

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



### **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Domaine: Sciences et Technologie*

*Filière : Electrotechnique*

*Spécialité : Commandes électriques*

## **THÈME**

# **Etude et modélisation de la chaîne d'entraînement électrique de la Toyota Prius**

*Préparé par:*

BOUBAKER Karim

*Soutenu publiquement devant le jury composé de:*

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Mr. K. NEGADI	MCA	Univ. Tiaret	Président
Mr. L. BESSOLTANE	MAA	Univ. Tiaret	Rapporteur
Mr. B. BELABASS	MCA	Univ. Tiaret	Examineur
Mr. A. TAHRI	MCB	Univ. Tiaret	Examineur

PROMOTION 2019 /2020

# Remerciement

Tous d'abord, je voudrais exprimer mes remerciements et ma gratitude à «DIEU tout-puissant» qui m'a donné la force, la patience et la volonté et le courage pour terminer ce travail.

J'ai la grande joie de remercier mon encadreur Mr BENSOULTANE pour ces précieux conseils et ces orientations qui nous ont éclairé le chemin durant toute la période de notre projet.

Mes remerciements les plus distingués vont aussi à l'égard de tous les enseignants du département de génie électrique.

Enfin, je remercie tous ceux qui nous ont tendu leur Main pour nous apporter leur aide.

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail :

- A celui que je n'oublierai jamais, à **mon cher père** que dieu le garde dans son paradis.
- A celle qui m'a donné l'amour et la tendresse, et qui m'a appris le courage toujours, **ma chère mère** à lesquelles je souhaite une belle vie.
- A mes chers frères et mes sœurs et leurs fils.
- Ainsi qu'à toutes mes cousins, mes cousines et à tous les membres de la famille de petits au grand.
- A tous qui m'ont enseigné pendant ma vie Scolaire.
- A toute mes amis.
- Enfin, tous qui me connaissent de près ou de loin.

*Karim*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I: Véhicules électriques et hybrides</b> .....	3
1. Introduction .....	3
2. Généralités sur les véhicules électriques et hybrides .....	3
2.1. Fonctionnalités .....	4
2.2. Classification des VEHs suivant l'hybridation .....	5
2.3. Architectures des VEHs .....	7
2.3.1. Structure série .....	7
2.3.2. Structure parallèle .....	8
2.3.3. Structure série-parallèle .....	8
2.3.4. Véhicules électriques 'pur' .....	9
3. Toyota Prius .....	10
3.1. Etat de l'art de la Toyota Prius .....	11
3.1.1. Première génération (1997 - 2003) .....	11
3.1.2. Deuxième génération (2004 - 2009) .....	11
3.1.3. Troisième génération (2009 - 2016) .....	13
3.1.4. Prius hybride rechargeable .....	14
3.1.5. Prius + (2012) .....	14
3.3.6. Quatrième génération (2016) .....	15
3.2. Conception et conditionnement du système d'entraînement de Prius .....	18
3.2.1. Unité de contrôle de puissance (PCU) .....	18
3.2.2. Groupe motopropulseur hybride TNGA pour la nouvelle Prius .....	20
3.3. Modes de fonctionnement de base .....	21
<b>Chapitre II: Motorisation électrique dans la Toyota Prius</b>	
1. Introduction .....	24
2. Batteries des VEHs .....	24
2.1. Types des batteries .....	25
2.2. Batterie utilisée dans la Prius .....	27
3. Modélisation de l'onduleur de traction dans la Prius .....	28
3.1. Onduleur de tension triphasée à commande MLI .....	31

3.2. Commande MLI sinus-triangle .....	32
3.3. Modélisation du filtre .....	33
4. Motorisation électrique dans la Prius.....	34
4.1. Présentation de la MSAP .....	37
4.2. Modélisation de la MASP triphasée .....	38
4.2.1. Equations électriques .....	39
4.2.2. Equations magnétique .....	39
4.2.3. Equation mécanique .....	40
4.2.4. Modèle de Park .....	41
4.2.4.1. Equations électriques dans le référentiel de Park .....	42
4.2.4.2. Equations mécaniques dans le référentiel de Park .....	43
4.3. Equation d'état de la MSAP .....	44
4.4. Commande vectorielle de la MSAM alimentée en tension .....	45
4.4.1. Principe de la commande Vectorielle du MASP .....	46
4.4.2. Couplage des grandeurs électrique dans la MSAP .....	48
4.4.3. Découplage par compensation .....	48
4.4.4. Synthèse des régulateurs des courants et de vitesse .....	50

### **Chapitre III: Simulation et interprétations des résultats**

1. Introduction .....	55
2. Simulation du convertisseur DC/DC bidirectionnel .....	55
3. Simulation du modèle de la MSAP avec $I_d = 0$ .....	56
4. Simulation de l'association MSAP- Onduleur en utilisant commande vectorielle .....	57
4.1. Modélisation de la MSAP .....	57
4.2. Principe de la technique MLI sinus-triangle .....	59
4.3. Description du système global .....	60
5. Conclusion .....	63
<b>Conclusion générale</b> .....	65
<b>Bibliographie</b> .....	66

