

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

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du diplôme de Master en

Electrotechnique

Option : Automatisme Industriel

Présenté par :

AOUZELLAG Haroune

Thème

Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride

Soutenu publiquement le : 19/06/2013, devant le jury composé de :

Président	K. IDJDAREN	Université de Béjaïa
Rapporteur	K. GHEDAMSI	Université de Béjaïa
Examinatrice	S. BELAID	Université de Béjaïa

Année Universitaire : 2012/2013

REMERCIEMENTS

*Après avoir rendu grâce à dieu, je ne saurais au terme de ce travail
d'adresser ma profonde gratitude à tous ceux
qui ont eu la bonté et la patience de satisfaire ma curiosité et qui ont apporté leurs
contribution à l'aboutissement de ce présent travail.*

Je tiens à remercier particulièrement :

- *M, K. GHEDAMSI (Promoteur).*

*Pour son bon encadrement, sa disponibilité, ses conseils fructueux qu'ils m'ont cessé de
me prodiguer et ses remarques pertinentes pour la pérennité de cet écrit.*

*Je tiens aussi à remercier profondément tous les enseignants du département de
génie électriques qui m'ont donné de leurs savoir et m'ont soutenu tout au long de
mon parcours universitaire.*

*Egalement, je tiens à remercier très chaleureusement l'ensemble des membres de jury
qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail.*

Devotions

Avec ma profonde gratitude et grand amour ; je dédie ce modeste travail :

A l'homme qui a été mon ombre durant toutes mes années d'études et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger, le plus fabuleux et le plus merveilleux des pères, pour toi mon père.

A celle qui m'a donné la vie, le symbole de la tendresse, elle qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à la merveilleuse femme et la douce mère que j'ai. Que dieu les garde et les protèges.

A mes adorables frères, ainsi ma chère sœur.

A mes grands - mères et mes grands - pères.

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins et mes cousines.

A mes amis (es) sans exception.

A toute la promotion de Génie Electrique.

A tous ceux que j'aime.

A tous ceux qui m'aiment.

TABLES DES MATIERES

LISTE DES SYMBOLES ET ABRIVIATIONS	I
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Hybrides Existants

I. Introduction	03
II. Historique.....	03
III. Fonctionnement du véhicule hybride	05
III.1. Définition.....	05
III.2. Phases de fonctionnement d'un VH :	06
III.3. Classification des véhicules hybrides.....	07
III.3.1. Selon le taux d'hybridation	07
III.3.2. Selon l'architecture de véhicule hybride	10
III.4. Comparaison des différentes structures de propulsion	12
IV. Conclusion	13

Chapitre II: Représentation Macroscopique d'un Véhicule Hybride Série

I. Introduction.....	15
II. Description du modèle série	15
II.1. Sous système de traction.....	16
a) Machine électrique	16
b) Convertisseurs DC/AC (Onduleur)	17
c) Boîte de vitesses	17
d) Différentiel	18
II.2. Stockeur d'énergie	18
a) Batterie	18
b) Convertisseur associé (Hacheur)	21
II.3. Groupe électrogène	22
a) Moteur thermique	22
b) Génératrice	23
II.4. Bus continu (nœud du couplage énergétique)	24
III. Conclusion	24

Chapitre III: Modélisation d'un Véhicule Hybride Série

I. Introduction	26
II. Modèle mécanique du véhicule	26
III. Modélisation des éléments internes du véhicule	28
III.1. Groupe électrogène.....	28
III.2. Modélisation du MSAP	28

III.3. Modélisation de la batterie	30
III.4 . Modélisation de l'onduleur de tension	31
III.5. Modélisation du Hacheur	33
IV. Conclusion.....	34
Chapitre IV: Techniques de Commande d'un Véhicule Hybride Série	
I. Introduction	35
II. Stratégies de commande basées sur une minimisation instantanée.....	35
II.1. Commandes de l'ensemble Convertisseur / Machine électrique	35
II.1.1. Commande MLI	36
II.1.2. Commande vectorielle pour un asservissement de vitesse	38
II.2. Commandes de l'ensemble Convertisseur / Batterie	43
II.3.1. Régulation par boucle de courant (CMC).....	43
II.3. Stratégie de commandes de l'ensemble Convertisseur /Groupe Electrogène.....	43
II.4.1. Commande du redresseur par la méthode MLI à bande d'hystérésis (HBCC).....	43
II.4.2. Configuration des circuits de contrôle	44
II.5. Application de la technique intelligente sur la commande de la MSAP.....	46
II.5.1. La commande Vectorielle avec régulateur PI flou de vitesse.....	46
III. Système de gestion d'énergie du modèle du véhicule	50
III.1. Présentation	50
III.2. Tehcnique de contrôle avec State-flow	51
IV.. Résultats de simulation et validation des commandes.....	53
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Schémas globale réalisé	53
IV.3. Validation des stratégies de commande	55
IV.3.1. Validation des commandes liées à la machine de traction et au système de stockage d'énergie	55
IV.3.2. Validation de la commande de groupe électrogène	59
IV.3.3. Validation du modèle globale du véhicule série réalisé durant un cycle	61
IV.4. Bilan de puissance.....	64
V. Conclusion.....	66
Conclusion générale et Perspectives	67

REFERENCES

ANNEXES

Liste des symboles

E_i	Energie impulsionnelle [J] ;
E_t	Energie transitoire [J] ;
E_p	Energie permanente [J] ;
E	Energie à fournir par les deux moteurs [J] ;
TH	Taux d'hybridation ;
C_{mth}	Couple du moteur thermique [N.m] ;
F_{ext}	Force extérieur au véhicule [N] ;
F_{air}	Force équivalente à la résistance de l'air [N];
F_t	Composante de la force de traction [N] ;
F_r	Résistance des roues sur le sol [N] ;
v	Vitesse du véhicule [m/s] ;
M_v	Masse du véhicule [kg] ;
ρ_{air}	Masse volumique de l'air;
S	Surface frontale du véhicule [m ²] ;
C_x	Coefficient de pénétration dans l'air ;
C_r	Coefficient de roulement ;
R_r	Réaction du sol sur les roues [N] ;
P	Poids du véhicule [N] ;
α_r	Angle formé par la route et l'horizontale [degré] ;
P_m	Puissance mécanique nécessaire à l'avancement du véhicule [Watt] ;
$[v_s]$	Tension des enroulements statoriques de la machine de traction [V];
$[i_s]$	Courants dans les enroulements statoriques de la machine de traction [A];
$[R_s]$	Résistances statoriques [Ω] ;
$[L_{ss}]$	Inductances statoriques [H] ;
$[\varphi_s]$	Composantes du flux statorique dans le repère triphasé (abc) [Wb];
$[\varphi_{dq}]$	Composantes du flux statorique dans le repère triphasé (dq) [Wb] ;
$[\varphi_f]$	Composantes du flux d'entre fer de la MSAP [Wb];

θ	Position électrique du rotor par rapport au stator [rad] ;
$[P(\theta)]$	Matrice de Park ;
i_d, i_q	Courants statoriques de la machin de traction dans le repère tournant (d-q) [A] ;
v_d, v_q	Composantes des tensions rotoriques dans le repère tournant (d-q) [V] ;
L_d, L_q	Inductances directe et quadratique de la MSAP [H] ;
C_e	Couple électromagnétique de la MSAP [$N.m$] ;
Ω	Pulsation des grandeurs rotorique [rad/s] ;
ω_e	Pulsation des grandeurs électriques [rad/s];
f	Coefficient de frottement ;
J	Moment d'inertie [$kg.m^2$] ;
P	Nombre de paires de pôles ;
C_r	Couple résistant [$N.m$] ;
E_b	Tension à vide de la batterie [V] ;
R_b	Résistance interne de la batterie [Ω] ;
I_b	Courant de la batterie [A] ;
U_b	Tension à la sortie de la batterie [V] ;
η_b	Rendement de la batterie ;
K	Constante de polarisation [Ah^{-1}] où résistance de polarisation [Ω] ;
i^*	Courant dynamique en basse fréquence [A] ;
i	Courant de batterie [A] ;
it	Capacité extraite [Ah];
Q	Capacité maximum de batterie [Ah];
A	Tension exponentielle [V] ;
B	Capacité exponentielle [Ah] ⁻¹ ;
i_c	Courant qui traverse la capacité du bus continu [A] ;
V_L	Tension au borne de l'inductance du hacheur [V] ;
i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}	Courants statoriques de la génératrice [A] ;
v_{ga}, v_{gb}, v_{gc}	Tensions statoriques de la génératrice [V].

Liste des Abréviations

MSAP	Moteur synchrone à aimants permanents ;
MCI	Moteur à combustion interne ;
VEH	Véhicule électrique hybride ;
PHEV	Véhicule électrique hybride particulier (<i>Particular hybrid Electric Vehicle</i>) ;
AC	Courant alternatif (<i>Alternative Current</i>) ;
DC	Courant continu (<i>Direct Current</i>) ;
F.E.M.	Force Électro-Motrice ;
PI	Proportionnel Intégral ;
GES	Gaz à effet de serre ;
VE	Véhicule électrique ;
SOC	Etat de charge (<i>State Of Charge</i>).

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : La puissance de la charge en deux composantes : moyenne et dynamique	08
Figure I.2 : Architecture série du véhicule hybride	10
Figure I.3 : Architecture parallèle du véhicule hybride double et simple arbre	10
Figure I.4 : Schéma véhicule à double hybridation	11
Figure II.1 : Schéma détaillé d'un véhicule hybride série	15
Figure II.2 : Schéma détaillé d'un onduleur	16
Figure II.3 : Différentiel	17
Figure II.4 : Vue interne d'une batterie	18
Figure II.5 : Courbe de décharge d'une batterie Li-Ion pour différentes charges en Ah	18
Figure II.6 : L'énergie massique en fonction de la puissance massique pour différents types d'accumulateurs	19
Figure II.7 : Schéma détaillé d'un convertisseur DC/DC	20
Figure II.8 : Moteur thermique Diesel à quatre temps	21
Figure II.9 : Carthographie d'un moteur Diesel Renault K9K	22
Figure III.1 : Bilan des forces sur le véhicule	26
Figure III.2 : Schéma d'une machine synchrone à aimants permanents	28
Figure III.3 : Modèle équivalent électrique de la batterie	29
Figure III.4 : Schéma équivalent de l'onduleur	30
Figure III.5 : Hacheur élévateur-abaisseur bidirectionnel	31
Figure IV.1 : Principe de la technique MLI Intersective (sinus-triangle)	35
Figure IV.2 : Schéma bloc d'une commande MLI	36
Figure IV.3 : Principe de la commande vectorielle	37
Figure IV.4 : Schéma global de la commande vectorielle en vitesse	38
Figure IV.5 : Schéma bloc de découplage	39
Figure IV.6 : Boucle de régulation de la vitesse	40
Figure IV.7 : Boucle de régulation du courant I_d	41
Figure IV.8 : Schéma de principe de la commande par boucle de courant	42
Figure IV.9 : Principe de la commande proposée pour le MCI	42
Figure IV.10 : Schéma de principe de la commande par Hystérésis	43
Figure IV.11 : Schéma de contrôle du convertisseur MLI	44
Figure IV.12 : Modèle en boucle fermée de la boucle de tension du bus continu	45
Figure IV.13 : Schéma principe d'un contrôleur flou de type PI	46
Figure IV.14 : Structure interne d'un régulateur flou	46
Figure IV.15 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées et sortie	46

Figure IV.16 : Surface de la fonction d'appartenance $I_q^* = fuzzy(E, \Delta E)$	48
Figure IV.17 : Diagramme de contrôle d'énergie	51
Figure IV.18 : Circuit de puissance réalisé avec logiciel Psim	53
Figure IV.19 : Circuit de commande réalisé avec logiciel Matlab/Simulink	54
Figure IV.20 : Référence de vitesse imposée à la machine de traction	55
Figure IV.21 : Vitesse mesurée du moteur électrique avec PI comme régulateur	55
Figure IV.22 : Courant i_d de la motorisation électrique de traction.....	56
Figure IV.23 : Courant i_q de la motorisation électrique de traction	56
Figure IV.24 : Couple C_e de la motorisation électrique de traction	56
Figure IV.25 : Tension à la sortie de la batterie	57
Figure IV.26 : Tension du bus continu	57
Figure IV.27 : Courants statoriques de la machine électrique de traction	57
Figure IV.28 : Zoom sur les courants statoriques de la machine de traction	58
Figure IV.29 : Tensions statoriques de la machine de traction	58
Figure IV.30 : Zoom sur l'allure des tensions statorique de la machine de traction	58
Figure IV.31 : Vitesse de la machine de traction avec régulateur PI flou	59
Figure IV.32 : Référence générée et vitesse de la génératrice	59
Figure IV.33 : Courant fournis par la génératrice au bus continu	60
Figure IV.34 : Courant fournit par la batterie	60
Figure IV.35 : Tension de bus continu durant le test	61
Figure IV.36 : Cycle de conduite proposé et la poursuite de la machine de traction.....	61
Figure IV.37 : Le couple développé par la machine de traction durant le cycle	62
Figure IV.38 : Vitesse de la génératrice et sa référence imposée par la commande	62
Figure IV.39 : Courant transcrit dans la batterie durant de cycle	62
Figure IV.40 : Tension sur les bornes de la batterie durant le cycle	63
Figure IV.41 : Evolution de SOC durant le cycle	63
Figure IV.42 : Tension sur le bus continu durant le cycle	63
Figure IV.43 : Puissance en entrée et en sortie du moteur électrique de traction	64
Figure IV.44 : Puissance délivrée par la génératrice	64
Figure IV.45 : Bilan de puissance lors de recharge/décharge de la batterie	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Dénomination usuelle des véhicules hybrides et fonctionnalité associées.....	09
Tableau I.2 : Comparaison de diverses architectures	12
Tableau II.1 : Caractéristique des différentes batteries pour une application VH.....	20
Tableau IV.1 : Table d'inférence.....	47

Introduction générale

Dans le contexte énergétique actuel (pénurie et pollution des énergies fossiles), le désir humain ne cesse d'améliorer sa qualité de vie en introduisant de milliers de nouvelles technologies dont l'automobile occupe l'univers quotidien d'aujourd'hui. En effet, les pollutions sonores et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation, impliquant de plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie. Plusieurs solutions préconisées par les constructeurs automobiles et organismes de recherche, pour remplacer peu à peu les véhicules classiques notamment dans les centres villes. Le devenir de l'automobile dans les prochaines années est donc un sujet de recherche d'actualité. Ces dernières années, ce sont la recherche d'une meilleure qualité de vie, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement dans l'énergie électrique. La réussite dans ce domaine proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie. Dans cette combinatoire, l'électricité jouera un rôle fondamental et continuera à atteindre les nouveaux objectifs de l'automobile en termes d'économie d'énergie et d'environnement. [HUSA03]

Le véhicule tout électrique semble à priori ne pas être une solution fiable à court et moyen terme de part sa faible autonomie et son temps important de recharge. [HOEL03] [KELLY06]

Le véhicule hybride est une solution intermédiaire très prometteuse. L'intérêt de ce véhicule est sa capacité de combiner les deux sources d'énergie (thermique et électrique) et bénéficier ainsi des avantages du véhicule conventionnel et du véhicule électrique.

Les véhicules hybrides, s'ils sont très intéressants, nécessitent aussi d'avoir un contrôle adapté, par rapport aux objectifs à atteindre, et par rapport à leur architecture. Le contrôle d'un véhicule hybride est en effet assez différent de celui d'un véhicule traditionnel, dans le sens où, celui-ci disposant de deux sources d'énergie, un contrôleur "haut-niveau" doit déterminer quelle est la puissance que doit fournir chacun des moteurs. Le contrôle d'un véhicule hybride doit donc être adapté à son architecture et à ses fonctionnalités (possibilité de récupérer de l'énergie au freinage, de couper le moteur thermique tout en utilisant le moteur électrique pour la traction, etc.). [EHSA05] [LHOM07]

Introduction générale

Un premier chapitre fera un état de l'art sur les véhicules hybrides ainsi que leurs classifications selon l'architecture et le taux d'hybridations, un choix sur l'architecture sera justifier par une comparaison entre les différentes structures selon plusieurs critères.

Le deuxième chapitre présentera les divers organes constituant une chaîne de traction hybride, chaque organe doit répondre au besoin de l'architecture choisie.

Le troisième chapitre traitera la modélisation de ses différents organes électriques, la partie mécanique n'est pas l'objectif de ce travail.

Le quatrième chapitre est l'œuvre d'art de ce travail, on l'a réservé pour les différentes techniques employées dans ce projet de simulation à fin de réaliser un modèle qui satisfait chacune des raisons de l'existence d'un hybride. Des résultats de simulations seront apportés.

Chapitre I :

Etat de l'Art des Véhicules Hybrides Existants

I. Introduction

Les particules et les gaz à effet de serre ont toujours été un handicap écologique pour le véhicule conventionnel (moteur à combustion interne), une solution première été adopté, les véhicule électrique où l'autonomie reste généralement très faible. Parce que, la seule source d'énergie est stockée dans une batterie, hors que celle-ci prend un temps énorme pour être rechargée, d'où l'idée de passer à l'hybridation en introduisant une motorisation électrique en plus de la motorisation thermique. L'objectif étant de combiner les avantages du véhicule électrique (zéro pollution et récupération d'énergie), l'autonomie de la batterie et les prestations du véhicule thermique.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art des véhicules hybrides, notamment du côté de leurs architectures et leurs taux d'hybridation, en commençant avec un bref historique sur cette technologie qui tôt où tard révolutionnera le monde.

II. Historique

Toute a commencé avec le véhicule électrique en Europe au début du 19^{ème} siècle, après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday. La première voiture électrique a été construit en 1834 à Brandon; en grand Bretagne par un génie mécanicien nommé Thomas Davenport, le petit véhicule fonctionnait avec une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail. Puis en 1859, le français G. Planté, inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable. En 1869, Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval. Douze ans plus tard, T. Gustave réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire [EHSA05]; le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu ; en 1885, les allemands Daimler et Benz inventait la première voiture à essence. Le début du 20^{ème} siècle a constitué l'âge d'or du VE, en effet c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100km/h. En 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée (La Jamais Contente), ce VE avait deux moteurs entraînant les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50kW (soit 67 chevaux),

alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne.

Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries font disparaître progressivement les VE du marché; ainsi au début des années 30, la production de VE est presque complètement interrompue, la période 1921-1960 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. [WAK98]

Après l'invention du transistor et thyristor en 1945, ces découvertes conduisent au développement de commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable. En même temps des chocs pétroliers des années 1970-1980, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE, les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. En 1980-1990, quelques véhicules réalisés comme la Peugeot 106 électrique mais leur autonomie et performance reste insuffisantes.

La question du stockage de l'électricité a mobilisé les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste encore l'une des clés de l'évolution du système énergétiques en général et du VE en particulier. L'autonomie des VE reste généralement faible. En outre, la recharge des batteries est lente et doit être généralement effectuée la nuit, ces contraintes d'utilisation ont bloqué le marché du véhicule électrique, des batteries plus performantes et plus légères arrivent sur le marché depuis ces dernières années, mais elles sont coûteuses et les progrès modestes. [FUHS09]

Pour palier au problème d'autonomie, d'autres solutions ont été investiguées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules hybrides (VH). Leur but est de diminuer la consommation et la pollution, des véhicules conventionnels où inversement d'augmenter l'autonomie du VE. Le véhicule hybride le plus connu est la Prius de Toyota commercialisée en première lieu au Japon. Aujourd'hui de plus en plus de voitures hybrides apparaissent, comme la Ford Espace Hybrid, la Lexus.....etc.

III. Fonctionnement du véhicule hybride

1. Définition

Un véhicule hybride est un véhicule qui utilise au moins deux sources d'énergie différentes pour la traction du véhicule, dans l'une doit être réversible. Généralement, on désigne par

voiture hybride une voiture qui recourt à un carburant et à l'électricité pour se mouvoir au moyen de deux moteurs, l'un thermique, l'autre électrique. D'un certain point de vue, les voitures à hydrogène peuvent être considérées comme des véhicules hybrides. Elles utilisent en effet le dihydrogène de leur pile à combustible comme source d'énergie chimique pour alimenter une batterie et un moteur électrique. [EHSA05]

L'hybridation actuelle vise à l'optimisation globale du véhicule particulièrement en milieu urbain. Cette optimisation est au niveau énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (GES). Elle vise aussi à améliorer le côté performance (vitesse, couple, gestion d'énergie...), sans aucune contrainte d'autonomie. Les moteurs thermiques, trop critiqué pour leurs émissions de CO₂, peuvent fournir un large panel de puissance : la faible (vitesse réduite) jusqu'à la plus forte (dépassement, démarrage en côte), mais cela se fait avec un rendement très faible et une importante émission du GES. Il est préférable d'utiliser ce dernier dans sa gamme de fonctionnement optimal et de faire recours au moteur électrique qui a un rendement élevé et un couple important.

III.2. Phases de fonctionnement d'un VH

2.1 Phase arrêt

Le moteur thermique peut être automatiquement coupé, ce qui permet de réduire la consommation en cycle urbain, c'est la solution la plus simple connu sous le nom d'*alternodémarrreur*, le démarrage est assuré par le moteur électrique. Cette fonctionnalité est destinée à être utilisée lors d'arrêt aux feux rouges, où dans des embouteillages.

2.2 Phase de départ où à faible vitesse

Les roues sont propulsées par le moteur électrique seul, alimenté par la batterie à fréquence variable. [HUSA03]

Dans le cas où la batterie est déchargée, le moteur thermique prendra la relève en fournissant un couple supérieur au couple de consigne (demandé par le conducteur), pour entrainer le véhicule et une génératrice afin de recharger la batterie.

Cette fonctionnalité vise à ce que la voiture soit propulsée par le moteur électrique dans la zone urbaine. Comme elle permet d'augmenter légèrement la charge du moteur thermique en lui permettant de fonctionner dans la plage de son meilleur rendement. Le supplément d'énergie est ensuite récupéré par la machine électrique pour recharger la batterie.

2.3 Phase de condition normale

Les roues sont propulsées à la fois par le moteur thermique et le moteur électrique, ce dernier est alimenté par une batterie. Un générateur assure la recharge de cette batterie, on parle ici de l'alternateur accouplé au moteur thermique qui constitue ensemble un groupe électrogène.

Ce mode peut être actionné pour charger le moteur thermique afin de le placer sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité.

Cette fonction n'existe que dans les véhicules hybrides où les deux couples peuvent s'additionner (architecture hybride parallèle et série/parallèle).

2.4 Cas de forte accélération

Les deux moteurs rentrent en jeu, le moteur électrique est alimenté par la batterie. Pas de générateur en fonctionnement, afin de céder toute la puissance du moteur thermique pour la propulsion.

2.5 Phase de freinage

L'énergie cinétique du véhicule peut être partiellement récupérée par le moteur électrique et stockée dans la batterie.

Si le système de stockage a atteint sa limite de charge maximale, le frein mécanique prend le relais pour continuer de décélérer le véhicule jusqu'à l'arrêt et l'énergie cinétique sera dissipée sous forme de chaleur dans les freins comme c'est le cas dans les véhicules conventionnels.

III.3. Classification des véhicules hybrides

3.1 Selon le taux d'hybridation

Cette classification est surtout utilisée par les constructeurs et équipementiers. Elle ne prend pas en compte l'architecture du véhicule mais plutôt les fonctionnalités qu'elle peut réaliser en fonction de son taux d'hybridation. Cette classification se distingue par quatre niveaux : le *micro hybrid*, le *mild hybrid*, le *full hybrid* et le *plug-in hybrid*.

