

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle/Automatique et systèmes

Thème

Commande vectorielle et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique

Préparé par :

KASRI Maïssa

ZIRI Nassim

Dirigé par :

Mr A. ACHOUR

Mlle T. MAKHLOUF

Examiné par :

Mr H. LEHOUCHE

Mr H. HADDAR

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous remercions en premier lieu dieu, le tout puissant de nous avoir donné la volonté, courage et la patience de mener à terme ce travail.

Nous tenons à adresser nos remerciements à notre encadrant monsieur A. ACHOUR, qui s'est toujours montré à l'écoute tout au long de ce travail, ainsi que pour ses conseils et remarques constructives.

Nous remercions vivement notre Co-promotrice, Melle T. MAKHLOUF pour sa disponibilité, ses encouragements et son aide.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptons d'évaluer notre travail et tous les enseignants du département ATE pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ceux qui me sont les plus chers au monde, mes parents, auxquels je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, pour leur amour, leur soutien tout au long de mes études

A mes frères et sœurs massi, narimene, siffedine et dyna

A mes cousines célena, sabrina, dylia, liticia, nesrine, kenza, kamilia, katia et kahina

A mes tantes sabah, katia, hjila, ghania, zahia, khadidja, nadia et salima

A mes amis smail, hanane, Hmanou, Lynda, Lydia et siham

A mon binôme Nassim et toute sa famille

A toute ma promo

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin même d'un mot gentil

MAISSA

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mon défunt père qui a tant attendu ce moment

Ma mère la prunelle de mes yeux

Tous mes frères et sœurs et leurs familles

Mon binôme Maissa ainsi qu'à toute sa famille

Tous mes collègues avec qui j'ai eu la chance de travailler

Tous mes profs et enseignants tout au long de mon cursus

Tous mes amis notamment G-kid, David, Mizou, Mzk, Yasou, Wawache et Celia

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin même d'un mot gentil

NASSIM

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Liste des abréviations	iii
Introduction générale.....	1
Chapitre I Etat de l'art des véhicules électriques	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition d'un véhicule électrique.....	3
I.3 Définition des véhicules tout électriques	4
I.4 Définition d'un véhicule hybride	4
I.5 Architectures des véhicules électriques hybrides.....	4
I.5.1 Structure série	4
I.5.2 Structure parallèle.....	5
I.5.3 Structure mixte / série-parallèle.....	6
I.6 Chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	6
I.6.1 Stockage d'énergie.....	6
I.6.2 Les convertisseurs.....	8
I.6.3 Moteur électrique.....	9
I.7 Conclusion.....	10
Chapitre II Modélisation de la MSAP et de la dynamique du véhicule	
II.1 Introduction.....	11
II.2 Modèle de la MSAP alimenté par un onduleur commandé par la MLI.....	11
II.2.1 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	11
II.3 Alimentation du MSAP par un onduleur de tension	17
II.3.1 Modélisation de l'onduleur de tension commandé par MLI	18
II.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension	18

II.3.3	Modulation de largeurs d'impulsions (MLI).....	20
II.4	Dynamique du véhicule	22
II.4.1	Force de roulement.....	23
II.4.2	Force aérodynamique	23
II.4.3	Force d'inclinaison.....	24
II.4.4	Force d'accélération	25
II.5	Couplage entre les modèles mécanique et électrique du VE	26
II.6	Conclusion	28

Chapitre III **Application de la commande vectorielle**

III.1	Introduction	29
III.2	Principe de la commande.....	29
III.2.1	Avantages de la commande vectorielle.....	30
III.2.2	Inconvénients de la Commande vectorielle	30
III.3	Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP	31
III.4	Découplage	32
III.4.1	Découplage par compensation	32
III.5	Calcul des régulateurs PI	35
III.5.1	Calcul des régulateurs de courant :	35
III.5.2	Calcul de régulateur de vitesse.....	37
III.6	Essais de simulation de poursuite de trajectoire	38
III.7	Conclusion	40

Chapitre IV **Gestion de puissance d'un véhicule hybride**

IV.1	Introduction	41
IV.2	Modélisation des composants du système de stockage	41
IV.2.1	Modélisation de la pile à combustible	41
IV.2.2	Simulation et résultats de la PEMFC.....	45
IV.2.3	Modélisation d'un système de stockage (batterie).....	45
IV.3	Dimensionnement du système de stockage	48
IV.3.1	Dimensionnement du « stack » pile à combustible.....	48
IV.3.2	Détermination de la taille des batteries.....	49
IV.4	Alimentation du VE par une Source d'Energie Hybride (SEH)	49

IV.4.1 La méthode de gestion	50
IV.4.2 L'organigramme de gestion d'énergie du véhicule électrique à système de stockage hybride (PAC/batteries)	54
IV.4.3 Simulation générale appliqué au système de gestion globale.....	55
IV.4.4 Résultats de simulation :.....	55
IV.5 Conclusion.....	58
Conclusion générale	59
Références Bibliographiques	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art des véhicules électriques

Figure I.1	Architecture d'un véhicule hybride série	5
Figure I.2	Architecture d'un véhicule hybride parallèle.....	5
Figure I.3	Architecture d'un véhicule hybride mixte.....	6

Chapitre II : Modélisation de la MSAP et la dynamique du véhicule

Figure II.1	Représentation du moteur synchrone à aimant permanent.....	11
Figure II.2	Représentation de MSAP dans le repère électrique (a, b, c)	12
Figure II.3	Rotors des machines synchrones à aimant permanents.....	12
Figure II.4	Représentation de la transformation de Park.....	15
Figure II.5	Schéma de l'association MSAP-onduleur de tension.....	18
Figure II.6	Schéma équivalent de l'onduleur à MLI.....	18
Figure II.7	Tensions de référence et tension de la porteuse.....	20
Figure II.8	Représentation des forces agissant sur le véhicule.....	21
Figure II.9	Force de roulement sur la roue.....	22
Figure II.10	Force aérodynamique pour différentes valeurs de C_x	23
Figure II.11	Pente sur la route.....	24
Figure II.12	Mécanisme du réducteur.....	25

Chapitre III: Application de la commande vectorielle

Figure III.1	Commande par orientation du champ de la MSAP.....	29
Figure III.2	Description de couplage.....	33
Figure III.3	Principe de découplage par compensation par compensation.....	34
Figure III.4	Schéma de compensation.....	35
Figure III.5	Boucle de régulation de courant	36
Figure III.6	Boucle de régulation du la vitesse.....	37
Figure III.7	Test de poursuite de trajectoire.....	39

Chapitre IV: Gestion de puissance d'un véhicule hybride

Figure IV.1	Schéma équivalent de la pile PEMF	41
Figure IV.2	Allure de la tension	45
Figure IV.3	Allure de la puissance	45
Figure IV.4	Schéma équivalent du modèle CIEMAT.....	46
Figure IV.5	Modèle de la batterie réalisé sous MATLAB Simulink.....	47
Figure IV.6	Schéma électrique global du VE a système de stockage hybride.....	50
Figure IV.7	Organigramme de gestion des puissances dans un véhicule électrique hybride..	54
Figure IV.8	Profil de vitesse appliqué.....	55
Figure IV.9	Allure du couple de charge et du couple électromagnétique.....	55
Figure IV.10	Tension de la batterie.....	56
Figure IV.11	Etat de charge de la batterie.....	56
Figure IV.12	Allure des puissances.....	57

Liste des tableaux

Chapitre IV: Gestion de puissance d'un véhicule hybride

Tableau IV.1	Différents cas du mode traction d'un VE.....	51
Tableau IV.2	Différents cas du mode freinage d'un VE.....	52
Tableau IV.3	Différents cas du mode arrêt d'un VE.....	52
Tableau IV.4	Différent mode de fonctionnement d'un VE.....	53

Liste des abréviations et symboles

a, b, c : Axes liés aux enroulements triphasé.

MSAP : Machines synchrones à aimant permanents.

$\mathbf{U}_s = [U_a \ U_b \ U_c]^T$: Tensions statorique triphasée (V).

R_s : Résistance statorique (Ω).

$\mathbf{I}_s = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: Courants des phases statorique (A).

$\boldsymbol{\Psi}_s = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$: Flux magnétique au stator (Wb).

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} : Inductances propres de chaque phase statorique (H).

$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$: Inductances mutuelles entre deux phases du stator (H).

θ : Position angulaire du rotor (rad).

Ψ_f : Amplitude des aimants permanents.

F_{VF} : Coefficient de frottement visqueux (SI).

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

C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine (N.m).

ω_r : Vitesse de rotation du rotor (rad/s).

J : Moment d'inertie (kg.m^2).

d, q : Axes de référence diphasé de Park.

$\mathbf{U}_{dq} = [U_d \ U_q]^T$: Tension statorique sur les axes d et q (V).

$\mathbf{I}_{dq} = [I_d \ I_q]^T$: Courants statorique sur les axes d et q (A).

$\boldsymbol{\Psi}_{dq} = [\Psi_d \ \Psi_q]^T$: Flux dans les enroulements d et q du système diphasé (Wb).

L_d, L_q : Inductances propre des enroulements d et q (H).

$\mathbf{V}_{an}, \mathbf{V}_{bn}, \mathbf{V}_{cn}$: Tensions simple à la sortie de l'onduleur (v).

$\mathbf{S}_a, \mathbf{S}_b, \mathbf{S}_c$: Variable logiques correspondantes a l'état des interrupteurs de l'onduleur.

E : Tension continue à l'entrée de l'onduleur (V).

m : Indice de modulation.

f_p : Fréquence de la porteuse (Hz).

r : Coefficient de réglage.

MLI : Modulation de largeur d'impulsions.

\mathbf{V} : Vitesse du véhicule (m/s).

g : La gravité en (m/s^2).

\mathbf{M} : Masse totale du véhicule (kg).

F_{tot} : Effort de traction totale du véhicule.

F_{res} : Force résistante totale.

F_f : Force de résistance au roulement.

F_a : Force résistante à la pénétration dans l'air.

F_g : Force résistante due à la pente à gravir.
 F_{acc} : Force d'accélération.
 C_{rr} : Le coefficient de roulement.
 ρ_{air} : Densité volumique de l'air (kg/m^3).
 S_f : Section frontale du véhicule (m^2).
 V : Vitesse du véhicule (m/s).
 V_{vent} : Vitesse du vent (m/s).
 C_x : Coefficient de pénétration dans l'air.
 β : Angle de la pente (rad).
 γ : Accélération du véhicule.
 R : Rayon de la roue.
 F_R : Force de résistance totale.
 ω_{roue} : La vitesse angulaire des roues (rad/s).
 F_{fr} : Force de traction longitudinale des roues frontales.
 N : Le rapport de réduction de vitesse.
 C_t : Couple de traction de la roue.
 C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine (N.m).
 V_{act} : Polarisation d'activation (V).
 V_{ohm} : Polarisation ohmique (V).
 V_{conc} : Polarisation de concentration (V).
 E_{Nernst} : Le potentiel de Nernst (V).
 T : Température opératoire absolue de la pile (K).
 $P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).
 $P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).
 I_{PAC} : Le courant de fonctionnement de la pile en ampère (A).
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ et ϵ_4 : Les coefficients paramétrique appropriés à chaque model physique de la pile à combustible PEMFC.
 P_{cath} : La pression de l'oxygène à la cathode (atm).
 $X_{H_2O}^{Sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié (SI).
 P_{anode} : La pression de l'hydrogène l'anode (atm).
 R_C : La résistance équivalente de contact a la conduction des électrons (Ω).
 R_M : La résistance équivalente de la membrane a la conduction des protons (Ω).
 l : L'épaisseur de la membrane (μm).
 r_M : La résistance spécifique de la membrane ($\Omega.m$).
 δ_{H_2O/SO_3^-} : La teneur en eau dans la membrane.
 A : La surface active de la pile (cm^2).
 B : Constate empirique qui dépend du type de la pile et de son état de fonctionnement.
 J : La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm²).
 J_{max} : Le densité du courant maximale ($\frac{A}{cm^2}$).
 C_{10} : Capacité nominale de la batterie en régime de décharge à courant constant durant 10 heures (Ah).
 I_{10} : Courant nominal de la batterie (A).

Q_d : La quantité de charge manquante à la batterie (Ah).

EDC : L'état de charge.

C_{bat} : Capacité de la batterie (Ah).

t : La durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} .

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante (K).

P_d : La puissance à l'entrée de l'onduleur (W).

P_{PAC} : Puissance électrique brute du « stack » (W).

N_{PAC} : Nombre de cellules de l'empilement.

S_{PAC} : Surface active des cellules (m²).

E_{pac} : La tension d'une cellule PAC (V).

V_{dc} : Tension du bus continue soit (V).

U_{stack} : Tension du « stack » en pleine charge (V).

I_{pac} : Courant maximal de la pile à combustible (A).

N_{ja} : Nombre de jours d'autonomie (jours).

P_{dem} : Puissance demandée par le moteur (W).

PD : Profondeur de décharge.

η_{bat} : Le rendement de la batterie.

V_{bat} : Tension des batteries (V).

PAC : Pile à Combustible.

VEH : Véhicule électrique hybride.

VE : Véhicule électrique.

V_{Bat} : Tension délivrée par la batterie (V).

I_{Bat} : Intensité de courant débité par la batterie (A).

P_{Bat} : La puissance de la batterie (W).

e_q, e_d : Termes compensatoires.

ω_0 : Pulsation propre du système,

ξ : Facteur d'amortissement.

S : Opérateur de Laplace.

I_{qref}, I_{dref} : Courants de références (A).

p : Nombre de paires de pôles.

J_e : Moment d'inertie global du véhicule.

J_w : Moment d'inertie de la roue.

C_{rm} : couple résistant du moteur.

Introduction générale

Avec la croissance démographique mondiale et le développement des pays émergents l'énergie est devenue indispensable à la vie quotidienne, mais l'homme ne s'est jamais préoccupé des menaces que peuvent lui apporter l'exploitation de cette énergie : d'une part cette énergie est appelée à s'épuiser et d'autre part elle est associée à des effets secondaires sur l'environnement. Le secteur des transports routiers est un des plus consommateur d'énergie et pollueur en termes d'émissions de gaz à effets de serre. Cette prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions polluantes et la consommation des véhicules. En parallèle à cela, les progrès technologiques ne cessent de se développer, avec l'arrivée des nouveaux dispositifs d'électronique de puissance et de matériaux de stockage de l'énergie. Ces multiples aspects favorisent la transition vers le véhicule électrique qui permet de se déplacer de manière plus Écologique.

Le véhicule électrique (VE) a commencé à s'intégrer dans les marchés automobiles ces dernières années, divers modèles ont été expérimentés et ont tenté de rivaliser avec les véhicules thermiques. L'échec a été à chaque fois au rendez-vous, Le frein essentiel était la batterie dont la capacité était insuffisante, comparés à celle des véhicules thermiques. Cela a prouvé que la polyvalence et l'autonomie étaient au centre des enjeux du développement des véhicules. Afin de pallier ces faiblesses, les constructeurs tendent à développer des véhicules qui sont à la fois moins polluants et qui possèdent une autonomie suffisante, cela paraît possible en associant les avantages du véhicule traditionnelle à combustible à ceux du véhicule électrique, ce nouveau type de véhicule c'est le véhicule hybride.

Ce type de moteur confère une qualité de roulement qualifiée de douce puisque en principe il n'utilise pas la transmission ce qui confère au véhicule une accélération continue progressive. La voiture électrique est très adaptée aux conditions urbaines dans la mesure où elle ne consomme de l'énergie ni dans le freinage ni dans les embouteillages et s'auto-recharge dans les descentes, quant à ses inconvénients ils sont tout aussi multiples et vont des conditions de production de l'énergie électrique aux différents coûts de la voiture, et surtout au stockage embarqué de l'énergie.

Comme le véhicule automobile est un système physique complexe composé de plusieurs sous-systèmes, la modélisation de chaque sous-système s'avère une tâche difficile qui nécessite des études cinématique et dynamique approfondies du véhicule.

Le développement du véhicule électrique hybride demande de multiples compétences du fait de sa conception et sa gestion de l'énergie qui le classe dans les systèmes pluridisciplinaire. En effet, diverses fonctionnalités y sont associées: la production et la distribution de l'énergie électrique à bord, la conversion de l'énergie électrique et le stockage.

On vise à commander et améliorer les performances du mouvement du véhicule tel que le suivi de consigne, la rapidité et la stabilité, en utilisant des techniques de commande linéaire avec découplage. Ces techniques doivent assurer la robustesse du comportement du véhicule vis-à-vis des perturbations. Parmi ces techniques, on peut citer la commande vectorielle « Field oriented control » permet à la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) d'avoir une

Introduction générale

dynamique proche de celle de la machine à courant continu qui concerne la linéarité et le découplage elle utilise des régulateurs linéaires de type proportionnel-intégral(PI). Ces derniers assurent la régulation de vitesse ainsi que le bon suivi des consignes, même en présence de perturbations extrinsèques au VE.

Dans le premier chapitre de notre mémoire, nous allons présenter des généralités sur le véhicule électrique ainsi que sa chaîne de traction.

Le deuxième chapitre, concernera la modélisation et simulation de la machine synchrone à aimants permanents associée à l'onduleur de tension commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), ainsi qu'à la modélisation de la dynamique du véhicule électrique.

Dans le troisième chapitre nous allons introduire une commande par orientation du flux afin d'assurer le bon fonctionnement du véhicule et améliorer ses performances en termes de stabilité, rapidité et précision.

Le quatrième chapitre, de notre travail abordera la gestion des puissances des sources d'alimentation du véhicule électrique (PAC /Batterie) pour une utilisation optimale.

Chapitre I

Etat de l'art des véhicules électriques

I.1 Introduction

Dans un temps où l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le vingtième siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré dans les temps de nos ancêtres.

Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère de CO₂ et des autres gaz dus à l'activité humaine [1]. Le secteur des transports est désormais le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre, c'est là pour ça que l'industrie de l'automobile s'intéresse précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer dans son domaine à une vie plus saine, et propose le véhicule électrique pour améliorer la qualité de l'air grâce à des émissions nulles en échappement. Les véhicules électriques (VEs) et hybrides (VHEs) constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants) [2].

Conçues pour lutter efficacement contre la pollution, les véhicules électriques sont, malheureusement, freinés par leurs coûts élevés, leur autonomie limitée qui dépend de la capacité des batteries, le manque d'investissements et d'autres problèmes critiques qui handicapent cette invention.

L'idée du véhicule électrique n'est pas récente et pourtant sa structure interne n'est pas figée. Plusieurs solutions sont actuellement en développement. La recherche dans le domaine des batteries est importante et donne lieu à de nombreux prototypes [3].

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art de la voiture électrique de plus nous nous intéresserons aux principaux composants de la chaîne de traction (batteries, motorisation...) et nous donnerons la configuration la plus favorable, nous finirons par souligner les différents avantages et inconvénients des véhicules électriques.

I.2 Définition d'un véhicule électrique

C'est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. La voiture électrique est avancée par tous les acteurs du domaine de l'automobile comme étant l'une des solutions de transport les plus propres et écologiques [4].

I.3 Définition des véhicules tout électriques

Dans ce genre de véhicules les moteurs électriques seuls assurent la traction, ils ont été présentés comme une solution prometteuse, grâce à leur indépendance vis-à-vis du pétrole. Mais leur faible autonomie ne leur permet pas aujourd'hui de remplacer définitivement les véhicules conventionnels, d'où le développement d'un autre concept : les véhicules hybrides [4].

I.4 Définition d'un véhicule hybride

Met en œuvre, par définition au moins deux sources d'énergie différentes pour utiliser les avantages de chaque organe et ainsi, améliorer le rendement global de la transmission. L'élément de stockage peut être rechargé à bord du véhicule, ce qui évite l'installation coûteuse de nouvelles infrastructures, l'autonomie du véhicule ne dépend alors plus que de la capacité de son réservoir comme dans un véhicule conventionnel. L'hybridation s'avère une des alternatives prometteuses à court et moyen terme. Le fait d'avoir deux types de source permet de récupérer l'énergie et de choisir le point de fonctionnement à meilleur rendement pour la source primaire [5].

La pénurie des ressources pétrolières et l'impact des gaz à effet de serre ont encouragé le développement d'un nouveau concept de véhicule hybride (thermique et électrique) ou tout électrique. Pour atteindre l'objectif de « zéro émission » de polluants, l'émergence d'un deuxième concept de véhicule électrique est basée sur l'hybridation tout électrique, mais ce concept souffre d'un problème d'autonomie.