# Table des figures

Chapitre I		
<b>Figure I.1</b>	Classification des différentes chaînes de traction hybride .....	5
<b>Figure I.2</b>	Chaîne de traction hybride série .....	7
<b>Figure I.3</b>	Chaîne de traction hybride parallèle .....	8
<b>Figure I.4</b>	Chaîne de traction hybride série-parallèle .....	9
<b>Figure I.5</b>	Véhicule tout électrique .....	9
<b>Figure I.6</b>	Photo de la Toyota Prius I et II (XW10/XW11/20) .....	12
<b>Figure I.7</b>	Photo de la Toyota Prius III (XW30) .....	13
<b>Figure I.8</b>	Photo de la Toyota Prius + .....	15
<b>Figure I.9</b>	Toyota Prius IV Business Edition+ PHEV .....	15
<b>Figure I.10</b>	Toyota Prius restyle à Los Angeles en 2019 .....	16
<b>Figure I.11</b>	Compartiments de l'ensemble onduleur et convertisseur Prius III .....	18
<b>Figure I.12</b>	Photo de la PCU séparé de la Prius III .....	18
<b>Figure I.13</b>	Configuration de la chaîne de traction de la Prius .....	19
<b>Figure I.14</b>	Comparaison de l'architecture de transmission de Toyota Prius III 2009 et Toyota Prius IV 2016 .....	20
Chapitre II		
<b>Figure II.1</b>	Vue interne d'une batterie .....	24
<b>Figure II.2</b>	Modèle statique équivalent de la batterie .....	25
<b>Figure II.3</b>	Batterie <i>Ni-MH</i> de la Toyota Prius .....	28
<b>Figure II.4</b>	Emplacement de la batterie dans la Toyota Prius .....	28
<b>Figure II.5</b>	Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius .....	29
<b>Figure II.6</b>	Schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux .....	31
<b>Figure II.7</b>	Principe de commande <i>MLI</i> sinus-triangle .....	33
<b>Figure II.8</b>	Représentation d'un filtre passé bas .....	34
<b>Figure II.9</b>	Arbre des différentes familles des machines électriques .....	35
<b>Figure II.10</b>	Caractéristique Couple/Vitesse d'engins moteurs .....	36
<b>Figure II.11</b>	MSAP utilisée dans la Prius : Stator et Rotor .....	37
<b>Figure II.12</b>	Représentation schématique de la <i>MSAP</i> dans l'espace électrique .....	38
<b>Figure II.13</b>	Différents couples agissant sur le rotor .....	40
<b>Figure II.14</b>	Représentation de la <i>MSAP</i> dans le système d'axe biphasé <i>d-q</i> .....	42
<b>Figure II.15</b>	Schémas de principe de la commande par orientation du flux de la <i>MSAP</i> alimentée en tension .....	47
<b>Figure II.16</b>	Description des couplages dans la <i>MSAP</i> .....	48
<b>Figure II.17</b>	Principe de découplages par compensation .....	49
<b>Figure II.18</b>	Commande découplée .....	50
<b>Figure II.19</b>	Schéma de principe d'un régulateur .....	50
<b>Figure II.20</b>	Boucle de régulation du courant $I_q$ .....	51
<b>Figure II.21</b>	Boucle de régulation du courant $I_d$ .....	53
<b>Figure II.22</b>	Boucle de régulation du la vitesse .....	53

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b>	Schéma de simulation de convertisseur <i>DC/DC</i> 201.6V-500V .....	55
<b>Figure III.2</b>	Tensions de la sortie de convertisseur <i>DC/DC</i> (201.6V-500V) .....	56
<b>Figure III.3</b>	Zoom de tensions de la sortie de convertisseur <i>DC/DC</i> (201.6V-500V) .....	56
<b>Figure III.4</b>	Modèle de la <i>MSAP</i> dans le repère <i>d-q</i> en imposant $I_d = 0$ .....	57
<b>Figure III.5</b>	Evolution de la vitesse mécanique $\omega_r$ en boucle ouverte avec $I_d = 0$ .....	57
<b>Figure III.6</b>	Evolution du couple électromagnétique $C_{em}$ .....	57
<b>Figure III.7</b>	Représentation des courants du Park $I_d$ et $I_q$ .....	58
<b>Figure III.8</b>	Représentation du flux directe et le flux quadratique .....	58
<b>Figure III.9</b>	Modèle de la <i>MSAP</i> dans le repère <i>d-q</i> .....	59
<b>Figure III.10</b>	schéma de principe de simulation d'un onduleur à MLI sinus-triangle .....	60
<b>Figure III.11</b>	Schéma de simulation globale, association <i>MSAP-Onduleur 2 niveaux</i> à MLI sinus-triangle .....	61
<b>Figure III.12</b>	Représentation de la vitesse mécanique .....	61
<b>Figure III.13</b>	Représentation de la tension d'une à la sortie de l'onduleur et sa tension de référence .....	
<b>Figure III.14</b>	Représentation du couple électromagnétique $C_{em}$ .....	62
<b>Figure III.15</b>	Représentation de la tension $V_d$ .....	62
<b>Figure III.16</b>	Représentation des courants de Park $I_d$ et $I_q$ .....	62

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Les véhicules électriques hybrides (VEHs) présentent les particularités de solliciter deux types de motorisations différentes, un moteur thermique et un moteur électrique. Ils disposent d'une batterie et d'un réservoir de carburant, l'intérêt est de profiter des deux types de motorisations afin d'améliorer les performances des VEs.