On appelle taux d'hybridation la part de puissance que peut fournir la seconde source d'énergie par rapport à la puissance totale disponible à bord. Pour un véhicule hybride thermique/électrique, le taux d'hybridation (I.1) est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale exprimé en pourcentage :

$$TH = \frac{\text{Puissance électrique}}{\text{Puissance électrique} + \text{Puissance thermique}} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

En allant d'un véhicule thermique ($TH=0\%$), jusqu'au véhicule électrique ($TH=100\%$) plusieurs nominations peuvent exister, notons que ces nominations sont très variables selon les auteurs et les constructeurs automobiles.

a) Micro Hybrid

La caractéristique principale du micro hybride est que l'ancien alternateur et démarreur du véhicule forment un seul moteur électrique appelé *alternateur-démarreur*, capable de remplir les deux fonctions, celles de démarrer le moteur thermique et de charger la batterie. Cette configuration permet également de remplir la fonction *Stop&Go* représentant le premier niveau d'hybridation. Ainsi, les véhicules qui le sont équipés se mettent en veille dès que la vitesse tombe au-dessus de 6 km/h, i.e. à l'approche d'un feu rouge où dans un embouteillage. Au démarrage, le moteur repart automatiquement dès que le conducteur relâche la pédale de frein. [GUEN11]

b) Mild Hybrid

La principale différence entre le *micro hybrid* et le *mild* est l'*alternateur-démarreur*, remplacé par un moteur électrique plus puissant capable d'accomplir de nouvelles tâches ainsi la batterie étant de taille plus grande, le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la traction, mais entraîne très rarement le véhicule tout seul. Une autre fonctionnalité importante de l'hybride *mild* est la possibilité de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage. Le moteur électrique est d'habitude branché sur le même arbre que le moteur thermique, entre le moteur thermique et la boîte de vitesse. Cette configuration permet un gain de consommation entre 20 % et 25 % par rapport à une voiture classique de même catégorie.

c) Full Hybrid

Le *full Hybrid* est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance relativement équivalente. Ainsi, par rapport à la configuration *mild* le moteur électrique augmente en importance, le moteur thermique pouvant être diminué de taille. La batterie devient aussi plus grande et permet grâce au moteur électrique d'entraîner le véhicule en fonctionnement tout électrique (zéro émission). Ce mode de fonctionnement peut être sous le contrôle de la gestion électronique du véhicule où sous le contrôle direct du conducteur. Dans le premier cas, le fonctionnement tout électrique couvre des distances courtes aux vitesses faibles (*Toyota Prius, Nissan Tino Hybrid*) laissant la priorité à l'essence sur route où quand la circulation est fluide. Donc le deuxième cas, le conducteur peut choisir un mode tout électrique pour des distances plus longues (20 Km où plus), en général compatibles avec

l'usage urbain. Le contrôle de tel système est complexe, mais l'amélioration du rendement global entraîne une diminution de consommation de 40 % à 45 %. [EHSA05]

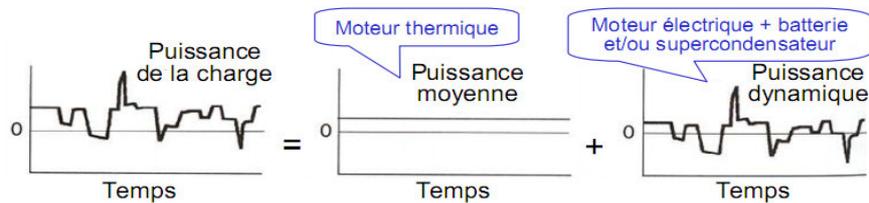


Figure I.1 : Puissance de charge en deux composantes : moyenne et dynamique

La variété des modes de fonctionnement d'un véhicule *full Hybrid*, procure une importante flexibilité dans la gestion énergétique. La figure I.1 présente une gestion d'énergie sur un VH où la puissance instantanée est décomposée en puissance moyenne et dynamique. Cette décomposition s'accorde avec la théorie des trois énergies ($\sum E = E_p + E_t + E_i$), qui divise la fourniture d'énergie en trois catégories : l'énergie permanente E_p , transitoire E_t et impulsionnelle E_i . Il est donc avantageux d'optimiser la liaison source et consommation afin d'améliorer l'efficacité énergétique du système entier. Dans ce sens, la puissance totale de la charge est fournie par deux types de sources différentes. Ainsi, l'énergie thermique provenant d'un moteur thermique est bien adaptée pour fournir l'énergie permanente, tandis que l'énergie électrique est bien adaptée pour fournir la puissance dynamique à travers le moteur électrique alimenté par la batterie.

d) *Plug In Hybride*

Un plug-in de véhicules électriques hybrides (PHEV), est un véhicule hybride avec des piles rechargeables qui peuvent être restaurés à pleine charge en branchant une fiche à une source externe d'énergie électrique. PHEV partage à la fois les caractéristiques d'un véhicule électrique hybride classique, ayant un moteur électrique et un moteur thermique et celles d'un véhicule tous électrique, tous ayant également une prise pour se connecter au réseau électrique. La plupart des véhicules électriques hybrides rechargeables sur les routes aujourd'hui sont les voitures particulières, mais il y'a aussi des versions PHEV de véhicules utilitaires et fourgonnettes, camions utilitaires, autobus, trains, motos, scooters et véhicules militaires.

Certaines classifications proposent des désignations où des fonctionnalités supplémentaires. Par exemple [GUIL08], mentionne l'existence de *Muscle Hybrid*, qui emploient l'assistance électrique dans le seul but d'améliorer les performances du véhicule, sans downsizing du

moteur thermique. Ce type de conception est assez éloigné de l'usage premier des véhicules hybrides, c'est-à-dire limiter les émissions de CO₂.

Le tableau (I.1) résume toutes les fonctionnalités déjà mentionnées selon le type d'hybridation :

Tableau I.1 : Dénomination usuelle des véhicules hybrides et fonctionnalité associées

	Micro Hybrid	Mild Hybrid	Full Hybrid	Plug-in Hybrid
Coupure du moteur à l'arrêt du véhicule	✓	✓	✓	✓
Récupération d'énergie au freinage	(optionnelle)	✓	✓	✓
Assistance électrique et Downsizing		✓	✓	✓
Mode Tout-électrique			✓	✓
Autonomie en Mode Tout-électrique (ZEV)				✓
Recharge batterie via Réseau Domestique				✓
Exemple de réalisation	Citroën C3	Honda IMA	Toyota THSII	Daimler Sprinter

3.2. Selon l'architecture du véhicule hybride

Les VH peuvent être classés en trois grandes architectures. L'architecture désigne la configuration des principaux éléments de la chaîne de traction. Dans notre cas, il s'agit du moteur thermique, machine électrique et d'une batterie. On peut caractériser trois architectures par la façon dont les énergies thermique et électrique sont acheminées jusqu'aux roues : série, parallèle ou à dérivation de puissance (série-parallèle). [CHAN01]

a) *Hybride série*

Dans cette configuration (figure I.2), le moteur thermique entraîne un alternateur qui alimente la batterie en cas de décharge et le moteur électrique en cas de forte demande de puissance. Ce type de modèle permet une très grande souplesse de propulsion, elle consiste à faire fonctionner le moteur thermique dans la plage de son rendement le plus élevé et à augmenter l'autonomie du véhicule. Par contre le rendement global est très faible à cause d'une double conversion d'énergie. Puis, elle nécessite un moteur électrique relativement puissant car il assure à lui seul l'intégralité de la propulsion.

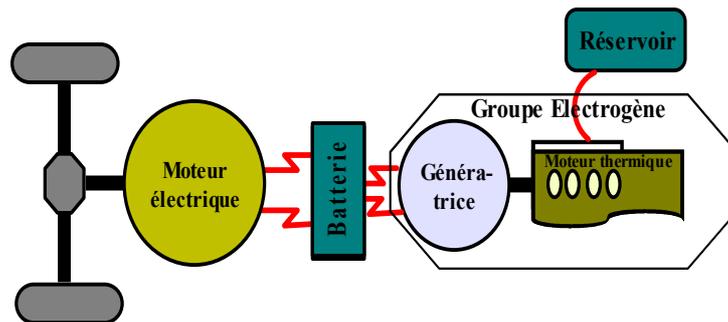


Figure I.2 Architecture série du véhicule hybride

Néanmoins cette architecture permet de satisfaire l'une des contraintes soulevées dans la problématique, particulièrement une faible émission en cycle urbain et un gain de 15 à 30% en consommation. [GUEN11] [CHAN01]

b) Hybride parallèle

Dans une structure hybride parallèle, le moteur thermique fournit sa puissance aux roues comme pour un véhicule traditionnel. Il est mécaniquement couplé à une machine électrique qui permet de l'assister.

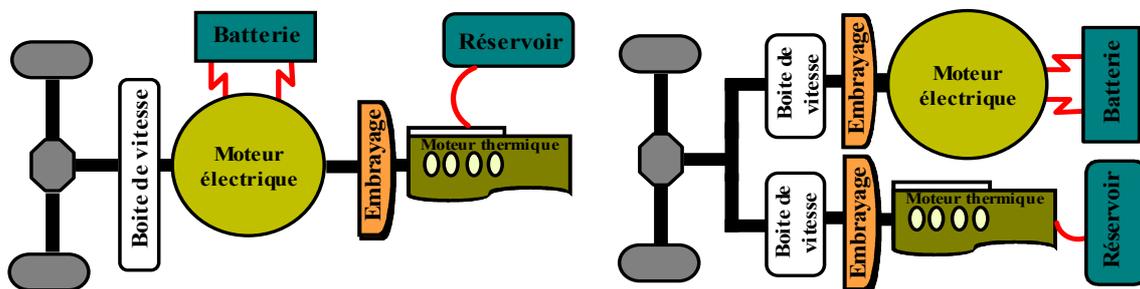


Figure I.3 Configuration hybride parallèle double arbre et simple arbre

La particularité de son couplage lui donne aussi le nom d'hybride parallèle à addition de couple où à addition de vitesse selon la structure et la conception du véhicule. La structure à addition de couple additionne les couples de la machine électrique et du moteur thermique afin de propulser le véhicule (où pour recharger la batterie). Cette connexion peut se faire par courroies, poulies, où engrenages (technologie nommée hybride parallèle double arbre). La machine électrique peut être également placée sur l'arbre reliant la transmission au moteur thermique (technologie appelée parallèle simple arbre). La structure à addition de vitesse additionne les vitesses du moteur thermique et de la machine électrique. La vitesse résultante est liée à la transmission. Ce type de couplage permet d'avoir une flexibilité importante au

niveau des vitesses. La connexion est réalisée mécaniquement par un train planétaire (appelé également train épicycloïdal).

Cette architecture demande un contrôle plus complexe que celui de l'architecture série et demande un travail supplémentaire pour l'intégration physique des sources d'énergie.

Néanmoins, des gains non négligeables peuvent être obtenus, même en utilisant des composants électriques de faible puissance et de faible capacité. Aussi, ces gains permettent de compenser le surcoût de cette architecture et le surpoids lié aux batteries et au moteur électrique.

c) *Hybride série-parallèle*

Une architecture série-parallèle, combine les modes de fonctionnement et les avantages des deux architectures série et parallèle. La plus connue des architectures hybrides série/parallèle est celle de la Toyota Prius. Cette dernière utilise un train planétaire et une première machine électrique qui permet d'amener le moteur sur ses meilleurs points de rendement, une deuxième machine participe à la traction.

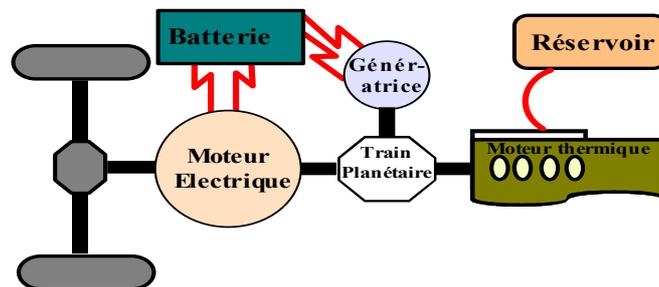


Figure I.4 : Schéma du véhicule à double hybridation

Au sein de ces structures, une partie de l'énergie délivrée par le moteur thermique est transmise mécaniquement aux roues. Parallèlement, les machines électriques prélèvent ou fournissent de l'énergie à la transmission pour satisfaire les objectifs (accélération, charge ou décharge de la batterie, consommation optimale du moteur thermique). Dans la majorité des cas il y a deux machines électriques, pouvant chacune être soit motrice soit génératrice. Cette configuration permet donc au moins 4 modes de fonctionnement ayant chacun certains avantages. Une telle architecture est décrite sur la figure I.4.

Cette architecture présente l'avantage d'être très performante, sans l'utilisation d'embrayage ou de variateur de vitesse mais d'une gestion très délicate.

III.4. Comparaison des différentes structures de propulsion

Selon la configuration employée, voici quelques avantages et inconvénients de chacune d'elle présenter dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Comparaison de diverses architectures [HOEL03]

Type d'hybride	Avantages	Inconvénients
Série	<p>Bon rendement énergétique aux faibles vitesses (mode tout électrique en zone urbaine);</p> <p>Très bon contrôle du moteur thermique.</p> <p>Bonnes performances dynamiques de la machine électrique (confort d'utilisation);</p> <p>Le groupe électrogène n'est pas nécessairement placé à côté de la machine électrique de traction : degré de liberté supplémentaire pour placer les divers composants (exemple du bus à plancher bas);</p> <p>Gestion relativement facile (par rapport aux autres architectures).</p> <p>Elle est simple à concevoir et à contrôler. Elle nécessite très peu d'équipements mécaniques (pas d'embrayage ni de boîte de vitesses).</p>	<p>Faible rendement énergétique de la chaîne globale (en zone extra-urbaine);</p> <p>Utilisation de 3 machines dont une (la machine électrique de traction) est au moins de forte puissance (encombrement maximal) ;</p> <p>Mode tout thermique impossible.</p>
Parallèle	<p>Bon rendement énergétique ;</p> <p>Utilisation d'une seule machine électrique;</p> <p>Mode tout thermique et tout électrique (dans certains cas) possible; Transmission peu modifiée (dans certains cas) par rapport au véhicule conventionnel;</p>	<p>Fonctionnement du moteur thermique plus accru : dynamiques mauvaises ;</p> <p>La consigne de couple doit être répartie à chaque instant entre les deux sources de couple.</p> <p>Couplage mécanique et contrôle énergétique complexe;</p>
Mixte	<p>Bon rendement énergétique ;</p> <p>Très bonne répartition de l'énergie ;</p> <p>Souplesse du véhicule : tous les modes sont autorisés (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle) ;</p> <p>Pas de rupture de couple à la roue.</p>	<p>Utilisation de 3 machines où 2 machines avec 2 embrayages ;</p> <p>Couplage très complexe et gestion très délicate ;</p> <p>Elle nécessite au moins deux machines électriques en plus du moteur thermique ce qui la rend coûteuse et très lourdes.</p>

IV. Conclusion

L'impact positif de l'hybridation des véhicules sur l'économie de carburant est double. Premièrement, la présence de batterie permet de faire fonctionner le moteur thermique à son efficacité optimale. Pour la structure série, cela est réalisé en concevant le train moteur d'une telle façon que le moteur thermique travaille à une condition de fonctionnement qui correspond à son efficacité de conversion maximale. Donc, les sommets dans la demande de puissance sont effectués par la batterie. Pour la disposition parallèle, le moteur a un fonctionnement meilleur que dans le cas d'un véhicule conventionnel, principalement à cause de deux raisons : la minimisation de la masse et l'occurrence de fonctionnement du moteur pendant la conduite urbaine, où l'économie de carburant du MCI (moteur à combustion interne) est d'habitude très basse. Dans ce cas, l'épuisement de la charge de la batterie est indemnisée en allumant le moteur dans des itinéraires de route et en exigeant plus de puissance pour recharger la batterie.

Le deuxième avantage important concerne le freinage régénérateur. Par un tel processus, le moteur/générateur électrique fournit le moment de torsion négatif exigé pour ralentir le véhicule, tant dans la structure série que dans la structure parallèle. Donc, l'énergie cinétique du véhicule, qui est généralement perdue sous forme de chaleur dans les véhicules conventionnels, peut être récupérée et reconstituée dans la batterie. Le freinage régénérateur contribue significativement à l'économie de carburant. Comme par exemple, en conduite urbaine, les économies de carburant obtenues via le freinage régénérateur s'étendent jusqu'à 20 % en respectant les mêmes proportions puissance-poids que les voitures conventionnelles. D'une vue architecture, l'hybride série, beaucoup plus implanté dans les bus de transport urbain, me semble assez avantageuse en terme d'autonomie et de facilité de gestion contrairement aux autres architectures, qui ont besoin d'une gestion très délicate. Elle présente aussi un bon rendement énergétique en mode tout électrique en zone urbaine. L'intérêt de cette structure est de pouvoir utiliser le moteur thermique à son point de fonctionnement optimal quelle que soit la puissance demandée au niveau des roues ce qui réduirait les émissions de GES.

Le deuxième chapitre sera consacré au choix des organes électriques et mécaniques d'un véhicule hybride série en insistant sur la technologie la plus répandue en termes de fiabilité, du prix et du rendement.

Chapitre II :

Représentation Macroscopique d'un Véhicule Hybride Série

I. Introduction

Une fois l'architecture sélectionnée, le choix de la technologie et le dimensionnement des composants sont essentiels car ils déterminent non seulement les performances dynamiques du véhicule (accélération maximale, vitesse et couple maximale, etc.) mais aussi la consommation moyenne du véhicule et ses émissions de polluants.

Dans ce chapitre, nous allons décrire le véhicule hybride série dans son ensemble, ainsi tous les éléments constituant une chaîne de traction série, en dressant l'œil sur l'identification et le choix de chaque élément selon les besoins d'une traction série.

Le choix de chaque élément se base sur le rendement de celui-ci, son impact sur l'environnement, le coût de fabrication et sa stratégie de commande, le marché offre certainement plusieurs choix selon le besoin mais dans un système embarqué tel qu'un véhicule, on cherche toujours à minimiser son poids totale même si la batterie où l'un des moteurs offre tous les atouts favorable, reste à le juger sur son poids. Ainsi, les attentes des consommateurs, les différentes utilisations possibles du véhicule hybride sont également des facteurs à prendre en compte.

II. Description du modèle série

Dans l'architecture série, le couple transmis aux roues provient du moteur électrique. Ce dernier est alimenté par une batterie et/ou une génératrice entraînée par le moteur à combustion. Des convertisseurs de passage seront définis comme sur la figure II.1. [GUEN11]

Ce système ne fait pas apparaître un système de commande ni un système de gestion de l'énergie de façon à faire fonctionner chacun des moteurs dans sa plage de haut rendement. Des tels systèmes sont mis en place et décrit au chapitre IV.

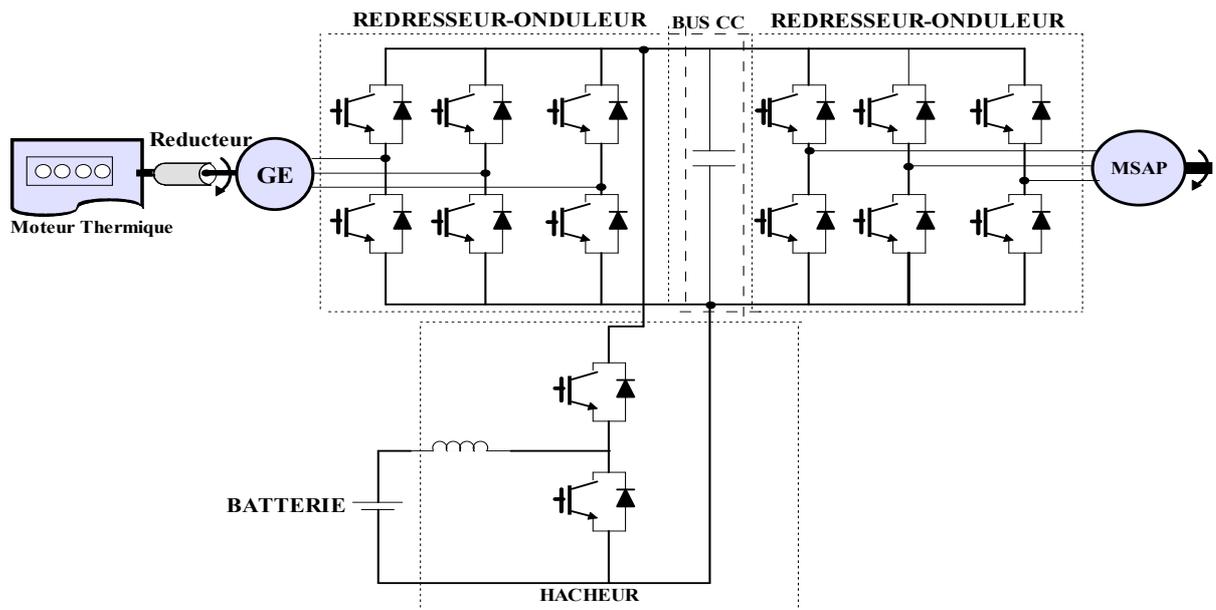


Figure II.1 : Schéma détaillé d'un véhicule hybride série

Pour la suite de l'étude nous considérerons les sous systèmes suivants :

- Un sous système de génération (non réversible) : groupe électrogène constitué d'un moteur thermique, d'un générateur électrique et d'un convertisseur électrique ;
- un sous système de traction (réversible) constitué : d'un convertisseur électrique, d'une machine électrique de traction et un équipement de transmission mécanique ;
- un sous système de stockage d'énergie (réversible) composé : d'une batterie, d'une inductance de lissage et d'un convertisseur électrique.

II.1. Sous système de traction

Le système de traction est composé d'une machine électrique alimentée par un convertisseur. Un différentiel mécanique est utilisé pour répartir la puissance aux roues. Un réducteur permet de coupler le différentiel à la machine.

a) Machine électrique

Une machine synchrone à aimant permanent est la plus répandue pour l'entraînement des véhicules hybrides [LHOM07], grâce aux meilleures performances qu'elle offre en terme de rendement, du couple et de la puissance massique, elle présente l'élément transformant le courant électrique en un couple (et inversement). Technologie très innovante, aucune alimentation électrique n'est nécessaire pour le rotor, aucune pollution, peu de maintenance et relativement facile à commander. Destiné aussi à faire freiner le véhicule en récupérant de l'énergie [EHSA05]. Ce qui concerne la mise en marche du moteur synchrone, peut être

réalisée par variation de fréquence lorsque la fréquence de la tension appliquée lors du démarrage varie progressivement de zéro jusqu'à sa valeur nominale.

b) Convertisseurs DC/AC (Onduleur)

Il s'agit d'un convertisseur électronique permettant d'alimenter le moteur électrique en tensions triphasées, à fréquence variable à partir de la tension continue de la batterie. Ainsi, la récupération d'énergie fournis par la machine synchrone qui est en fonction génératrice en cas de freinage récupératif (figure II.2).

L'onduleur utilise des valeurs moyennes intégrées donc des sources de tension et de courant commandées.

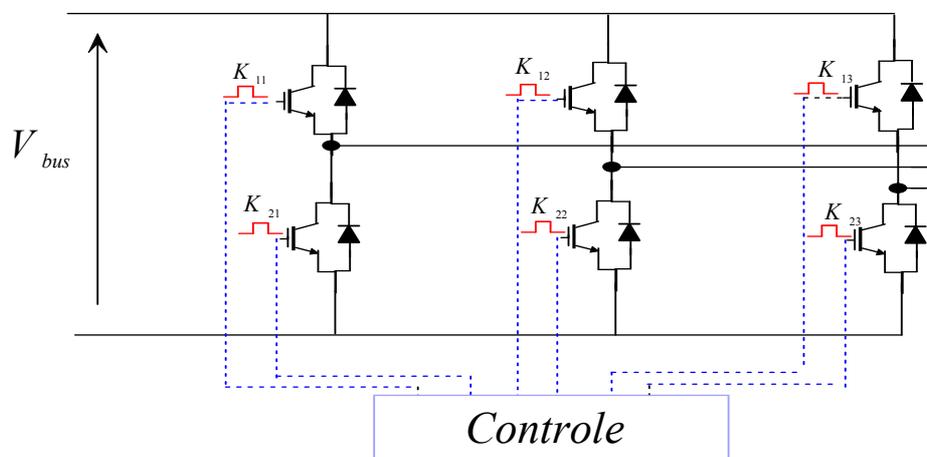


Figure II.2 : Schéma détaillé d'un onduleur

L'onduleur peut également fonctionner en mode saturé. Ce mode est utilisé lorsque la tension du bus n'est plus suffisante face à la tension interne de la machine synchrone et le courant demandé ne peut être fourni. Alors, deux sources de tension sont utilisées (batterie + génératrice).

c) Boîte de vitesses

En sortie de l'arbre du moteur électrique, un couple est disponible. Ce couple est transmis aux roues par l'intermédiaire de plusieurs éléments mécaniques. Le premier est la boîte de vitesses dont le rapport de transmission est imposé par un système hydraulique qui change le diamètre des poulies. Dans ce travail, on s'affranchit à donner les vitesses sur l'arbre du moteur uniquement en tour par minute (tr/mn), donc la boîte de vitesse ne sera pas modéliser et son rendement sera pris égal à un.

d) Différentiel

Le second élément mécanique pour transmettre le couple aux roues est le différentiel (Figure II.3). Cet élément relie l'arbre de transmission aux roues, permettant à chacune des roues de tourner à une vitesse différente l'une par rapport à l'autre.