Les technologies hybrides ont été inventées pour plusieurs raisons :

- Le respect de l'environnement.
- Amélioration du rendement de la partie thermique.
- Compensation du manque de moyens de stockage d'énergie qui ne sont pas totalement maîtrisés.

I.5 Architectures des véhicules électriques hybrides

On distingue trois familles de véhicule électrique qui se différencient selon l'architecture de ses différents organes de propulsion embarqués.

I.5.1 Structure série

Dans l'architecture série d'un véhicule hybride électrique l'organe de propulsion est un moteur électrique, il est relié directement à la partie traction et une deuxième machine électrique produit de l'énergie électrique en étant entraînée par un moteur thermique. Les nombreuses conversions de puissance sont (thermique/mécanique, mécanique/électrique, électrique/électrique, électrique/mécanique et enfin mécanique/mécanique). Ces conversions permettent toutefois de découpler les roues du moteur, et donc de le faire fonctionner à un fonctionnement plus favorable. Il est généralement bien adapté aux véhicules lourds [6].

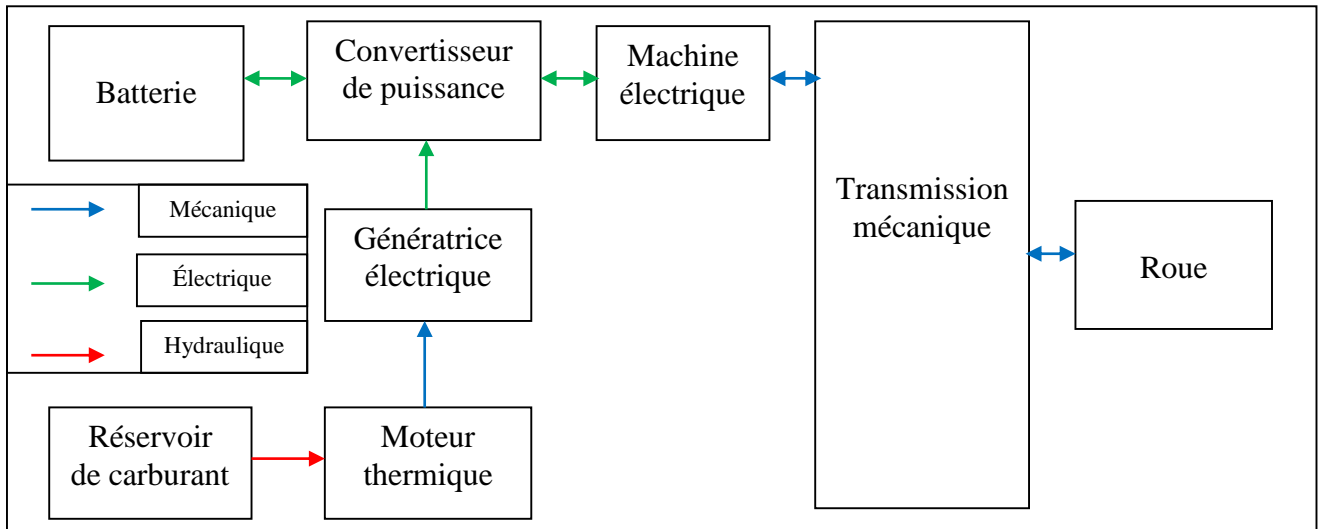


Figure I.1 Architecture d'un véhicule hybride série [7]

I.5.2 Structure parallèle

Dans l'architecture d'un véhicule hybride parallèle, le moteur thermique et le moteur électrique peuvent agir indépendamment sur la traction et ils peuvent chacun propulser le véhicule, car ils sont directement liés aux roues. Le moteur thermique est plutôt utilisé à haute vitesse et le système électrique est utilisé comme appoint pour les accélérations. Par rapport à la propulsion hybride série, le système permet d'obtenir un très bon rendement à haute vitesse puisque la transmission mécanique est alors optimale, et aussi une réduction de la taille de la machine électrique et de la batterie [6].

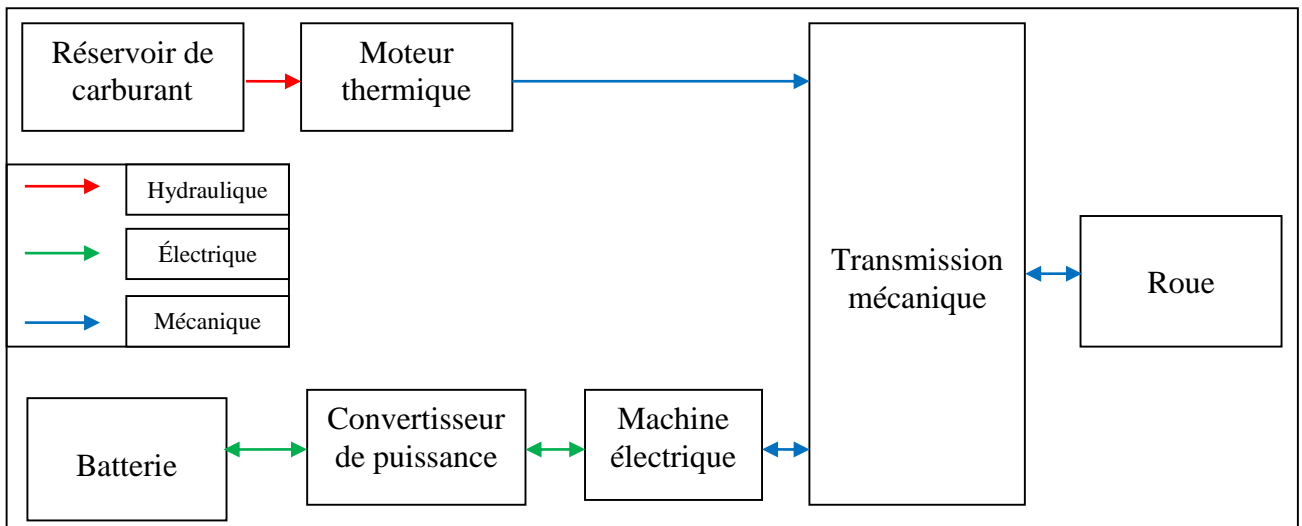


Figure I.2 Architecture d'un véhicule hybride parallèle [7]

I.5.3 Structure mixte / série-parallèle

Le véhicule hybride dit série-parallèle est un véhicule qui combine les avantages des deux structures. Cette association se paie par le fait que le véhicule devient complexe et très coûteux. Mais de nombreuses alternatives peuvent être construites en fonction des performances recherchées par le constructeur [6].

Cette structure est intéressante dans la mesure où elle offre de nombreux modes de fonctionnement et qu'ainsi elle permet de se rapprocher d'un optimum énergétique quel que soit le point de fonctionnement. On peut noter qu'à basse vitesse, le comportement de ce véhicule est comparable à celui d'un véhicule hybride série, et à haute vitesse, comparable à celui d'un véhicule hybride parallèle.

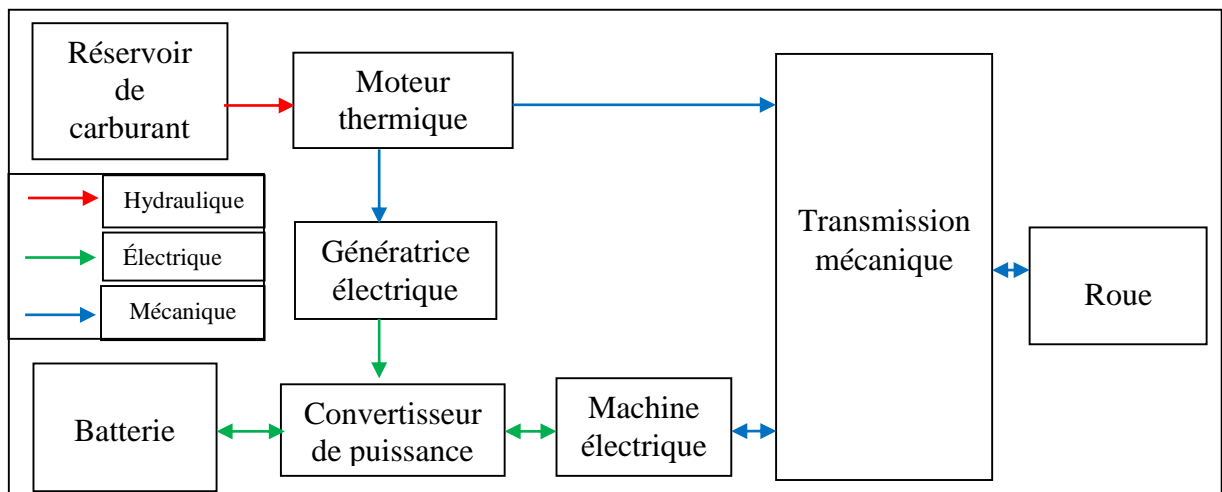


Figure I.3 Architecture d'un véhicule hybride mixte [7]

I.6 Chaîne de traction d'un véhicule électrique

I.6.1 Stockage d'énergie

En ce qui est du stockage de l'énergie, le composant le plus couramment utilisé est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. Du fait qu'elles sont parmi les moins chères, les batteries au plomb sont les plus utilisées dans le domaine du transport, mais elles sont aussi les plus lourdes et peu performantes. D'autres technologies, comme nickel métal hydrure ou le lithium-Ion, qui ont généralement un meilleur rendement et de meilleures performances spécifiques peuvent être utilisées. Mais ces technologies ont un coût encore élevé qui peut représenter un point limitant pour des applications à des véhicules électriques et hybrides

électriques d'une part et d'autre part leur gestion (température, cycle de charge, estimation de l'état de charge) s'avère plus délicate [8].

I.6.1.1 Les batteries

Une batterie est un accumulateur électrochimique qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques aux électrodes. Ces dernières assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique réversible. L'accumulateur électrochimique a la caractéristique intéressante de fournir une tension à ses bornes peu dépendante de sa charge. Cette tension est de l'ordre de quelques volts pour un élément. Comme en pratique des tensions plus élevées sont requises, typiquement 12V, 24V voir 48V et plus, il suffit pour augmenter la tension, de raccorder des éléments du même type en série au sein d'une batterie d'accumulateurs. Les principales technologies Retenues sont les batteries au Plomb, les batteries Nickel Métal-Hydrure et les batteries Lithium-ion.

Le choix de la batterie pour un VE doit répondre aux conditions suivantes :

- Une bonne puissance massique permettant de bonnes accélérations.
- Une tension stable.
- Une bonne autonomie justifiée par une bonne énergie massique.
- Une durée de vie élevée qui est calculée en nombre de cycles de chargement et de Déchargement.

I.6.1.1.1 Batterie Plomb-acide

La technologie au plomb est la technologie la plus commune dans le domaine de l'automobile et déjà utilisée pour les batteries des véhicules conventionnels. Elle se caractérise par sa robustesse et son faible coût, néanmoins elle possède une puissance et une énergie spécifique médiocre.

I.6.1.1.2 Batteries Métal-Hydrure

La technologie Nickel Métal-Hydrure (Ni-Mh) présente une énergie massique estimée à deux fois celle de la technologie plomb. Ni-Mh est la technologie qui domine le marché des véhicules hybrides aujourd'hui.

I.6.1.1.3 Batterie Lithium-ion

La technologie Lithium-ion (Li-ion) représente de réelles perspectives d'avenir pour les applications de traction électrique. Elle possède de meilleures performances en termes de puissance et d'énergie massique. Mais malgré ses bonnes performances, la technologie Li-ion souffre de son coût élevé et de la difficulté de gestion de la température et des risques d'explosion.

I.6.1.2 Les piles à combustible

Une pile à combustibles est un convertisseur d'énergie qui transforme directement et de façon continue de l'énergie chimique en énergie électrique ceci à partir de la réaction chimique entre oxygène O_2 et hydrogène H_2 . Une pile à combustibles se différencie des autres

piles (ou batteries) électrochimiques par le fait que les réactifs sont renouvelés et les produits évacués en permanence.

I.6.1.3 Les supercondensateurs :

Un supercondensateur est un condensateur de technologie spécifique. Il permet d'obtenir une densité de puissance et d'énergie intermédiaire comparée aux batteries et aux condensateurs classiques. Il existe plusieurs technologies de supercondensateur. Dans le cas des applications liées au stockage de l'énergie, on utilise un électrolyte organique qui limite la tension élémentaire à 3V et des électrodes de haute surface spécifique. L'objectif est d'apporter une réponse aux besoins de stockage et de restitution d'énergie sur de courtes durées.

I.6.2 Les convertisseurs

L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans un véhicule sous-entend la présence à leur bord d'une source d'énergie électrique qui est une batterie de capacité appropriée à l'autonomie souhaité 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 :

I.6.2.1 Convertisseur alternatif/continu (redresseur)

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

I.6.2.2 Onduleur (DC/AC)

L'onduleur est utilisé pour transformer l'énergie électrique à courant continu (côté batterie) en énergie électrique à courant alternatif (côté stator de la machine). Il permet de réaliser la commande du couple de la machine et donc le réglage de la vitesse du véhicule.

I.6.2.3 Hacheurs (DC-DC)

Les hacheurs ont deux usages essentiels dans un VE :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs s'ils sont à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires Électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc...).

I.6.3 Moteur électrique

Très utilisé, depuis plus d'un siècle, la machine électrique est le composant principal de la voiture électrique, elle est souple, silencieux, ne pollue pas et elle s'adapte à toutes les situations.

De manière spécifique, la machine électrique de traction doit répondre aux critères suivants :

- Il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation.
- Il doit posséder un couple important à bas régime, ainsi qu'un bon rendement.

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

- La machine à courant continu (devenues obsolètes pour cette application avec l'évolution d'électronique de puissance).
- La machine synchrone.
- La machine asynchrone.

La motorisation électrique a deux fonctions dans le véhicule. Soit la machine électrique fonctionne en mode moteur pour propulser le véhicule, soit elle fonctionne en génératrice pour récupérer l'énergie mécanique (au freinage ou fournie par le moteur thermique) et recharger la batterie.

I.6.3.1 Machine synchrone à aimants permanents

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Le moteur synchrone est constitué de deux parties, partie fixe ou stator soutenant des enroulements constituant l'induit, et une partie mobile ou rotor constituant l'inducteur.

- **Le stator** : partie fixe de la machine, est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° , logés dans les encoches du circuit magnétique fixe.
- **Le rotor ou roue polaire** : partie mobile de la machine, est réalisé par un circuit magnétique comportant des aimants permanents. La roue polaire est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants.

On distingue principalement deux types de rotors :

- **Rotor à pôles lisses** : Les aimants permanents sont collés à la surface du rotor.
- **Rotor à pôles saillants** : Les aimants sont enterrés dans le rotor.

I.6.3.1.1 Les avantages

Les avantages d'une machine synchrone à aimant permanent sont :

- ✓ rendement et facteur de puissance élevés.
- ✓ Puissance massique et volumique important.
- ✓ Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse.
- ✓ Augmentation de la fiabilité.
- ✓ Absences des contacts glissants.

I.6.3.1.2 Les inconvénients

Les inconvénients de la machine synchrone à aimant permanent se résument à :

- ✓ Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante.
- ✓ Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

I.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le véhicule électrique hybride dans un contexte général en présentant ces différents types et architectures (structure), puis les éléments de base de la chaîne de traction de ces derniers. Cela nous a permis d'effectuer nos choix concernant l'architecture, le moteur, les convertisseurs et les sources d'énergies pour notre travail.

Chapitre II

**Modélisation de la machine synchrone à
aimants permanent et la dynamique du
véhicule**

II.1 Introduction

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est à courant alternatif. En mode moteur, elle est utilisée dans l'entraînement à vitesse variable. Ce moteur présente plusieurs avantages : absence des pertes par effet Joule au rotor, faible inertie, un couple massique élevé, inductances relativement faibles, ce qui entraîne des réponses rapides des courants et donc du couple.

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

Dans ce chapitre, on abordera dans un premier lieu la modélisation de la MSAP, ou on présentera d'abord les hypothèses simplificatrices adoptées, puis la mise en équation de cette dernière, enfin on terminera cette partie par la transformation de PARK, ensuite on s'intéressera à la modélisation de l'onduleur de tension commandé par la technique de modulation de Largeur d'impulsion(MLI). A la fin de ce chapitre, on détaillera la dynamique du VE, en citant les différentes forces agissant sur ce dernier.

II.2 Modèle de la MSAP alimenté par un onduleur commandé par la MLI

II.2.1 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et 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 modélisation du MSAP est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux des aimants. Donc, le modèle est issu du modèle de la machine synchrone classique [9].

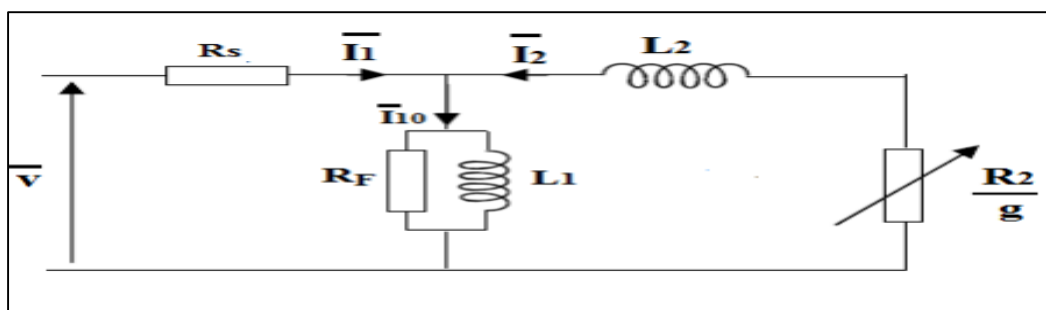


Figure II.1 Représentation du moteur synchrone à aimants permanents

La MSAP comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a,b,c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

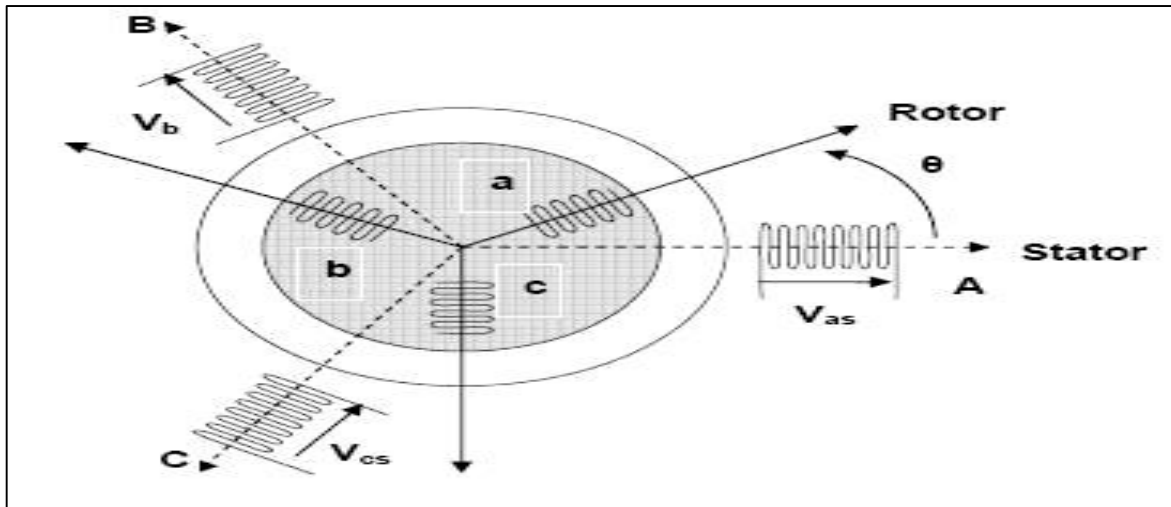


Figure II.2 Représentation du MSAP dans le repère électrique (a, b, c)

On peut distinguer deux types de rotors :

Dans le premier type (a) les aimants sont montés sur la surface du rotor offrant un entrefer homogène, le moteur est appelé à rotor lisse et les inductances ne dépendent pas de la position du rotor. Dans le deuxième (b) les aimants sont montés à l'intérieur de la masse rotorique et l'entrefer sera variable à cause de l'effet de la saillance. Dans ce cas les inductances dépendent fortement de la position du rotor. De plus, le diamètre du rotor du premier type est moins important que celui du deuxième ce qui réduit considérablement son inertie en lui offrant la propriété de l'entraînement des charges rapides. En ce qui concerne le stator, il est semblable à celui de toutes les machines à courant alternatif [10].

