

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DU GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction
d'un véhicule électrique basé sur une machine
asynchrone à double alimentation



En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique
Option
Commande des systèmes électriques

Présentée par :

Mr. MEZIANI SIF EDDINE

Mr. BOURENANE ANIS

Encadré par :

Mr. AOUZELLAG DJAMEL

Mr. BABOURI RABAH

PROMOTION 2013

Remerciements

Tout d'abord merci au bon dieu le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures circonstances et en bon état.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Messieurs BABOURI Rabah et AOUZELLAG Djamel pour leurs aides et leurs conseils avisés, tout au long de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.



Dédicaces



Je tiens à dédier ce mémoire :

A mon cher Père et à ma très chère Mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limites.

- *A mes chères frères et sœurs : Hani, Alili, Amel*
- *A mes chères amis : Rafik, Samir, Yanis*
- *A mon chère Ami et binôme Syf pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passé ensemble et à sa famille.*
- *A nos encadreur qui nous ont soutenus pendant tout le long de notre travail*
- *A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.*

Anis





Dédicaces



Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limites.

- *A mon chère frère **Badr Eddine**.*
- *A mon grand-père **Mustapha** qui sera toujours présent dans ma mémoire*
- *Ames chères amis : Rafik, Samir, Mamoudi, Maçou, Amir, Bouelam, Saçi, Djamel, et a tous ceux qui sont au cieux*
- *A mon chère Ami et binôme **Anis** pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passé ensemble et à sa famille.*
- *A nos encadreurs qui nous ont soutenus pendant tout le long de notre travail*
- *A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.*

Sif Eddine



LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 Les 1ers véhicules électriques

Figure I.2 Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

Figure I.3 Architecture classique d'une chaîne de traction électrique

Figure I.4 Architecture d'un VE mono moteur

Figure I.5 Architecture bi moteurs

Figure I.6 Architecture détaillé d'un VE bi moteurs avec un MAS et deux roues motrices

Figure I.7 Représentation des ventes des VE en France en 2012

Figure I.8 Répartition des ventes de VE par modèle sur 2012

Figure I.9 Peugeot Partner ion [VE 13]

Figure I.10 Renault Kangoo ZE [VE 13]

Figure I.11 Transport de l'électricité par électrons ou à travers l'hydrogène [Bos 06]

Figure I.12 Autonomie de différents types de voitures avec 100Mj d'énergie provenant du vent
(tenant en compte le rendement global vent-roue)

Figure I.13 Architecture Hybride série

Figure I.14 Architecture hybride parallèle simple arbre

Figure I.15 Architecture double arbre

Figure I.16 Architecture hybride combinée

Figure I.17 Schéma explicatif de la machine à courant continu

Figure I.18 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

Figure I.19 Diagramme représentatif de l'entraînement de VE à l'aide de la MADA

Figure I.20 Batterie aux Nickel-Cadmium

Figure I.21 Batterie Li-Ion

CHAPITRE II

Figure II.1 Représentation schématique de la MADA

Figure II.2 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

Figure II.3 Représentation schématique d'un onduleur MLI

Figure II.4 Principe de la MLI

Figure II.5 Batterie idéal

Figure II.6 Force de roulement sur la roue

Figure II.7 Force aérodynamique en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du C_x .

Figure II.8 Forces longitudinales du véhicule

Figure II.9 Principe de la commande vectorielle

Figure II.10 position du référentiel par rapport au flux

Figure II.11 Vecteur flux dans le système d'axe choisis

Figure II.12 Schéma bloc de la régulation des courants

Figure II.13 Régulateur des courants

CHAPITRE III

Figure III.1 structure général d'un contrôleur floue.

Figure III.2 Dispositif de commande global d'une MADA par la logique floue

Figure III.3 Schéma synoptique d'un contrôleur floue de vitesse

Figure III.4 Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou.

Figure III.5 Matrice d'inférence des règles floues

Figure III.6 Parcours prioritaire par la voiture

Figure III.7 Allure de la vitesse de rotation et de sa référence

Figure III.8 Allure des pulsations des courants statoriques et rotoriques

Figure III.9 Allure du couple électromécanique et du couple de référence en fonction du temps

Figure III.10 comportement d'un courant et d'une tension de phase statorique

Figure III.11 Zoom sur la première partie de la figure III.10

Figure III.12 Zoom sur la deuxième partie de la figure III.10

Figure III.13 Allure de la puissance active statorique et rotorique

Figure III.14 Allure de flux statorique directe en fonction du temps

Figure III.15 Allure de flux statorique en quadrature en fonction du temps

Figure III.16 Allure de la tension de la batterie en fonction du temps.

Figure III.17 Allure Du courant de la batterie en fonction du temps

Figure III.18 Energie fournie par la batterie

Figure III.20 Allure de courant d'une phase rotorique.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

TAB I.1 Historique.

Tab I.2 Tableau comparatif des différentes technologies.

CHAPITRE II

Tab II.1 Paramètres de simulation

Tab II.2 Stratégie de commande en courant

CHAPITRE III

Tab III.1 Méthodes usuelles de l'inférence floue.

NOMENCLATURE

A.Principales abréviation

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

VE : Véhicule électrique

B.Principales notations

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

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

f : Coefficient de frottement visqueux (Nm.s/rd)

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3)

P_s : Puissance active statorique (Watt)

Q_s : Puissance réactive statorique(VAr)

g : Glissement

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} :Tensions d'alimentation des enroulements statorique(A ,B,C) (V)

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} :Tension d'alimentation des enroulements rotoriques (a , b, c)(V)

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} :Courants statoriques(A)

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} :Courants rotoriques(A)

R_s : Résistance statorique par phase(Ω)

R_r : Résistance rotorique par phase(Ω)

L_s, L_r : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique(H)

l_s, l_r : Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine(H)

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator (H)

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H)

M : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celle du rotor(H)

M_{sr} : La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique (H)

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rd/s)

ω_s : Pulsation du champ statorique (rd/s)

V_{ds}, V_{qs} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d ,q) (V)

V_{dr}, V_{qr} : Tensions rotoriques dans le repère de Park(d,q) (V)

i_{ds}, i_{qs} : Courants statoriques dans le repère de Park(d,q) (A)

i_{dr}, i_{qr} : Courants rotoriques dans le repère de Park(d,q) (A)

ϕ_{dr}, ϕ_{qr} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) (wb)

ϕ_{ds}, ϕ_{qs} : Flux statoriques dans le repère de Park (d,q) (wb)

θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et de l'axe direct «d » (rd)

θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et de l'axe direct «d » (rd)

s : Operateur de LAPLACE, soit le nombre de paires de pôles de la machine

ω_m : Vitesse électrique de la machine (rd/s)

θ : Angle électrique de position de la machine (rd)

V_s : Tension statorique (V)

V_{Bat} : Tension Batterie(V)

S_a, S_b, S_c : Fonction de connexion de l'interrupteur

τ_r : Temps de réponse du système (s)

K_{ps} : Gain proportionnel statorique

K_{is} : Gain integral statorique

K_{pr} : Gain proportionnel rotorique

K_{ir} : Gain integral rotorique

e : Erreur de vitesse

Δe : Variation de l'erreur de vitesse

Δu : Variation de la commande

C.Indices

Réf : indique la valeur de référence

més : indique la valeur mesurée

est : indique la valeur estimée

reg : indique la valeur régulé

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I

ETAT DE L'ART SUR LES VEHICULES ELECTRIQUE

I.1. Introduction	2
I.2. Véhicule tout électrique	3
I.2.1. Historique	4
I.3. Voiture électrique	5
I.3.1. Fonctionnement d'une voiture électrique	5
I.3.2. Architecture classique d'une chaîne de traction d'un VE	7
I.3.3. Véhicule électrique (mono_moteur)	8
I.3.4. Véhicule électrique (bi_moteur)	9
I.3.4.a. Véhicules électriques commercialisés	10
I.3.4.b. Véhicules électriques et source d'énergie embarquée	12
I.4. Véhicule hybride	14
I.4.1. Historique	14
I.4.2. Principales architectures de véhicules hybrides	15
I.4.2.1. Architecture série	15
I.4.2.2. Architecture parallèle	16
I.5. Différentes machines qui interviennent pour la traction des VE	19
I.5.1. Machines à courant continu	19
I.5.2. Machines à courant alternatif	20
I.5.2.1. Machines synchrones	21
I.5.2.2. Machines asynchrones	21
I.5.2.2.a. Machines asynchrones à cage d'écureuil	21

I.5.2.2.b Machines asynchrones à rotor bobiné	21
I.5.2.2.b.1. Structure de la machine à double alimentation (MADA)	22
I.5.2.2.b.2. Différents modes de fonctionnement de la MADA	23
I.6.Batteries	25
I.6.1.Batterie au Plomb	25
I.6.2.Batteries aux Nickel-Cadmium	25
I.6.3.Batteries aux Métal-Hydrures	26
I.6.4.Batteries Lithium-Ion	26
I.6.5.BatteriesLithiumPlymères	27
I.6.6.Batteries Sodium-Chlorure de Nickel	27
I.6.7.Batteries Zebra	27
I.6.8. Tableau comparatif des différentes technologies	28
I.7.Conclusion	28

Chapitre II

MODELISATION DE LA CHAINE DE TRACTION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE

Introduction	29
II.1 Hypothèses.....	29
II.2 Modélisation de la MADA dans le repère (abc).....	29
II.2.1 Equations électriques.....	30
II.2.2 Equations magnétiques.....	30
II.2.3 Equation mécanique	31
II.3 Modélisation la MADA dans le repère park (dq).....	31
II.3.1 Intérêt de repère dq.....	31
II.3.2 Matrice de park.....	32
II.4 Application de la transformation de Park au modèle de la MADA.....	32
II.4.1 Application aux équations électriques	32
II.4.2 Application aux équations magnétiques	33
II.4.3 Application à l'équation mécanique	35
II.5 Choix du référentiel.....	35
II.5.1 Référentiel lié au stator.....	35
II.5.2 Référentiel lié au rotor.....	35
II.5.3 Référentiel lié au champ tournant.....	35
II.6 Modélisation de l'alimentation de la MADA.....	36
II.6.1 Modélisation de l'onduleur.....	36
II.6.2 Modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale MLI	37

II.6.3 Modèle électrique de la batterie.....	38
II.6.3.1 Modèle idéal.....	38
II.7 Modélisation du véhicule.....	39
II.7.1 Modélisation du couple résistant	39
II.8 Commande vectorielle de la MADA.....	43
II.8.1.Introduction.....	43
II.8.2 Modèle de la MADA en vue de la commande	44
II.8.3 Commande vectorielle de la MADA	45
II.8.4 Schéma de contrôle des courants	48
II.8.5 Dimensionnement des régulateurs du courant	48
Conclusion	50

CHAPITRE III

COMMANDE DE LA VITESSE PAR LOGIQUE FLOUE

III.1 Logique floue	51
III.1.1 Historique	51
III.1.2 Domaines d'application.....	52
III.1.3 Commande par logique floue	52
III.1.4 Interface de fuzzification	53
III.1.5 Mécanisme d'inférence flou	54
III.1.6 Interface de défuzzification	55

III.1.7 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	55
III.2 Commande de vitesse d'une MADA par logique floue.....	57
III.3 Structure de base d'un contrôleur flou de vitesse	57
III.4 Fuzzification	59
III.5 Base des règles	59
III.6 Simulation du système.....	61
III.7 Résultat de simulations	61
III.7.1. Démarrage avec un couple résistant.....	61
III.8 Conclusion.....	70
Conclusion generale.....	71

I.1.Introduction générale

Dans le contexte énergétique actuel (Pénurie et pollution des énergies fossiles), l'automobile occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores (acoustiques) et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation du carburant en constante augmentation, impliquant de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie. Le véhicule électrique (VE) est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs d'automobiles et les organismes de recherche, pour essayer de remplacer peu à peu les véhicules thermique dans les centres villes où le facteur de pollution est notamment important, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique [NOU 08].

Il suffit de se pencher sur l'histoire du véhicule électrique pour voir que celui-ci a été souvent considéré comme une technologie très prometteuse, capable de s'emparer d'une importante part du marché, mais qui n'y est pas arrivée. Cet échec s'explique principalement par la concurrence, disposant d'une technologie bien établie par le moteur thermique (le moteur à explosion), qui a profité des économies d'échelle, du faible coût du carburant. Les véhicules électriques sont freinés par leurs coûts élevés, leurs autonomie limitées, le manque d'investissements, une insuffisance en infrastructures de charge et les défis ordinaires que représente le lancement d'une nouvelle technologie [NOU 08].

Sur ce travail, on étudiera un système qui est basé sur une machine asynchrone à double alimentation comme organe principale de la chaîne de traction, comme on le c'est bien c'est une machine qui peut atteindre le double de sa puissance nominale, ce qui est vraiment intéressant car on pourra gagner en puissance.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

SUR

LES VEHICULES ELECTRIQUES

I.1 Introduction

Les études sur la conception des véhicules à traction électrique sont motivées par la nécessité d'un changement radical dans le domaine du transport. En effet, les problèmes environnementaux et de consommation d'énergie sont au cœur de notre actualité. C'est pourquoi, un moyen de transport propre non émetteur de gaz à effet de serre est d'un enjeu mondial.

Ainsi, le but principal de ce premier chapitre est de présenter les solutions actuelles envisagées par les constructeurs afin de répondre à ces problèmes à partir des technologies existantes. Il présente les différentes solutions envisagées dans le monde automobile pour répondre à cette problématique, tout en permettant simultanément de garder le niveau actuel de mobilité et de confort, voir même l'améliorer. [Mes 07]

Les véhicules tout électriques possèdent de grands avantages par rapport aux véhicules traditionnels, représentant la solution idéale aux problèmes annoncés. En effet, ils sont:

- Sans émission de gaz à effet de serre (la production d'électricité est supposée propre) ;
- Avec un bon rendement de la chaîne de traction ;
- Permettent un électrique avec récupération d'énergie ;
- Une conduite plus souple et silencieuse;
- D'une conception simplifiée (suppression des boîtes de vitesse, etc.).

Pourtant, leurs désavantages coïncident avec les avantages des véhicules traditionnels : leur source d'énergie embarquée, les batteries, sont caractérisées par une faible densité d'énergie engendrant ainsi un véhicule aux faibles performances avec une autonomie réduite.

Cette nature complémentaire des véhicules traditionnels et tout électrique souligne la nécessité d'un compromis afin de bénéficier de leurs avantages en tentant de supprimer leurs inconvénients. Les véhicules tentant ce compromis sont appelés hybrides. [Mes 07]

Ce premier chapitre présente les véhicules à traction électrique en les divisant en deux grandes catégories : les véhicules tout électriques et les véhicules électriques hybrides. Après quelques rappels d'histoire, on présentera quelques exemples de réalisations soulignant les architectures utilisées, les problèmes rencontrés et les orientations prises par les constructeurs.

I.2 Véhicule tout électrique

Historique

Avant les années 1830, les moyens de transport utilisaient seulement de la puissance à vapeur, car les lois de l'induction électromagnétique n'ont pas été développées, les moteurs électriques et les générateurs, venaient juste d'être découvertes. Faraday a démontré le principe du moteur électrique en 1820 par une barre de fer portant un courant électrique et un aimant. En 1831 il a découvert les lois de l'induction électromagnétique qui ont permis le développement et la démonstration des moteurs électriques et des générateurs essentiels pour le transport électrique. [NOU 08]

L'évolution de l'industrie automobile entre 1830 et 1900 peut se résumer aux dates suivantes (TAB. 1.1) [HUS 03] [WES 01] :

1830	transport à puissance de vapeur
1831	loi de Faraday, ensuite l'invention de moteur à courant continu
1834	voiture électrique à batteries non rechargeables
1859	développement d'un accumulateur de plomb
1885	véhicules à moteur à essence
1900	4200 automobiles se sont vendues dont 40% à puissance de vapeur, 38% à puissance électrique et 22% à moteur à essence

TAB. I.1 Historique

A la fin du 19^{ème} siècle, plusieurs automobiles électriques alimentées par des accumulateurs électrochimiques, furent réalisées et testées en pensant à leur industrialisation. A cette époque où les moteurs thermiques étaient loin du stade actuel, il semblait que la propulsion électrique avait ses chances, grâce aux performances honorables atteintes par les

prototypes qui furent réalisés. Ainsi, la fameuse Jamais Contente roula à 105 km/h ,en 1899, et en 1901, un trajet de 307 km sans recharge fut parcouru [MUL 01], [KAN 95].

En 1901, compte tenu de ces performances, le plus bel avenir semble être promis au véhicule électrique. Ainsi, on imagine installer des postes de charge là où l'on pourrait, pendant la nuit, recharger la batterie d'accumulateurs épuisée par une journée d'utilisation ou changer une batterie vide par une autre pleine. Cependant dès 1907, les journaux affirment que le véhicule électrique est en déperdition ; bien qu'il ne présente pas d'inconvénient de démarrage et qu'il soit propre, il reste une voiture de ville ou de luxe, très facile à conduire, par exemple pour la promenade. Il n'a qu'un seul moteur électrique, léger mais robuste. Il peut développer une puissance double de la puissance normale sans échauffement dangereux. Ses deux groupes de batterie (devant et derrière) de 110 V sont des accumulateurs solides et de grande capacité pour de long parcours et il est rapide [BER 05]. Mais son prix reste encore souvent assez élevé, du fait même de cette batterie d'accumulateurs qui lui assure son autonomie énergétique. Les facteurs qui ont mené à la disparition des VE, après sa période courte de succès, étaient [HUS03], [BER05] :

1. L'invention d'un démarreur en 1911 qui a facilité le démarrage des véhicules à gaz ;
2. Le prix de revient très élevé des VE ;
3. L'accès limité à l'électricité et au rechargement des batteries dans les secteurs ruraux, tandis que l'essence pourrait être vendue dans ces secteurs ;
4. La faiblesse de l'autonomie des accumulateurs (batteries) ;
5. Enfin, le modèle T de Ford en 1909 donne le départ à la popularité des véhicules fonctionnant à l'essence, matière supérieure comme source autonome d'énergie, et à leur emprise durable sur le marché.

Dans le nouveau continent, l'aventure de la voiture électrique débute en 1894 à Philadelphie où deux constructeurs, Henry Morris et Pedro Salom, fabriquent une première voiture expérimentale; l'Electrobrat est un véhicule doté d'un moteur électrique pour chaque roue et dont l'autonomie est de 40 km à une vitesse constante de 32 km/h. Dès l'année suivante, ils en commencent une production en série, notamment destinée aux flottes de taxis de Philadelphie et New York [BER05].

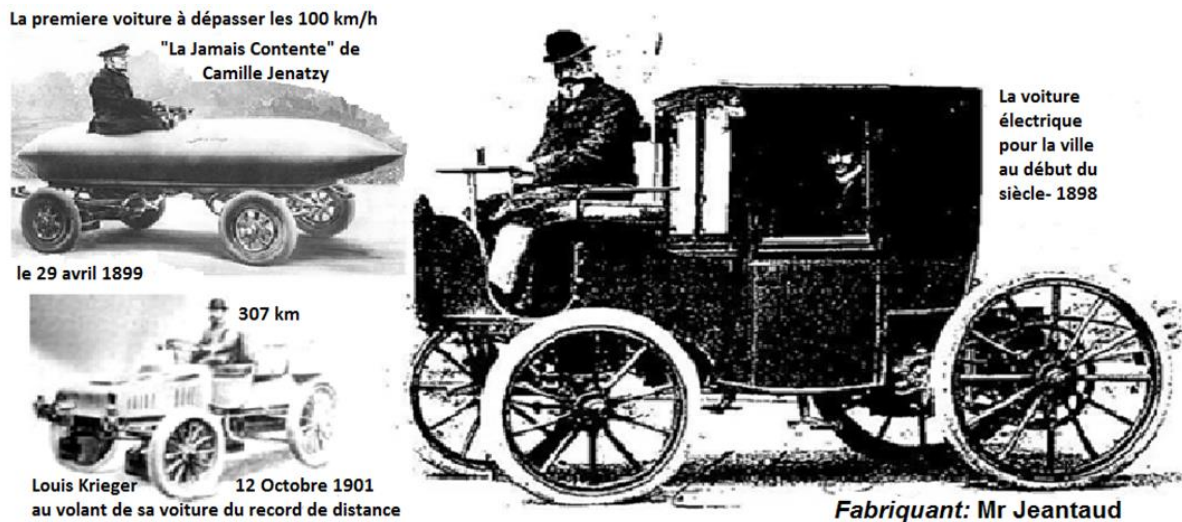


Figure I.1 Les 1ers véhicules électriques

Au début du siècle, la technologie de la voiture électrique aurait peut-être pu se constituer en industrie viable, au moins sur certains secteurs (pour le transport urbain), mais de fait ce ne fut pas le cas. Quoi qu'il en soit, l'idée qu'elle reste une alternative ou un complément viable et prometteur aux véhicules à essence n'a jamais complètement disparu : Les espoirs placés dans la technologie des voitures électriques ne datent en effet pas d'aujourd'hui. À la fin des années 1960, la voiture électrique connaît ainsi un regain d'intérêt, grâce notamment au développement de la pile à combustible, et est par exemple présentée à la télévision comme une technologie pouvant s'imposer à relativement brève échéance. Aujourd'hui à nouveau, on voit apparaître dans la presse des articles annonçant l'émergence prochaine de cette technologie, sous la pression de l'augmentation du prix du pétrole et du développement des préoccupations environnementales, et grâce aux derniers progrès techniques. [NOU 08]

I.3 Voiture électrique

I.3.1 Fonctionnement d'une voiture électrique

La batterie stocke l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (*DC*) de la batterie en courant alternatif (*AC*).

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur [TRI 10]. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique. D'un point de vue mécanique, donc, un véhicule électrique est plus simple qu'un véhicule à moteur thermique : pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses. [TER VE]

Un autre avantage du moteur électrique est qu'il peut transformer l'énergie cinétique du véhicule en énergie électrique pendant les phases de décélération et de freinage. Le moteur devient un générateur qui permet de recharger la batterie. La qualité de la batterie et de la recharge est le point clé du véhicule électrique. [TER VE]

Tous les véhicules électriques ont aussi un système embarqué qui leur permet de charger la batterie. Il existe deux méthodes pour recharger la batterie :

- Conduction
- Induction

La majorité des véhicules électriques utilisent la conduction, avec un système de branchement au réseau électrique, Pour la méthode d'induction, le chargement se fait sans contact. Dans les deux cas, le système chargeur contient un transformateur (adaptation de la tension) et un convertisseur (AC/DC). [TRI 10]

La composition d'une batterie classique évolue légèrement après chaque cycle de charge/décharge ; en plus, une batterie plomb ne doit pas être déchargée à plus de 80% sous peine d'irréversibilité et de détérioration. La maintenance des batteries est donc délicate.