Figure II.3 : Différentiel [FORU13]

En ligne droite, les roues tournent à la même vitesse. Cependant dans un virage, afin d'éviter qu'une roue glisse sur le sol et les efforts de torsion sur les arbres, un dispositif différentiel est nécessaire. Autrement dit, la puissance développée sur chaque roue est différente quand le véhicule tourne. Toutefois la puissance appliquée sur le châssis du véhicule reste identique (en supposant que la conversion des roues soit parfaite). En partant de l'hypothèse que le véhicule roule en ligne droite et que l'on néglige le contact entre les roues et la chaussée, le différentiel mécanique n'a aucune utilité d'être représenté. La modélisation du différentiel mécanique avec les roues du véhicule peut donc s'apparenter à une seule roue équivalente. Notons toutefois que son rendement sera pris égal à 1. [LHOM07]

II.2. Stockeur d'énergie

Pour notre cas, une batterie est utilisée comme source de stockage d'énergie. Cette batterie est associée à un hacheur *Boost* afin de réaliser l'étage de tension du bus continu. Ce hacheur doit être bidirectionnel, autrement-dit inverseur en courant.

a) Batterie

C'est l'élément qui assure le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique, caractérisée par sa capacité et son énergie massique, afin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. Les principales technologies utilisées pour les véhicules hybrides sont : Lithium-ion, Ni-MH, Lithium-polymère ce dernier présente les meilleures performances mais sa gestion est très délicate et son prix est élevé. [EHSA05]

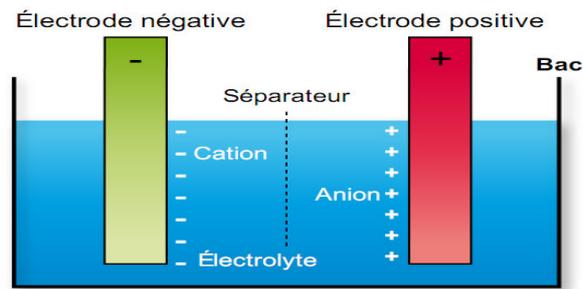


Figure II.4 : Vue interne d'une batterie [FRUM13]

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit elle une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force Électro-Motrice) de l'accumulateur.

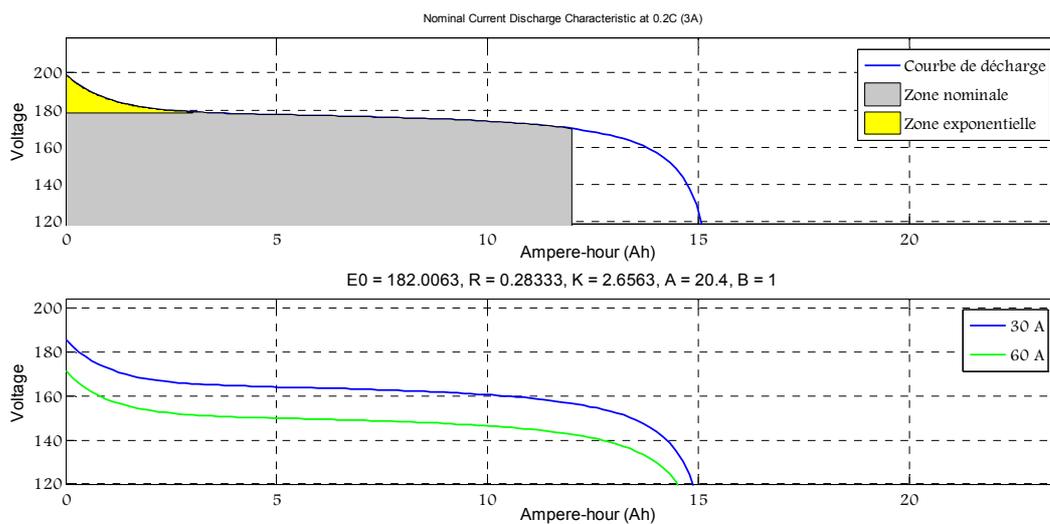


Figure II.5 : Courbe de décharge d'une batterie Li-Ion pour différentes charges en Ah [MATH13]

L'un des objectifs de contrôle d'énergie, qui sera développé dans le chapitre IV, est de faire fonctionner la batterie dans la zone nominale (figure II.5) pour un rendement plus élevé.

Les batteries utilisées actuellement dans un véhicule hybride doivent reprendre aux conditions suivantes :

- ✓ Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations ;
- ✓ Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie ;
- ✓ Une tension stable engendrant des performances régulières ;
- ✓ Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles de chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur ;
- ✓ Entretien faible et recyclage facile.

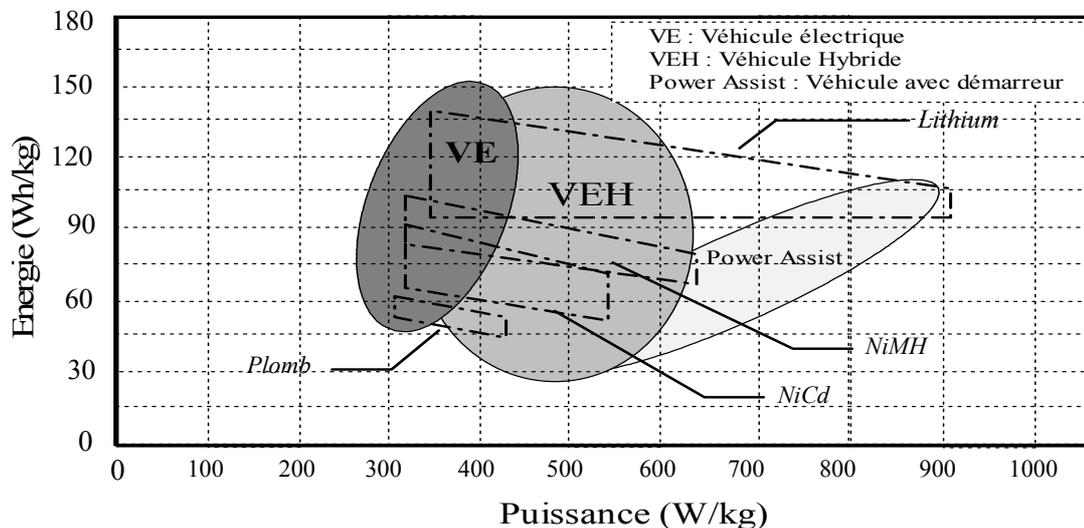


Figure II.6 : L'énergie massique en fonction de la puissance massique pour différents types d'accumulateurs [GUEN11]

Les batteries Nickel-Hydrure de Métal possèdent toutes les performances déjà soulignées sauf que leur durée de vie est encore faible pour une batterie de traction (à forte profondeur de décharge).

Le tableau II.1 présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules de tractions.

Il est important de souligner que dans le domaine des batteries, les évolutions sont toujours lentes du fait de la complexité des systèmes chimiques mis en œuvre. [KELLY02]

Tableau II.1 : Caractéristique des différentes batteries pour une application VH [EHSA05]

Batteries	Energie Wh/kg	Puissance W/J.g	Rendement %	Cycle de vie	Cout USD/kWh
Plomb-Acide	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Nickel-Cadmium	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
Nickel-Métal-Hydrure	60-80	200-300	75	1000-2000	250-350
Aluminium-Air	200-300	100	<50	/	/
Zinc-Air	100-220	30-80	60	500	90-120
Sodium-Sulfure	150-240	230	85	1000	200-350
Sodium-Nickel-Chloride	90-120	230	80	1000	250-350
Lithium-Polymère	150-200	350		1000	150
Lithium-Ion	80-130	200-300	>95	1000	200

b) Convertisseur associé (Hacheur)

Le convertisseur statique DC/DC, où hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne réglable. La tension d'entrée du convertisseur DC/DC est la tension de la batterie. La tension de sortie est une tension régulée et très élevée. Le schéma de principe de base du convertisseur est représenté dans la figure II.7. [HIJA10]

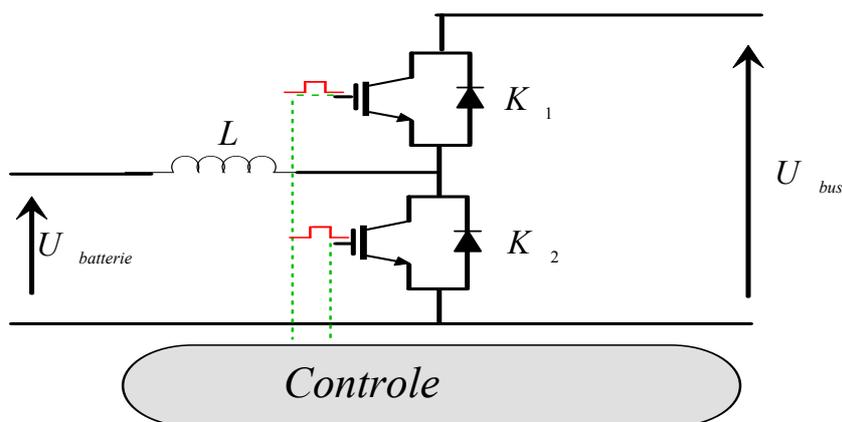


Figure II.7 : Schéma détaillé d'un convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC est un convertisseur bidirectionnel. En effet, le courant traversant ce système peut circuler dans les deux sens selon le mode de fonctionnement du véhicule. Dans le cas où la batterie fournit de l'énergie, le courant circule de la batterie vers le moteur électrique et dans le sens inverse si le moteur fournit de l'énergie à la batterie.

II.3. Groupe électrogène

Ce système est composé du moteur à combustion interne, de la génératrice et d'un convertisseur AC/DC. Les différents éléments sont présentés ci-dessus :

a) Moteur thermique

Le moteur thermique convertit de manière unidirectionnelle une énergie chimique en une énergie mécanique (figure II.8). L'énergie chimique provient d'un réservoir rempli généralement par du gasoil ou de l'essence. L'énergie mécanique résultante de la conversion, entraîne dans les véhicules traditionnels, l'alternateur électrique et la traction du véhicule. Dans la plupart des véhicules hybrides, les chercheurs utilisent des moteurs classiques à combustion interne et à cycle alternatif : moteur à allumage commandé (essence) ou à allumage par compression (Diesel).



Figure II.8 : Moteur thermique Diesel à quatre temps [FORU13]

Notons que d'autres technologies (moteur Stirling, turbine à gaz, moteur Rankine) peuvent être employées [BADIN97] mais leurs utilisations sont minimales dans le domaine hybride.

Deux types de moteur thermique à combustion interne et cycle alternatif peuvent être utilisés : le moteur deux temps et le moteur quatre temps. Sans rentrer dans les détails, nous pouvons dire que le moteur deux temps a été abandonné au profit du quatre temps en raison d'une consommation élevée et d'une fumée bleuâtre à l'échappement.

La technologie des moteurs diesels a fortement évolué durant ces dernières années. L'injection directe remplaçant la préchambre de combustion en est pour beaucoup. L'amélioration du rendement moteur permet de diminuer ainsi la consommation des véhicules. Cette raison nous laisse penser qu'un véhicule électrique hybride devrait nécessairement utiliser une motorisation thermique de ce type.

Le modèle du moteur thermique utilisé dans ce mémoire est considéré comme une source mécanique délivrant un couple (effort) et recevant une vitesse angulaire (réaction). Le couple demandé est transmis directement au système (génératrice électrique). On peut dans certain cas introduire une pseudo-dynamique qui correspond au système mais qui doit être négligeable devant les autres dynamiques du véhicule. Il faut pas oublier que l'un des objectifs de hybride est de faire fonctionner le moteur thermique dans son rendement élevé et le situé dans les zones les plus économique [LHOM07]. La figure II.9 présente un exemple d'une cartographie d'un moteur thermique Renault K9K qui donne une idée sur le point de fonctionnement d'un moteur thermique.

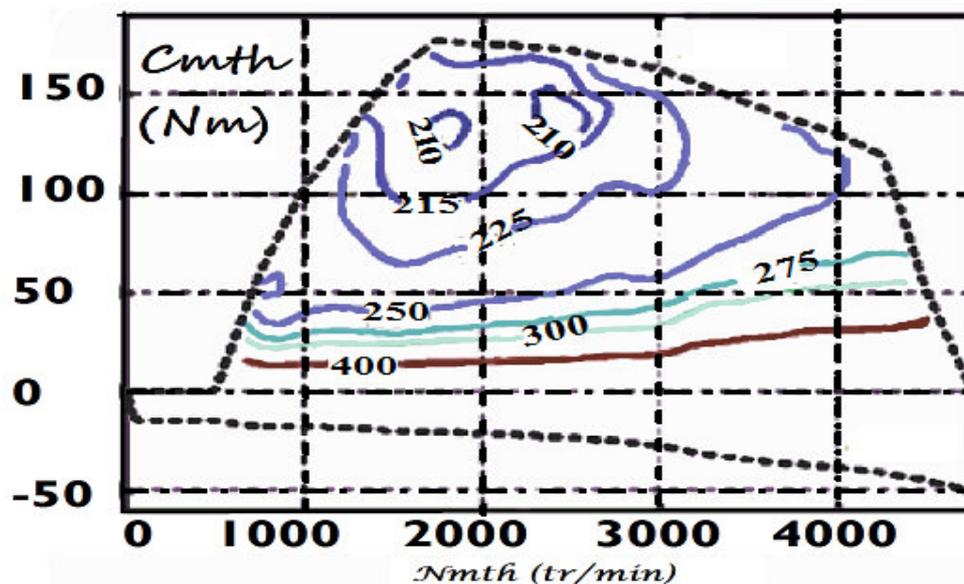


Figure II.9 : Cartographie d'un moteur Diesel Renault K9K [LHOM07]

Cette table appelée cartographie (Figure II.9), correspond à la consommation spécifique C_s en (g/kWh), en fonction du couple et de la vitesse. Les caractéristique maximales et minimales sont représentées par les traits en pointillés. Contrairement au moteur électrique, un moteur thermique possède plusieurs points de fonctionnement qui se situent dans la surface delimité par les traits bleus.

b) Génératrice

La génératrice électrique utilisée pour convertir l'énergie mécanique du moteur thermique en énergie électrique sur le bus continu, est de type synchrone à aimant permanent. Une machine synchrone à excitation séparée avec un simple pont de graëtz triphasé est viable mais ceci requiert l'utilisation du démarreur conventionnel pour pouvoir démarrer le moteur thermique. [VIDO04]. La génératrice doit être de même dimension que le moteur thermique (vitesse nominale et couple nominal).

Dans un système comme le véhicule hybride, la dynamique d'une machine électrique est beaucoup plus rapide que celle du véhicule. Comme pour le moteur thermique, une modélisation énergétique peut être requise dans certain cas (en néglige le régime dynamique). Le convertisseur associé (redresseur triphasé) à cette génératrice, peut être contrôlé de différentes manières. Selon le choix, la commande peut être choisie de sorte à minimiser les pertes où à assurer une bonne qualité des signaux de sortie. Le but de ce mémoire est d'associer une commande à minimisation de perte, cette commande sera l'objet dans les chapitres qui suivent.

II.4. Bus continu (nœud du couplage énergétique)

Le bus continu, matérialisé par un condensateur de filtrage, est traversé par tous les flux énergétiques du véhicule (Figure II.1). Des fluctuations importantes de la tension du bus peuvent diminuer les performances dynamiques de la traction. Ces fluctuations peuvent donc avoir une influence sur le rendement énergétique du système. C'est pourquoi le condensateur est représenté par un élément d'accumulation d'énergie potentielle (condensateur électrolyte par exemple).

Pour notre cas d'étude, chaque couplage électrique représente un nœud de courant. Notre système en compte trois. Ces couplages étant tous de même nature, la modélisation du système viserait à représenter ces couplages en une unité avec le condensateur du bus continu comme tampon d'énergie. Néanmoins, nous verrons par la suite que le contrôle de la tension du bus continu ne peut être assuré que par l'ensemble du système de stockage (par le réglage du courant du hacheur).

III. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les éléments de base de la chaîne de traction des véhicules hybrides séries en penchant sur les technologies disponibles.

Dans notre cas, la chaîne de propulsion électrique assure seule le déplacement du véhicule, le MSAP est une solution adaptée pour ses performances technique et en particulier, sa capacité, son rendement et les valeurs élevées des rapports couple/masse et puissance/masse. Quoique le prix des aimants permanents est élevé et ne permet pas, à ce jour, de satisfaire la contrainte sur le prix de vente.

La batterie constitue l'élément central de la transmission hybride série vers lequel convergent l'ensemble des contraintes de puissance, son fonctionnement en tampon permet de déconnecter la dynamique du moteur thermique de celle du véhicule.

L'onduleur permet d'alimenter la MSAP en tension triphasée, comme il peut varier sa vitesse dans une plage bien définie. Il assure aussi le redressement du courant au mode freinage afin de le transmettre vers la batterie sous forme continu.

Le convertisseur DC/DC, dit aussi hacheur, permet de stabilisé la tension sur le bus continu toute en assurant le réglage progressif et sans perte notable. Il permet aussi de réguler le couple du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

Nos choix sur les éléments selon l'architecture série est mis au point. Dans le chapitre suivant, nous abordons la modélisation de notre système selon la partie dynamique (couple, vitesse, forces,...) et la partie motorisation (source, convertisseur, moteurs,...). Seul les éléments qui ont relation avec notre stratégie de commande seront détaillés (convertisseurs et machines électriques tournantes).

Chapitre III :

Modélisation d'un Véhicule Hybride série

I. Introduction

Afin de pouvoir arriver à simuler un véhicule hybride série et pour pouvoir développer une stratégie de commande, il faut être capable de déterminer quels sont les couples et les vitesses imposés au moteur de traction en interaction avec le profil de la route. Pour ce faire, nous établissons un bilan des efforts appliqués au véhicule.

Après avoir élaboré le modèle dynamique, la seconde étape consiste à modéliser les éléments internes de chaque sous systèmes à fin de pouvoir simuler le comportement de ces derniers sur logiciel Matlab/Psim, ce qui nous donnera une vue approximative de la nature de la stratégie de commande a réalisé.

II. Modèle mécanique du véhicule

Le comportement d'un véhicule en mouvement le long de son sens de déplacement est déterminé par toutes les forces qui agissent sur lui dans cette direction. La figure III.1 montre les forces agissant sur un véhicule en mouvement. L'effort de traction F_t dans la zone de contact située entre les pneus des roues motrices et la surface de la route propulse le véhicule vers l'avant. Elle est produite par le couple de la centrale, et ensuite transféré à travers la transmission aux roues motrices. Lorsque le véhicule est mobile, il y'a une résistance qui tente d'arrêter son mouvement. Elle comprend en général la résistance au roulement, la traînée aérodynamique et la résistance en montée.

Le modèle mécanique du véhicule doit permettre de calculer la puissance nécessaire pour propulser ce dernier en fonction de ses caractéristiques, de sa vitesse et de son accélération. Afin de calculer la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule, on applique le principe fondamental de la dynamique (P.F.D.),

$$M_v \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}ext \quad (III.1)$$

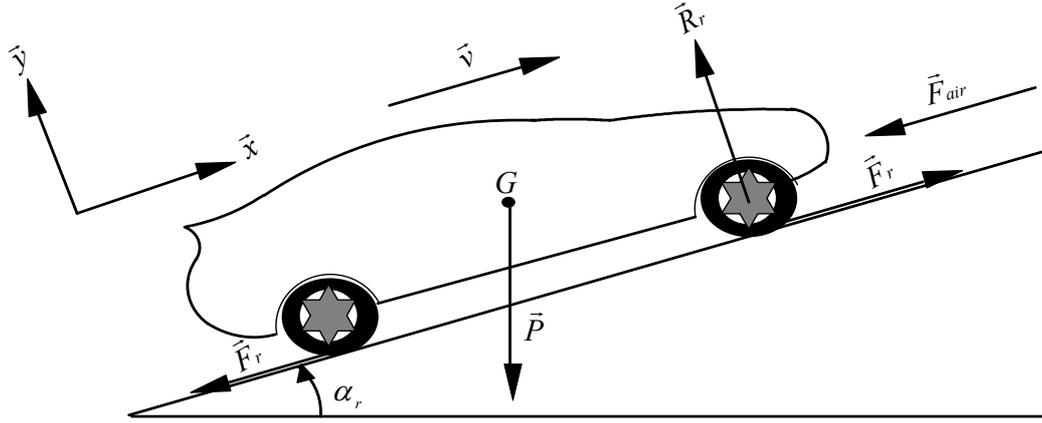


Figure III.1 : Bilan des forces sur le véhicule

Le bilan des forces extérieures au véhicule est illustré par la figure III.1.

$$M_v \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{air} + \vec{P} + \vec{F}_r + \vec{F}_t + \vec{R}_r. \quad (\text{III.2})$$

La force équivalente à la résistance de l'air \vec{F}_{air} sur le véhicule est donnée par l'équation :

$$\vec{F}_{air} = -\frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x \vec{x}, \quad (\text{III.3})$$

La résistance des roues sur le sol \vec{F}_r est donnée par la formule :

$$\vec{F}_r = -P C_r \cos \alpha \vec{x}, \quad (\text{III.4})$$

D'après la figure III.1 on peut voir que la composante de la force de traction \vec{F}_t suivant \vec{y} est nulle, on porte dans ce cas les équations que sur l'axe \vec{x} .

$$M_v \frac{dv}{dt} \vec{x} = \left(-\frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x - M_v g \sin \alpha - M_v g C_r \cos \alpha + F_t \right) \vec{x} \quad (\text{III.5})$$

L'expression de la force de traction F_t mécanique est :

$$F_t = M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha, \quad (\text{III.6})$$

La puissance mécanique (P_m) nécessaire à l'avancement du véhicule est égale au produit de la force de traction et de la vitesse,

$$P_m = F_t v, \quad (\text{III.7})$$

Donc, d'après (III.5) et l'expression de la puissance de traction du véhicule en fonction de la vitesse v et de l'accélération $\frac{dv}{dt}$ est :

$$P_m = v \left(M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha \right). \quad (III.8)$$

III. Modélisation des éléments internes du véhicule

III.1. Groupe électrogène

Comme on ne dispose que de connaissances très limitées a priori du fonctionnement du moteur thermique, développer un modèle mathématique adéquat serait délicat. Mais le fait d'avoir une architecture de base série, on se permet de remplacer le moteur thermique par un MSAP.

III.2. Modélisation du MSAP

Afin d'aboutir à une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle, nous optons pour les hypothèses suivantes :

- Le moteur est à pôles lisse sans amortisseurs et il possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les enroulements.
- Les pertes fer sont négligées.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.
- Le flux d'excitation de l'aimant permanent est considéré constant.

Equations de tensions et flux :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (III.9)$$

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\varphi_f] \quad (III.10)$$

Et :

$$[\varphi_f] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

Equation (III.11) étant l'expression de flux engendré par les aimants, et φ_{sf} la valeur crête (constante) créée par l'aimant à travers les enroulements statoriques.

On remarque que l'équation (III.9) est non linéaire et couplée, pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) qui tourne avec le rotor.

A l'aide de la transformation de Park, on passe des grandeurs statoriques réelles (tension, flux courant) à leurs composantes fictives appelées les composantes d-q

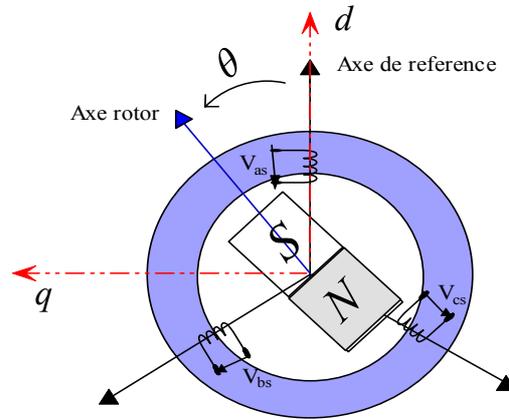


Figure III.2 : Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$[P(\theta)]$ étant la matrice de la transformation de Park qui permet le passage des grandeurs statoriques $[V_s]$, $[\varphi_s]$ et $[I_s]$ à leurs composantes relatives $[V_{dq}]$, $[I_{dq}]$ et $[\varphi_{dq}]$.