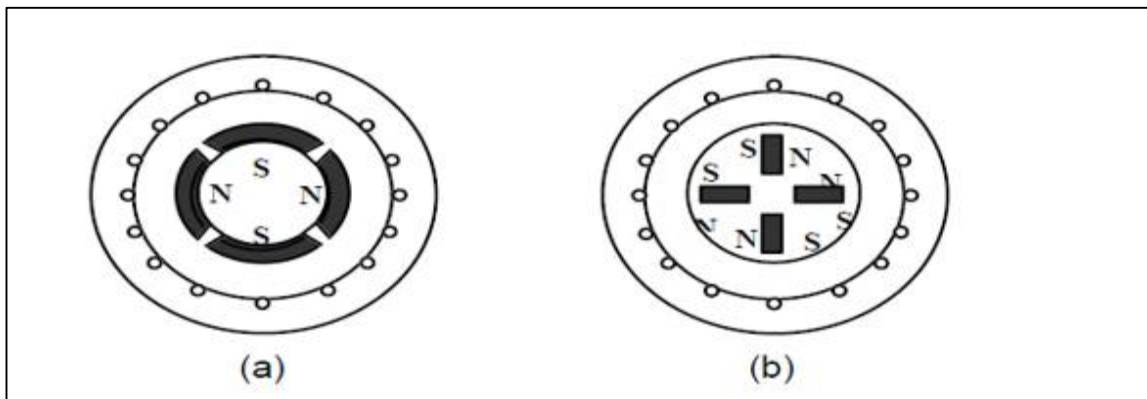


Figure II.3 Rotors des machines synchrones à aimants permanents

II.2.1.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MSAP est formulée, en adoptant les hypothèses simplificatrices Suivantes [11] :

- ✓ L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- ✓ L'effet d'encoche est négligeable.
- ✓ L'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ✓ Le circuit magnétique est supposé non saturé.
- ✓ Les harmoniques d'encoche et d'espaces sont négligées.
- ✓ Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté.
- ✓ L'hystérésis, l'effet de peau ainsi que l'effet de la température sont négligés.

II.2.1.2 Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents

En tenant compte de la représentation de la machine et des hypothèses simplificatrices précédentes, le modèle triphasé s'exprime par les équations suivantes :

II.2.1.2.1 Equations électriques

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$[U_a \ U_b \ U_c]^T$: Vecteur des tensions des phases statoriques.

R_s : La résistance de chaque phase statorique.

$[I_a \ I_b \ I_c]^T$: Vecteur des courants des phases statorique.

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$: Vecteur des flux totaux statorique.

II.2.1.2.2 Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{af} \\ \Psi_{bf} \\ \Psi_{cf} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{af} \\ \Psi_{bf} \\ \Psi_{cf} \end{bmatrix} = \Psi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} : Inductances propres de chaque phase statorique.

$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$: Inductances mutuelles entre deux phases du stator.

θ : Angle électrique du rotor par rapport au stator de la machine.

Ψ_f : Amplitude du flux des aimants permanents.

II.2.1.2.3 Equation mécanique

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - F_{VF} \cdot \omega_r) \quad (\text{II.4})$$

F_{VF} : Coefficient des frottements visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique.

ω_r : Vitesse de rotation du rotor.

C_r : Couple résistant.

J : Moment d'inertie.

II.2.1.2.4 Equation électromagnétique

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_s]^T \cdot \frac{d[L_s]}{d\theta} [L_s] + \frac{1}{2} \frac{d[\Psi_s]}{d\theta} \quad (\text{II.5})$$

$$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$$

$$[\Psi_s] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

II.2.1.3 Transformation de Park

La transformation de Park (Figure II.4) est un outil mathématique qui permet de transformer le système triphasé (a, b, c) en un système diphasé (d, q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\frac{\pi}{2}$ et situées sur le rotor, les aimants se situent sur l'axe d [12][13].

Cette transformation rend les équations dynamiques des moteurs à courant alternatif indépendantes de l'angle électrique, donc plus simples ce qui facilite leurs études et leurs analyses

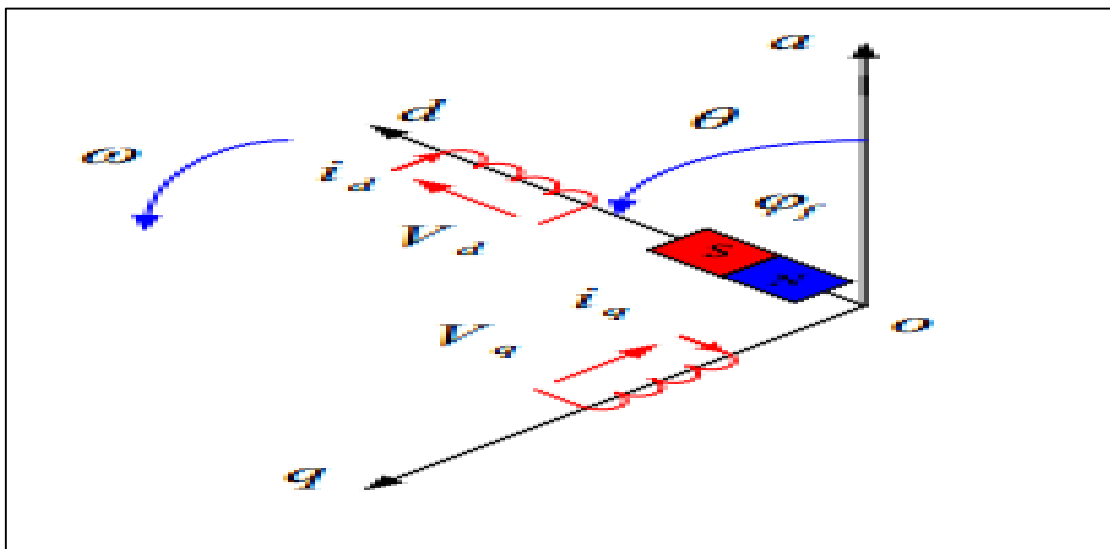


Figure II.4 Représentation de la transformation de Park [14]

Soit $P(\theta)$ la matrice de transformation directe de PARK, la transformation est comme suit :

$$[x_{dq0}] = P(\theta) \cdot [x_{abc}] \tag{II.6}$$

La transformation inverse est définie par :

$$[x_{abc}] = P(\theta)^{-1} \cdot [x_{dq0}] \tag{II.7}$$

Avec,

$$[x_{dq0}] = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \text{ et } [x_{abc}] = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{II.8}$$

Ou x représente les grandeurs électriques (tension, courant ou flux)

Et La matrice de transformation est donnée par :

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

La matrice de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées et elle est Définie par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

II.2.1.3.1 Application de la transformation de Park à la MSAP

En choisissant le repère de PARK lié au champ tournant et après application de la transformation aux équations de flux, de courant et de la tension précédente, on obtient après développement le système décrit par les équations (II.11) et (II.12) ci-dessous :

A) Equations électriques

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + p\omega_m \begin{bmatrix} \Psi_d \\ -\Psi_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$[U_d \ U_q]^T$: Vecteur des tensions statorique dans le repère d_q .

$[I_d \ I_q]^T$: Vecteur des courants statorique dans le repère d_q .

$[\Psi_d \ \Psi_q]^T$: Vecteur des flux dans le repère d_q .

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

L_d, L_q : Inductances propre directe et en quadrature.

B) Equation mécanique

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - F_{VF} \cdot \omega_r) \quad (II.13)$$

C) Equation électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q + \Psi_f I_q] \quad (II.14)$$

Avec,

p : le nombre de pair de pôle.

D) Equation d'état dans le repère tournant d_q

Le modèle d'état du MSAP est obtenu à partir des équations électriques (II.11) et l'équation mécanique (II.13) et il est donné par l'équation (II.15) :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_q \\ \dot{I}_d \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} (-R_s I_q + p \frac{L_d}{L_q} I_d \omega_r - p \frac{\Psi_f}{L_q} \omega_r) \\ \frac{1}{L_q} (-R_s I_d + p \frac{L_q}{L_d} I_q \omega_r) \\ \frac{1}{J} (C_{em} - F_{VF} \cdot \omega_r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} C_r \quad (II.15)$$

II.3 Alimentation du MSAP par un onduleur de tension

L'onduleur assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le domaine de la conversion d'énergie électrique. L'onduleur représente le pré-actionneur car c'est une interface entre le bloc de commande, la source d'énergie de puissance et l'actionneur commandé.

Dans le système étudié, on utilise un onduleur de tension commandé par MLI. Le convertisseur muni d'une commande MLI permet d'obtenir à la sortie de ces dernières trois tensions dont la composante fondamentale est sinusoïdale de fréquence et amplitude compatible au MSAP.

L'onduleur utilisé est constitué de trois bras composés d'interrupteurs électroniques (thyristors), choisis selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en antiparallèle. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la machine une fois les interrupteurs sont ouverts [15].

II.3.1 Modélisation de l'onduleur de tension commandé par MLI

La figure II.5 suivante présente un schéma d'alimentation pour la MSAP avec un onduleur de tension à deux niveaux :

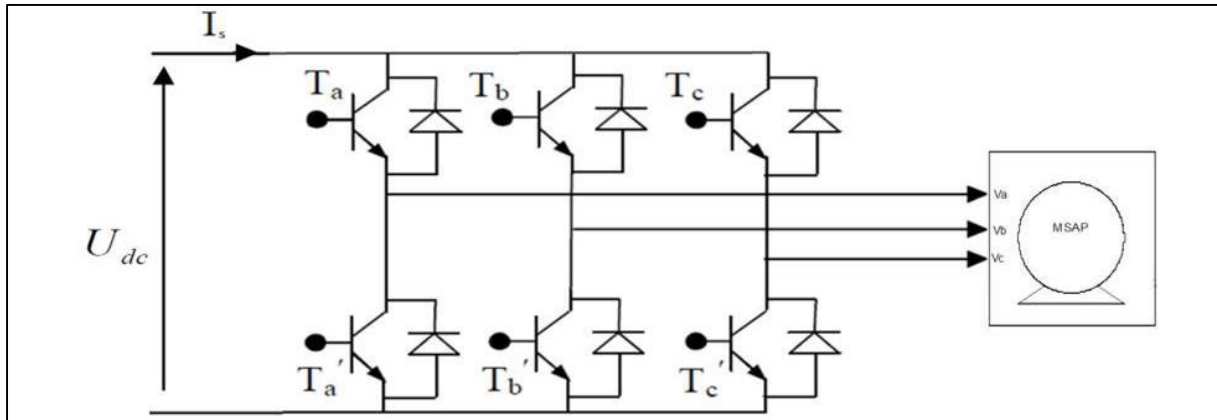


Figure II.5 Schéma de l'association MSAP-onduleur de tension

Avec,

T_i et T'_i avec $i = (a, b, c)$ sont des thyristors.

II.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension ou ces thyristors sont modélisés par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le schéma de cet onduleur est donné par la figure suivante [16] :

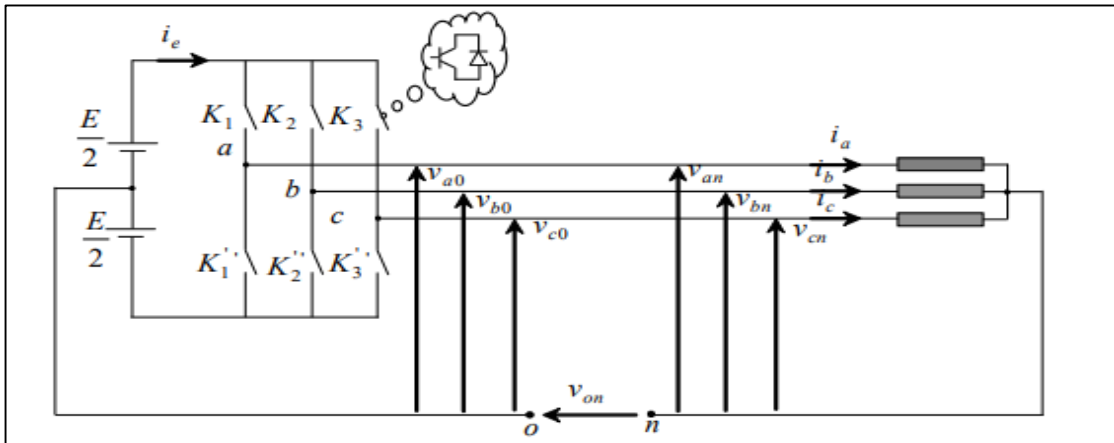


Figure II.6 Schéma équivalent de l'onduleur à MLI.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, en appliquant la loi de Kirchhoff, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (II.16)$$

En faisant la somme des équations du système on obtient :

$$\begin{cases} v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \\ v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \\ v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \end{cases} \quad (II.17)$$

En substituant l'équation (II.17) dans le système (II.16) on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Le principe de la MLI est que les deux interrupteurs de chaque bras de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire alors la tension à la sortie de chaque bras est donnée par la relation suivante :

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{E}{2} & \text{si } K_i \text{ est fermé} \\ -\frac{E}{2} & \text{si } K'_i \text{ est fermé} \end{cases} \quad \text{avec } i=a, b, c \quad (II.19)$$

Les tensions aux à la sortie de l'onduleur de tension commandé par la MLI et qui sont appliquées au stator du MSAP sont données comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Avec « S_i » est l'état de l'interrupteur « K_i », supposé parfait tel que pour le $i^{\text{ème}}$ bras de l'onduleur ($i=a, b, c$), on a :

- $S_i=1$ si l'interrupteur en haut (K_i) est fermé et l'interrupteur en bas (K_i') est ouvert.
- $S_i=0$ si l'interrupteur en bas (K_i') est fermé et l'interrupteur en haut (K_i) est ouvert.

II.3.3 Modulation de largeurs d'impulsions (MLI)

L'onduleur qui est un pré-actionneur (convertisseur) nécessaire pour varier la vitesse du MSAP, il devra délivrer trois tensions compatibles au fonctionnement du MSAP, c'est-à-dire des tensions très proches des sinusoïdes. Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI) et PWM (Pulse Width Modulation en anglais), permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source de tension à fréquence et amplitude fixes (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

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 [17].

La figure II.7 représente le principe de la MLI, ou un signal triangulaire (porteuse) de fréquence importante est comparé à une tension de référence (modulante), et le résultat est un signal logique qui commande les gâchettes des thyristors de l'onduleur :

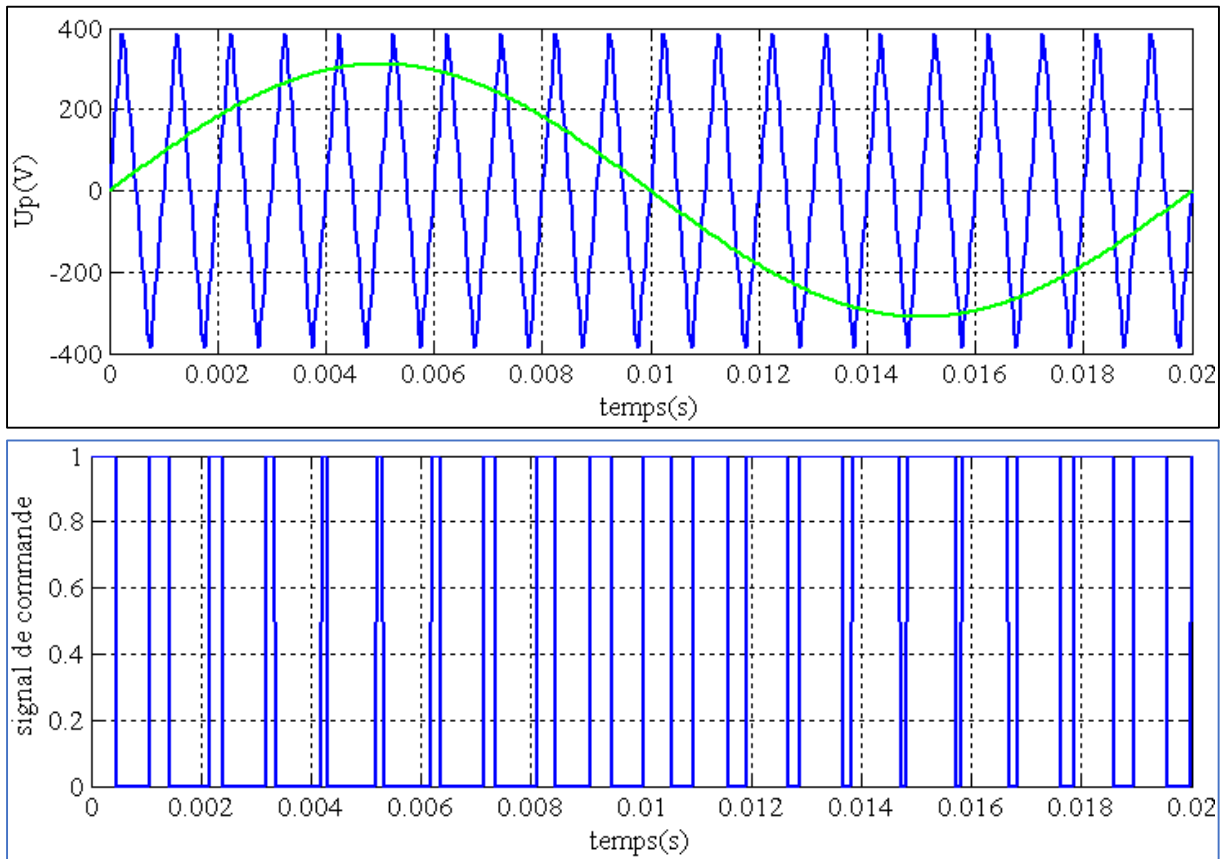


Figure II.7 Tensions de référence et tension de la porteuse

Les propriétés de la commande MLI à porteuse triangulaire sont :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \tag{II.21}$$

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \tag{II.22}$$

Tel que,

m : Indice de modulation, qui devrait être un multiple de trois afin que les fréquences des harmoniques de la tension à la sortie de l'onduleur soient très éloignées de celle de la fondamentale.

f_p : Fréquence de la porteuse.

f_r : Fréquence de la tension de référence.

r : Coefficient de réglage.

V_p : amplitude de la porteuse.

V_{ref} : amplitude de la tension de référence.

II.4 Dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du VE, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui tient compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement [18]. Le comportement d'un véhicule en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par toutes les forces qui lui sont appliquées dans cette direction. La figure (II.8) montre les forces agissant sur un véhicule dans une pente.

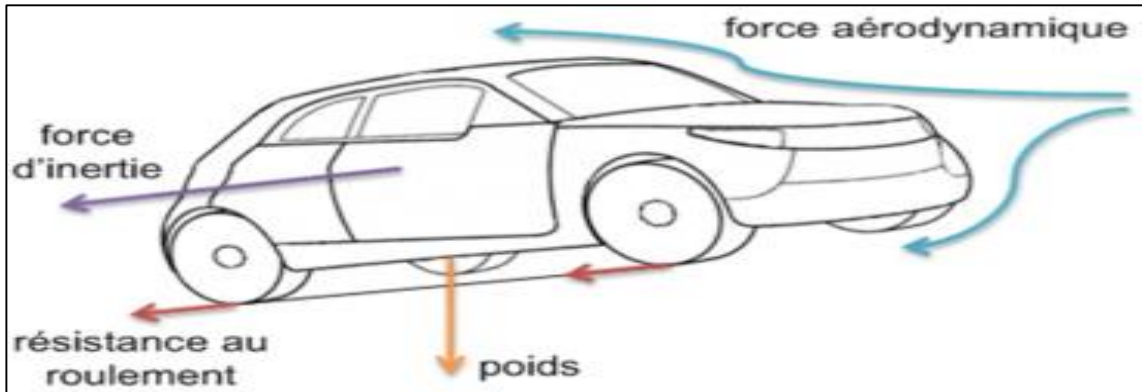


Figure II.8 Représentation des forces agissant sur le véhicule

En appliquant la deuxième loi de Newton au mouvement du véhicule, on obtient :

$$F_{tot} - F_{res} = M \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.23})$$

v : Vitesse du véhicule.

F_{tot} : Effort de traction totale du véhicule.

F_{res} : Force résistante totale.

M : masse totale du véhicule.

L'expression de la force totale est donnée par la relation suivante :

$$F_{tot} = F_r + F_a + F_g + F_{acc} \quad (\text{II.24})$$

Avec,

F_r : Force de résistance au roulement.

F_a : Force résistante à la pénétration dans l'air.

F_g : Force résistante due à la pente à gravir.

F_{acc} : Force d'accélération.

II.4.1 Force de roulement

La force F_r de résistance de roulement est produite par le pneu au contact de la chaussée. Elle est liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement, le coefficient de roulement C_{rr} a une valeur moyenne de « 0.01 ». Il dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier [19][20].