Les nouvelles générations de batterie supportent plus facilement de nombreux cycles. Les batteries : Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH), Lithium/ion (Li-ion)...peuvent supporter assez de cycles pour parcourir 100000 km. Leur prix est évidemment en conséquence (excessif).L'autonomie du véhicule est fonction de l'énergie stockée dans la batterie et dépendra aussi du poids total embarqué de la batterie (énergie massique de la batterie). Les nouvelles générations de batterie permettent des autonomies plus importantes, sans que l'on soit obligé d'embarquer des quantités trop importantes de batteries. [TER VE]



Figure I.2 Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

I.3.2 Architecture classique d'une chaîne de traction d'un VE

Pour la réalisation d'un VE, on prend un véhicule thermique et on remplace le moteur thermique par un moteur électrique, sur ceux on simplifie la transmission mécanique et on supprime l'embrayage voir même la boîte à vitesse, par contre la suppression de la boîte à vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant, donc plus couteux. [SCH 07]

Alors pour réduire la masse embarquée, les VE sont conçus avec des réducteurs qui permettent au moteur électrique de tourner à grande vitesse, ces réducteurs agissent sur les moteurs pour réduire leur taille grâce à la réduction du couple demandée. [SCH 07]

Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique comprenant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la figure (I.3) [SCH 07]



Figure I.3 Architecture classique d'une chaîne de traction électrique

1. Batteries 2. Moteur 3. Transmission 4. Freins 5. Régulateur électronique [SCH 07]

I.3.3 Véhicule électrique (mono moteur)

L'architecture mono moteur qui emploie un moteur à courant continu, une batterie plus un variateur (un hacheur réversible) en série et un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple) comme le montre la figure (I.4) [JAN 11]

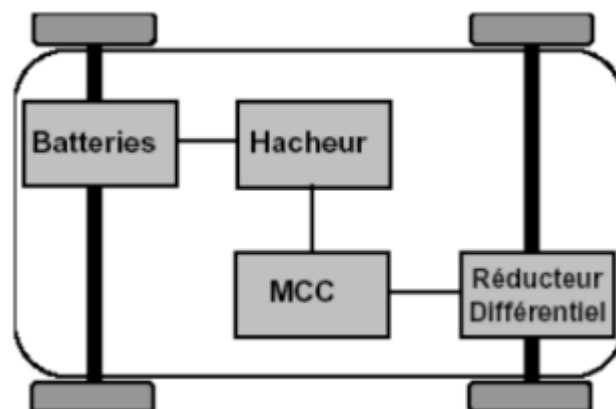


Figure I.4 Architecture d'un VE mono moteur

I.3.4 Véhicule électrique (bi moteur)

Sur les VE bi moteur on trouve deux grandes architectures, l'une utilise une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu qui permet d'avoir plus de fiabilité coté moteur[JAN 11] ;l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule ainsi expliquée sur les figures suivantes.[TRI 10]

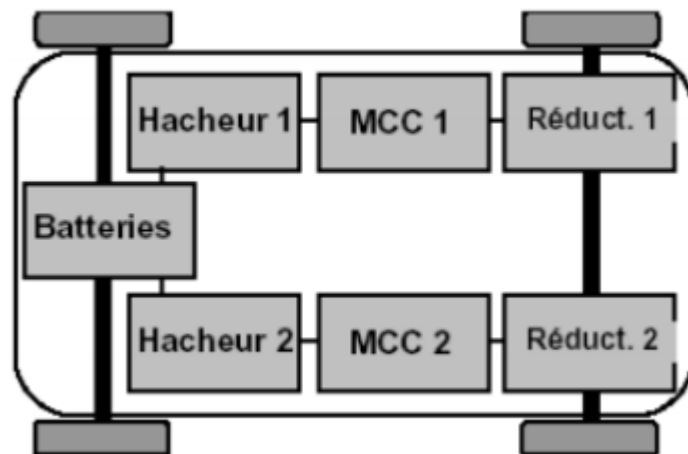


Figure I.5 Architecture bi moteurs

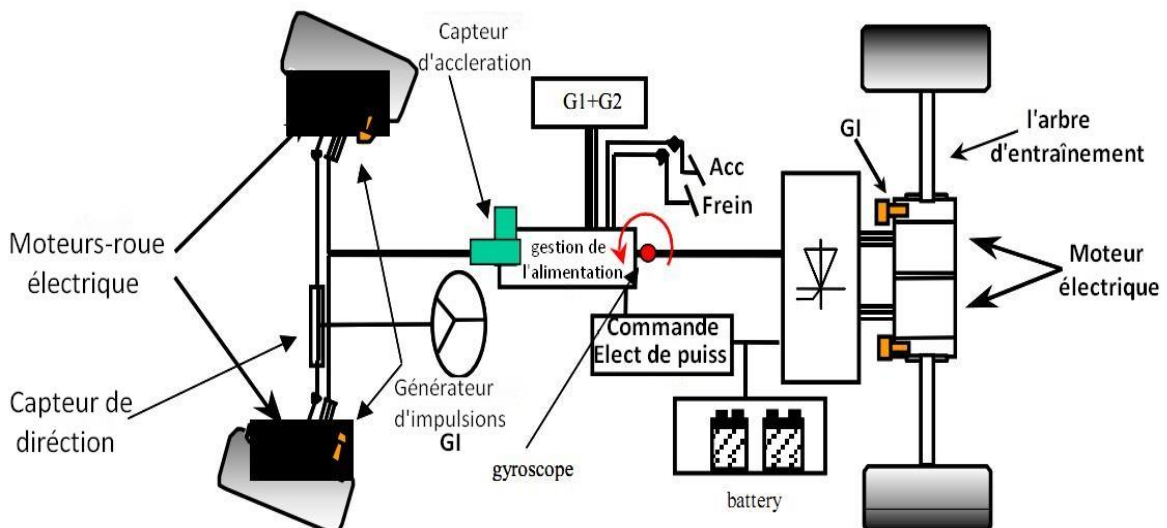


Figure I.6 Architecture détaillé d'un VE bi moteurs avec un MAS et deux roues motrices

I.3.4.a Véhicules électriques commercialisés

Non seulement ils existent des VE commercialisée pour les agglomérations mais les constructeurs ne se sont pas limiter à ça, ils s'attaquent à un marché important qui est le véhicule utilitaire, on s'est penché sur ce marché pour voir la commercialisation de ces VE en 2012 et on trouve alors deux exemples en France. [VE 13]

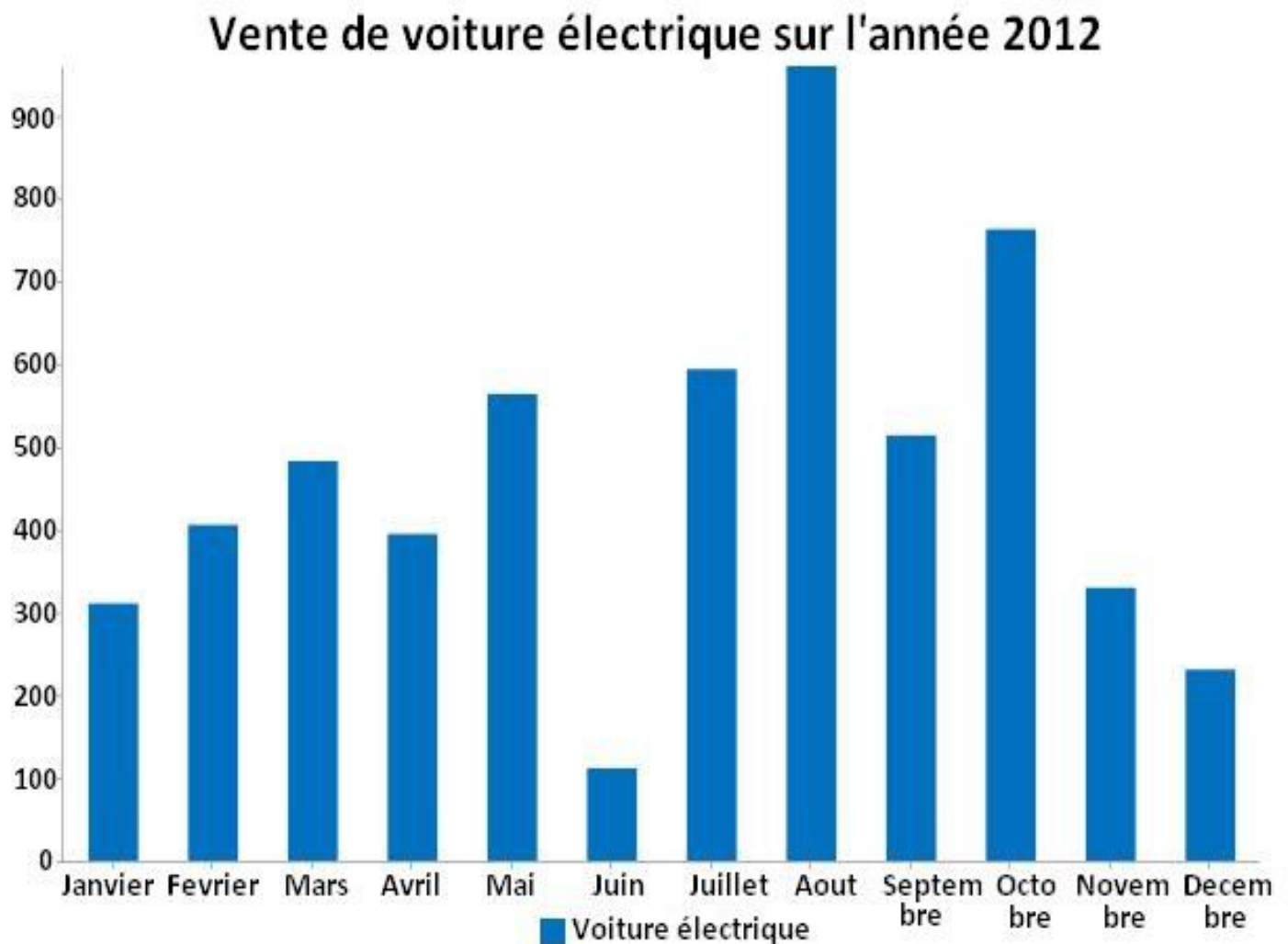


Figure I.7 Représentation des ventes des VE en France en 2012

Sur le marché européen, ils existent plusieurs constructeurs de véhicules électriques, on se penche sur deux constructeurs français pour faire une évaluation du marché et une étude sur les ventes de leur produit. [VE 13]

Répartition des ventes de voitures électriques par modèle sur 2012

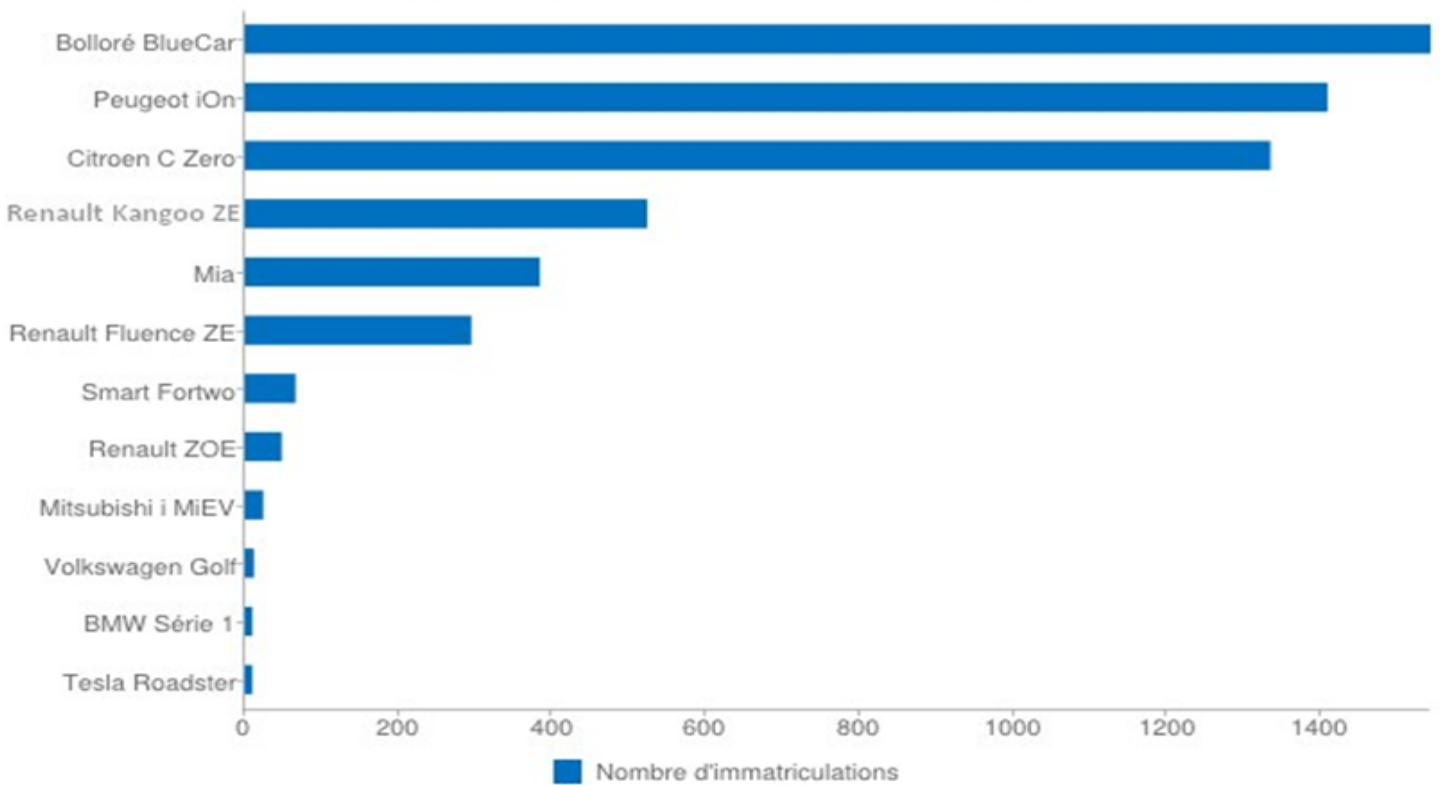


Figure I.8 Répartition des ventes de VE par modèle sur 2012

On se concentre sur le Kangoo ZE et le Peugeot Ion, qui se concurrencent le marché du véhicule utilitaire, avec leur exploits le deux marques on pue atteindre les 170 Km sur un cycle normalisée avec des batteries de capacité de 22,5 KWh et un moteur qui développe 67 Cv et un couple disponible au démarrage de 200 Nm tout ça pour attendre une vitesse de pointe de 110Km/h.(ces configuration sont les même pour les deux marques)[VE 13]



Figure I.9 Peugeot Partner ion [VE 13]



Figure I.10 Renault Kangoo ZE [VE 13]

Le Partner Ion possède aussi un nouveau système de récupération d'énergie capable d'assurer seul les légers freinages. Il permet de récupérer jusqu'à 10% d'autonomie suivant le parcours. [VE 13]

I.3.4.b Véhicules électriques et source d'énergie embarquée

Dans un système embarqué, le stockage de l'énergie électrique est réalisé principalement par des accumulateurs électrochimiques (plomb-acide, lithium-ion,...). Grâce à la réversibilité des réactions au sein de ces éléments, il est possible de les recharger à partir d'une source d'énergie électrique (réseau embarqué, générateur). [TRI 10]

L'autonomie est dépendante du niveau d'énergie stockée dans l'accumulateur (exprimée en Ah associée à une tension). Dans le domaine des transports (rail, route, avion), les besoins en énergie sont plus élevés. Pour un véhicule électrique, l'énergie embarquée est de l'ordre de 20kWh (72mégaJoule) pour une autonomie d'environ 150km. [TRI 10]

Toutefois, d'autres paramètres influencent l'autonomie d'un système. La température interne de l'accumulateur, le vieillissement, le profil de courant de l'accumulateur, ...

Une solution envisagée pour le stockage de l'énergie à bord des VE est la pile à combustible à base d'hydrogène. Les VE comportant une telle source d'énergie embarquée sont appelées FCV (Fuel Cell Véhicule). DaimlerChrysler et General Motors sont deux constructeurs fortement impliqués dans le développement de ces véhicules [MAH 05].

L'enthousiasme suscité par les voitures à hydrogène a fait long feu, mais, malheureusement, la situation n'est pas assez satisfaisante. En effet, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie car il doit lui-même être produit en utilisant d'autres sources d'énergie. Il est donc un intermédiaire énergétique, au même titre que l'électricité. Ainsi, sa fabrication intervient dans le bilan énergétique et écologique. Sa fabrication peut se faire d'une manière conventionnelle engendrant une pollution ou d'une manière propre. [MES 07].

Dans le premier cas, utilisé actuellement, l'hydrogène est obtenu à partir de combustibles fossiles qui émettent du CO₂ et d'autres polluants. Un usage massif de ce procédé aggraverait le réchauffement de la planète et ne résoudrait pas le problème de l'épuisement de ressources fossiles. [MAH 05]

Dans le deuxième cas, pour être un combustible propre l'hydrogène doit être produit à partir d'énergies renouvelables. Mais, utiliser l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène (par l'électrolyse de l'eau) qui à son tour sera utilisé pour produire de l'électricité représente un processus complexe et coûteux. [BOS 06]

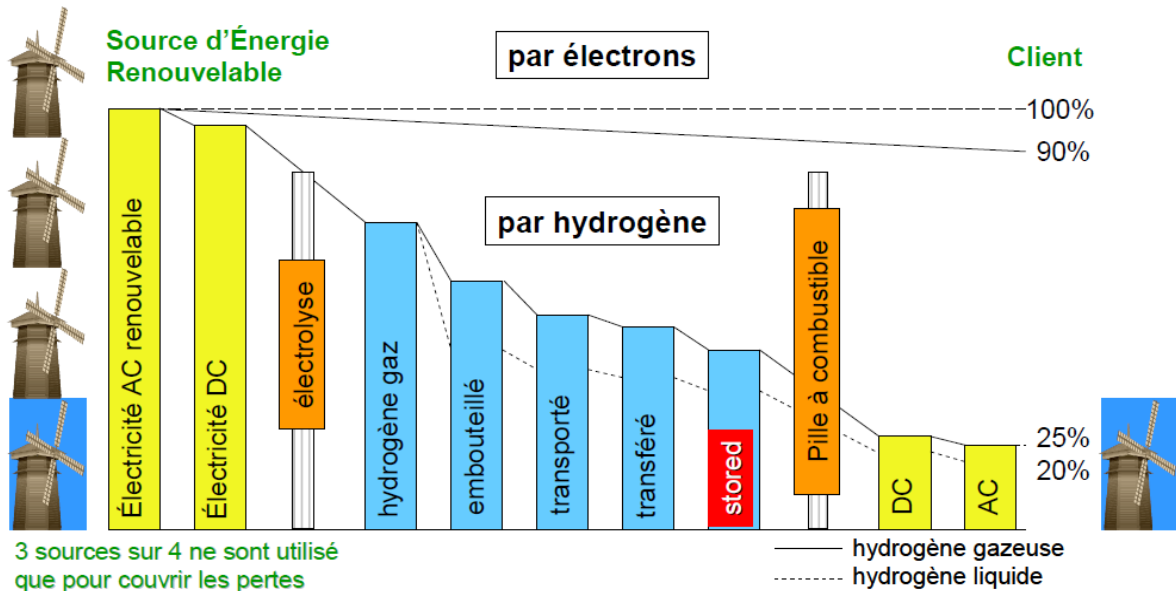


Figure I.11 Transport de l'électricité par électrons ou à travers l'hydrogène [Bos 06]

D'après la figure(I.11), pour produire de l'électricité au bord du véhicule (disons 100%) à partir d'hydrogène, une quantité d'énergie électrique initiale 4 fois plus grande (400%) est requise. En effet, seulement la moitié de l'énergie électrique initiale arrive au véhicule sous forme d'hydrogène, et seulement la moitié de celle-ci sera transformée en énergie électrique, la meilleure pile à combustible ayant un rendement max de 50% [BOS 03-05]. Ainsi, d'après Ulf Bossel, le fondateur du Forum Européen de la Pile à combustible [MES 07], l'hydrogène ne peut pas devenir une forme d'énergie dominante, car il ne peut pas rivaliser avec sa propre source d'énergie : l'électricité [BOS 06].

En fait, la pile à combustible remplace la batterie comme élément de stockage avec l'avantage de permettre au FCV une plus grande énergie stockée et donc une plus grande autonomie. Toutefois, si on se reporte à l'énergie initiale produite, le VE à batterie à une autonomie plus que double par rapport au FCV. La figure (I.12) représente l'autonomie énergétique de chaque type de voitures avec 100Mj d'énergie provenant du vent. [BOS 06]

I.4 Véhicule hybride

Pour affaiblir le problème d'autonomie, d'autres solutions ont été envisagées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules électriques hybrides (VH). Ils représentent un compromis entre le véhicule traditionnel à moteur thermique et le VE. Leurs but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie de VE. Ils peuvent être vus comme solution intermédiaire, en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus [BOS 06]

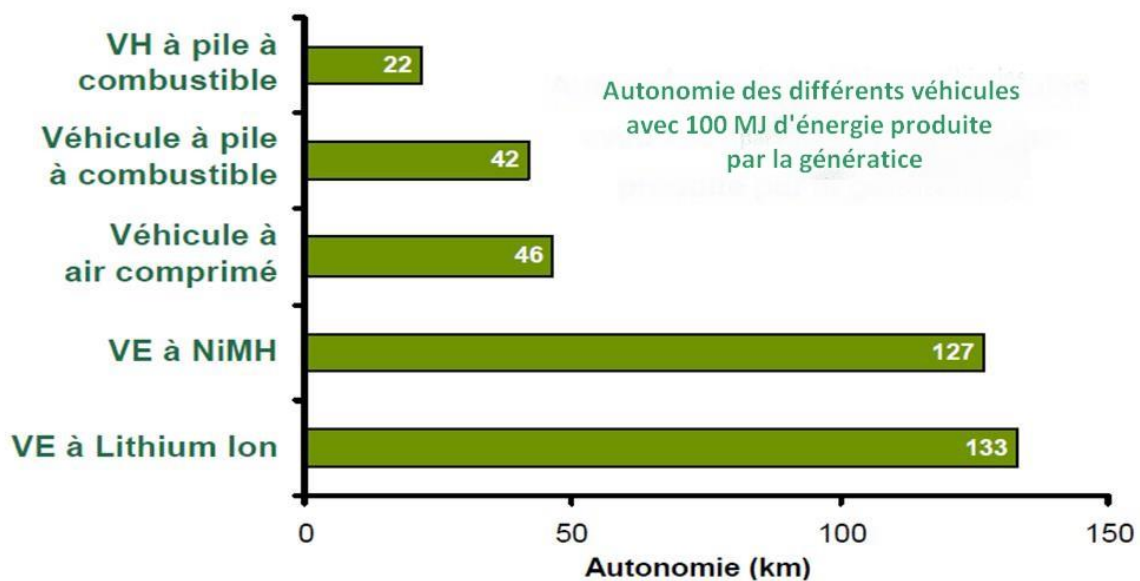


Figure I.12 Autonomie de différents types de voitures avec 100Mj d'énergie provenant du vent (tenant en compte le rendement global vent-roue)

I.4.1 Historique

Même si le VH apparaît maintenant comme une solution aux faibles performances des VE actuellement le concept des VH n'est pas nouveau. En effet, il est aussi vieux que l'automobile elle-même. A l'origine son but n'était pas de diminuer la consommation de carburant, mais surtout d'assisté les faibles performances des moteurs à combustion de l'époque. [EHS 05]

Les premiers VH de type série ou parallèle ont été présentés à Paris au Salon de 1899. Le VH parallèle avait un petit moteur thermique refroidie par air, assisté par un moteur électrique et alimenté par des batteries au plomb. Le moteur électrique était utilisé dans le cas

où la puissance de traction dépassait la puissance du moteur thermique. Lors d'un stationnement ou d'un roulage au-dessous de la capacité du moteur thermique, la batterie était chargée par le moteur thermique. [EHS 05]

Le premier VH série a été conçu pour augmenter l'autonomie d'un VE. Deux moteurs électriques entraînant séparément les deux roues arrière, la batterie étant rechargée par un moteur thermique de 3/4 chevaux couplé à un générateur de 1,1kW [EHS 05], ces deux types de véhicules ont été commercialisés jusqu'en 1914 avant de disparaître complètement, à cause de l'amélioration des moteurs à combustion interne.