L'application de la transformation du Park à l'équation (III.9) donne après développement :

Les équations électriques :

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} (v_d - R i_d + L_q \omega_e i_q) \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} (v_q - R i_q - L_d \omega_e i_d - \varphi_f p \Omega) \quad (\text{III.14})$$

Expression de couple électromagnétique :

$$C_e = p((L_d - L_q)i_d i_q + \varphi_f i_q) \quad (\text{III.15})$$

Les équations mécaniques :

$$\frac{d}{dt} \Omega = \frac{1}{J} (C_e - f \Omega - C_r) \quad (\text{III.16})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = p \Omega \quad (\text{III.17})$$

III.3. Modélisation de la batterie

Ce modèle est en fait une source de tension contrôlée et branchée en série avec la résistance interne de la batterie comme sur la figure (III.3). La tension en circuit ouvert est calculée grâce aux équations (III.21) et (III.22) à partir de l'état de charge de la batterie (*SOC*), selon les équations suivantes :

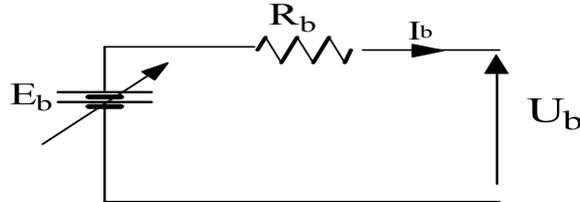


Figure III.3 : Modèle électrique équivalent de la batterie

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série :

$$U_b = E_b - R_b I_b \quad (III.18)$$

Avec :

On appelle état de charge de la batterie *SOC* (*State Of Charge*) le rapport entre la quantité d'électricité restante à l'instant t ($Q(t)$) sur sa capacité nominale (Q_{MAX}). Le *SOC* est souvent donné en %. [MATH13]

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{MAX}} \cdot 100 \quad (III.19)$$

La capacité de la batterie à l'instant t est donnée par l'équation ci-dessous :

$$Q(t) = Q(0) - \int_0^t \eta_b \cdot I_b dt \quad (III.20)$$

Le model pendant la décharge ($i^* > 0$) :

$$E_b = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it - A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (III.21)$$

Le model pendant la charge ($i^* < 0$) :

$$E_b = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i \cdot t - A \cdot e^{(-B \cdot it)} \quad (III.22)$$

E_0 : Tension de la batterie quand celle-ci est complètement chargée [V].

III.4. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure (III.4), où K_i et K'_i ($i=a, b, c$) sont des transistors IGBT monter en antiparallèle avec des diodes, S_i et S'_i sont les commandes logiques qui leurs sont associées telle que :

- si $S_i = 1$: l'interrupteur K_i est passant et K'_i est ouvert,
- si $S_i = 0$: l'interrupteur K_i est ouvert et K'_i est passant.

On suppose que l'alimentation de l'onduleur est comme une source parfaite, constituée par deux générateurs de f.é.m. égale à $\frac{V_{bus}}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

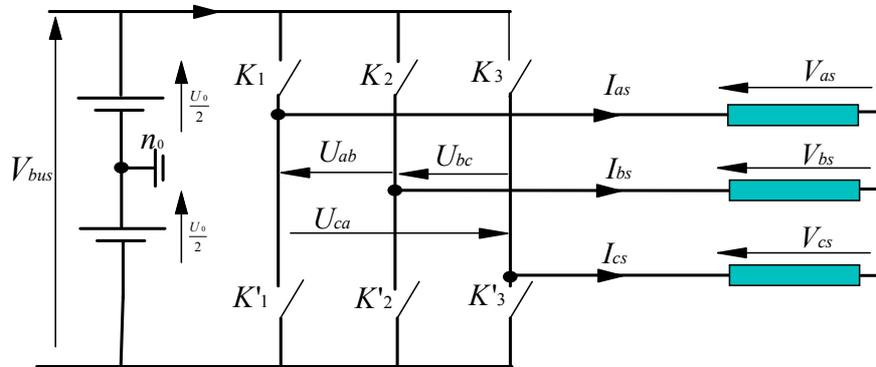


Figure III.4 : Schéma équivalent de l'onduleur

L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure III.4. La machine synchrone est connectée en étoile, V_{bus} est la tension de bus continu alimentant l'onduleur de tension.

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{bus}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{bus}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{bus}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (III.23)$$

Les tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} forment un système de tension triphasées équilibrées :

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \quad (III.24)$$

D'où :

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_{bus}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_{bus}}{3} (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{V_{bus}}{3} (2S_c - S_b - S_a) \end{cases} \quad (III.25)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_{bus}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

III.5. Modélisation du Hacheur

Le convertisseur DC/DC employé dans notre travail est composé de deux transistors IGBT (K_1 et K_2) et d'une bobine (L) branchés comme à la figure III.5.

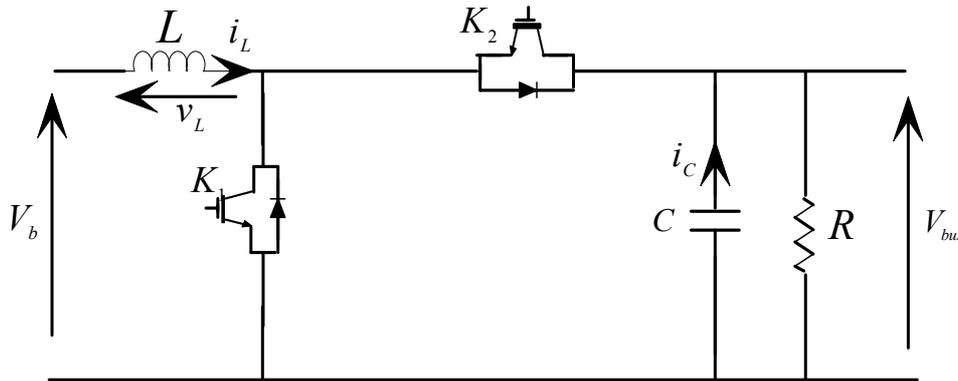


Figure III.5 : Hacheur élévateur bidirectionnel

- Analyse en régime permanent du convertisseur élévateur :

Pour contrôler l'ondulation du courant dans l'inductance L , il faut étudier les deux états de l'interrupteur K_1 .

a. K_1 fermé :

En négligeant les ondulations dans le convertisseur, il est établi que :

$$v \approx V \quad (III.27)$$

Dans ce cas, la tension aux bornes de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = V_b \quad (III.28)$$

$$i_c = -\frac{V_{bus}}{R} \quad (III.29)$$

b. K_I ouvert :

Encore une fois, en négligeant les oscillations, il est établi que :

$$v \approx V \quad (III.30)$$

$$i_L \approx I_L \quad (III.31)$$

Lorsque le transistor K_I devient ouvert, la tension au borne de l'inductance et le courant traversant le condensateur sont égaux à :

$$V_L = V_b - V_{bus} \quad (III.32)$$

$$i_c = i_L - \frac{V_{bus}}{R} \quad (III.33)$$

Donc :

$$V_L = V_b - V_{bus} \quad (III.34)$$

$$i_c = I_L - \frac{V_{bus}}{R} \quad (III.35)$$

Au finale, on peut déduire des équations précédentes la tension aux bornes de l'inductance au cours d'une période de commutation :

$$\int_0^T V_L(t)dt = V_b \cdot \alpha \cdot T + (V_b - V_{bus}) \cdot \alpha' \cdot T \quad (III.36)$$

$\alpha \cdot T = T_{on}$ et $\alpha' \cdot T = T_{off}$: Respectivement temps d'ouverture et de fermeture du transistor k_I .

En égalisant l'expression (III.37) à zéro et en groupant les termes, la formule suivante est obtenue :

$$V_b \cdot (\alpha + \alpha') - V_{bus} \cdot \alpha' = 0 \quad (III.37)$$

Or:

$$(\alpha + \alpha') = 1 \quad (III.38)$$

L'expression (III.38) donne :

$$V_{bus} = \frac{V_b}{\alpha'} \quad (III.39)$$

Le même principe sera employé pour obtenir le courant traversant le convertisseur. Le courant sur une période de commutation est égal à :

$$\int_0^T i_c(t)dt = -\frac{V_{bus}}{R} \cdot \alpha \cdot T + \left(1 - \frac{V_{bus}}{R}\right) \cdot \alpha' \cdot T \quad (III.40)$$

En regroupant les termes semblables et en égalant la dernière équation à zéro, l'équation suivante est obtenue :

$$-\frac{V_{bus}}{R} \cdot (\alpha + \alpha') + I \cdot \alpha' = 0 \quad (III.41)$$

La résolution de l'équation précédente nous donne le courant traversant le convertisseur :

$$I = \frac{V_{bus}}{R \cdot \alpha'} \quad (III.42)$$

IV. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenté les équations mathématiques utilisées pour la modélisation de chaque élément du véhicule hybride série séparément. Tous ces modèles permettent d'établir et de valider les lois de commandes. Ainsi, cette validation s'effectuera par des simulations qu'on présentera dans le dernier chapitre. La partie mécanique a été modélisée avec un modèle quasi statique.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les divers techniques de commande utilisées dans les véhicules en générale, soit hybride ou électriques, et des résultats de simulations seront à l'issue de valider les techniques proposés.

Chapitre IV :

Techniques de Commande pour Véhicule Hybride Série

I. Introduction

On s'attend à ce que les véhicules hybrides aient une consommation de carburant inférieure à celle de leur homologue conventionnel tout en conservant les mêmes performances. La principale différence concerne la gestion de deux sources d'énergie : si les stratégies de commande doivent aller dans le sens de la réduction de la consommation moyenne de carburant, il est nécessaire d'y intégrer la gestion de la deuxième source d'énergie et c'est ce qu'on va chercher à développer dans ce chapitre.

L'autonomie du véhicule en mode tout électrique, moteur thermique éteint, est très souvent petite. Dans ce cas, la gestion de la batterie peut revenir, par exemple, à maintenir l'état de charge dans des limites acceptables. Cependant, l'état de charge doit rester assez bas pour pouvoir profiter du freinage récupératif sans surcharger la batterie et suffisamment haut pour assurer, à tout moment, une autonomie minimale en mode électrique pur.

La suite de ce chapitre présente quelques stratégies de commande qui ont été appliquées sur des véhicules hybrides. Elles sont regroupées en deux classes. L'une d'elles correspond aux stratégies dont la synthèse fait appel à des connaissances empiriques. Dans ce contexte, un des formalismes fait appel à des régulateurs à base de règle nombreuse pour la synthèse de ces derniers. La deuxième classe concerne des stratégies basées sur l'analyse des échanges énergétiques entre les différents organes du groupe motopropulseur et le véhicule [CALLA01].

II. Stratégies de commande basées sur une minimisation instantanée de pertes

II.1. Commandes de l'ensemble convertisseur / machine électrique

Dans le contexte de la traction électrique, le rendement énergétique de l'ensemble de la chaîne de traction est primordial. En effet, la source d'énergie étant limitée, la consommation énergétique doit être réduite autant que possible. Nous nous intéresserons à établir différentes stratégies maximisant le rendement de l'ensemble convertisseur / machine électrique. Ainsi, pour une machine donnée, l'obtention du couple désiré par l'utilisateur peut être obtenue pour différents états magnétiques du stator et du rotor.

II.1.1. Commande MLI

La commande souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la stratégie MLI. Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmonique possible. Le principe de cette stratégie est la détermination des portions de temps (durée de modulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage. Cette commande rapprochée permet de déterminer les séquences des allumages et des extinctions des composants du convertisseur et de minimiser les harmoniques des tensions appliquées au moteur. Pour un entraînement à courant alternatif performant, on préfère une stratégie de commande évoluée. Le contrôle par flux orienté est une méthode appropriée pour satisfaire des performances élevées. [CAPI02]

La réduction des pertes, dans le cadre de la variation de vitesse, a été traitée depuis longtemps, de plusieurs points de vue :

- La réduction des pertes de la machine, liée en général à la qualité des courants imposés par une certaine commande de l'onduleur
- la réduction des pertes dans l'onduleur : par commutation et par conduction.

a) La MLI Intersective (sinus-triangle)

C'est la modulation la plus classique, les ordres de commande des interrupteurs de puissance sont générés à partir de la comparaison des signaux de référence sinusoïdaux v_{ma} , v_{mb} et v_{mc} , appelées modulantes, de fréquence égale à f , et du signal de modulation triangulaire v_p , appelé porteuse de haute fréquence f_c . La figure suivante illustre le principe de ce type de modulation. [LABR09]

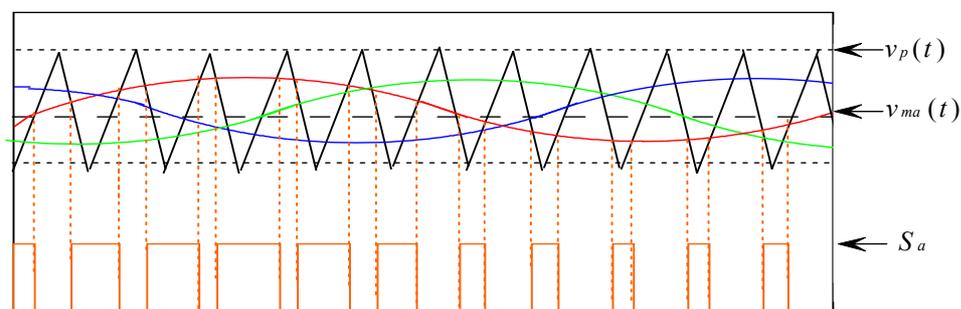


Figure IV.1 : Principe de la technique MLI Intersective (sinus-triangle)

Deux paramètres caractérisent ce type de modulation :

- L'indice de réglage : défini par le rapport $m = f_c/f$.

- Le coefficient de réglage : défini par le rapport des amplitudes des modulantes et de la porteuse $r = V_m/V_{pmax}$. Généralement, ce coefficient est compris entre 0 et 1 (l'amplitude de la référence reste inférieure à celle de la porteuse).

Le fondamental des trois tensions simples (mesurées par rapport au neutre du réseau) à l'entrée du pont redresseur triphasé est représenté par les expressions ci-dessous :

$$\begin{cases} v_a(t) = \frac{1}{2}V_{bus} r \sin(\omega t) \\ v_b(t) = \frac{1}{2}V_{bus} r \sin(\omega t - \frac{2\cdot\pi}{3}), \\ v_c(t) = \frac{1}{2}V_{bus} r \sin(\omega t + \frac{2\cdot\pi}{3}) \end{cases} \quad (IV.1)$$

Dans notre cas, la porteuse est supposée comprise entre 0 et 1, comme le montre la figure IV.1, les modulantes ont les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{ma}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r \sin(\omega t) \\ v_{mb}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r \sin(\omega t - \frac{2\cdot\pi}{3}) \\ v_{mc}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r \sin(\omega t + \frac{2\cdot\pi}{3}) \end{cases} \quad (IV.2)$$

Dans le cadre de cette étude, nous utilisons la MLI Intersective (sinus-triangle). Dans ce cas, une porteuse délivrant un signal triangulaire alternatif de haute fréquence (27kHz) fixe la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur de tension. Ce signal triangulaire d'amplitude crête $V_{bus}/2$, est comparé à trois tensions instantanées de référence v_{mi}^* (signal modulante) sortant des régulateurs du type PI. Les intersections de ces deux signaux génèrent les ordres de commande des bras de l'onduleur. La figure IV.2 illustre le principe de cette méthode de commande en monophasé.

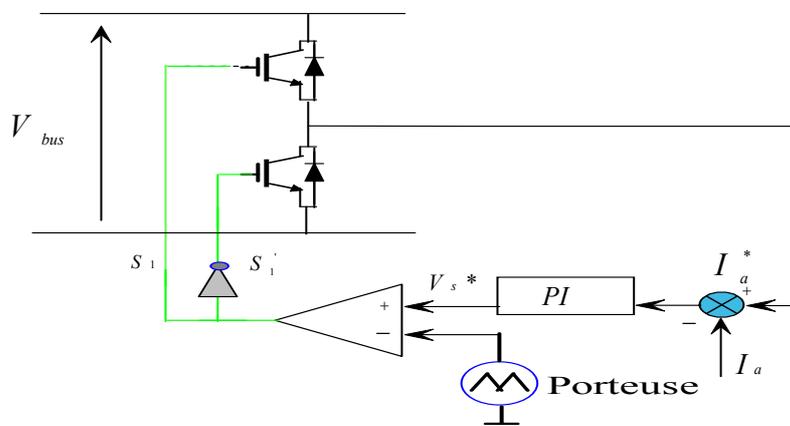


Figure IV.2 : Schéma bloc d'une commande MLI

II.1.2. Commande vectorielle pour un asservissement de vitesse

a) Principe

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine synchrone à aimants à une structure équivalente à une machine à courant continu à excitation séparée, c.-à-d. un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique. [NABT10]

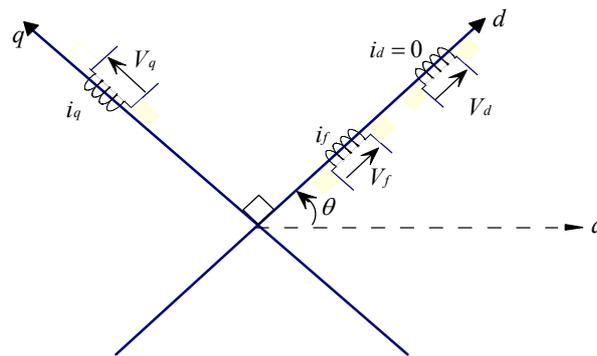


Figure IV.3 : Principe de la commande vectorielle

Par conséquent, le flux rotorique est situé à un angle téta (θ) par rapport à l'axe réel de la phase a . L'application de la commande vectorielle nécessite que l'axe des courants i_q soit en quadrature par rapport au flux rotorique, ce qui conduit à ce que la composante i_d du courant statorique soit colinéaire au flux rotorique, si le courant i_d est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe d s'ajoute aux flux des aimants ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer, d'autre part si le courant I_d est négatif le flux statorique sera en opposition à celui du rotor ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (défluxage), les machines synchrones à aimants permanents sont conçues de telle façon que les aimants puissent donner un flux d'entrefer nécessaire jusqu'à la vitesse nominale.

Normalement le courant i_d doit être nul lorsque le système travaille à couple constant. Donc :

Si le courant i_d est forcé à zéro i égale à i_q , la composante φ_d du flux statorique devient :

$$\varphi_d = \varphi_f \tag{IV.3}$$

Et la forme de couple électromagnétique sera :

$$C_e = p \varphi_f i_q = K i_q \tag{IV.4}$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle du couple de la machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi (découplage) [REKI91].

La référence de la composante directe des courants statoriques est égale à zéro ($i_d^* = 0$). Cette composante est nulle afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire (la puissance réactive créée et les pertes associées sont donc nulles). De plus les inductances sur les axes q et d étant égales ($L_d = L_q$), la composante i_d n'affecte pas le calcul du couple électromagnétique (équation IV.4).

La figure IV.4 représente le schéma global de la commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère $d-q$ qui a été réalisé dans ce mémoire.

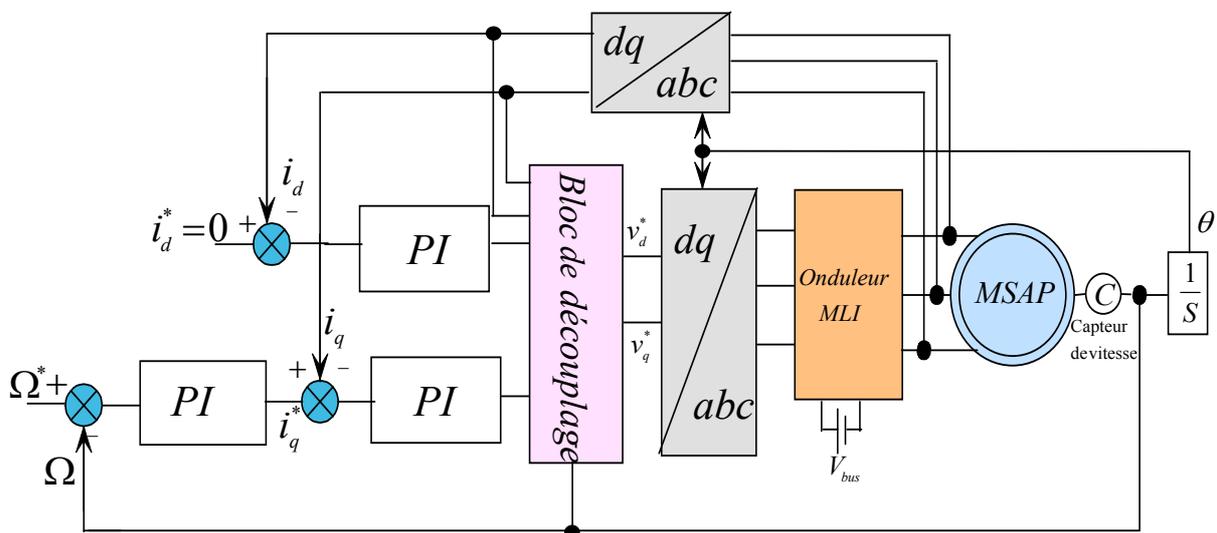


Figure IV.4 : Schéma global de la commande vectorielle

La référence du courant direct i_d^* est fixée égale à zéro et la sortie du régulateur de vitesse i_q^* constitue la référence du couple C_e^* . Les références des courants i_q^* et i_d^* sont comparées séparément avec les courants réels mesurés de la machine i_d et i_q . Les erreurs des courants sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références v_d^* et v_q^* .

Les sorties du bloc de découplage v_d^* et v_q^* passent par une transformation biphasée vers triphasée se qui nous donne les trois tensions de référence.

b) Découplage

Comme il est loisible de le remarquer, les courants i_d et i_q dépendent simultanément des grandeurs d'entrées v_d et v_q . Nous avons ici un système multi variable à deux entrées et deux sorties coupler. Afin de pouvoir mettre en place des commandes mono variables, on va rechercher à partir des équations qui régissent le régime dynamique du moteur une contre réaction qui découple le système.

En reprenant les équations électriques (III.13 et III.14) de la MSAP et en mettant :

$$\begin{cases} v'_d = v_d + e_q \\ v'_q = v_q + e_d \end{cases} \quad (IV.5)$$

Avec :

$$e_q = \omega_e L_q i_q \quad (IV.6)$$

$$e_d = \omega_e L_d i_d + \omega_e \varphi_f \quad (IV.7)$$

$$\begin{cases} v_d = v'_d - e_q \\ v_q = v'_q + e_d \end{cases} \quad (IV.8)$$

On peut conclure le schéma bloc de la compensation par la figure IV.5

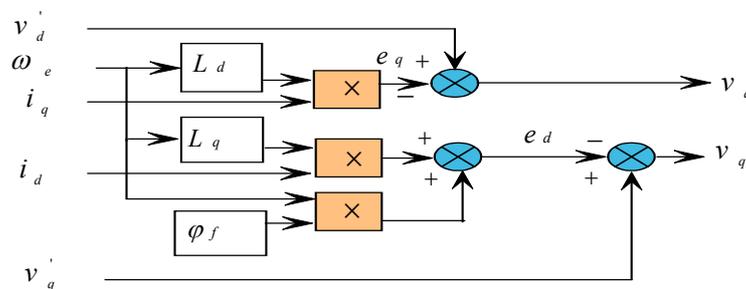


Figure IV.5 : Schéma bloc de découplage

c) Calcul des régulateurs

Comme on l'a déjà mentionné, la régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type PI (proportionnelle, intégrale). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions. Nous avons adopté un régulateur PI dont le coefficient intégral K_i sert de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire le dépassement. Comme le terme proportionnel K_p permet le réglage de la rapidité du système et donc le temps de réponse.

❖ Régulateur de vitesse :

Dans un système embarqué telle qu'un véhicule, on ne s'attend pas à ce qu'il aura des oscillations, autrement, on va chercher une régulation adapté à un régime critique.

La situation est devenue similaire à celle de la machine à courant continu. La vitesse est mesurée directement et il est possible de former sa régulation en utilisant un régulateur PI (figure IV.6). Au niveau du calcul des paramètres du régulateur. Le processus à commander est décomposé en deux sous système.

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

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure IV.6 :

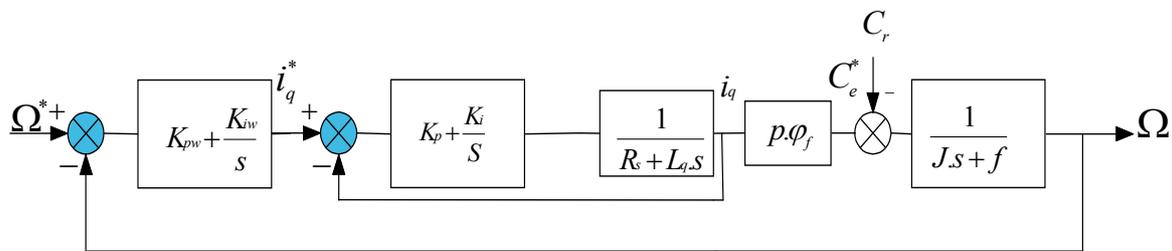


Figure IV.6 : Boucle de régulation de la vitesse.

$$G(p) = \frac{1 + \tau \cdot s}{1 + \tau \cdot s + \frac{J}{K_{iw}} s^2} \quad (IV.9)$$

Avec :

$$\tau = \frac{K_{pw}}{K_{iw}} \quad (IV.10)$$

Sachant que la fonction de transfert d'un système de second ordre est :

$$F(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + \frac{1}{\omega_0^2} s^2} \quad (IV.11)$$

Par analogie, on essaiera de trouver les paramètres du régulateur (PI)

$$\frac{K_{iw}}{J} = \omega_0, \tau = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (IV.12)$$

Pour un amortissement critique

$$K_{iw} = \frac{4J}{\tau^2}, K_{pw} = K_{iw} \cdot \tau. \quad (IV.13)$$

On prendra $\tau = 0.8s$, sachant que la constante du temps électrique doit être inférieure à la constante du temps mécanique.