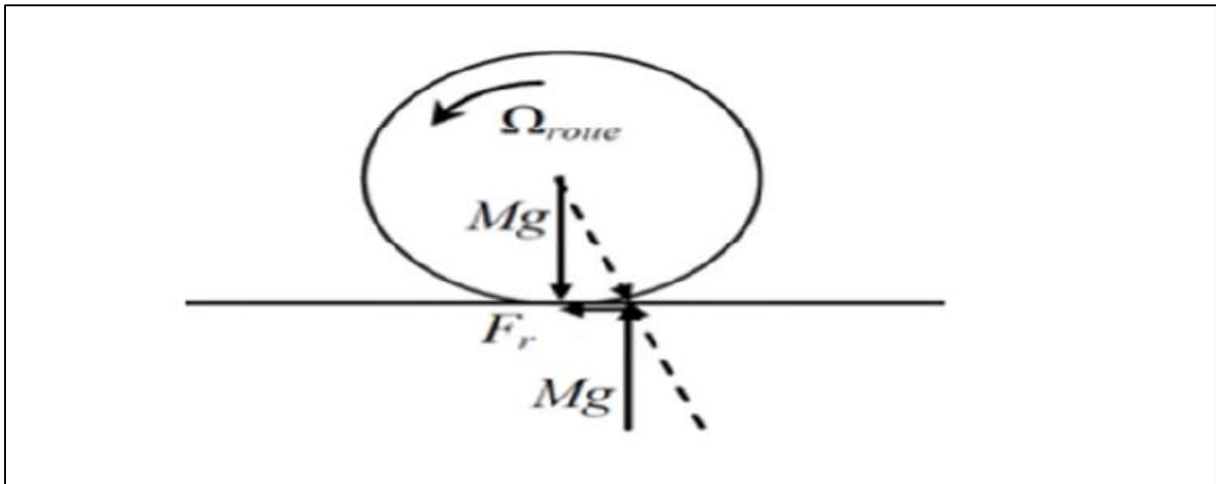


Figure II.9 Force de roulement sur la roue [21].

Elle est donnée par l'équation :

$$F_r = MgC_{rr} \quad (\text{II.25})$$

II.4.2 Force aérodynamique

La force aérodynamique est proportionnelle à la masse volumique de l'air, au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale du véhicule et à son coefficient de pénétration dans l'air C_x . La figure (II.10) donne l'allure de la force aérodynamique en fonction de C_x et cette force est exprimée par la relation suivante :

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_x (V - V_{vent})^2 \quad (\text{II.26})$$

avec,

ρ_{air} : Densité volumique de l'air.

S_f : Section frontale du véhicule.

V : Vitesse du véhicule.

V_{vent} : Vitesse du vent.

C_x : Coefficient de pénétration dans l'air.

Le coefficient C_x peut être estimé à [22] :

- 0.2 pour un véhicule ayant un très bon profil.
- 0.3 pour un véhicule ayant un bon profil.
- 0.5 pour un véhicule typique.
- 0.7 pour une camionnette.

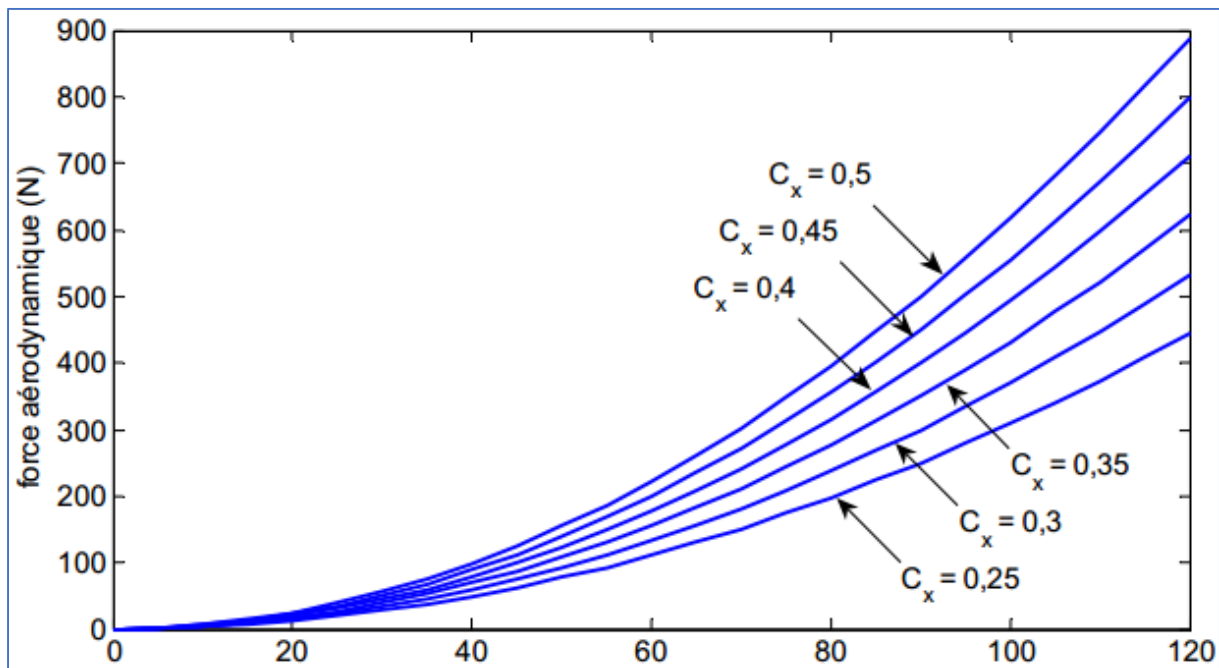


Figure II.10 Force aérodynamique pour différentes valeurs de C_x [23].

II.4.3 Force d'inclinaison

C'est la force de résistance due à la pente d'angle α_p , à gravir (force liée au profil de la route). La caractérisation du profil de la route sur un parcours donné, nécessite la cartographie de la pente en fonction de la distance, ce qui permet de déduire la pente à chaque instant [15]. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$F_g = Mg * \sin(\alpha_p) \quad (\text{II.27})$$

α_p : angle de la pente.

Pour simplifier les calculs, $\sin(\alpha_p)$ est souvent remplacé par la pente « p », pour $p < 20\%$, alors on écrit :

$$F_g = Mgp \quad (\text{II.28})$$

La pente en pourcentage (%) est définie comme l'élévation verticale en mètres pour une distance de 100 mètres :

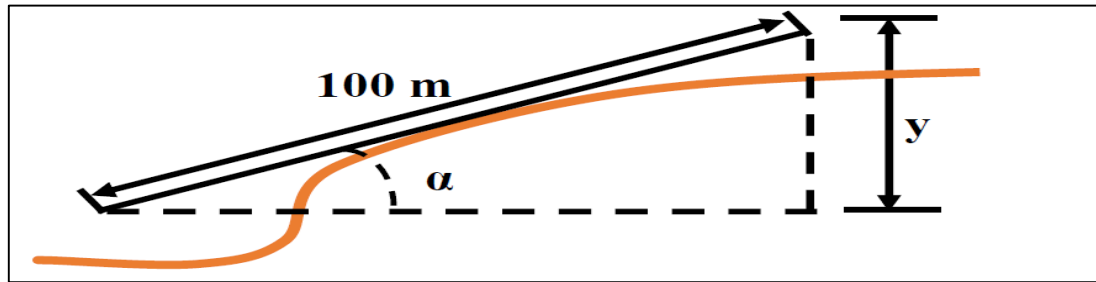


Figure II.11 Pente sur la route.

Si « y » représente l'élévation verticale, la pente est donnée par la relation suivante [24]:

$$P(\%) = \frac{y(m)}{100} \times 100(\%) \quad (\text{II.29})$$

II.4.4 Force d'accélération

La force due à l'accélération F_{acc} assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Elle est obtenue par le produit entre la masse du véhicule et l'accélération imposée par le conducteur [23].

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{acc} = M \frac{dv}{dt} = M\gamma \quad (\text{II.30})$$

avec,

γ : Accélération du véhicule.

La puissance à fournir aux roues est donnée par l'expression suivante :

$$P = F_{tot}V \quad (\text{II.31})$$

Le couple de traction total est exprimé comme suit :

$$C_{tot} = F_{tot}R \quad (\text{II.32})$$

Avec,

R : rayon de la roue.

Le couple résistant appliqué au véhicule s'écrit :

$$C_r = F_R R \quad (\text{II.33})$$

Avec,

$$F_R = F_r + F_a + F_g \quad (\text{II.34})$$

F_R : Force de résistance totale.

La vitesse angulaire des roues est exprimée par la relation suivante :

$$\omega_{roue} = \frac{V}{R} \quad (\text{II.35})$$

II.5 Couplage entre les modèles mécanique et électrique du VE

La dynamique du véhicule étudié est couplée à la motorisation électrique à travers un réducteur. La figure (II.12) représente le mécanisme de réduction :

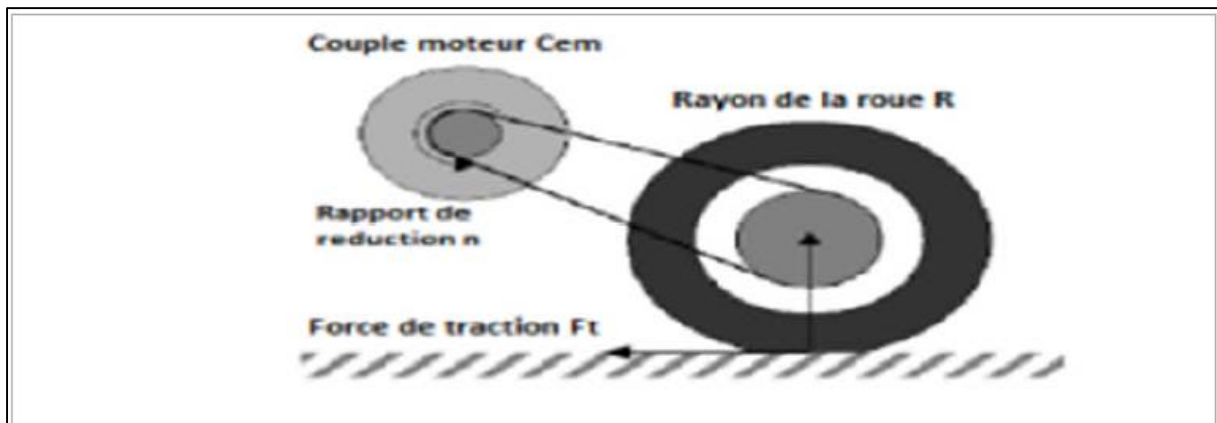


Figure II.12 Mécanisme du réducteur [20].

Le réducteur doit être dimensionné de telle manière que le couple transmissible soit toujours supérieur au couple résistant. Il permet l'adaptation des vitesses de rotation et des couples entre l'arbre de l'actionneur électrique et les roues.

L'équation dynamique du mouvement du véhicule est :

$$M\dot{V} = F_{tot} - F_{res} = F_{fr} + F_{ar} - F_{res} \quad (\text{II.36})$$

F_{fr} : Force de traction longitudinal des roues frontales.

avec,

$F_{fr} = 0$ si le véhicule est propulsé par les deux roues arrière

La vitesse longitudinale du véhicule est donnée par :

$$V = R \cdot \omega_{roue} \quad (\text{II.37})$$

La relation entre la vitesse du moteur et la vitesse de la roue est exprimé par :

$$\omega_r = N \cdot \omega_{roue} \quad (\text{II.38})$$

N : Le rapport de réduction de la vitesse.

Alors, l'accélération longitudinale est déduite comme suit :

$$\dot{V} = \frac{R}{N} \dot{\omega}_r \quad (\text{II.39})$$

On remplaçant (II.39) dans (II.36) on obtient :

$$M \cdot \frac{R}{N} \dot{\omega}_r = F_{ar} - F_{res} \quad (\text{II.40})$$

Alors :

$$F_{ar} = M \cdot \frac{R}{N} \dot{\omega}_r + F_{res} \quad (\text{II.41})$$

L'équation dynamique de la rotation de la roue motrice est donnée par :

$$J\dot{\omega}_{roue} = C_t - RF_{ar} \quad (\text{II.42})$$

C_t : Couple de traction de la roue.

En substituant (II.40) dans (II.41), on obtient :

$$J\dot{\omega}_{roue} = C_t - R \left(M \cdot \frac{R}{N} \dot{\omega}_r + F_{res} \right) \quad (\text{II.43})$$

Le couple de traction de la roue est donné comme suit :

$$C_t = J\dot{\omega}_{roue} + R \left(M \cdot \frac{R}{N} \dot{\omega}_r + F_{res} \right) \quad (\text{II.44})$$

L'équation de rotation du moteur est exprimée comme suit :

$$J\dot{\omega}_r + F_{VF}\omega_r = C_{em} - \frac{C_t}{N} \quad (\text{II.45})$$

En remplaçant (II.44) dans (II.45) on obtient :

$$J\dot{\omega}_r + F_{VF}\omega_r = C_{em} - \frac{J\dot{\omega}_{roue} + R \left(M \cdot \frac{R}{N} \dot{\omega}_r + F_{res} \right)}{N} \quad (\text{II.46})$$

Donc :

$$\left(J + \frac{J}{N^2} + M \cdot \frac{R^2}{N^2} \right) \dot{\omega}_r + F_{VF}\omega_r = C_{em} - \frac{R}{N} F_{res} \quad (\text{II.47})$$

On obtient après calcul :

$$J_e \dot{\omega}_r + F_e \omega_r = C_{em} - C_{rm} \quad (\text{II.48})$$

Avec,

$$J_e = J + \frac{J}{N^2} + M \cdot \frac{R^2}{N^2} \quad (\text{II.49})$$

$$F_e = F_{VF} \quad (\text{II.50})$$

$$C_{rm} = \frac{R}{N} F_{res} \quad (\text{II.51})$$

En insérant les équations électriques du MSAP, le modèle global du véhicule s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_s}{L_q} x_3 + p \frac{L_d}{L_q} x_1 x_2 - p \Psi_f x_1 + \frac{1}{L_q} V_q \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_s}{L_d} x_2 + p \frac{L_q}{L_d} x_1 x_3 + \frac{1}{L_d} V_d \\ \dot{x}_3 = -\frac{F_e}{J_e} x_1 + \frac{3}{2J_e} (p \Psi_f x_3 + p(L_d - L_q) x_2 x_3) - \frac{1}{J_e} C_{rm} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu la modélisation de la MSAP. Ces équations ont été développées dans le référentiel naturel abc , puis ramenées dans le référentiel de Park, dans l'objectif d'établir les modèles d'états électriques et mécaniques de la machine. On a modélisé ensuite, le convertisseur statique choisis qui est l'onduleur en tension commandé par la MLI. La dernière partie a été consacré à l'étude de la dynamique du VE, où on a présenté les différentes forces auxquelles le véhicule est soumis, puis on a élaboré le modèle d'état complet, composé de la dynamique du VE et du MSAP.

Chapitre III

Application de la commande vectorielle

III.1 Introduction

La commande vectorielle aussi appelée commande par orientation de flux (en anglais Field Oriented Control « FOC »). Cette commande permet de forcer le comportement des moteur à courant alternatif et en particulier le MSAP à celui du moteur à courant continu à excitation séparée, où la force magnétomotrice de l'induit établie un angle de 90° avec l'axe du flux de l'inducteur et ceci quel que soit la vitesse. La commande vectorielle contrôle donc les courants des phases statoriques en fonction du module et de l'angle désiré pour s'assurer que ceux-ci soient sinusoïdaux et toujours en quadrature avec le flux statoriques. Dans une MSAP, le module du flux rotorique est fixe et le module des courants statoriques est fixé selon le couple désiré, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le courant générant le couple. Ainsi, nous obtenons un modèle de la machine où le flux et le couple électromagnétique sont découplés, de sorte à ce que l'on puisse agir sur ce dernier sans influencer sur le flux, puisque le couple ne dépend que du courant en quadrature (I_q). Cela va permettre l'obtention des performances considérables relatives à la réponse du système en régime dynamique semblable à celle des machines à courant continu [25].

III.2 Principe de la commande

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée, elle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axe (d, q) et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple [26].

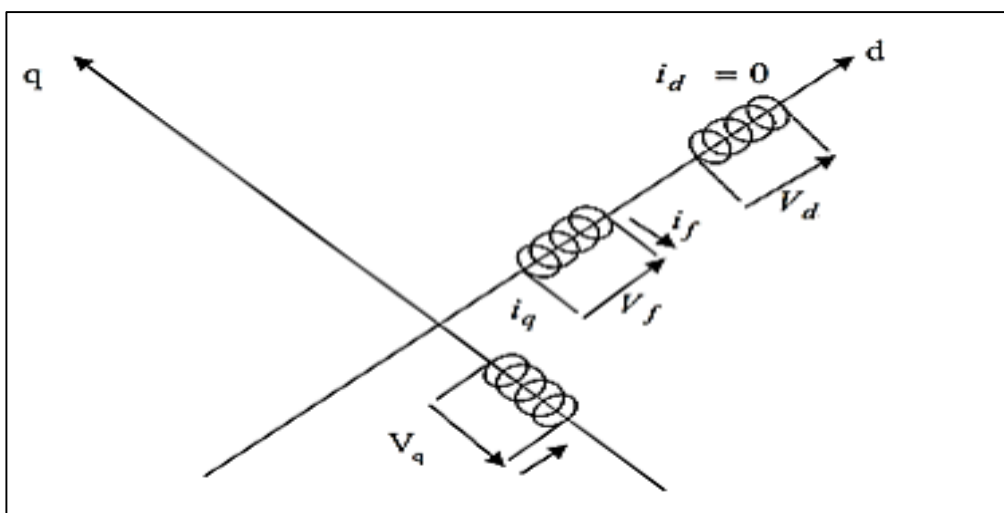


Figure III.1 Commande par orientation du champ de la MSAP

L'équation du couple électromagnétique C_{em} dans le repère dq montre que celui-ci dépend des deux courants I_q et I_d . Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante I_d nulle. Cette stratégie permet l'obtention d'un modèle simplifié où la relation entre le couple et le courant est linéaire. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée [27].

L'expression du couple devient :

$$I_d=0 \quad C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_q \quad (\text{III.1})$$

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

Donc :

$$C_{em} = KI_q \quad (\text{III.2})$$

Avec,

$$K = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_f \quad (\text{III.3})$$

La mise en œuvre de la commande vectorielle va être effectuée en réalisant une boucle de réglage de courant I_d maintenu à une valeur de référence nulle. Ce qui nécessite un découplage dans le cas d'une commande linéaire.

III.2.1 Avantages de la commande vectorielle

Les avantages de la commande vectorielle sont :

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

III.2.2 Inconvénients de la Commande vectorielle

Les Inconvénients de la Commande vectorielle sont :

- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.

- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.

III.3 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

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

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \quad (\text{III.4})$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_q \omega I_d + \Psi_f \omega \quad (\text{III.5})$$

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

Avec,

ω : est la pulsation électrique.

Elle est exprimée par l'expression suivante : $\omega = p \cdot \omega_r$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) I_d I_q + \Psi_f \omega \quad (\text{III.7})$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé.

Le but principal de la commande vectorielle est de ramener le fonctionnement des machines à courants alternatifs similaire à celle d'une machine à courant continu.

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

$$V_d = -L_q \omega I_q \quad (\text{III.8})$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \Psi_f \omega \quad (\text{III.9})$$

III.4 Découplage

Le modèle de MSAP dans le repère de Park résulte en un système d'équations différentiel où les courants sont couplés à cause des termes de couplage (non linéaires) $(p\omega_r L_q I_q)$ $(p\omega_r L_d I_d)$:

$$V_d = \left[R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \right] - p\omega_r L_q I_q \quad (\text{III.10})$$

$$V_q = \left[R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \right] + p\omega_r (L_d I_d + \Psi_f) \quad (\text{III.11})$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette méthode consiste à réaliser des retours de sorties linéarisants afin d'éliminer le couplage par annulation (si on utilise dans le terme de retour le courant et la vitesse mesurés) ou d'une manière amortie (si on utilise dans le terme de retour le courant et la vitesse désirés) ce qui découple les axes d et q [28].

III.4.1 Découplage par compensation

La commande en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande MLI de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes d et q [29].