Il doit s'assurer un courant absorbé avec le minimum impact sur la qualité d'énergie et un facteur de puissance élevé afin de maximiser la puissance réelle disponible [1] [2]. Il doit être conçu, fabriqué et installé de telle sorte que le véhicule, dans la configuration «mode recharge de batterie sur le réseau électrique», puisse satisfaire aux dispositions de règlements internationaux de la CEM qui limitent les interférences électromagnétiques (IEM) et l'injection d'harmoniques et de courant continu dans les réseaux électriques [1] [3] [4].

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), le secteur des transports est fortement responsable de l'accroissement de la consommation d'énergie en France, ainsi que des émissions de polluants et de gaz à effet de serre. Parmi les différents modes de transport, le transport routier représenterait à lui seul 80 % de la consommation d'énergie. Or, pour son fonctionnement, le secteur des transports est dépendant à 98 % des produits pétroliers (ADEME, 2012).

Afin de rendre les véhicules moins consommateurs et moins polluants, de nouvelles normes européennes (Euro 4, Euro 5...) révisent à la baisse, tous les 4 ou 5 ans, les seuils d'émissions des principaux polluants réglementés. La recherche et le développement dans le domaine automobile permet de faire des progrès techniques pour diminuer les consommations des véhicules et par conséquent les émissions de CO<sub>2</sub>. Les quatre principaux axes de recherche portent sur : les carburants conventionnels et alternatifs ; les systèmes de dépollution pour la réduction des émissions à l'échappement ; les moteurs (thermique, électrique, hybride, pile à combustible) ; les accessoires (climatisation, pneus, allègement, bruit). Parmi les différentes pistes à explorer, nous nous sommes intéressés aux véhicules électriques hybrides et plus particulièrement au dimensionnement des composants de la chaîne de traction.

En effet, à l'heure où l'automobile doit répondre à des enjeux environnementaux majeurs, le dimensionnement des composants de la chaîne de traction est une problématique clef dans les systèmes hybrides. La complexité de l'architecture embarquée est accrue par rapport aux véhicules thermiques conventionnels et il devient primordial de dimensionner correctement ces éléments afin d'assurer la fiabilité de l'architecture tout en diminuant sa consommation énergétique. Or, ce compromis n'est

## **Introduction générale**

---

possible que par une bonne adéquation entre les systèmes de génération, les moyens de stockage d'énergie et les consommateurs électriques.

Ce projet aussi modeste qu'il soit a pour objectif d'étudier la chaîne de l'entraînement électrique de la Toyota-Prius

L'objectif de notre travail est de montrer les différentes étapes que constitue la chaîne électrique de la véhicule Toyota-Prius.

Ce mémoire est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude générale sur les véhicules électriques et hybrides avec la présentation de véhicule Toyota-Prius.

Dans le deuxième chapitre nous avons commencé par un état de l'art sur la Toyota Prius en présentant leurs différentes générations, nous avons étudié en suite quelque partie de la chaîne de traction de ce véhicule telle que la batterie, les convertisseurs statiques DC/DC bidirectionnel, onduleur et la machine électrique de traction en basant sur la technique de la commande de cette dernière.

Le troisième chapitre est destiné à la simulation numérique les idées traitées dans le chapitre précédent en exploitation les modèles développés à savoir: la simulation du convertisseur DC/DC, l'onduleur et la machine de traction. Des résultats sont obtenus et interprétés.

Ce travail est achevé par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Véhicules électriques et hybrides**

## 1. Introduction

Aujourd'hui le domaine du transport et notamment celui des véhicules est un secteur clé d'un point de vue consommation énergétique et de l'impact environnemental. Afin d'améliorer l'efficacité globale des véhicules, l'introduction de sources d'énergies alternatives embarquées est une solution. Deux solutions émergent actuellement : l'hybridation du moteur thermique par une source d'énergie électrique avec un taux d'hybridation plus ou moins important et la solution 100% électrique avec des problèmes d'autonomie et de coût qui lui sont associés [5].

On s'intéresse dans ce chapitre à la présentation dans un premier temps des types des véhicules électriques hybrides, ses classifications et les architectures existantes. Nous passons en suite à l'étude du véhicule hybride Toyota Prius, en commençant par un état de l'art. On représente en suite la chaîne l'unité de contrôle de puissance (UCP) ainsi que le principe de la chaîne de traction.

## 2. Généralités sur les véhicules électriques et hybrides

Un véhicule électrique hybride est un véhicule intégrant deux sources d'énergies différentes, par exemple un moteur thermique (MT) conventionnel avec son réservoir de carburant et une machine électrique associée à une source d'énergie électrique DC. En 1898, la Lohner -Porsche dite «a chaise» est le premier véhicule électrique hybride son architecture de type série incluait un moteur à combustion entraînant une génératrice qui alimentait des moteurs électriques (ME) situés dans les moyeux des roues avant. Cette automobile pouvait parcourir près de 60 km sur batterie seule. Dans les années 1900, une automobile mixte pétrole/électricité, développée par le constructeur Pieper, est commercialisée en Belgique. Un moteur électrique aidait le moteur à combustion de 3,5 CV dans les côtes et rechargeait les batteries dans les descentes [6] [7].