Même si quelques études et prototypes de VH ont vu le jour avant l'intérêt des constructeurs est réapparu dans les années 90, une fois convaincu que le VE ne pouvait pas, dans l'état de la technologie actuelle, remplacer les véhicules thermiques. Le plus gros effort de développement et de commercialisation a été fait par les constructeurs japonais. Ces efforts ont été concrétisés par des VH commercialisés apportant de réels gains en consommation. Le VH le plus connu est la Prius de Toyota commercialisée à partir de 1997 au Japon et suivie par la Prius 2 sortie en 2004. Honda avec son Insight et sa Civic Hybride est un autre pionnier dans le domaine. En effet Honda a été le premier constructeur automobile à commercialiser un VH en dehors du Japon et notamment en Amérique du Nord avec Insight en 1999. En 2002 il a été suivi par la Honda Civic Hybride, le véhicule hybride véritablement commercialisé [Honda], Aujourd'hui de plus en plus de VH apparaissent, comme la Ford Escape Hybride, la Lexus RX400h, GS45h et LS600hL ou le Toyota Highlander, etc. [MES 07].

I.4.2 Principales architectures de véhicules hybrides

On distingue trois grandes familles d'architecture : série, parallèle et combinée. Une manière de différencier les deux premières est de considérer la nature du point de jonction entre les différentes chaînes de traction, appelé 'nœud'. Dans l'architecture 'Série', le nœud est électrique, dans l'architecture parallèle, il est mécanique. [DEL 02]

I.4.2.1 Architecture série

Dans l'architecture série, figure (I.13), la propulsion est intégralement assurée par un moteur électrique. Ce dernier peut être alimenté par les batteries et/ou par le groupe électrogène.

Ce type d'architecture est souvent utilisé dans les bus hybrides. Une utilisation « naturelle » de ce type d'architecture consiste à augmenter l'autonomie d'un véhicule électrique par l'ajout d'un groupe électrogène. Cette architecture nécessite un moteur électrique relativement puissant car il assure à lui seul l'intégralité de la propulsion. Le taux d'hybridation est donc généralement élevé. [DEL 02]

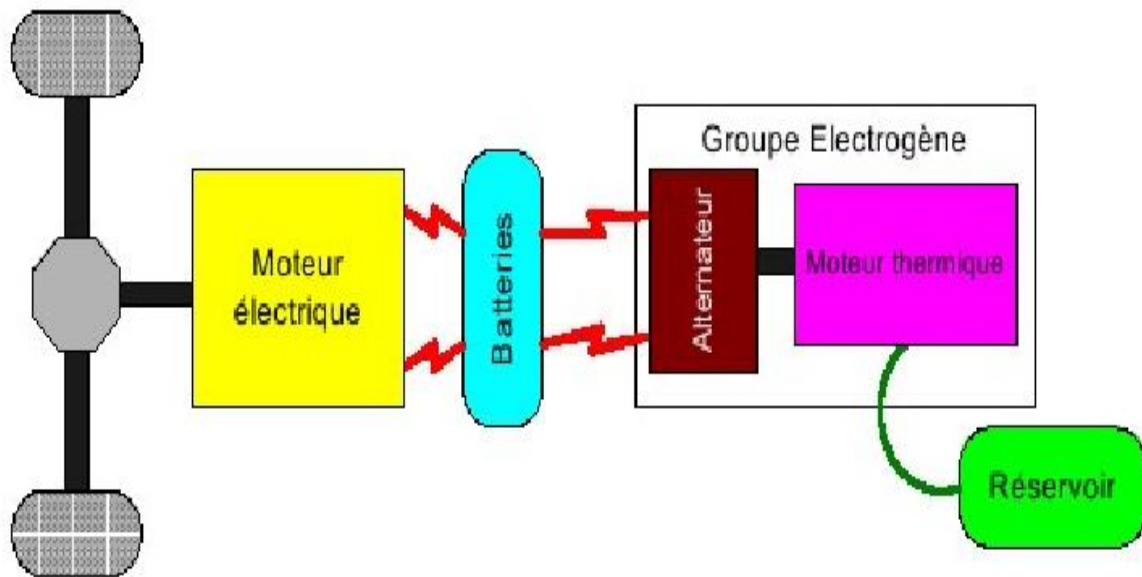


Figure I.13 Architecture Hybride série

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite. [DEL 02]

I.4.2.2. Architecture parallèle

Pour l'architecture parallèle, le point de jonction entre les différentes chaînes de traction est cette fois mécanique. Lorsque les différents moteurs sont solidaires du même arbre, figure (I.14), on parle d'architecture hybride parallèle simple arbre.

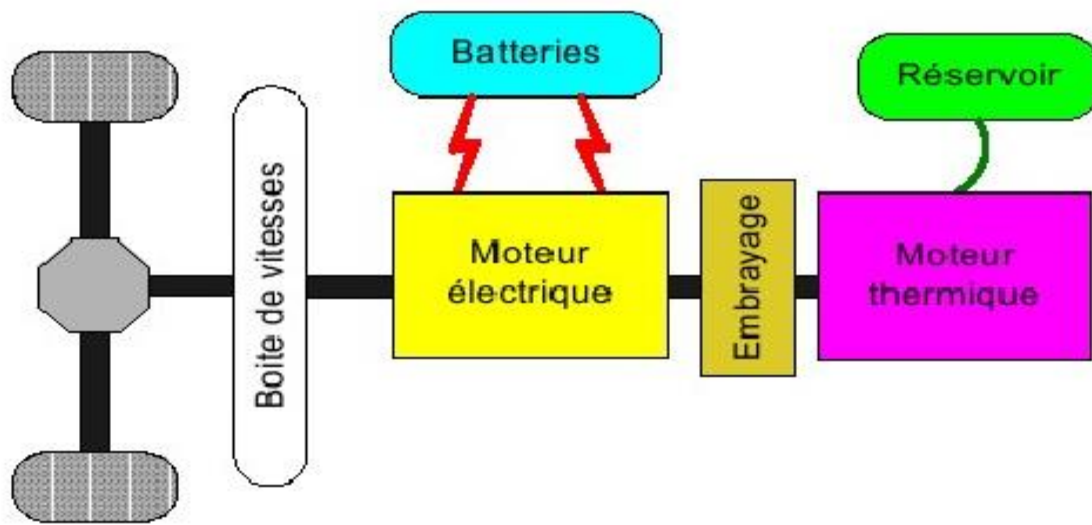


Figure I.14 Architecture hybride parallèle simple arbre

Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternodémarrreur et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternodémarrreur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative. [DEL 02]

Lorsque les deux moteurs ont des puissances similaires, le moteur électrique est placé entre l'embrayage et la boîte de vitesses. Les régimes des deux moteurs sont linéairement dépendants du régime des roues. Il s'agit alors de répartir le couple aux roues nécessaire à la propulsion du véhicule entre les deux moteurs, en tenant compte des rapports de boîte. L'un des inconvénients essentiel à cette architecture est la perte de couple aux roues apparaissant lors des changements de rapports, qui dégrade le confort de conduite. [DEL 02]

Pour remédier à cet inconvénient, la boîte de vitesses peut être remplacée par un variateur continu de vitesse. Le moteur électrique peut également être connecté sur un arbre différent, on parle dans ce cas d'architecture double arbre, figure (I.15). On s'aperçoit que le dimensionnement des composants et la répartition de puissance sur les deux chaînes de traction sont moins contraints. [DEL 02]

Dans l'architecture double arbre, les deux moteurs ont des régimes indépendants et à tout moment la traction du véhicule est assurée par un des deux moteurs. [DEL 02]

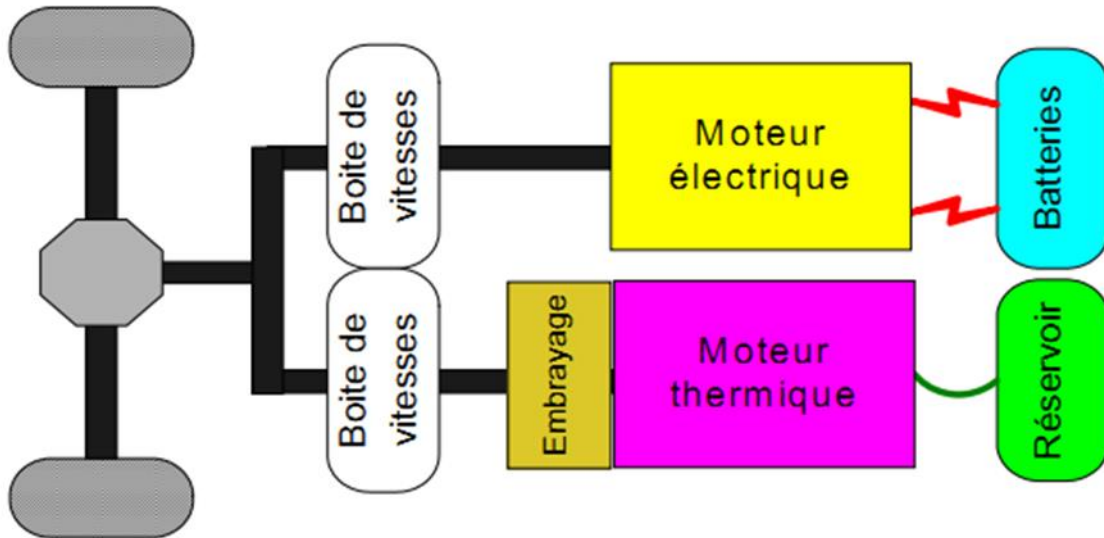


Figure I.15 Architecture double arbre

Lorsque le moteur électrique est relié directement aux roues, pour assurer une réduction de consommation de carburant et des émissions de polluants significative, sa puissance doit être relativement importante. L'utilisation d'un moteur électrique de moindre puissance reste possible si une deuxième boîte de vitesses est ajoutée, comme l'indique la figure (I.15) Cependant, pour des raisons de coût et de complexité mécanique cette dernière solution semble difficilement envisageable. Dans les architectures simple et double arbre, le couple aux roues résulte de l'addition des couples fournis par les moteurs (aux rapports de réduction près). L'architecture combinée met en œuvre un train planétaire afin de réaliser une addition de vitesse, voir la figure (I.16). [DEL 02]

Si seulement un moteur thermique et un moteur électrique sont utilisés, le seul degré de liberté est le choix des régimes de chacun des moteurs. Par contre, si un deuxième moteur électrique est ajouté, figure (I.16), alors le couple et le régime du moteur thermique peuvent être choisis presque indépendamment des conditions de conduite (vitesse du véhicule, couple demandé aux roues par le conducteur). Cette liste d'architectures est loin d'être exhaustive, mais représente les configurations les plus utilisées. D'autres ont été proposées mais elles sont généralement plus complexes (plusieurs embrayages, 3 moteurs électriques, etc.). [DEL 02]

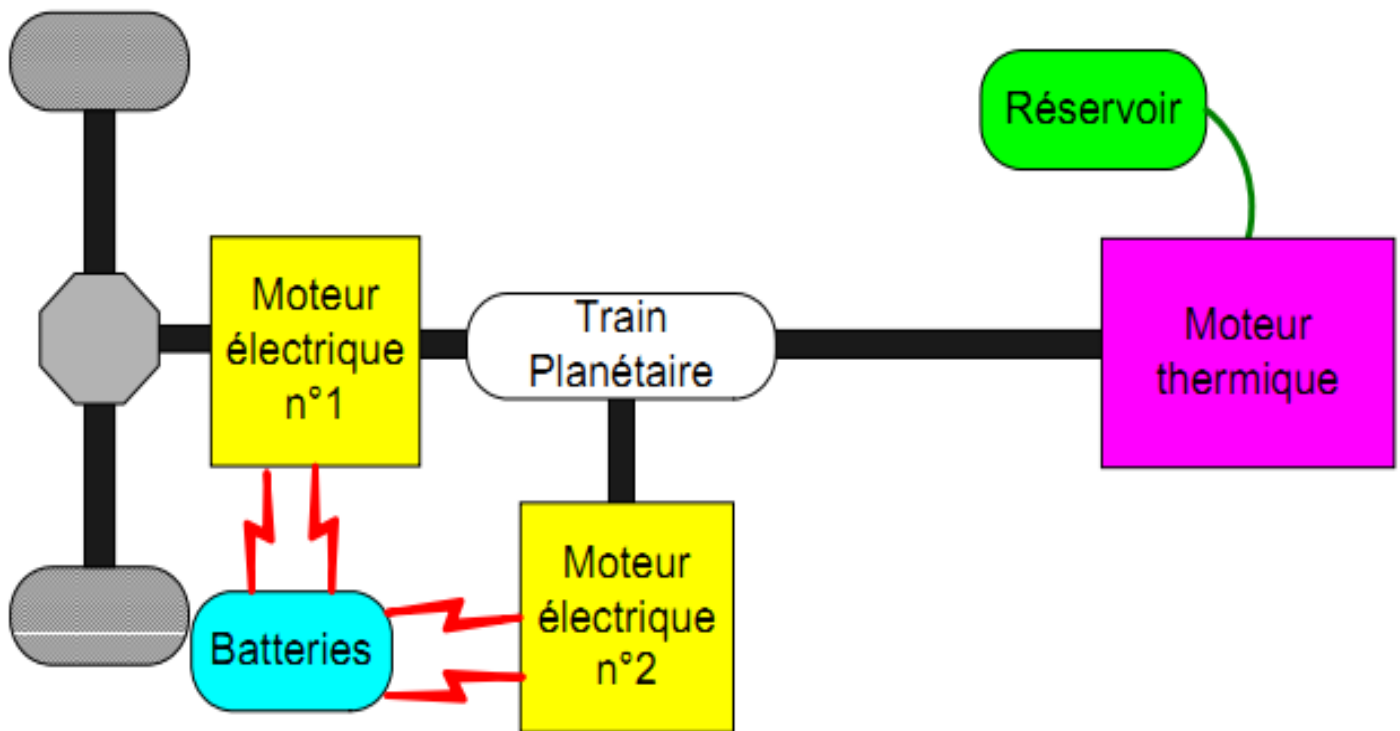


Figure I.16 Architecture hybride combinée

I.5 Différentes machines qui peuvent intervenir dans la traction des VE

I.5.1 Machines à courant continu

La classe des moteurs à courant continu n'intègre que les moteurs à collecteurs alimentés en courant continu. Elle exclut les moteurs alternatifs à excitation série, dits universels, qui utilisent la même structure à collecteur, ainsi que les structures « brushless », où le collecteur devient électronique. Le moteur à collecteur fut la première machine électrique inventée. L'histoire retient le nom de Zénobe Gramme pour sa première réalisation industrielle en 1871. Wernher von Siemens proposa peu après la version à induit cylindrique de cette machine. Ces deux machines, conçues comme une application de la théorie des champs, ne fonctionnaient alors qu'en génératrice. Elles engendrèrent bien des sourires face à la puissance de la vapeur. Mais leur application rapide comme moteur réversible leur valut un franc succès et, dès 1880, des trains de mines furent électrisés et un premier ascenseur électrique fut construit. Au début du siècle, la traction électrique acquit ses lettres de noblesse, avec plusieurs vitesses record de 205 km/h. [BER 56]

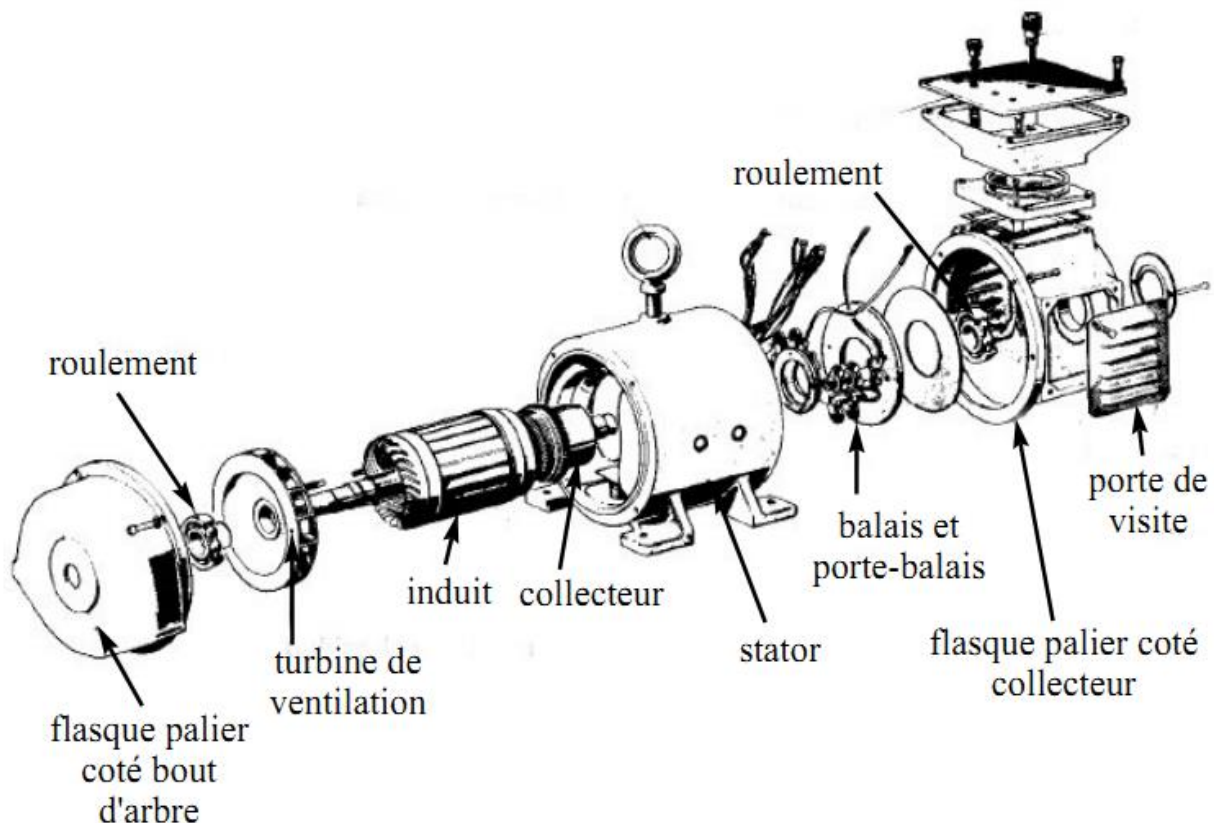


Figure I.17 Schéma explicatif de la machine à courant continu

Le moteur à courant continu a l'avantage d'être facile à appréhender, car les deux bobines qui le composent sont non seulement fixes dans l'espace grâce à l'action du collecteur, mais aussi faiblement couplées. Il offre donc une introduction facile au fonctionnement de ses homologues, en donnant des repères clairs, auxquels le néophyte pourra toujours se raccrocher. [BER 55]

I.5.2 Machines à courant alternatif

Les machines à courant alternatif sont très utilisées de nos jours du fait de la souplesse de leurs contrôle qui est devenu possible grâce aux progrès réalisés dans le domaine des convertisseurs d'électronique de puissance et les commandes qui leurs sont associés, en effet on trouve les machines à courant alternatif pratiquement dans tous les domaines d'entraînement à vitesse variable et remplace plus en plus les machines à courant continu qui sont fragiles à cause de la présence du système balais/collecteur et qui limite leurs domaines d'utilisation [Ket 10].

I.3.2.1 Machines synchrones

La machine synchrone est constituée d'un stator comportant des enroulements induit et d'un rotor porte un inducteur (bobine ou aimants permanents). L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée au bout d'arbre (excitatrice). (Absence du système balais-collecteurs). La tension statoriques est proportionnelle au courant d'excitation ainsi que tension de sortie dépendent de à la vitesse de rotation.

Pour le fonctionnement de la machine synchrone en alternateur la plupart des applications de grande puissance concernent les centrales de production de l'énergie électrique à savoir : les centrales thermiques à gaz ou à vapeur, les centrales nucléaires et les centrales hydrauliques. Et pour les applications de petites et moyennes puissances on trouve les générateurs éoliens et les alternateurs d'électrification des véhicules, des bateaux et des avions [ELB 09].

I.5.2.2 Machines asynchrones

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : rotor bobiné, rotor à cage d'écureuil [BAC 02]

I. 5.2.2.a Machines asynchrones à cage d'écureuil

La machine est constituée d'un stator comportant un bobinage et d'un rotor qui porte la cage cette dernière remplace le bobinage rotorique. [TAR 08]

I.5.2.2.b Machines asynchrones à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné est constituée de deux composants principaux le rotor et le stator, ils sont faits de tôles d'épaisseur très étroite d'acier au silicium pour diminuer les pertes par hystérésis et courant de Foucault. En générale ces tôles sont isolées par oxydation ou par vernis isolant pour les très grosses machines, elles comportent des

encoches dans les quelles sont logés des enroulements de fil conducteur, qui peuvent avoir un nombre de phases différent mais le même nombre de paires de pôles. [BAB 10]

- **Stator**

C'est la partie fixe de la machine, il porte à l'intérieur des encoches un bobinage de fils conducteurs triphasés formant p paires de pôles, et il est alimenté par une source de tension ou de courant alternative. [BAB 10]

- **Rotor**

C'est la partie rotative de la machine, il est constitué de tôles rainurées à l'extérieur, concentriques au stator et séparées par un entrefer étroit. Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal, et comportent des fils conducteurs formant ainsi un bobinage polyphasé de même nombre de paires de pôles que le stator. En générale c'est un bobinage triphasé connecté en étoile d'une part et de l'autre part il est relié à trois bagues fixées sur l'arbre sur les quelles frottent des balais fixés sur le stator d'où on branche un convertisseur d'électronique de puissance pour le contrôle de la machine. [BAB 10]

I.5.2.2.b.1 Structure de la machine à double alimentation (MADA)

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures.

Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles ferromagnétique, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La figure (I.18) représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation. [ELB 09]

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général [ELB 09].

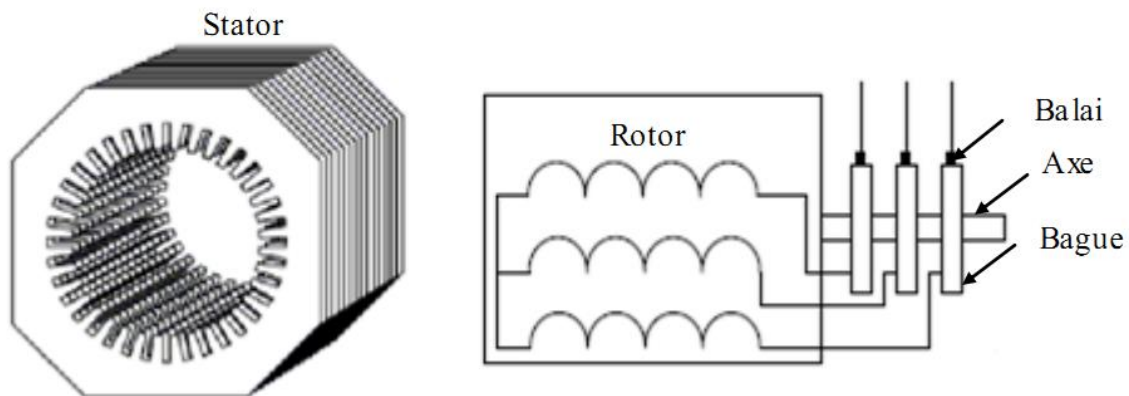


Figure I.18 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.5.2.2.b.2 Différents modes de fonctionnement de la MADA

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement g comme suit :

- **Stationnaire** ($g=1$) le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence $[f_s]$ le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence $[f_r]$ égale à celle du stator. Dans ce cas-là la MADA se comporte comme un transformateur.
- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence $[f_r]$ décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement et la valeur minimale à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ($g=0$) : dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence $[f_r]$ du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hypersynchrone** ($g < 0$) : par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence $[f_r]$ devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite du rotor. [ELB 09]

Néanmoins cette machine a quelques inconvénients à savoir :

- Elle est volumineuse qu'une machine asynchrone à cage;
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudié et très connue ;
- Usure du système (bagues/balais) et jaillissement d'étincelles lors du frottement des balais sur les bagues.

Aujourd'hui, presque toutes les études faites sur les machines électriques doublement alimentés pour leur fonctionnement, surtout, en ce qui concerne les énergies renouvelables, ces derniers optent pour une structure de cette machine ou son stator est directement reliaer au réseau, et l'alimentation de son rotor est faite à travers un convertisseur d'électronique de puissance.

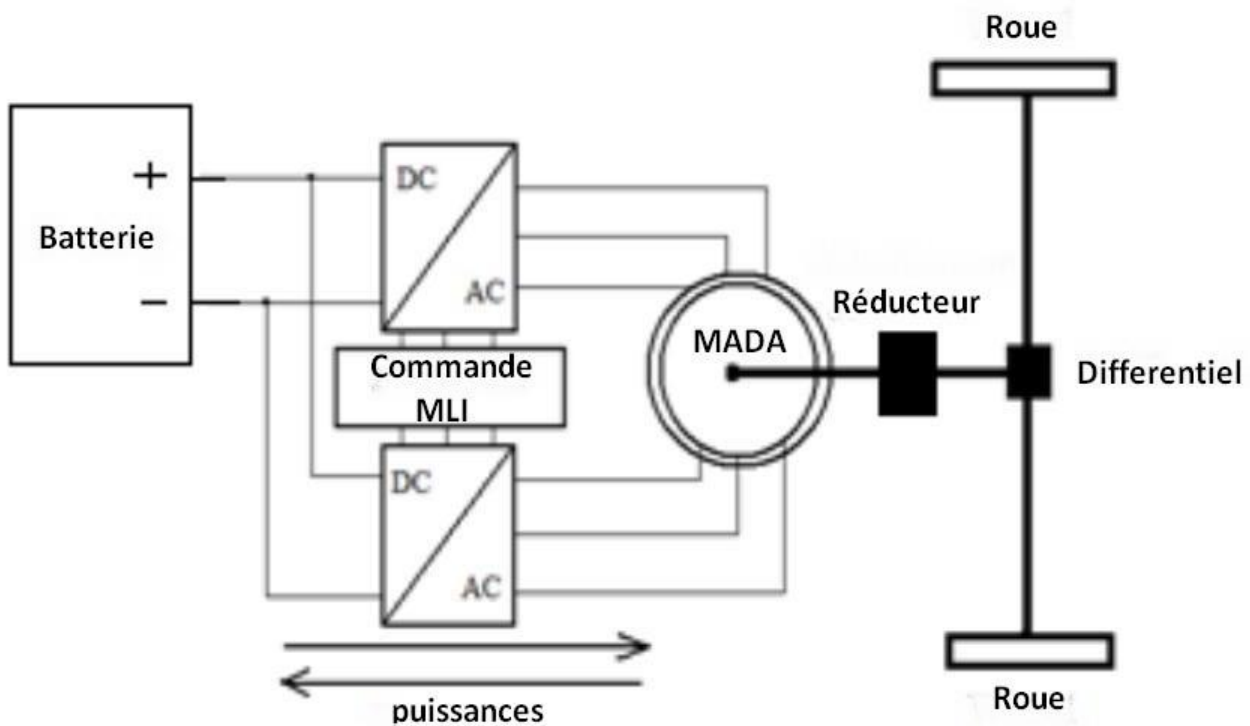


Figure I.19 Diagramme représentatif de l'entraînement de VE à l'aide de la MADA

Dans notre cas, on va s'intéresser à la structure, ou l'alimentation du stator et du rotor est faite à travers deux convertisseurs d'électronique de puissance, qui sont alimentés à travers une batterie de stockage d'énergie électrique.

I.6 Batteries

La batterie est l'un des organes important du véhicule électrique actuellement en forte progression, afin d'augmenter sa puissance et son autonomie. De nombreux laboratoires et chercheurs travaillent à la rendre plus légère, plus puissante et en plus à un bon marché, comme les petites batteries de nos téléphones et ordinateurs portables.

Des industriels du monde entier sont actifs sur ces sujets. On peut citer pour exemple en France, Saft et Batscap, Zebra en Suisse, Johnson Controls aux USA et sa filiale Varta en Allemagne.

L'énergie électrique se mesure en Wattheures. Pour illustrer cet ordre de grandeur, un véhicule particulier qui roule 1 km consomme environ 150 Wh prise sur sa batterie. On compte donc 100 Wh/tonne. Actuellement, pour fournir une autonomie de 200 km à une voiture légère, il lui faudrait embarquer presque une tonne de batterie au plomb. Cette technologie est couramment employée pour les batteries de démarrage.

Le plomb est trop lourd, il faut condenser l'énergie, voilà l'enjeu. Les batteries se comparent donc, entre autres, par leur « densité énergétique » : la quantité d'énergie que chacune délivre pour un même poids (Wh/kg). [CLE 05]

Les batteries au plomb, qui sont toujours utilisées du début 2005 dans les VE, 4 roues et 2 roues, sont progressivement complétées par de nouvelles technologies dont voici les principales caractéristiques

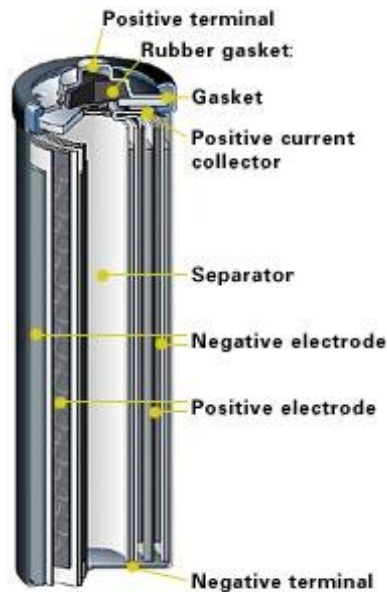
I.6.1 Batterie au Plomb

Le plomb équipe la quasi-totalité des petits véhicules électriques comme les chariots élévateurs, véhicules de golf, fauteuils roulants électriques. Mais ce couple électrochimique n'est pas assez efficace pour des véhicules routiers : lourd, faible densité d'énergie. Leur coût, nettement inférieur à celui des autres technologies reste le principal facteur d'intérêt pour les constructeurs automobiles. [CLE 05]

I.6.2 Batteries aux Nickel-Cadmium

Celles-ci ont un fonctionnement tout à fait similaire aux batteries au plomb, si ce n'est que le couple Pb/PbO₂ est cette fois remplacé par le couple Ni/Cd.

Les systèmes à base de nickel présentent les avantages sur les systèmes au plomb d'avoir une grande puissance, longue durée de vie, énergie volumétrique et densité de puissance relativement élevées, elle peuvent néanmoins présenter, selon le mode d'utilisation, un "effet mémoire" réduisant la capacité utilisable, L'effet est cependant réversible.[CLE 05]



FigureI.20 Batterie aux Nickel-Cadmium

I.6.3 Batteries aux Nickel Métal Hydrures

Les batteries Ni/MH sont exclusivement étanches. En raison de leurs caractéristiques élevées en puissance, ces batteries équipent surtout des véhicules hybrides (Honda Insight et Civic. TOYOTA PRIUS 1 et 2). Le constructeur PANASONIC a successivement développé pour TOYOTA deux générations d'accumulateurs Ni/ MH de puissance. La seconde génération d'éléments prismatiques qui équipe le véhicule hybride PRIUS 2 fait référence en termes de performances et de fiabilité. [CLE 05]

I.6.4 batteries au Lithium-ion

Ce couple électrochimique semble à ce jour le plus performant. Contrairement aux couples précédents, les batteries au lithium utilisent un électrolyte non aqueux, ce qui constitue un avantage en éliminant la réaction parasite de décomposition de l'eau. Ce type de batterie devrait équiper les véhicules de la société SVE (Cleanova3). La filière lithium est déjà très développée pour les batteries de petite taille (téléphones, ordinateurs...). L'Asie du Sud-Est en produit en grandes quantités permettant ainsi une baisse des coûts. [CLE 05]



Figure I.21 Batterie Li-Ion

I.6.5 Batteries lithium-polymères

Technologie en phase de lancement sur des prototypes de V.E. Théoriquement, cette technologie pourrait permettre de dépasser les performances des batteries lithium-Ion actuelles. Sa constitution interne, faite d'électrodes minces superposées autour d'un électrolyte solide en polymère extrudé permet d'envisager un coût de production avantageux. En France, la société BATSCAP développe cette technologie. [CLE 05]

I.6.6 Batteries sodium-chlorure de nickel

Cette batterie, parfois appelée "batterie chaude", présente la caractéristique de ne pouvoir fonctionner qu'à des températures élevées, de l'ordre de 300°C. Cela présente des avantages et des inconvénients. La haute température implique que l'on dispose en permanence d'une forte source de chaleur pour chauffer l'habitacle du véhicule (environ 10 Wh/kg disponibles sous forme thermique) mais en plus que l'on doit maintenir cette température même à l'arrêt. Une partie de l'énergie de la batterie est donc dépensée pour conserver sa température, alors qu'en elle-même, elle ne s'autodécharge pas. [DEL 98]

I.6.7 Batteries Zebra

Cette technologie a été spécifiquement mise au point pour les applications véhicules électriques, transport lourd et transport public. La température interne de fonctionnement est comprise entre 270°C et 350°C. Les éléments sont enfermés dans un caisson isolé dont les parois externes ont une température de l'ordre de 30°C. Les 5 premiers bus électriques fonctionnant en France avec des batteries Zebra ont été livrés à Lyon en novembre 2004. [CLE 05]

I.6.8 Tableau comparatif des différentes technologies

Technologies	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni MH	Li-ION	Li-ion Polym	Na- NiCl	Zébra
Densité énergétique (Wh/Kg)	30-50	45-80	60-120	110-160	100-130	120	130
Nombre de cycle (charge et décharge)	400 à 1200	2000	1500	500 à 1000	200 à 500	800	600
Temps de charge	6 à 12h	1h à 2h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h	n.c.
Températures de fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C	n.c.	n.c.
Tension d'un élément en (V)	2,25	1,2	1.2	3.6	3.7	2.6	2.2
Puissance en pointe (W/Kg)	700	n.c.	900	1500	250	200	180

n.c : Non connue

Sur ce tableau on retrouve toutes les informations qui concernent les batteries utilisé sur les véhicules électrique et hybride. [SCH 07]

I.7 Conclusion

A l'issu de ce travail, nous avons fait une présentation générale des différentes types architectures de VE, des divers constituants qui font partie de la chaîne de traction d'un VE, de leurs modes de fonctionnement et les tâches à accomplir par chaque sous-ensemble. Cela nous a guidés dans la définition de notre véhicule en termes d'architectures, moteurs et sources d'énergies. Notre système étudié est un véhicule tout électrique, il est propulsé par un moteur du type asynchrone à double alimentation (MADA), et alimentés par des batteries d'accumulateurs à travers des convertisseurs d'électronique de puissance du côté statorique et du côté rotorique, dans le chapitre qui suivra on fera introduire toute les définitions et modélisation de chaque élément de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA CHAINE DE TRACTION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE

Introduction

Dans ce chapitre on va modéliser une chaîne de traction d'un véhicule électrique, pour cela on devra tout d'abord modéliser notre machine asynchrone à double alimentation, puis on passera à son alimentation, car dans notre cas la machine est alimentée par une tension continue qui est transmise d'une batterie vers deux onduleurs de tension, cette tension sera directement administrée à notre machine, que ce soit du côté statorique et côté rotorique, ce qui nous ramène à la dernière étape qui est de modéliser notre véhicule, du côté de son poids et de forces appliquées pour cela on commence par la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.1 Hypothèses

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices suivantes : [BEN. 06] [Den. 09] [IDJ. 07]

- La machine a une parfaite symétrie de construction ;
- L'entrefer entre le rotor et le stator constant ;
- L'effet d'encoches ainsi l'effet de peau sont négligeables ;
- Une répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices le long de l'entrefer ;
- Circuit magnétique non saturé ;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligées ;
- Les grandeurs homopolaires nulles ;
- La résistance des enroulements ne varie pas en fonction de la température.

II.2 Modélisation de la MADA dans le repère (abc)

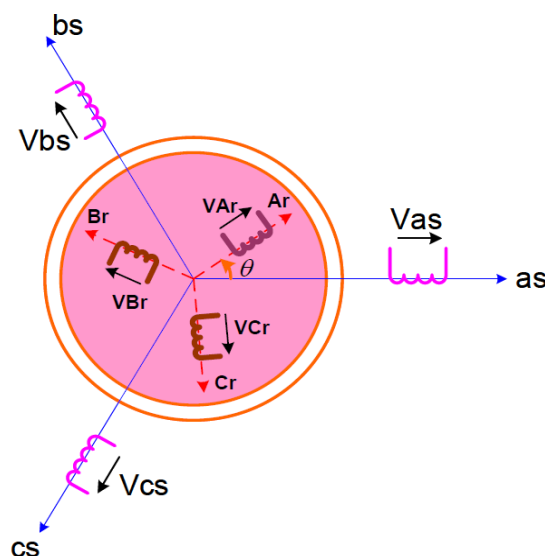


Figure II.1 Représentation schématique de la MADA

II.2.1 Equations électriques

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire :

$$V = R \cdot I + \frac{d\varphi}{dt}$$

On peut alors résumer cette écriture par l'écriture matricielle condensée pour les trois phases:

$$\begin{cases} [V_{s abc}] = [R_{s abc}] \cdot [i_{s abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s abc}] \\ [V_{r ABC}] = [R_{r ABC}] \cdot [i_{r ABC}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{r ABC}] \end{cases} \quad \text{II. 1}$$

- **Equation électrique du stator:**

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{II. 2}$$

- **Equation électrique du rotor:**

$$\begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{As} \\ \varphi_{Bs} \\ \varphi_{Cs} \end{bmatrix} \quad \text{II. 3}$$

Avec :

$[R_s], [R_r]$: Matrices des résistances statoriques rotoriques;

$[V_{s abc}], [V_{r ABC}]$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques; et rotoriques;

$[\varphi_{s abc}], [\varphi_{r ABC}]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques;

$[i_{s abc}], [i_{r ABC}]$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques; respectivement.

II.2.2 Equation magnétiques

Les flux sont donnés par une équation matricielle :

$$\begin{cases} [\varphi_{sabc}] = [L_{ss}] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rABC}] \\ [\varphi_{rABC}] = [L_{rr}] \cdot [i_{rABC}] + [M_{rs}] \cdot [i_{sabc}] \end{cases} \quad \text{II. 4}$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Ou :

l_s, l_r : Inductances de fuite statoriques et rotoriques respectivement ;

M_s, M_r : Inductances mutuelles

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

II.2.3 Equation mécanique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [i_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad \text{II.05}$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit comme suit:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad \text{II.06}$$

II.3 Modélisation la MADA dans le repère Park (dq)

II.3.1 Intérêt de repère dq

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [BAR 82].

La transformation de PARK est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q) continu (Figure II.2) [BAB 10].

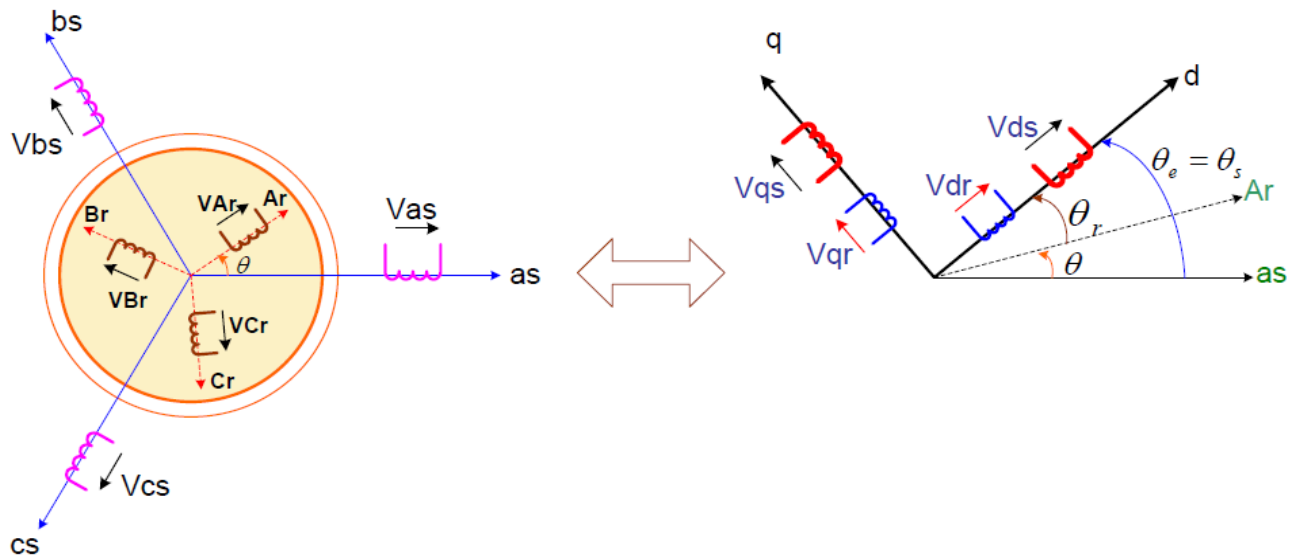


Figure II.2 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

II.3.2 Matrice de Park

La matrice de transformation de Park modifié $[A]$ est donnée comme suite :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de Park $[A]^{-1}$ est :

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

II.4 Application de transformation de Park au modèle de la MADA

II.4.1 Application aux équations électriques

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

$$[A]^{-1}[V_{dq0}] = [R][A]^{-1}[i_{dq0}] + \frac{d}{dt} [A]^{-1} [\varphi_{dq0}] \quad \text{II.7}$$

$$[V_{dq0}] = [R][i_{dq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq0}] + [A] \left[\frac{d}{dt} [A]^{-1} [\varphi_{dq0}] \right] \quad \text{II.8}$$

Tel que:

$$[A][d/dt][A]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} d\theta/dt \quad \text{II.9}$$

On remplace la relation(II.9) dans (II.8) on obtient le modèle biphasé suivant:

$$\begin{cases} V_d = R_{id} + \frac{d}{dt} \varphi_d - \frac{d\theta}{dt} \varphi_q \\ V_q = R_{iq} + \frac{d}{dt} \varphi_q + \frac{d\theta}{dt} \varphi_d \\ V_0 = R_{i0} + \frac{d}{dt} \varphi_0 \end{cases} \quad \text{II.10}$$

Pour un système équilibré les composantes homopolaires sont nulles, de ce fait on conclut les équations électriques dans le repère dq :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} \end{cases} \quad \text{II.11}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Les expressions des puissances active et réactive sont donnée par :

$$\begin{cases} P_s = (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad \text{II.13}$$

$$\begin{cases} P_r = (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = (V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad \text{II.14}$$

II.4.2 Application aux équations magnétiques

On applique la transformation de Park au système d'équation (II-6) on obtient :

$$\begin{cases} [\varphi_{sdq0}] = [A][l_s][A]^{-1} [i_{sdq0}] + [A][M_{sr}][A]^{-1} [i_{rdq0}] \\ [\varphi_{rdq0}] = [A][l_r][A]^{-1} [i_{rdq0}] + [A][M_{sr}][A]^{-1} [i_{sdq0}] \end{cases} \quad \text{II.15}$$

La mise sous forme matricielle de système (II-15) nous donne :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 & \frac{3}{2}M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 & 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & L_s + 2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M & 0 & 0 & L_r - M & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M & 0 & 0 & L_r - M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_r + 2M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sd} \\ i_{sd} \\ i_{sd} \\ i_{sd} \\ i_{sd} \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

Tel que :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor ;

$L_{Os} = l_s + 2M_s$: Inductance homopolaire statorique ;

$L_{Or} = l_r + 2M_r$: Inductance homopolaire rotorique.

Si on supprime les termes homopolaires dans l'équation (II.15), on obtient:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.17}$$

L'équation (II.17) nous donne un système d'équation des flux en fonction des courants:

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Nous avons exprimé les équations électriques et magnétiques de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la Co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance.