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = \left(R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \right) - \omega L_q I_q \\ V_q = \left(R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \right) + \omega (L_d I_d + \Psi_f) \\ \omega = p \cdot \omega_r \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

La figure suivante représente le couplage entre l'axe «d» et «q» :

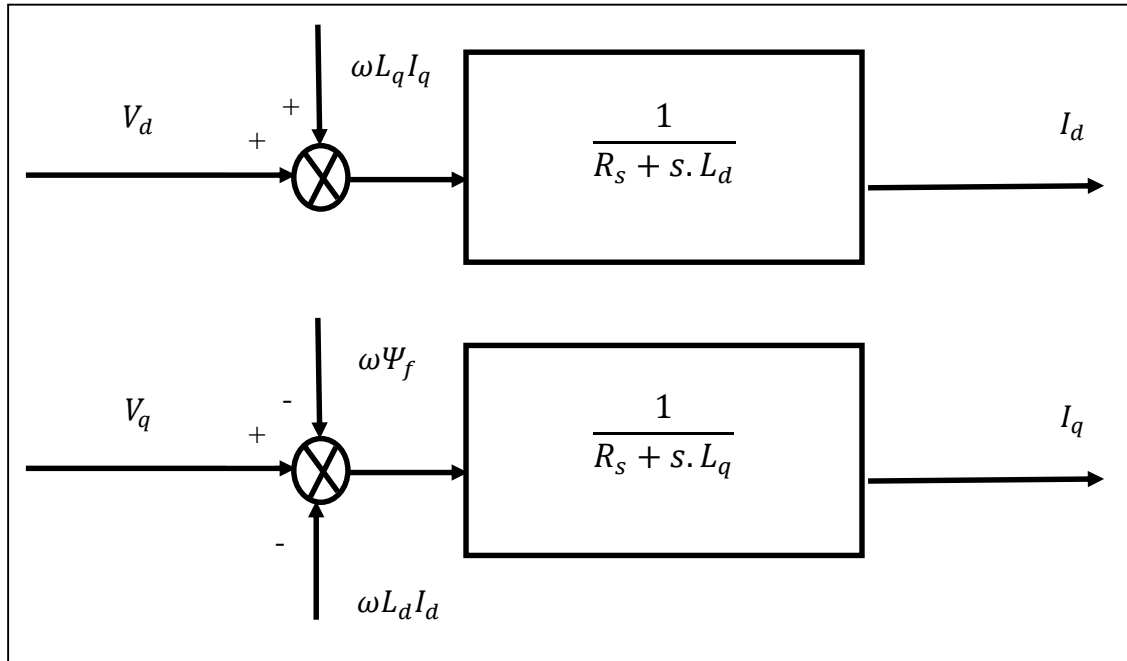


Figure III.2 Description de couplage

Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes «d» et «q», on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires e_d et e_q

Avec,

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q I_q \\ e_q = \omega(L_d I_d + \Psi_f) \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

A partir des équations (III.12) et (III.13) on a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

Avec,

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + S.L_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + S.L_q)I_q \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

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 de V_{q1} . À partir de l’équation (III.15) les courants I_d et I_q s’écrivent (dans le plan complexe) de la façon suivante :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + s.L_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + s.L_q} \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

Avec,

S : Opérateur de Laplace.

Avec deux régulateurs PI, on force les courants statoriques à leurs grandeurs de référence (désirées).

Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure ci-dessous [30] :

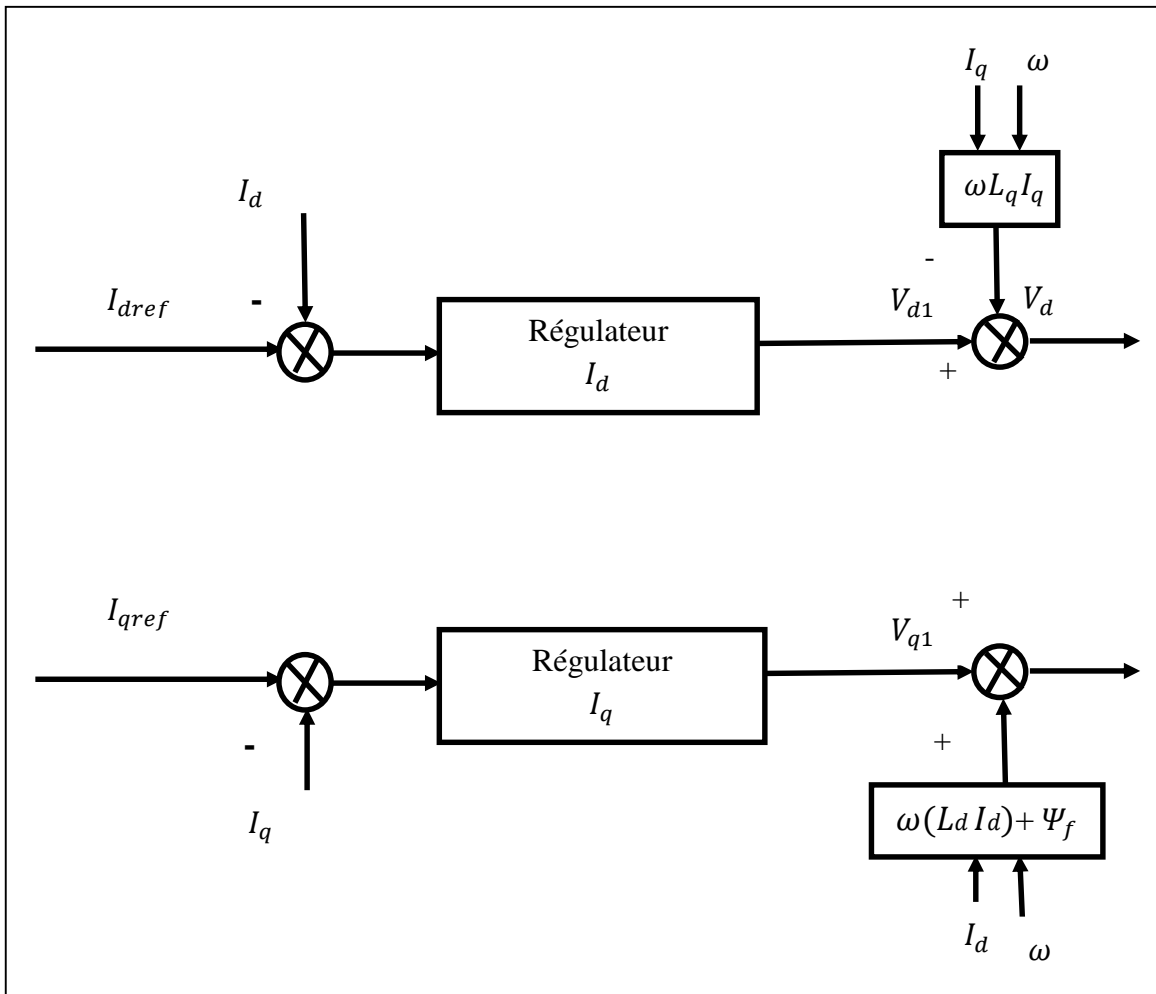


Figure III.3 Découplage par compensation et régulation des courants.

Avec,

V_{d1} : La tension à la sortie de régulateur PI de courant " I_d ".

V_{q1} : La tension à la sortie de régulateur PI de courant " I_q ".

La figure ci-dessous représente la machine avec les signaux qui réalisent le découplage et la régulation des courants :

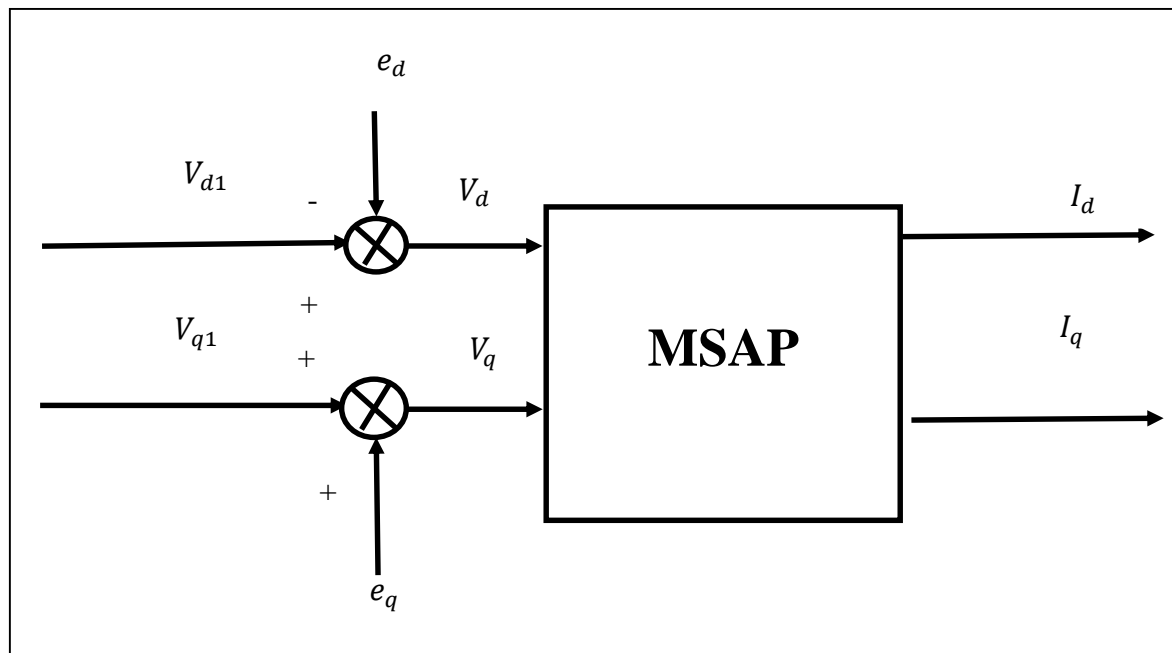


Figure III.4 Schéma de compensation

III.5 Calcul des régulateurs PI

La régulation des courants est réalisée par deux régulateurs PI appliqués sur le MSAP après compensation des termes de couplage entre les courants et la vitesse. De même la vitesse rotorique est régulée par un PI.

III.5.1 Calcul des régulateurs de courant :

Le schéma de régulation des courants pour le MSAP découplée avec la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure suivante :

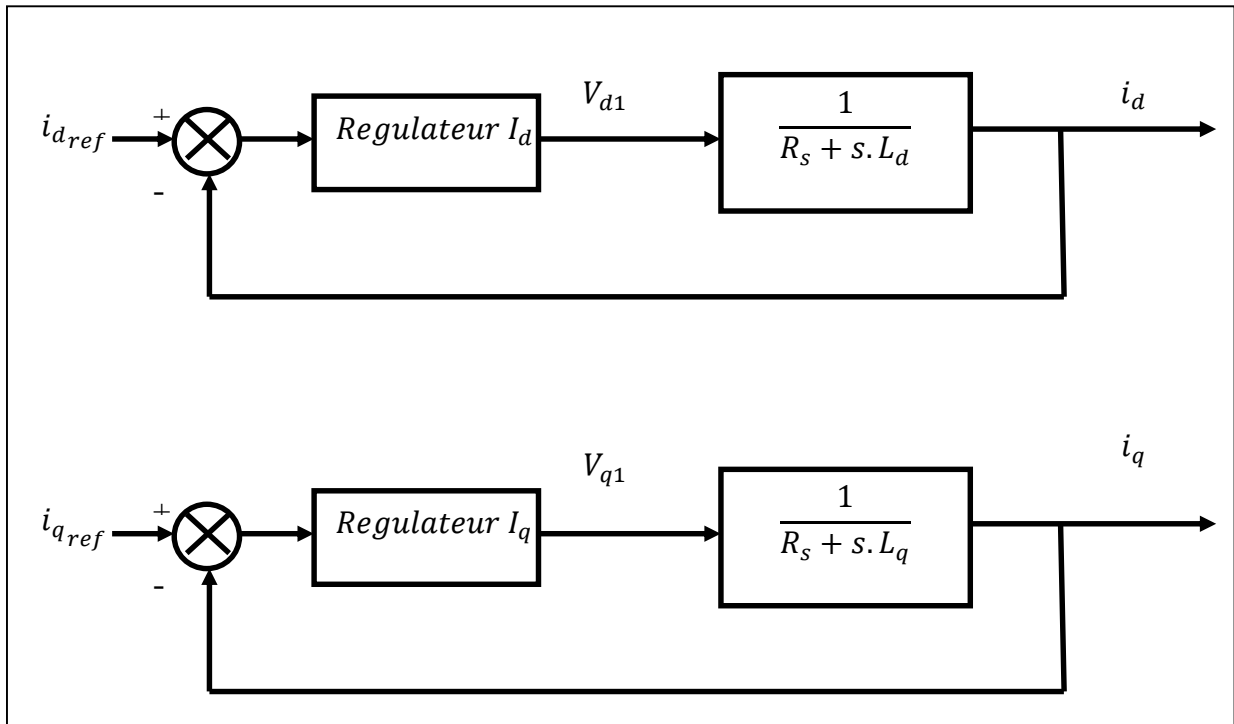


Figure III.5 Boucle de régulation de courant

Les régulateurs (Reg_d) et (Reg_q) sont des PI donnés dans le plan complexe par les fonctions suivantes :

$$Reg_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \tag{III.17}$$

$$Reg_q(s) = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s \right) \tag{III.18}$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$FTIBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} \tag{III.19}$$

$$FTIBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s \right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} \tag{III.20}$$

Le principe consiste à compenser les constantes de temps électriques des deux sous systèmes et d'imposer celles désirées en choisissant :

$$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = T_d \tag{III.21}$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = T_q \tag{III.22}$$

Les fonctions de transfert en boucle fermé (FTBF) sont données par :

$$FTIBO_d = \frac{1}{(1+\tau_d s)} = \frac{i_d}{i_{d_{ref}}} \quad (III.23)$$

$$FTIBO_q = \frac{1}{(1+\tau_q s)} = \frac{i_q}{i_{q_{ref}}} \quad (III.24)$$

Avec,

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad (III.25)$$

$$\tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}} \quad (III.26)$$

Les boucles de courants impose une dynamique d'un système du premier ordre pour chaque sous système, en choisissant les valeurs des paramètres « τ_d » et « τ_q ». Ces derniers sont choisis de manière à ce que la constante de temps en boucle ouverte.

III.5.2 Calcul de régulateur de vitesse

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

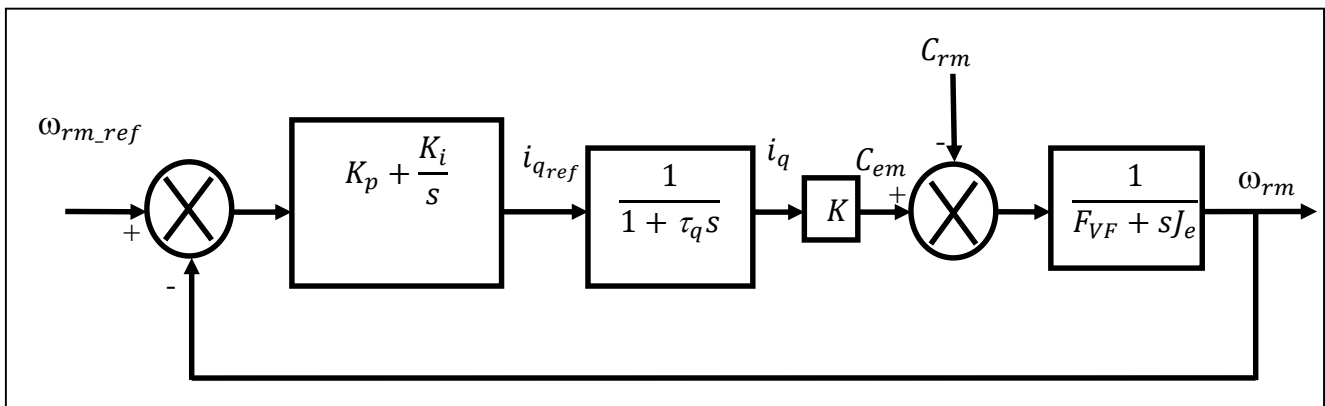


Figure III.6 Boucle de régulation du la vitesse

On a ajouté à cette boucle un filtre pour éliminer le dépassement dû à l'existence d'un (Zéro) dans la FTBF du Système (machine + régulateur PI). La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (III.27)$$

La fonction de transfert du sous-système mécanique en boucle ouverte (sachant que $C_r = 0$) est donnée par :

$$FTBO_{\omega_r} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \frac{K}{(1+\tau_d s)(J_e s + F_{VF})} \quad (\text{III.28})$$

Avec,

$$K = \frac{3}{2} p \Psi_f \quad (\text{III.29})$$

La fonction du sous-système mécanique en boucle fermée est donnée par :

$$FTBO_{\omega_r} = \frac{\omega_{rm}(s)}{\omega_{rm_{ref}}(s)} = \frac{K(K_p s + k_i)}{J_e \tau_q s^3 + (J_e + F_{VF} \tau_q) s^2 + (K K_p + F_{VF}) s + K K_i} \quad (\text{III.30})$$

Si on néglige $J_e \tau_q$ et $F_{VF} \tau_q$ devant J_e , la $FTBO_{\omega_r}$ possèdera une dynamique de deuxième ordre, Par identification à la forme canonique du deuxième ordre, l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1 \quad (\text{III.31})$$

Avec,

$$K_i = \frac{J_e \omega_0^2}{K} \quad (\text{III.32})$$

$$K_p = \frac{2J_e \xi \omega_0 - F_{VF}}{K} \quad (\text{III.33})$$

Où :

ω_0 : Pulsation propre du système.

ξ : Facteur d'amortissement.

III.6 Essai de simulation de poursuite de trajectoire

Dans cet essai on a appliqué un profil de vitesse variable afin de tester le suivi de consigne.

Une variation de pente (17%) est appliquée à l'instant $t=5s$.

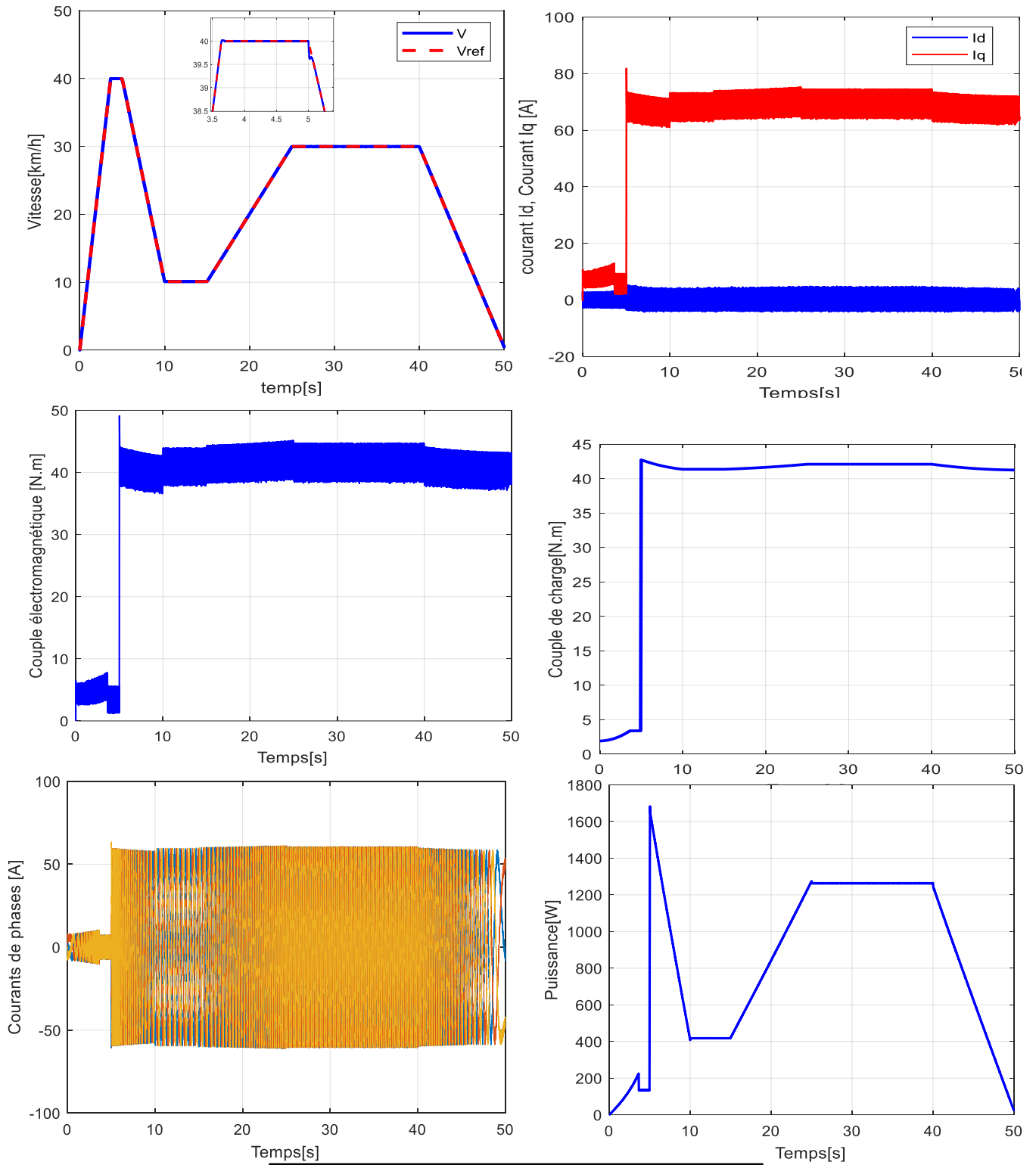


Figure III.7 Test de poursuite de trajectoire

On remarque que :

- La vitesse suit la vitesse de référence.
- Le couple présente de faibles oscillations dû à l'augmentation du couple de charge.
- Le courant en quadrature à la même allure que le couple électromagnétique, pendant que le courant direct est fixé à zéro, cela est dû à la commande vectorielle appliquée

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande simple de sa vitesse.