En 1902, la compagnie Krieger construisit quelques prototypes hybrides équipés d'un moteur thermique qui rechargeait les batteries via une dynamo. Ce constructeur basé à Paris fabriquait déjà des véhicules électriques avec roues avant motrices.

L'intérêt pour les véhicules hybrides commence à baisser avec le développement des moteurs thermiques et des chaînes de production d'Henry Ford à partir de 1904.

Entre 1910 et 1918, la société Commercial Construction Trucks a produit des véhicules dont le moteur à essence entraîne une génératrice qui alimentait directement le moteur de traction, éliminant ainsi la nécessité d'une transmission ou d'une batterie.

En 1969, les voitures hybrides réapparurent après une longue période sans avancée. La General Motors 512 a été conçue pour fonctionner selon trois modes : en tout électrique pour une vitesse inférieure à 10 miles/h, en combiné électricité-essence entre 10 et 13 miles/h et en tout thermique au-

delà de 13 miles/h. L'intérêt pour la technologie hybride revient après l'embargo pétrolier de 1973. Volkswagen développe un véhicule hybride appelé «Taxi » avec la plage de rendement la plus grande de tous les hybrides présentés dans le monde jusque là puisqu'une commutation est possible entre son moteur électrique et son moteur à essence.

En 1989, Audi présente son hybride Duo. C'est un hybride bi-mode dont le moteur électrique, alimenté par une batterie au nickel-cadmium, est connecté aux roues arrière du véhicule alors que le moteur thermique entraîne les roues avant.

L'ère moderne de l'automobile hybride commence en 1997 avec la commercialisation de la **Toyota Prius** au Japon. Deux ans plus tard, Honda lance l'Insight suivie de près par la Honda Civic hybrid. En une dizaine d'années, plus d'un million de véhicules hybrides ont été vendus dans le monde et plus de vingt nouveaux modèles ont été introduits sur le marché automobile [6].

### 2.1. Fonctionnalité

Grâce à l'hybridation de sa propulsion, un véhicule peut exploiter de nouvelles fonctionnalités par rapport au véhicule conventionnel afin de réduire sa consommation de carburant, d'améliorer ses performances et son confort de conduite [6].

- **Stop & start:** Ce système permet d'arrêter le moteur thermique lors des arrêts aux feux rouges ou dans les embouteillages, puis de le redémarrer rapidement avec la possibilité d'une aide du moteur électrique pour favoriser le démarrage du véhicule. Ainsi, la consommation de carburant du moteur au ralenti est économisée lors d'arrêts de courte durée.
- **Mode Boost:** Ce mode correspond à l'assistance du moteur thermique par la machine électrique. Cela permet de faire tourner le moteur thermique à un point de fonctionnement avec un meilleur rendement. Ce mode peut aussi être actionné lorsque la demande en puissance est supérieure à celle que peut développer le moteur thermique.
- **Mode régénération:** Dans ce mode, le moteur thermique fournit une puissance supérieure à celle demandée au niveau des roues afin de fonctionner à un meilleur rendement. Le surplus d'énergie est récupéré par la machine électrique, en mode génératrice, et emmagasiné dans un organe de stockage pour être utilisé ultérieurement.
- **Mode freinage récupératif:** L'énergie cinétique du véhicule au freinage est récupérée sous forme d'énergie électrique et stockée.

- **Mode tout thermique:** Cette fonctionnalité est celle d'un véhicule thermique classique puisque la batterie n'est pas utilisée. Ce mode est activé si la batterie est déchargée ou si le moteur thermique peut fonctionner à un bon rendement, lors d'un parcours autoroutier par exemple.
- **Mode tout électrique:** A l'inverse, il s'agit du mode pour lequel le véhicule est propulsé à l'aide de l'énergie contenue dans l'organe de stockage alors que le moteur thermique est arrêté. Ce mode offre tous les avantages du véhicule électrique: une consommation de carburant nulle, l'absence de rejet de polluant et un fonctionnement silencieux.

2.2. Classification des VEHS suivant l'hybridation

Les constructeurs et équipementiers utilisent souvent une classification des véhicules électriques hybrides suivant leur degré d'hybridation défini par le rapport entre la puissance du moteur électrique et la celle du moteur thermique. Les technologies de VEH se divisent en trois catégories, dépendant du niveau d'assistance du moteur électrique. On parle alors de chaînes de traction Micro-hybride, Mild-hybride et Full-hybride. Le véhicule électrique hybride rechargeable (Plug-in hybrid) est une variante de la technologie Full-hybride [8].

