

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Thème

La commande prédictive appliquée aux véhicules électriques

Réalisé par :

BRAHAMI SOFIANE
Electrotechnique industriel

HAMOUDI CHAWKI
Commande électrique

Encadré par:

Mr : K.OUARI

Les jurys :
Mr.AZIB
Mr.KASDI

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Nous tenons à remercier éternellement le dieu tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier nos familles et nos amis d'avoir été à nos côtés.

Ainsi, Nous tenons à remercier notre promoteur Mr K.OUARI d'avoir suivi notre travail et ses conseils avisés.

Nous souhaitons aussi remercier toutes les personnes qui de près ou de loin, ont permis à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*À ma mère et mon père qui n'ont pas cessé de m'encourager
tout au long de mes études pour que j'arrive à ce jour-là.*

*Ils sont les plus chers à mon cœur, avec toute ma
gratitude,*

À mes chères sœur et frères,

À tous mes amis,

À toute ma famille.

Chawki. HAMOUDI

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A la mémoire de mon cher père,

À ma chère mère et ma chère sœur qui n'ont pas cessé de m'encourager tout au long de mes études pour que j'arrive à ce jour-là.

Ils sont les plus chers à mon cœur, avec toute ma gratitude.

Sofiane. BRAHAMI

Sommaire

Liste des symboles.....	I
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	V
Abréviation.....	VI
Introduction générale	VII

Chapitre I : Etat de l'art sur les véhicules électriques.

I.1. Introduction.....	1
I.2. Historique.....	1
I.3. Définition d'un Véhicule Electrique.....	2
I.4. Structure de la chaine de traction d'un véhicule électrique.....	2
I.4.1. La batterie	3
I.4.1.1. Les différents types de batteries.....	5
I.4.2. L'électronique de puissance dans un véhicule électrique.....	7
I.4.2.1. Le convertisseur alternatif/continu (redresseur).....	7
I.4.2.2. Les onduleurs (DC-AC).....	8
I.4.2.3. Les hacheurs (DC-DC).....	8
I.4.2.4. Le chargeur.....	8
I.4.3. Le moteur électrique.....	9
I.4.3.1. Le moteur à courant continu.....	9
I.4.3.2. Le moteurs asynchrone.....	9
I.4.3.3. Le moteur synchrone.....	9
I.5. Différentes configurations de véhicule électrique.....	11
I.5.1. Véhicule électrique monomoteur.....	11
I.5.2. Véhicule électrique multi-moteurs.....	12
I.6. Les différents modes de charge pour véhicules électriques	14
I.6.1. Prise domestique	14
I.6.2. Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection.....	14
I.6.3. Prise spécifique sur un circuit dédié	15
I.6.4. Connexion courant continu	15
I.7. Performances des véhicules électriques	15
I.7.1. La distance parcourue avant d'avoir à recharger le véhicule électrique	15
I.7.2. La vitesse maximale d'un véhicule électrique	15

Sommaire

I.7.3. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques	16
I.7.4. La durée de vie d'une batterie et le coût de remplacement	16
I.7.5. La performance d'un véhicule électrique en hiver	16
I.8. Avantages et inconvénients de la voiture électrique.....	16
I.8.1. Avantages.....	16
I.8.2. Inconvénients.....	17
I.9. Conclusion.....	18

Chapitre II : modélisation et simulation de la motorisation utilisée

II.1. Introduction.....	19
II.2 Analyse dynamique du véhicule	19
II.3. La chaine de traction du véhicule électrique.....	21
II.3.1.Modélisation du moteur synchrone à aimants permanents.....	22
II.3.1.1.Description.....	22
II.3.1.2.Hypothèses simplificatrices	22
II.3.1.3.Mise en équations de la MSAP dans le repère (a,b,c).....	22
II.3.1.4. Transformation de Park.....	25
II.3.1.5.Expression de la puissance et du couple électromagnétique	26
II.3.1.6.Schéma fonctionnelle de la MSAP	27
II.3.1.7.Mise sous forme d'équation d'état.....	27
II.3.1.8.MSAP autopiloté.....	28
II.3.2.Alimentation de la MSAP par onduleur de tension à commande M.L.I.....	29
II.3.2.1.Modélisation de l'onduleur	29
II.3.2.2.Résultats de simulation de la MSAP autopiloté avec l'association de l'onduleur M.L.I	31
II.3.2.3. Interprétation des résultats	34
II.4.Conclusion	34

Chapitre III : Application de la commande prédictive au véhicule électrique

III.1. Introduction	35
III.2.Historique	35

Sommaire

III.3. Principe de la commande prédictive.....	36
III.3.1. Les concepts de la commande prédictive	37
III.3.2. Les différents types d'algorithmes prédictifs.....	39
III.3.2.1. Cas linéaire.....	39
III.3.2.2. Cas non-linéaire.....	39
III.4. Avantages et inconvénients de la commande prédictive.....	39
III.5. Commande prédictive généralisée.....	40
III.5.1. Application de la commande prédictive généralisée non linéaire au MSAP	40
III.5.1.1. La fonction de coût.....	40
III.5.1.2. Degré relatif	41
III.5.1.3. Dérivée de Lie.....	41
III.5.1.4. Schéma bloc de la commande prédictive non linéaire généralisée	44
III.5.1.5. Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée d'un MSAP.....	45
III.5.2. Résultats de simulation.....	46
III.6. Commande prédictive du véhicule électrique.....	53
III.6.1. Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée du VE...53	
III.6.2. Résultats de simulation de la NGPC au véhicule électrique	54
III.6.3. Interprétation des résultats.....	57
III.7. Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Annexes.....	59
Références bibliographiques.....	60

Liste des symboles

m_{veh} : Masse du véhicule.

v_{veh} : Vitesse de la voiture .

F_{trac} : Forces de traction fournie par les sources d'énergie.

P_{veh} : Puissance du véhicule .

f_r : Coefficient de frottement .

F_{aero} : Force de résistance aérodynamique .

S_f : Section frontale .

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions des phases statoriques.

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : Courants des phases statoriques.

$\Theta_{as}, \Theta_{bs}, \Theta_{cs}$ flux totaux à travers les bobines statoriques.

Θ_f : Flux des aimants.

I_{ds}, I_{qs} : Courants statoriques d'axe direct et en quadrature.

$[R_s]$: Résistance rotorique ;

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique.

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator .

θ_m : La position mécanique du rotor par rapport au stator.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge) .

$[p(\theta)]$: Matrice de transformation de Park .

P : Nombre de pair de pôles .

J : Inertie totale des parties tournantes .

Ω : Vitesse mécanique de rotation.

L_d : Est l'inductance cyclique direct.

L_q : Est l'inductance cyclique quadratique;

(d,q) : Référentiel lié au champs tournant.

X : Vecteur des états.

Liste des symboles

$f(x)$: Matrice fondamentale qui caractérise le système.

G : Matrice d'entrée.

y : Vecteur d'état.

$h(x)$: Vecteur de sortie.

H_s : Champs statorique.

H_r : Champs rotorique.

C_1, C_2, C_3 : Signaux délivrés par le capteur de vitesse.

\mathfrak{J} : Fonction cout.

Y_r : Sortie de référence.

$L_f h(x)$: Dérivé de Lie.

τ_r : Est le temps de prédiction.

Ω_r : Vitesse rotorique.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Exemple de la réalisation : « La Jamais contente » en 1899.....	2
Figure I.2 : Structure de la chaîne de traction dans un VE	3
Figure I.3 : La vue interne d'une batterie.....	3
Figure I.5 : Batterie Li-Ion.....	6
Figure I.5 : Chaîne de traction monomoteur.....	11
Figure 1.6 : Exemples schématiques de motorisation monomoteur.....	12
Figure 1.7 : Véhicule multi-moteurs.....	12
Figure I.8 : Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs.....	13

Chapitre II

Figure II.1 : Forces agissantes sur un véhicule se déplaçant sur une pente.....	19
Figure II.2 : Chaîne de traction du VE avec MSAP.....	21
Figure II.3 : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.....	23
Figure II.4 : Machine équivalente au sens de Park.	25
Figure II.5 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.....	27
Figure II.6 : Structure des machines synchrones autopilotées.....	29
Figure II.7 : Schéma équivalent de l'onduleur.....	30
Figure II.8 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale.....	31
Figure II.9 : Vitesse mécanique du moteur.....	31
Figure II.10 : Couple électromagnétique	32
Figure II.11 : Les courants statoriques	32
Figure II.12 : Courant direct.....	33
Figure II.13 : Courant quadratique.....	33
Figure II.14 : Tension d'alimentation.....	33

Chapitre III

Figure III.1 : Philosophie de la commande prédictive	36
Figure III.2 : Schéma de principe de la commande prédictive	37
Figure III.3 : Stratégie de la commande prédictive.....	38
Figure III.4 : Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini.....	39
Figure III.5 : Schéma bloc de la commande prédictive non linéaire d'un MSAP.....	45
Figure III.6 : Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée d'un MSAP.....	46

Liste des figures

Figure III.7 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C.....	46
Figure III.8 : Erreur de vitesse.....	47
Figure III.9 : Les courants statoriques.....	47
Figure III.10 : Le couple électromagnétique.....	47
Figure III.11 : Le courant direct.	48
Figure III.12 : Le courant quadratique.....	48
Figure III.13 : Zoom de la tension d'alimentation du moteur.....	48
Figure III.14 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C.....	50
Figure III.15 : Erreur de vitesse.....	50
Figure III.16 : Les courants statoriques.....	50
Figure III.17 : Le couple électromagnétique.....	51
Figure III.18 : Le courant direct.	51
Figure III.19 : Le courant quadratique.....	51
Figure III.20 : Zoom de la tension d'alimentation du moteur.....	52
Figure III.21 : Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée du VE.....	53
Figure III.22 : Schéma bloc du VE utilisé.....	54
Figure III.23 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C associé au VE.....	54
Figure III.24 : Erreur de vitesse.....	55
Figure III.25 : Les courants statoriques.....	55
Figure III.26 : Le couple électromagnétique.....	55
Figure III.27 : Le courant direct.....	56
Figure III.28 : Le courant quadratique.....	56
Figure III.29 : Zoom de la tension d'alimentation du moteur.....	56

Liste des tableaux

Tableau I.1. Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles	7
Tableau I.2 : Comparaison des différents Moteurs.	10

Abréviation

VE : Véhicule électrique.

FEM : Force électro motrice.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

IGBT : Transistor bipolaire à grille isolée.

BV : Boite vitesse.

MG : Moteur gauche.

MD : Moteur droit.

MSAP : Moteur synchrone à aimants permanents.

PID: Proportionnel intégrateur dérive.

N.M.P.C : La Commande Prédictive non linéaire.

N.G.P.C : La Commande Prédictive non linéaire généralisée.

G.P.C : La commande prédictive généralisée.

M.B.P.C : La commande prédictive à base du modèle.

P.F.C : La commande prédictive fonctionnelle.

Introduction générale

À la fin du 19^{ème} siècle est apparue une invention technologique majeure qui a considérablement modifié les sociétés de nombreux pays au cours du 20^{ème} siècle. Cette invention n'est autre que le véhicule (automobile). À l'origine, l'automobile a d'abord été à propulsion électrique, mais avec la découverte de nombreux puits de pétrole, le véhicule à moteur thermique s'est rapidement imposé au début du 20^{ème} siècle. Ce véhicule utilise donc le pétrole comme vecteur d'énergie. L'automobile s'est ainsi progressivement imposée dans les pays développés comme le principal mode de transport pour la circulation des individus et des marchandises. Son industrie a été l'un des secteurs les plus importants et les plus influents depuis la fin de la seconde guerre mondiale et son essor mondial a été spectaculaire [38]. Malgré le développement de la voiture et la place qu'elle occupe au sein de la société, elle fait toute fois l'objet de critique importante surtout dans cette conséquence environnementale. L'automobile doit faire face désormais à la raréfaction de cette énergie et à la pollution causée par celle-ci.

Afin de remédier à ce problème et de trouver une solution innovante et durable, ingénieurs et constructeurs s'activent à trouver une alternative à cette énergie polluante tout en gardant les mêmes avantages que propose le véhicule conventionnel (thermique). De nos jours, plusieurs alternatives ont été présentées par les acteurs du secteur automobile, tel que le fonctionnement à l'essence éthanol ou le fonctionnement hybride (combinaisons de deux technologies électrique et thermique) et enfin le tout électrique qui utilise les batteries comme source d'énergie [39].

Le véhicule tout électrique est un véhicule qui utilise un moteur électrique pour sa traction et les batteries comme sources d'énergie. L'absence du dispositif d'échappement sur ce véhicule montre que l'on peut le classer dans la catégorie des non polluants (zéro émission de gaz à effet de serre), si ce n'est quelques problèmes liés aux systèmes de stockage d'énergie qui laissent à désirer, le VE peut ainsi se vanter d'être l'alternative attendue aux problèmes de pollution.

Les véhicules électriques d'aujourd'hui utilisent des machines spécifiques, et parmi elles on trouve, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus particulièrement les machines synchrones à aimants permanents, à réluctance variable et les machines asynchrones

La machine synchrone à aimants permanents est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inerties ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotique, servomoteur, entraînement à vitesse variable ...etc.). Mais le modèle du moteur synchrone à aimants permanents correspond à un système multi variable et fortement couplé, c'est pour cette raison que sa commande est plus complexe que celle d'une MCC.

Introduction générale

Parmi les nombreuses méthodes de commande développées dans la littérature technique, la commande vectorielle par ‘orientation du flux’ de la machine synchrone à aimants permanent permet d’envisager des variateurs de vitesse à courant alternatif très compétitifs et aussi performants que les variateurs à courant continu. En revanche, lorsque des performances sévères sont requises, les commandes classiques montrent vite leurs limites. En effet l’une des principales difficultés rencontrées dans la commande des procédés est la présence de retard dus essentiellement aux caractéristiques physiques du système à contrôler (constante de temps d’éléments chauffants, acquisition-conversion de signaux...). Ces retards sont souvent la cause de problèmes rencontrés lors de l’application de commande classique. C’est pour résoudre type de problème qu’a été introduite la notion de commande prédictive.

L’idée à la base de la commande prédictive généralisée est de calculer une séquence de commandes future de telle façon qu’une fonction de coût à plusieurs composantes soit minimale sur un certain horizon de prédiction. L’indice à optimiser est une fonction quadratique qui mesure la distance entre la sortie prédite du système et une séquence de référence, plus une fonction quadratique qui mesure l’effort de commande.

Notre travail consiste à appliquer la commande prédictive non linéaire généralisée à la machine synchrone à aimant permanent dans les véhicules électriques en vue de montrer la poursuite des trajectoires de référence et le rejet de perturbation. Pour cela on répartira notre travail sur trois chapitres. Le premier chapitre fera l’objet d’une recherche bibliographique en présentant l’état de l’art du véhicule électrique : en premier lieu un bref historique du véhicule électrique sera présenté, quelques architectures utilisées seront citées, les différentes motorisations qui peuvent mouvoir le véhicule seront énoncées tout en soulignant les sources d’énergie nécessaires à son alimentation.

Dans le deuxième chapitre, on étudie la dynamique du véhicule électrique, ainsi nous présentons la chaîne de traction de ce dernier, nous ferons aussi une modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent autopiloté.

Le troisième chapitre présente la commande prédictive ou nous nous intéressons plus particulièrement à la commande prédictive non linéaire généralisée, on expose l’historique de cette stratégie de commande, et ses bases théoriques. Par la suite, en guise de validation de la théorie exposée, nous élaborons un programme de simulation sous Simulink/Matlab de la dite commande. Des résultats obtenus par simulation permettent de mettre en exergue les performances de la commande NGPC sur une MSAP, ainsi nous présentons l’application de la NGPC au véhicule électrique.

Une conclusion finale vient, couronner l’ensemble des chapitres présentés dans ce travail.

I.1. Introduction

Au début du 20^{ème} siècle la voiture à essence connaît un succès important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. C'est pourquoi jusqu'à nos jours la voiture à essence s'est développée. La voiture électrique ne fait donc pas encore partie de notre entourage mais elle devient de plus en plus sollicitée grâce à la constante hausse du pétrole et la médiatisation de la réduction du rejet de CO₂ [1]. De nombreuses entreprises et d'écologistes veulent développer la voiture électrique au niveau de l'autonomie des batteries et de l'utilisation maximale des énergies propres. Afin que celle-ci deviennent réellement plus propre et plus avantageuse que les voitures à essence [2]. Dans ce chapitre nous présentons une introduction générale et un bref historique sur les véhicules électriques, ainsi les différents éléments constituent un véhicule électrique. On présentera aussi les différents architectures ainsi les avantages et les inconvénients des VEs.

I.2. Historique

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La Première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme D'affaires écossaises. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique. Vers 1838 l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. Ces deux inventeurs n'utilisaient pas de batterie rechargeable. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui pourrait être la première au monde.

En 1899 en Belgique, une société construit "La Jamais Contente " la première auto électrique à dépasser les 100 km/h. L'auto était pilotée par le belge Camille Jenatzy, et munie de pneus Michelin. Elle était en forme de torpille. Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en Circulation sont électriques, le reste étant des autos à essence et à vapeur. Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les Ford à essence. En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors). Dès 1988, le président de GM Roger Smith lance un fond de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui va être produite entre 1996 et 1998. En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride. De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV. En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la

sortie de sa voiture hybride Kango Electrode mais abandonne la production après environ 500 véhicules. [3]



Figure I.1 : Exemple de réalisation : « La Jamais contente » en 1899.

I.3. Définition d'un Véhicule Electrique

Un Véhicule Electrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue. [4]

1.4. Structure de la chaine de traction d'un véhicule électrique

La chaine de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaine de traction, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche. Dans cette partie, on essaiera de présenter les organes de la traction électrique en justifiant le choix de chaque organe.

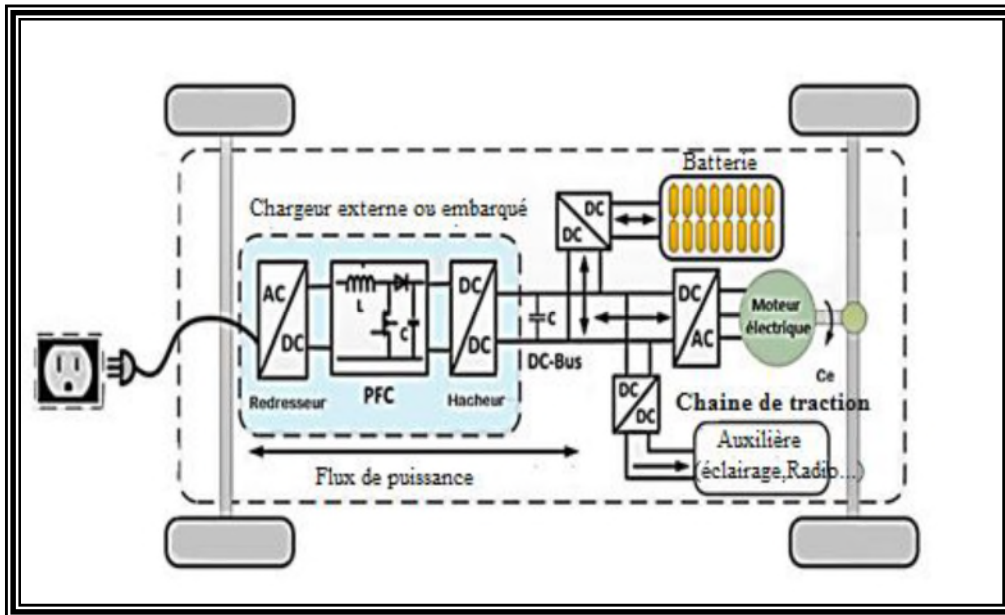


Figure I.2 : Structure de la chaîne de traction dans un VE [5].

I.4.1. La batterie

La batterie est un système de stockage d'électricité sous forme chimique, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique, afin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique. La figure I.3 représente la vue interne d'une batterie utilisée dans les véhicules électriques.

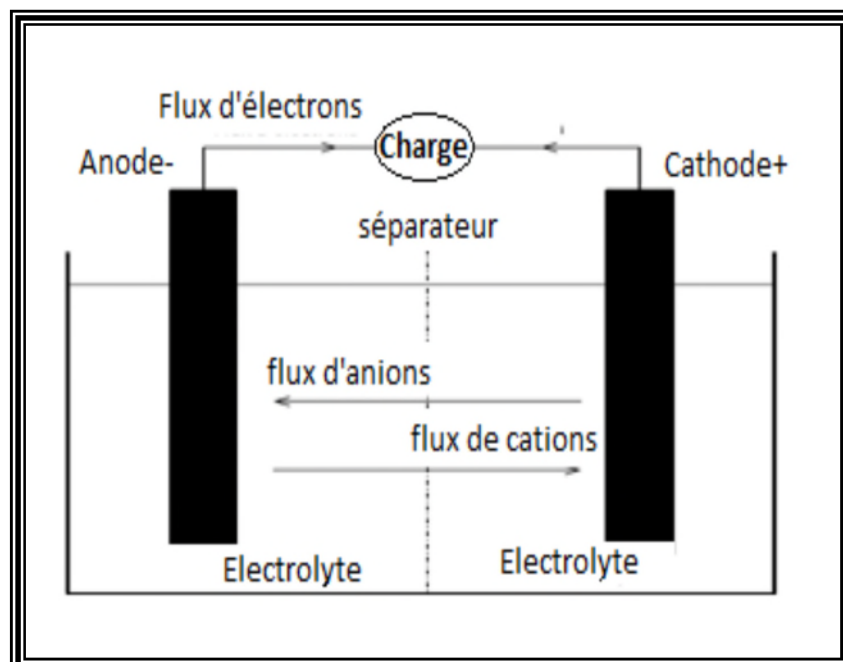


Figure I.3 : La vue interne d'une batterie.

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [6]. Il existe des batteries de différentes formes (structure ou technologie), par contre l'utilisation de ces différentes technologies dans les voitures électriques doit respecter certaines conditions, parmi lesquelles :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance / poids en W/kg) permettant des accélérations importantes.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles charge/ décharge, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Entretien faible et recyclable [7].

On distingue deux grandes familles de systèmes de stockage électrique direct :

a. Les accumulateurs

Ils stockent l'énergie par transformation de l'énergie chimique. Les accumulateurs sont constitués de deux couples électrochimiques composés de deux électrodes, immergées dans un électrolyte. Dès qu'interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui échangent des électrons, les ions générés circulent dans l'électrolyte. Pour disposer d'une grande énergie stockée, il faut d'une part un nombre important d'électrons échangés, une réaction associant, un élément très oxydant et un élément très réducteur et d'autre part, il faut une parfaite réversibilité des processus électrochimiques ainsi que des matériaux de faible masse ou volume molaire [8].

b. Les super-condensateurs

Ils stockent l'énergie électrique sous forme électrostatique, Le principe général de fonctionnement des super-condensateurs repose sur la formation d'une double couche électrochimique à l'interface d'un électrolyte et d'une électrode polarisable de grande surface spécifique. L'application d'une différence de potentiel aux bornes du dispositif entraîne le stockage ionique de charges aux deux interfaces électrode-électrolyte qui se comportent comme deux condensateurs en série. Les super-condensateurs sont caractérisés par une énergie spécifique 10 à 20 fois plus faible que celle des accumulateurs, mais leur puissance spécifique peut être jusqu'à 10 fois plus élevée que celle des batteries au plomb par exemple [9].