Il en résulte plusieurs expressions tout égales : [BAB 10]

$$Cem = p (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad \text{II.19}$$

$$Cem = p (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad \text{II.20}$$

$$Cem = p M (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad \text{II.21}$$

$$Cem = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad \text{II.22}$$

II.4.3 Application à l'équation mécanique

Nous remplaçant l'expression de l'équation (II.22) dans l'expression de l'équation mécanique (II.6) nous obtenons l'équation suivante :

$$P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) - C_r - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II.23}$$

II.5 Choix du référentiel

II.5.1 Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

II.5.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega$ Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

II.5.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r$$

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad \text{II.24}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.25}$$

Les systèmes d'équations (II-24) et (II.25) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (dq) lié au champ tournant.

On remplace le système d'équations (II-8) dans les systèmes (II-24) et (II.25) on obtient le système d'équations(II.26) suivant :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + M \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s (L_s i_{sq} + M i_{rq}) \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + M \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_s (L_s i_{sd} + M i_{rd}) \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + M \frac{d}{dt} i_{sd} - (\omega_s - \omega_r) (L_r i_{rq} + M i_{sq}) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + M \frac{d}{dt} i_{sq} + (\omega_s - \omega_r) (L_r i_{rd} + M i_{sd}) \end{cases} \quad \text{II.26}$$

II.6 Modélisation de l'alimentation de la MADA

II.6.1 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continue en une alimentation de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif.

L'onduleur triphasé possédant six cellules de commutation (IGBT) et six diodes de roue libre. Chaque bras de l'onduleur est composé de deux cellules de commutation constituées chacune de l'interrupteur avec sa diode, la sortie correspondant au point milieu du bras. Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires pour éviter le court-circuit de l'alimentation continue de l'onduleur (La figure II.3).

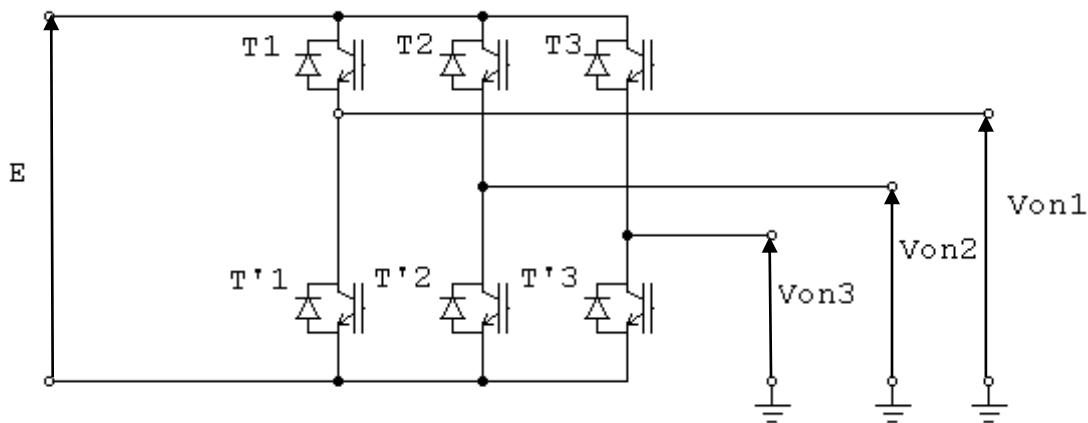


Figure II.3 Représentation schématique d'un onduleur MLI

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$F'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction S_i avec ($i = a, b, c$) tel que :

$$S_i = (F_i - F'_i) = \begin{cases} +1 & \text{si } F_i = 1 (F'_i = 0) \\ -1 & \text{si } F_i = 0 (F'_i = 1) \end{cases}$$

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

Avec :

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondants à l'état de l'interrupteur.

II.6.2 Modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale MLI

La technique MLI sinusoïdale est une technique très utilisée en industrie et est largement passée en revues dans la littérature.

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse (figure II.4), le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [ACH 07].

On définit :

L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_0} \quad \text{II.28}$$

L'indice d'amplitude r égal au rapport de l'amplitude des tensions de références sur l'amplitude de la porteuse.

$$r = \frac{V_p}{V_0} \quad \text{II.29}$$

Le choix des valeurs de m et r procède d'un compromis entre la neutralisation des harmoniques et le rendement de l'onduleur [SEG 04].

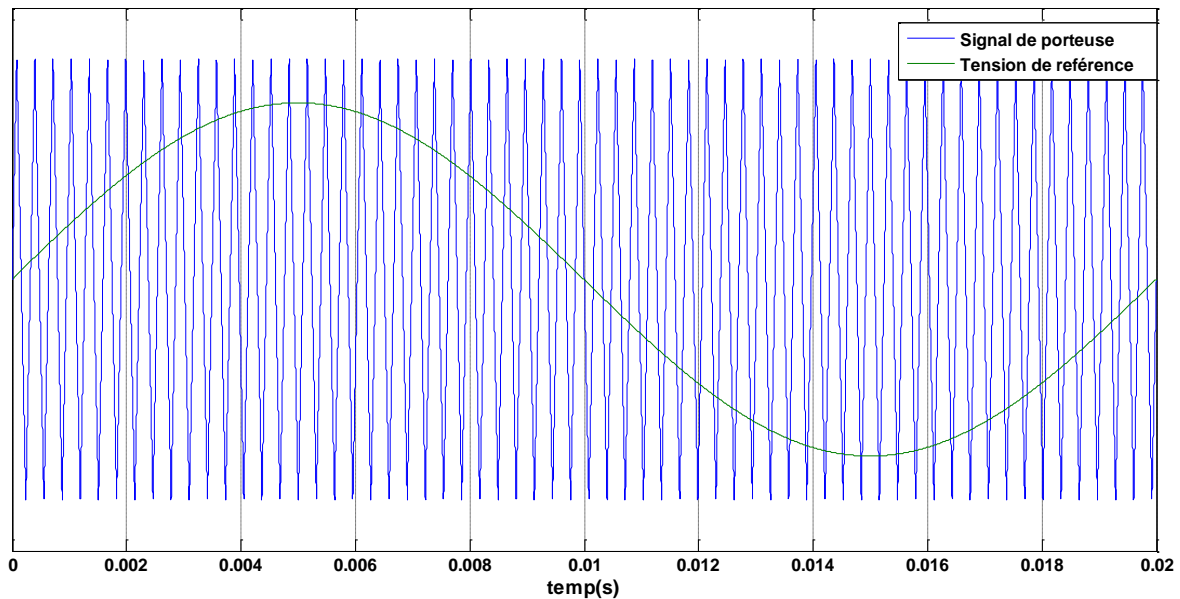


Figure II.4 Principe de la MLI

II.6.3 Modèle électrique de la batterie

Le modèle électrochimique est rarement utilisé dans le domaine de la modélisation des batteries car ce dernier nécessite une grande puissance de calcul et l'incertitude sur les résultats justifie le non utilisation de cette approche [BEL 12].

II.6.3.1 Modèle idéal

Ce modèle est dit idéal, car il est le plus simple à étudier et ne comporte qu'une résistance interne nommée R_i comme représenté sur la figure II.6. [BEL 12].

$$V_t = V_b - R_i I \quad \text{II.30}$$

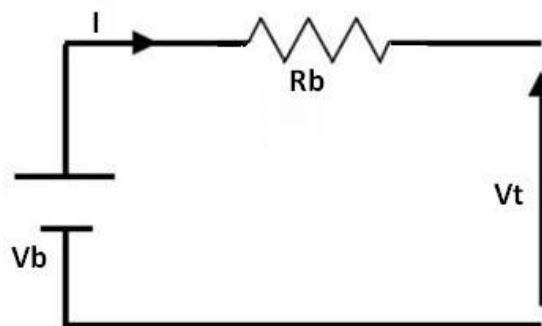


Figure II.5 Batterie idéal

II.7 Modélisation du véhicule

II.7.1 Modélisation du couple résistant

Afin de modéliser le comportement dynamique d'un véhicule, Il faut connaître toutes les forces qui lui sont appliquées voir la figure II.6

Il convient de noter qu'ici l'effet des forces est longitudinale car le mouvement dans la direction latitudinale est non considérable [SIA 08].

On applique la loi de Newton, qui divisent la somme des forces en deux :

F_t : Force qui suit le mouvement (Force appliquée aux roues)

F_r : Force équivalente de résistance (Force appliquée sur la direction opposée du mouvement du véhicule)

$$\frac{dV_v}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{M_v} \quad \text{II.31}$$

V_v : Vitesse linéaire du véhicule

M_v : La masse globale du véhicule

Les forces de résistance appliquées au véhicule sont divisées en trois types. La première s'appelle résistance de roulement qui est due à l'hystérésis dans le matériel du pneu.

$$F_R = P \cdot C_r \quad \text{II.32}$$

$$C_r = 0,01 \left(1 + \frac{V_v}{100} \right) \quad \text{II.33}$$

La force de roulement apparaît sur tout objet ayant une traction. Dans le cas du véhicule, elle est due à la déformation de la roue ou du pneu et à l'état de la surface de la route [Mes 07]. C'est une force qui s'oppose toujours au déplacement. Dans un pneu en repos, la force normale est la route équilibrée plus le poids du véhicule au niveau du contact roue/sol. Quand le véhicule roule, les deux forces ne sont plus alignées à cause de la déformation du pneu. La Figure II.6 montre le décalage créé par la force de roulement qui produit un couple résistant sur la roue.

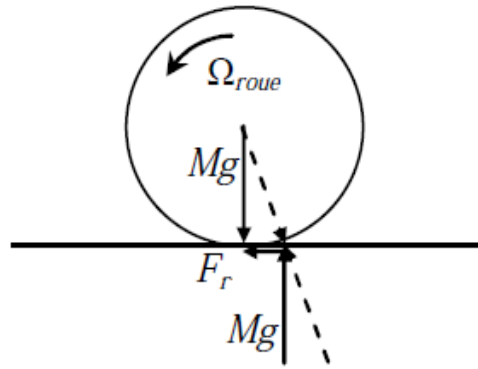


Figure II.6 Force de roulement sur la roue

Les facteurs qui affectent la résistance au roulement sont :

- Le type des pneumatiques,
- La pression des pneumatiques
- La matière des pneumatiques
- La température des pneumatiques
- La vitesse du véhicule
- Le revêtement routier

Parmi ces facteurs, le type des pneumatiques et leur pression sont souvent les plus significatifs. Comme le C_r est proportionnel à la superficie de contact pneu/sol, un pneu plus petit minimise sa valeur, mais en même temps diminue l'adhérence de la roue.

Le coefficient C_r pour les pneus radiaux montés habituellement sur nos voitures, est d'environ 0,013. Ce coefficient augmente lorsque la pression diminue. Pour la traction électrique Michelin a développé des pneus dits "verts" d'une valeur de seulement 0,007, soit environ la moitié d'un pneu classique. [Mes 07]

$$F_{ard} = 0,5 \rho S_f C_x (V_v + V_w)^2 \quad \text{II.34}$$

La force de résistance aérodynamique F_{ard} est proportionnelle à la densité volumique de l'air ρ , à la section frontale du véhicule S_f (m²), au coefficient de pénétration dans l'air C_x (*drag coefficient* – C_d dans la littérature anglo-saxonne), à la vitesse du véhicule V_v (m/s) et à la vitesse du vent V_w (m/s) qui est positive dans le sens inverse de V_v et négative dans le sens de V_v . Environ 60% de la puissance nécessaire pour rouler sur l'autoroute est utilisée pour surmonter la résistance aérodynamique qui augmente très rapidement avec la vitesse. Par conséquent, un véhicule avec une aérodynamique sensiblement meilleure est sera plus économique en consommation [Mes 07]. La Figure II.6 représente la variation de la force aérodynamique en fonction de la variation du coefficient C_x entre 0,25 et 0,5 pour une plage de valeurs de

la vitesse de véhicule de 0 à 120 km/h. Ces courbes montrent que pour une vitesse de 120 km/h un C_x de 0,4 augmente la force de résistance aérodynamique de 33% par rapport à un C_x de 0,3. Les paramètres considérés pour tracer la Figure II.7 sont présentés dans le Tableau II.1

L'autre force de résistance F_g est appliquée quand le véhicule s'élève dans une pente comme elle est représentée sur la figure II-8.

Une force dont la direction est opposée au mouvement du véhicule [SIA 08]. C'est une force liée au profil de la route et qui est nécessaire à un véhicule de masse M_v , pour vaincre une pente, Pour caractériser le profil de la route sur un parcours donné, il faut cartographier la pente en fonction de la distance parcourue ou, α représente l'angle de la pente [Mes 07].

$$F_g = M_v g \sin(\alpha) \tag{II.35}$$

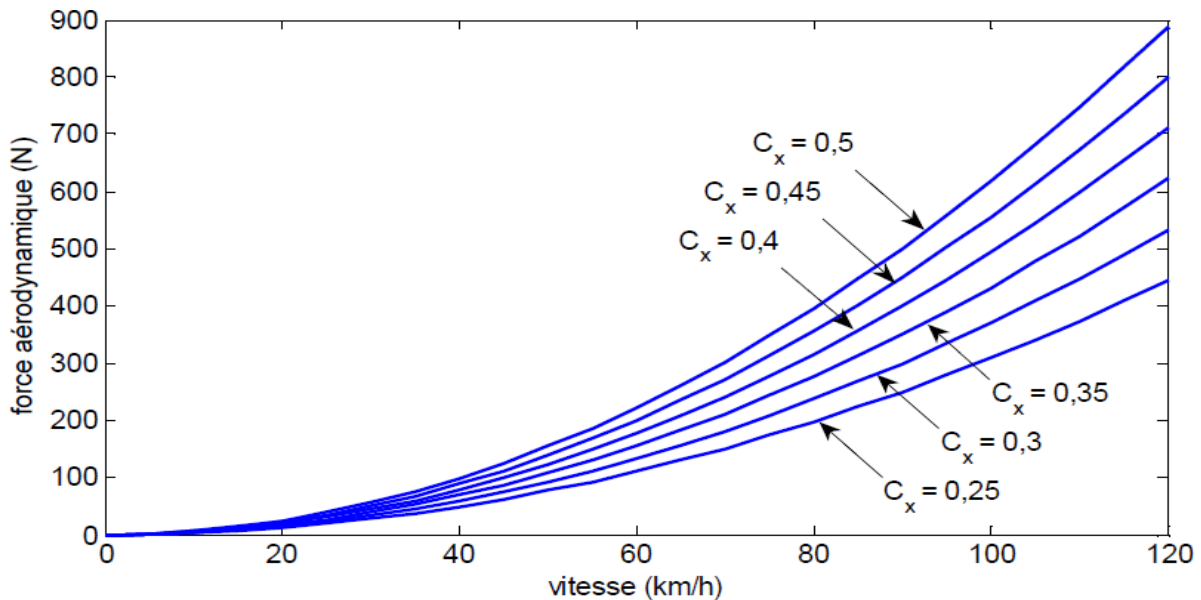


Figure II.7 Force aérodynamique en fonction de la vitesse Pour différentes

Valeurs du C_x [Mes 07].

La force due à l'accélération assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Cette force est obtenue par le produit entre la masse M_v de la voiture, l'accélération a imposée par le conducteur et un coefficient δ .

$$\delta M_v a = F_t - (F_r + F_{Ard} + F_g) \tag{II.36}$$

$$C_r = (F_r + F_{Ard} + F_g) r \tag{II.37}$$

Avec:

F_r : Force de résistance au roulement;

F_{ard} : Force de résistance aérodynamique ;

F_g : Force gravitationnelle ;

C_r : Couple résistant ;

P : poids du véhicule.

On notera que les frottements des pièces mécaniques à l'intérieur du véhicule sont négligés.

II.8 Commande vectorielle de la MADA

II.8.1.Introduction

Au cours de ces dernières années, des méthodes ont été mises en point, permettant d'assurer le découplage entre les commandes du flux et du couple de la machine asynchrone. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique.

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu (MCC) (Figure II.9) ou le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit donc de placer le référentiel (d, q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) (Figure II.10); ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante quadrature [BAB10].

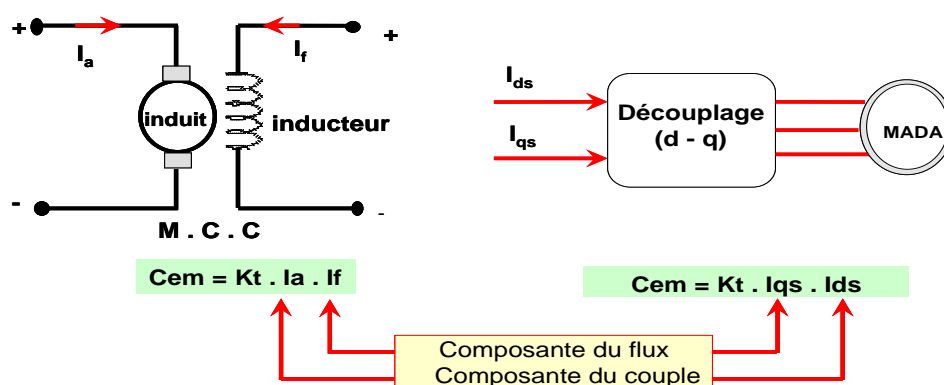


Figure II.9 Principe de la commande vectorielle

Couple électromagnétique de la machine à courant continu

$$\begin{cases} C_{em} = K\phi_f \cdot i_a \\ \phi_f = K \cdot i_f \end{cases} \quad \text{II.38}$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC.

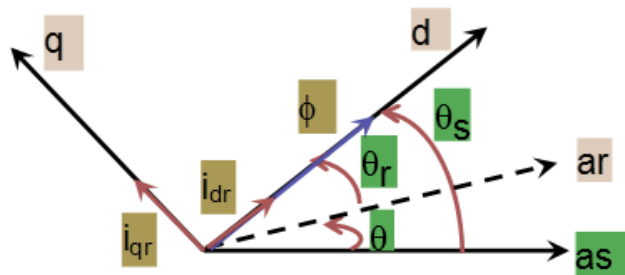


Figure II.10 position du référentiel par rapport au flux

II.8.2 Modèle de la MADA en vue de la commande

Nous avons défini dans ce chapitre les équations de la MADA dans le repère (d,q) lié au champ tournant. Si on exprime les équations du système (II-24) et (II.25) en utilisant la transformation de Laplace on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + s \phi_{dr} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + s \phi_{qr} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + s \phi_{dr} - [\omega_s - \omega] \phi_{qr} \\ v_{dq} = R_r i_{qr} + s \phi_{qr} + [\omega_s - \omega] \phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.39}$$

Dans la suite de notre travail on simplifie les variables obtenues par la transformation de Laplace ; par exemple nous noterons V_{ds} au lieu de $V_{ds}(s)$; s est l'opérateur de Laplace.

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les axes d et q, nous définissons des tensions intermédiaires comme suite : [BAB 10]

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} - \frac{M}{L_r} v_{dr} = v_{tds} v_{qs} \\ v_{dr} - \frac{M}{L_s} v_{ds} = v_{tdr} v_{qr} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{M}{L_r} v_{qr} = v_{tqs} \\ \frac{M}{L_s} v_{qs} = v_{tqr} \end{array} \right. \quad \text{II.40}$$

Des termes de couplage a compensé apparaissent ; P1d, P1q, P2d, P2q ; ces expressions nous permettent d'obtenir des relations entre les tensions intermédiaires et les courant statoriques et rotoriques dans les axes d ou q.[Pau. 05]

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{tds} = R_s(1+ST_s \delta) i_{ds} + P1d \\ v_{tqs} = R_s(1+ST_s \delta) i_{qs} + P1q \\ v_{tdr} = R_r(1+ST_s \delta) i_{dr} + P2d \\ v_{tqr} = R_r(1+ST_s \delta) i_{dr} + P2q \end{array} \right. \quad \text{II.41}$$

- $T_s = \frac{L_s}{R_s}$; constante de temps électrique statorique.
- $T_r = \frac{L_r}{R_r}$; constate de temps électrique rotorique.
- $\delta = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$; coefficient de dispersion.

Les termes de couplage peuvent être exprimés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} P1d = -\frac{M}{L_r} R_r i_{dr} - \omega_s \varphi_{qs} + \omega \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} \\ P1q = -\frac{M}{L_r} R_r i_{qr} + \omega_s \varphi_{ds} + \omega \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \\ P2d = -\frac{M}{L_s} R_s i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_s} \varphi_{qs} - \omega \varphi_{qr} \\ P2q = -\frac{M}{L_s} R_s i_{qs} - \omega_s \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} + \omega \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad \text{II.42}$$

II.8.3 Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle de la machine asynchrone consiste à orienter l'un des flux de la machine suivant l'axe d ou q.

Dans notre cas on choisit l'orientation de repère (d,q) suivant le vecteur flux statorique directe φ_{ds} , ainsi le modèle de la MADA sera simplifié et le dispositif de commande qui en résulte l'est également.

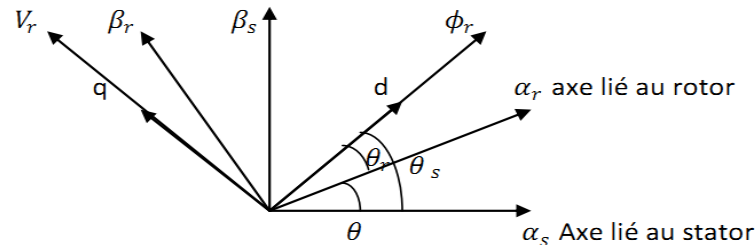


Figure II.11 Vecteur flux dans le système d'axe choisit

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases}$$

II.43

Avec ce choix d'orientation du flux, les expressions des systèmes d'équation (II.39) et (II.40) deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_s \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_s \varphi_{dr} \end{cases}$$

II.44

Avec :

$$\omega = \omega_s - \omega_r$$

Compte tenu des hypothèses de travail retenues, cela nous incite à prendre le courant statorique dans l'axe d nul, $i_{ds} = 0$. Le courant et la tension dans cet axe sont alors en phase :

$$V_{qs} = V_s \text{ et } i_{qs} = i_r$$

Dans ce cas nous obtenons un facteur de puissance unitaire au stator, donc la puissance réactive statorique est nulle $Q_s = 0$.

Ces simplifications nous conduisent à l'expression de couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \varphi_{ds} i_{qs}$$

II.45

Cette expression est semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

L'analyse des équations de flux en régime permanent permet de conclure que φ_{ds} ne peut être imposé que par le courant rotorique i_{dr} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_S i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad \text{II.46}$$

Afin de garantir l'état magnétique de la machine au rotor, ($\varphi_{ds} = \varphi_{sn}$), nous procédons à la régulation du courant, on répartie la magnétisation entre le stator et le rotor.