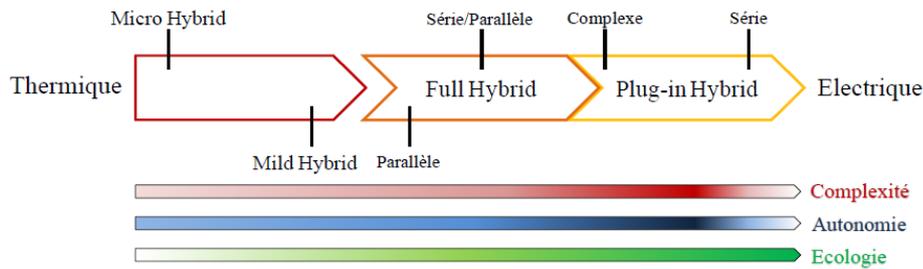


Figure I.1: Classification des différentes chaînes de traction hybride

Les types d'hybride et le gain en carburant relative ont été répertoriés par [6] dans le Tableau (I.1).

Tableau I.1: Synthèse types d'hybride et le gain en carburant relative

Type d'hybride	Fonctions	Gain en carburant sur cycle urbain
Micro hybrid ou Stop & start	<p>Arrêt du (MT) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le MT est stoppé afin de moins consommer ; Redémarrage du MT: (ME) (alternodémarreur) intégrée redémarre le MT quand le conducteur active la pédale d'accélérateur,</p> <p>Accélération : l'alternodémarreur peut aider le MT au démarrage et pendant de courtes accélérations ;</p> <p>Mode normal : le MT fonctionne seul, un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier aux acyclismes du MT.</p>	5 à 8 %
Mild hybrid	<p>La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est le remplacement de l'alternodémarreur par une ME;</p> <p>La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le MT ;</p> <p>La ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants que dans le cas d'un Micro hybrid et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.</p>	20 à 30 %
Full hybrid	<p>Sa configuration est quasiment la même que le Mild-hybrid mais les composants sont encore plus puissants ;</p> <p>La ME propulse souvent le véhicule seul, particulièrement pour une conduite en ville,</p> <p>Le MT peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée.</p> <p>Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.</p>	30 à 40 %
Plug-in hybrid	<p>Son architecture est semblable au Full hybrid mais avec la possibilité de recharger la batterie par une source extérieure, sur le réseau par exemple.</p> <p>La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances.</p> <p>Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full-hybrid.</p>	<p>Aucun carburant consommé en mode tout électrique.</p> <p>Comparable au Full-hybrid lorsque le moteur thermique est utilisé.</p>

### 2.3. Architectures des VEHS

Cette classification est la plus utilisée et la plus détaillée. Elle permet de mettre en évidence les couplages mis en jeu. Le choix dans ce rapport s'est porté sur trois principales appellations : hybride série, parallèle et mixte. Les explications qui vont suivre sont d'ordre général. Elles ne prennent pas en compte tout l'éventail que propose la solution hybride.

Lorsque l'on s'intéresse aux fonctionnements d'un VEH, une représentation structurelle est de préférence requise. Pour une question de lisibilité des différentes figures associées aux architectures, les convertisseurs de l'électronique de puissance seront donc représentés.

#### 2.3.1. Structure série

L'hybride série est l'architecture hybride la plus simple et la plus proche d'un véhicule 100% électrique. Dans cette configuration seule la machine électrique est connectée directement à la transmission et donc aux roues, elle doit être dimensionnée pour assurer la traction du véhicule. Le moteur thermique est associé à une génératrice électrique, faisant ainsi office de groupe électrogène et transformant l'énergie issue de la combustion en énergie électrique. L'électricité ainsi générée peut être emmagasinée dans batterie électrochimique ou être utilisée par le moteur électrique pour propulser le véhicule [6]. La transmission est donc électrique et constitue un avantage par rapport aux autres architectures car étant très flexible. Sur le marché des véhicules hybrides lourds, c'est l'architecture la plus rencontrée [9]. En plus, L'intérêt de cette structure est donc de pouvoir utiliser le moteur thermique à son point de fonctionnement optimal quelle que soit la puissance demandée au niveau des roues [10].

Le schéma de principe de la structure série ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes sont représentés à la figure (I.2) [9] [6] [10] [11] [12].

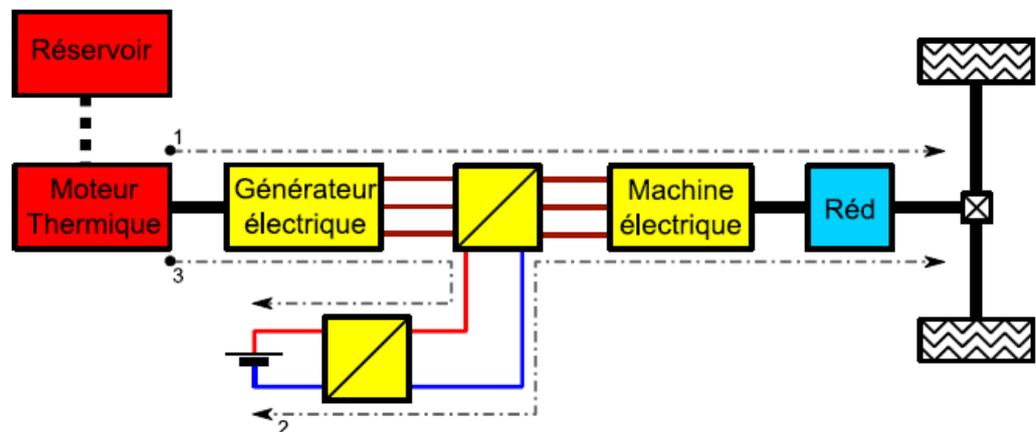


Figure I.2 : Chaîne de traction hybride série

### 2.3.2. Structure parallèle

L'hybride parallèle est une évolution de l'architecture des véhicules conventionnels. Le schéma de principe est illustré sur la figure (I.3).