I.4.1.1. Les différents types de batteries

Les batteries les plus utilisées dans les véhicules électriques sont celles constituées d'accumulateurs. Il existe différents types de batteries disponibles à l'heure actuelle sur le marché mais aucune d'elles ne parvient à égaler ou surpasser la densité énergétique des carburants fossiles.

a. La batterie Plomb Acide

C'est la plus ancienne des technologies de batteries et la moins onéreuse actuellement. Inventée en 1859 par le français Gaston Planté et améliorée en 1881 grâce au luxembourgeois Henri Owen Tudor qui la rend plus robuste et efficace en remplaçant les feuilles de plomb baignant dans de l'acide sulfurique par des plaques de plomb enduites d'une pâte active. Lors de sa charge une batterie au plomb dégage de l'oxygène et de l'hydrogène, la boîte n'étant pas fermée hermétiquement, la batterie doit être utilisée à plat et le niveau d'eau ajusté régulièrement. D'autre part les vapeurs et/ou projections d'acide sulfurique provoquent de la corrosion si l'emplacement de la batterie n'est pas entretenu (avec de l'eau et bicarbonate de soude). Ce type de batterie supporte très mal la décharge complète et la surcharge, elles sont faites pour rester chargées en permanence.

b. Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd)

C'est une technologie très ancienne aussi, inventée par le suédois Waldemar Jungner en 1899. Elle était très répandue pour les appareils électriques nécessitant un courant électrique important comme les téléphones portables ou les appareils photos numériques. Ce type de batterie a une longévité assez importante (environ 1000 cycles) Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigés pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour [10].

c. Les batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride Ni-Mh)

C'est la technologie qui a succédé aux batteries Ni-Cd, commercialisée en 1990. Ces batteries ont une architecture similaire aux batteries Ni-Cd pour une densité énergétique doublée mais une résistance supérieure qui impose une phase de rodage des éléments pour débiter de forts taux de courants. C'est une technologie assez fragile car ne supportant pas la surcharge. Un avantage certain de cette technologie est qu'elle n'a pas d'effet mémoire mais a une capacité d'autodécharge importante. Ce type de batterie est adapté pour une transition vers les voitures électriques mais sa durée de vie n'est pas satisfaisante. La technologie Ni-Mh est la mieux adaptée pour les véhicules électriques grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion.

d. Les batteries Lithium-ion (Li-ion)

Bien que le principe en soit connu depuis les années 1980 les premiers éléments rechargeables au lithium n'ont été commercialisés qu'en 1991. Cela à cause du caractère

instable du lithium métallique pendant la phase de charge. Le problème a été résolu en utilisant des ions de lithium. Le lithium-ion (Li-ion) ne présente pas de danger si certaines précautions sont prises lors de la charge. En revanche il y a un risque de surchauffe et d'explosion si elles sont chargées dans de mauvaises conditions, la plupart des fabricants équipent donc leurs blocs de batteries de circuits de protection. Avec un faible taux de décharge dans le temps et sans effet mémoire, cette batterie offre une densité énergétique importante (le double du Ni-Mh) mais une durée de vie inférieure aux batteries Ni-Mh[10].



Figure I.4 : Batterie Li-Ion.

e. Les batteries Lithium-ion Polymère (Li-po)

Depuis 1999 est apparue une nouvelle génération d'accumulateurs Li-ion : Le Lithium ion Polymère (Li-po). L'électrolyte est un polymère gélifié qui permet d'obtenir des éléments très fins et plats pouvant prendre toutes les formes possibles. Encore chère aujourd'hui cette technologie récente est promise à beaucoup d'avenir. Elle doit, à terme, revenir moins chère à la réalisation que le Li-ion classique. Le tableau I.1 présente les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques.

Tableau I.1. Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles [11].

Batterie	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion	Li-po
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200	100-130
Nombre de cycles (Charge décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200	400 à 600
Temps de charge	6 à 12h	1h à 2h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
Température de Fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C

La batterie influe directement sur les performances et l'autonomie du véhicule électrique. Aujourd'hui, l'invention des batteries lithium ou li-ion a permis d'améliorer les caractéristiques techniques des véhicules électriques puisque le lithium permet de stocker énormément de charges électriques sous forme d'ions sur les électrodes et de manière très compacte. Cette dernière assure une autonomie de 100 à 200 km environ pour un temps de charge d'une demi-heure à plusieurs heures.

I.4.2. L'électronique de puissance dans un véhicule électrique

Dans la plupart des véhicules électriques, on trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif. Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques de convertisseurs électroniques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement.

De ce fait, on pourra trouver à bord des véhicules [12] :

- Un chargeur adapte le courant apporté par la prise de branchement à ce que la batterie électrique peut recevoir.
- Des convertisseurs de courant continu fourni par la batterie en courant alternatif dont le moteur du véhicule électrique a besoin, que l'on appelle onduleurs.
- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), que l'on appelle redresseurs.
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu de tension différenciée (DC-DC), que l'on appelle hacheurs.

I.4.2.1. Le convertisseur alternatif/continu (redresseur)

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforment une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu. Nous pouvons distinguer des redresseurs à diodes, des redresseurs à thyristors, des redresseurs mixtes associant des diodes

et des thyristors, des redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui associent des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes. Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique. En énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité [13].

I.4.2.2. Les onduleurs (DC-AC)

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

La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielles ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montés en antiparallèle et commandés selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW)).

I.4.2.3. Les hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

I.4.2.4. Le chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique, c'est-à-dire monophasée ou triphasée, à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant. Cette phase de fonctionnement obéit à des valeurs limites (tension, intensité, temps, température, etc.) [14]. Les principales notions, définissant les différents types de chargeur sont présentés selon leur emplacement et leur niveau de puissance :

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

I.4.3. Le moteur électrique

Les perspectives de progrès des moteurs électriques sont également considérables : les moteurs utilisés aujourd'hui ont été conçus pour des usages standards de type industriel, comme moteurs -outils. Les perspectives d'amélioration du poids, de l'encombrement et de la performance des moteurs des voitures électriques sont donc considérables. Les différentes technologies de machines électriques dans le domaine automobile sont les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents ou synchrones à réluctance variable. Les moteurs à courant continu sont devenus obsolètes pour cette application avec les progrès de la commande des machines.

I.4.3.1. Le moteur à courant continu

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en général, les 0,3 à 0,5 kW/kg ; alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre de 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application [15].

I.4.3.2. Les moteurs asynchrone

Le moteur asynchrone est équivalent à un transformateur dont le secondaire est tournant, les courants du stator vont créer un champ statorique tournant, qui va induire au rotor des courants qui vont à leur tour créer un champ rotor, tournant à la même pulsation que celui du stator, et c'est finalement l'interaction entre ces deux champs qui va créer un couple. Il est donc nécessaire d'apporter de la puissance réactive pour magnétiser le fer, d'où un mauvais facteur de puissance et des pertes joules relativement élevées au stator. De plus des pertes joules au rotor sont nécessaires pour créer du couple. Pour la même raison, un moteur asynchrone est plus lourd et plus encombrant qu'un moteur synchrone [16].

I.4.3.3. Le moteur synchrone

Le moteur synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur.

Il se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor [17]. Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons deux types les plus fréquents dans la littérature :

a. Le moteur synchrone à aimants permanents

C'est le moteur la plus populaire pour l'entraînement des véhicules électriques car, il

offre des meilleures performances en termes de rendement, de couple et de puissance massique. De plus, il demande peu de maintenance et il est relativement facile à commander. Cependant le coût de production, dépendant essentiellement de la qualité des aimants, est parmi les plus élevés [18].

b. Le moteur synchrone à réluctance variable

Le moteur synchrone à réluctance variable gagne l'intérêt des constructeurs car c'est un moteur solide, facile à contrôler, sans balais donc sans usure ou entretien, et pouvant avoir de bonnes performances en termes de couple maximum, de rendement et de facteur de puissance. Cependant, pour obtenir ces performances, il est nécessaire de rendre maximal le rapport des inductances extrêmes mais cette technologie reste délicate à réaliser. De plus, n'étant pas encore standardisée, son coût reste élevé. Le tableau I.2 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des principaux types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques. A ce jour, toutes les voitures commercialisées utilisent des moteurs synchrones (à aimants permanents ou à rotor bobiné), sauf la Tesla Roadster qui utilise un moteur asynchrone. Le moteur synchrone à aimants permanents est plus coûteux mais donne une bonne autonomie, le moteur synchrone à rotor bobiné présente un très bon rapport puissance/prix, et l'asynchrone est simple et donne un excellent rapport puissance/prix de fabrication.

Tableau I.2 : Comparaison des différents Moteurs (+ : avantage 0 : neutre - : désavantage) [12].

Types et caractéristiques des moteurs	Moteur à courant continu	Moteur à induction permanents	Moteur Synchrone à aimants	Moteur à Réluctance variable
Rapport puissance/poids	0	+	++	+
Vitesse de rotation max	-	+	+	+
Rendement(%)	80-85	85-90	90-95	90-94
Contrôlabilité	++	+	+	+
Maintenance	-	+	0	+
Coût du moteur	-	++	-	+

Dans cette étude, on s'intéresse au moteur synchrone à aimants permanents car c'est le plus favorisée en termes de critères technologiques (tel que le meilleur rendement en mode générateur et moteur), en plus il a un couple massique plus élevé. Le véhicule électrique choisi dans tous ce qui suit est propulsé par deux roues motrices arrière. Chaque roue est couplée à son moteur à travers un réducteur de rapport fixe et sera commandée indépendamment.

I.5. Différentes configurations de véhicule électrique

On envisage actuellement deux types de véhicules électriques :

- Les véhicules à motorisation purement électrique : véhicules électriques ;
- Les véhicules à motorisation mixte électrique et thermique : véhicules hybrides.

Le présent chapitre ne concerne que les véhicules électriques, qui se trouvent actuellement au stade du pré série industrielle. Notons, de plus, que la motorisation hybride actuelle, outre son coût élevé, présente un rendement global faible, car l'énergie primaire subit de très nombreuses conversions (thermodynamique, mécanique, électrodynamique, électrochimique). Notre objectif, n'est pas de faire un état de la technologie des véhicules électrique, mais d'établir une liste non exhaustive de quelques ébauches de solutions aux problèmes de la motorisation d'un véhicule électrique. Cette dernière, est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multi-moteurs [9].

I.5.1. Véhicule électrique monomoteur

Le véhicule électrique monomoteur présente une seule chaîne de traction, figure I.5.

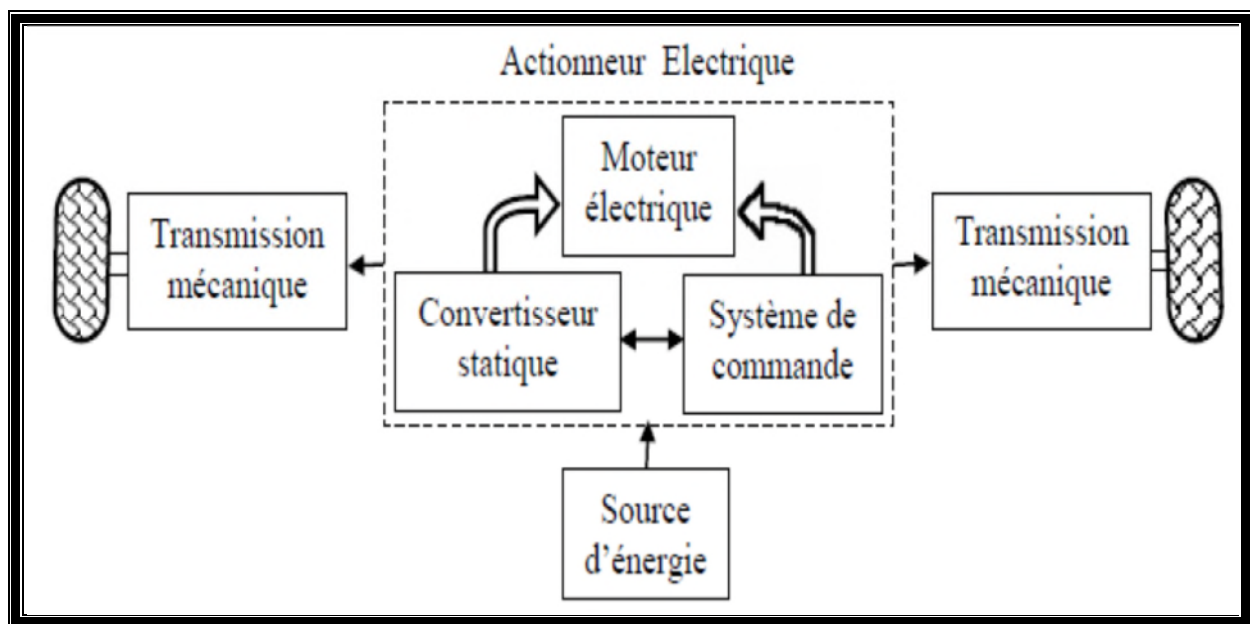


Figure I.5 : Chaîne de traction monomoteur.

La figure I.6 montre trois exemples schématiques de motorisation monomoteur [19]:

- Un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel, figure I.6.A.
- Un seul moteur électrique + embrayage + BV + différentiel, figure I.6.B.
- Un seul moteur électrique + boîte de transfert + BV + deux différentiels, I.6.C.

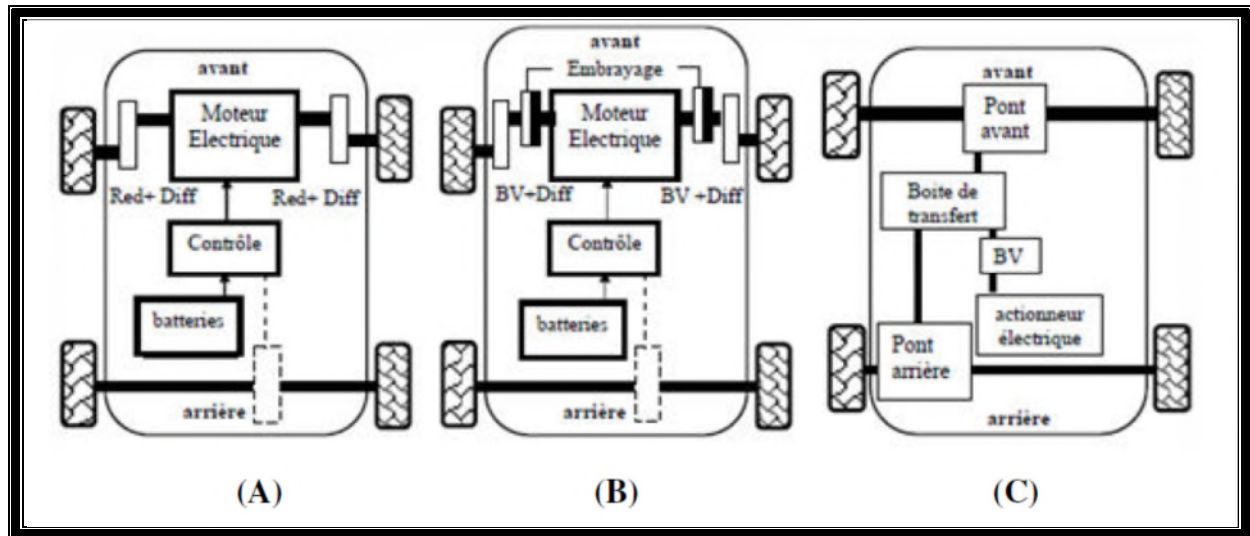


Figure 1.6 : Exemples schématiques de motorisation monomoteur.

I.5.2. Véhicule électrique multi-moteurs

Le véhicule électrique multi-moteur présente plusieurs chaînes de traction indépendantes, figure I.7. Il peut sembler a priori intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme la boîte de vitesse, l'embrayage et le différentiel mécanique.

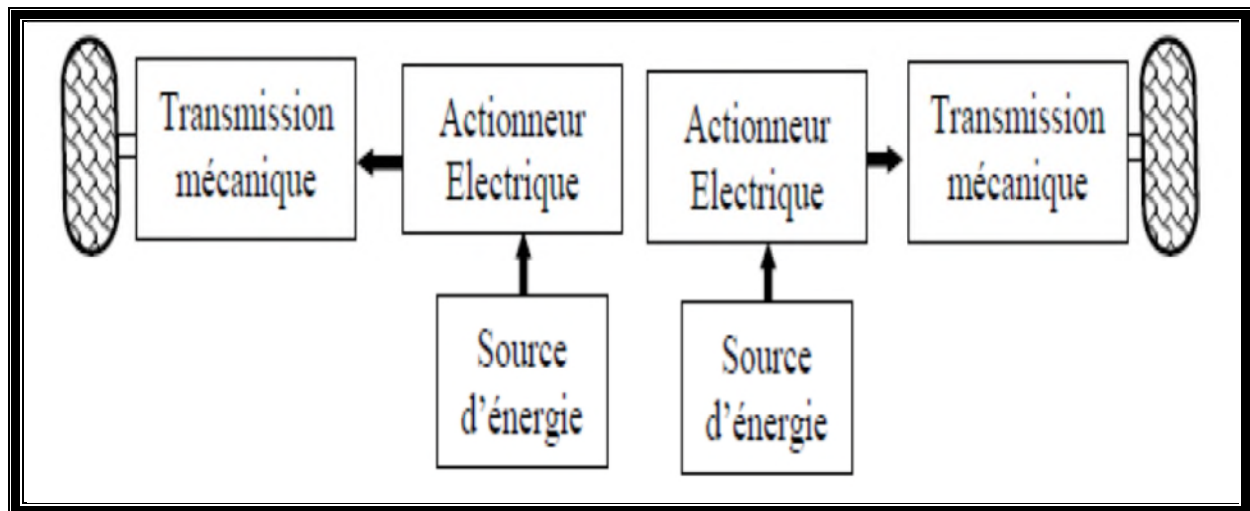


Figure 1.7 : Véhicule multi-moteurs.

On peut donc réaliser des véhicules à deux roues motrices, soit à l'arrière figure I.8.A soit à l'avant figure 1.8.B, ou encore à quatre roues motrices figure I.8.C [19].

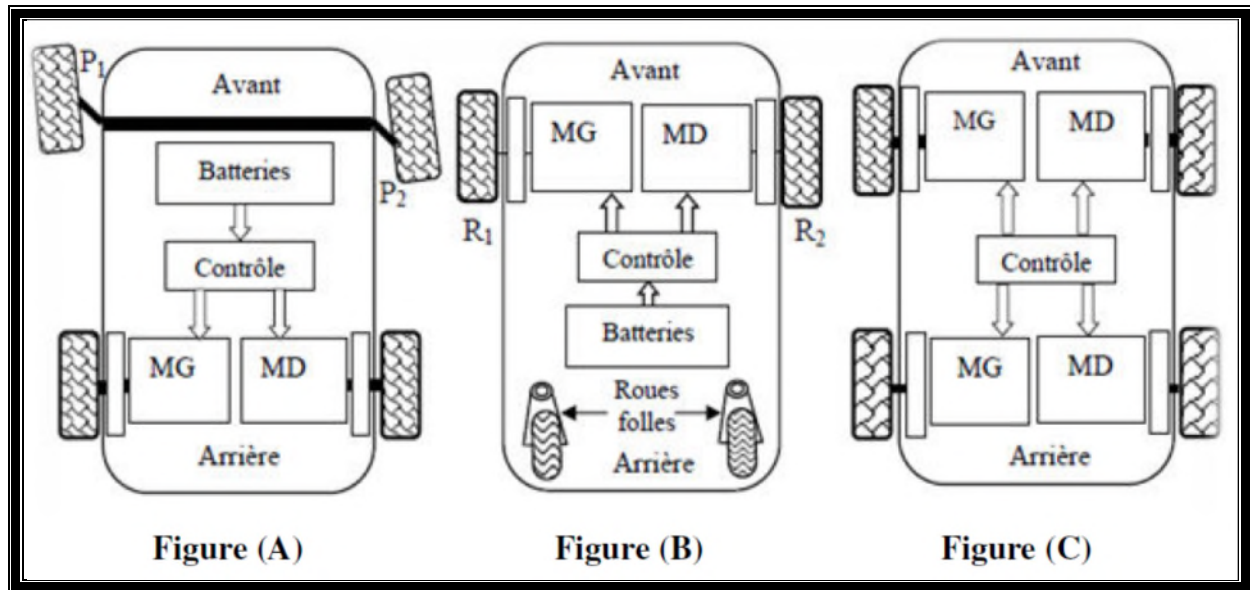


Figure I.8 : Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs.

a. Direction avec essieu brisé

C'est le principe bien connu de l'automobile figure I.8.A, les roues motrices disposées à l'arrière, et les roues directrices à l'avant possèdent chacune un axe de pivotement propre (P1 et P2) situé à une extrémité de l'essieu. La direction par essieu brisé réalise une véritable séparation des fonctions motrices et directrices. Cette séparation [20] :

- Facilite la conduite du véhicule (effort de braquage faible).
- Favorise la stabilité du véhicule (réaction produite par le choc d'un obstacle avec une roue est faible).

Cette solution présente néanmoins quelques inconvénients majeurs [4] :

- La rotation sur place est impossible (rayon de courbure est assez grand).
- La commande du braquage nécessite une mécanique sophistiquée.
- Un encombrement important : une grande partie de l'espace central du véhicule est occupé par le système de direction-propulsion.

b. Direction par roues différentielles

Ici deux roues R1 et R2 indépendantes rigides au pivotement réalisent à la fois la propulsion et la direction, l'orientation est obtenue par différence de vitesse des deux roues motrices, et l'équilibre de la plate-forme est garanti par des roues libres à l'arrière, figure I.8.B. Les roues libres seront toujours orientées de telle façon à présenter la moindre opposition au roulement sans glissement. La rigidité au pivotement des roues motrices évite tous les phénomènes de dandinement des roues directrices, c'est à dire les oscillations incontrôlées des roues autour de leur axe de pivotement, dues au passage d'un obstacle, où aux irrégularités du sol [19]. Grâce à la totale indépendance des deux roues, la configuration qui a été choisie est la structure à roues différentielles. Nous n'énumérerons pas les qualités et les défauts de chacune des configurations puisque cela serait trop long. Par contre nous

pouvons justifier le choix effectué en mentionnant les principales qualités de cette configuration [21], [22] :

- En cas de rencontre avec un obstacle ou en cas de glissement de l'une des deux roues, l'autre peut ne pas en être affectée.
- Les inerties des deux roues ne s'ajoutent pas, ce qui diminue le risque de glissement à vitesse élevée lors des virages rapides du véhicule notamment.
- Le perfectionnement de la stabilité latérale de véhicule.
- Symétrie : Ceci constitue le point fort de cette structure. La symétrie permet des performances intéressantes en rotation puisque le centre de masse est situé le plus proche au centre de l'axe des deux roues motrices.
- Un gain en mobilité grâce à un meilleur contrôle de la motricité.
- Un gain en consommation de plus de 20% grâce aux nouvelles stratégies de gestion de l'énergie.
- La génération de couple électrique est très rapide et précise, à la fois pour l'accélération et la décélération.
- De plus, la génération anti-directionnelle de couple est possible, en agissant seulement sur le signe du couple de consigne.
- Le couple moteur de chaque roue motrice peut être contrôlé indépendamment, ce qui entraîne un contrôle efficace de véhicule notamment dans les virages.
- Une flexibilité d'architecture permettant des concepts modulaires compacts.
- Prix réduit : dans un véhicule classique, on a besoin de matériels additionnels coûteux, par exemple, boîte de vitesse, actionneurs de frein et embrayage. En revanche, la commande de traction pour un véhicule électrique peut être réalisée seulement par un logiciel, donc à prix réduit et peut avoir des performances élevées.
- Réponse rapide : dans un véhicule classique, le temps de réponse est beaucoup plus lent ceci est dû au système mécanique (plus de 200ms nécessaire pour ouvrir la boîte de vitesse). Tandis que, le temps de réponse du couple d'un moteur électrique est de moins de 10ms.

I.6. Les différents modes de charge pour véhicules électriques

I.6.1. Prise domestique

C'est une prise domestique toute simple. Le véhicule électrique est branché directement sur le réseau électrique de la maison. Il n'existe que très peu de véhicules dotés d'une 'simple' prise, la Renault Twizy en fait partie. Le temps de charge s'établit entre 8 et 11 heures, dépendant de l'état du réseau électrique de la maison. En tout état de cause, l'intensité de charge ne dépassera pas 8 A.

I.6.2. Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection

Constitué d'une prise domestique (1,8 kW) sur laquelle on trouve un boîtier intelligent. C'est à lui qu'incombent le bon déroulement et la sécurité de la charge. Depuis ce boîtier, il est possible de sélectionner l'intensité de charge désirée, sans que celle-ci ne dépasse les 8 A. Il

existe néanmoins des prises en 3,2 kW/14 A, mais l'intensité restera bloquée à 8 A. En cas de problème, le boîtier peut stopper à tout moment le processus de recharge estimé entre 8 heures et 11 heures.

I.6.3. Prise spécifique sur un circuit dédié

Branchement direct du véhicule électrique au réseau principal de distribution AC avec une fiche spécifique et un circuit dédié d'une puissance de 3,7 kW/16 A ou 22 kW/32 A (triphasé). On peut avoir chez soi ce genre de matériel, appelé alors « Wallbox » et installé par un électricien. Ce genre de borne particulière, préconisée par les constructeurs automobiles de voitures électriques ou d'hybrides rechargeables, doit posséder sa propre ligne électrique dédiée afin « d'apporter » le courant adéquat. Le temps de charge (normale ou rapide) oscille entre 1 heure et 8 heures.