D'après les expressions des équations qui viennent d'être établies, nous pouvons tracer un tableau récapitulatif mettant en liaison les objectifs de la stratégie de commande avec les références des variables d'action concernées : [BAB10]

Objectifs	References
$\varphi_{ds} = \varphi_s = \varphi_{sn}$	$i_{dr}^* = \frac{\varphi_{sn}}{M}$
$\varphi_{qs} = 0$	$i_{qr}^* = -\frac{L_S}{M} i_{qs}^*$
$Q_s = 0, (\cos\varphi=1)$	$i_{sd}^* = \frac{\varphi_{sn}}{M+L_S} i_{qr}^*$
$C_{em} = C_{em}^*$	$i_{qs}^* = \frac{C_{em}^*}{K C_{em}}$

Tab II.2 Stratégie de commande en courant

II.8.4 Schéma de contrôle des courants

La figure (II.12) donne la représentation sous forme de schéma bloc de contrôle des courants de la MADA.

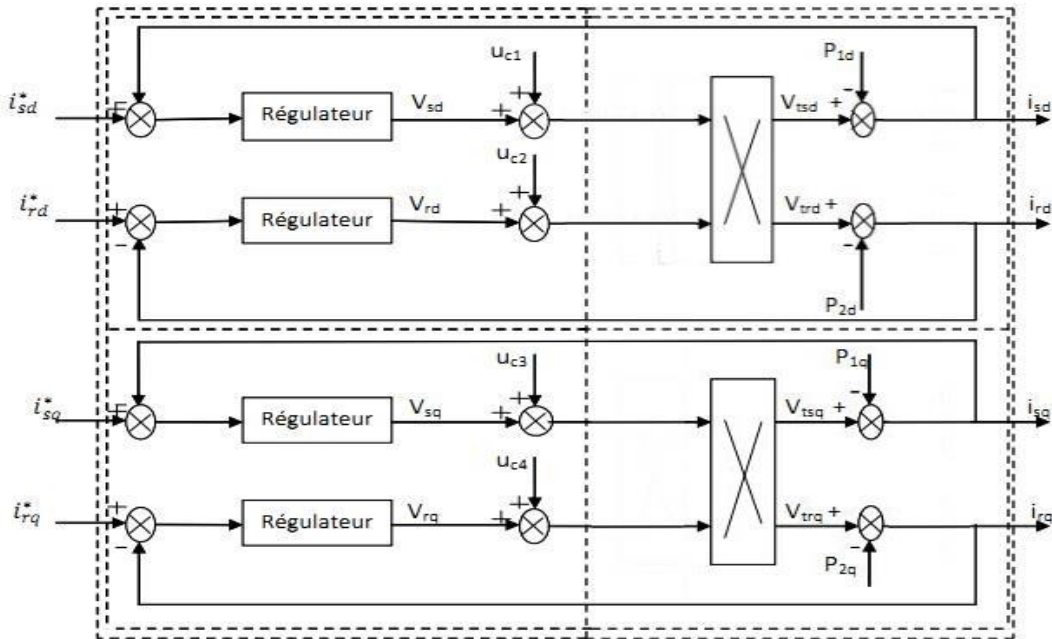


Figure II.12 Schéma bloc de la régulation des courants

II.8.5 Dimensionnement des régulateurs du courant

Le but essentiel d'utilisation des régulateurs est d'avoir un système stable et bien amortie, pour cela on utilise un régulateur proportionnel intégral, simple et rapide à mettre en œuvre.

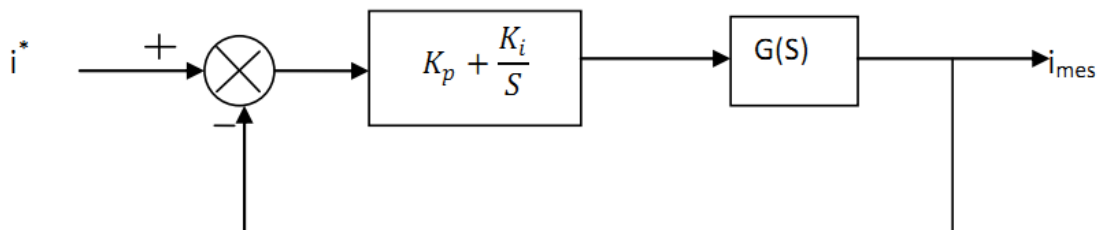


Figure II.13 Régulateur des courants

Avec :

$$G(S) = \frac{1}{R+SL\sigma} = \frac{1/R}{1+TS}$$

$$T = \frac{L\delta}{R}$$

T : constante de temps électrique du système.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P + \frac{L_s R_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad \text{II. 47}$$

Pour éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad \text{II. 48}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBO = k_p \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{P} \quad \text{II. 49}$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{II. 50}$$

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad \text{II. 51}$$

Le terme τ_r désigne ici le temps de réponse du système nous choisissons de fixer celui-ci à 10ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA qu'on a choisie.

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad \text{II. 52}$$

$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad \text{II. 53}$$

Conclusion

Durant ce chapitre on a modélisé toutes les structures de commande et de régulation ainsi que tous les organes qui concerne la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

Donc on passe au troisième chapitre pour ainsi faire la conception du régulateur floue et simuler le tout sur MATLAB/SIMULINK.

CHAPITRE III

COMMANDE DE VITESSE

PAR

LOGIQUE FLOU

III.1 Logique floue

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle.

III.1.1 Historique

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0, 1\}$. Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs.

Depuis les années 30, Max Black a appliqué la logique floue aux ensembles d'éléments ou de symboles. Il a dessiné la première fonction d'appartenance (Membership function).

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automaticien de réputation internationale, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Il publia un article intitulé (Fuzzy sets) ou (Ensembles flous). En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société Smidt-Fuller en 1978. C'est la première véritable application industrielle de la logique floue. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue.

Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique. Et en 1995 grâce à Jang, l'application de la logique floue s'élargit aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle.

Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et utilisée dans de nombreuses applications industrielles et gestionnaires. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement [Elb 09].

III.1.2 Domaines d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...)
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.) ;

Systèmes autonomes mobiles ;

- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...)
- Systèmes de conditionnement d'ambiance ;
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance ;
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet ;
- Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette
- des gaz pour les véhicules ;
- Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin ;
- Produits de consommation courante. [Elb 09].

III.1.3 Commande par logique floue

Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- La quantification floue des entrées, appelée aussi la Fuzzification. Elle permet la conversion des variables des entrées qui sont des grandeurs physiques, en grandeurs floues, ou variables linguistiques
- L'établissement des règles liant les sorties aux entrées, appelé l'Inférence floue ;
- La Défuzzification qui est l'opération inverse de la fuzzification. Elle consiste à transformer les variables linguistiques en variables réelles ou numériques.
- Le schéma bloc d'un contrôleur flou est illustré par la figure suivante [Elb 09]:

$R(t)$ est le signal de référence ;

$U(t)$ est le signal de commande ;

$Y(t)$ est la sortie du système à commander.

Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties ; une interface de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et une interface de défuzzification.

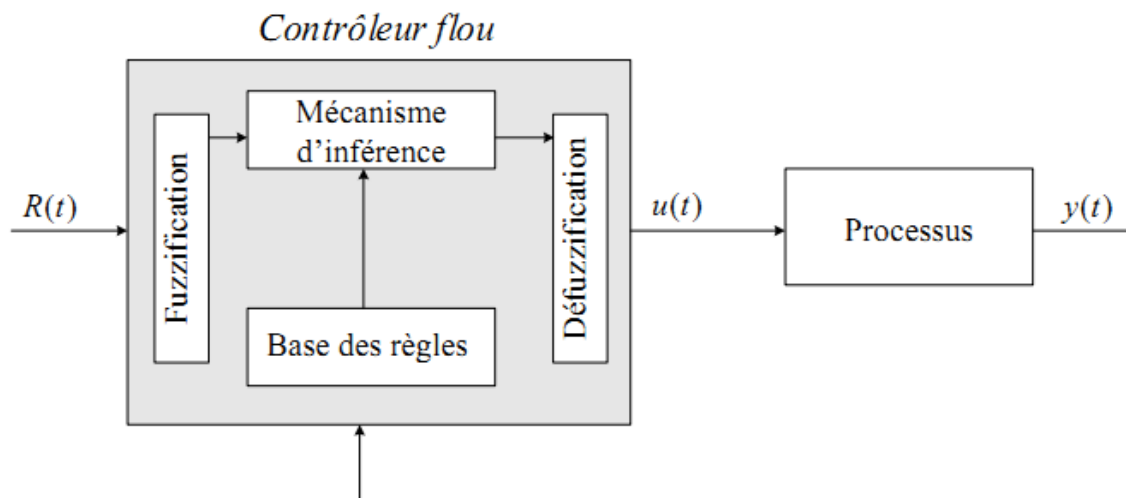


Figure III.1 structure général d'un contrôleur flou.

III.1.4 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables [Elb 09]. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées ;
- Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues ;
- Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants ;

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

III.1.5 Mécanisme d'inférence flou

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence de la logique floue. Elle utilise les variables floues transformées par la fuzzification et les règles d'inférence pour créer et déterminer les variables floues de sortie, en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance.

Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit la notion de mécanisme ou méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes:

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani) ;
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen) ;
- Méthode d'inférence Somme-Produit.

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue "Et, Ou, et Alors".

Opérateurs flous Méthodes d'inférence	Et	Ou	Alors
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

Tab III.1 Méthodes usuelles de l'inférence floue.

III.1.6 Interface de défuzzification

La défuzzification est la dernière étape dans la commande floue. Elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour faire cette opération. La méthode de défuzzification choisie est souvent liée à la puissance de calcul du système flou. Parmi les plus couramment utilisées, on cite :

- **Méthode de Maximum:** cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles ;
- **Méthode de la moyenne des maximums :** cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale;
- **Méthode du centre de gravité:** cette méthode génère une commande égale l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante :

$$X_G = \frac{\int X \mu_{rés}(X) dx}{\int \mu_{rés}(X) dx}$$

L'intégrale du numérateur donne le moment de la surface, tandis que l'intégrale du dénominateur donne la surface de la fonction d'appartenance $\mu_{rés}(x)$.

Cette méthode est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, (car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision), malgré sa complexité, puisqu'elle demande des calculs importants. [Elb 09].

III.1.7 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont [ELB 09] :

- La non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non- linéaire et difficile à modéliser) ;
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à Mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs Souvent difficile) ;
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;

III.2 Commande de vitesse d'une MADA par logique floue

Cette partie est consacrée à l'application de la logique floue à la commande de vitesse d'une machine asynchrone à double alimentation comme est indiquée sur la figure (III.2). A noter que toutes les notions présentées dans le deuxième chapitre ont été conservées.

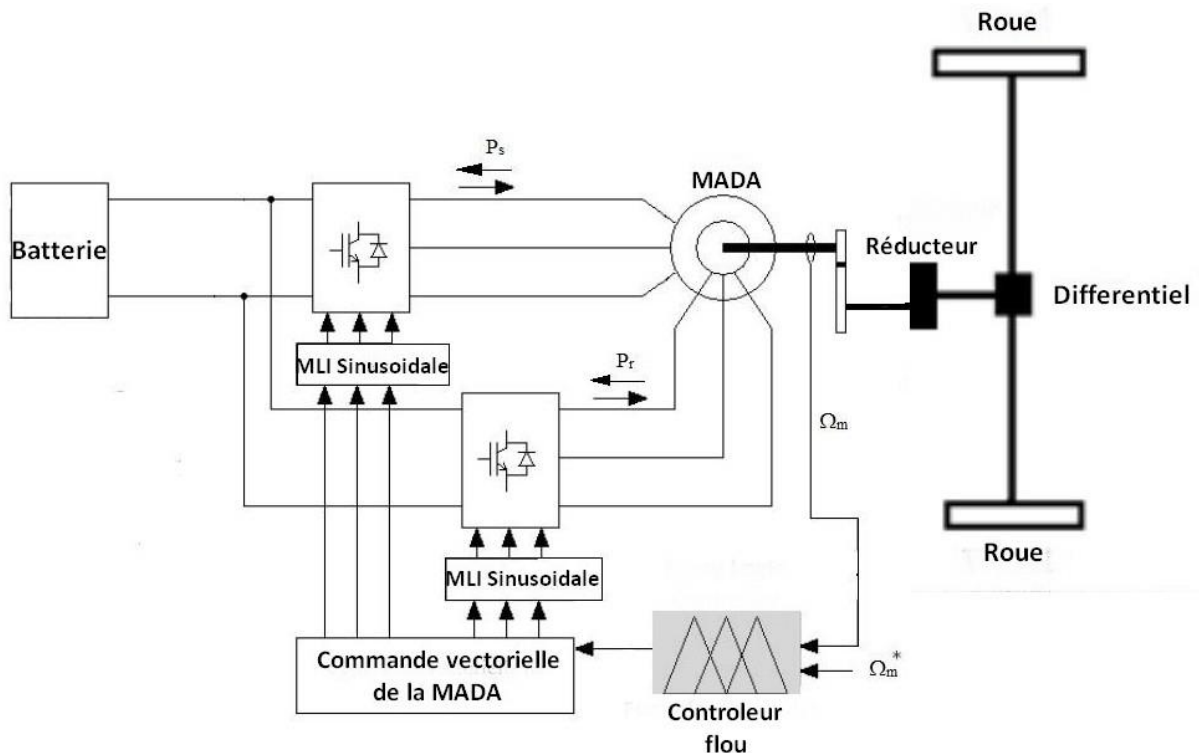


Figure III.2 Dispositif de commande global d'une MADA par la logique floue

III.3 Structure de base d'un contrôleur flou de vitesse

Généralement, la conception d'un régulateur flou pour la commande des entraînements électriques exige les choix des paramètres suivants:

- Choix des variables linguistiques ;
- Choix des fonctions d'appartenance ;
- Choix de la méthode d'inférence ;
- Choix de la stratégie de défuzzification.

Pour les systèmes mono variables simples, les entrées du contrôleur flou sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). Et la majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani, comme le montre la figure suivante :

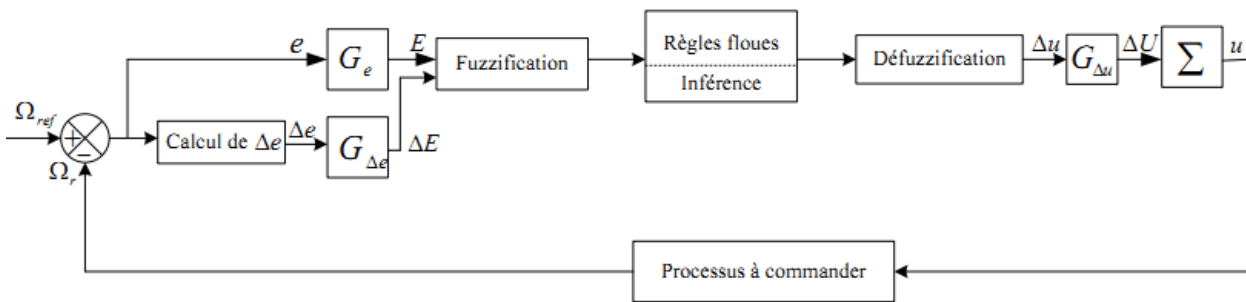


Figure III.3 Schéma synoptique d'un contrôleur flou de vitesse

Les deux entrées du contrôleur flou sont l'erreur de vitesse et sa variation.

- L'erreur de vitesse notée e est définie par :

$$e = \Omega_{ref} - \Omega_r \quad \text{III.1}$$

- La variation de l'erreur de vitesse notée Δe est définie par :

$$\Delta e = e(t + \Delta t) - e(t) = e(k + 1) - e(k) \quad \text{III.2}$$

La sortie du régulateur correspond à la variation de la commande ou du couple électromagnétique notée Δu .

Les trois grandeurs, e , Δe et Δu sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} E = G_e e \\ \Delta E = G_{\Delta e} \Delta e \\ \Delta U = G_{\Delta u} \Delta u \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Où : G_e , $G_{\Delta e}$ et $G_{\Delta u}$ sont des facteurs d'échelle ou de normalisation, et jouent un rôle déterminant sur les performances statiques et dynamiques de la commande.

Le régulateur flou représenté par la figure (III.3) est composé de :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur de vitesse Δ au cours de temps ;
- Des facteurs d'échelle associés à l'erreur et sa variation et la grandeur de commande ;
- Un bloc de fuzzification ;
- Des règles floues ;
- Un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur numérique ;
- Un bloc sommateur qui calcule la valeur intégrale de la commande.

III.4 Fuzzification

Cette étape s'occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs floues ou variables linguistiques. Les variables d'entrées qui sont l'erreur de vitesse et sa variation sont soumises à une opération de fuzzification et par conséquent converties à des ensembles flous. L'univers de discours normalisé de chaque variable du régulateur (l'erreur, sa variation et la variation de la commande) est subdivisé en cinq ensembles flous. Ceux-ci sont caractérisés par les désignations standards suivantes :

- Négatif grand noté **NG** ;
- Négatif petit noté **NP** ;
- Environ de zéro noté **EZ** ;
- Positif petit noté **PP** ;
- Positif grand noté **PG** ;

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre la figure suivante :

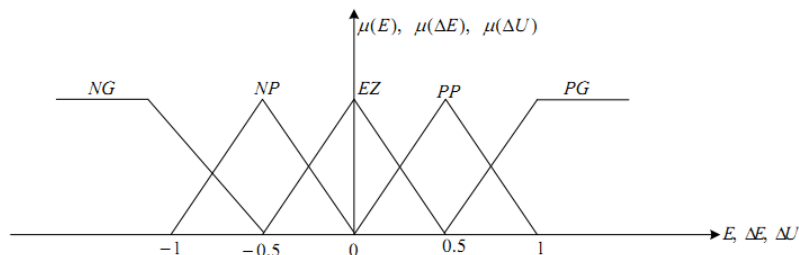


Figure III.4 Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou.

III.5 Base des règles

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [Elb 09]. Elle permet de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou et exprimer qualitativement la relation qui existe entre les variables d'entrées et la variable de sortie.

A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relie la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède cinq ensembles flous, ce qui donne un

ensemble de vingt-cinq règles. Celles-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante :

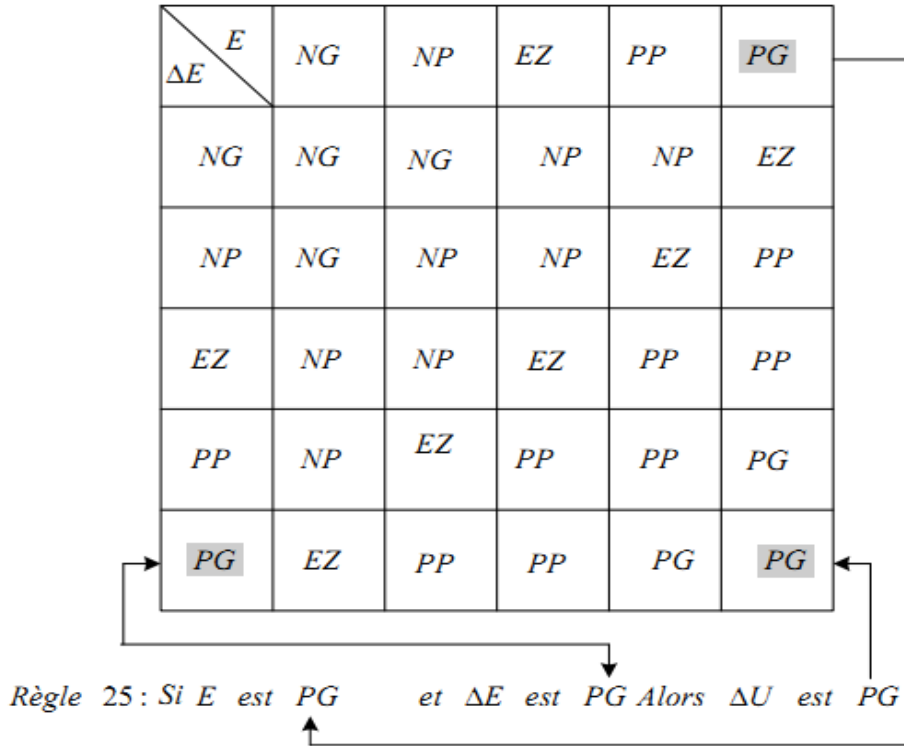


Figure III.5 Matrice d'inférence des règles floues

La logique de détermination de cette matrice des règles est basée sur une connaissance globale ou qualitative du fonctionnement du système. A titre d'exemple, prenons les deux règles suivantes :

"Si E est PG et ΔE est PG Alors ΔU est PG"

"Si E est EZ et ΔE est EZ Alors ΔU est EZ"

Elles indiquent que si la vitesse est trop petite par rapport à sa référence (E est PG), alors il faut un appel de couple grand (ΔU est PG) pour ramener la vitesse à sa référence. Et si la vitesse atteint sa référence et s'établit (E est EZ et ΔE est EZ) alors garder le même couple (ΔU est EZ).

III.6 Simulation du système

Après avoir modélisé le schéma d'ensemble (MADA, régulateur flou, onduleur MLI, Batterie), on procède à la simulation du système sous le logiciel MATLAB/Simulink va simuler son model par Simulink sous MATLAB.

III.7 Résultat de simulations

Les notions théoriques présentées précédemment ont été exploitées pour établir un programme qui simule le comportement dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, munie d'un réglage de vitesse par un régulateur flou, et alimentée par deux onduleurs de tension, l'un au niveau du stator et l'autre au niveau du rotor (tous les paramètres de l'entraînement sont récapitulés dans une annexe placée à la fin de ce mémoire).

III.7.1. Démarrage avec un couple résistant

On impose à la MADA une vitesse de référence variable, ce qui suppose que le véhicule accélère ou décélère, et cela quel que soit son sens de déplacement. Aussi, un couple résistant qui est en fonction de la vitesse puisque le véhicule est soumis aux forces de sa propre inertie et à la force aérodynamique qui est dû aussi à la force du vent. Et en fin, l'angle alfa qui représente la pente du parcours supposé suivie par le véhicule et qui lui impose une force dite, force du poids.