Dans cette configuration, les moteurs thermique et électrique sont tous les deux connectés directement à la transmission donc aux roues. Ces deux moteurs peuvent ainsi participer indépendamment ou simultanément à la propulsion du véhicule, leurs puissances mécaniques s'additionnant au niveau des roues [6] [10].

Le fonctionnement simultané et optimisé des deux moteurs permet d'améliorer le rendement et de réduire la pollution [6] [9] [10] [11] [12].

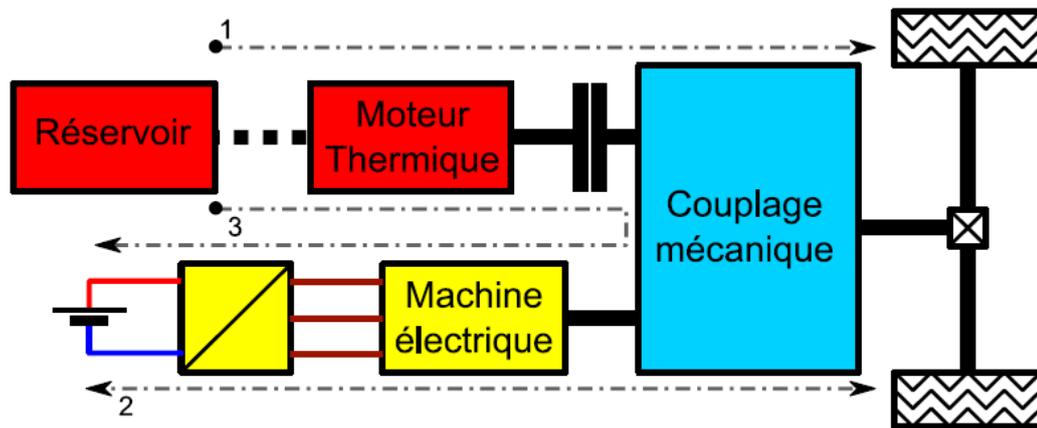


Figure I.3 : Chaîne de traction hybride parallèle

L'architecture hybride parallèle est complexe à contrôler car les deux sources de puissance sont directement reliées aux roues. Il faut donc une commande capable de répartir la consigne de couple entre le moteur thermique et la machine électrique à chaque instant. Le coût de cette architecture est néanmoins compensé par son potentiel important de réduction de consommation de carburant.

### 2.3.3. Structure série-parallèle (Structure combine ou mixte)

La chaîne de traction hybride série-parallèle a la possibilité de combiner les avantages des hybrides séries et parallèles, un fonctionnement série en basse vitesse et parallèle pour les puissances élevées. La transmission mécanique et la commande sont très complexes car pour un point de fonctionnement, il existe une multitude de solutions pour répartir le couple entre les trois moteurs [9] [6] [10] [11] [12].

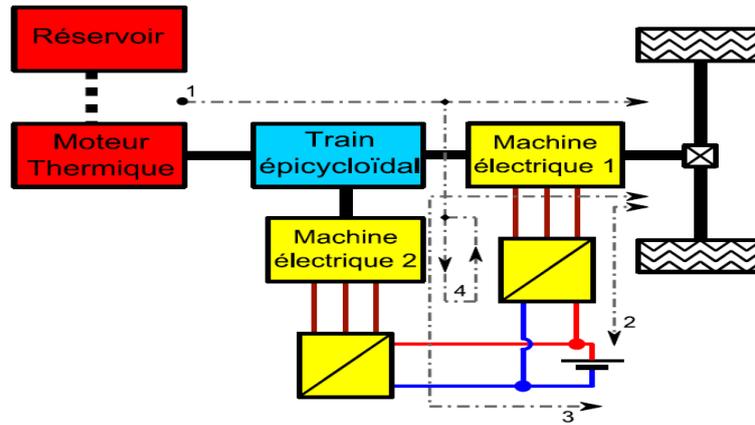


Figure I.4 : Chaîne de traction hybride série-parallèle

La chaîne de traction de type «série-parallèle» (aussi appelée «power-split ») est une combinaison entre une chaîne de traction série et une chaîne de traction parallèle. Cette chaîne de traction est aussi appelée chaîne de traction à dérivation d'énergie, car une partie de la puissance mécanique produite par le moteur thermique est détournée par la machine électrique 2 qui est ensuite réinjectée par le biais de la machine électrique 1, dans figure (I.4) est indiqué par les flux 1 plus 4. Ce type de fonctionnement permet de découpler totalement le point de fonctionnement du moteur thermique de celui du véhicule. En phase de freinage, les deux machines électriques reconvertissent de l'énergie cinétique en énergie électrique dont une très petite quantité est stockée dans la batterie, dans la figure (I.4) est indiqué par les flux 2 plus 3 [9] [11].