I.6.4. Connexion courant continu

Le véhicule est alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un chargeur externe lui-même raccordé à l'installation électrique fixe. Dans ce mode, le câble de recharge du véhicule est fixé à demeure à l'installation. Les connecteurs de raccordement sont spécifiques. Le mode de charge en courant continu est réservé à la charge rapide (de l'ordre de 30 min), à des niveaux de puissance et de tension élevés (50 kW sous 500 V).

I.7. Performances des véhicules électriques

I.7.1. La distance parcourue avant d'avoir à recharger le véhicule électrique

La distance pouvant être parcourue peut bien sûr varier en fonction des conditions routières et des habitudes de conduite, mais la moyenne observée à ce jour va de 140 à 450 km d'autonomie théorique selon la marque de voiture. Les conducteurs de véhicules électriques finissent par adopter des habitudes de conduite par exemple, laisser la voiture perdre naturellement de la vitesse jusqu'à un arrêt, ce qui permet de réduire la consommation électrique et de parcourir des distances nettement plus grandes avant d'avoir besoin de recharger.

I.7.2. La vitesse maximale d'un véhicule électrique

Cela dépend grandement de la marque et du modèle du véhicule, ainsi que du type de moteur électrique qui le propulse. En général, les véhicules électriques conçus pour aller sur les autoroutes atteignent une vitesse maximale avoisinant les 140 km/h et présentent un taux d'accélération semblable ou supérieur à celui des véhicules à moteur à combustion interne. Tout comme les sous-compacts à moteur thermique, les véhicules électriques plus petits atteignent une vitesse et présentent un taux d'accélération moins élevés.

I.7.3. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques

Comme c'est le cas pour tous les véhicules à moteur à combustion interne, les constructeurs de véhicules électriques doivent respecter toutes les normes fédérales en matière de sécurité. De plus, puisque les constructeurs accordent une grande importance au succès et à la durabilité de l'industrie des véhicules électriques, ils ont tout intérêt à ce que la sécurité de ces véhicules constitue une priorité. Selon des essais réalisés par la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), le Tesla Model S a reçu la cote la plus sécuritaire jamais accordé à un véhicule en 2014.

I.7.4. La durée de vie d'une batterie et le coût de remplacement

Les batteries des véhicules électriques sont couvertes par une garantie de fabrication de 8 ans, mais elles ont généralement une durée de vie beaucoup plus grande. Actuellement, le prix de remplacement des batteries est effectivement élevé (environ le tiers de la valeur du véhicule), mais on s'attend à ce que ce prix baisse grandement dans les prochaines années.

I.7.5. La performance d'un véhicule électrique en hiver

Le principal effet du froid sur les véhicules électriques est de réduire la distance qu'ils peuvent parcourir. Un véhicule a été testé par temps chaud : il pouvait alors parcourir 155 km. Sa moyenne en hiver se réduisait à 100 km d'autonomie, et même à 75 km par temps très froid (-25 °C) [23].

1.8. Avantages et inconvénients de la voiture électrique

En quelques années la voiture électrique est devenue une alternative à examiner sérieusement par rapport aux véhicules thermiques (essence, diesel). Voici les principaux avantages et inconvénients de la voiture électrique :

1.8.1. Avantages

-L'auto électrique est propre et écologique : Bien entendu, l'automobile électrique ne produit pas de pollution, ni de fumée ou de particules. Elle propose donc un « bilan carbone » à faire rêver les écologistes.

-La voiture électrique est dotée d'une énergie « intelligente » : L'auto électrique ne demande en effet aucune consommation durant les périodes de ralenti, et le système de batterie se recharge lorsque le conducteur décélère. Un avantage de taille.

-Le moteur de la voiture électrique : Malgré un coût supérieur à l'achat, le moteur d'une voiture électrique est presque à toute épreuve. L'usure du moteur sera moins sévère qu'une auto conventionnelle, et on récupère une partie des frais initiaux en épargnant sur l'entretien et sur l'essence. On estime les frais en énergie de six à huit fois moins élevés qu'une voiture à essence.

-La conduite de la voiture électrique : Plusieurs avantages de l'automobile électrique moins connus sont liés à sa conduite et à son moteur. Fini les problèmes de démarrage, même en hiver. Le moteur ne cale pas, notamment grâce à l'absence d'embrayage. De plus, le moteur est silencieux et permet tout de même d'atteindre la barre des 100 km/h parfois en moins de quatre secondes ! On explique cette performance par le rendement sur « carburant consommé » de 60% supérieur d'une voiture électrique sur les modèles conventionnels.

-L'automobile électrique est idéale pour le travail : Des études estiment le temps de conduite moyen pour se rendre au travail à moins de 30 minutes. Comme elle démarre bien même l'hiver et que son autonomie permet ces trajets sans problème, la voiture électrique s'avère parfaite pour se rendre au travail et en revenir.

1.8.2. Inconvénients

-Le prix à l'achat plus élevé des voitures électriques : Bien que l'on note plusieurs économies liées à l'auto électrique, le prix d'achat demeure un irritant pour plusieurs. Variant selon les modèles en moyenne de 30 000\$ à 80 000\$, une telle somme est à considérer en plus des autres inconvénients. Il existe cependant certains programmes, comme au Québec (Roulez électrique), de rabais ou de remboursement pour ce type de véhicule.

-L'autonomie limitée des autos électriques : La plupart des voitures électriques disponibles sur le marché ne permettent pas d'effectuer une grande distance (Montréal-Québec, par exemple), sans recharge. L'autonomie moyenne est estimée à moins de 160km.

-Le temps de recharge important : Le temps de recharge important de l'auto électrique est également à considérer. Il est d'une durée de six à huit heures pour une recharge complète. Il existe bien des bornes de recharges rapides (15 à 30 minutes pour 80-90% de recharge), mais elles demeureront rares encore longtemps. De plus, ces bornes rapides semblent, selon quelques études, user la voiture plus rapidement.

-Les bornes de recharges se font encore rares : Et pour recharger sa voiture électrique, encore faut-il trouver les bornes. Encore rares dans certains endroits, et inexistantes dans plusieurs autres, il est impossible de partir de manière improvisée avec un véhicule électrique. On doit connaître l'emplacement des bornes. Heureusement, des endroits comme le Québec travaillent sur des initiatives (comme Le Circuit Électrique) pour augmenter l'accès aux bornes et aux véhicules électriques.

-L'entretien spécialisé des autos électriques : Si l'automobile électrique demande peu d'entretien, celui-ci devra tout de même être effectué par des techniciens spécialisés et avec de l'équipement particulier et adéquat. La batterie devra par ailleurs être remplacée complètement après cinq ans [24].

I.9. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les véhicules électriques, un bref historique et les éléments qui compose ce genres de véhicule a été présenté au premier lieu, les avantages et les inconvénients ont été aussi discutés.

Les véhicules électriques, étant écologiques et propres, vont certainement être le nouveau moyen de transport qui va prendre une place de plus en plus importante au marché dans un avenir proche, et vont donc remplacer dans les prochaines années les voitures thermiques qui sont beaucoup trop polluantes, et surtout non éternelles.

La production d'énergie nécessaire au fonctionnement et à la fabrication des véhicules électriques, prennent part au réchauffement climatique, ce qui nous permet de dire que finalement la voiture électrique n'est pas aussi écologique, sauf si cette dernière est produite à partir des énergies renouvelables, comme l'énergie solaire ou hydraulique.

Plusieurs architectures de véhicules électriques sont actuellement possibles et présentent des performances et des fonctionnalités variées. Les points qui bloquent l'arrivée complète du véhicule électrique sont aujourd'hui connus, les constructeurs proposent des solutions très performantes en termes de technologie et de puissance malgré cela, certains points demandent encore à être améliorées pour permettre la réelle immersion du véhicule électrique au sein des populations, notamment en ce qui concerne l'autonomie, le prix et les infrastructures indispensables à son expansion, ainsi des réaménagements qui ne semblent pas être envisageables à court terme.

Le chapitre suivant sera consacré pour la motorisation utilisée.

II.1. Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. La première étape, de la synthèse d'une loi de commande, est la modélisation du procédé à contrôler (MSAP). Le modèle doit être capable de représenter fidèlement les différentes dynamiques présentes. Cette modélisation est établie en termes d'équations différentielles et est basée essentiellement sur la transformation de Park.

Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse dynamique du véhicule électrique ainsi nous présentons la chaîne de traction de ce dernier. Nous clôturerons ce chapitre par l'interprétation des résultats de simulations de la MSAP autopiloté avec l'onduleur MLI.

II.2. Analyse dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender [19]. La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération. En se basant sur les principes de la mécanique et de l'aérodynamique du véhicule, on peut évaluer la puissance de transmission et l'énergie nécessaire pour assurer le fonctionnement du véhicule figure II.1 [25].

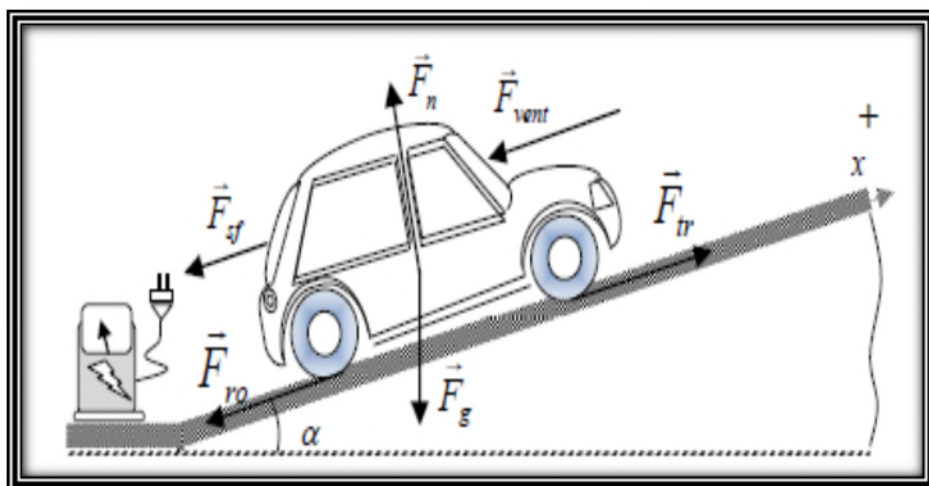


Figure II.1 : Forces agissantes sur un véhicule se déplaçant sur une pente.

L'effort total de traction F_{tr} d'un véhicule peut se décomposer en :

$$\vec{F}_{tr} = \vec{F}_{roue} + \vec{F}_{grav} + \vec{F}_{aéro} + \vec{F}_{sf} \quad (II.1)$$

F_{roue} : Force de résistance au roulement.

F_{grav} : La force nécessaire pour vaincre une pente.

$F_{aéro}$: Forces aérodynamiques.

F_{sf} : Forces du au frottement.

La force de roulement F_{roue} est produite par le pneu au contact de la surface de la chaussée.

$$F_{roue} = f_r \cdot m_{veh} \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (II.2)$$

f_r : est un coefficient non linéaire dépendant de la vitesse du véhicule, du type et de la pression du pneu, et du trajet de la route. Il augmente avec la vitesse du véhicule et également durant ces manœuvres ($0.015 < f_r < 0.3$)

m_{veh} : masse du véhicule .

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$: constante de gravitation.

Par ailleurs, La force de montée (avec un signe négatif) et la force de descente (avec un signe positif) est donnée par :

$$F_{grav} = m_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (II.3)$$

La force aérodynamique $F_{aéro}$ due à la résistance de l'air est donnée par :

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_f \quad (II.4)$$

ρ : La densité de l'air.

S_f : La section frontale de notre véhicule.

C_x : Le coefficient de pénétration dans l'air de notre véhicule.

V : La vitesse relative par rapport à l'air ($V = V_{air} + V_{veh}$).

Et enfin, la force de frottement est donnée par :

$$\vec{F}_{sf} = M \cdot \vec{\gamma} \quad (II.5)$$

M : Poids totale avec charge $M = (m_{veh} + m_{ch})$.

γ : Accélération longitudinale du véhicule ($\gamma = \dot{v}$).

La puissance nécessaire pour déplacer un véhicule doit alors compenser la charge F_{tr} de la route.

$$P_{veh} = V \cdot \vec{F}_{tr} \quad (II.6)$$

V : La vitesse du véhicule

II.3. la chaîne de traction du véhicule électrique

La chaîne de traction figure II.2 est composée :

- **Moteur de traction** : Le moteur utilisé est de type synchrone triphasé à aimants permanents. L'intérêt de ce type de machine est sa grande fiabilité, son rendement plus élevé, possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes, sa puissance massique élevée, ce qui est important pour les systèmes embarqués.
- **Convertisseur** : Les onduleurs sont utilisés dans la chaîne de traction pour gérer les échanges énergétiques entre la source d'énergie et le groupe motopropulseur (moteur de traction). L'onduleur de tension permet une alimentation alternative triphasée du moteur.
- **Source d'énergie** : La source d'énergie est une batterie d'accumulateur, qui a pour but de fournir (éventuellement de récupérer en cas de freinage) l'énergie électrique.
- **Partie commande** : La partie commande reçoit sur son entrée des consignes telles que le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation de la machine.
- **Partie mécanique** : Il existe une transmission mécanique comprenant un réducteur entre le moteur et la roue.

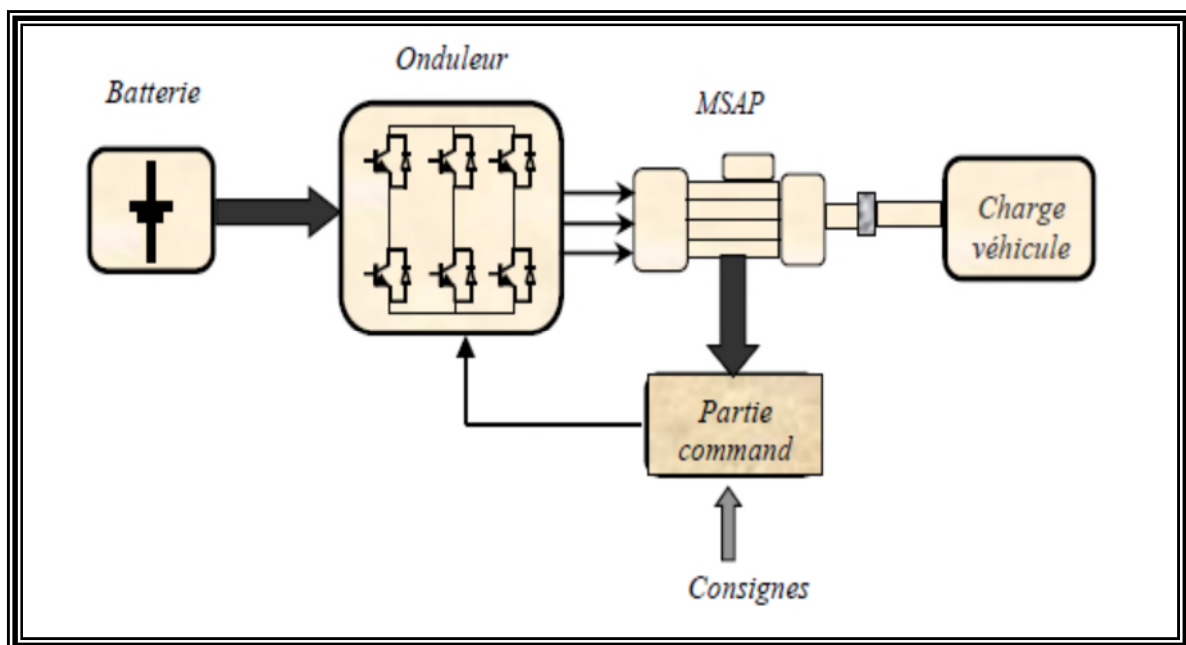


Figure II.2 : Chaîne de traction du VE avec MSAP.

II.3.1. Modélisation du moteur synchrone à aimants permanents

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent.

II.3.1.1 Description

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant deux enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer.

A. Rotor :

Les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique.

B. Stator :

Il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée.

II.3.1.2 Hypothèses simplificatrices :

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

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- Les f.é.m. sont à répartition sinusoïdale.
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable.
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.

II.3.1.3. Mise en équations de la MSAP dans le repère (abc)

La figure II.3 donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

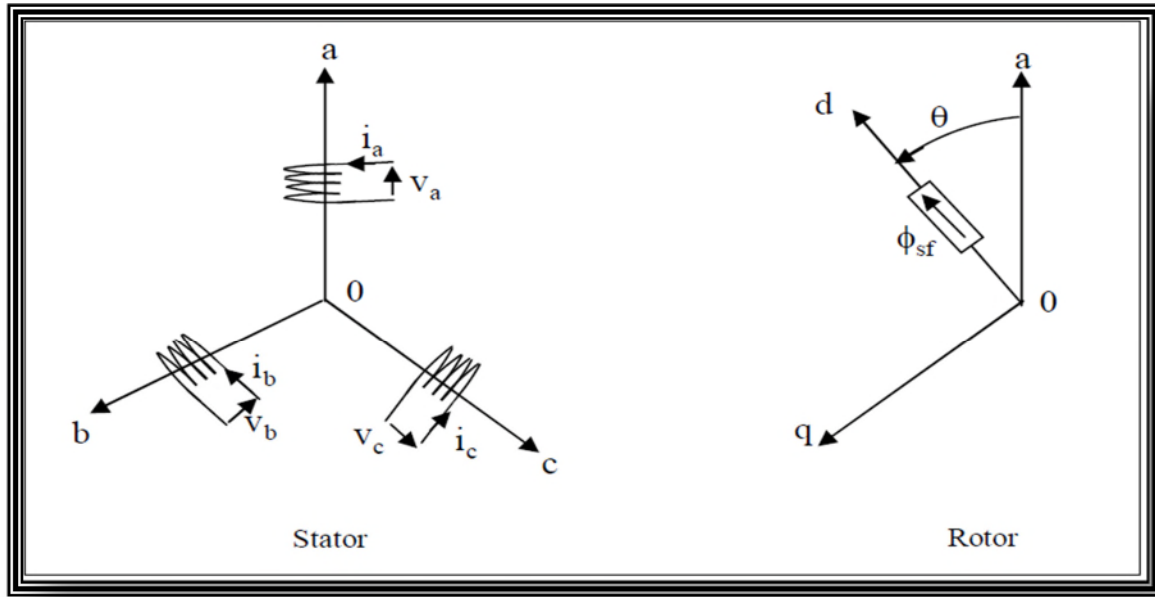


Figure II.3 : Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

a. Equation électrique

A partir de la figure (II.3), nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

$$\textbf{Stator:} \quad [V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II. 7})$$

$$\textbf{Rotor:} \quad [V_r] = [R_f][i_f] + \frac{d}{dt} [Q_f] \quad (\text{II.8})$$

$[V_s] = [V_a V_b V_c]^T$: Vecteur tensions statorique.

$[i_s] = [i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courant statorique.

$[\Phi_s] = [\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^T$: Vecteur flux statorique.

$$[\Phi_f] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\theta): \text{Position absolue du rotor en degré électrique.}$$

Φ_{sf} : Valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistance du stator.}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrice résistance du rotor.}$$

b. Expression des flux statorique

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\Phi_{sf}] \quad (\text{II. 9})$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance statorique.}$$

$$[\Phi_{sf}] = [\Phi_{af} \ \Phi_{bf} \ \Phi_{cf}]^T : \text{Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statorique.}$$

$[L_{ss}]$: Étant la matrice des inductances statoriques. Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statoriques $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}]$ qui est en fonction de l'angle " $\theta = p\theta_m$ ", " θ " étant l'angle électrique et " θ_m " : est la position mécanique du rotor par rapport au stator.

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}(\theta)] \quad (\text{II.10})$$

Le terme $[L_{s0}]$ à pour expression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

Le terme $[L_{s2}(\theta)]$ s'écrit, dans le cadre de la théorie du premier harmonique :

$$[L_s(\theta)] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

Les inductances propres et mutuelle L_{s0} , M_{s0} et L_{s2} sont des constantes.

En introduisant (II.9) dans (II.7) on aura :

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}] [i_s] + [\Phi_f]) \quad (\text{II.13})$$

On remarque que l'équation (II.13) est non linéaire et couplée pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) tournant avec le rotor [26].

II.3.1.4. Transformation de Park

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

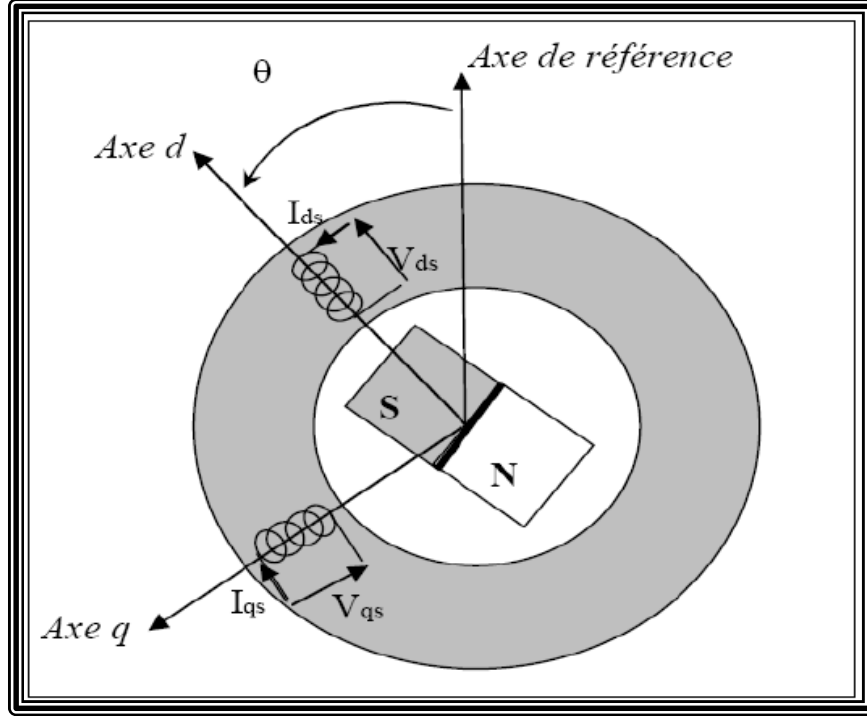


Figure II.4 : Machine équivalente au sens de Park.

Dans le système d'équations (II.13) effectuons le changement de la variable suivant :

$$\begin{cases} [P(\theta)][V_{dqhs}] = [V_s] \\ [P(\theta)][I_{dqhs}] = [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

Dont la matrice inverse a pour forme :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Les équations simplifiées des tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_{qs} = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En introduisant (II.17) dans (II.18) on aura le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{d}{dt} I_{ds} - \omega L_{qs} I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_{qs} \frac{d}{dt} I_{qs} + \omega L_{ds} I_{ds} + \omega \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.3.1.5 Expression de la puissance et du couple électromagnétique :

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$P(t) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{II.20})$$

En remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leur expression il vient :

$$P(t) = \frac{2}{3} \left[R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - \left(I_{ds} \frac{d}{dt} \Phi_{ds} + I_{qs} \frac{d}{dt} \Phi_{qs} \right) + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \right] \quad (\text{II.21})$$

D'où :

Le 1^{er} terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).

Le 2^{ème} terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le 3^{ème} terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

$$\text{Sachant que : } P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{II.22})$$

$$\text{D'où : } C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} + \Phi_f i_{qs}] \quad (\text{II.23})$$

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II.24})$$

$$\text{Où : } \omega_m = p \Omega \quad (\text{II.25})$$

Avec :

Ω : Vitesse de rotation mécanique de la MSAP. J : Moment d'inertie totale de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux. C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

II.3.1.6. Schéma fonctionnelle de la MSAP

D'après les équations (II.19), (II.23) et (II.24), on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{d}{dt}i_{ds} = \frac{1}{L_{ds}}(V_{ds} - R_s i_{ds} + \omega L_{qs} i_{qs}) \quad \frac{d}{dt}i_{qs} = \frac{1}{L_{qs}}(V_{qs} - R_s i_{qs} + \omega L_{ds} i_{ds} - \omega \Phi_f)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} + \Phi_f i_{qs}] \quad \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r$$

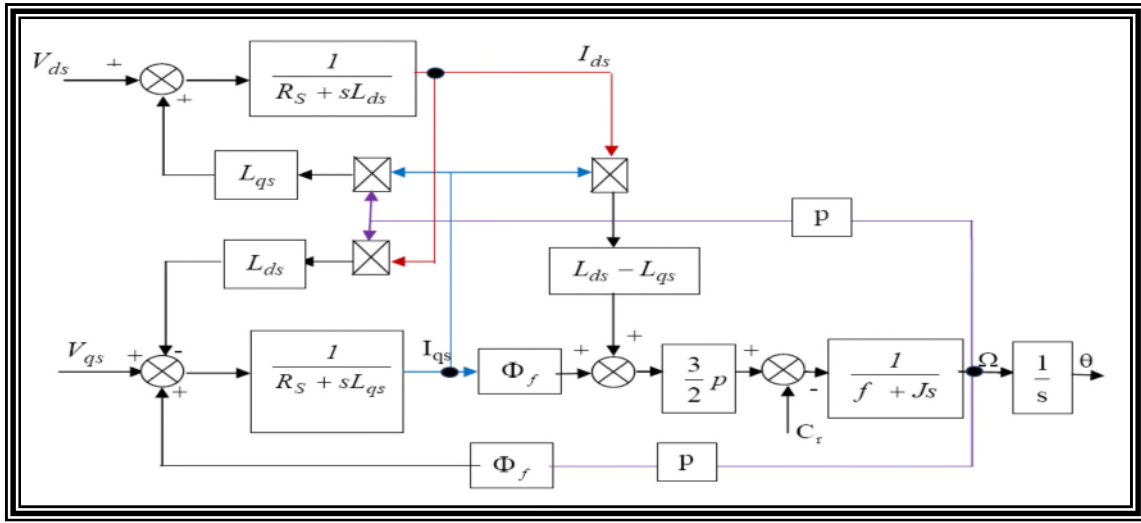


Figure II.5 : Schéma bloc d'une MSAP alimentée en tension.