D'après les résultats obtenus, on constate que la commande vectorielle associée aux régulateurs PI d'un MSAP alimenté avec un onduleur de tension assure de bonnes performances, où le temps de réponse est faible, le rejet de perturbation est rapide, une erreur statique nulle en régime permanent et un petit dépassement ou oscillations transitoires.

Chapitre IV

Gestion de puissance d'un véhicule hybride

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord modéliser les deux composants du système de stockage (pile à combustible et batterie), puis on présente la méthode de gestion d'énergie que nous avons appliqué au VE, en détaillant les différents modes de fonctionnement de ce dernier ainsi que l'organigramme de la gestion, on termine par la présentation des résultats de simulation sous Matlab/simulink.

IV.2 Modélisation des composants du système de stockage

IV.2.1 Modélisation de la pile à combustible

Pour cette modélisation les hypothèses considérées sont les suivantes [31] [32] :

- ✓ Il est supposé que toute la cellule se comporte de la même manière.
- ✓ Les gaz d'entrée sont de dihydrogène et du dioxygène pur.
- ✓ La diffusion est prise en régime stationnaire.
- ✓ Aucune réaction chimique parasite n'est considérée (rendement faradique unitaire).
- ✓ Le modèle décrit les conditions normales de fonctionnement c'est-à-dire que le vieillissement et d'éventuelles détériorations de la pile ne sont pas pris en compte.
- ✓ La gestion de l'eau n'est pas prise en compte dans notre cas.
- ✓ Les produits sont évacués continuellement.
- ✓ Les paramètres : température, pression, hydratation sont connus et constants.

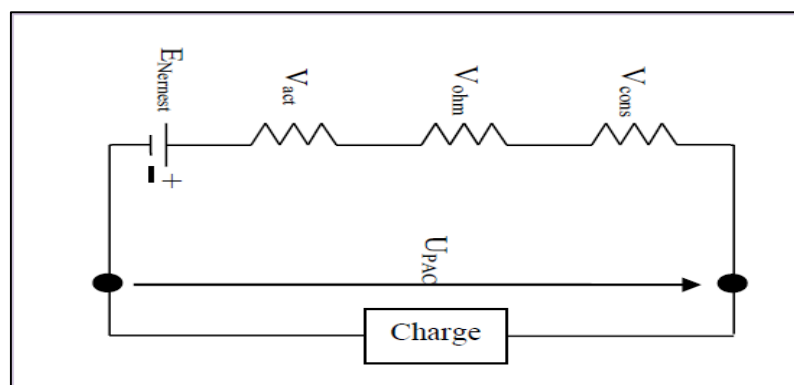


Figure IV.1 Schéma équivalent de la pile PEMF

La tension à la sortie est calculée par cette expression :

$$U_{pac} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (IV.1)$$

V_{act} : Polarisation d'activation.

V_{ohm} : Polarisation ohmique.

V_{conc} : Polarisation de concentration .

E_{Nernst} Est donnée par l'équation suivante:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 * 10^{-3} \times (T - 298.15) + 4.3085 * 10^{-5} \times T \left[\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*) \right] \quad (IV.2)$$

T : Température opératoire absolue de la pile(K).

$P_{H_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm).

$P_{O_2}^*$: Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

IV.2.1.1 Polarisation d'activation

Ces pertes sont résultantes des faibles densités du courant, la décroissance logarithmique du potentiel est déterminée principalement par la somme des surtensions à l'anode et à la cathode correspondant aux équations de Butler-Volmer et par la cinétique lente de transfert de charge dans les zones actives [33].

La relation entre les pertes d'activation et la densité du courant est exprimé dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \times T + \varepsilon_3 \times T \times \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \times T \times \ln(I_{PAC}) \quad (IV.3)$$

I_{PAC} : Le courant de fonctionnement de la pile en ampère (A).

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ et ε_4 : Les coefficients paramétrique appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible PEMFC.

$$C_{O_2}^* = \frac{P_{O_2}^*}{5.08 * 10^5 * e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (IV.4)$$

$C_{O_2}^*$ Représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm³) décomposé dans un film d'eau à $I_{PAC} = 0$ l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry.

Étant donné qu'on utilise de l'oxygène pur, donc :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times (1 - X_{H_2O}^{Sat}) \quad (IV.5)$$

P_{cath} : La pression de l'oxygène à la cathode.

$X_{H_2O}^{Sat}$: La fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée \approx à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2}^* = P_{cath} \times \left(\frac{1}{2}\right) \quad (IV.6)$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur, qui ne contient pas du monoxyde de carbone.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \left(1 - \frac{1}{2} \cdot X_{H_2O}^{Sat}\right) \quad (IV.7)$$

P_{anode} : La pression de l'hydrogène a l'anode.

$$P_{H_2}^* = P_{anode} \times \frac{3}{4} \quad (IV.8)$$

IV.2.1.2 Polarisation ohmique

Ces pertes sont liées aux résistances électroniques dans les plaques bipolaires, électrodes et connexions en série de l'assemblage et liée aussi aux résistances ioniques internes, diminuant la tension entre électrodes, elles sont exprimées par l'utilisation de la loi d'Ohm :

$$V_{ohm} = I_{PAC} \times (R_M + R_C) \quad (IV.9)$$

R_C : La résistance équivalente de contact a la conduction des électrons.

R_M : La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons. Elle est représentée par la relation suivante :

$$R_M = \frac{l \times r_M}{A} \quad (IV.10)$$

l : L'épaisseur de la membrane (μm).

R_M : La résistance spécifique de la membrane.

r_M : Est obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303}\right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634 - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right) \right] \times \exp\left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T}\right) \right]} \quad (IV.11)$$

Le terme $\left(\frac{181.6}{\delta_{H_2O/SO_3} - 0.634}\right)$ représente la résistance spécifique de la membrane ($\Omega.cm$) à et à une température de 30 °C ($T = 303$ K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

δ_{H_2O/SO_3} - Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 [31].

A : La surface active de la pile.

En remplaçons les relations, l'expression de la polarisation ohmique devient :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{181.6 \times \left[1 + 0.03 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \times \left(\frac{T}{303} \right)^2 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\delta_{H_2O/SO_3} - 3 \times \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \times \exp \left[4.18 \times \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] \times l \times A \times R_C \quad (IV.12)$$

IV.2.1.3 Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité du courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (IV.13)$$

B : constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement.

J : La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm^2).

J_{max} : La densité du courant maximale.

Par conséquent la tension E_s de (n) piles unitaires reliées entre elle en série formant un assemblage est donné par la relation suivante :

$$E_s = n \times E_{PAC} \quad (IV.14)$$

IV.2.2 Simulation et résultats de la PEMFC

Après la simulation du modèle de la PEMFC réalisé sous Matlab/Simulink, on a obtenu les allures suivantes de la tension et de la puissance :

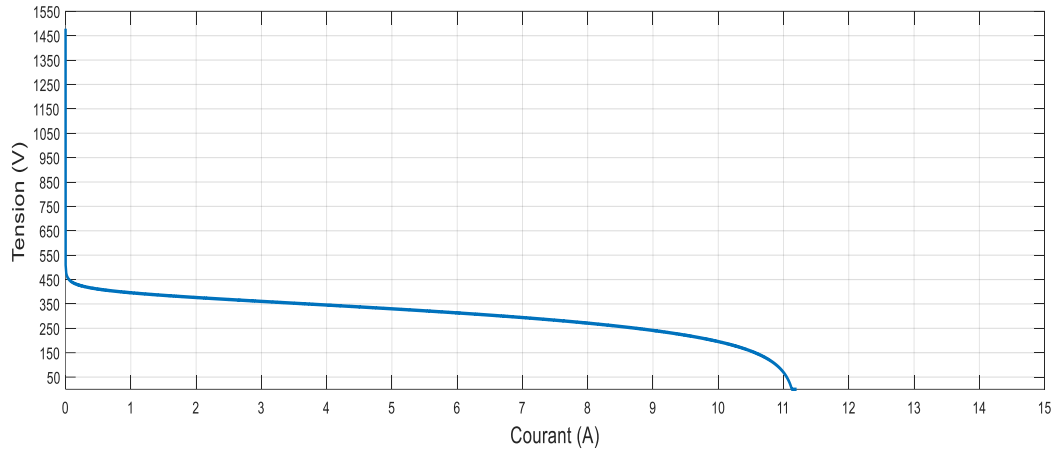


Figure IV.2 Allure de la tension

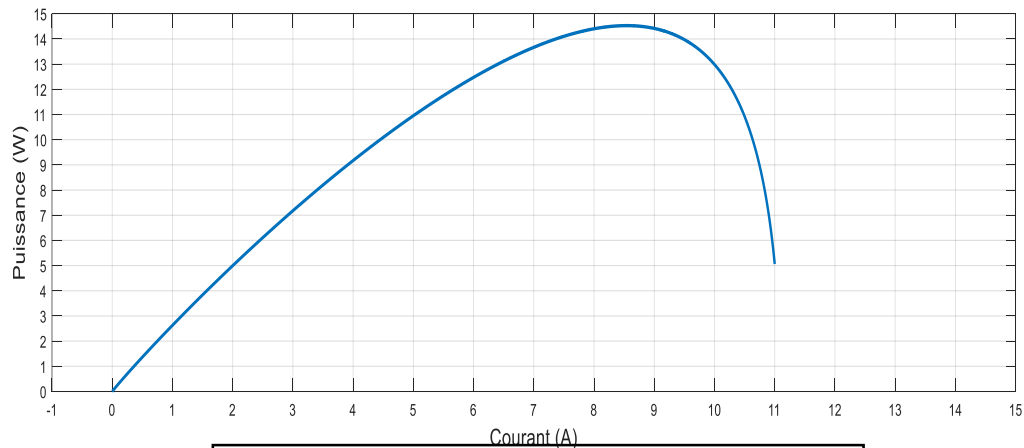


Figure IV.3 Allure de la puissance

IV.2.3 Modélisation d'un système de stockage (batterie)

Une batterie est un accumulateur d'énergie électrochimique réversible qui possède deux modes de fonctionnement : la décharge où la batterie transforme de l'énergie chimique en énergie électrique et la recharge où l'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie chimique. En général, une batterie est composée d'un ensemble de cellules connectées entre elle en série et/ou en parallèle. De nombreux couples électrochimiques existent sur le marché, par exemple Plomb acide et Nickel-cadmium [34].

Ce modèle est basé sur le schéma électrique ci-dessous, la batterie est décrite par deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres: la tension à vide E_b et sa résistance interne R_b .

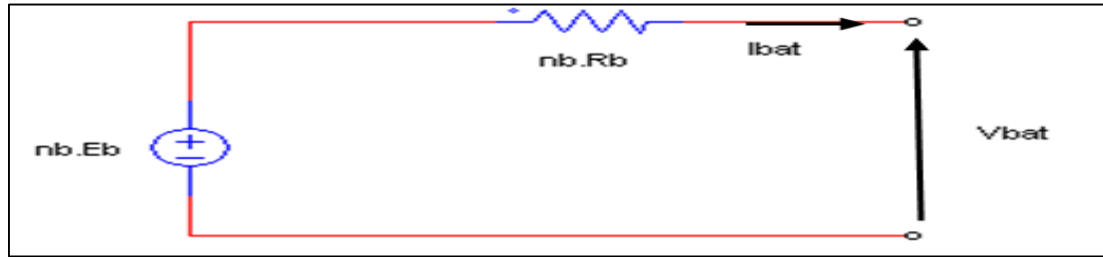


Figure IV.4 Schéma équivalent du modèle CIEMAT

A partir de ce schéma la tension de la batterie est définie par l'équation suivante :

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_b I_{bat} \quad (IV.15)$$

IV.2.3.1 Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie C_{bat} que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge $\overline{I_{bat}}$. son expression est établie à partir du courant I_{10} correspondant au régime de fonctionnement C_{10} .

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 * \left(\frac{I_{bat, moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} * (1 + 0.005 * \Delta T) \quad (IV.16)$$

ΔT : Représente le réchauffement de l'accumulateur par rapport a une température ambiante de 25°C.

La capacité C_{10} est exprimée par la loi suivante :

$$C_{10} = 10 * I_{10} \quad (IV.17)$$

IV.2.3.2 L'état de charge EDC

La Capacité C_{bat} sert de référence pour son évaluation, il est formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie Q_d .

EDC de la batterie est donné par l'équation suivante :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (IV.18)$$

L'évolution temporelle de Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie, et elle est défini par l'équation ci-dessous :

$$Q_d = I_{bat} * t \quad (IV.19)$$

t : La durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} .

IV.2.3.2.1 Equations de la tension de charge

L'équation de la tension en régime de charge est définie par l'équation suivante, elle est fonction de l'état de charge et du courant de la batterie [35].

$$V_{bat,char} = n_b * [2 + 0,16.EDC] + n_b * \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} * \left(\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) * (1 - 0,025. \Delta T) \tag{IV.20}$$

IV.2.3.2.2 Equations de la tension de décharge

L'équation de la f.e.m de la batterie en régime de décharge est comme suit (équation IV.21), elle est fonction de l'état de charge [35].

$$E_{b,déch} = 1.965 + 0.12EDC \tag{IV.21}$$

Tandis que la résistance interne de la batterie dans ce régime il est exprimé par [35] :

$$R_{b,déch} = R_{bat} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \tag{IV.22}$$

Et la tension de la batterie dans ce régime sera définit comme suit [35] :

$$V_{bat,déch} = n[1.965 + 0.12EDC] - n \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \tag{IV.23}$$

Le modèle de la batterie est réalisé sous MATLAB/Simulink et il est présenté sur la figure suivante :

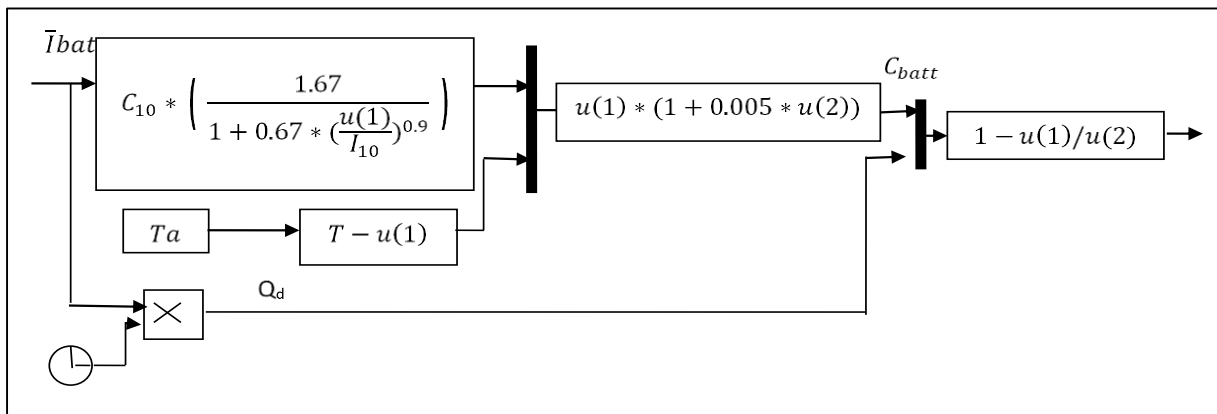


Figure IV.5 Modèle de la batterie réalisé sous MATLAB/Simulink

IV.3 Dimensionnement du système de stockage

IV.3.1 Dimensionnement du « stack » pile à combustible

Le dimensionnement du « stack » consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un « stack » de piles à combustible.

IV.3.1.1 Détermination du nombre de cellules

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{PAC} = N_{PAC} \times E_{PAC} \times j \times S_{PAC} \quad (IV.24)$$

La limite de la tension E_{PAC} d'une cellule d'une pile à combustible de type PEM est de 0.6V et une densité de courant nominale de 0,6 A/cm² [35].

La pile à combustible est connectée à un convertisseur statique de type élévateur qui doit générer une tension de bus de 200V. Comme le gain de ce convertisseur est limité à deux pour des raisons de rendement, il faut que la tension de pile soit au minimum de 190V.

Ce qui donne un nombre de cellules de :

$$N_{PAC} = \frac{U_{stack}}{E_{PAC}} = \frac{\frac{V_{bus}}{2}}{E_{PAC}} = ENT \left(\frac{100}{0.6} \right) + 1 = 168 \text{ cellules.} \quad (IV.25)$$

Avec ,

V_{dc} : Tension du bus continue soit 200V.

U_{stack} : Tension du « stack » en pleine charge soit $U_{stack} = V_{dc}/2$.

E_{PAC} : Tension de la cellule en pleine charge soit $E_{ch}=0.6V$.

IV.3.1.2 Détermination de la surface des cellules

Pour déterminer la surface de l'empilement on doit d'abord calculer le courant de PAC

$$I_{PAC} = \frac{P_{PAC}}{U_{stack}} = 2.5 \text{ A} \quad (IV.26)$$

$$S_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{j} = 4.17 \text{ cm}^2 \quad (IV.27)$$

Avec,

P_{PAC} : Puissance utile maximale soit 500 W.

I_{pac} : Courant maximal de la pile à combustible.

IV.3.2 Détermination de la taille des batteries

La capacité des batteries de stockage est déterminée à partir de la puissance demandée elle est exprimée par :

$$C_{bat,tot} = \frac{N_{ja} \cdot P_{dem}}{V_{bat} \cdot P_{DD} \cdot \eta_{bat}} \quad (IV.28)$$

Où :

N_{ja} : Nombre de jours d'autonomie (2 jours).

P_{dem} : Puissance demandée par le moteur (1680 W)

P_{DD} : Profondeur de décharge (0.7).

η_{bat} : Le rendement de la batterie (0.9).

V_{bat} : Tension des batteries (24V).

Le nombre de batteries à retenir est déterminé à partir de la capacité d'une unité de batterie, en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{bat} = ENT \left[\frac{C_{bat,tot}}{C_{bat,u}} \right] \quad (IV.29)$$

$$N_{bat_s} = ent \left[\frac{V_{dc}}{V_{bat_u}} \right] = \frac{200}{24} = 9 \text{ batteries} \quad (IV.30)$$

IV.4 Alimentation du VE par une Source d'Energie Hybride (SEH)

On tient à préciser que l'alimentation du VE par les batteries seules est très contraignant et offre peu de degrés de liberté, de plus, à cause des contraintes technologiques il est pratiquement impossible, dans la plupart des cas, on doit récupérer toute l'énergie au freinage. Alors en vue de l'optimisation de la source d'énergie et d'exploiter au mieux les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie, nous proposons l'étude d'une solution hybride (pile à combustible/batterie).

L'idée générale de ce principe d'hybridation des systèmes de stockage d'énergie est basée sur le respect des natures essentiels de deux sources d'énergie l'une est réversible en courant et l'autre non. Sur cette base nous allons dimensionner les composants de la SEH comme suit :

La pile à combustible : source primaire d'énergie qui assure à la fois l'alimentation de la charge et la recharge de la batterie.

La batterie assure la compensation de la puissance de la charge.

IV.4.1 La méthode de gestion

La fonction principale de la gestion d'énergie consiste à assurer la distribution de la puissance avec la prise en compte des caractéristiques et les conditions d'exploitation des sources et à répartir les flux entre elles pour permettre une utilisation optimale.