- Régulateur du courant :

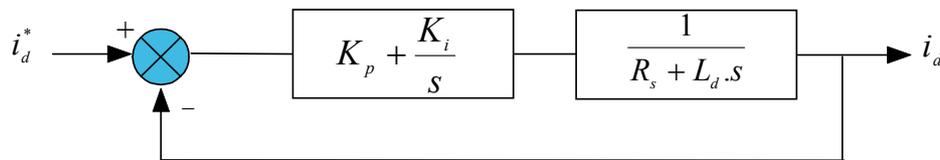


Figure IV.7 : Boucle de régulation du courant i_d

La fonction de transfert en boucle fermée, nous donne un système de type 1^{er} ordre avec une constante du temps électrique :

$$\tau_e = \frac{R_s}{K_i} \quad (IV.14)$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau_e \cdot s + 1} \quad (IV.15)$$

Le temps de réponse t_{rep} est défini par l'instant où la grandeur de sortie vaut 95 % de la valeur finale donnée lorsque le temps t devient infini, soit :

$$t_{rep} = 3 \cdot \tau_e \quad (IV.16)$$

$$K_p = 3 \cdot \frac{L_d}{t_{rep}} \quad (IV.17)$$

$$K_i = 3 \cdot \frac{R_s}{t_{rep}} \quad (IV.18)$$

II.3. Stratégie de commande de l'ensemble Convertisseur / Batterie

Le contrôleur du convertisseur DC/DC asservit la tension du bus continu de 500V. Son rôle est de maintenir la tension à ce niveau, peu importe les perturbations.

II.3.1. Régulation par boucle de courant (CMC)

Cette méthode permet d'augmenter les performances de régulation en apportant des informations concernant le montage. La grandeur utilisée est le courant dans la self. Il est important de contrôler le courant parcourant l'inductance afin de le limiter lors de la charge

où de la décharge de la batterie. Ce courant sera donc utilisé pour modifier la loi de commande MLI. En réalité deux boucles seront réalisées : une boucle de tension et une boucle de courant. L'erreur en tension va alors servir de référence en courant virtuel.

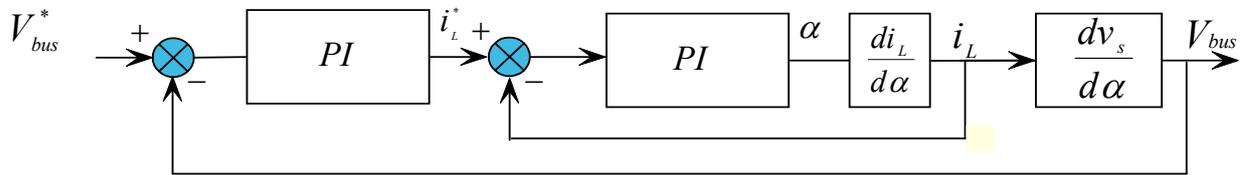


Figure IV.8 : Schéma de principe de la commande par boucle de courant

Cette stratégie a l'avantage de contrôler la tension et le courant. Elle semble donc tout à fait indiquée pour notre application, elle va nous servir aussi dans le contrôle énergétique.

II.4. Stratégie de commande de l'ensemble convertisseur/groupe électrogène

Nous avons proposé un modèle qui va s'occuper de fournir le surplus de puissance demandé par la machine de traction, qui va se comporter comme un moteur thermique, ainsi qu'une commande présentée dans la figure IV.9. On rappelle que la batterie est limitée à 20 kW. Ce modèle est semblable à un MSAP commandé en vitesse. La vitesse de référence est calculée de manière à situer la machine dans un point de fonctionnement (figure II.8). Cette MSAP est raccordé, par un système qui traduit le fonctionnement d'un embrayage, à une autre MSAP qui va servir d'une génératrice de 30kW. Un redresseur MLI est rajouté pour fixer la tension de bus continu à 500V lorsque le système de stockage électrique est déconnecté de reste du système.

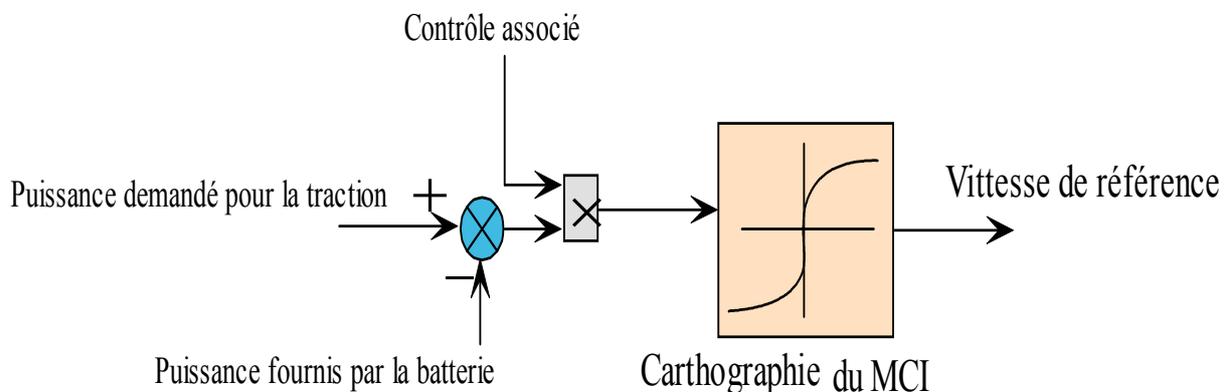


Figure IV.9 : Principe de la commande proposée pour le MCI

II.4.1. Commande du redresseur par la méthode MLI à bande d'hystérésis (HBCC)

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase.

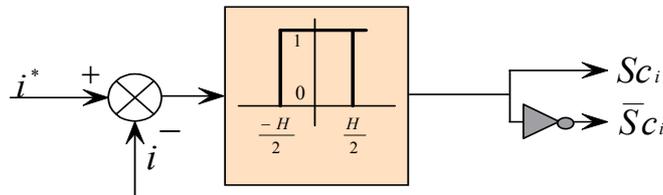


Figure IV.10 : Schéma de principe de la commande par hystérésis

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure IV.10, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c.-à-d., qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

Sc_i et $\bar{S}c_i$ sont les commandes logiques qui sont associées aux interrupteurs du redresseur.

II.4.2. Configuration des circuits de contrôle

Diverses méthodes ont été proposées par les auteurs pour déterminer les courants de source de référence. Dans notre travail, la méthode utilisée consiste à employer un détecteur de crête. L'amplitude des courants de source est générée par une boucle de régulation de la tension du bus continu en utilisant un régulateurs PI. [MARI01]

Les courants de référence i_{ga}^* , i_{gb}^* et i_{gc}^* sont calculés à partir de la multiplication de trois sinus unitaires ($1 \cdot \sin(\omega t)$, $1 \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3)$, $1 \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3)$) par la valeur crête de courant de référence de la source I_{max} . Les trois sinus unitaires sont obtenus à partir de la division de trois tensions de la génératrice par leur amplitude V_{gmax} . A partir de la méthode de détecteur de crête, V_{smax} est obtenue à l'aide de cette équation :

$$V_{gmax} = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{ga}^2 + v_{gb}^2 + v_{gc}^2)} \quad (IV.19)$$

Les trois courants de références seront comparés aux courants i_{ga} , i_{gb} et i_{gc} . L'erreur obtenue

passer sur un comparateur à hystérésis pour fournir les ordres de commutations des interrupteurs du convertisseur à MLI.

En effet, cette méthode de détecteur de crête exige que la tension à la sortie de la génératrice quelle soit saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon l'utilisation de la boucle à verrouillage de phase (*phase-locked-loop PLL*) est indispensable pour la synthèse des trois sinus unitaires [KEND12]. Dans notre travail, on s'arrange à ce que les tensions générées par le groupe électrogène soit sinusoïdale et équilibrée. La détermination des courants de référence sinusoïdaux nécessite une régulation de la tension du bus comme le montre la figure IV.11.

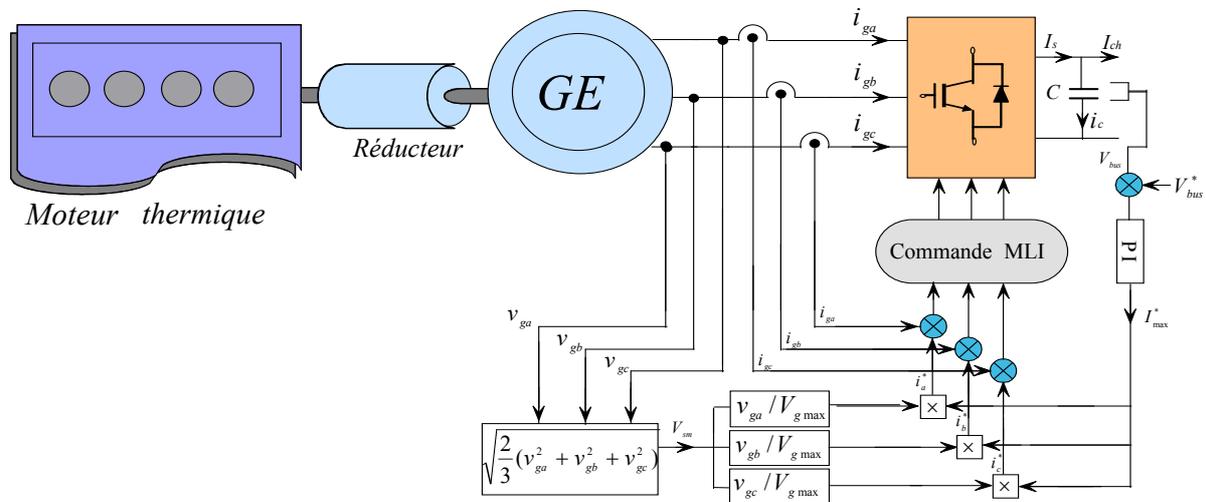


Figure IV.11 : Schéma de contrôle du convertisseur MLI

a) Boucle de régulation de la tension

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur, un contrôleur PI est utilisé pour réguler cette tension, il est défini par la formule suivante :

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \tag{IV.20}$$

En négligeant les pertes actives dans le convertisseur et dans les inductances de couplage, l'application du principe de conservation de la puissance donne la relation entre la puissance active débitée par le système éolien et celle reçue à la sortie du pont. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$P_g = P_{bus} \tag{IV.21}$$

$$V_{bus} I_{DC} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot V_g \cdot I_{max} \quad (IV.22)$$

$$I_{DC} = i_c + I_{ch} \quad (IV.23)$$

Avec :

$$\begin{cases} i_c = C \cdot \frac{dV_{bus}}{dt} \\ I_{ch} = \frac{V_{bus}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (IV.24)$$

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée :

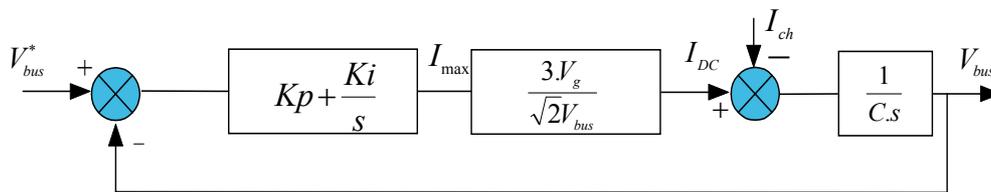


Figure IV.12 : Modèle en boucle fermée de la boucle de tension du bus continu

La fonction de transfert en boucle fermée du système est :

$$F(s) = \frac{1 + K_p \cdot s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} s + 1} \quad (IV.25)$$

Donc :

$$K_i = 2C \frac{U_{DC}}{3V} \omega_n, \quad K_p = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \quad (IV.26)$$

II.5. Application de la technique intelligente sur la commande de la MSAP

La théorie de la logique floue a été mise au point durant les années soixante par le professeur Lotfi ZADEH. Elle reproduit des modes de raisonnement humain et son domaine d'application est très vaste. [CHIK08]

Les régulateurs flous utilisent généralement une expertise exprimée sous forme règles. La forme générique pour un régulateur à deux entrées et une sortie est la suivante :

$$Si \{x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } A_2\} \text{ alors } \{y \text{ est } B\} \quad (IV.27)$$

II.5.1. Commande vectorielle avec régulateur PI flou de vitesse

Cette partie établit un régulateur flou PI de vitesse, qui applique les principes et la méthode de la logique floue pour ajuster le coefficient proportionnel K_p et le coefficient intégral K_i du régulateur PI à chaque instant.

II.5.1.1. Conception du régulateur flou

Dans le cas de la régulation de vitesse, on utilise habituellement l'erreur $e = \omega_e^* - \omega_e$ et la variation de l'erreur Δe et parfois l'intégration d'erreur.

$$\begin{cases} e(k) = \omega_e^*(k) - \omega_e(k) \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (IV.28)$$

La sortie du régulateur de vitesse est la valeur du courant de référence I_q^* dans le schéma de la commande vectorielle de la machine synchrone. On peut écrire :

$$I_q^* = Fuzzy(e, \Delta e)$$

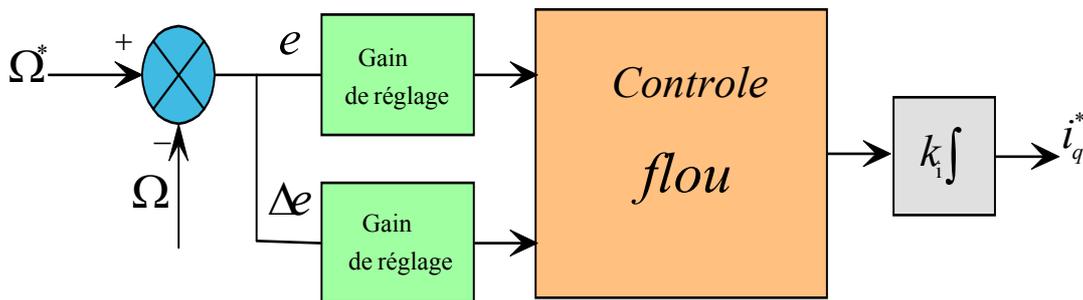


Figure IV.13 : Schéma principe d'un contrôleur flou de type PI

On remarque que cette structure de commande floue de type PI figure (IV.13) est en fait une association en série d'un contrôleur flou de base réalisé avec le bloc *Fuzzy Logic Control* sous Matlab/Toolbox et d'une structure d'un régulateur de type PI.

Comme les fonctions d'appartenance sont normalisées entre $[-1,1]$, les variables sont multipliées avec des gains de réglages. La structure interne de ce régulateur flou est représentée dans le diagramme fonctionnel présenté dans la figure IV.14.

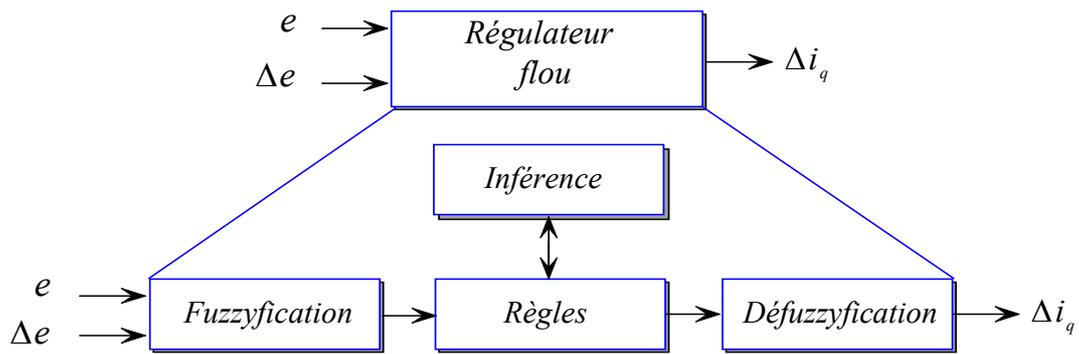


Figure IV.14 : Structure interne d'un régulateur flou

Où trois blocs appelés fuzzification, inférence et défuzzification sont utilisés et dont la fonctionnalité est décrite dans ce qui suit.

a) Interface de fuzzification

C'est une opération qui consiste à transformer les données numériques d'un phénomène à des valeurs linguistiques sur un domaine normalisé qui facilite le calcul. A partir de ces domaines numériques appelés univers de discours et pour chaque grandeur d'entrée où de sortie, on peut calculer les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous de la variable linguistique correspondant. [MINH97]

Dans notre cas, les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie sont illustrées par la figure (IV.15)

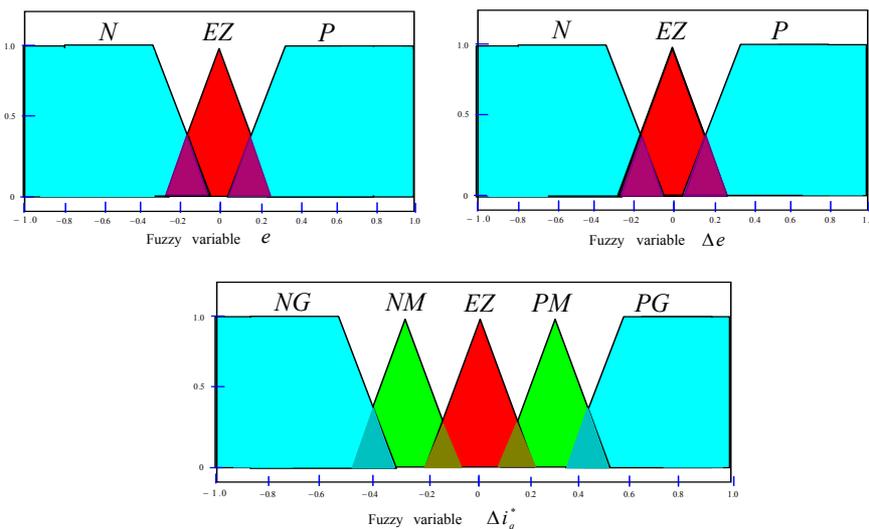


Figure IV.15 : Fonction d'appartenance des variables d'entrées et sortie

b) Mécanisme d'inférence floue

Les règles floues, qui permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrées, sont déduites à partir de la table de MacVicar (tableau IV.1). Ainsi, on obtient la table d'inférence suivante :

Tableau IV.1 : Table d'inférence

Δe \ e	N	EZ	P
N	NG	NM	EZ
EZ	NM	EZ	PM
P	EZ	PM	PG

Les valeurs linguistiques : NG : Négatif Grand, NM : Négatif Moyen, N : Négatif, ZE : Zéro (nulle), P : Positif, PM : Positif Moyen et PG : Positif Grand.

Dans le tableau (IV.1), chaque élément formalise une règle comme, par exemple :

Si (e (k) est NM) et (Δe (k) est ZE), alors (di (k) est NM).

Une condition précédée du symbole 'SI' appelée prémisse, et d'une conclusion (action, décision, opération où commande) précédée du symbole 'alors'.

Cet ensemble de règle regroupe toutes les situations possibles du system évaluées par les différentes valeurs attribuées à e et à sa variation Δe et toutes les valeurs correspondantes de la variation de la commande Δi_q^* .

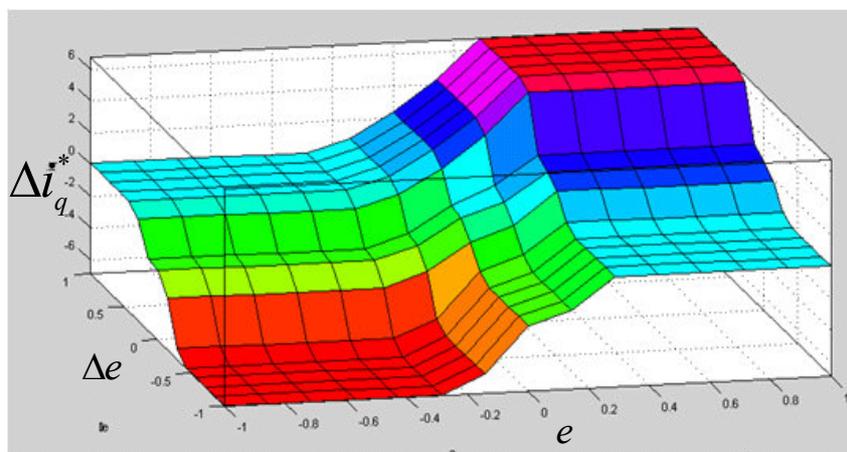


Figure IV.16 : Surface de la fonction d'appartenance $\Delta i_q^* = fuzzy(e, \Delta e)$

L'évaluation des gains proportionnels provient de l'expérience, pour le gain K_e , par exemple on peut commencer avec un facteur qui dépend de l'erreur maximale. Effectivement ces valeurs font partie de la procédure d'évaluation par simulation.

c) Interface de défuzzification

Comme le système à asservir ne peut accepter que une commande définie et nette, cette fonction d'appartenance doit être traduite en une commande non floue, nette et précise. Ce processus est connu sous le nom de défuzzification.

Ils existent plusieurs méthodes de défuzzification dans la littérature dont une méthode qui est le plus souvent plus efficace que les autres, celle de la défuzzification par centre de gravité.

La défuzzification par centre de gravité : Cette méthode calcule la loi de commande non floue I_q^* en tant que l'abscisse du centre de gravité la fonction d'appartenance de la loi de commande $\mu_{res}(\Delta i_{qi})$.

$$\Delta i_q^* = \frac{\int_{-1}^1 I_{qi} \mu_{res}(\Delta i_{qi}) \cdot di_q}{\int_{-1}^1 \mu_{res}(\Delta i_{qi}) \cdot di_q} \quad (\text{IV.29})$$

III. Système de gestion d'énergie du modèle du véhicule

III.1. Présentation

Le problème majeur dans l'architecture que nous avons choisis est d'avoir un rendement de la chaîne global faible par rapport aux autres architectures. Ce rendement faible est dû certainement à la disposition série des éléments de la chaîne de traction. L'objectif de ce système est de minimiser les pertes dans la chaîne globale.

L'utilisation de la batterie comme source d'énergie électrique nous donne le choix de définir deux modes de contrôle :

- **Mode de contrôle avec maintien de charge**

Dans ce mode de contrôle [PISU05], la charge du moteur thermique essaye de suivre la charge du moteur électrique. Cette stratégie n'améliore pas vraiment le rendement global mais elle augmente la durée de vie de la batterie.

- **Mode de contrôle avec épuisement de charge**

Par contre dans celui-ci, le moteur thermique est éteint jusqu'à ce que la batterie atteigne un niveau bas de charge [ANDR11]. Une fois que ce niveau est atteint, il sera allumé pour arriver à un niveau de charge élevé. L'avantage de ce mode de contrôle est qu'il permet au moteur thermique de fonctionner à un seul point de fonctionnement, le plus efficace. Ceci améliore considérablement son rendement d'où le rendement global.

Cependant, on remarque des grandes pertes de charge de la batterie dues au taux de recharge/décharge élevés. En outre, la durée de vie de la batterie diminue à cause de cette utilisation agressive.

Notons pour conclure, nous allons prendre comme choix le deuxième type de contrôle, puisque l'un de nos objectifs est inclus dans celui-ci.

III.2. Technique de contrôle avec State-flow

State-flow est un outil de conception graphique interactif qui fonctionne avec Matlab/Simulink pour modéliser et simuler des systèmes pilotés par les événements. Event-Driven : transition des systèmes d'un mode de fonctionnement à un autre en réponse à des événements et des conditions. Ces systèmes sont souvent utilisés à la logique de modèle pour contrôler dynamiquement un périphérique physique tel qu'un ventilateur où un moteur. Ces systèmes peuvent être modélisés comme des machines à états finis. Par exemple, un ventilateur de maison peut avoir des états tels que la haute, moyenne, basse et éteint. Ce système de contrôle nous conviendrait énormément d'après cet exemple pour le contrôle de notre modèle. Et pour construire des machines à états finis, State-flow fournit des objets graphiques que vous pouvez déposer à partir d'une palette de conception pour créer des graphiques dans lesquels une série de transitions dirige un flux de la logique d'un état à un autre. State-flow vous permet également d'ajouter des entrées et des data-Events de sortie (transition par front) pour déclencher State-flow graphiques actions et conditions, vous pouvez attacher à états et les transitions afin de mieux définir le comportement de l'organigramme State-flow. [MATH13]

La gestion de l'énergie entre différent organe du véhicule est réalisée par State-flow. Ce contrôle permet de manœuvrer le transit de puissance dans la chaîne de traction (figure IV.17). Donc, on peut développer une unité de contrôle qui transite dans le bus continu notant

qu'un filtre passe-bas doit être dimensionné pour éliminer le bruit présent dans les mesures pour avoir un contrôle stable.