II.3.1.7. Mise sous forme d'équation d'état

Considérons les tensions (V_{ds} , V_{qs}) et le flux d'excitation Φ_f comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_{ds} , I_{qs}) comme variable d'état et le couple résistant C_r comme perturbation. A partir des équations (II.22) on peut écrire le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \dot{[X]} = [A][X] + [B][V] \\ [Y] = [C][X] + [D][V] \end{cases} \quad (II.26)$$

$[A]$: Matrice fondamentale qui caractérise le système.

$[B]$: Matrice d'entrée.

$[V]$: Vecteur de commande.

$[X]$: Vecteur d'état (posons, $[X] = [I_{ds} I_{qs}]^T$).

$[C]$: Matrice de sortie.

$[D]$: Matrice de transfert direct.

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équation (II.23) comme suit [24] :

$$\frac{d}{dt} [X] = [A][X] + [B][V] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$[X]=[I_{ds}I_{qs}]^T \text{ et } [V]=[V_{ds}V_{qs}\Phi_f]^T \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Et : } \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Et on pose : } [A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \text{ et } [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & -\frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix}.$$

II.3.1.8 .MSAP autopilotée

Le moteur synchrone, comme son nom l'indique, tourne à la vitesse synchrone, qui est liée uniquement à la fréquence des tensions d'alimentation. Pour assurer la variation de la vitesse, on va utiliser le principe d'autopilotage figure II.6, qui consiste à maintenir un angle constant entre le champ magnétique statorique par rapport au champ magnétique du rotor.

Pour pouvoir piloter correctement le champ statorique, la position du rotor sera récupéré à l'aide d'un capteur de position angulaire fournissant une information continue sur la position du rotor et à l'aide d'un onduleur commandé, nous pourrons ajuster la phase des tensions du stator donc leur fréquence.

La machine synchrone autopilotée est un dispositif à vitesse variable alimenté par convertisseur statique où la fréquence d'alimentation est asservie à la vitesse de rotation. Cela veut dire que la machine prescrit elle-même sa fréquence.

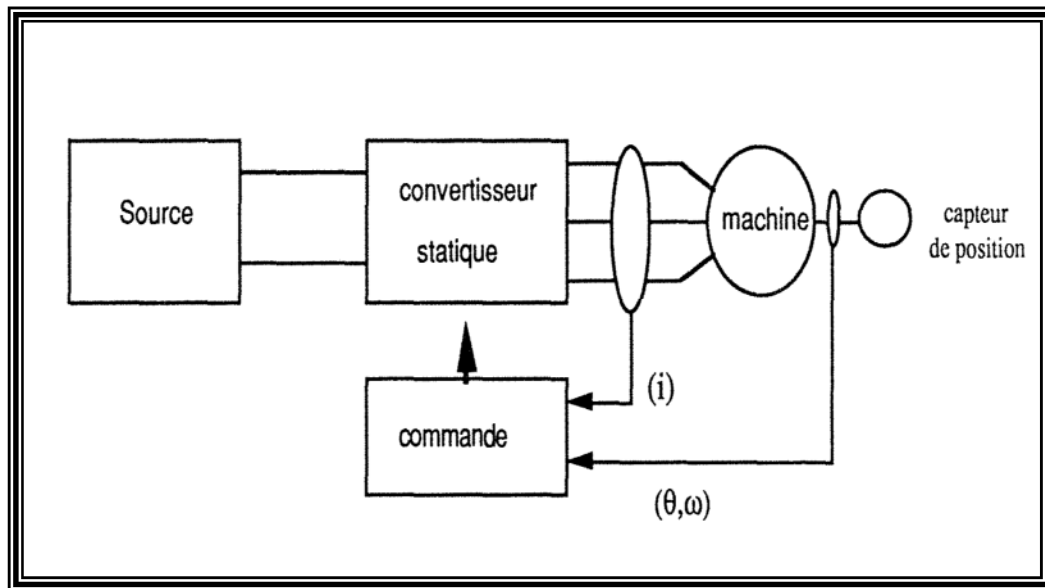


Figure II.6 : Structure des machines synchrones autopilotées.

II.3.2. Alimentation de la MSAP par onduleur de tension à commande M.L.I

II.3.2.1. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure II.7, où K_i et K'_i ($i=a, b, c$) sont des transistors IGBT monter en antiparallèle avec des diodes, S_i et S'_i sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

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

On suppose que l'alimentation de l'onduleur est comme une source parfaite, constituée par deux générateurs de f.é.m. égale à $\frac{U_0}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 . L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure.

La machine synchrone est connectée en étoile, U_0 est la tension de bus continu alimentant l'onduleur de tension [28].

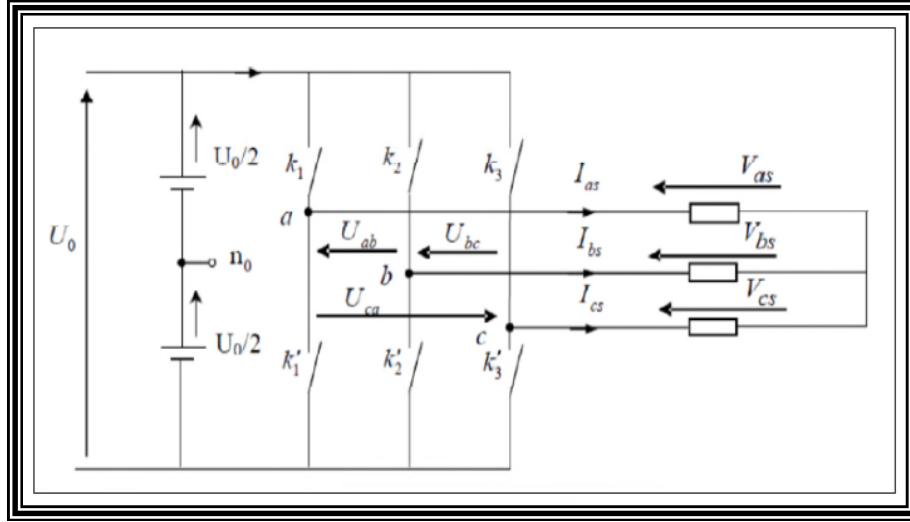


Figure II.7 : Schéma équivalent de l'onduleur.

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_0(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = U_0(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = U_0(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

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

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{U_0}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{U_0}{3} (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{U_0}{3} (2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Donc : } \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs des courants. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué.

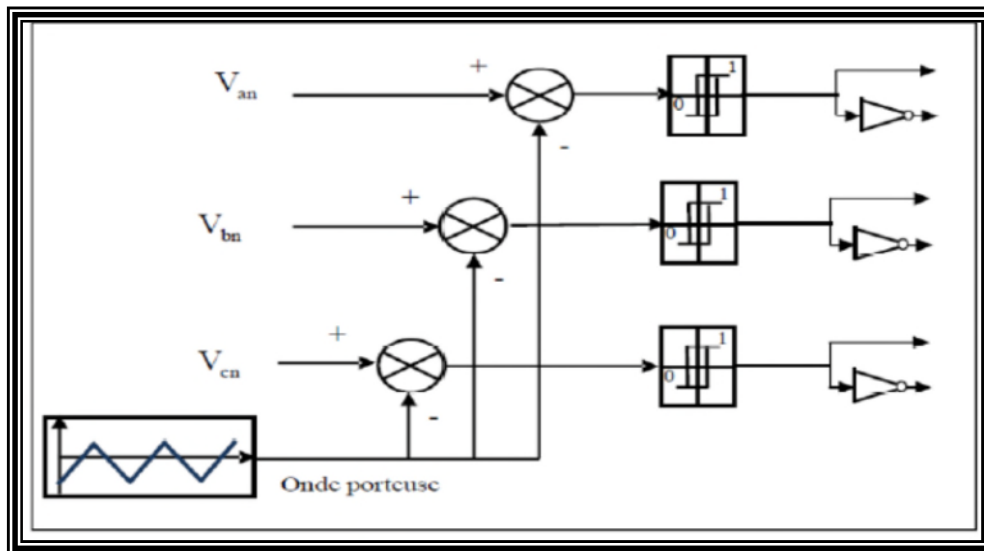


Figure II.8 : Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale.

II.3.2.2. Résultats de simulations de la MSAP autopiloté associé à de l'onduleur MLI

Pour vérifier le modèle mathématique de la machine, nous allons tester les programmes numériquement dans l'environnement MATLAB. Les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe A.

Nous avons soumis notre système à une simulation on appliquant un couple résistant de 3 N.m à un instant $t=2s$. Nous avons relevé le comportement de la vitesse, du couple électromagnétique, les courants statoriques et la tension d'alimentation.

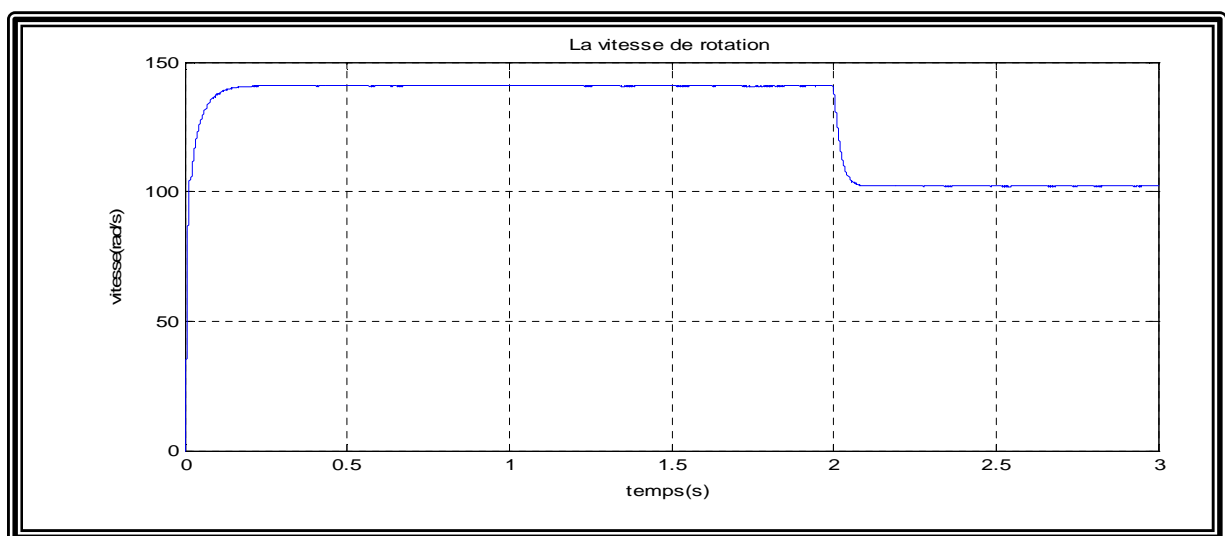
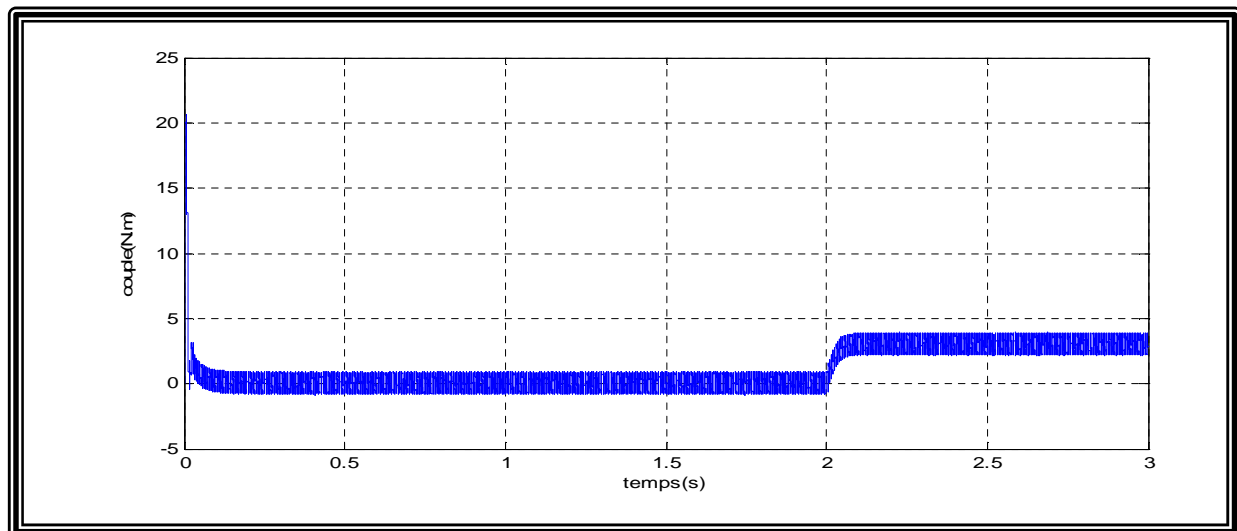
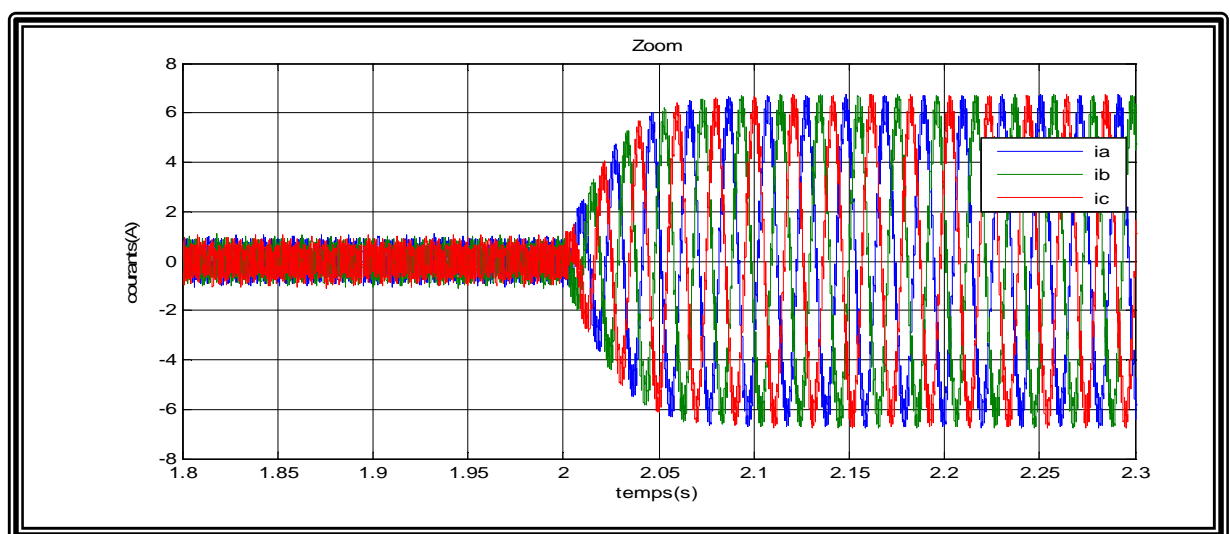
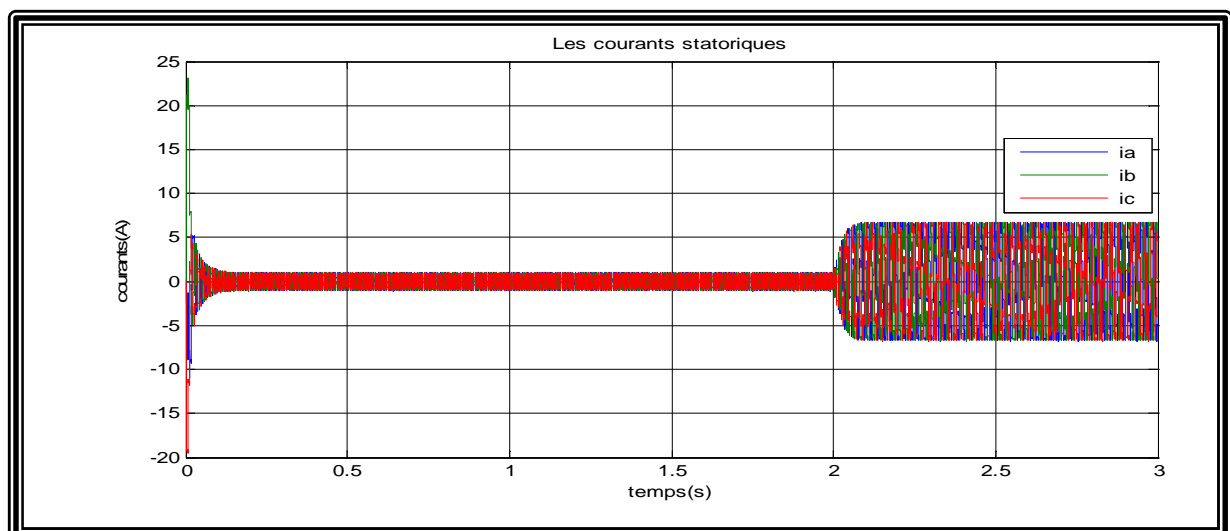
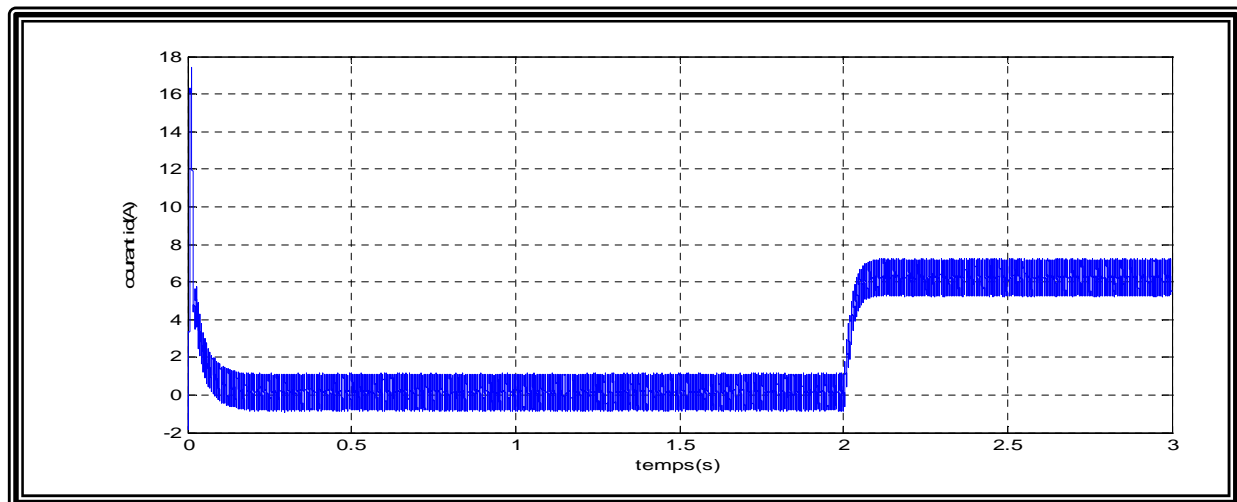
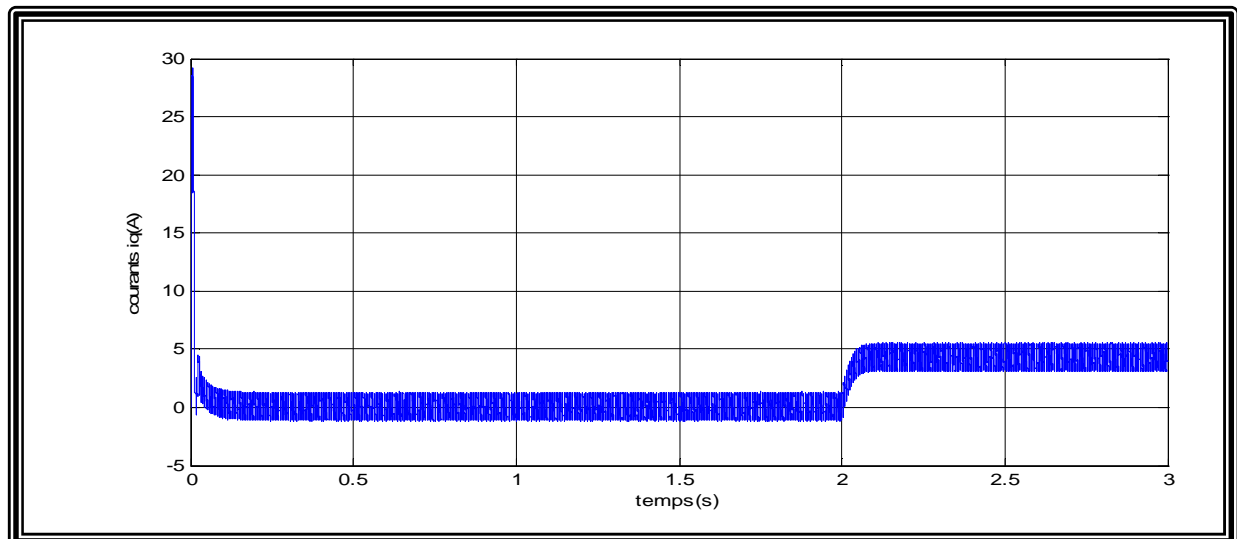
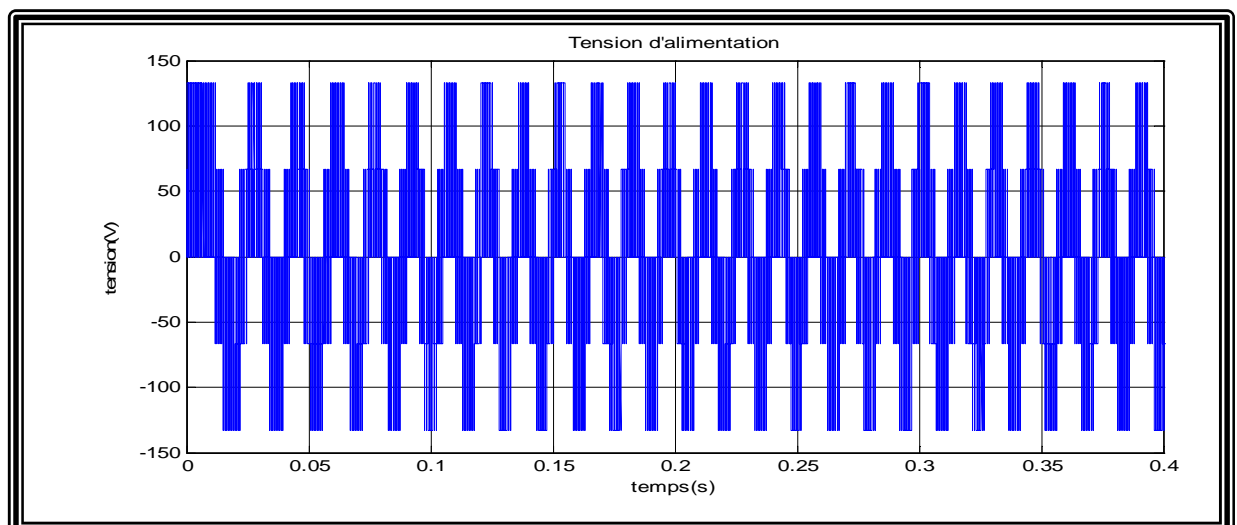


Figure II.9 : Vitesse mécanique du moteur.