L'algorithme de gestion d'énergie est appliqué comme indiqué dans la figure suivante :

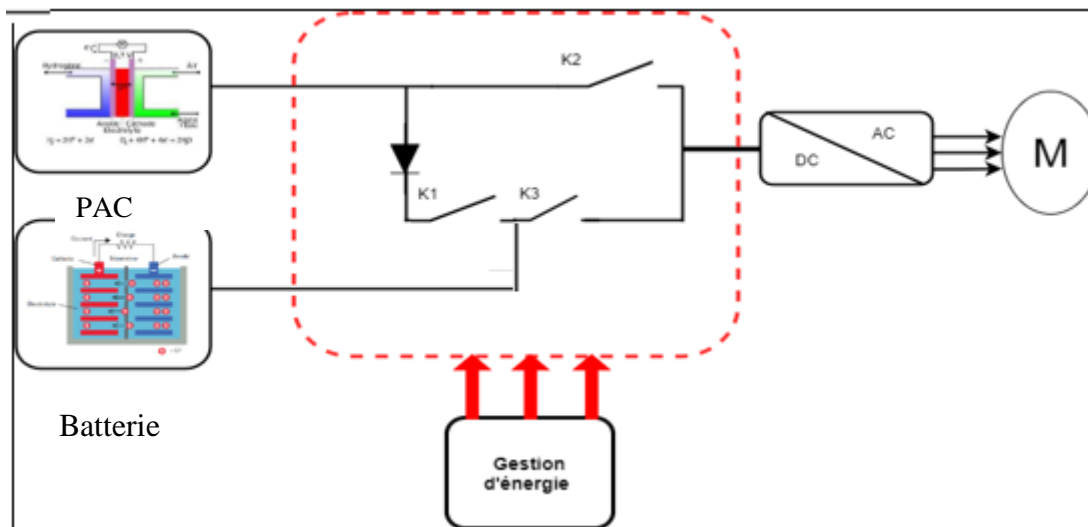


Figure IV.6 Schéma électrique global du VE à système de stockage hybride [36].

Les trois interrupteurs (K1, K2, K3) dans le système de gestion de puissance ci-dessus nous permettent de distinguer trois modes de fonctionnement possible du groupe motopropulseur qui sont :

Mode traction : C'est un mode où la puissance demandée par le moteur à l'instant « t » est supérieure ou égale à celle de l'instant d'avant. Les différents cas de ce mode sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 Différents cas du mode traction d'un VE [36]

Mode traction (mode 1)		
cas		puissances
1^{er} cas	La pile alimente le véhicule électrique	$\Delta P_{dem} > 0$ $P_{pac} > 0$ $P_{Batt} = 0$
2^{eme} cas	La pile et la batterie alimentent le véhicule électrique	$\Delta P_{dem} > 0$ $P_{pac} > 0$ $P_{Batt} > 0$
3^{eme} cas	La Batterie alimente le véhicule électrique	$\Delta P_{dem} > 0$ $P_{pac} = 0$ $P_{Batt} > 0$
4^{eme} cas	PAC alimente les VE et recharge la batterie	$\Delta P_{dem} > 0$ $P_{pac} > 0$ $P_{Batt} < 0$

Mode freinage : Le mode freinage est un mode où la demande de puissance du véhicule à un instant « t » est inférieure à celle d'avant. Pour le rechargement, les batteries reçoivent l'énergie cinétique du freinage ainsi que l'énergie des PAC si le SOC-batt est inférieur à 35%

Tableau IV.2 Différents cas du mode freinage d'un VE [36]

Mode freinage (mode 2)		
Cas		puissances
1^{er} cas	Rechargement des batteries	$\Delta P_{dem} < 0$ $P_{PAC} > 0$ $P_{Batt} < 0$
2^{eme} cas	Pas de puissance	$P_{dem} = 0$ $P_{PAC} = 0$ $P_{Batt} = 0$

Mode arrêt : Le véhicule est dit en mode arrêt lorsque la puissance demandée par le moteur est nulle. Dans ce mode, la puissance fournie par les batteries et les PAC est égale à 0. Ces cas figurent dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 Différents cas du mode arrêt d'un VE [36]

Mode arrêt (mode 3)		
cas		puissances
1^{er} cas	Pas de puissance fournie par la batterie et la PAC	$\Delta P_{dem} = 0 ; P_{pac} = 0$ $P_{Batt} = 0$
2^{eme} cas	PAC recharge la batterie	$P_{dem} = 0 ; P_{pac} > 0$ $P_{Batt} < 0$

Les états des interrupteurs ainsi que les trois différents modes du véhicule sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau IV.4 Différent mode de fonctionnement d'un VE

Interupteurs			Les puissances			EDC _{bat}	Etat du véhicule	Mode
K1	K2	K3	P _{pac}	P _{Batt}	P _{charge}			
0	0	0	0	0	0	=EDC _{min}	arrêt	3
					$\Delta P_{dem} < 0$	=EDC _{max}	freinage	2
1	0	0	$0 < P_{pac} < P_{dem}$	P _{pac}	0	<EDC _{max}	arrêt	3
					$\Delta P_{dem} < 0$		freinage	2
0	1	0	$P_{pac} \geq P_{dem}$	0	$P_{dem} = P_{pac}$	>EDC _{min}	traction	1
1	1	0	$P_{pac} > P_{dem}$	$P_{Pile} - P_{dem}$	$P_{dem} = P_{pac} > 0$	<EDC _{max}	traction	1
0	0	1	0	P _{Batt}	$P_{dem} = P_{Batt} > 0$	>EDC _{min}	traction	1
0	1	1	$0 < P_{pac} < P_{dem}$	P _{Batt}	$P_{dem} = P_{Batt} + P_{Pile} > 0$	>EDC _{min}	traction	1

Avec,

$$P_{charge} = P_{bat} + P_{PAC} \tag{IV.28}$$

$$\Delta P_{dem} = P_{PAC} - P_{charge} \tag{IV.29}$$

ΔP_{dem} : La variation de la puissance demandée par le moteur

IV.4.2 L'organigramme de gestion d'énergie du véhicule électrique à système de stockage hybride (PAC/batteries)

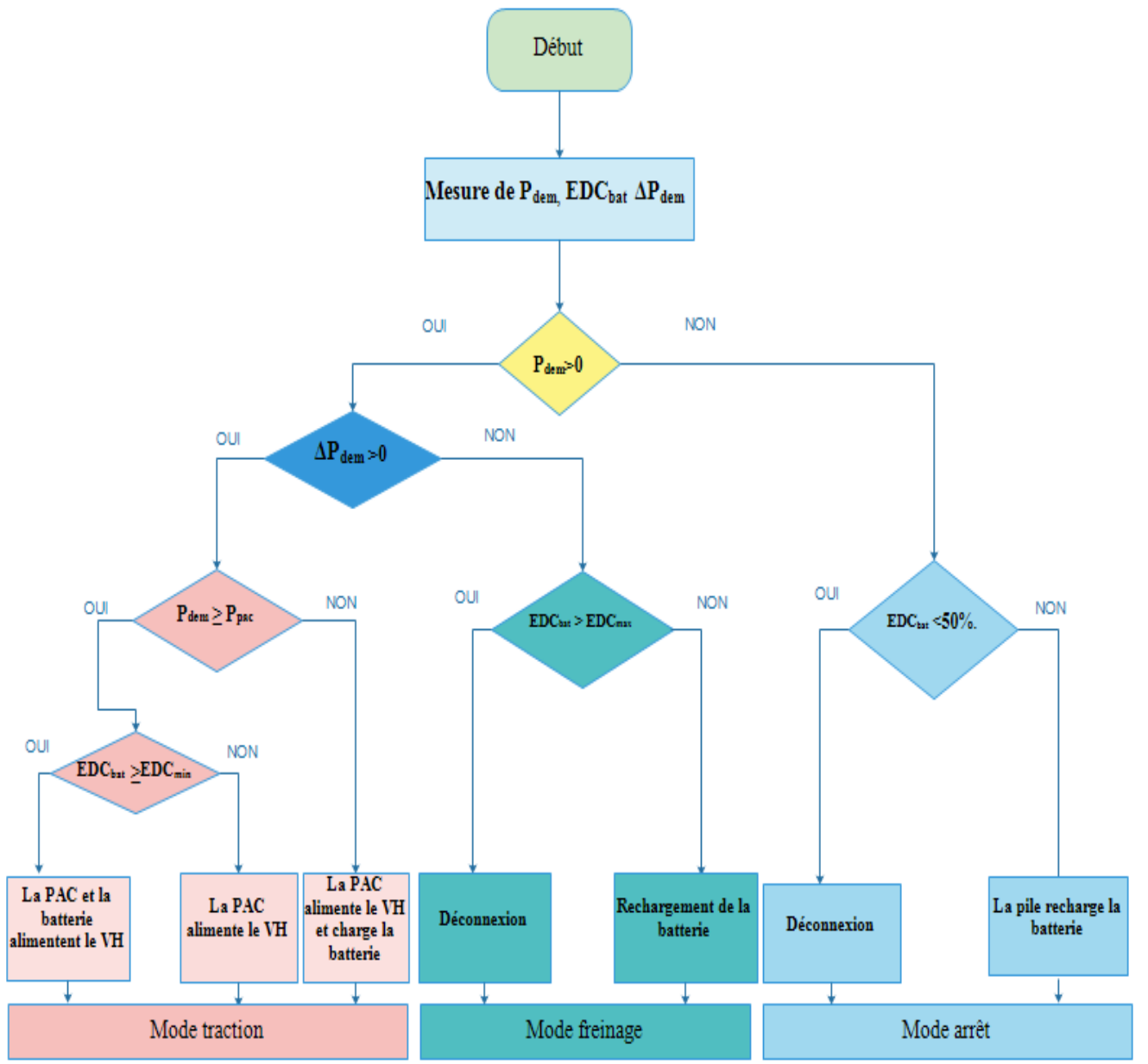


Figure IV.7 Organigramme de gestion des puissances dans un véhicule électrique hybride [37]

IV.4.3 Simulation générale appliqué au système de gestion globale

La simulation du model globale, nécessite un profil de vitesse qui est un cycle de conduite représentant en générale un ensemble de points de vitesse du véhicule en fonction du temps de telle sorte que les différents points puissent être comparés entre eux.

Le profil de vitesse appliqué au VEH est donné ci-dessous :

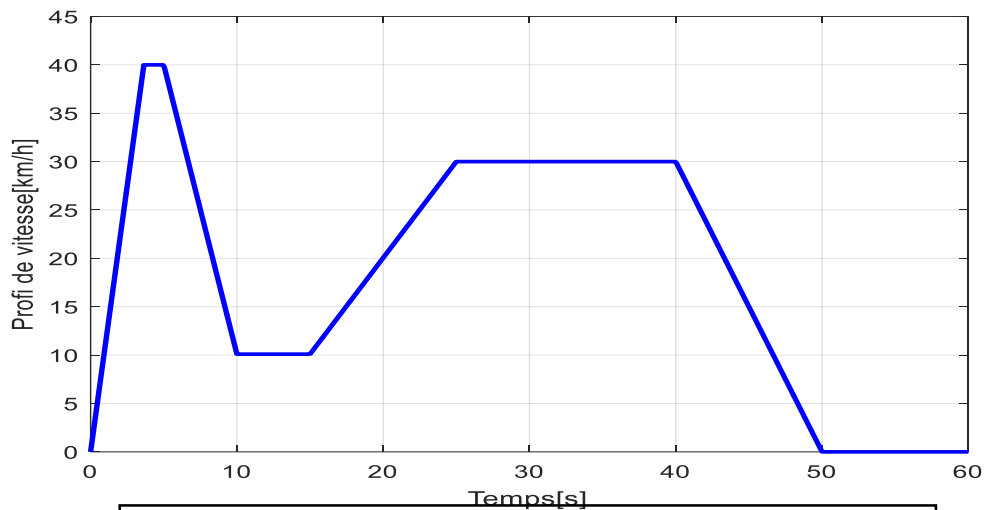


Figure IV.8 Profil de vitesse appliqué

IV.4.4 Résultats de simulation :

IV.4.4.1 L'allure de couple de charge et du couple électromagnétique :

Après application du profile de vitesse sur le système globale du véhicule, on remarque un changement de la dynamique du couple qui suit le profil de la vitesse

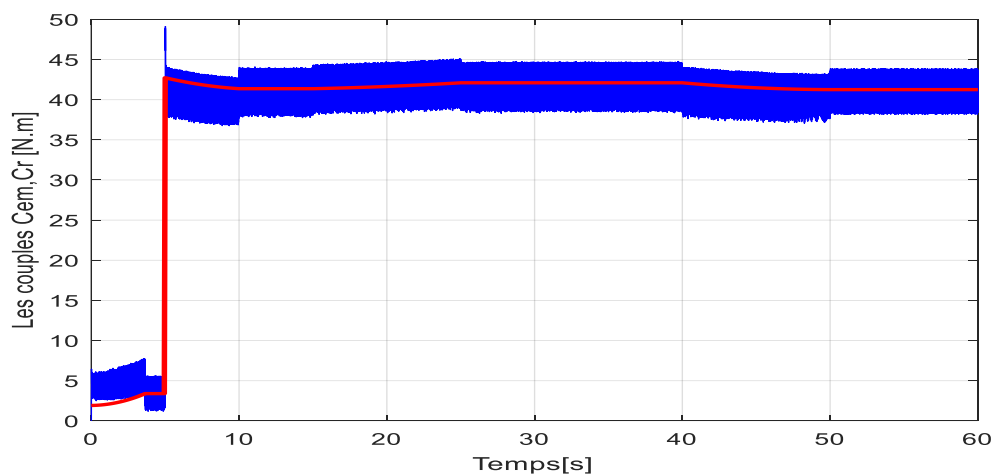


Figure IV.9 Allure du couple de charge et du couple électromagnétique

D'après la figure ci-dessus on peut constater que le couple appliqué à la machine est similaire au couple délivré par la machine.

IV.4.4.2 Dynamique des batteries

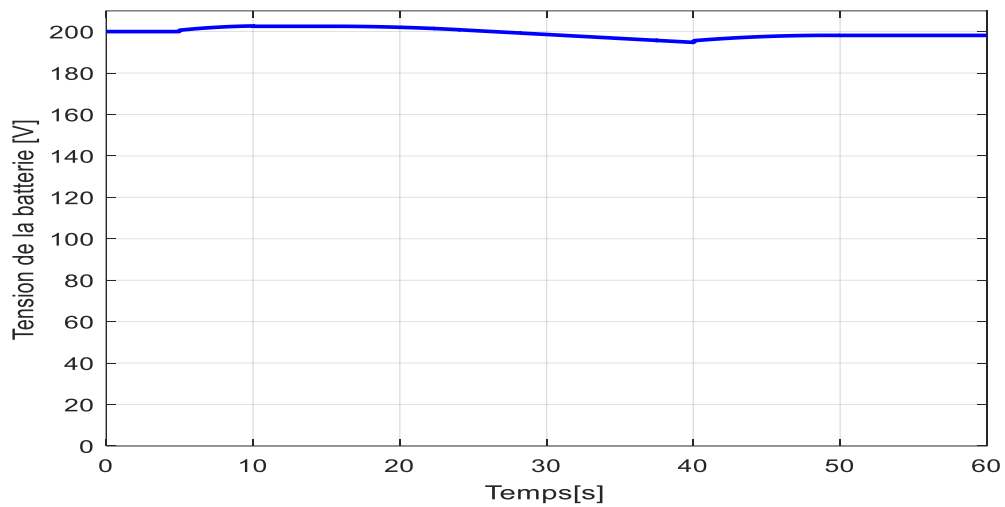


Figure IV.10 Tension de la batterie

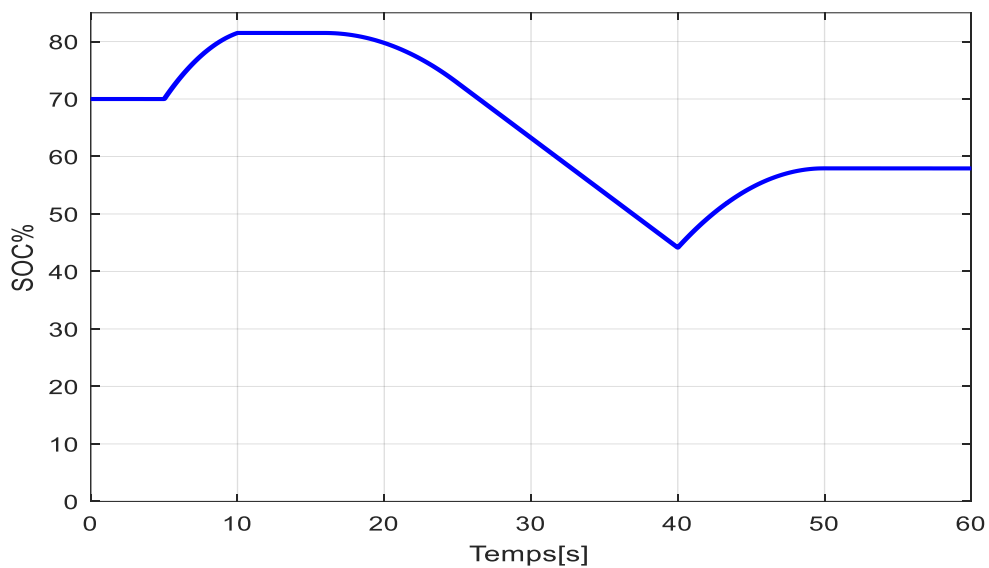


Figure IV.11 Etat de charge de la batterie

On remarque d'après la figure (IV.11) que l'état de charge reste constant lorsque la batterie n'est pas utilisée (pas de demande de puissance), se décharge lors de la traction du véhicule (forte demande de puissance ou la pile ne peut pas subvenir au besoin de puissance demandée par le moteur) et se charge avec l'énergie récupérée au freinage.

IV.4.4.3 Allure des puissances

Lors de la traction $P_{dem} = P_{PAC} + P_{bat}$ (alimentation par source hybride).

Et lors du freinage $P_{dem} = P_{PAC} - P_{bat}$ (récupération de l'énergie de freinage pour la recharge des batteries).

- L'équation d'équilibre est donnée par : $P_{dem} = P_{PAC} + / - P_{bat}$

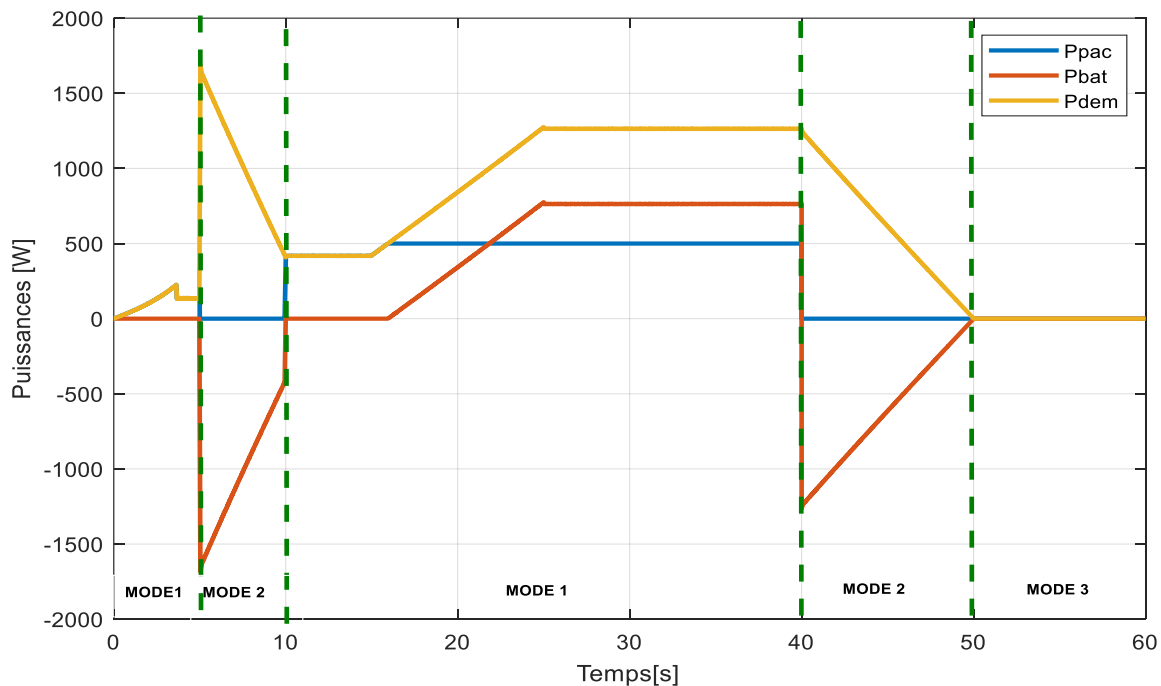


Figure IV.12 Allure des puissances

La figure IV.12 montre la variation des puissances du VEH en fonction du temps, on remarque les trois modes de fonctionnement 1, 2 et 3 (traction, freinage et arrêt).