Dans le cadre de ce projet, seulement quelques paramètres ont été pris en considération dans le système de contrôle des flux d'énergie des trois moteurs. L'utilisation des différents moteurs dans ce projet est fonction des paramètres suivants :

- la vitesse actuelle du véhicule ;
- la position de la pédale de frein ;
- état de charge de la batterie ;

En réalité, beaucoup d'autres facteurs peuvent être pris en compte tel que la position de la boîte de vitesses. Cependant, prendre en compte ces paramètres, compliquerait beaucoup la stratégie de commande. De plus, ils ne sont pas nécessaires pour montrer le comportement du système dans son ensemble.

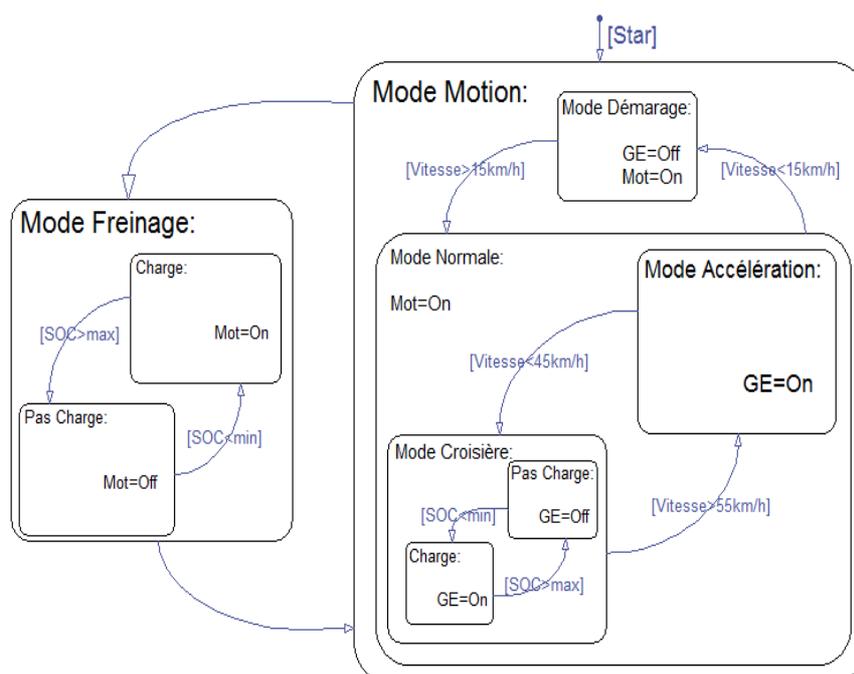


Figure IV.17 Diagramme de contrôle d'énergie

Les fonctionnalités selon et les contraintes sur les organes de la chaîne de traction du véhicule hybride sont surveillées par ce diagramme (figure IV.17), comme telles :

- Limitation de la charge sur la batterie à un certain seuil min-max selon le SOC ;

- Servir le moteur électrique par une puissance suffisante selon les différents modes ;
- Récupération d'énergie au mode freinage ;
- Lorsque la batterie a atteint sa limite maximum, la puissance récupérée par le freinage sera dissipée dans une résistance de dissipation installée en parallèle de la batterie ;

Ce diagramme doit reprendre à toutes les phases de fonctionnement d'un VH série déjà souligné dans le chapitre I.

IV. Résultats de simulation et validation des commandes

IV.1. Introduction

Le modèle est testé sur un cycle de 10 secondes pendant lequel tous les modes de fonctionnement sont couverts, à savoir le démarrage, la conduite normale, le cas d'une forte accélération, le freinage et la recharge de la batterie. Les résultats montrés pour chacun de ces modes mettent en évidence les transferts de puissance entre les différents sous-systèmes et particulièrement entre la batterie, la génératrice et le moteur électrique. Avant ça, des résultats qui permettent de valider les commandes appropriées à chacun des systèmes qui constituent le modèle seront présentés.

IV.2. Schéma global simulé

La figure IV.18 présente le circuit de puissance réalisé avec Psim, il regroupe le système global d'un véhicule hybride série dans son ensemble : groupe électrogène, batterie et moteur électrique de traction. La commande du hacheur a été réalisée sur Psim pour des raisons de régulation.

La figure IV.19 donne le circuit de commande réalisé avec Matlab/Simulink, qui est couplé au circuit de puissance à l'aide d'un composant appelé SimCoupler disponible sur la librairie Simulink. Un composant appelé mémoire devrait être rajouté à chaque grandeur sortant de SimCoupler pour mémoriser la grandeur ce qui permet d'accélérer le temps de simulation.

La batterie utilisée est celle de Psim, mais celle-ci se comporte comme une source d'énergie parfaite, pour cette raison nous avons rajouté la batterie du Matlab à qui nous avons injecté le courant transitant dans la self pour observer la charge et décharge de la batterie, en particulier l'évolution de l'état de charge (SOC).

Un système électrique, similaire à la fonction d'un embrayage, été rajouté pour coupler le groupe électrogène avec le reste du système, après que celui-ci atteindrait le régime voulu.

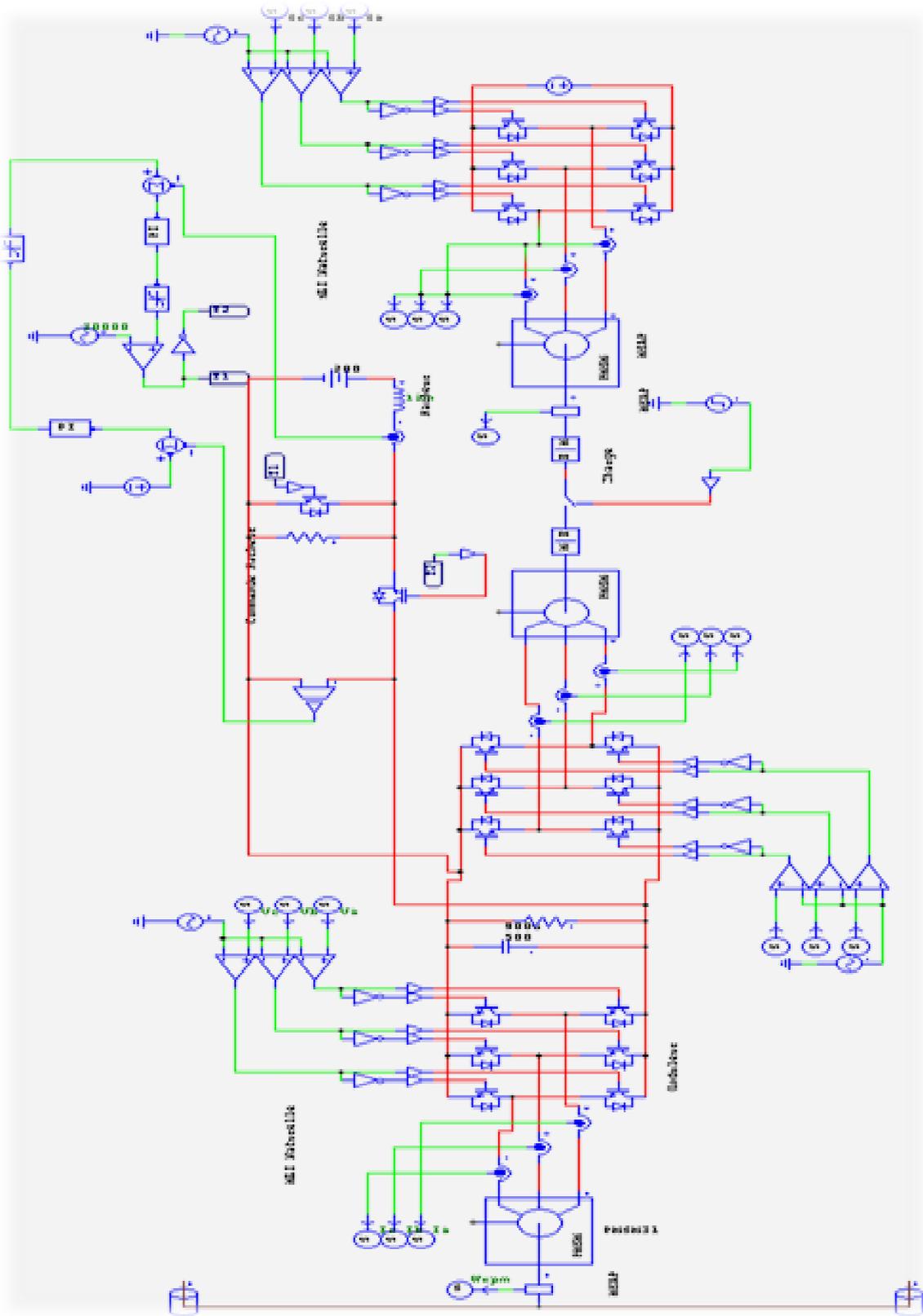


Figure IV.18 : Circuit de puissance réalisé avec logiciel Psim

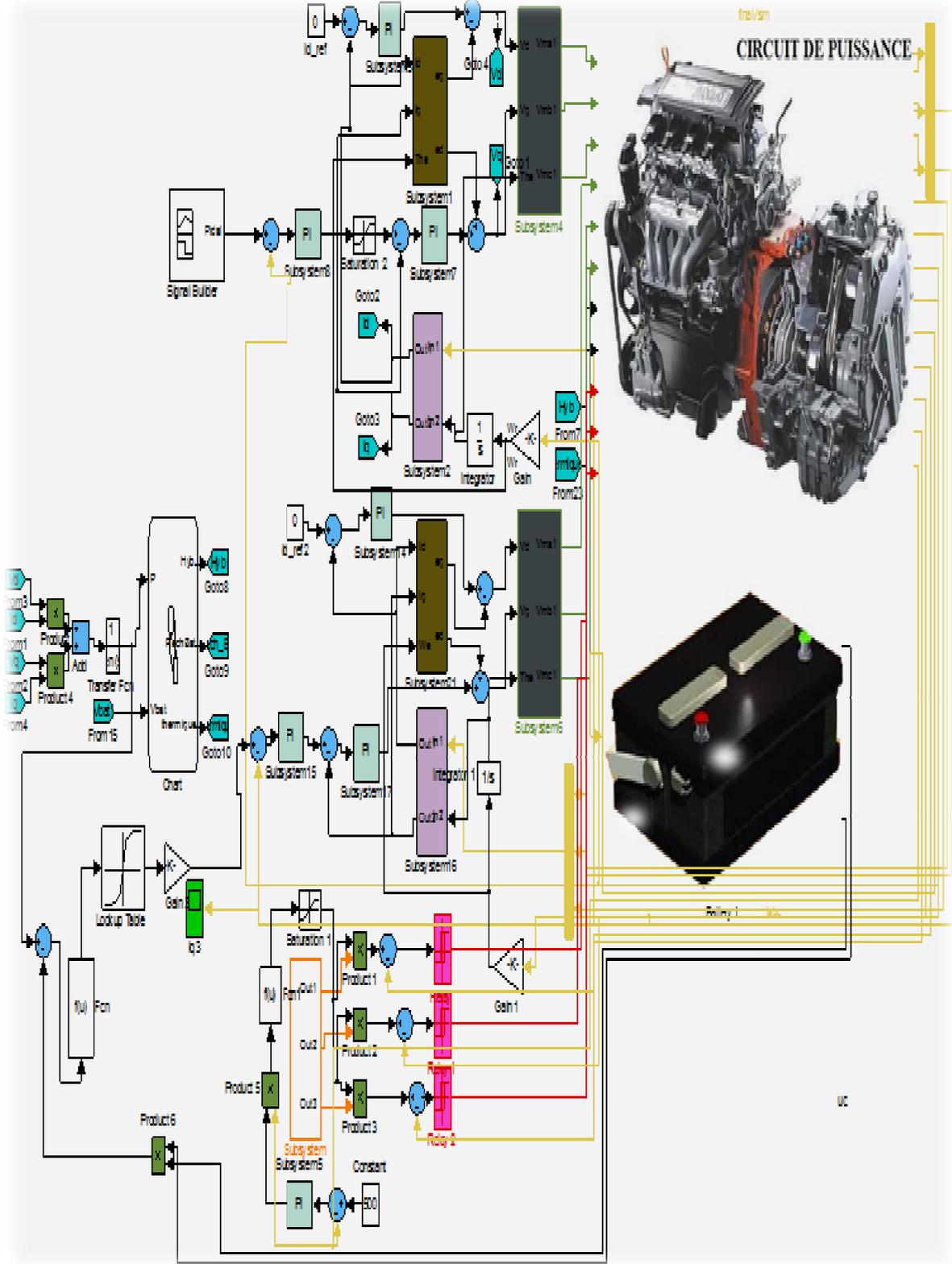


Figure IV. 19 : Circuit de commande réalisé avec logiciel Matlab/Simulink

IV.3. Validation des stratégies de commande

IV.3.1. Validation des commandes liées à la machine de traction et au système de stockage d'énergie

Chaque système doit répondre aux exigences de chaque commande qui lui ont été appropriées. La référence étant un échelon de vitesse fixé à 1000 tr/mn jusqu'à 2 secondes puis subir une rampe descendante jusqu'à 3 secondes. Le temps de simulation est réglé à 3 secondes avec un pas de $1 \mu s$.

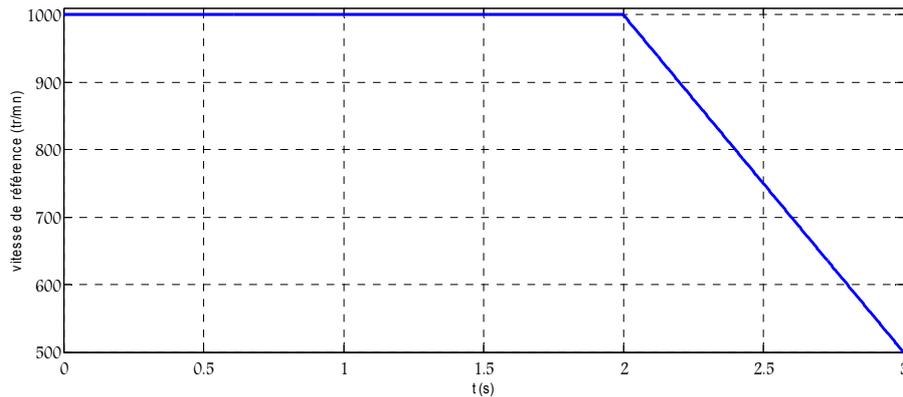


Figure IV.20 : Référence de vitesse imposée à la machine de traction

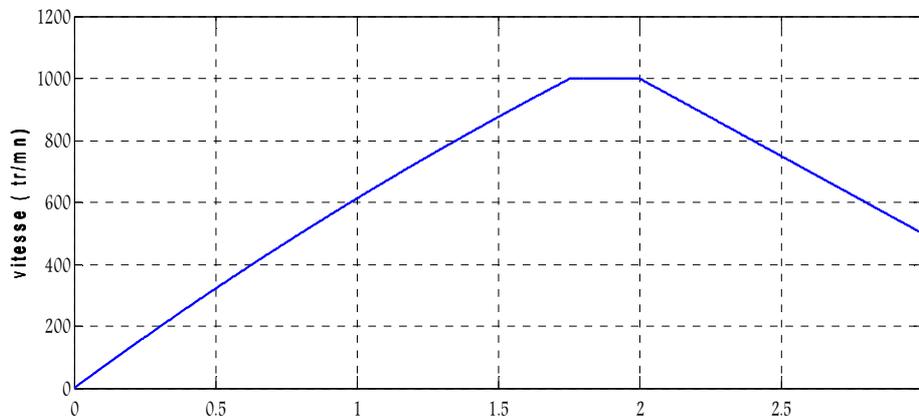


Figure IV.21 : Vitesse mesurée du moteur électrique avec PI comme régulateur

La figure (IV.20) étant la référence de vitesse imposée au système de traction, la machine de traction atteint cette vitesse au bout de 1.7 secondes avec un temps de réponse de 1.5 seconde. L'erreur de vitesse étant égale à zéro selon la figure (IV.21) et le système est parfaitement réguler. Comme on peut le constater ainsi, la vitesse de la machine évolue d'une façon linéaire avec ce type de régulateur. Comme prévu, il ne y'a aucune oscillation dans le système et le régime est critique.

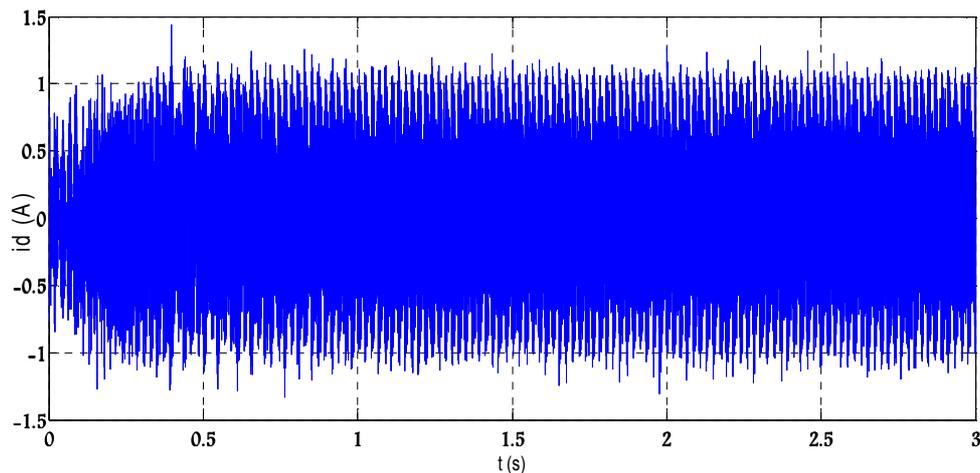


Figure IV.22 : Courant i_d de la motorisation électrique de traction

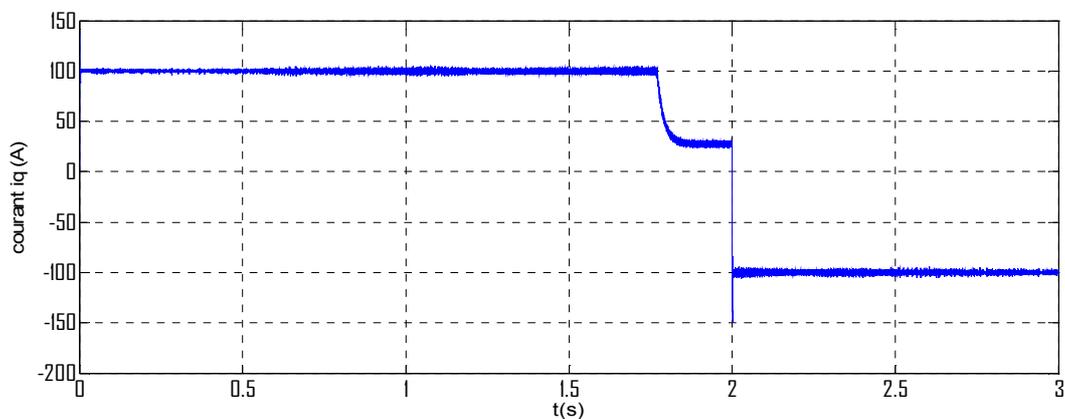


Figure IV.23 : Courant i_q de la motorisation électrique de traction

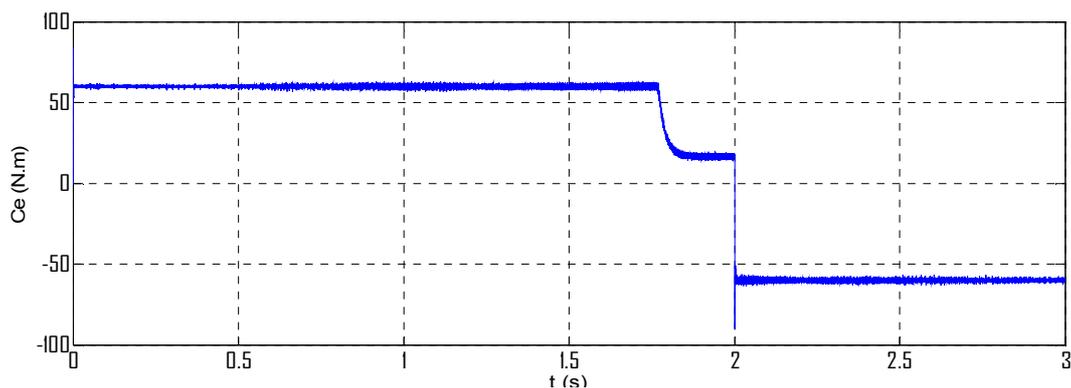


Figure IV.24 : Couple C_e de la motorisation électrique de traction

Les figures (IV.22 et IV.23) présentent le courant direct et en quadrature de la machine de traction. Comme la commande l'exige, le courant direct est fixé à zéro et le couple électromagnétique observé dans la figure IV.24 est l'image du courant en quadrature.

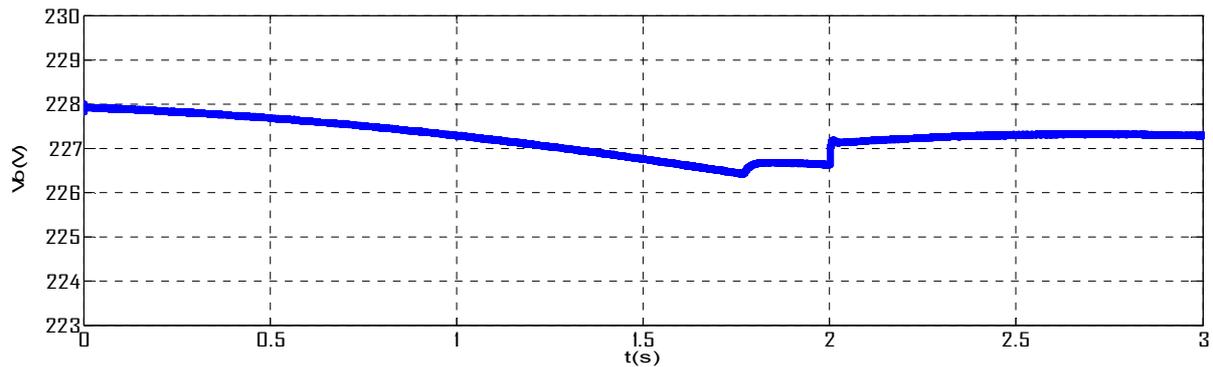


Figure IV.25 : Tension à la sortie de la batterie

La figure IV.25 montre que la batterie subi une charge où une décharge, selon le mode de fonctionnement. Comme elle subi aussi des chutes de tension en fonction du courant absorbé.

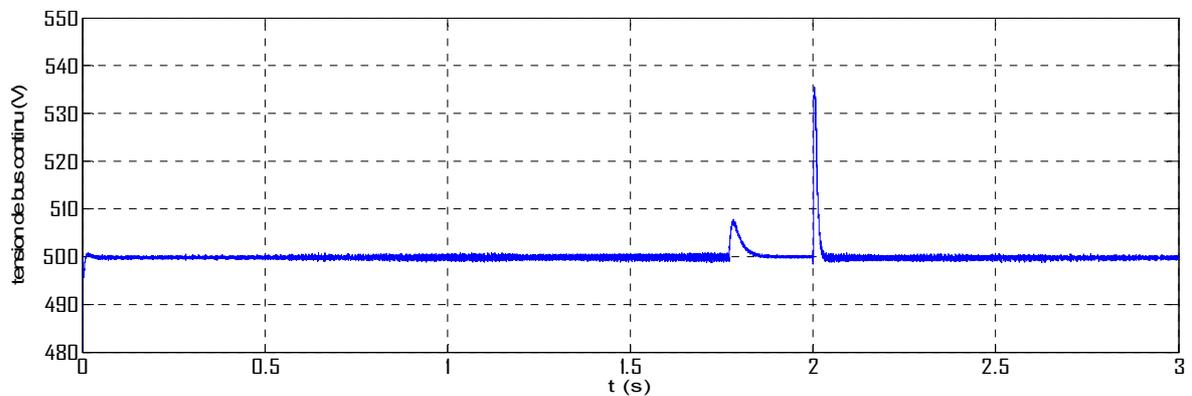


Figure IV.26 : Tension du bus continu

La figure IV.26 présente l'allure de la tension au niveau du bus continu. Cette tension est maintenue à 500V par le hacheur, d'un temps de repense de 0.05s.