**Figure II.10 :** Couple électromagnétique**Figure II.11 :** Les courants statoriques

**Figure II.12 :** Courant direct.**Figure II.13 :** Courant quadratique.**Figure II.14 :** Tension d'alimentation.

II.3.2.3. Interprétation des résultats

La figure II.9 montre que la vitesse mécanique du moteur atteint très rapidement le régime permanent ceci étant due à la très faible inertie du MSAP, ce qui impose un temps de réponse très court. En régime permanent la vitesse reste constante, jusqu'à l'application du couple résistant $C_r = 3\text{N.m}$ à $t=2\text{ s}$, lors de la présence de la perturbation de charge on constate que la vitesse diminue.

La figure II.10 montre que le couple présente au démarrage des battements importants dans un intervalle de temps court. Au moment de l'application de la charge le couple augmente pour subvenir à la charge appliquer se stabilise à la valeur de la charge appliquée.

Les figures II.11 et II.14 illustrent la tension d'alimentation et les courants statoriques (I_{abc}) respectivement, qui ont une forme sinusoïdale. On remarque que leurs fréquences augmentent à l'instant d'application du couple résistant, et cela est dû à l'imposition de la fréquence d'alimentation du moteur par la fréquence de rotation de la roue polaire, ce qui est le but de l'autopilotage.

II. 4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents autopiloté associé à l'onduleur de tension MLI. La modélisation de la MSAP par la transformation de Park est présentée. Une simulation numérique a permis de valider ce dernier. Le modèle de la machine est utilisé pour l'élaboration de la commande prédictive, qui est objet du chapitre suivant.

III.1. Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé [29].

Cette commande est également appelée commande à horizon glissant ou fuyant, en référence à la manière dont la fenêtre de temps considérée pour les calculs est décalée à chaque itération. Le principal atout de la commande prédictive est sa capacité à prendre en compte dans son expression même les contraintes fonctionnelles et les contraintes d'exploitation du système considéré.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait que doit être résolu à temps réel. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système mises à jour.

Cette stratégie de commande a montré son efficacité, sa flexibilité et son succès dans des applications industrielles, même pour des systèmes à faible période d'échantillonnage. L'application de la commande prédictive dans le domaine des commandes numériques a donné des bons résultats en termes de rapidité et de précision [30].

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes (MPC, GPC, PFC, NPC, NGPC...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le même principe de fonctionnement [31].

Ce chapitre consiste à présenter une brève historique sur la commande prédictive, ainsi on expose le principe et les concepts de cette dernière, la suite de ce chapitre est consacrée à l'application de la commande prédictive non-linéaire généralisée dans le MSAP.

Nous clôturerons ce chapitre par l'élaboration d'un programme de simulation sous Simulink/Matlab et une interprétation des résultats de la commande prédictive non linéaire appliquée au véhicule électrique.

III.2. Historique

La commande prédictive est une méthode relativement récente, qui n'a connu un réel essor que depuis le milieu des années 80, grâce aux travaux de D.W Clarke et de son équipe à Oxford. Toutes fois cette technique de commande, que l'on peut rattacher à la famille des commandes prédictives par modèle (Model Predictive Control) suscite un intérêt dans le domaine depuis la fin industriel des années 70.

En effet en 1978, J. Richalet et al. Publient les premiers résultats obtenus dans des applications industrielles, en 1979 des ingénieurs de la Shell, C.R. Cutler et D.M. Prett font part de leur expérience sur un craqueur catalytique. En 1982, R.M.C. De Keyser, puis en 1984 B.R. Ydstie proposent leur propre approche et leur apport à ce type de technique.

C'est en 1985 que D.W. Clarke et al. Présente la première version de la commande prédictive généralisée (GPC). Il faut attendre 1987, pour voir publier les premiers résultats obtenus par J. Richalet et al. sur des systèmes électromécaniques rapides tels que des commandes d'axes d'un robot.

Si, comme nous l'avons rappelé, la commande prédictive a connu très tôt un vif engouement dans le secteur de l'industrie chimique et pétrolière. Une des raisons tient en partie au fait que c'est la seule technique fournissant une méthodologie susceptible de prendre en compte d'une façon systématique les contraintes lors de la conception et de l'implantation de la loi de la commande [32].

III.3. Principe de la commande prédictive

Le principe de cette commande consiste à créer, pour le système à commander un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre, connue à l'avance cela en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et un minimisant un certain critère de performance (fonction coût), tout en respectant des contraintes de fonctionnement. Cette idée est simple et pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne.

Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions.

La figure III.1 présente la philosophie de la commande prédictive lors de la conduite d'un véhicule :

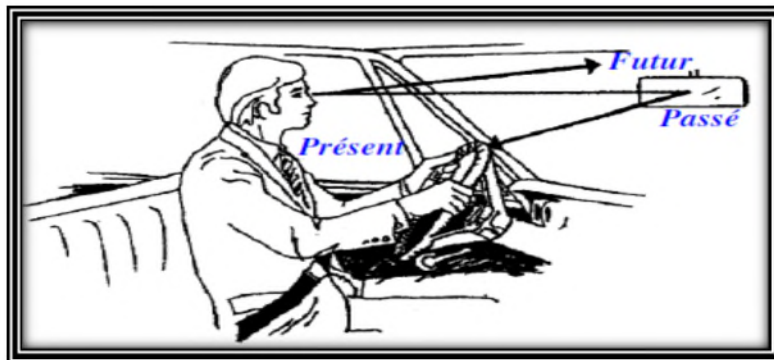


Figure III.1 : Philosophie de la commande prédictive [32].

La figure III.2 résume le principe de la commande prédictive dans le cas général d'un problème de commande optimale sous contraintes sur un horizon glissant.

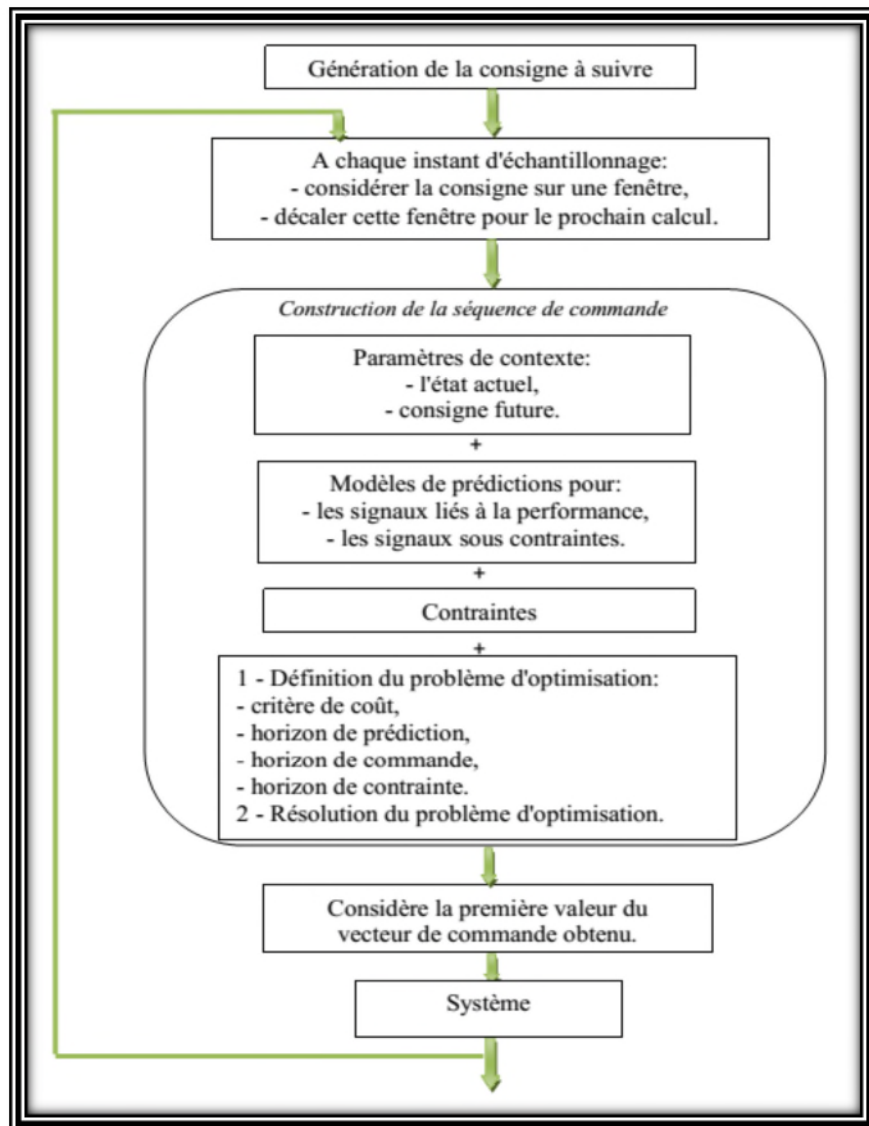


Figure III.2 : Schéma de principe de la commande prédictive [33].

III.3.1. Les concepts de la commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments de la figure III.2, et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une Multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

- Le modèle du système (pour la prédiction).
- Le critère de performances (la prédiction).
- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande).

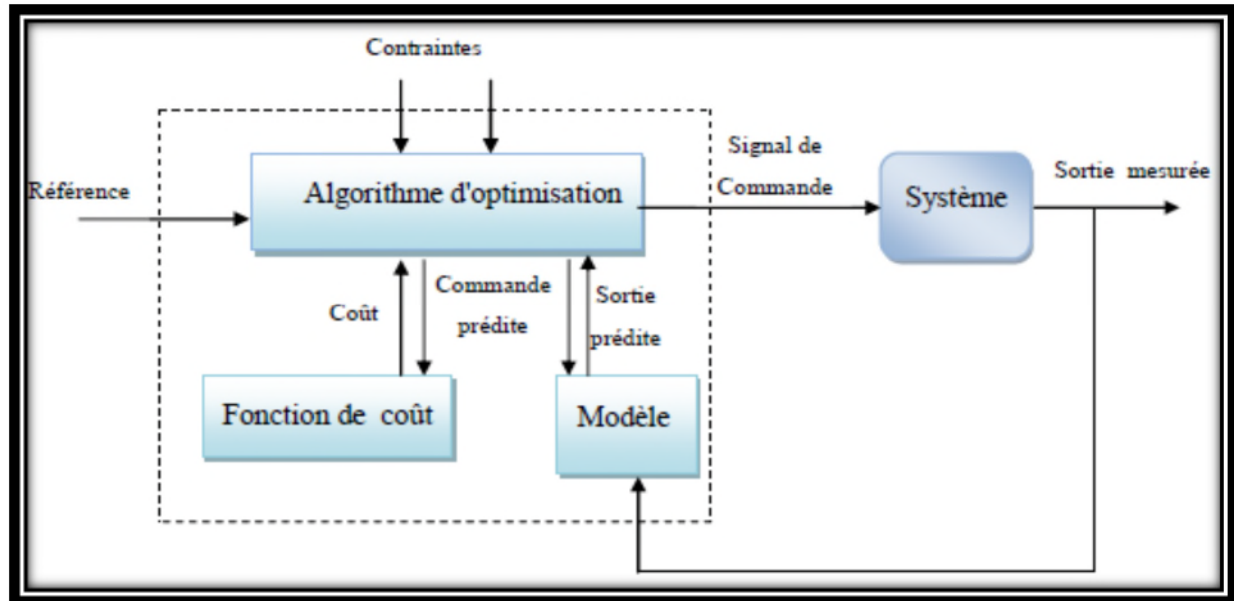


Figure III.3 : Stratégie de la commande prédictive [34]

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure III.3 est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures.

À chaque période d'échantillonnage du contrôleur :

- Un calcul de prédiction sur un horizon de temps (horizon de prédiction)
- Une séquence de commande est calculée en minimisant un critère de performance
- Seule la première commande est appliquée au système
- Cette procédure est ensuite répétée ; c'est le principe de l'horizon fuyant. Ainsi à chaque période d'échantillonnage, un problème d'optimisation doit être résolu en temps réel.

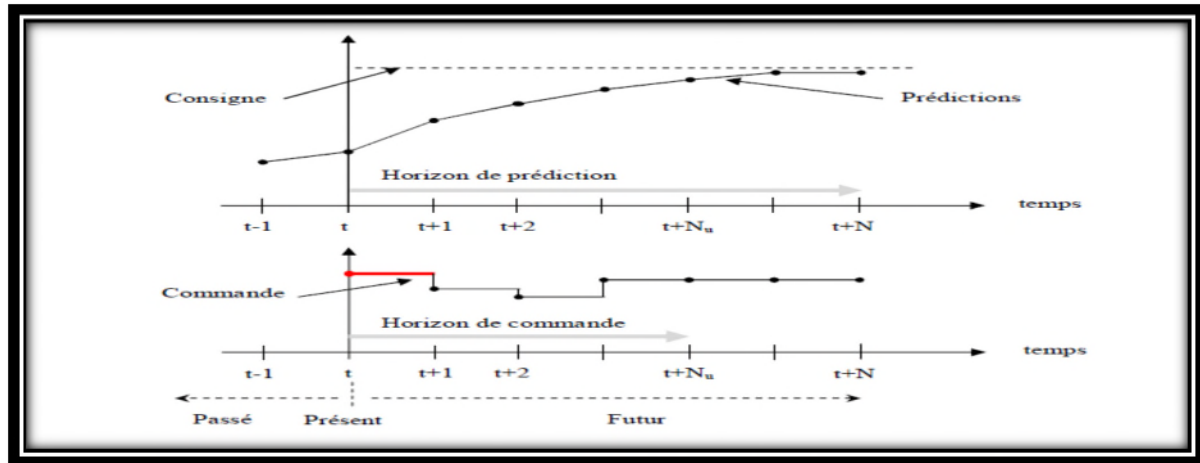


Figure III.4 : Evolution temporelle de la prédiction à horizon fini.

III.3.2. Les différents types d'algorithmes prédictifs

III.3.2.1. Cas linéaire

- La commande prédictive généralisée (G.P.C)
- La commande prédictive à base du modèle (M.B.P.C)
- La commande prédictive fonctionnelle (P.F.C)

III.3.2.2. Cas non-linéaire

- La Commande Prédictive non linéaire (N.M.P.C)
- La Commande Prédictive non linéaire généralisée (N.G.P.C)

III.4. Avantages et inconvénients de la commande prédictive

a. Avantage

- Elle est particulièrement intéressante pour les ingénieurs n'ayant qu'une connaissance limitée en contrôle parce que les concepts sont très intuitifs et que le réglage est très simple.
- Les cas multi variables peuvent être facilement traités
- Il s'agit d'une méthodologie complètement ouverte dont les principes de base permettent des extensions futures.

b. Inconvénient

- L'obtention de la loi de commande demande un effort de calcul beaucoup plus grand que dans le cas d'un régulateur PID conventionnel.
- Dans le cas adaptatif, tous les calculs pour obtenir la loi de commande doivent être repris à chaque période d'échantillonnage.

- Lorsque des contraintes d'opération sont prises en considération, la solution devient itérative et les temps de calcul peuvent devenir très importants.

III.5. Commande prédictive généralisée

La commande prédictive généralisée (GPC Generalized Predictive Control) de Clarke, Mohtadi et Tuffs est considéré comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour les processus industriels. Elle combine la prédiction du comportement futur du procédé avec la commande de rétroaction. [35]

III.5.1. Application de la commande prédictive généralisée non linéaire au MSAP

Notre commande consiste à contrôler le courant statorique « I_d » et la vitesse rotorique « ω_r » du moteur synchrone à aimant permanent. Pour cela on a choisi comme vecteur d'état $x = [I_d \omega_r]^T$, et comme sortie $y = [I_d \omega_r]$ et le vecteur de commande $u = [V_d V_q]^T$. Le modèle du moteur synchrone à aimant permanent, exprimé dans le référentiel lié au rotor sous forme d'équation d'état :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x) + G(x).U(t) \\ y = H(x) \end{cases} \quad (III.1)$$

$$\text{Avec : } y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ I_d \end{bmatrix} ; \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ \omega_r \end{bmatrix} ; \quad U = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} ;$$

$$G(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 x_1 + a_2 x_2 x_3 \\ b_1 x_2 + b_2 x_1 x_3 + b_3 x_3 \\ c_1 x_3 + c_2 x_1 x_2 + c_3 x_2 - C_r / J \end{bmatrix} ;$$

Où :

$$a_1 = -\frac{R_s}{L_d} ; a_2 = \frac{p \cdot L_q}{L_d} ;$$

$$b_1 = -\frac{R_s}{L_d} ; b_2 = -\frac{p \cdot L_d}{L_q} ; b_3 = -\frac{p \cdot \Phi_f}{L_q} ;$$

$$c_1 = -\frac{f}{J} ; c_2 = \frac{1.5 \cdot p \cdot (L_d - L_q)}{J} ; c_3 = \frac{1.5 \cdot p \cdot \Phi_f}{J} .$$

III.5.1.1. La fonction de coût

L'objectif de la commande prédictive est de calculer la commande $U(t)$ tel que la sortie au futur de procédé $y(t+\tau)$ est piloté proche de $y_r(t+\tau)$. Cette tâche est accomplie par minimisation de « \mathfrak{J} ». [36]

La fonction de coût est donnée par la relation suivante :

$$\mathfrak{J}(X, U) = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_r} (y(t + \tau) - y_r(t + \tau))^T (y(t + \tau) - y_r(t + \tau)) d\tau \quad (\text{III.2})$$

Avec :

τ_r : est le temps de prédiction.

$y(t + \tau)$: Est la prédiction à « τ » pas en avant de la sortie du système.

$y_r(t+\tau)$: Est la trajectoire de référence au futur.

La prédiction des sorties est calculée à partir de l'expansion en série de Taylor, qui est exprimée par les dérivées de Lie.

$$y_i(t + \tau) = h_i(X) + \tau L_f h_i(X) + \dots + \frac{\tau^{r_i}}{r_i!} L_f^{r_i} h_i(x) + \frac{\tau^{r_i}}{r_i!} L_g L_f^{(r_i-1)} h_i(X) U(t) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

r_i : le degré relatif de chaque sortie $y_i(t)$.

Dans notre cas $i=1,2$.

III.5.1.2. Degré relatif

Le degré relatif d'une sortie est le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître l'entrée U [37].

III.5.1.3. Dérivée de Lie

La notation suivante est utilisée pour la dérivée de Lie de la fonction $h_j(x)$ le long d'un champ de vecteur $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$.

$$\begin{cases} L_f h_j = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h_j}{\partial x_i} f_i(x) = \frac{\partial h_j}{\partial x} f(x) \\ L_f^k h_f = L_f(L_f^{(k-1)} h_j) \\ L_g L_f h_g = \frac{\partial L_f h_j}{\partial x} G(x) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

-Degré relative de la vitesse mécanique « ω_r »

$$\begin{cases} \dot{y}_1(t) = \dot{h}_1(x) = L_f h_1(x) + L_g h_1(x) \cdot U = f_3(x) \\ \ddot{y}_1(x) = \ddot{h}_1(x) = L_f^2 h_1(x) + L_g L_f h_1(x) \cdot U \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$L_f h_1(x) = f_3(x) \quad (III.6)$$

$$L_g h_1(x) = 0 \quad (III.7)$$

$$L_f^2 h_1(x) = c_2 x_2 f_1(x) + f_2(x) (c_3 + c_2 x_1) + c_1 f_3(x) \quad (III.8)$$

$$L_g L_f h_1(x) = [c_2 x_2 g_1 g_2 + (c_3 x_1 + c_3)] \quad (III.9)$$

Le degré relatif $y_1(t)$ est $r_1=2$.

-Degré relatif du courant I_d

$$\dot{y}_2(t) = \dot{h}_2(x) = L_f h_2(x) + L_g h_2(x) \cdot U \quad (III.10)$$

Avec :

$$L_f h_2(x) = f_1(x) \quad (III.11)$$

$$L_g h_2(x) = [g_1 \ 0] \quad (III.12)$$

Le degré relatif de $y_2(t)$ est $r_2=1$.

Le degré relatif du système est $r=r_1+r_2=3$

En introduisant (III.5) et (III.10) dans (III.3) on aura :

$$\begin{cases} y_1(t + \tau) = h_1(X) + \tau L_f h_1(X) + \frac{\tau^2}{2!} L_f^2 h_1(x) + \frac{\tau^2}{2!} L_g L_f h_1(X) \cdot U(t) \\ y_2(t + \tau) = h_2(X) + \tau L_f h_2(X) + \tau L_g h_2(X) \cdot U(t) \end{cases} \quad (III.13)$$

Pour la vitesse :

$$\begin{cases} y_1(t) = h_1(x) \\ \dot{y}_1(t) = L_f h_1(x) \\ \ddot{y}_1(t) = L_f^2 h_1(x) + L_g L_f h_1(X) \cdot U \end{cases} \quad (III.14)$$

Pour le courant I_d :

$$\begin{cases} y_2(t) = h_2(x) \\ \dot{y}_2(t) = L_f h_2(x) + L_g h_2(x) \cdot U(t) \end{cases} \quad (III.15)$$

En introduisant (III.14) et (III.15) dans (III.13), la sortie au future $y(t+\tau)$ est calculée par:

$$y(t+\tau) = T(\tau)Y(t) \quad (III.16)$$

$$\text{Avec : } Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \ddot{y}_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(X) \\ h_2(X) \\ L_f h_1(X) \\ L_f h_2(X) \\ L_f^2 h_1(X) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_1(x)U(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$G_1(X) = \begin{bmatrix} L_g h_2(X) \\ L_g L_f h_1(X) \end{bmatrix}; \text{ et } T(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tau & 0 & \frac{\tau^2}{2} \\ 0 & 1 & 0 & \tau & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Si la référence au future $y_r(t+\tau)$ n'est pas prédéfinie, un calcul similaire à $y(t+\tau)$ est utilisé.

$$y_r(t+\tau) = T(\tau)Y_r(t) \quad (\text{III.19})$$

En utilisant (III.16) et (III.19), la fonction de cout sera :

$$\begin{aligned} \mathfrak{J}(X, U) &= \frac{1}{2} \int_0^{\tau_r} (T(\tau) \cdot Y(t) - T(\tau) \cdot Y_r(t))^T (T(\tau) \cdot Y(t) - T(\tau) Y_r(t)) d\tau \\ \mathfrak{J}(X, U) &= \frac{1}{2} (Y(t) - Y_r(t))^T \Pi (Y(t) - Y_r(t)) \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$\Pi = \int_0^{\tau_r} T(\tau)^T T(\tau) d\tau = \begin{bmatrix} \tau & 0 & \frac{\tau^2}{2} & 0 & \frac{\tau^3}{6} \\ 0 & \tau & 0 & \frac{\tau^2}{2} & 0 \\ \frac{\tau^2}{2} & 0 & \frac{\tau^3}{3} & 0 & \frac{\tau^4}{8} \\ 0 & \frac{\tau^2}{2} & 0 & \frac{\tau^3}{6} & 0 \\ \frac{\tau^3}{6} & 0 & \frac{\tau^4}{8} & 0 & \frac{\tau^5}{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_1 & \Pi_2 \\ \Pi_2^T & \Pi_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

A partir de l'équation (III.17) et (III.19), on obtient :

$$Y(t) - Y_r(t) = M + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_1(x)U(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$\text{Avec : } M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(X) \\ h_2(X) \\ L_f h_1(X) \\ L_f h_2(X) \\ L_f^2 h_1(X) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{r1}(t) \\ y_{r2}(t) \\ \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \ddot{y}_1(t) \end{bmatrix}$$

En remplaçant (III.21) et (III.22) dans (III.20) on aura :

$$\mathfrak{J}(X, U) = 1/2(M + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_1(x)U(t) \end{bmatrix})^T \begin{bmatrix} \Pi_1 \Pi_2 \\ \Pi_2^T \Pi_3 \end{bmatrix} (M + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_1(x)U(t) \end{bmatrix}) \quad (III.23)$$

La condition nécessaire à satisfaire pour trouver la commande optimale est la suivante :

$$\frac{\partial \mathfrak{J}}{\partial u} = 0 \quad (III.24)$$

A partir de (III.23), cette condition peut être représentée par la relation suivante :

$$G_1(X)^T [\Pi_2^T \Pi_3] M + G_1(X)^T \Pi_3 G_1(X) U(t) = 0 \quad (III.25)$$

La commande non linéaire optimale après la minimisation de la fonction de coût est donnée par :

$$U(t) = -G_1(X)^{-1} [\Pi_3^{-1} \Pi_2^T I_4] M \quad (III.26)$$

La condition $(\Phi_f + (L_d - L_q)I_d \neq 0)$ permet à $G_1(X)$ d'être irréversible.