A partir de la variation de la puissance demandée par le moteur, on distingue les cas suivant :

Lorsque $P_{dem} \leq 500$ W, $P_{dem} = P_{PAC}$, C'est la pile à combustible qui alimente le véhicule pendant que P_{bat} est nulle.

Lorsque $P_{dem} > 500$ W, $P_{dem} = P_{PAC} + P_{bat}$. Le véhicule est alimenté par la batterie et la pile au même temps (batterie sollicitée).

Au freinage, $P_{dem} = P_{PAC} - P_{bat}$. Les batteries se rechargent avec l'énergie cinétique récupérée pendant le freinage, et $P_{PAC} = 0$.

IV.5 Conclusion

L'étude des caractéristiques des sources de stockage d'énergie nous a permis de montrer qu'une seule source n'est pas suffisante dans ce type d'alimentation (ne peut pas subvenir aux besoins du moteur), ce qui nous a orienté vers l'hybridation qui permet de combiner la source d'énergie (la pile à combustible) et l'élément de stockage (les batteries) et cela nécessite une gestion de puissance afin de pouvoir suivre le flux demandé par le moteur et recharger les batteries pour améliorer leur durée de vie.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'un modèle du véhicule électrique décrivant son comportement, en suite la conception d'une commande vectorielle à flux orienté commandant le système toute en réduisant sa complexité. Une fois que la technique de commande est mise en œuvre, une méthode de gestion d'énergie hybride est élaborée pour une utilisation optimale.

La première partie du travail a été consacré à l'étude des systèmes à propulsion électrique, en présentant les différents types et architectures existantes. Cette partie, nous a aidé dans le choix du modèle du véhicule électrique qui fait l'objet de notre étude. Par la suite, nous avons étudié la modélisation de la partie électrique du véhicule. Puis nous avons présenté un modèle de VE en traduisant la dynamique longitudinale et en tenant compte de toutes les forces agissantes sur ce dernier, ainsi que le couplage entre les deux modèles mécanique et électrique. L'ensemble de ces deux modèles constitue le modèle global du VE que nous avons adopté pour le reste de l'étude.

Le modèle global du VE établi au préalable nous a éclaircis sur le choix de la loi de commande nécessaire à appliquer. La commande vectorielle à flux orienté de la machine synchrone à aimants permanents régule la vitesse de rotation de la machine et les courants en utilisant les correcteurs PI. La mise en œuvre de cette commande a été effectuée dans l'environnement virtuel Matlab/Simulink, en intégrant le modèle du véhicule précédemment développé. D'après les résultats de simulations, en tenant compte des différentes conditions de la route, on a constaté que cette technique de commande permet d'asservir les grandeurs contrôlées à leurs valeurs de consigne, malgré la présence des perturbations. Nous pouvons conclure que la commande assure de bonnes performances en termes de stabilité, de rapidité et de précision.

La gestion de l'énergie pour un système hybride présentant deux sources d'énergie électriques devant satisfaire une demande de puissance. L'étude des caractéristiques de chaque source d'énergie nous permet de démontrer qu'une seule source n'est pas suffisante dans ce type d'alimentation, ce qui a conduit à l'hybridation des sources d'énergie. L'hybridation étudiée s'agit d'une mixité d'une source d'énergie qui est la pile à combustible (source primaire), et une source de stockage qui est la batterie (source secondaire). Une méthode de gestion des puissances a été proposée afin d'arriver à une amélioration, cette dernière est basée sur l'état de trois interrupteurs, elle permet de gérer les différentes sources (PAC, batteries), c'est un système simple, flexible et facile à implémenter .

Références Bibliographiques

- [1] V. Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007.
- [2] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, Commande DTC d'une propulsion moteurasynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique , Européen Journal of Electrical Engineering 14, 2-3 (2011) 237-254.
- [3] B. CHAUCHAT. « Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, France, 1997
- [4] D. Benoudjit, Contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique, Thèse doctorat, Université de Batna, Janvier 2010.
- [5] L. Angot, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l'électromobilité dans la métropole toulousaine ?. Géographie. 2014.
- [6] Destiny Loukakou, Christophe Espanet, Frédéric Dubas. Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Franche-Comté, 2012. Français.
- [7] Gwenaëlle SOUFFRAN, Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission, UNIVERSITÉ DE NANTES, Année 2012.
- [8] H. Gharbi, Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride, Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2014.
- [9] H. Aid, W. Aina, Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents, Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Octobre 2013.
- [10] Kamillia ABDELLAOUI, Saloua BELAID, « Etude de l'autopilotage d'une machine synchrone à aimant permanent », mémoire master, université de Bejaia, 2017/2018
- [11] H. Trabelsi « Commande vectorielle d'une machine asynchrone » thèse de magistère, Université de Bejaia 2002.

- [12] N. Sanhadji , A. Chalabi, Commande du moteur synchrone a aimants permanents par Backstepping, Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, Juin 2015.
- [13] F. Boussekra, La commande non linéaire à régime glissant de la MSAP, Mémoire de magister, Université de Batna, Novembre 2011.
- [14] N. Bounasla, Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de magister, Université Ferhat ABBAS Sétif - 1, 2014.
- [15] S.Rezgui "Commande de Machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel", Mémoire, Université Mentouri de Constatine Algérie 2009.
- [16] Toufik REKIOUA, « Contributions à la modélisation et la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanent », thèse de doctorat, Institut national polytechnique Lorraine, 1991.
- [17] G.Grellet, G.Clerc "Actionneurs électriques : Principes, modèles et commandes", Eyrolles, Paris, France, 2000.
- [18] A. Boucha , Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué , Mémoire de magister , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [19] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, Commande DTC d'une propulsion moteur asynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique, Européen Journal of Electrical Engineering 14, 2-3 (2011) 237-254.
- [20] H. Benariba , Contribution à la commande d'un véhicule électrique , Thèse de doctorat , Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen , Décembre 2018.
- [21] D. Lahouel, Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de magister, Université de Batna, Juillet 2009.
- [22] S. Gwenaelle , Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission , Thèse de doctorat , Université de Nantes , Juillet 2012.
- [23] H. Karima, Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Juin 2016.
- [24] V. Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007.

- [25] H.ABDELLAOUI « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électriques », Magister, UMMTO, Algérie.
- [26] N. Sanhadji, A. Chalabi, *Commande du moteur synchrone à aimants permanents par Backstepping*, Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, Juin 2015.
- [27] N. Bounasla, *Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents*, Mémoire de magister, Université Ferhat ABBAS Sétif - 1, 2014.
- [28] M. Attou « commande par mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents », master en électrotechnique, Université de Sidi Bel-Abbes, 2007
- [29] F. Benchabane "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering", Mémoire de magister, Université Mohamed khider de Biskra, 2005. Algérie,
- [30] N.M. Babak "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, convergence, robustesse, identification "en ligne" des paramètres", Thèse de doctorat, 2001.
- [31] Rezak ALKAMA, « Cours de stockage de l'énergie et pile à combustible », Université de Bejaia 2019/2020
- [32] Mathieu BRESSEL, « modèle dynamique de pile à combustible à membrane échangeuse de protons et identification paramétriques », article scientifique, institut UMR, université de Lille-Science technologie, 2015
- [33] F. AMROUCHE (USTHB), B. MAHMAH (CDER), H. BENMOUSSA, Université Hadj Lakhder, « Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale », revue énergie renouvelable, 2005
- [34] J. Synota, « La voiture de demain : carburants et électricité », tech. rep., 2011.
- [35] D. REKIOUA, E. MATAGNE, « Optimization of photovoltaic power systems », Livre, Springer-Verlag London Limited, 2012
- [36] Z. MOKRANI, D. REKIOUA, N. MEBAREKI, T. REKIOUA, S. BACHA, « Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells », Article de presse, Laboratoire LTII, Département génie électrique, Université de Bejaia, 2017
- [37] Nasser Eddine, « Gestion en temps réel d'un système multi-sources à énergie renouvelable en fonctionnement autonome », thèse de doctorat, Département génie électrique, université de Bejaia, 2019

Annexe A

A.1 Paramètres du moteur synchrone à aimant permanent

Paramètres	symboles	Valeurs
Moment d'inertie	J	0.00011 kg.m ²
Inductance direct	L_d	0.0011 H
Inductance quadratique	L_q	0.0011 H
Nombre de pair de pôles	p	2
Résistance statorique	R_s	0.8 Ω
Amplitude de flux des aimants permanent	Ψ_f	0.2 Wb
Coefficient des frottements visqueux.	F_{VF}	0.000195 N.m/rd/s
Facteur d'amortissement.	ξ	0.7
Moment d'inertie de la roue	J_w	1.14
Pulsation propre du système.	ω_0	100 rad/s

A.2 Paramètres du véhicule électrique

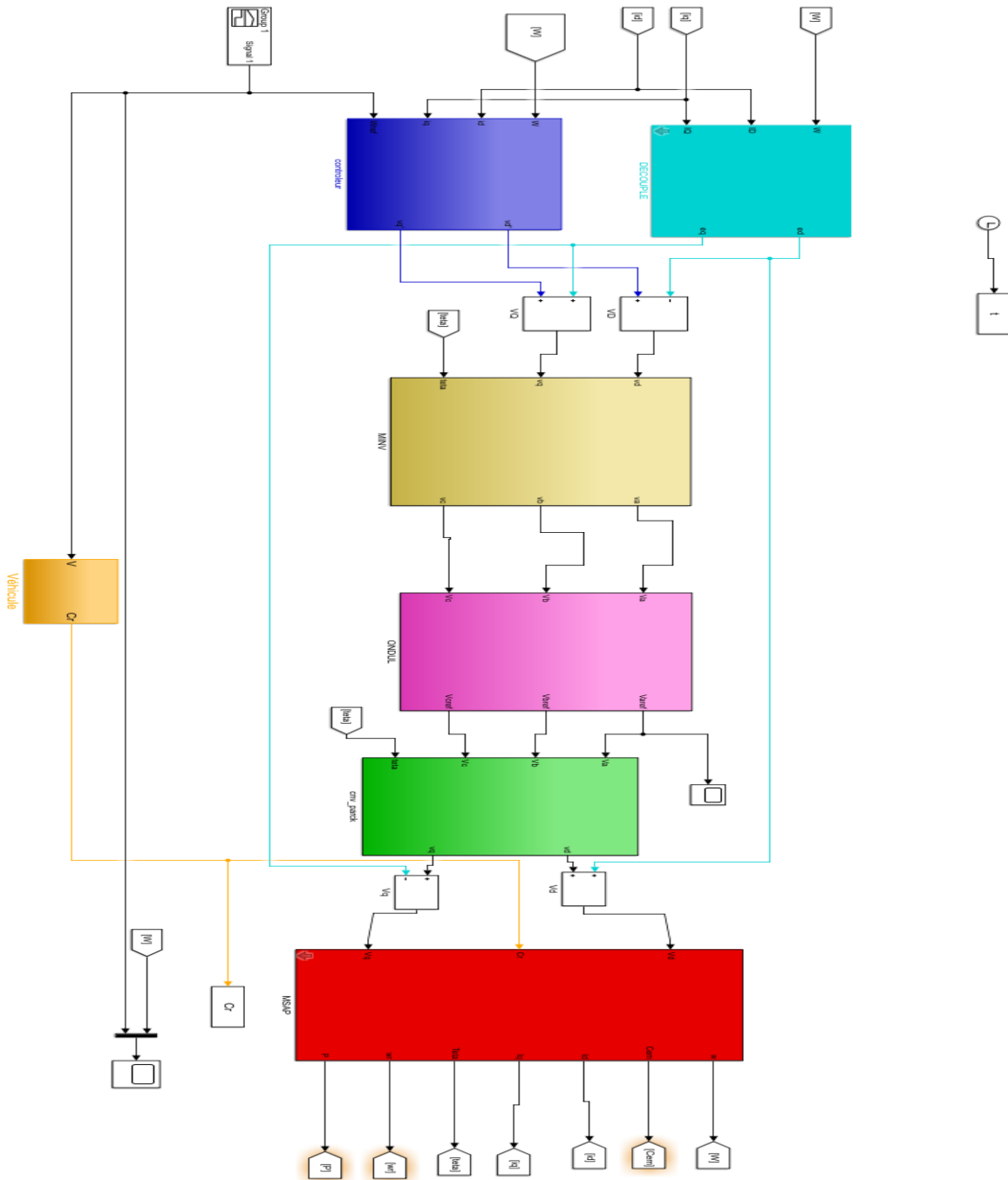
Paramètres	symboles	Valeurs
Masse totale du véhicule	M	300 Kg
Constante de gravitation	g	9,81 m/s^2
Section frontale du véhicule	S_f	1,9 m^2
Coefficient de pénétration dans l'air	C_x	0,25
Coefficient de roulement	C_{rr}	0,017
Rayon de la roue	R	0.26 m
Le rapport de réduction de la vitesse	N	6
Densité volumique de l'air	ρ_{air}	1,23 kg/m^3

A.3 Paramètres de la pile à combustible

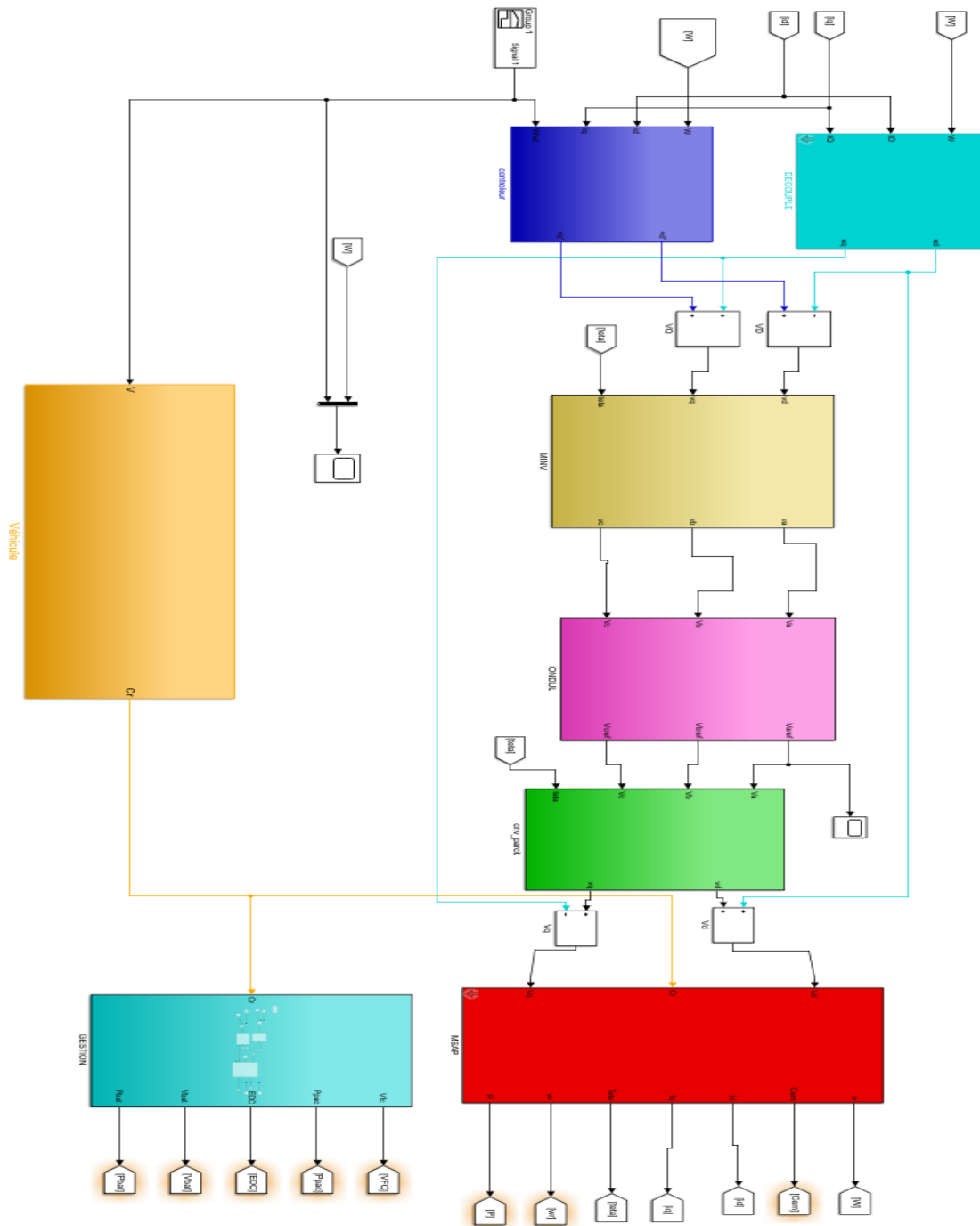
Paramètres	Symboles	valeurs
Température opératoire de la pile	T	298.15 K
Pression de l'oxygène à la cathode	P_{cath}	0.02 Atm
Pression de l'hydrogène a l'anode	P_{anode}	0.01 Atm
Surface active de la pile	A	16 m ²
Epaisseur de la membrane	L	230 μm
Résistance équivalente de contact a la conduction des électrons	R_C	0.0003 Ω
Constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement	B	0.016V
Densité du courant maximale	J_{max}	0,04934375 A/cm ²
Teneur en eau dans la membrane	δ_{H_2O/SO_3^-}	14
Les coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile	ε_1	-0.9514
	ε_2	3.12*10 ⁻³
	ε_3	-1.87*10 ⁻⁴
	ε_4	7.4*10 ⁻⁵

Annexe B

B.1 Schéma globale de la commande vectorielle



B.2 Schéma globale de la gestion d'énergie



Résumé

Un véhicule électrique est une automobile dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique.

L'objectif de ce travail est de présenter une commande par orientation du flux (FOC) sur un véhicule électrique préalablement modélisé et lui introduire une gestion d'énergie adéquate.

La première partie de cette étude, a été consacrée à des généralités sur le véhicule électrique ainsi que sa chaîne de traction. La deuxième partie, concerne la modélisation et simulation de la machine synchrone à aimants permanents associée à l'onduleur de tension commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), ainsi qu'à la modélisation de la dynamique du véhicule électrique. Dans La troisième partie nous avons introduit une commande par orientation du flux afin d'assurer le bon fonctionnement du véhicule et améliorer ses performances en termes de stabilité, rapidité et précision. La quatrième partie, de notre travail aborde la gestion des puissances des sources d'alimentation du véhicule électrique (PAC /Batterie) pour une utilisation optimale.

Abstract

An electric vehicle is an automobile whose propulsion is ensured by a motor running exclusively on electric energy.

The objective of this work is to present a control by orientation of the flow (FOC) on a previously modelled electric vehicle and to introduce an adequate energy management.

The first part of this study was devoted to generalities on the electric vehicle and its drive train. The second part, concerns the modelling and simulation of the permanent magnet synchronous machine associated with the voltage inverter controlled by the pulse width modulation (PWM) technique, as well as the modelling of the electric vehicle dynamics. In the third part, we introduced a flux orientation control in order to ensure the proper functioning of the vehicle and to improve its performance in terms of stability, speed and precision. The fourth part of our work deals with the management of the power sources of the electric vehicle (PAC /Battery) for an optimal use

المخلص

السيارة الكهربائية هي سيارة يتم توفير دفعها بواسطة محرك يعمل حصرياً على الطاقة الكهربائية.

الهدف من هذا العمل هو تقديم عنصر تحكم من خلال توجيه التدفق على مركبة كهربائية تم تصميمها مسبقاً وإدخال إدارة كافية للطاقة لها.

تم تخصيص الجزء الأول من هذه الدراسة للعموميات على السيارة الكهربائية بالإضافة إلى مجموعة نقل الحركة الخاصة بها.

يتعلق الجزء الثاني بنمذجة ومحاكاة الآلة المتزامنة مع المغناطيس الدائم المرتبط بعكس الجهد الذي يتم التحكم فيه بواسطة تقنية تعديل عرض النبضة وديناميكيات السيارة الكهربائية.

في الجزء الثالث، قمنا بإدخال التحكم في اتجاه التدفق من أجل ضمان الأداء السليم للسيارة وتحسين أدائها من حيث الثبات؛ السرعة والدقة.

سيتناول الجزء الرابع من عملنا إدارة قدرات شحن السيارة الكهربائية (خلايا الوقود/البطارية) من أجل الاستخدام الأمثل.