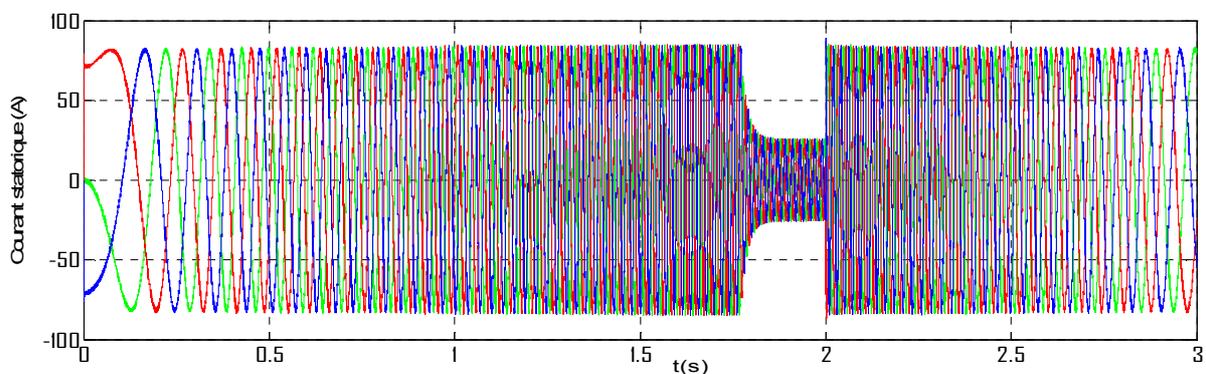


Figure IV.27 : Courants statoriques de la machine électrique de traction

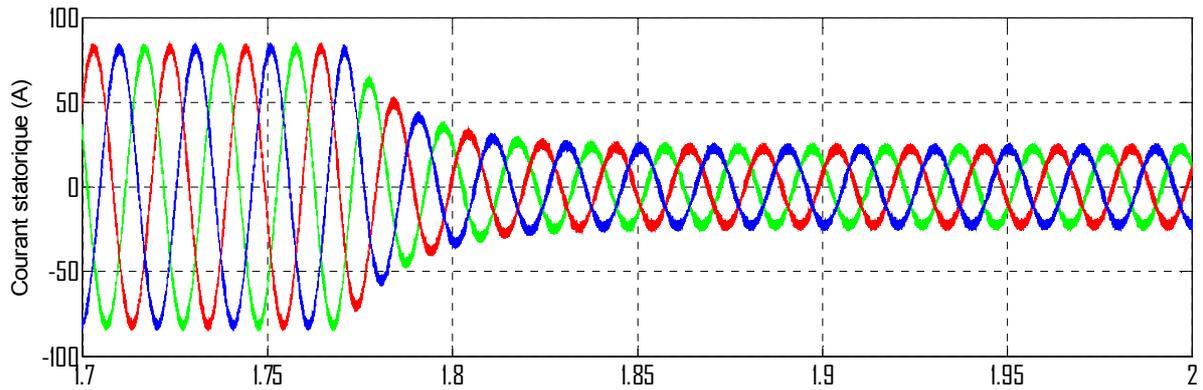


Figure IV.28 : Zoom sur les courants statoriques de la machine de traction

Les courants statoriques, de la machine de traction, sont présentés par la figure IV.27 et un zoom lorsque la vitesse de la machine se stabilise par la figure IV.28. Notons que la fréquence des courants évolue avec le profile de la vitesse. On peut admettre aussi que les allures des courants sont saines.

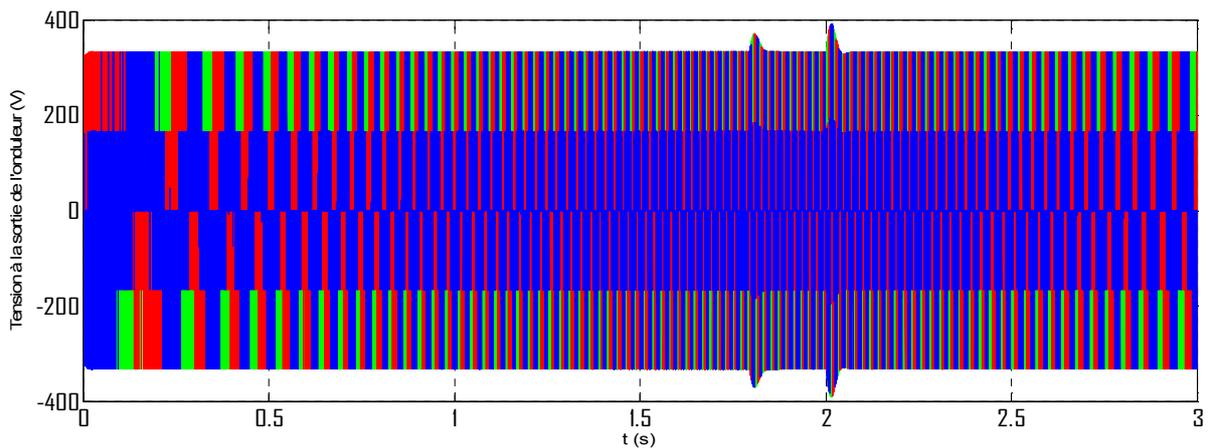


Figure IV.29 : Tensions statoriques de la machine de traction

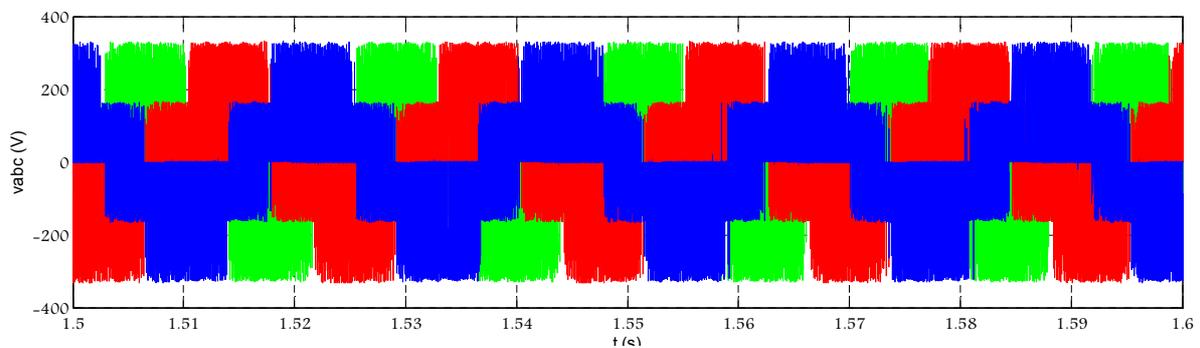


Figure IV.30 : Zoom sur l'allure des tensions statorique de la machine de traction

Les figures (IV.29 et IV.30) présentent les tensions à la sorties des bras de l'onduleur qui alimente la machine de traction. Ces résultats confirment que la technique MLI Intersective est satisfaisante pour la commande de l'onduleur.

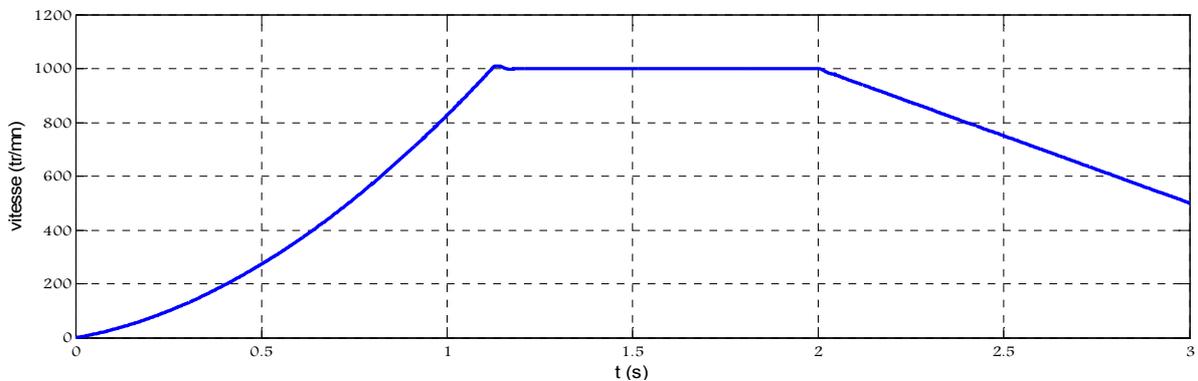


Figure IV.31 : Vitesse de la machine de traction avec régulateur PI flou

La vitesse de référence est similaire à celle donnée dans la figure IV.20, mais cette fois-ci le régulateur de vitesse de la machine de traction été remplacé par un régulateur non linéaire (PI flou), on peut même distinguer la non-linéarité sur la figure IV.31. C'est clair que le temps de repense soit plus court avec un régulateur PI flou que son homologue PI classique puisqu'il est classé parmi les régulateurs robustes.

IV.3.2. Validation de la commande de groupe électrogène

Dans cette partie, nous allons expliquer le fonctionnement de groupe électrogène. Ainsi le contrôle developper avec l'effectuation d'un un test sur une charge résistive qu'on va varié durant la simulation.

Au début, nous avons inséré une charge de 13 kW. Après 0.2s de simulation, nous avons augmenté la charge à 50 kW.

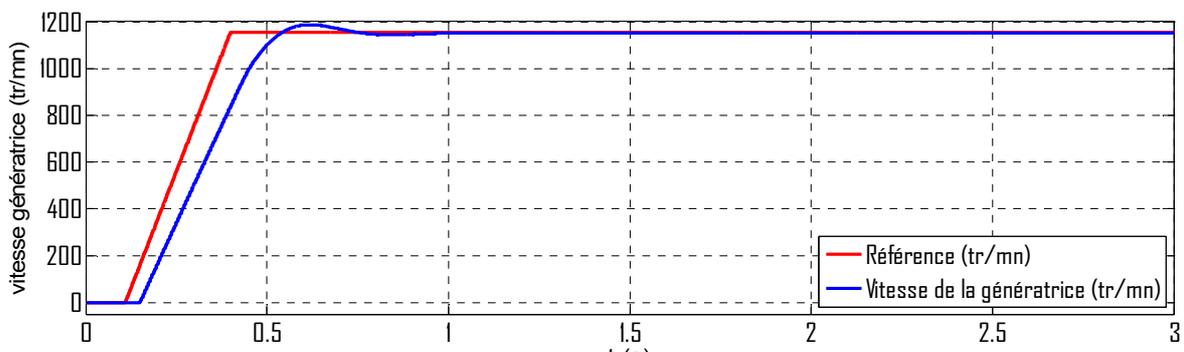


Figure IV.32 : Référence générée et vitesse de la génératrice

La figure IV.32 montre qu'une référence a été fournie à la génératrice après avoir augmenté la charge. La génératrice suit cette référence et elles se stabilisent à une valeur de 1150 tr/mn.

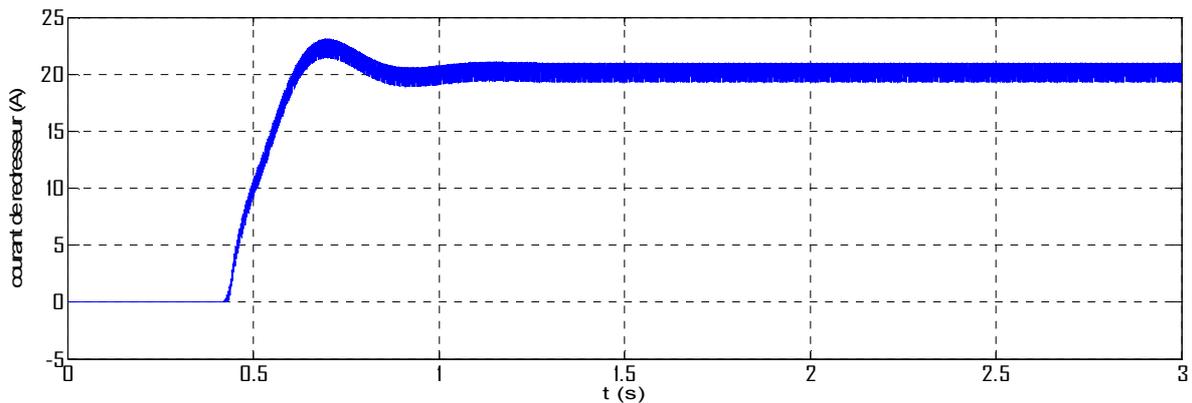


Figure IV.33 : Courant fournis par la génératrice au bus continu

La figure IV.33 montre que le courant de la génératrice redressé prend un certain retard de 0.2 s pour être généré par rapport à la référence, cela est dû au temps de réponse du redresseur à MLI qui est égale à 0.2s. Nous admettons que le courant de la génératrice est bruité à cause des harmoniques générés par le redresseur.

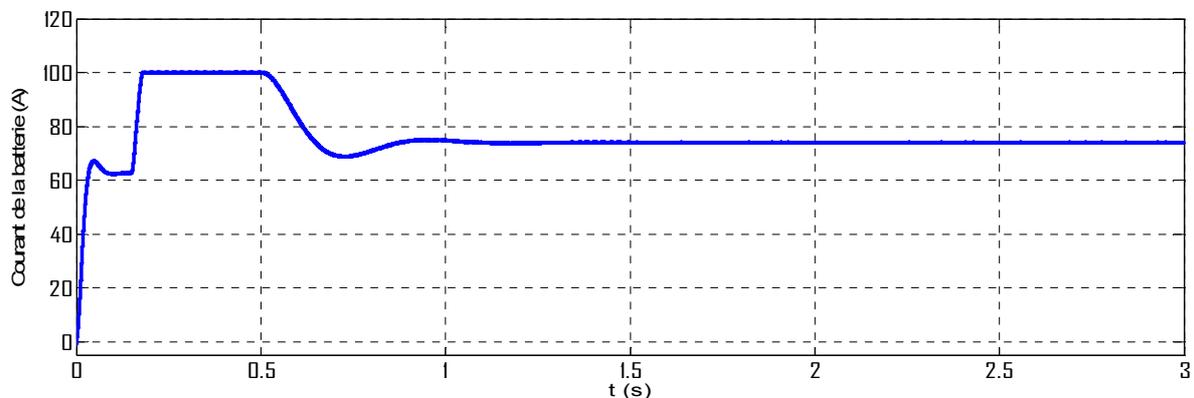


Figure IV.34 : Courant fournis par la batterie

Dans cette figure IV.34, nous observons mieux le principe d'où nous avons eu l'idée de développer ce modèle. Entre 0 s et 0.2 s, la batterie fournit la puissance nécessaire pour que la tension dans le bus continu soit stabilisée à 500V, ce temps qui correspond à la charge de 20kW. Mais, dès que nous avons augmenté la charge à 50 kW, la batterie ne peut plus fournir la puissance nécessaire à cause de la saturation du courant qui limite le courant à 100 A (la puissance à 20kW). Ce qui va permettre de fournir une erreur de tension sur le bus continu, qui va activer le redresseur à MLI autrement-dit le groupe électrogène.

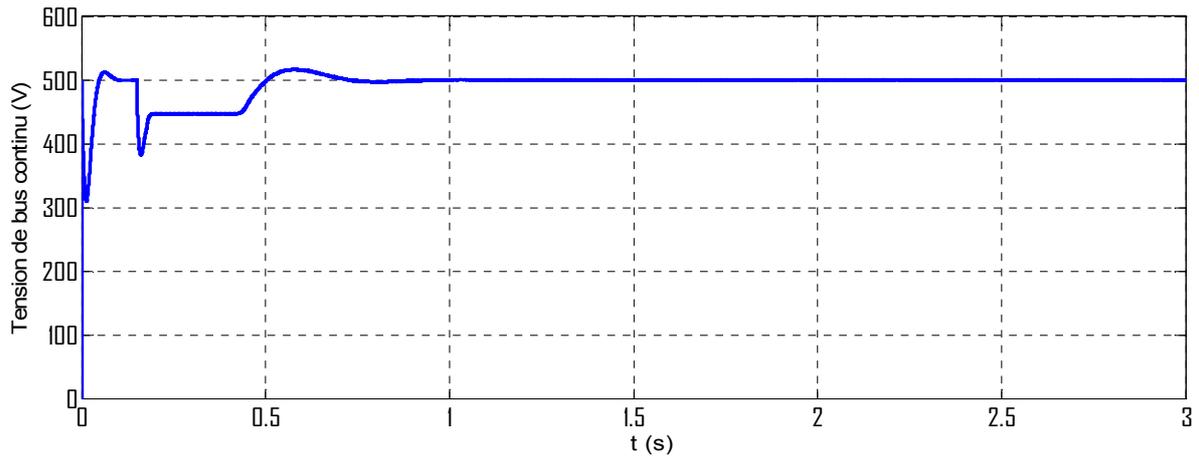


Figure IV.35 : Tension de bus continu durant le test

Comme nous le remarquons sur la figure IV.35 que le hacheur *Boost* n'arrive plus à fixer la tension de bus continu à 500 V lorsque y'avait une augmentation de la charge à 50 kW jusqu'à ce que le groupe électrogène se mette en marche pour fournir la puissance manquante.

IV.3.4. Validation du modèle globale du véhicule série réalisé durant un cycle

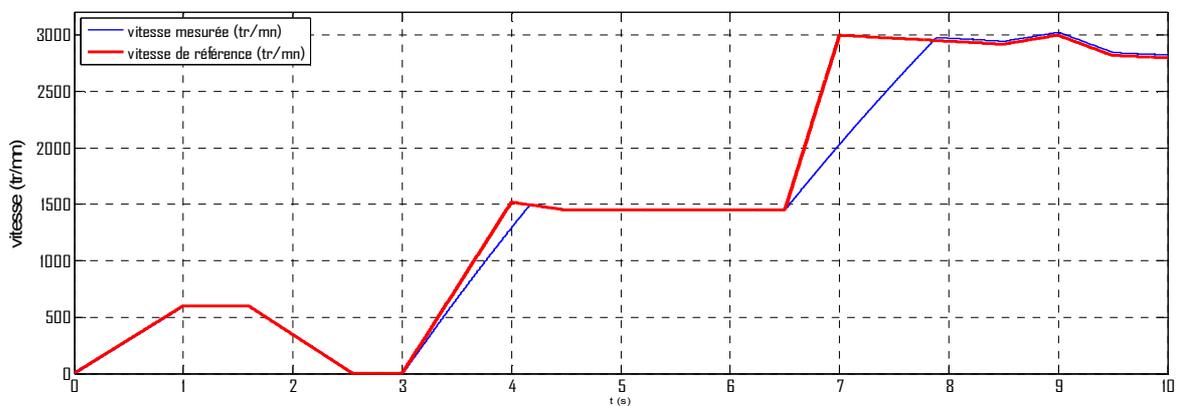


Figure IV.36 : Cycle de conduite proposé et la poursuite de la machine de traction en vitesse

Ce cycle de vitesse fusionne les phases de fonctionnement énoncées dans le chapitre I et la réponse en vitesse de la machine de traction. Ce qu'on peut distinguer dans cette figure (IV.36) est que le temps de réponse de la machine de traction augmente au fur et à mesure que la consigne appliquée est très grande, cela est expliqué de fait d'avoir mis une limitation dans la commande pour que le couple électromagnétique ne dépasse pas la valeur nominale.

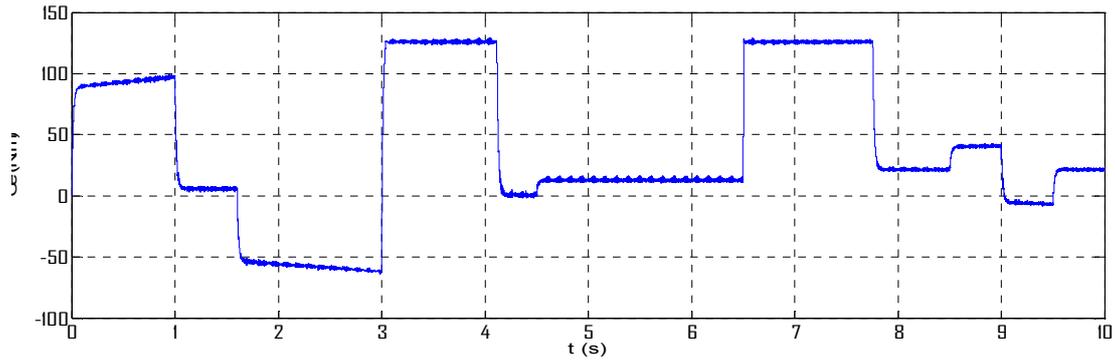


Figure IV.37 : Le couple développé par la machine de traction durant le cycle

La figure (IV.37) présente le couple développé par la machine de traction le long du cycle parcouru.

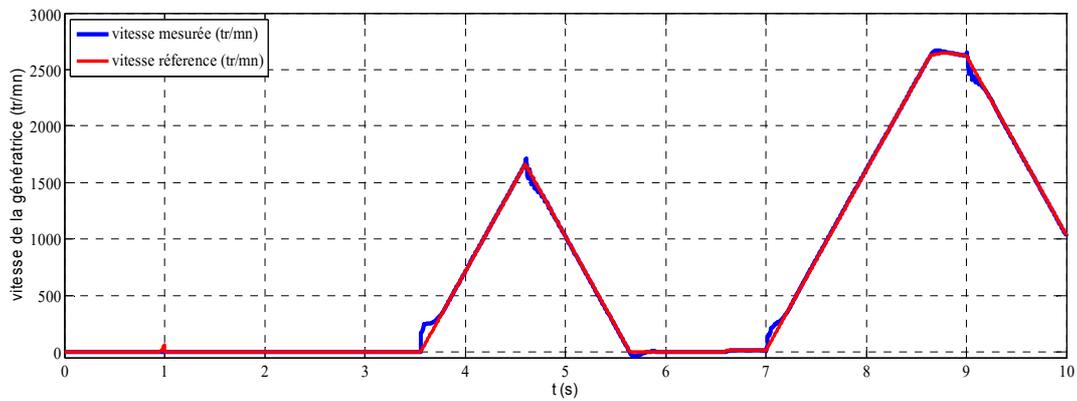


Figure IV.38 : Vitesse de la génératrice et sa référence imposée par la commande

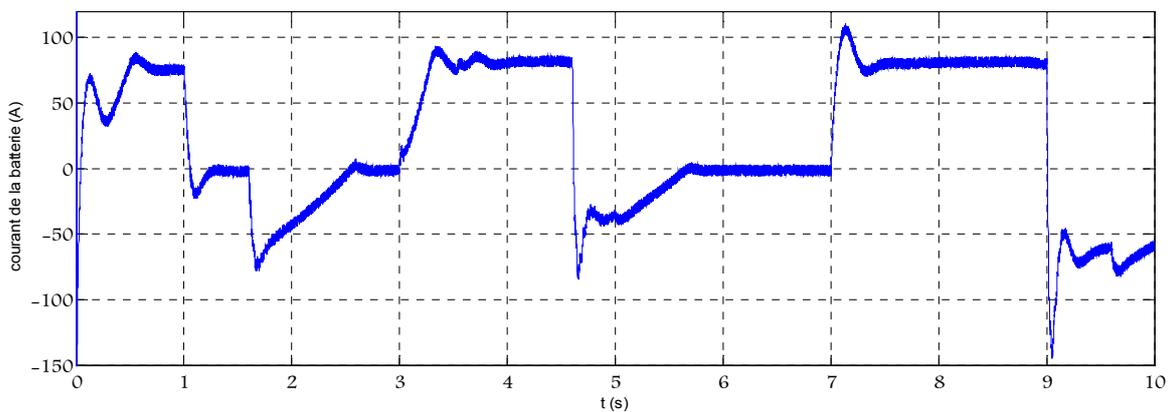


Figure IV.39 : Courant transcrit dans la batterie durant de cycle

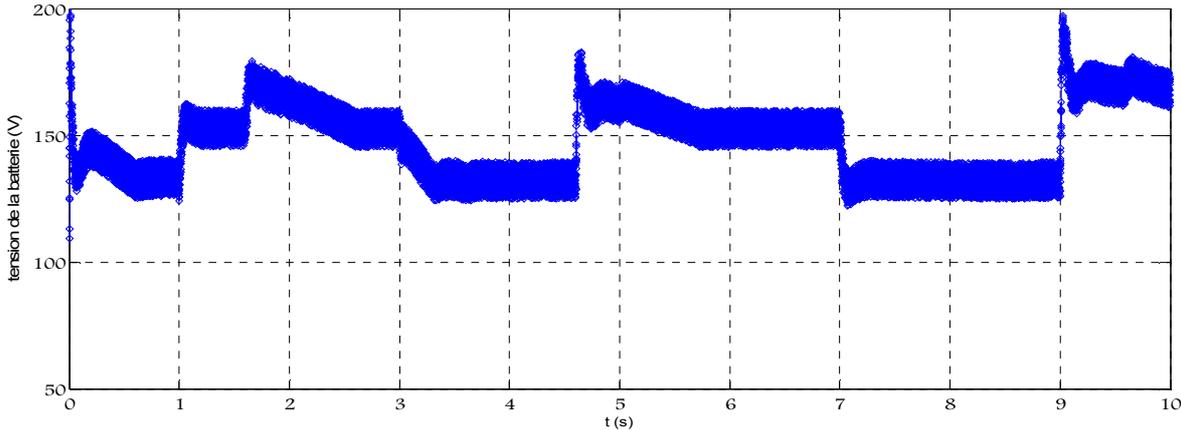


Figure IV.40 : Tension sur les bornes de la batterie durant le cycle

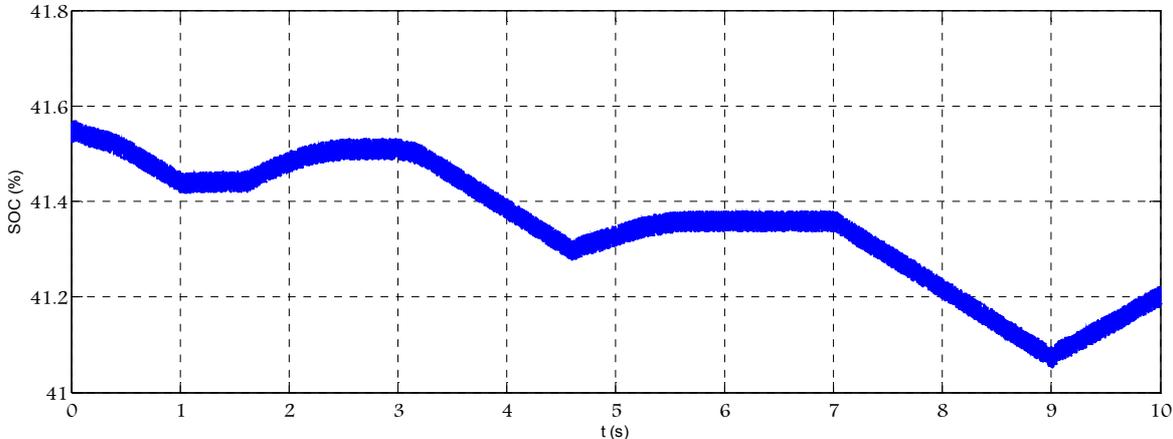


Figure IV.41 : Evolution de SOC durant le cycle

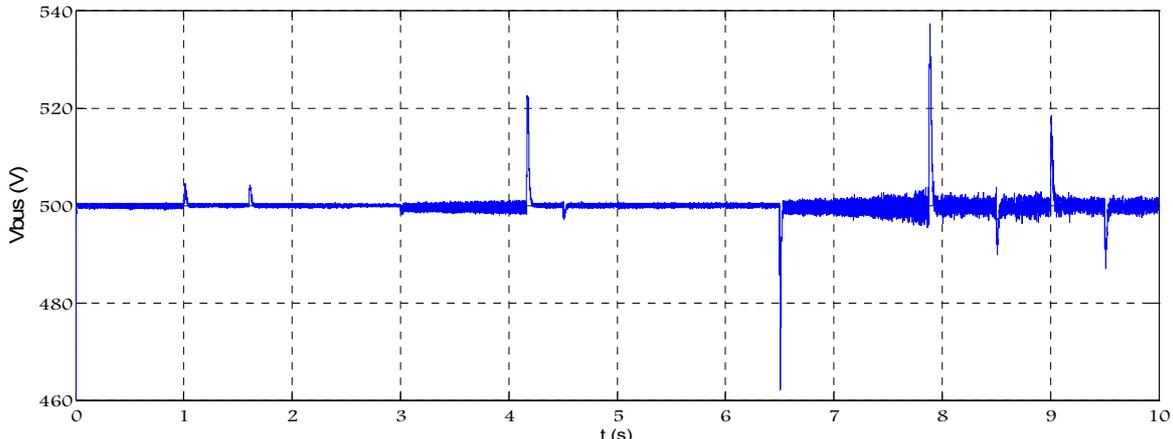


Figure IV.42 : Tension sur le bus continu durant le cycle

IV.3.3. Bilan des puissances

Pour chacun des modes de fonctionnement, le bilan des puissances des différents organes du système doit être respecté. Ce bilan doit valider l'équation (IV.30) durant toute la simulation. Cette équation stipule que la puissance en entrée du moteur électrique est égale à celle délivrée par la génératrice plus celle fournie par la batterie.