Où :

$$\Pi_3^{-1} \Pi_2^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{3}{2\tau} & 0 \\ \frac{10}{3\tau^2} & 0 & \frac{5}{2\tau} \end{bmatrix} \quad (III.27)$$

$$G_1(X)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{g_1} & 0 \\ -c_2 x_2 & 1 \\ \frac{1}{g_2(c_2 x_1 + c_3)} & \frac{1}{g_2(c_2 x_1 + c_3)} \end{bmatrix} \quad (III.28)$$

En remplaçons (III.27), (III.28) dans (III.26) on aura :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{g_1} \left(\frac{3}{2\tau} M_2 + M_4 \right) \\ \frac{1}{g_2(c_2 x_1 + c_3)} \left[c_2 x_2 \left(\frac{3}{2\tau} M_2 + M_4 \right) - \left(\frac{10}{3\tau^2} M_1 + \frac{5}{2\tau} M_3 + M_5 \right) \right] \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

III.5.1.4. Schéma bloc de la commande prédictive non linéaire généralisée

A partir des équations (III.29), (III.22), (III.6), (III.8), (III.11), le schéma bloc de la N.G.P.C d'un MSAP est présenté comme suit figure III.5.

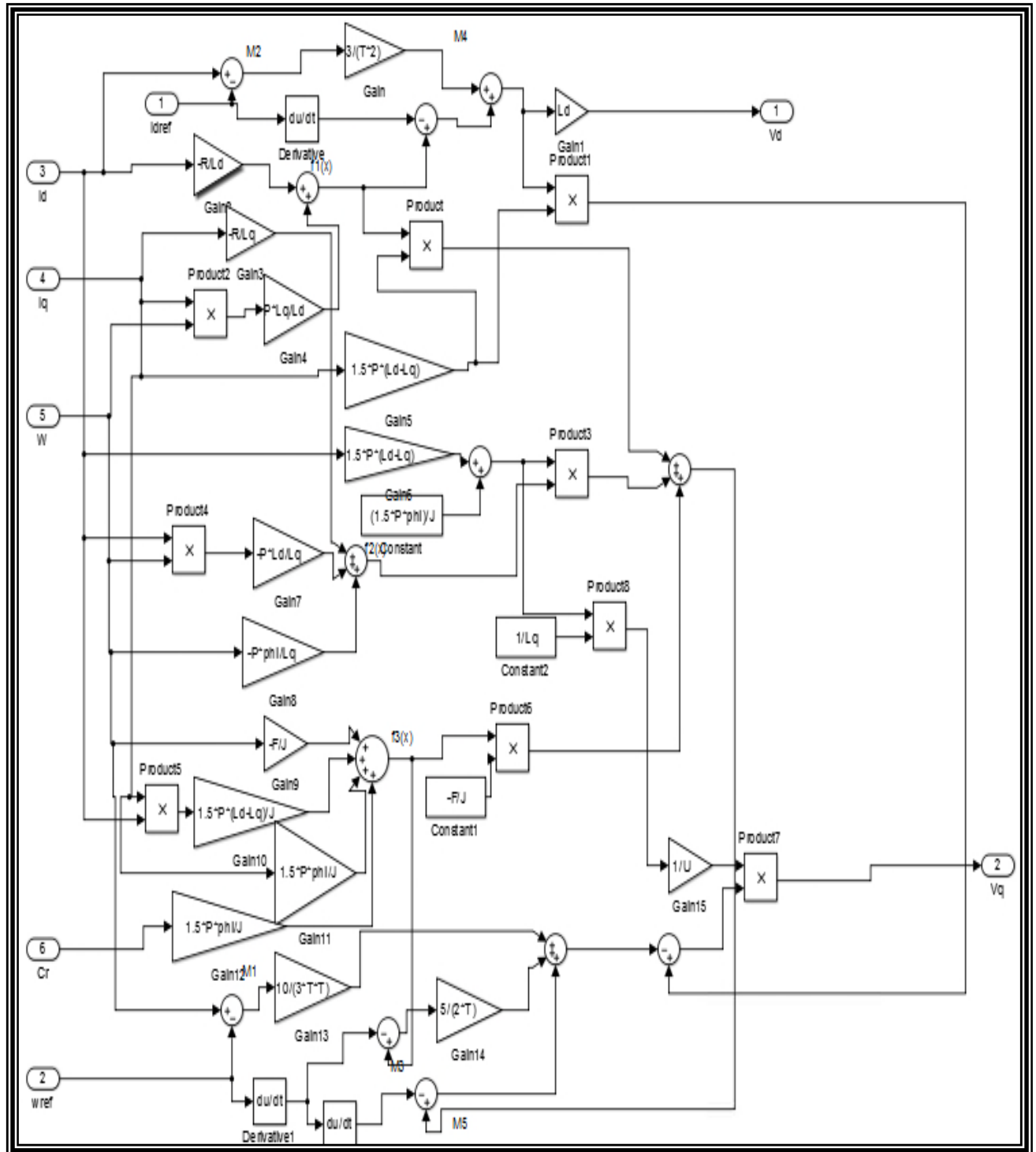


Figure III.5 : Schéma bloc de la commande prédictive non linéaire d'un MSAP.

III.5.1.5. Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée d'un MSAP

La figure III.6 présente le schéma structurel d'une application de la N.G.P.C au moteur synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension commandé par MLI.

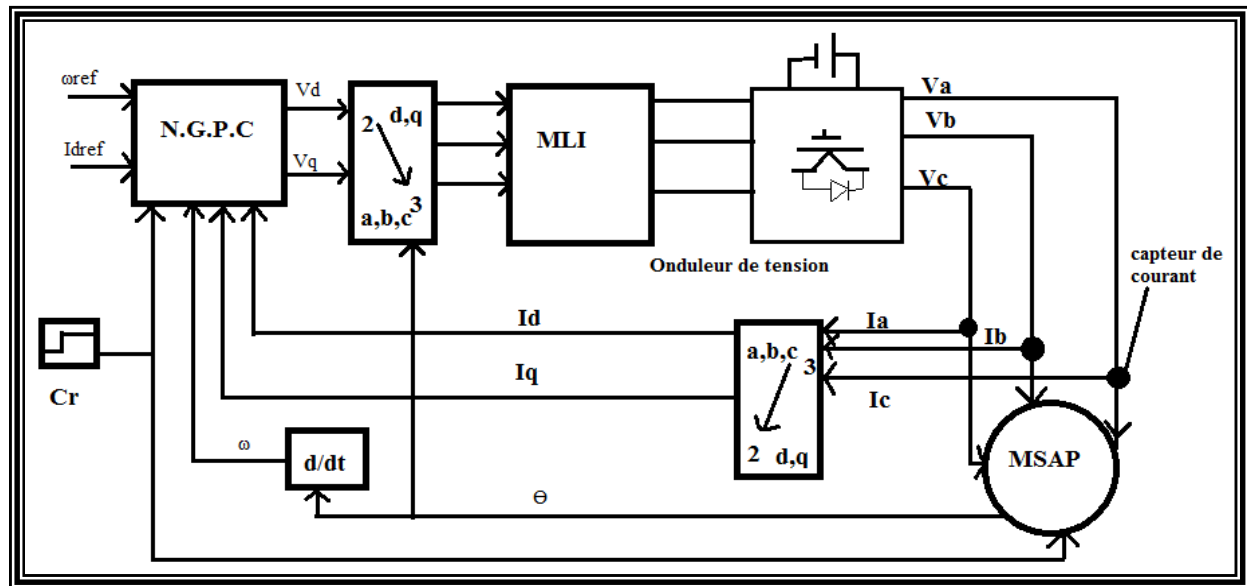


Figure III.6 : Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée d'un MSAP.

III.5.2. Résultats de simulation

Afin d'évaluer les performances de la commande non linéaire prédictive généralisée à savoir le suivi d'une consigne, nous avons soumis notre système à un test de simulation, on a appliqué au système une vitesse de référence, voir figure III.7, et un courant direct de référence (I_{dref}) figure III.11, suivi par une application d'un couple de charge de 5 N.m à l'instant $[1 < t < 2s]$ et $[4 < t < 5s]$.

Nous avons relevé l'allure de la vitesse mécanique, l'erreur de vitesse, les courants statoriques, le couple électromagnétique, le courant statorique direct (I_d), le courant statorique quadratique (I_q) et la tension d'alimentation.

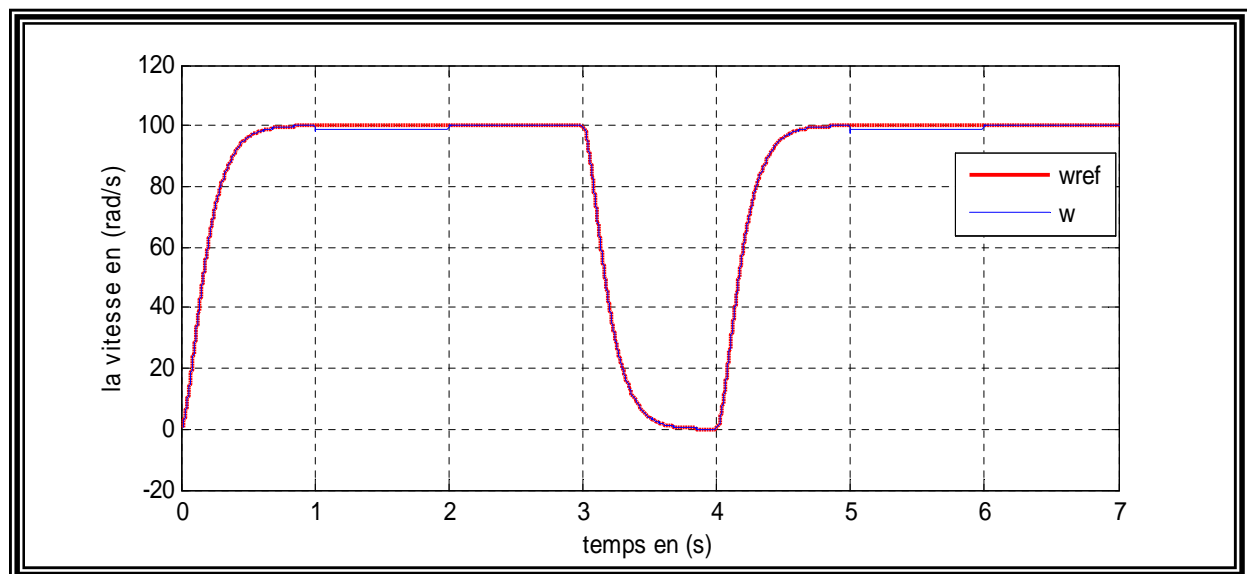


Figure III.7 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C.

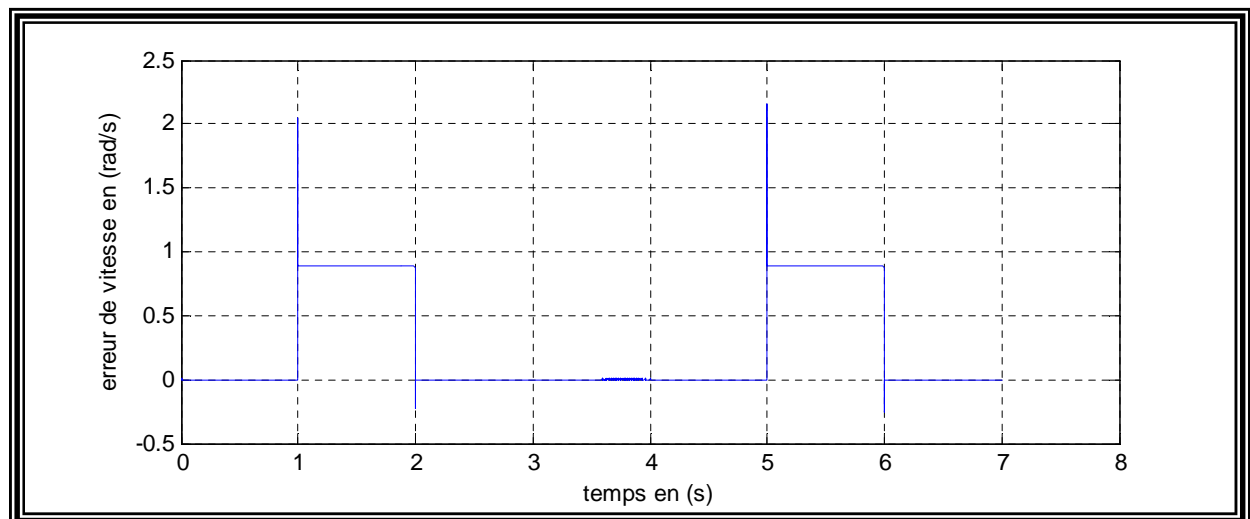


Figure III.8 : Erreur de vitesse.

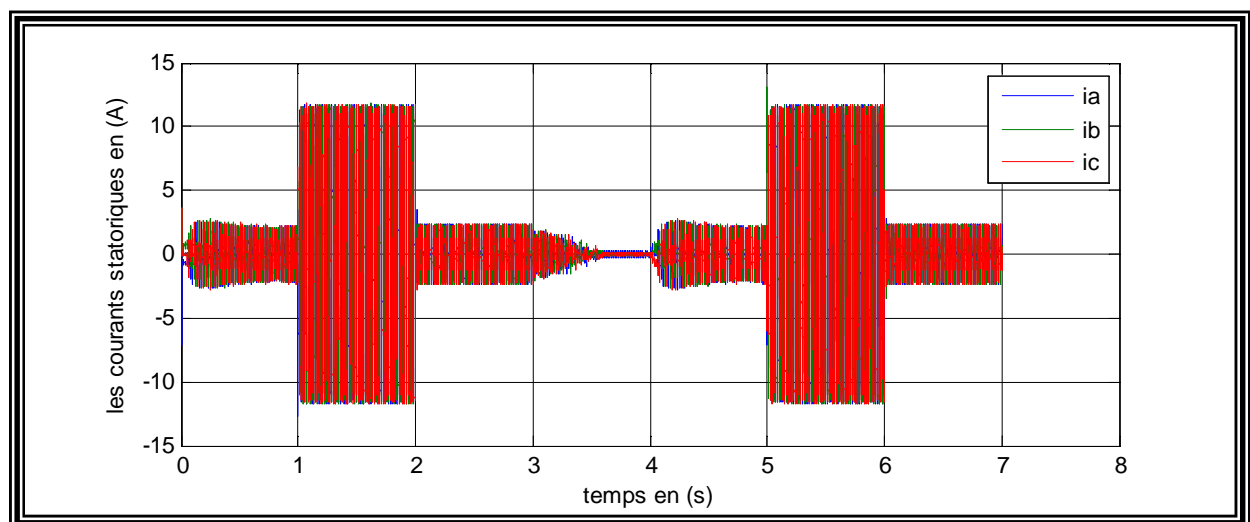


Figure III.9 : Les courants statoriques.

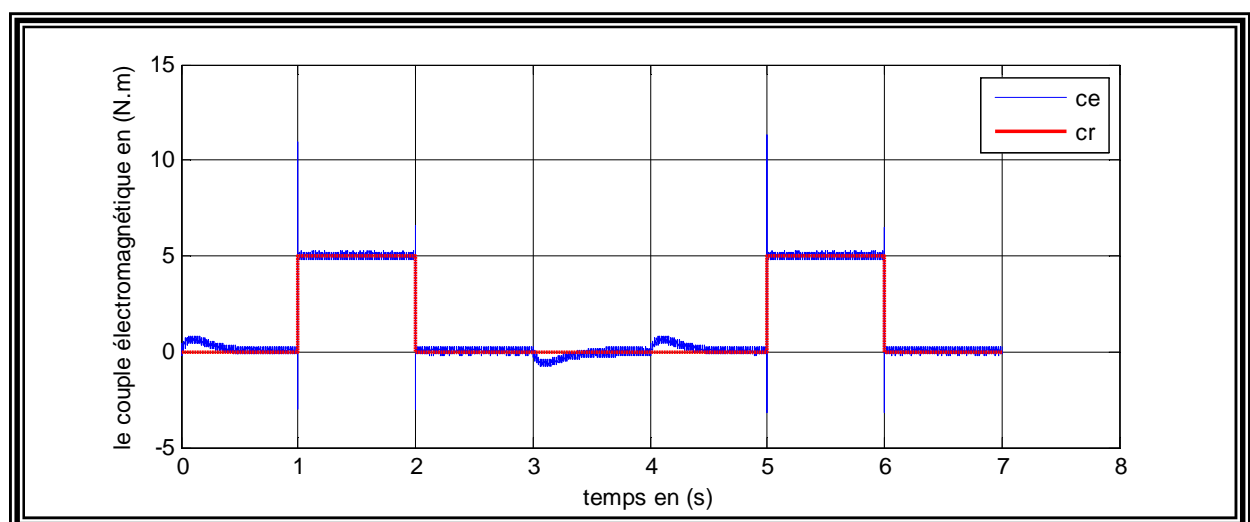


Figure III.10 : Le couple électromagnétique.

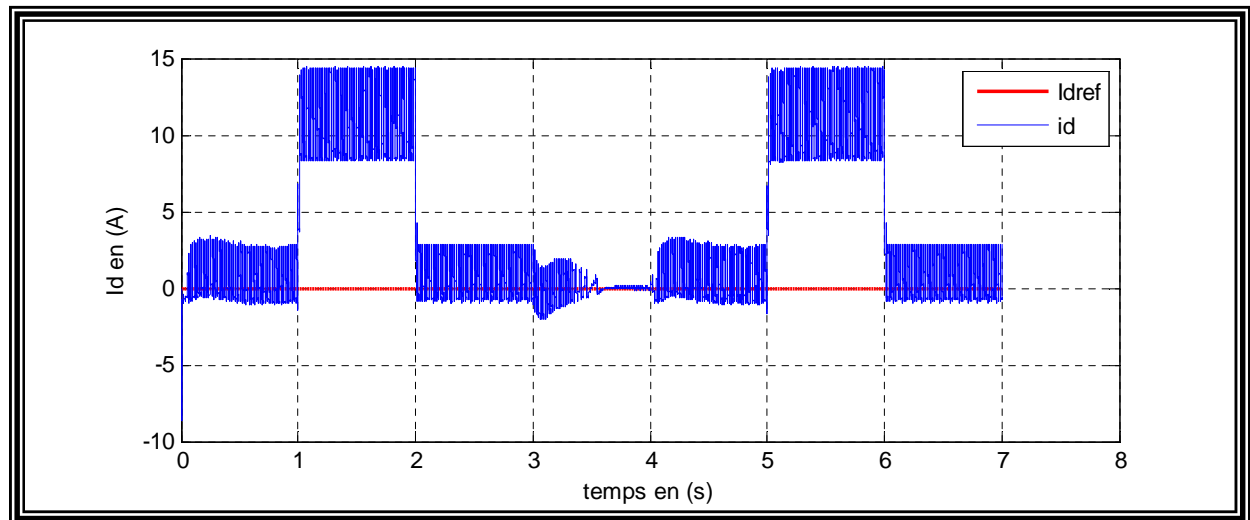


Figure III.11 : Le courant direct.

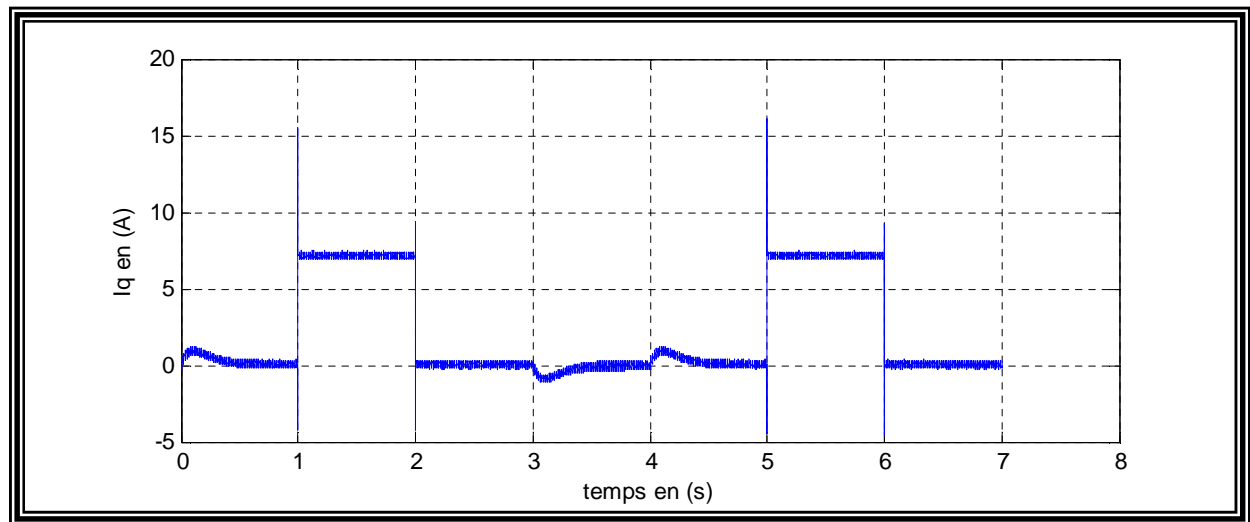


Figure III.12 : Le courant quadratique.

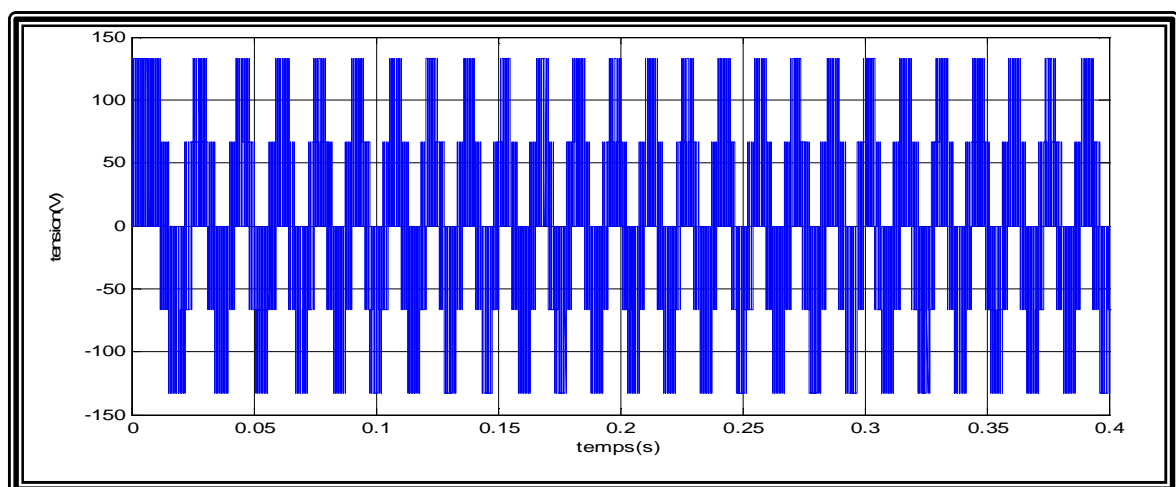


Figure III.13 : Zoom de la tension d'alimentation du moteur.

➤ Interprétation des résultats

Lors du démarrage, la vitesse du moteur suit parfaitement la trajectoire de référence, et ça malgré l'application du couple de charge aux instants $[1 < t < 2s]$ et $[5 < t < 6s]$. (Suivi de consigne et rejet de perturbation), comme le montre la figure III.7.

La figure III.8 montre l'erreur de vitesse qui présente des pics aux instants de variation du couple de charge, mais ces pics ne dépassent pas 2.5rad/s, dans ce cas l'erreur relative est de l'ordre 10^{-3} ce qui est satisfaisant.

La figure III.9, représente les courants statoriques qui ont une forme sinusoïdale, leurs amplitudes augmentent à l'instant d'application du couple de charge $[1 < t < 2s]$ et $[5 < t < 6s]$.

La figure III.10 montre que la MSAP développe un couple électromagnétique égale au couple de charge appliqué, on remarque que le couple suit parfaitement le couple de référence malgré l'application de la charge aux instants $[1 < t < 2s]$ et $[5 < t < 6s]$.

La figure III.11 montre que le courant I_d suit la référence imposée I_{dref} . Ce qui est totalement différent lors de l'application de la charge aux instants $[1 < t < 2s]$ et $[4 < t < 5s]$.

La figure III.12 montre que l'évolution du courant quadratique I_q qui augmente lors de l'application de la charge aux instants $[1 < t < 2s]$ et $[5 < t < 6s]$, avec la présence des parasites dus à la MLI.