### 2.3.4. Véhicules électriques 'pur'

Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d'énergie. La structure est donnée par le schéma de la figure (I.5).

Les véhicules tout électriques proposés actuellement sont exclusivement urbains, leur autonomie est comprise entre 70 et 120 km avec des technologies de batteries relativement conventionnelles (plomb-acide et cadmium-nikel) et 150 à 200 km avec des technologies plus avancées (nikel-métal-hydrure et lithium). Le freinage récupératif permet d'accroître sensiblement l'autonomie, surtout en cycle urbain (d'environ 20%) [12].

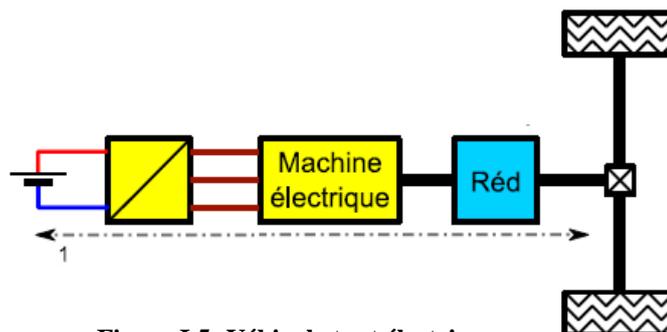


Figure I.5: Véhicule tout électrique

Pour une synthèse de diverses architectures, nous récapitulons les avantages et les inconvénients de chaque structure dans le tableau (I.2).

**Tableau I.2: Synthèse des diverses architectures des VEHS [9] [6] [10]**

Architecture	Avantages	Inconvénients
Série	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement énergétique en mode tous électrique en zone urbaine.</li> <li>- Gestion relativement facile</li> <li>- Très bon contrôle du moteur Thermique</li> <li>- Bonnes performances dynamiques de la machine électrique de traction (confort d'utilisation).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible rendement énergétique de la chaîne globale en zone extra-urbaine.</li> <li>- Utilisation de trois machines dont une (au moins) de forte puissance.</li> <li>- Mode tous thermique impossible.</li> </ul>
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement énergétique.</li> <li>- Modes tout électrique et tous thermique possibles.</li> <li>- Utilisation d'une seule machine électrique de puissance plus faible que pour l'architecture série.</li> <li>- Transmission peu modifiée (dans certains cas) par rapport au véhicule conventionnel.</li> <li>- Fourniture d'un couple supplémentaire de la machine électrique pour pallier les acyclismes du moteur thermique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion délicate.</li> <li>- Fonctionnement du moteur thermique pas toujours optimal.</li> <li>- Couplage mécanique et implantation des composants complexes.</li> </ul>
Série-Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement énergétique.</li> <li>- Tous les modes sont possibles (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle).</li> <li>- Très bonne répartition de l'énergie.</li> <li>- Pas de rupture de couple à la roue.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestion très délicate.</li> <li>- Couplage mécanique et implantation des composants très complexes.</li> <li>- Utilisation de trois machines.</li> <li>- Coût élevé.</li> </ul>
Tout électrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zéro émission.</li> <li>- Silencieux.</li> <li>- Confort d'utilisation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problème d'autonomie</li> <li>- Utilisation urbaine</li> <li>- Coût élevé</li> </ul>

### 3. Toyota Prius

La Toyota Prius est une génération de véhicules électriques hybrides, est très semblable au full-hybride, avec les deux motorisations (électrique et thermique) de puissance équivalente, puis une batterie avec une capacité encore plus intéressante. La nouveauté pour cette technologie est de permettre la recharge de la batterie sur une source extérieure (grâce à un chargeur et un câble), comme le réseau électrique [13].

Quelques commercialisations de VE sont réalisées à partir des années 1990, mais les chiffres ne sont pas vraiment encourageants. L'association entre le thermique et l'électrique au sein du véhicule hybride rechargeable a eu un grand succès sur le marché, particulièrement en 1997 avec le modèle de la Toyota «Prius».

Ensuite, depuis les années 2010, le VEHR connaît son essor avec des progrès technologiques importants et plusieurs constructeurs proposent maintenant des modèles hybrides [13].

### 3.1. Etat de l'art de la Toyota Prius

La Toyota Prius est une automobile hybride électrique produite par Toyota depuis 1997 avec quatre générations déjà commercialisées. La dénomination Toyota Prius couvre plusieurs modèles d'automobiles à motorisation hybride, présentant une double motorisation thermique et électrique et équipés du système *Hybrid Synergy Drive* (HSD).

#### 3.1.1. Première génération (1997 - 2003) [14]

Le premier modèle est, la Prius I type (XW10), une berline quatre portes avec une malle séparée, a été proposé en 1997 au Japon seulement. Il a été suivi en 2000 par une version techniquement remaniée mais à la carrosserie identique (XW11), disponible également en Europe, aux États-Unis et en Australie.

