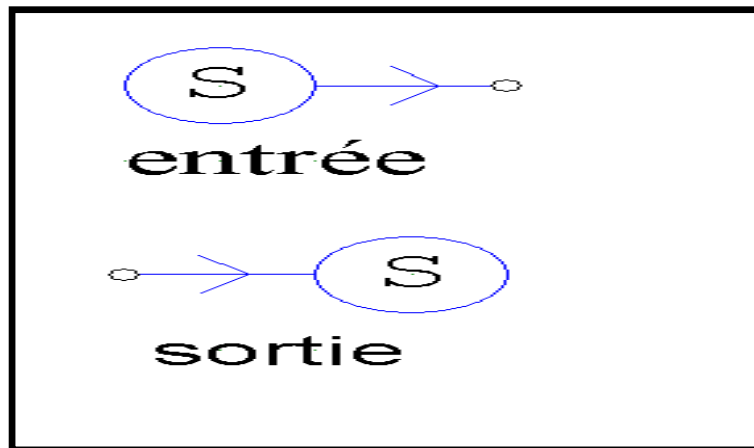


Figure 3.15 Entrée/sortie pour la liaison entre PSIM/Simulink

3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle dynamique du moteur synchrone à aimants permanents. En suite nous avons établi la technique de la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu. Le réglage de la vitesse avec un régulateur classique permet d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes. Puisque les correcteurs classiques sont dimensionnés à partir des paramètres de la machine. Si ces derniers varient dans une large plage de fonctionnement, les performances sont détériorées, alors il est préférable de voir d'autres techniques de réglage robuste. La commande par mode glissant est connue par leur robustesse, qui est le sujet du chapitre suivant.

Chapitre 4

*Commande d'un
véhicule électrique par
mode glissant*

Conclusion générale

Au cours de cette dernière décennie, l'accroissement des émissions polluantes des véhicules génèrent notamment l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui engendre le réchauffement climatique. L'électrification de la chaîne de traction de véhicule semble alors la bonne solution en terme de transport au problème d'émission de gaz à effet de serre et de puisement de ressources fossiles.

Le travail que nous avons présenté vise d'une part à évoluer l'intérêt des commandes non linéaires d'un VE et d'autre part à examiner l'apport des stratégies de commande avancée (mode glissant). L'architecture utilisée pour l'étude est un véhicule tout électrique propulsé par un moteur synchrone à aimant permanent associé à un réducteur .Ce moteur est alimenté par une batterie d'accumulateur à travers un onduleur triphasés pour entraîner les deux roues avant du véhicule.

Nous nous sommes intéressés à la commande en vitesse d'un VE en utilisant le régulateur PI classique puis le régulateur par mode glissant. A travers les résultats obtenus, nous avons pu constater que le régulateur par mode glissant présente de meilleures performances de poursuite par rapport au régulateur PI classique. Les avantages de cette technique se trouvent dans le fait qu'elle utilise toute la force de commande pour compenser l'effet des perturbations extérieures ce qui prouve la robustesse de ce régulateur.

En perspectives, il serait judicieux d'appliquer expérimentalement cette approche de commande mode glissant sur un VE afin, de déterminer d'une part la validité de notre modèle de simulation et nos stratégies de commande.

Bibliographie

[40] A. Annane. *Analyse Du Comportement Du Moteur Synchronique Dans Les Entraînements Electriques A Vitesse Variable*, Mémoire de Magister, Université badji mokhtar-Annaba, 2010

[41] **K. Nabti**, “Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010 .

[42] **G. Grellet**, and G. Clerc, “ Actionneur électriques, principes, modèles, commande ” Eyrolles, 1997

[43] **F. Benchabane**, “Commande en position et en vitesse par mode de glissement d’un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering”, Thèse de Magister, Université de Biskra, 2005

Résumé :

Ce mémoire, présente une étude de modélisation et de commande d'un véhicule électrique entrainer parune machine synchrone à aimants permanents (MSAP), alimentée par un onduleur de tension contrôlé par la technique MLI. La commande vectorielle de la MSAP utilisant des régulateurs PI présente certains inconvénients tels que la sensibilité aux variations de la charge mécanique. Pour améliorer les performances du système à commander, nous avons appliqué une technique de réglage robuste par le mode glissant. Cette dernière est caractérisée par une précision dans le cas d'une poursuite de la vitesse. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité et les performances de la commande proposée.

Mots clés : véhicule électrique, Machine synchrone à aimants permanents, MLI, Commande vectorielle, Mode glissant.