La figure III.13 représente l'allure de la tension d'alimentation du moteur, on remarque que la tension suit l'évolution de la vitesse du moteur, cela est dû à l'autopilotage car à l'instant où la vitesse s'annule les interrupteurs de l'onduleur ne change pas d'état.

➤ Inversion de vitesse

La MSAP démarre avec application d'une charge de 5N.m à $[1 < t < 2s]$, la vitesse prend la consigne appliquée 100 rad/s.

A l'instant $[5 < t < 6s]$ on impose une inversion de charge à -5N.m et une consigne de vitesse de -100 rad/s.

Le courant direct I_d est maintenu à la valeur nulle par sa référence $I_{dref}=0$.

Nous avons relevé l'allure de la vitesse mécanique et la vitesse de référence, l'erreur de vitesse, les courants statoriques, le couple électromagnétique, le courant statorique direct (I_d), le courant statorique quadratique (I_q) et la tension d'alimentation.

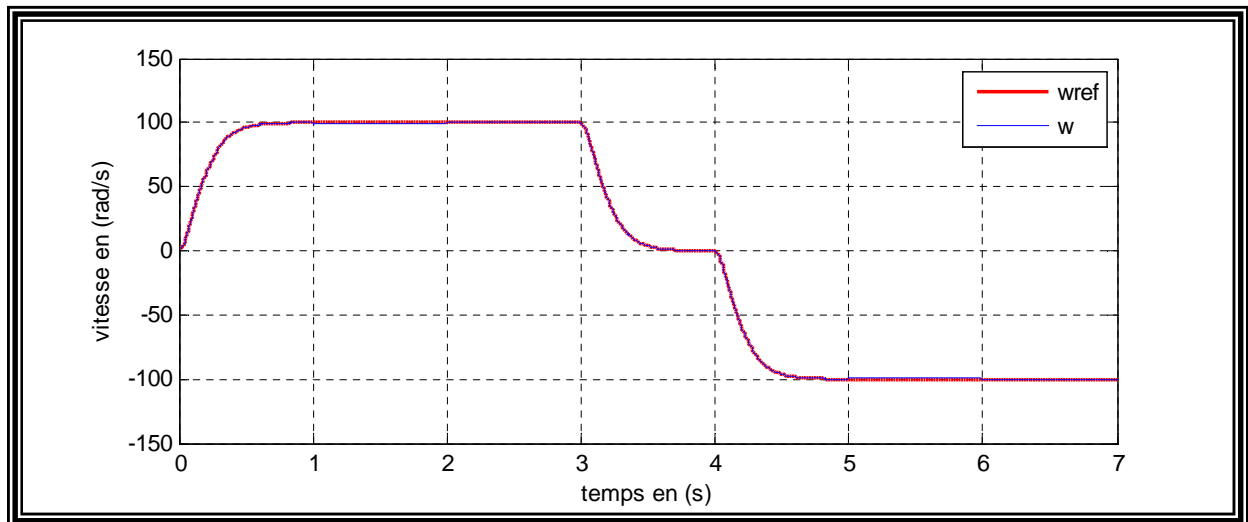


Figure III.14 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C.

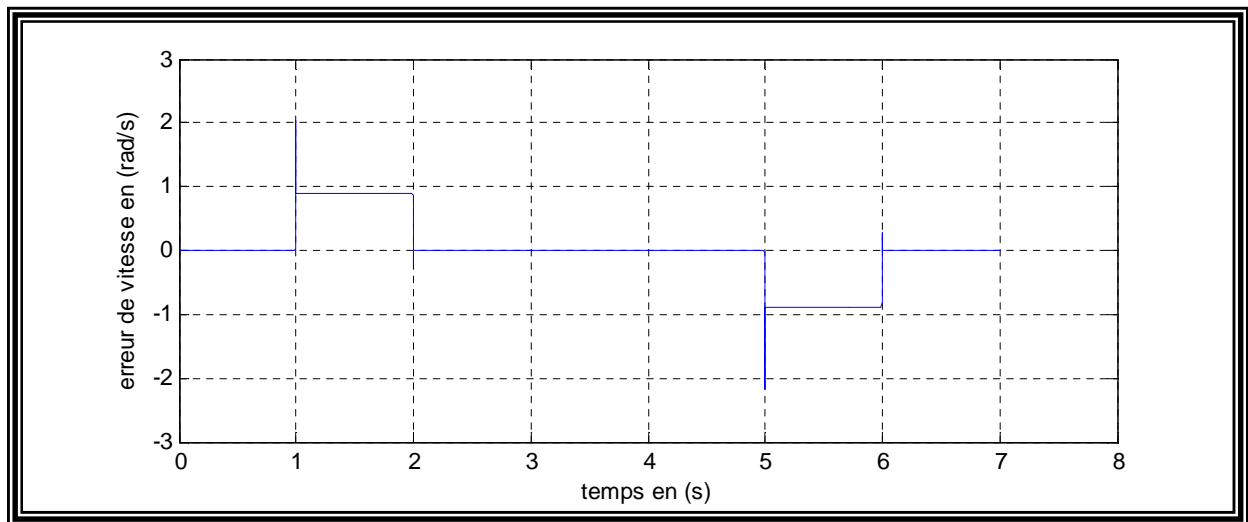


Figure III.15 : Erreur de vitesse.

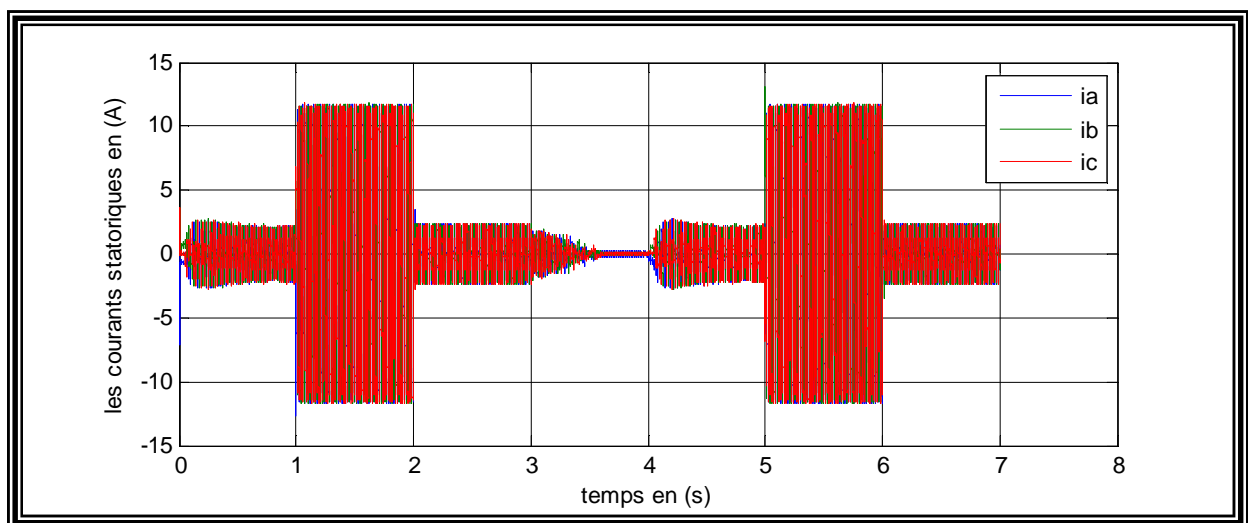


Figure III.16 : Les courants statoriques.

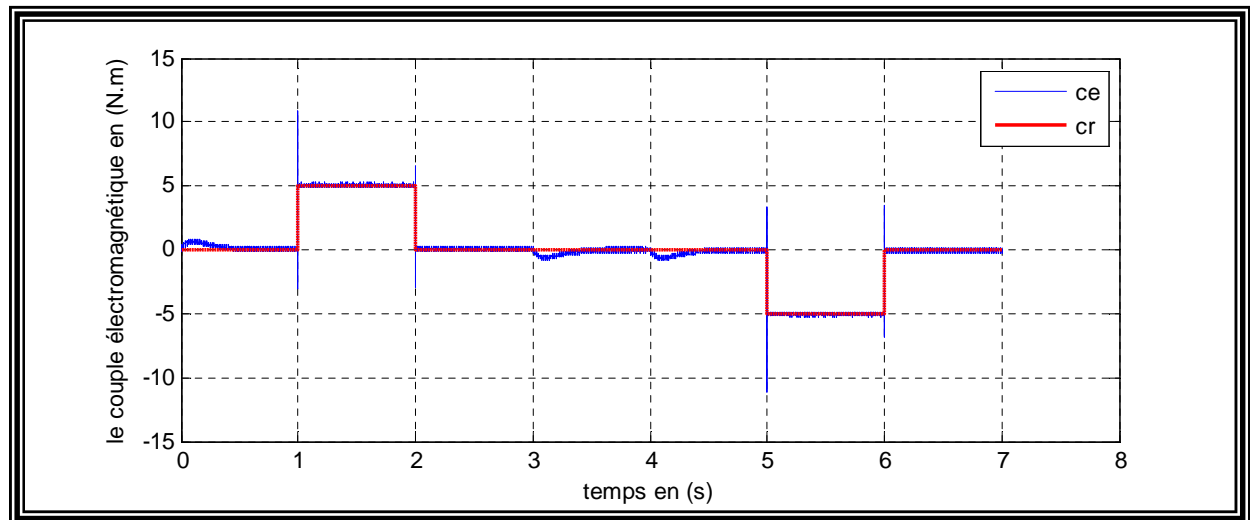


Figure III.17 : Le couple électromagnétique.

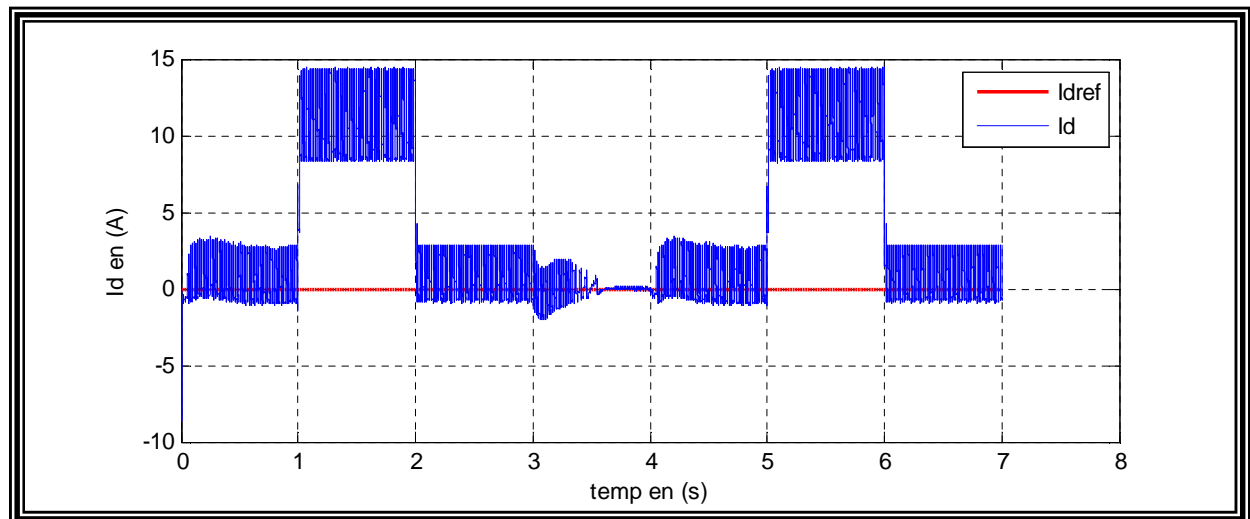


Figure III.18 : Le courant direct.

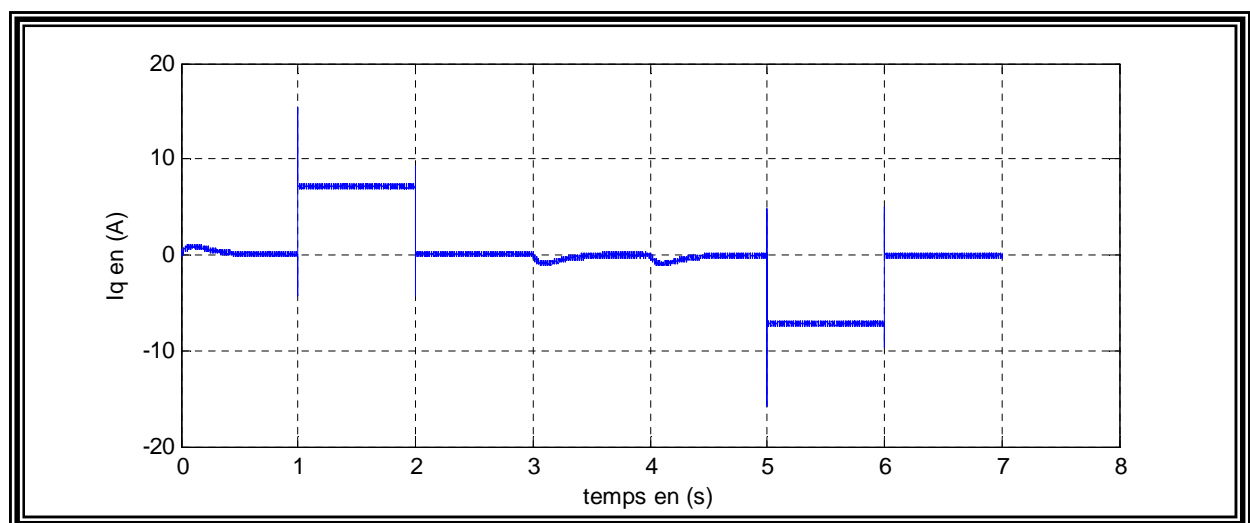


Figure III.19 : Le courant quadratique.

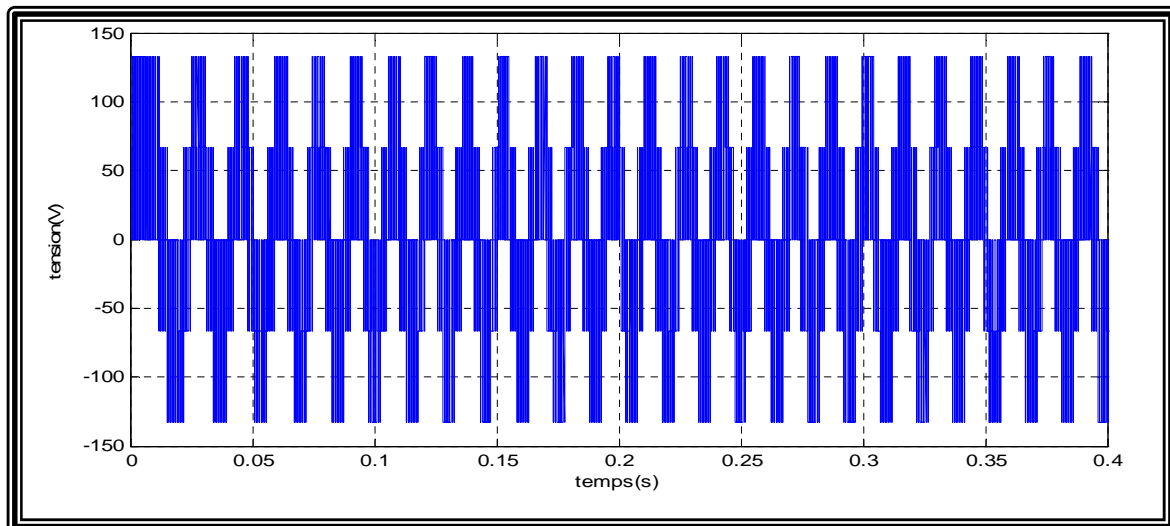


Figure III.20 : Zoom de la tension d'alimentation du moteur.

➤ Interprétation des résultats

Lors d'un démarrage en charge ($C_r=5\text{N.m}$) à l'instant $[1 < t < 2\text{s}]$ pour une consigne de 100 rad/s et une charge de ($C_r=-5\text{N.m}$) à l'instant $[5 < t < 6\text{s}]$ avec inversion de consigne -100 rad/s , On distingue que la vitesse du MSAP suit parfaitement la trajectoire de référence la figure III.14.

La figure II.15 montre l'erreur de vitesse présente des pics aux instants de variation du couple de charge, mais ces pics ne dépassent pas 2.5rad/s , dans ce cas l'erreur relative est de l'ordre 10^{-3} ce qui est satisfaisant.

La figure III.16 montre que les courants statoriques ont une forme sinusoïdale, leurs amplitudes sont presque nulles à vide, augmente à l'application du couple de charge afin de générer le couple électromagnétique nécessaire pour la poursuite de la vitesse de la référence, et s'annule au moment où le moteur s'arrête.

La figure III.17 montre que le MSAP développe un couple électromagnétique égale au couple de charge appliqué, on constate aussi que le couple présente des parasites dus à la modulation de largeur d'impulsion avec quelques variations aux instants $t=3\text{s}$ et $t=4\text{s}$, et cela est dû à la variation brusque de la vitesse.

La figure III.18 représente le courant direct statorique I_d , et on constate que la poursuite de la référence imposée est satisfaisante avant d'imposer le couple de charge à l'instant $[1 < t < 2\text{s}]$ et $[5 < t < 6\text{s}]$.

La figure III.19 montre que l'évolution du courant quadratique I_q suit l'évolution du couple de charge, avec la présence des parasites dus à la MLI.

La figure III.20 illustre l'allure de la tension d'alimentation du moteur, on voit que cette dernière suit l'évolution de la vitesse du moteur, car à l'instant où la vitesse s'annule l'allure de la tension change et cela est dû à l'autopilotage.

III.6 commande prédictive du véhicule électrique

III.6.1. Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée du VE

La figure III.21 présente le schéma structurel d'une application de la N.G.P.C au VE.

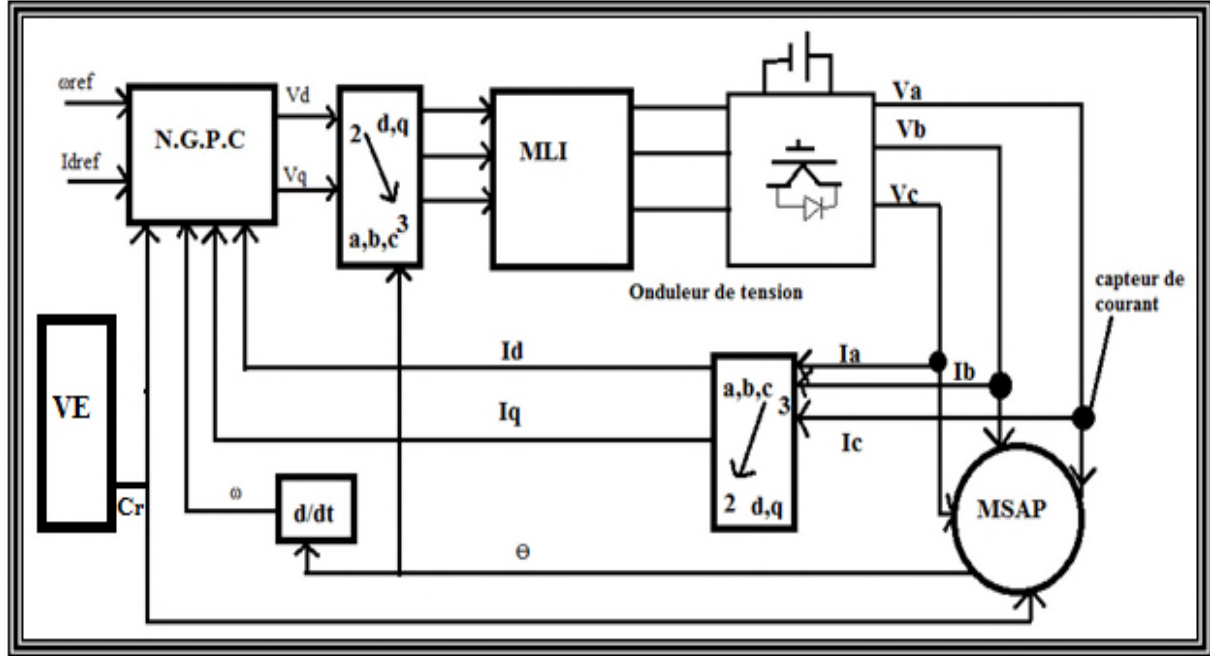


Figure III.21 : Schéma structurel de la commande prédictive non linéaire généralisée du VE.

D'après la dynamique du véhicule électrique étudié dans le chapitre II, on a abouti à l'équation de force de traction suivante :

$$\vec{F}_{tr} = \vec{F}_{roue} + \vec{F}_{grav} + \vec{F}_{aéro} + \vec{F}_{sf}$$

$F_{roue} = f_r \cdot m_{veh} \cdot g \cdot \cos(\alpha)$: Force de résistance au roulement.

$F_{grav} = m_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha)$: La force nécessaire pour vaincre une pente.

$F_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_f$: Forces aérodynamiques.

$\vec{F}_{sf} = M \cdot \vec{\gamma}$: Forces du frottement.

Les paramètres du VE utilisés dans les équations des forces sont donnés dans l'annexe B.

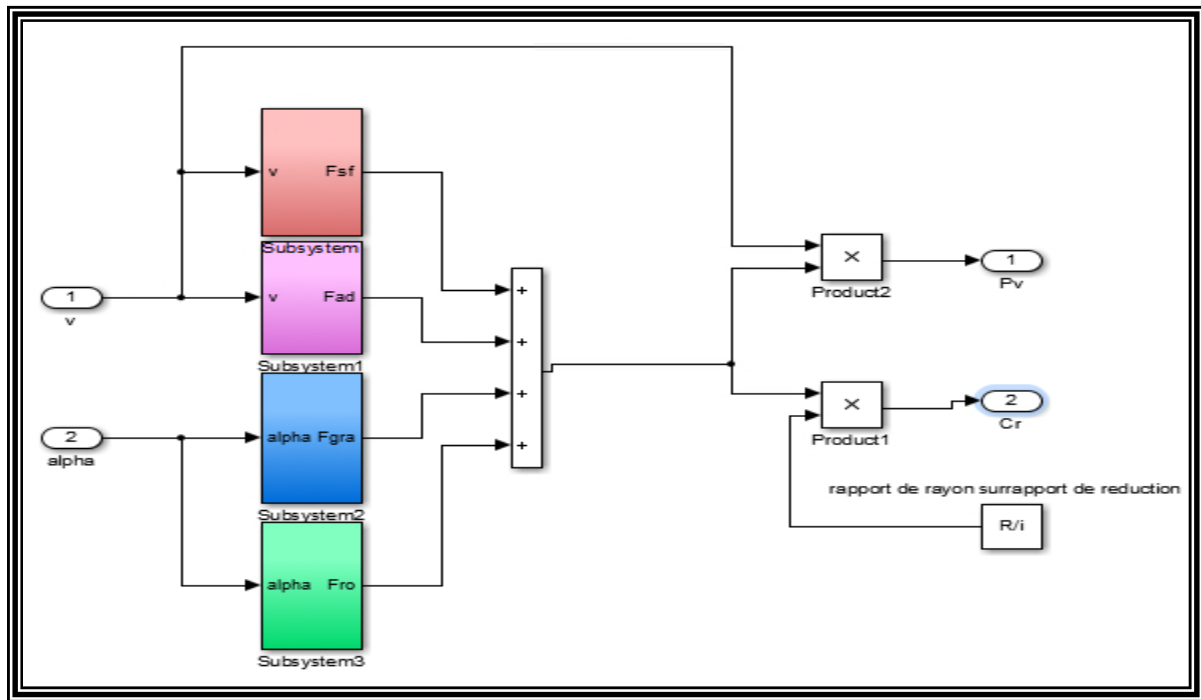


Figure III.22 : Schéma bloc du VE utilisé.

III.6.2. Résultats de simulation de la NGPC au véhicule électrique

Le modèle de la figure III.21 a été implémenté numériquement sur Simulink/Matlab, Le couple de charge considéré comme un véhicule électrique, Ce test traite la poursuite de la trajectoire. On considère que le véhicule trace un chemin droit de pente nulle à une vitesse de référence variable d'une vitesse de 60 rad/s à l'instant $[0 < t < 2s]$, 80 rad/s à l'instant $[2 < t < 4s]$ et d'une vitesse de 40 rad/s à l'instant $[4 < t < 6s]$

Nous avons relevé l'allure de la vitesse mécanique, la vitesse de référence, l'erreur de vitesse, les courants statoriques, le couple électromagnétique, le courant statorique direct (I_d), le courant statorique quadratique (I_q) et la tension d'alimentation.