$$P_{moteur} = P_{générateur} + P_{batterie} \quad (IV.30)$$

Les figures (IV.43, IV.44 et IV.45) montrent ces différentes puissances. On peut se rendre compte à partir des figures, durant tout le cycle de simulation, la puissance du moteur électrique est l'addition des deux autres puissances. Les courbes se superposant parfaitement, l'équation (IV.30) est alors vérifiée.

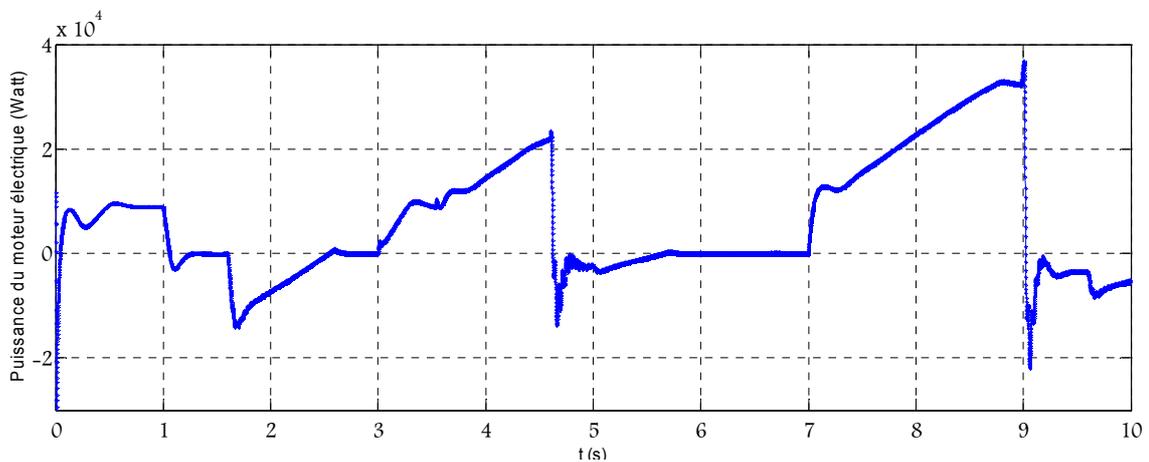


Figure IV.43 : Puissance en entrée et en sortie du moteur électrique de traction

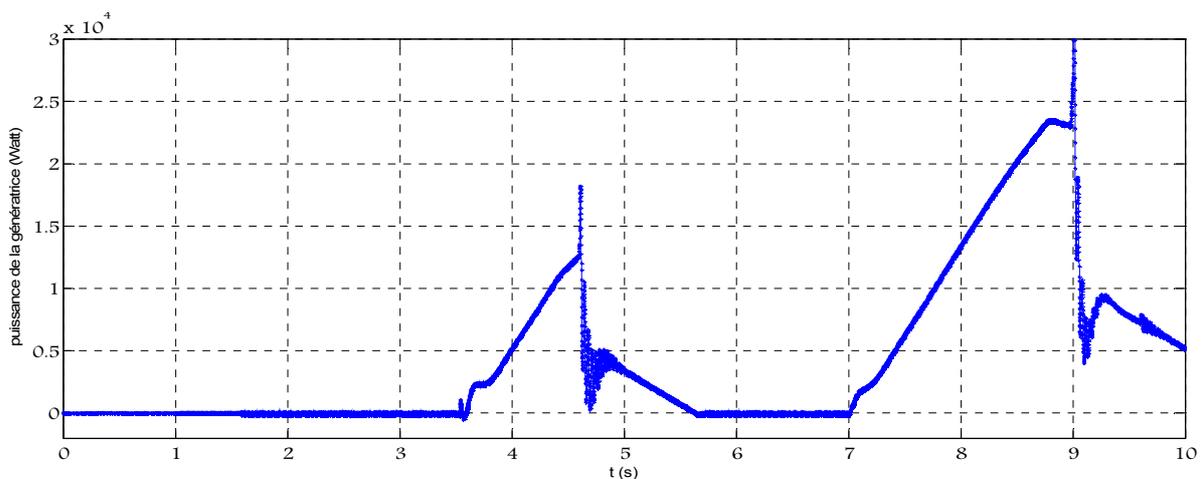


Figure IV.44 : Puissance délivrée par la génératrice

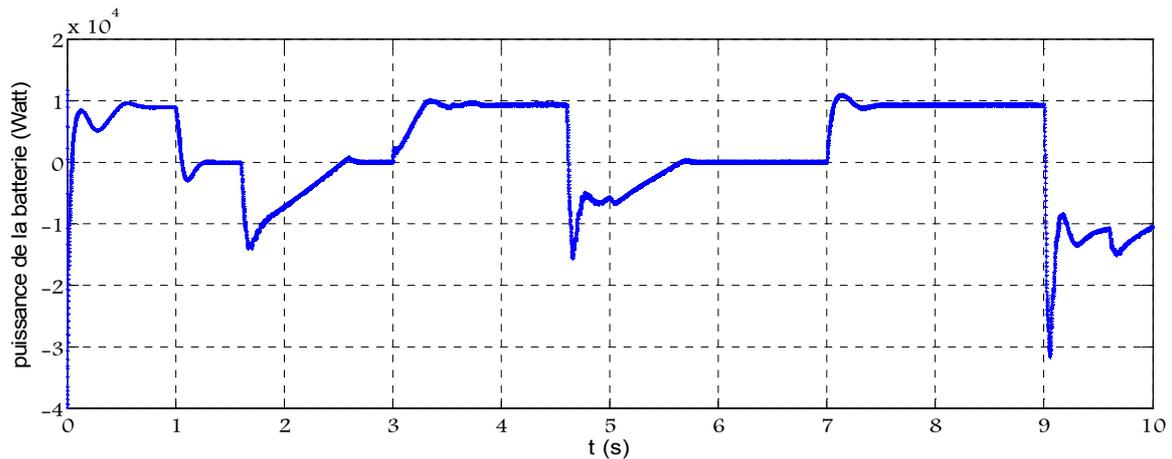


Figure IV.45 : Bilan de puissance lors de recharge/décharge de la batterie

On peut distinguer les quatre phases de fonctionnement décrites dans le chapitre I durant le cycle de conduite proposé, et le comportement de chaque élément suivant le contrôle donner dans la figure IV.17.

La phase de départ et à basse vitesse est observée entre 0 s et 3.5 s. Durant cette période, le véhicule est mû uniquement par le couple lié à la puissance délivrée par la batterie, le groupe électrogène au repos.

Phase de condition normale compris entre 3.5 s et 6 s, il y'a demande d'un surplus de puissance, une référence pour la génératrice est généré à 3.6 s.

La durée entre 7 s et 9 s correspond à la phase de forte accélération (plain puissance), tous les éléments du système de traction son en jeu, la puissance fournie par la batterie s'additionne à la puissance de la génératrice pour alimenter la machine de traction. Après la 9^{ième} seconde, il y'a diminution de la vitesse, la batterie lâche prise. La référence pour la génératrice est toujours fournie pour alimenté le moteur de traction et recharger la batterie.

La recharge de la batterie autrement-dit, la phase freinage, est observée lorsqu'il y'a diminution de la vitesse comme entre 1.6 s et 2.6 s, aussi entre 4.7 s et 5.7 s.

Le SOC évolue selon la charge où la décharge de la batterie (figure IV.41). Le SOC nous donne une meilleure idée sur l'état de charge de la batterie que de mesuré sa tension de sortie, puisque celle-ci est erronée par la chute de tension présente dans la résistance interne de la batterie.

V. Conclusion

Dans la suite de ce chapitre, on a utilisé le modèle de la machine électrique MSAP choisi dans le chapitre précédent pour définir une stratégie de commande vectorielle qui permet le découplage du système de la machine. La modélisation du moteur synchrone à aimants permanents dans le référentiel (dq) nous a été très bénéfique.

Le choix des PI pour la régulation a été très conforme, tant que les paramètres du système à réguler sont connus. Pour la régulation de la vitesse, un régulateur intelligent non-linéaire a été proposé. Ce dernier offre une bonne robustesse en termes de rapidité et de précision.

Trois techniques de commande ont été appropriées pour chacun des convertisseurs. La commande CMC pour le hacheur permet aussi l'accès au courant de la batterie et limite son module à une valeur maximale pour protéger la batterie d'un fort courant.

Un mode de contrôle des sous-systèmes selon les phases de fonctionnement a été proposé. Ce mode de contrôle a pour objectif de déterminer, selon la vitesse du véhicule, le transit d'énergie dans la chaîne de traction. Ceci vise à augmenter le rendement énergétique du véhicule. La détection du mode hybride permet de faire fonctionner le moteur à combustion ou non, selon la puissance requise par le moteur de traction.

A la fin, une simulation sur une durée de 10 secondes, permettant de couvrir les différents modes de fonctionnement, a été effectuée. Les résultats ont montré que le comportement du système hybride série était respecté et notamment que les écoulements de puissance entre chacun des différents sous-systèmes étaient conformes aux prévisions selon la phase de fonctionnement parcourue.

Conclusion générale

Les émissions polluantes des véhicules, comme le gaz à effet de serre, est devenue un des plus importants challenge à relever par les constructeurs automobiles mais aussi par les gouvernements qui durcissent les lois relatives aux rejets nocives des véhicules. Ainsi, depuis peu, des nouvelles structures alternatives aux véhicules conventionnels, qui allient les avantages des propulsions thermique et électrique, sont mises en place. Ces nouveaux véhicules sont nommés véhicules hybrides. C'est l'étude de ces derniers qui a fait l'objet de notre travail.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur les véhicules hybrides, leurs types et les différentes architectures existantes, est rapporté. Avant de définir les contraintes qui régit un véhicule hybride, la connaissance de celui-ci sous ses divers existences été bien nécessaire, car cela va influencer sur la stratégie de commande à développer par la suite. On a vu qu'aucune de ces trois architecture n'été parfaites, chacune a ses avantages et ses défauts selon le domaine d'utilisation, par exemple l'architecture série est beaucoup plus adopté pour les bus de transport urbain.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fait une description des divers organes constituant un véhicule hybride, le choix a été fait en rependant au besoin de l'architecture série. La batterie reste toujours un handicap des VE et VEH, d'autres types d'éléments du stockage d'énergie électrique, plus performants, sont apparus récemment dans le marché comme les super-condensateurs.

Le troisième chapitre traite la modélisation les différents organes de la traction hybride en proposant un modèle adéquat à chacun des composants et à l'architecture série. La modélisation de cette architecture mène à un système représenté d'une manière structurée tout en respectant la causalité physique.

Le quatrième chapitre est l'œuvre de ce travail, il a traité les différentes techniques employer pour commandé les éléments électriques et réduire les pertes qui subsistent, ainsi le contrôle

Le quatrième chapitre est l'œuvre d'art de ce mémoire, des techniques de commandes des différent convertisseurs AC/DC, DC/DC et DC/AC ont été apportées. Un contrôle global des éléments de traction été mis en œuvre, ce contrôle a montré son efficacité comme toute les techniques de commandes d'ailleurs.

Conclusion générale

Finally, a model of the series architecture has been constituted, to which is added a system of energy management, so that each engine works in its range of high efficiency, as well as a system of power distribution between the powertrain and the battery. Analytical and graphical study of the main power flows has allowed to validate the behavior of the model according to different operating modes of the vehicle.

The personal contributions brought to this project were diverse. It has been possible to show that the complementarity of the modules of Psim and of Matlab/Simulink proved to be relatively good for this type of project. The complete model of the series architecture also showed a good stability and robustness despite the numerous sub-systems and parameters to be taken into account. The passage from one domain to another as well as the study of signals is done quite simply by using sensors.

As for the hybrid vehicle model itself, the behavior of the system and particularly that of the energy management sub-system proved to be conforming with reality. A simulation cycle covering each of the operating modes has been set up. The results have shown that power at low speeds comes mainly from the battery, while for higher speeds the combustion engine is mainly contributing. This is a typical behavior of a hybrid vehicle and of its series architecture. This model contains the key elements of such a system which can be used as a basis for the development and the test of a more advanced energy management system for the control of each element and the study of the reduction of pollutant emissions.

Perspectives

Future improvements necessary on the model in order to better reflect the nature of real world vehicles. More sophisticated control strategies, must be developed.

At the current time, the simulation tools of vehicles available cannot guarantee the modeling and the analysis of all the design options of the vehicle, rather than to concentrate on a specific application. A considerable work is necessary to introduce more reliable models and simulation tools for the design of hybrid vehicles.

To complete the modeling of a VH, additional works in several domains must be carried out.

REFERENCES

A

- [AMAR01] Y. AMARA, « Contribution à la Conception et à la Commande des Machines Synchrones à Double Excitation : Application au Véhicule Hybride », Thèse de doctorat, Université, Paris XI, 2001.
- [ANDR11] A. ANDREAS, « Stochastic Optimal Control for Series Hybrid Electric Vehicles », Article, US Department of Energy, USA, 2011

B

- [BOUQ08] D. BOUQUAIN, « Contribution à la modélisation et à l'optimisation des architecture de véhicule hybride », Thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2008.
- [BERE05] J. BERETTA, « Le génie électrique automobile, la traction électrique », H. Science, Edition LAVOISIER, France, 2005.
- [BADI97] F. BADIN. « Contribution à la modélisation des transmissions hybrides thermiques électriques séries. Réalisation d'un bilan énergie-pollution en usage réel, » Thèse de doctorat de l'Université de Savoie, France, 1997.

C

- [CHAN01] C. C. CHAN, K. T. CHAU, « Modern Electric Vehicle Technology », Oxford U.K, Oxford University, USA, 2001.
- [CALLA01] L. CALLAGHAN, S. LYNCH, T. BALON, « Hybrid-Electric Drive Transit Bus Chassis and Engine Emission Evaluation Programs, Electric Vehicle » Symposium EVS 18, Berlin, Germany, 2001.
- [CAPI02] S. L. CAPITANEANU, « Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2002.
- [CHIK08] A. CHIKHI, « Commande Directe du Couple du Moteur Asynchrone-Apport de la Logique Floue», Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2008.

F

- [FUHS09] A. FUHS, « Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation », Édition CRC Press, USA, 2009.
- [FORU13] Site: <http://www.forum-auto.com/marques/opel/sujet244-70.htm>

G

- [GUEN11] S. F. GUENU DI. « Modélisation, Commande et Gestion de l'Energie d'un Véhicule Electrique Hybride ». Mémoire de Magister, Ecole National Polytechnique, Alger, Algérie.
- [GUIL08] A. GUILLAUME. « Comparaison de Concepts de Moteur Diesel en Vue de leur Hybridation : Bilan des émissions de CO₂ suivant l'usage en véhicule ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2008

H

- [HOEL03] D. HOELSCHER, M. EHSANI and others, « Impact of hybrid electric Vehicles on the world's petroleum consumption and supply », Society of Automotive Engineers (SAE) Future Transportation Technology Conference, Paper No.2003-01-2310, 2003.
- [HUSA03] I. HUSAIN, « Electric and hybrid vehicles ». CRC PRESS Boca Raton London New York Washington D.C, USA, 2003.
- [HIJA10] A. HIJAZI. « Modélisation électrothermique, commande et dimensionnement d'un système de stockage d'énergie par super-condensateurs avec prise en compte de son vieillissement ». Thèse de doctorat. Ecole Doctorale Electrique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, France, 2010.

J

- [JANI12] N. JANIAUD. « Modélisation du système de puissance du Véhicule Éclectique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie, des performances et des couts associés ». Thèse de Doctorat. Université Paris Sud, France, 2012.

K

- [KHAL10] N. KHALIL. «Stratégie de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone ». Mémoire de Magister. Université MENTOURI Constantine, Algérie, 2010.
- [KERM09] S. KERMANI. « Gestion Energétique des Véhicules Hybrides : de la Simulation à la Commande Temps Réel ». Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, France, 2009.
- [EHSA05] M. EHSANI, Y. GAO, S. Gay, A. EMADI, « Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles-Fundamentals Theory and Design ». Édition CRC Press, USA, 2005
- [KELLY06] K. J. KELLY, M. MIHALIC, M. ZOLOT, « Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing », Battery Conference on Applications and Advances. Long Beach, U.S.A., 2002.

[KEND12] F. KENDOULI, « Centrale Eolienne et Qualité de l'Énergie Électrique », Thèse de Doctorat, Université de MENTOURI, Constantine, Algérie, 2012.

L

[LHOM07] W. LHOMME. « Gestion d'Énergie de Véhicules Électrique Hybrides Basées sur la Représentation Énergétique Macroscopique », Thèse de doctorat en Génie Électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2007.

[LABR09] F. LABRIQUE, S. GUSIA « Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI », Université catholique de Louvain, France, 2009.

M

[MEST07] V. MESTER. « Conception Optimale Systématique des Composants des Chaines de Traction Électrique ». Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Lille, France, 2007.

[MINH97] T. C. MINH, « Commande Numérique de Machines Asynchrone par Logique Flou », Thèse de Doctorat de l'Université Laval, Québec, Canada, 1997.

[MATH13] Site: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/battery.html>

[MARI01] M. Sc. MARIUSZ MALINOWSKI, « Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers », Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, Poland, 2001.

N

[NOUH08] A. NOUH. « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électrique routiers ». Thèse doctorat, Université de Franche-Comté, France, 2008.

[NABT10] K. NABTI, « Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone », Thèse de Doctorat de l'Université MENTOURI, Constantine, 2010.

P

[PISU05] P. PISU, G. RIZZONI, « A supervisory control strategy for series hybrid electric vehicles with two energy storage systems », Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, Ohio State University, Columbus, USA, 2005.

R

[REKI91] T. REKIOUA. « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des MSAP ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Lorraine, France, 1991.

[ROUS08] G. ROUSSEAU. «Véhicule Hybride et Commande Optimale». Thèse Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2008.

S

[SEIL98] J. SEILER, D. SCHRODER, « Hybrid vehicle operating strategies, Electric Vehicle », Symposium EVS15, Bruxelles, 1998.

V

[VIDO04] L.VIDO. «Étude d'actionneurs électriques à double excitation destinés au transport : dimensionnement de structures synchrones». Thèse de doctorat en Électronique Électrotechnique Automatique, École Normale Supérieure (ENS) de Cachan, France, 2004.

W

[WAKE98] E. H. WAKEFIELD, «History of the Electric Automobile: Hybrid Electric Vehicles», Society of Automotive Engineers (SAE), Pennsylvania, U.S.A., 1998.

ANNEXE 1

DIMENSIONNEMENT

1. Calcul des paramètres du DC/DC BOOST

a) Inductance du lissage

Reprenant l'équation du courant qui circule dans la self :

$$\Delta I_b = \frac{V_b}{L} \alpha T, \text{ et en remplaçant } V_b \text{ par son expression :}$$

$$\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = \frac{2\alpha-1}{L_f} V_{bus}$$

Ce qui implique que ΔI_L est maximale dans le cas où

$$\alpha = \frac{1}{2}$$

$$\Delta I_{bmax} = \frac{V_{bus}}{4L_f}$$

Ainsi l'inductance minimale est donnée par :

$$L_{min} = \frac{V_{bus}}{4 \Delta I_{bmax} f}$$

b) Capacité de filtrage

On suit le même raisonnement que celui de l'inductance du lissage

$$\Delta V_{busmax} = \frac{I_b}{4C_f}$$

Ainsi la capacité minimale est donnée par :

$$C_{min} = \frac{I_b}{4 \Delta V_{busmax} f}$$

ANNEXE 2

PARAMÈTRES DU MODÈLE

2. Le sous-système du stockage électrique

2.1. Modèle de la batterie

Grandeurs	Valeurs
<i>SOC initial</i>	100 %
<i>Tension à vide</i>	202 V
<i>Résistance interne</i>	0.01 Ω

2.2. Convertisseur CC/CC

Valeurs des composants

Grandeurs	Valeurs
<i>R</i>	01 k Ω
<i>C</i>	850 μF
<i>L</i>	09 mH

Valeurs des gains des régulateurs

Grandeurs		Valeurs
<i>Régulateur de tension</i>	<i>K_i</i>	0.007
	<i>K_p</i>	0.1
<i>Régulateur de courant</i>	<i>K_i</i>	0.007
	<i>K_p</i>	01
<i>Tension de référence</i>	<i>Elévateur</i>	500 V
	<i>Abaisseur</i>	210 V
<i>Fréquence en dents de scie</i>		09 kHz

3. Sous-système de traction

3.1. Machine synchrone à aimants permanents

Valeurs des composants

Grandeurs	Valeurs
<i>Résistance statorique</i>	0.05 Ω
<i>Inductance sur l'axe d</i>	0.00065 H
<i>Inductance sur l'axe q</i>	0.00065 H
<i>Flux induit des aimants</i>	0.2 Wb
<i>Inertie</i>	0.1 kg.m ²
<i>Coefficients de friction</i>	0.005 Nm.s
<i>Nombre de paires de pôles</i>	03

Valeurs des gains des régulateurs

Grandeurs		Valeurs
<i>Régulateur de la vitesse</i>	K_{iw}	1.5
	K_{pw}	0.25
<i>Régulateur de courant I_d</i>	K_i	50
	K_p	100
<i>Régulateur de courant I_q</i>	K_i	50
	K_p	100