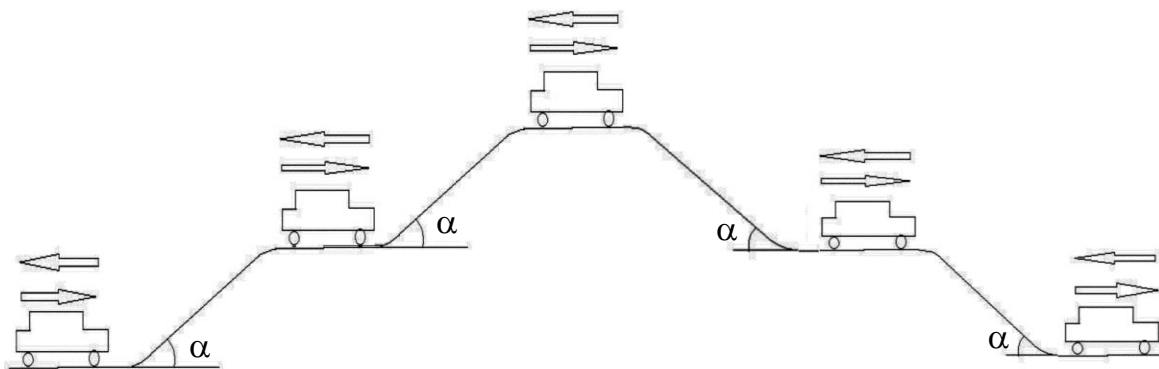


Figure III.6 Parcours pris par la voiture

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation avec la variation du couple résistant. On remarque d'après les résultats obtenus que la vitesse de rotation de la MADA suit parfaitement sa vitesse de référence et elle atteint même une valeur qui est égale au double de sa valeur nominale comme l'atteste la figure III.7

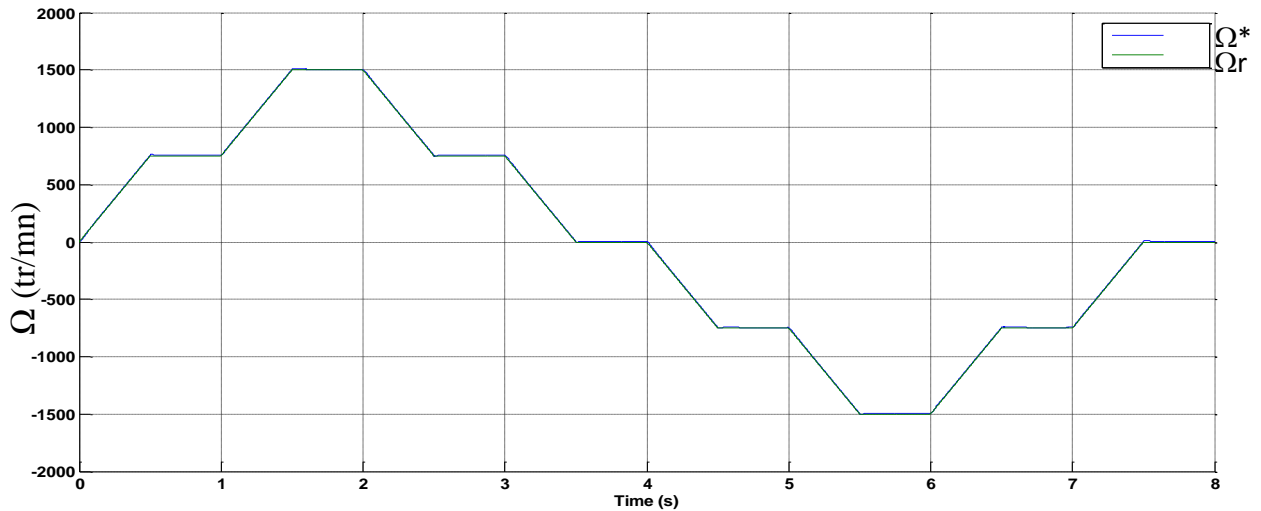


Figure III.7 Allure de la vitesse de rotation et de sa référence

C.à.d. que quand le conducteur du véhicule accélère, le moteur répond à ces exigences et cela malgré un grand couple résistant. Conclusion, nous pourrions diminuer le recours à l'utilisation des amplificateurs mécanique de vitesse et pourquoi pas la suppression pure et simple de la boîte à vitesse qui est connu pour faire diminué le rendement du moteur à cause notamment des frottements entre ces engrenages.

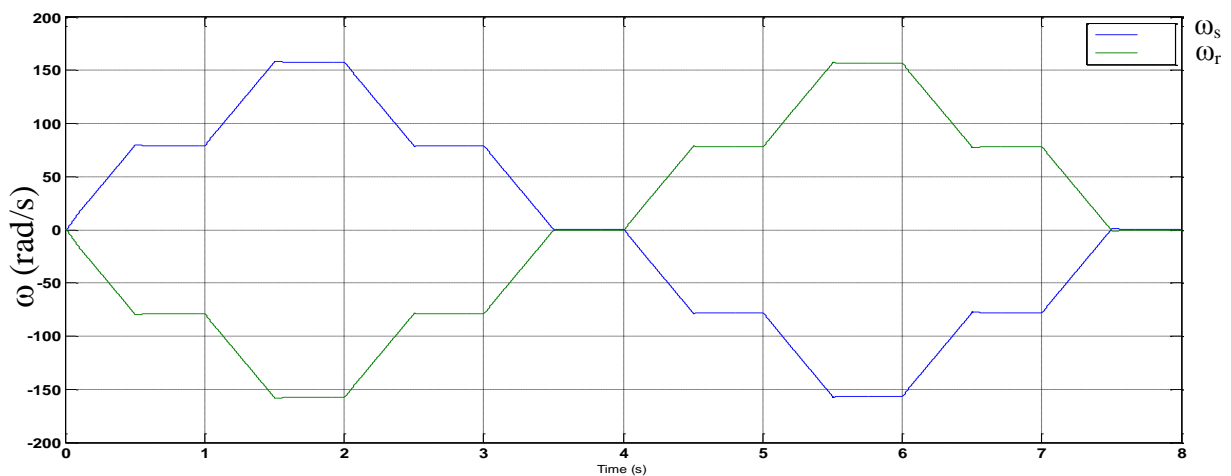


Figure III.8 Allure des pulsations des courants statoriques et rotoriques

Les pulsations statorique et rotorique ont des allures symétriques par rapport à l'axe des temps, comme le montre la figure III.8 ce qui explique l'allure du glissement qui s'établit sur la valeur de $g=-1$.

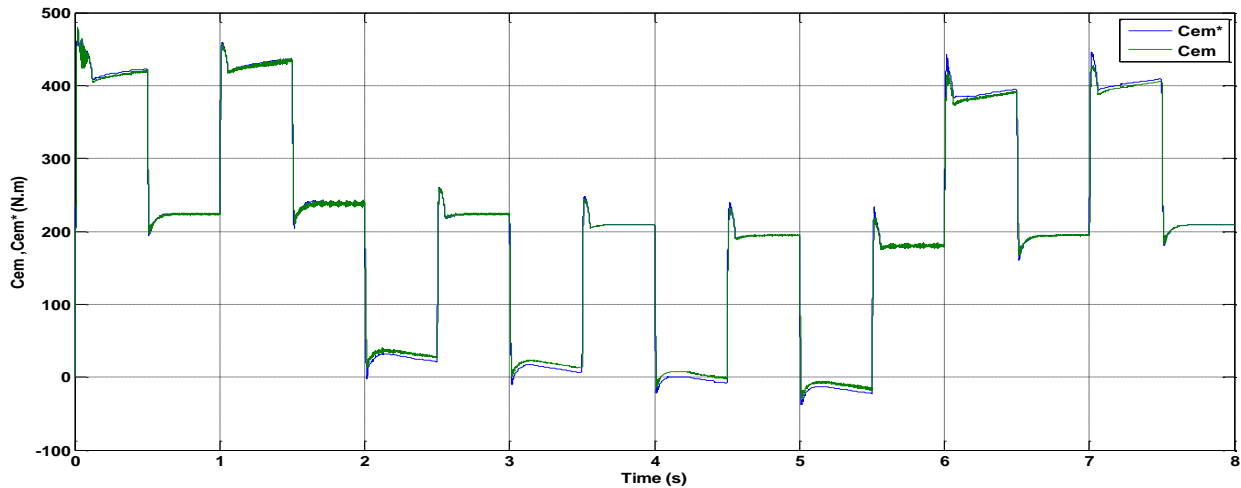


Figure III.9 Allure du couple électromécanique et du couple de référence en fonction du temps

La figure III.9 représente le couple électromécanique qui, lui présente une forte valeur au démarrage, ils atteignent des pics de 450 N.m en régime transitoire (accélération) puisque le véhicule démarre directement avec un grand couple résistant qui est dû essentiellement au poids et à son inertie et au parcours pris, puis le couple diminue et suit le couple de référence pour ce stabilisé à la valeur de 230 N.m, à partir de 1,5(s), régime permanent. Des perturbations à chaque fois que la vitesse de rotation change de valeur, mais il maintient toujours sa valeur en régime permanent. Tout fois on remarque que à chaque valeur de la vitesse le couple électromécanique présente une légère différence par rapport au couple de référence, et cela revient au fait que le coefficient de frottement de la MADA n'est pas nul.

Sur la figure III.10 on peut voir différentes modes de fonctionnement de la MADA, représentés sur l'allure du comportement du courant et de la tension d'une phase statorique.

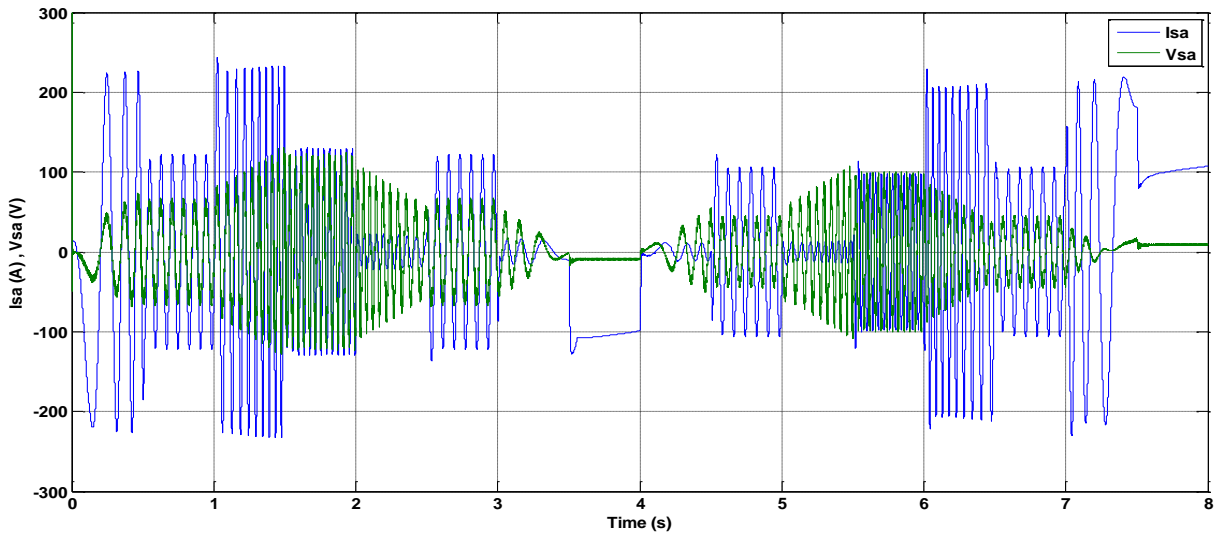


Figure III.10 comportement d'un courant et d'une tension de phase statorique

Si on zoom sur la première partie de la figure III.10 on prendra la partie qui commence de 0 jusqu'à 1 s, cela va nous donner la figure III.11 ou, on peut remarquer qu'après le régime transitoire, l'amplitude du courant devient plus grande que celle de la tension mais, tous deux sont en train d'augmenter, et cela est dû essentiellement au fort couple de démarrage, vu que le véhicule commence son parcours directement sur une pente et que le couple résistant est positif tous comme la vitesse. La MADA est alors en mode moteur

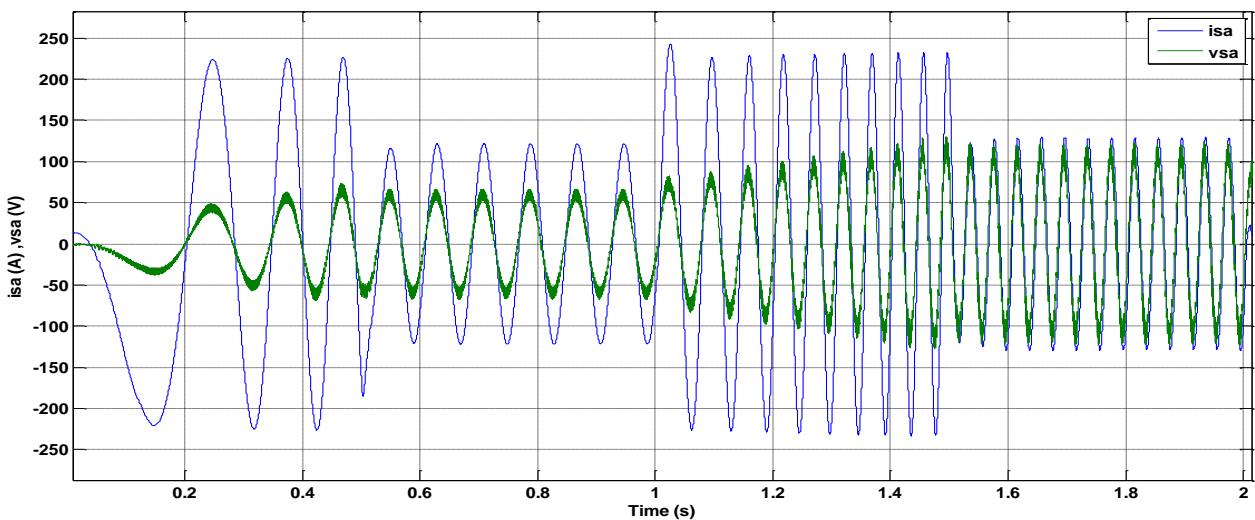


Figure III.11 Zoom sur la première partie de la figure III.10

Sur le zoom de la deuxième partie de la figure III.12 on peut voir que le courant et la tension prennent des valeurs constante et que l'amplitude du courant est toujours supérieur à la

tension, puisque la MADA est aussi en mode moteur puisque le véhicule est toujours soumis à un couple résistant et une vitesse positives.

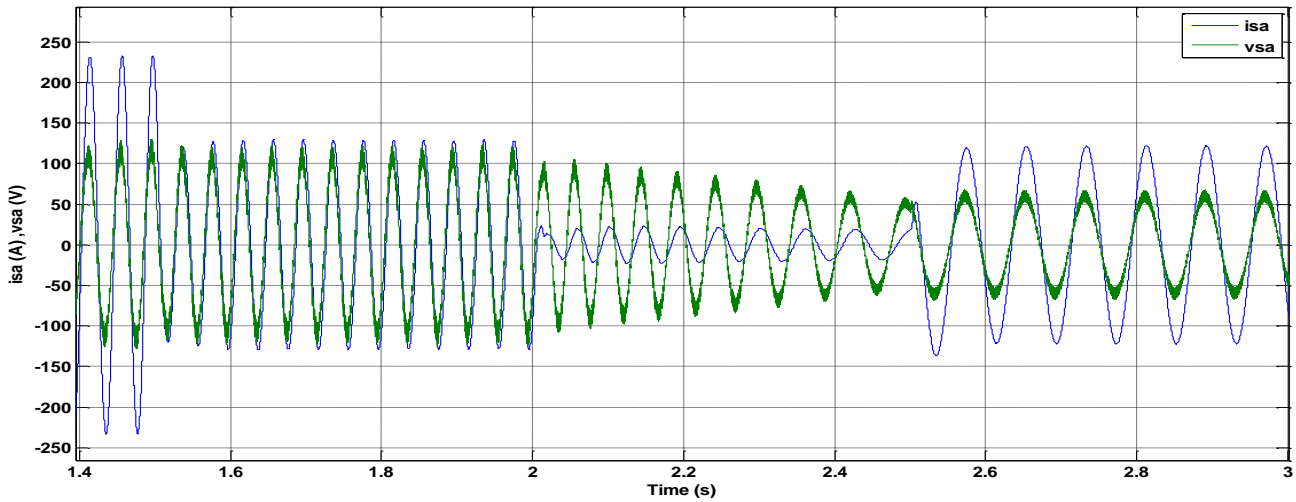


Figure III.12 Zoom sur la deuxième partie de la figure III.10

Sur la figure III.12 on peut voir que l'amplitude du courant et de la tension sont entrain de diminuer, et c'est normale puisque le véhicule aborde une décente, mais au moment où le couple prend des valeurs négatives et que la vitesse est toujours positive, on remarque que le courant augmente malgré que la tension continue toujours à diminuer, à ce moment-là, il y a récupération d'énergie électrique qui se fait au niveau de la batterie. La MADA est alors en mode génératrice.

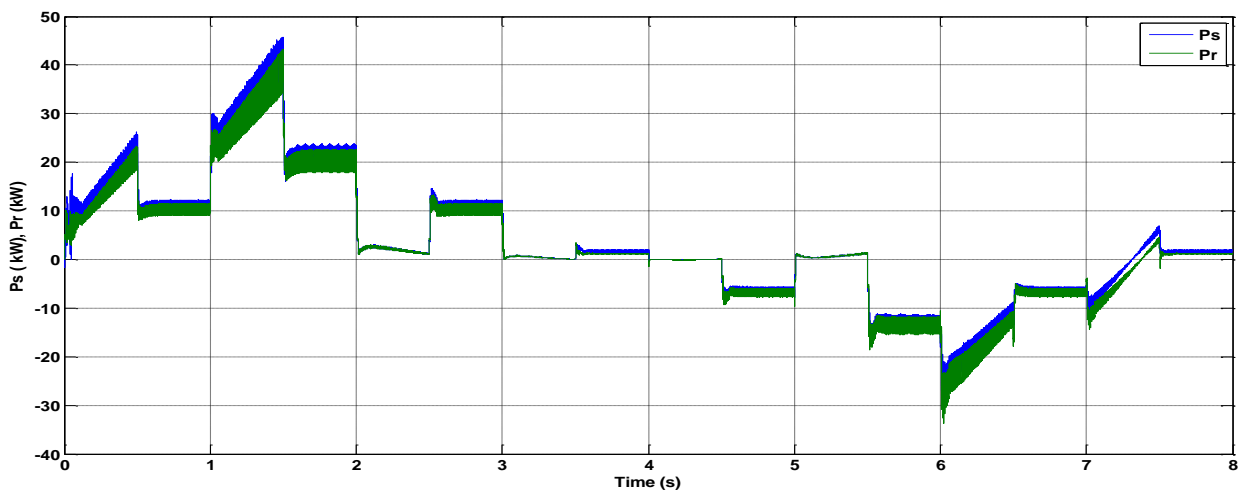


Figure III.13 Allure de la puissance active statorique et rotorique

On remarque sur la figure III.13 que la partie où les puissances deviennent négative, ce qui confirme tout ce qu'on a défini dans le paragraphe précédent, où nous avons expliqué le caractère réversible de la MADA, car c'est sur cette partie que la récupération de l'énergie électrique se fait.

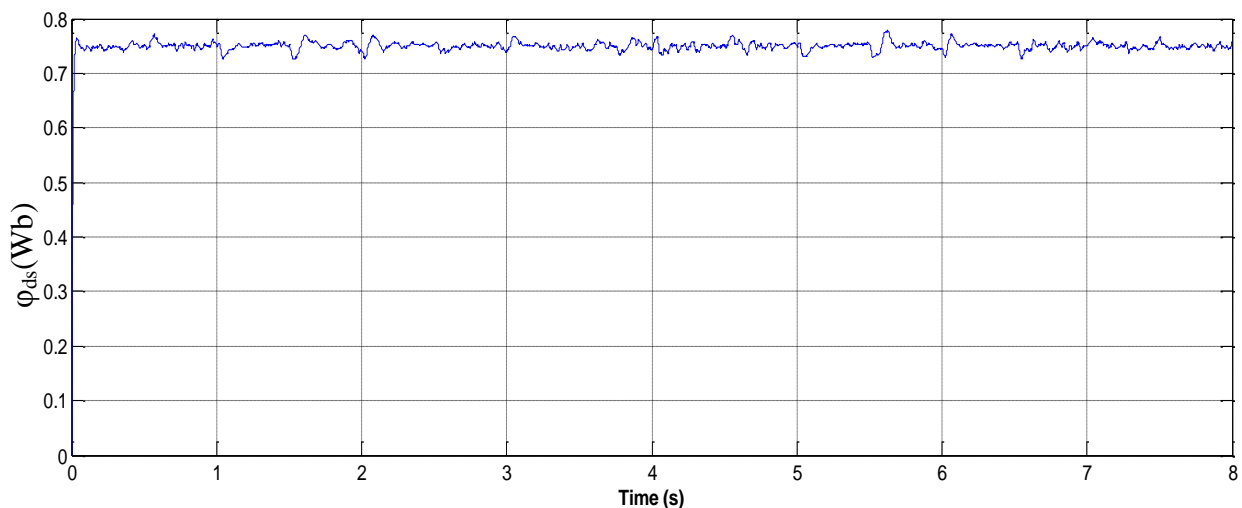


Figure III.14 Allure de flux statorique directe en fonction du temps

Sur la figure III.14 on voit que le flux statorique suit sa référence selon l'axe directe et prend une valeur de 0.75 Wb ce qui va permettre la magnétisation de la machine

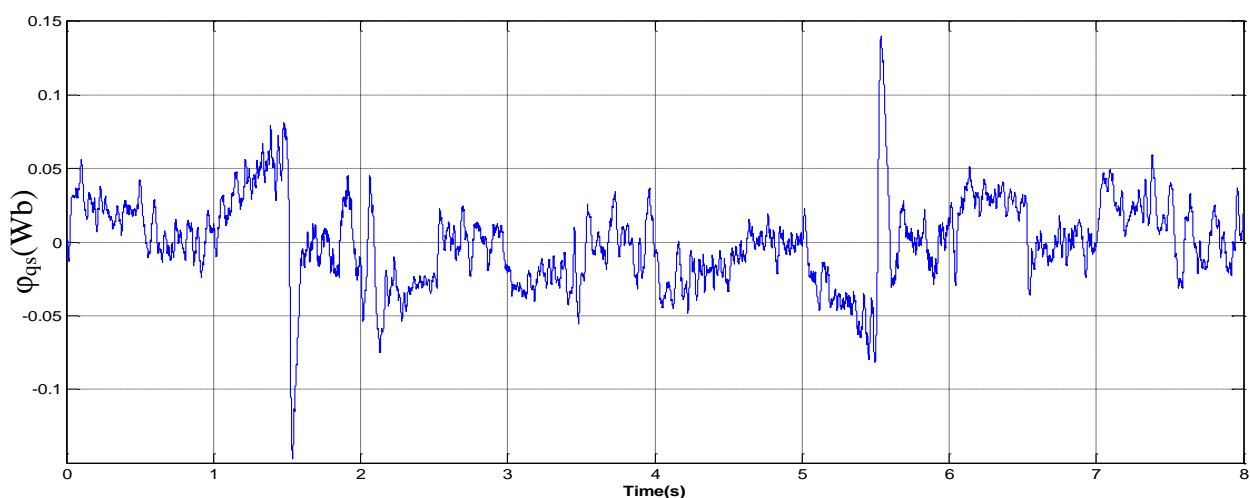


Figure III.15 Allure de flux statorique en quadrature en fonction du temps

La figure III.15 montre que le découplage entre le couple électromécanique et le flux statorique est très satisfaisant.