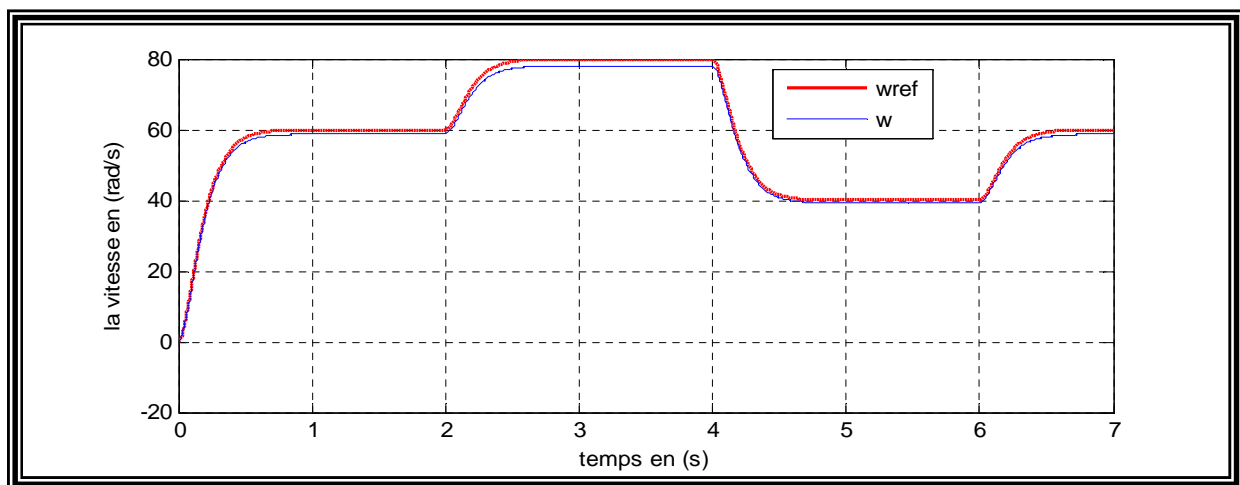
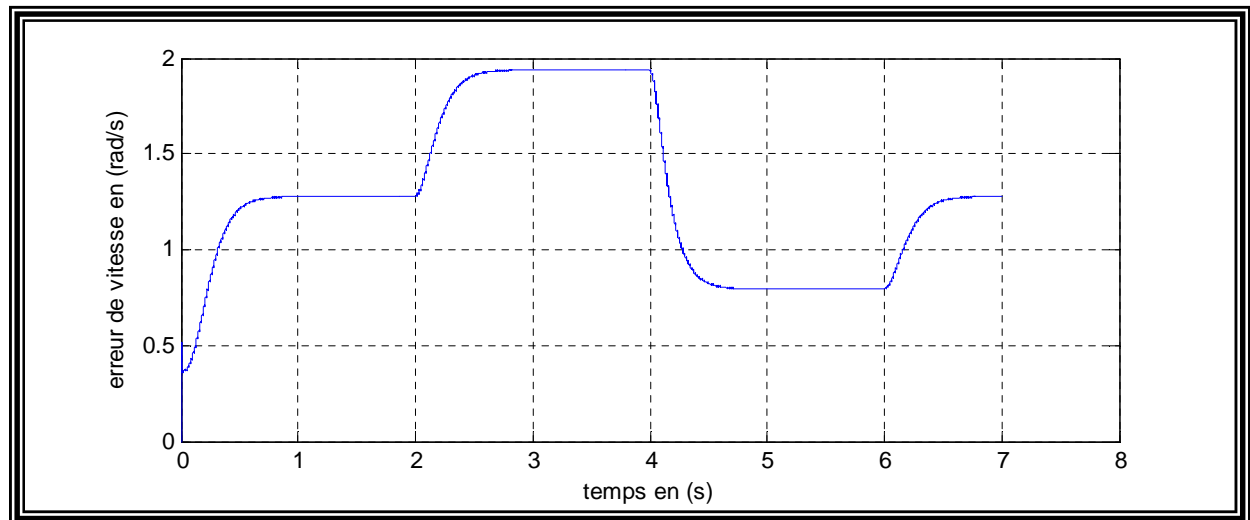
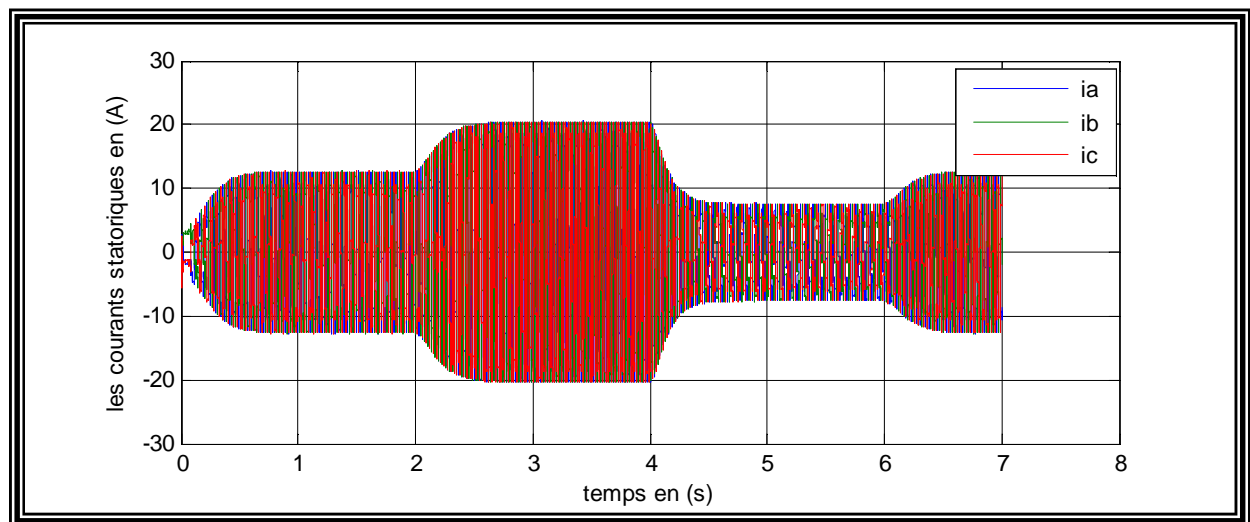
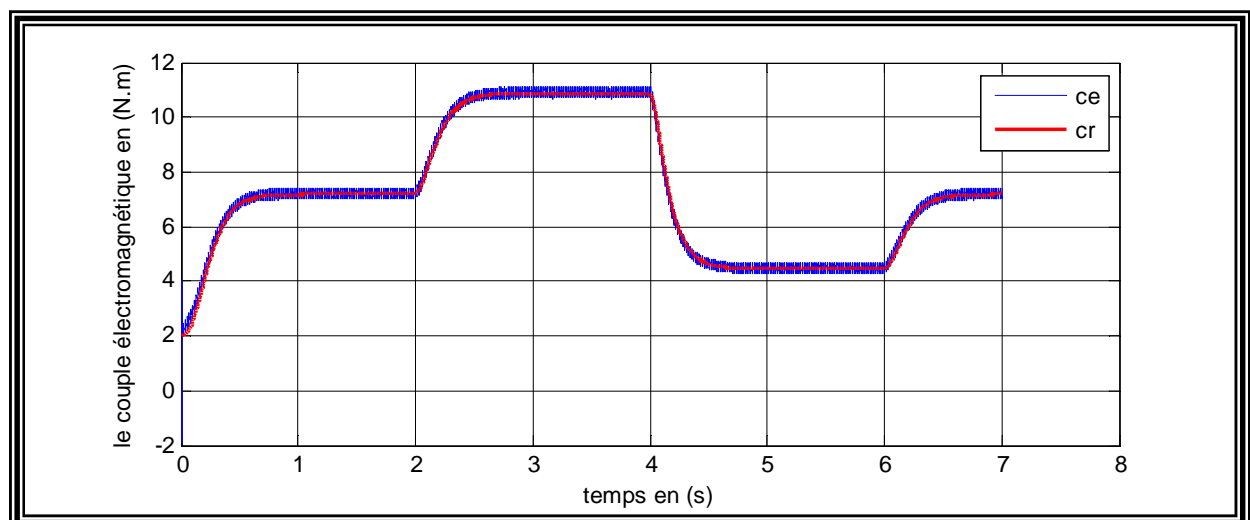
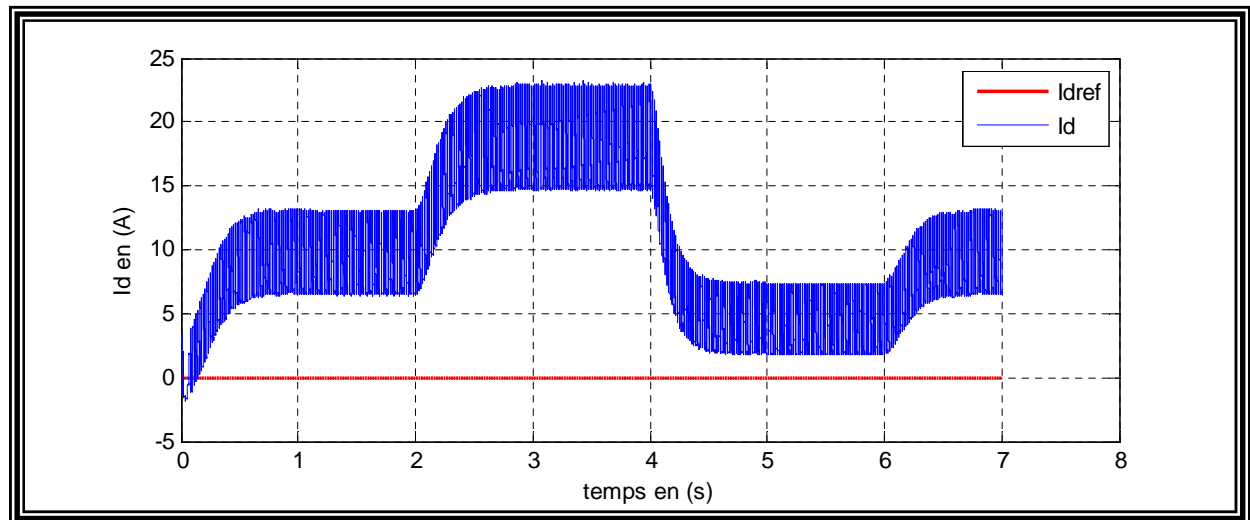
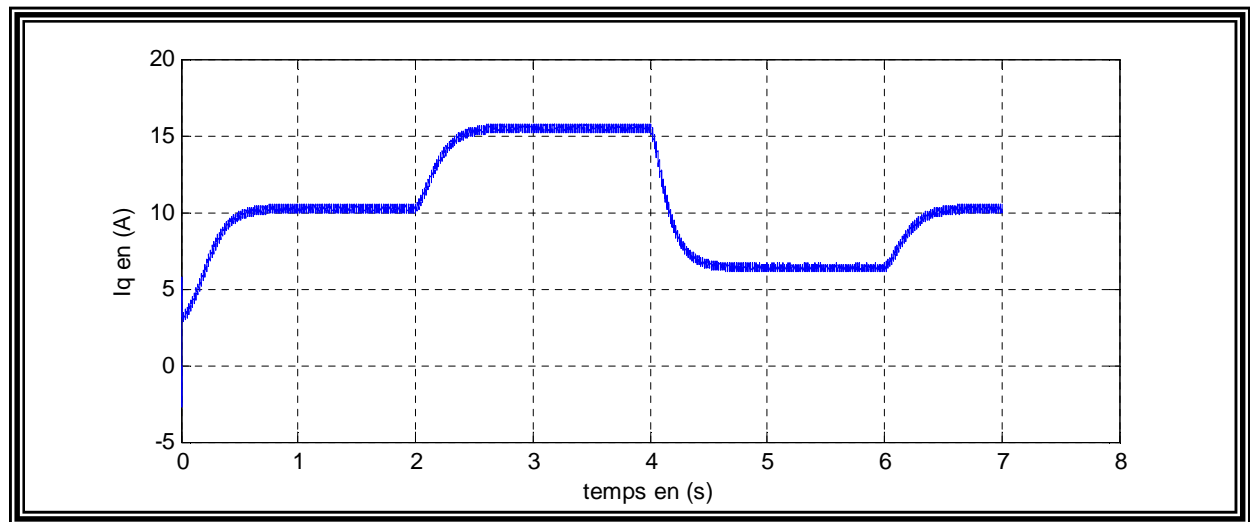
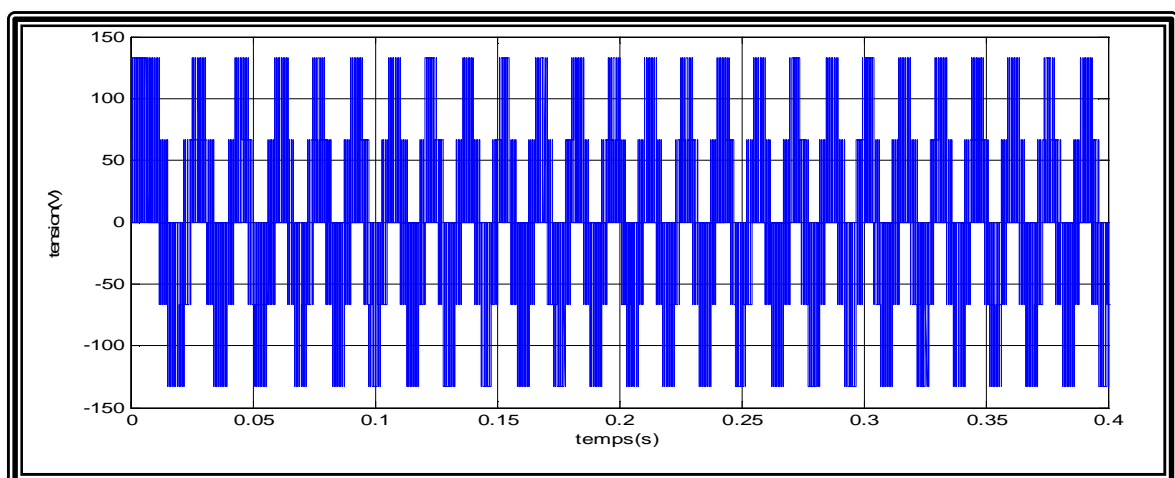


Figure III.23 : Vitesse mécanique de la MSAP piloté par la N.G.P.C associé au VE.

**Figure III.24 :** Erreur de vitesse.**Figure III.25 :** Les courants statoriques.**Figure III.26 :** Le couple électromagnétique.

**Figure III.27 :** Le courant direct.**Figure III.28 :** Le courant quadratique.**Figure III.29 :** Zoom de la tension d'alimentation du moteur.

III.6.3. Interprétation des résultats

Le démarrage du véhicule sur une pente nulle nous a donné une allure de vitesse mécanique illustré dans la figure III.23. Malgré l'application des forces sur le véhicule on remarque que la vitesse du moteur suit parfaitement la référence (suivi de consigne).

La figure III.25 représente l'évolution des courants statoriques. On remarque que ces derniers évoluent de façons à générer le couple nécessaire pour la poursuite de la vitesse de référence.

La figure III.26 illustre le couple électromagnétique qui suit parfaitement la trajectoire du couple de référence (rejet de perturbation).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la mise en œuvre de la commande prédictive non linéaire généralisé pour le pilotage d'un MSAP. Dans ce contexte une NGPC a été modélisée et simulée puis testée sur le MSAP.

Les résultats de simulations obtenus montrent que la poursuite des trajectoires de référence est respectée ainsi que le rejet de perturbation

Dans la dernière partie ce chapitre, on a présenté l'application de la N.G.P.C au véhicule électrique en variant la vitesse de référence et en considérant la pente nulle, les résultats de simulation indiquent le suivi de la consigne.

Conclusion générale

Face au défi climatique d'une part et la recherche permanente du confort d'autre part, il est devenu impérative de trouver une alternative aux moyens de déplacement actuels. Même si le réchauffement climatique est utilisé comme un simple slogan politique pour certains, il est évident que nous devons prendre conscience des effets que peut avoir ce fléau à long terme sur notre environnement. Pour parvenir à stopper ou du moins limiter ce réchauffement c'est l'humanité toute entière qui doit œuvrer ensemble et dans le même sens pour y parvenir. Ce travail est notre contribution à l'édification d'un monde plus pur.

Si aujourd'hui des prouesses technologiques sont accomplies dans le secteur des véhicules électriques, il n'en rien il y a deux siècles de cela. Le chapitre I de ce travail montre cette lente évolution chronologique. En effet, elle est due à l'élément limitatif du développement des véhicules électriques qui a toujours été la source d'énergie.

Afin de réaliser un travail complet nous avons touché le maximum de parties du système de traction électrique qui est le cœur des véhicules électriques. Ce système est composé des moteurs électriques, de convertisseurs de puissance et de leurs contrôles/commandes.

Dans ce mémoire on a étudié une technique de la commande prédictive, appliquée à la machine synchrone à aimants permanents.

Dans le chapitre II, on a modélisé d'abord la MSAP en utilisant le modèle de Park, puis on a simulé la MSAP autopiloté associé avec l'onduleur. La modélisation du moteur synchrone à aimants permanents par les équations d'état dans la référentiel (d, q) nous a été très bénéfique, du fait qu'elle nous amène de conclure que, le moteur synchrone à aimants permanents peut être commandé en utilisant la transformation de Park (d, q) .

Dans le troisième chapitre, on a étudié la commande prédictive non linéaire généralisée appliquée à la MSAP, les résultats de simulation indiquent d'assez bonnes performances lors de l'intervention de la charge et l'inversion de la consigne remarquant que l'amplitude des courants statoriques augmente lors de l'application du couple. Les forces de la dynamique ont une influence déterminante sur le comportement du véhicule.

La commande NGPC a montré la possibilité de poursuite de trajectoires prédéterminées pour le MSAP avec une bonne performance, en effet les résultats de simulation obtenus montrent que la poursuite des trajectoires de la vitesse rotorique et de courant direct statorique, sont très satisfaisants.

Annexes

Annexe A : Paramètres du moteur synchrone à aimants permanents utilisé.

Puissance	1.5 KW
Fréquence	50 Hz
Résistance statorique	$R_s = 1.4 \Omega$
Induction suivant l'axe « d »	$L_d = 0.0066 \text{ H}$
Induction suivant l'axe « q »	$L_q = 0.0066 \text{ H}$
Nombre de paire de pôles	$P = 3$
Flux permanent	$\Phi_f = 0.1546 \text{ Wb}$
Moment d'inertie	$J = 0.00176 \text{ N.m.s/rad}$
Coefficient de frottement visqueux	$f = 0.000388 \text{ Kg.m}^2$
Vitesse nominale	$\omega_n = 105 \text{ rad/s}$
Couple nominal	$C_n = 12 \text{ N.m}$
Temps de prédiction	$T_p = 100e^{-6} \text{ s}$
Tension nominale	$V_n = 240 \text{ V}$ par phase

Annexe B : Paramètres du véhicule électrique utilisé.

$m_{veh} = 150 \text{ kg}$
$S_f = 1 \text{ m}^2$
$R = 0.23 \text{ m}$
$A = 0.015$
$C_x = 0.25$
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
$K_a = 0.22$
$\rho = 0.23 \text{ Kg/m}^3$
$i = 5$

Références bibliographiques

- [1] : S. TCHUNG-MING, S. VINOT, "Les Energies pour le Transport : Avantages & Inconvénients", Edition Panorama Centre de Recherche IFP, France, décembre 2008.
- [2]. D.Benoudjit, "Contribution à l'optimisation et à la commande D'un système de propulsion Pour véhicule électrique", Thèse Doctorat Es-Science Université de Batna, Janvier 2010.
- [3] : Abdeljalil Daanone « Contribution à l'étude et à l'optimisation d'une machine synchrone à double excitation pour véhicules hybrides », Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de GRENOBLE, 7aout 2006 Spécialité : Génie électrique.
- [4] : B .GASBAOUI, "Analyse et Commande Directe du Couple d'un Véhicule Electrique à deux Roues Motrices", Thèse Doctorat Université de Béchar, 2012.
- [5] : K. Tanguy, Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier, Université laval, Québec, Canada, 2013.
- [6] : AOUZELLAG Haroun. « Stratégies de commande d'un véhicule hybride», mémoire de master : université A-Mira Bejaia, 2013.
- [7] : Nouh Aiman, « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers ». Thèse doctorat 26 mars 2008.
- [8] : « Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques : Données de la base sur les différentes technologies de stockage d'énergie », 2010.
- [9] : F. BELHACHEMI, « Modélisation et caractérisation des super-condensateurs à couche double électrique utilises en électronique de puissance », Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.
- [10] : Marc DEBRUYNE « Apport de l'électronique de puissance pour la traction électrique» technique d'ingénieur. 2010.
- [11] : Kevin Tanguy, « Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d'un complexe immobilier », Québec, Canada, 2013.
- [12] : A. PAYMAN, Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Multi-sources Multi charges, Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [13] : I. Husain Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals, CRC Press LLC, 2003.

Références bibliographiques

[14] : Y. Kchaou Etude d'industrialisation de véhicules électriques en Tunisie, Mémoire de Master professionnel, Université Virtuelle de Tunis, Juillet 2013.

[15] : A. Daanoune, Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse doctorat, Université de Grenoble, décembre 2012.

[16] : J. Bretta, le génie électrique automobile, la traction électrique, ouvrage page 99, Hermes Science Publications, 2005.

[17] : V. Mester, Conception optimale systématique des composants des chaines de traction électrique, Thèse doctorat, Ecole centrale de Lille, Mai 2007.

[18] : N. Janiaud, Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie des performances et des couts associés, Thèse doctorat, Supélec, Septembre 2011.

[19] : A. Laguidi, "Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.

[20] : M. PORNIN "Traction électrique automobile routière ", Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, juin 1981.

[21] : H.CHENNOUFI "Contribution à l'Etude de la Commande d'un Véhicule Electrique à Deux Roues Motrices", Thèse Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Février 2005.

[22] : P.CHAPOULIE, "Modélisation Systématique Pour la Conception de Véhicules Électriques multi-moteurs, Thèse Doctorat, institut nationale polytechnique de Toulouse, 1999.

[23] : BENNANI Samy et MERAHI Sofiane, «La commande non linéaire d'un véhicule électrique entraîné par un moteur asynchrone », Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2015.

[24] :<https://www.selection.ca/auto/guide-achat/auto-electrique-10-avantages-et-inconvenients/> consulté le 24 /04/2019 à 14h.

[25] : S.G Souffran, Dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission, Thèse doctorat, université de Nantes, juillet 2012.

[26] : Benbrahim Amel, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Magistère à université de Batna, juin 2009.

[27] : Y. Amara "contribution à la Conception et à la Commande des Machine Synchrone à

Références bibliographiques

Double Excitation Appliquée au Véhicule Hybride", Thèse de Doctorat, Université Paris, France, Décembre 2001.

[28] : H.AOUZELLAG " Stratégies de commande d'un véhicule hybride" Université de Bejaia 2012/2013.

[29] : M. Maaziz, "Commande adaptative des systèmes non linéaires : Application à la commande d'une machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Paris (2000)

[30] : O. A.V. Albán, "Contribution à l'identification et à la commande des robots parallèles», thèse de doctorat, Université MONTPELLIER II, 2004.

[31] : I. Quennic, "Optimisation d'un procédé de fermentation semi continu : Optimisation et commande", Thèse de Doctorat, Toulouse (1990).

[32] : livre de La commande prédictive Par Patrick Boucher, Didier Dumur 1996 éditions technip-paris ISBN 2-7108-0702-5 Issn 1152-0647

[33] : S. Aouaouda, «Modélisation Multimodèle Et Commande Prédictive D'une Station D'épuration », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Ubma) ,2012.

[34]: E.F. Camacho, C.Bordons, "Model Predictive Control", Springer-Verlag London, 2eme edition, 2003.

[35] : Nicolas Petit, Commande prédictive, Notes de cours, école centrale Paris, Année Scolaire 2005-2006.

[36] : A.MERABET. (Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone). Thèse de doctorat de l'université du QUEBEC à Chicoutimi, mai 2007

[37] : A.Kassatkine, « Electrotechnique élémentaire », Eddition Mir, Moscou,1987.

[38] : Destiny Loukakou Bounzeki Mbemba. Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains. Thèse de Doctorat de l'université de Franche-Comté, 2012.

[39] : A.Adjati. Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage. Mémoire de Magister, Université A.MIRA-BEJAIA. 2012.