Sur les figures III.14, III.15, on voit bien que le flux statorique se dirige selon l'axe direct et que la composante en quadrature prend quasiment sa valeur nulle imposée par la condition d'orientation du flux statorique, sa prouve l'efficacité de notre commande qui n'est autre que la commande vectorielle a orientation du flux. Cela va nous permettre de séparé entre d'une part, la commande du couple, et d'autre part, la commande de la vitesse. C'est cette dernière qui confère à la machine à courant continue son principale avantage qui se trouve être naturel chez cette dernière.

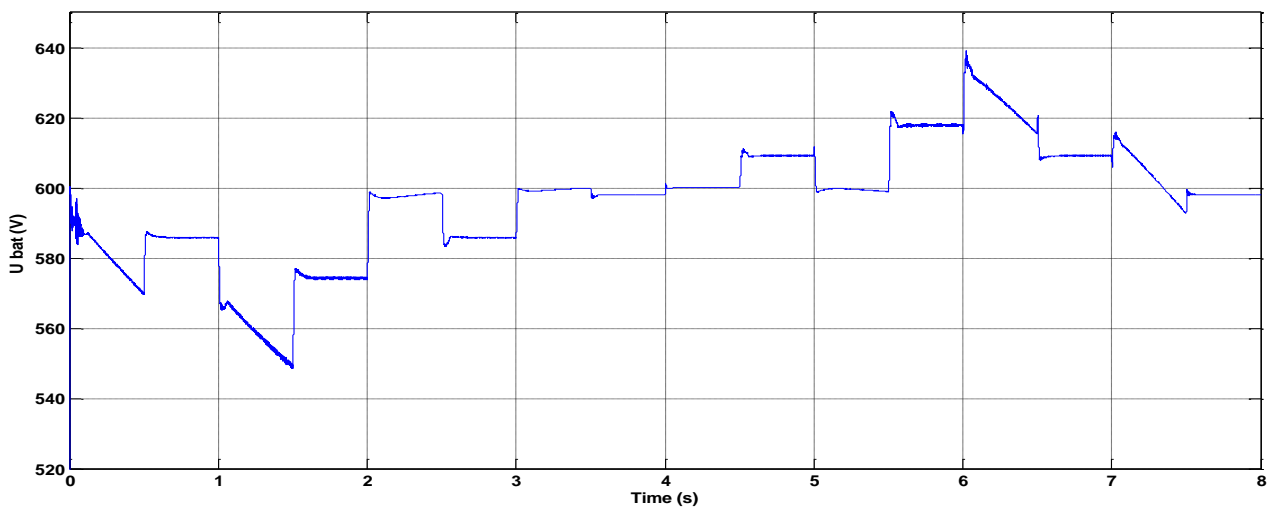


Figure III.16 Allure de la tension de la batterie en fonction du temps.

La figure III.16, représente la tension de la batterie, on voit que sa forme suit celle de la puissance mais dans le sens opposé, ce qui explique que lorsque la puissance augmente (consommation) parce que le conducteur accélère, la tension diminue et donc la batterie se décharge, et c'est normale puisque dans cette partie la MADA fonctionne en mode moteur.

Et dans le cas contraire ou la voiture décélère, la tension augmente et donc la batterie se charge. La MADA fonctionne en mode génératrice dans cette partie-là aussi. Sa confirme que notre modèle de la batterie est proche de la réalité.

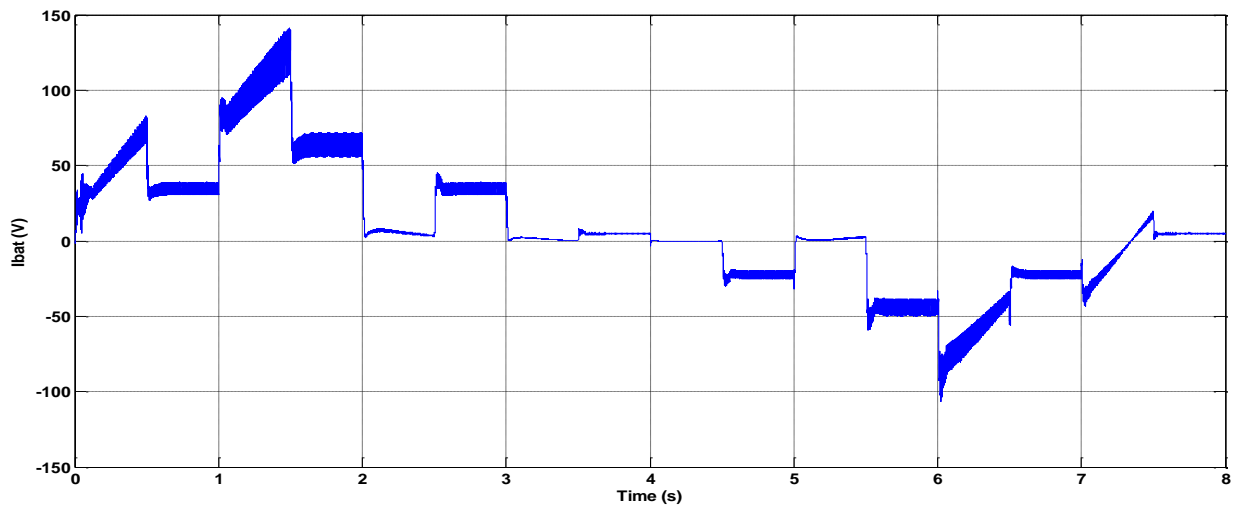


Figure III.17 Allure Du courant de la batterie en fonction du temps

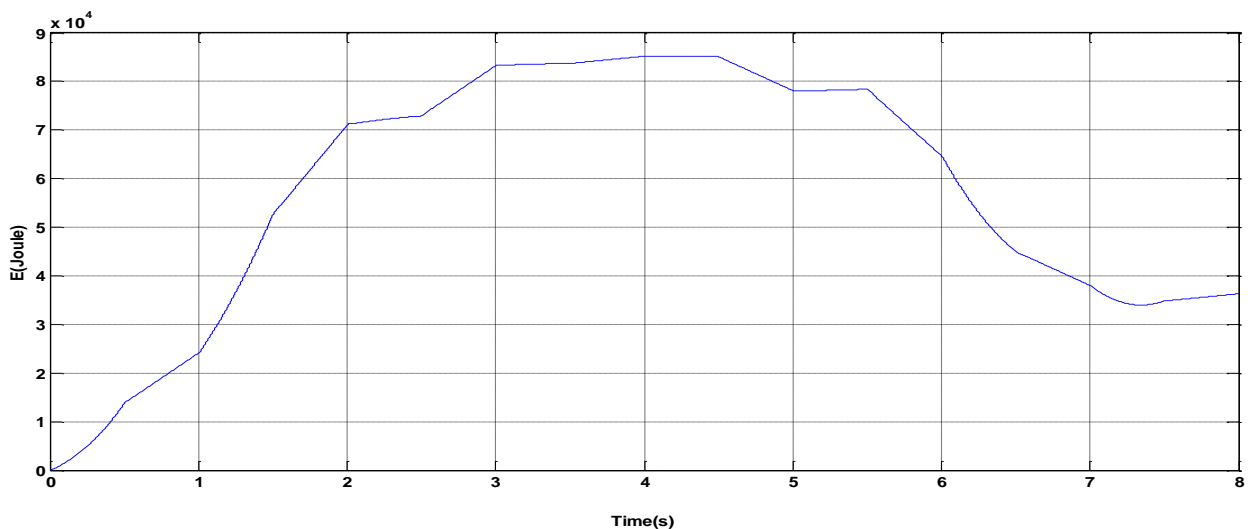


Figure III.18 Energie fournit par la batterie

Dans la figure III.18 on constate que l'énergie fournie par la batterie suit exactement le sens de la consommation, lors du démarrage l'énergie augmente ce qui fait qu'on a une grande consommation à cause des forces appliquée au véhicule (pente), par contre sur la suite on remarque que l'énergie se stabilise et suit le parcours (décélération), l'énergie est récupérée

III.8 Conclusion

Les notions de base de la logique floue ont été présentées au début de ce chapitre. Les aspects de la commande par logique floue, ainsi que la conception d'un contrôleur flou ont été introduits tout en justifiant notre choix de ce type de commande qui réside dans sa capacité de traiter l'imprécis et l'incertain et sa simplicité de conception. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée pour faire le réglage de vitesse d'une machine asynchrone à double alimentation.

D'autre part, on a noté que tous les résultats et les performances obtenus avec la machine asynchrone à double alimentation nous offre la possibilité d'aller jusqu'à une valeur de deux fois la vitesse nominale sans défluxage et une puissance de deux fois la nominale, ce qui a pour but de réduire le dimensionnement ou de supprimé carrément la boite à vitesse, car elle est encombrante pour un véhicule et diminue son rendement.

Ensuite, notre choix d'une structure ou l'alimentation de la MADA se fait à travers deux convertisseurs d'électronique de puissance et de travailler avec un glissement $g=-1$, ce qui va permettre d'abord de réduire le dimensionnement et le coût des deux convertisseurs, ensuite ça va nous permettre de faire varier la vitesse de notre machine dans une large plage, jusqu'à deux fois sa vitesse nominale et sans défluxage. Le troisième avantage que nous offre cette machine est son grand couple de démarrage et un bon rapport entre la puissance et la masse, ce qui va grandement nous permettre de réduire la masse du véhicule et d'économisé de l'espace ainsi que de l'énergie pour la propulsion.

Nous avons constaté aussi que les performances obtenues avec la commande par logique floue sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de la trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leurs références désirée.

D'après ce chapitre nous pouvons avoir une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable comme pour notre cas.

Conclusion générale

Ce travail a pour objectif de concevoir un système capable de répondre aux fortes sollicitations et à la grande variation de vitesse aux quelles est soumis le moteur d'un véhicule électrique.

Nous avons pu réaliser un modèle basé sur une machine asynchrone à double alimentation capable de simuler et de répondre au mieux à ces conditions. Pour cela nous avons réparti notre travail sur trois chapitres :

Le premier chapitre présente un bref aperçu historique sur les véhicules électriques et hybrides, ainsi que les différentes machines électriques qui peuvent être utilisées dans la traction des véhicules électriques dont la machine asynchrone à rotor bobiné, ce qui nous a aidé à choisir une structure pour laquelle la MADA pourra s'intégrer dans un véhicule électrique.

Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une modélisation mathématique de la machine asynchrone à double alimentation, à travers les équations des tensions et des flux dans le repère abc puis on a introduit la transformation de Park pour passer au repère biphasé dq ce qui nous a permis de tirer un modèle de la machine sur lequel est basé notre simulation.

Ensuite nous avons donné le modèle de l'onduleur MLI qui représente le convertisseur de puissance choisie puisque il a la caractéristique d'être réversible et de fonctionner dans les deux sens, DC/AC pour le fonctionnement en mode moteur et AC/DC pour le mode générateur car il y a récupération d'énergie électrique en ce qui concerne notre modèle du véhicule électrique.

Ensuite on a présenté une stratégie de commande de la MADA, tel-que on a pu établir un modèle de cette machine et on lui applique la commande vectorielle à orientation de flux statorique, ce qui donne à cette machine l'avantage de la MCC, c.à.d. le découplage entre la commande du couple et celle du flux. Et enfin, nous avons donné le modèle de la batterie pour l'alimentation de la MADA en mode moteur, et le stockage de l'énergie électrique récupéré de cette dernière en mode génératrice au freinage du véhicule.

Dans le troisième et dernier chapitre, on a présenté le contrôle de vitesse basé sur la logique floue et on a dimensionné le régulateur de vitesse (flou) et on a simulé le système global dont on a tiré les résultats qui nous ont permis de mettre en évidence l'importance des avantages de

la MADA et son comportement vis-à-vis du changement des conditions auxquelles elle est soumise.

En effet, cette machine nous a permis de la faire fonctionner dans une large gamme de vitesse, car elle peut monter jusqu'à une vitesse deux fois sa vitesse nominale et une puissance deux fois sa puissance nominale pour un glissement $g = -1$, ce qui pourra réduire le rapport entre son poids et sa puissance.

On a montré aussi qu'elle est bien adaptée pour les applications de moteur à vitesse variable, ce qui pourra réduire le dimensionnement, ou la suppression de la boîte à vitesse.

Dans notre modèle, nous avons choisi un système de stockage d'énergie qui se compose de plusieurs batteries en parallèle-série. Ce qui ne pourra pas s'implanter dans une voiture, faute d'espace. Donc comme perspective, nous envisageons l'implantation d'un modèle plus commode, de moindre taille et de même puissance.

REFERENCES

[BAB 10] BABOURI R. «Contrôle, commande de la machine asynchrone à double alimentation dans les quatre quadrants couple-vitesse». Université de Bejaia, Travail de fin d'étude 2010.

[BER 55] : BERNOT F. « Machine à courant continu». Maitre de conférence à l'UTBM (Belfort) D3555- Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique.

[BER 56] : BERNOT F. « Machine à courant continu». Maitre de conférence à l'UTBM (Belfort) D3556- Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique.

[BER 05] : BERRETA J. «Le génie électrique automobile, la traction électrique» H. Science, éd. LAVOISIER.2005.

[BOS 05]: BOSSEL U. «Does a Hydrogen Economy Make Sense» 2005on-line:

1.4. Références 40. www.efcf.com/reports/E13.pdf.

[BOS 03]: BOSSEL U. « Efficiency of Hydrogen PEFC, Diesel-SOFC-Hybrid and Battery» ,Electric Vehicles, European Fuel Cell Forum, 2003 on-line:

<http://www.efcf.com/reports/E04.pdf>.

[BOS 03-05]: BOSSEL U. « Baldur Eliasson and Gordon Taylor, the Future of the Hydrogen Economy, Bright or Bleak? », 2003 on-line:

www.efcf.com/reports or www.evworld.com/databases/storybuilder.cfm?storyid=471

[BOS 06] BOSSEL U. « On the Way to a Sustainable Energy Future, Lucerne FUEL CELL», FORUM 2006, July 3-7, 2006, on-line: www.efcf.com/reports/E16.ppt.

[CLE 05] : Energie – Les batteries du 3eme millénaire à EVS21

<http://www.clean-auto.com/Energie-Les-batteries-du-3eme?3672.html> 2013

- [DEL 98] DELFOSSE F.** « Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique » mémoire d'Ingénieur, Université de Liège 1998.
- [DEL 02] DELPART S.** «Evaluation de stratégies de commande pour véhicule hybrides parallèles», Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 2002.
- [EHS 05] Ehsani M, Gao Y, Sebastien E, Emadi A** – Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles – Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press LLC, 2005, USA
- [ELB 09] : ELBIA Y.** «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», Mémoire de Magister , l'Université de Batna, 2009
- [ING 75] CHALLENGE B.** «le show des nouveaux concepts», Ingénieurs de l'Automobile, n°775 bis – supplément au n°775.
- [JAN 11] : JANIANUD N.** «Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie des performances et des couts associes »Thèse de doctorat, école de formation supérieur Supléc, 2011
- [KET 10] : KETAM I.et SAIDAENE A.** « commande non linéaire d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) » mémoire d'Ingénieur, université de Bejaia, 2010
- [MAH 05] : Mahé T.** «Motorisations hybrides: Que Faire? », Industrie et Technologie, n°868, mai 2005.
- [MES 07] : MESTER V.** « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique » Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille. 2007
- [NOU 08] : NOUH A.** « CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT D'UN SIMULATEUR POUR LES VEHICULES ELECTRIQUE ROUTIERS » Thèse de doctorat, université de Franche-Comté. 2008
- [SCH 07] : SCHMITZ R.** Travail de maturité, «La voiture électrique comme alternative réaliste à la voiture à essence ». 2007

[TAR 08] : **TARAFT S.** « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » ; Mémoire de Magister en Electrotechnique à l'Université de Bejaia, 2008.

[TER VE] : **Terre en sante**, voiture électriques, revue 2012

<http://www.terreensante.com/vehicule/vehicule-electrique-fonctionnement.php>

[TRI 10] : **TRICHLER. P** «Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole»Thèse doctorale le 22-octobre-2010

[VE 13] : **Article sur les VE**, différence entre le Kangoo ZE et le Partner Ion

<http://www.cnetfrance.fr/cartech/peugeot-partner-electrique-la-reponse-au-kangoo-ze-9786134.htm> 2013

[HUS 03]: **Husain I.** « Electric and Hybrid Vehicles»: Design Fundamentals.

CRC Press LLC, 2003.

[KAN 95] **Kant M.** «La voiture électrique», Techniques de l'ingénieur, numéro D5562.

1995

[MUL 01] **Multon B.** Motorisation des véhicules électriques, Techniques de l'ingénieur, numéro E3996. 2001

[WES 01] **Westbrook M. H.** «The electric car: development and future of

battery, hybrid and fuel-cell cars», série38. The Institution of Electrical Engineers,

London, United Kingdom and Society of Automotive Engineers, USA, numéro ISBN 0

85296 0131.2001.

[ABD 11] **F.ABDOUNE** « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné ». *Magister en Electrotechnique, Université de Bejaia 2011.*

- [KHO 06] **S. KHOJET EL KHIL** « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée. Optimisation des pertes dans les convertisseurs reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé ». *Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2006.*
- [VID 04] **P. VIDAL** « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». *Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2004.*
- [SAL 07] **G. SALLOUM** « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation ». *Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.*
- [BAG 05] **L. BAGHLI** « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone » *Notes de cours. IUFM de Lorraine – UHP 2005.*
- [BAR 82] **P. BARRET** « Régime transitoire des machines électriques tournantes ». *Ecole supérieure d'Electricité, Eyrolles- Paris-1982.*
- [SEG 04] **F.LABRIQUE, G.SEGUIER et R.BAUSIERE,** « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », *Editions Lavoisier.*
- [ABB 06] **M.ABBAS et M.MECHENTEL** « Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne ». *Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie 2006.*
- [CHA 83] **J. CHATELAIN** « Machines électriques tournantes ». *Edition Dunod, tome1, 1983.*
- [KHA 05] **M.KHALFALLAH, A.EL AFIA, A.SAAD, et J.GHOULI,** « Etude comparative des performances de la modulation sinusoïdale régulière et la modulation vectorielle d'un onduleur à MLI », *IEEE Transaction, Mai 2005.*
- [D 3643] **J.P.LOUIS et C.BERGMANN,** « Commande numérique : régimes intermédiaires et transitoires », *Techniques de l'ingénieur D 3 643.*

- [SIA 08] **Z.SIAVASH** «Modeling and simulation of vehicular power systems »*Master's thesis in the International master's 'Program 'Electric Power Engineering' Chalmers university OF technology Göteborg, Sweden, 2008.*
- [BOU 09] **F.BOUMARAF** « Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation » *Magister en électrotechnique, Université de Batna 2009.*
- [DEL 98] **F.DELFOSSE** « Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique » *Ingénieur, Université de Liège 1998.*
- [BEL 12] **N.BELAZI** « Estimation de l'état de charge (soc) et de l'état de santé (soh) d'une batterie lith voitures électriques » *Ingénieur, Ecole de technologie supérieure université du Québec 2012.*

ANNEX

Paramètres de la MADA

Puissance : $P = 37 \text{ kW}$

Tension statorique nominale : $U_{sn} = 400 \text{ V}$

Vitesse de rotation nominale : $N = 1500 \text{ tr/mn}$

Résistance de phase statorique : $R_s = 0.08233 \Omega$

Résistance de phase rotorique : $R_r = 0.0503 \Omega$

Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.027834 \text{ H}$

Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.027834 \text{ H}$

Inductance mutuelle : $M = 0.02711 \text{ H}$

Nombre de pair de pôles : $P = 2$

Moment d'inertie : $J = 0.37 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Coefficient des frottements : $F = 0.02791 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$

Couple électromagnétique nominal: $C_{em} = 235.66 \text{ N}\cdot\text{m}$

Dimensionnement des régulateurs

Régulateurs courant (PI)

Coefficient de proportionnalité statorique	$K_{PS} = 3.84$
Coefficient d'intégration statorique	$K_{IS} = 246.98$
Coefficient de proportionnalité rotorique	$K_{PR} = 3.84$
Coefficient d'intégration rotorique	$K_{IR} = 150.85$

Régulateurs vitesse (flou)

Gain de l'erreur de vitesse	$G_e = 0.02$
Gain de la variation d'erreur	$G_{\Delta e} = 0.001$
Gain de la variation de commande	$G_{\Delta U} = 5000$

Paramètres du véhicule

Masse du vehicule	$M_V = 1150 \text{ (kg)}$
Coefficient de resistance au roulement	$C_r = 0.015$
Coefficient de penetration dans l'air	$C_x = 0.32$
Section frontale du vehicule	$S_f = 2.5 \text{ (m}^2\text{)}$
Vitesse du vehicule	$V_V = \text{cycle (m/s)}$
Vitesse du vent	$V_w = 0 \text{ (m/s)}$
Gravitation	$g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
Angle de la pente	$\alpha = 10^\circ$
Densité volumique de l'air	$\rho = 1.28 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Rayon des pneumatiques	$r = 0.33 \text{ (m)}$

Résumé

Cette étude présente des stratégies linéaires et non-linéaires de contrôle appliquées à l'asservissement en vitesse d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dont les enroulements statoriques et rotoriques sont reliés à des onduleurs de tensions à Modulation de Largeur d'Impulsion indépendants. Nous avons choisi de répartir les puissances actives entre le stator et le rotor suivant un certain rapport de proportionnalité. Cela nous conduit à garantir, en régime permanent, une répartition des pulsations statoriques et rotoriques. Cette répartition est assurée dans un premier temps par deux régulateurs de pulsations réparties, et dans un deuxième temps par le biais des angles de transformation directement. Nous développons ensuite deux modèles analytiques de la MADA : le premier exprime les courants, et les simulations des stratégies de contrôle linéaire (contrôle vectoriel), et non-linéaire (contrôle par logique floue), démontrent un bon découplage entre l'axe magnétisant et l'axe du couple. Une validation expérimentale est présentée. Les premiers résultats expérimentaux montrent le bon contrôle de l'état magnétique de la machine, ainsi que la répartition des puissances désirées à travers les pulsations.

Abstract

This study deals with linear and non-linear control strategies applied to the rotation speed feedback of a doubly fed induction machine (DFIM), whose stator and rotor windings are connected to two Pulse Width Modulation voltage source inverters. We choose to distribute the active powers between the stator and the rotor following a certain proportionality ratio. This leads to guarantee, in steady state operation, a stator and rotor angular frequencies sharing. This distribution is initially assured by two shared angular frequencies controllers and in a second time by the means of the Park transformation angles directly. Two models are established: the first express the currents, and the second is linked with the fluxes.

The simulations results of the linear control (field oriented control), and non-linear control (sliding mode control), show a good independence between the main flux and the torque. An experimental validation is also presented. The results presented show the satisfactory DFIM flux control. Special attention is paid to the active power dispatching.