Tableau I.3: Caractéristiques techniques de la Prius I (type XW10) [9] [15]

<b>Moteur et transmission</b>	
Moteurs	1.5
Cylindrée	1 497 cm <sup>3</sup>
Puissance maximale	53 à 72 ch
Couple maximal	115 à 4 200 Nm
Transmission	Traction
Boîte de vitesses	E-CVT
<b>Poids et performances</b>	
Poids à vide	1 225 kg
Vitesse maximale	160 km/h
Accélération	0 à 100 km/h en 13,4 s
Consommation mixte	4,6 à 5,9 L/100 km
Émission de CO <sub>2</sub>	138 g/km

#### 3.1.2. Deuxième génération (2004 - 2009) [14]

La deuxième génération est la Prius II (XW20), elle bénéficie d'une carrosserie totalement redessinée. Est commercialisée fin 2003 au Japon et aux États-Unis, et début 2004 en Europe. Il marque l'accès de cette voiture à une réelle popularité, en particulier aux États-Unis.

La demande excédant largement l'offre, la production a été doublée en 2005 pour atteindre 100 000 exemplaires. Aux États-Unis, son marché préférentiel avec le Japon, il se vendait environ 8 000 à 10 000 Prius par mois au début de l'année 2005. La production mondiale de Prius (toutes générations confondues) a dépassé la barre des 500 000 exemplaires fin avril 2006 selon Toyota. Elle a été élue Voiture de l'année 2005 en Europe. En mai 2008, Toyota a annoncé avoir vendu 1 million de Prius dans le monde.

La figure (I.6) représente une photo de la Toyota Prius type XW10/XW11/20.



Figure I.6: Photo de la Toyota Prius I et II ( XW10/XW11/20)

Tableau I.4: Caractéristiques techniques de la Prius II (XW10/XW11/20) [9] [15]

<b>Moteur et transmission</b>	
Moteurs	- A essence 1,5 L, 14, DOHC 16 soupapes, à cycle Atkinson - Electrique: 500V, 400 Nm à 0 tr/min, 28 hp (20.9 kW) à 36 hp (26.8 kW)
Puissance maximale	Totale : 110 ch
Couple maximal	115 Nm à 4 200 tr/min (moteur à essence seul) ; 478 (pour l'ensemble) Nm
Batterie	201.6-volt en Ni-MH
Transmission	Traction, E-CVT (train épicycloïdal)
<b>Poids et performances</b>	
Poids à vide	1 320 kg
Consommation mixte	4,3 <sup>4</sup> L/100 km
Émission de CO <sub>2</sub>	104 g/km

### 3.1.3. Troisième génération (2009 - 2016) [14]

La troisième génération de la Prius est (Prius III) est lancée au printemps 2009 en Europe.

- Plus longue (15 mm) et plus large (20 mm), les occupants des places arrière, peuvent dorénavant compter sur une meilleure garde au toit.
- Le freinage est plus facile à moduler.
- L'affichage de la distribution d'énergie passe du grand écran au compteur.
- Phares à LED en option.
- Régulateur de vitesse qui s'adapte en fonction de la distance des autres véhicules (en option dans certains pays).
- Toit ouvrant avec panneau solaire et ventilation à énergie solaire en option.
- Affichage tête haute par projection sur le pare-brise.

Cette génération de Prius a terminé en tête de son marché en 2009 au Japon, toutes catégories confondues. En octobre 2010, Toyota annonce avoir vendu deux millions de Prius dans le monde (depuis le lancement du premier modèle). Une version légèrement modifiée est présentée début 2012. En février 2014, Toyota rappelle deux millions de Prius dans le monde à la suite de la détection d'un défaut du logiciel pour les modèles construits entre janvier 2009 et janvier 2014. Lors de certaines utilisations, le programme peut mettre la voiture en mode "de sécurité", ce qui en limite la puissance. Cela peut même aller jusqu'à couper le système hybride, ce qui provoque l'arrêt de l'auto. Toyota précise qu'aucun accident dû à ce dysfonctionnement n'est à déplorer.

Dans la figure (I.7) nous représentons une photo de la Toyota Prius III.



Figure I.7: Photo de la Toyota Prius III (XW30)

Tableau I.5: Caractéristiques techniques de la Prius III (XW30) [9] [106]

Moteur et transmission	
Moteurs	- A essence 1,8 litre, I4, DOHC 16 soupapes, 98 ch (73 kW) à 5 200 tr/min, 142 Nm, cycle Atkinson, VVT - Electrique: 650 V, 207 Nm à 0 tr/min, 36 ch (27 kW)
Puissance maximale	Totale : 134 ch (100 kW)
Batterie	201.6-volt en Ni-MH
Transmission	Traction, E-CVT (Train épicycloïdal)
Poids et performances	
Poids à vide	1 370 kg
Vitesse maximale	180 km/h
Consommation mixte	3,8 L/100 km
Émission de CO <sub>2</sub>	89 <sup>5</sup> g/km

### 3.1.4. Prius hybride rechargeable [14]

Une version rechargeable de la Prius III (VEHR « PHEV: Plug-in hybrid electrical vehicle ») est présentée lors de différents salons en 2009. Des expérimentations sont menées au cours de l'année 2010 au Japon, aux États-Unis et en France, à Strasbourg pour déterminer les conditions dans lesquelles sont utilisés les et l'infrastructure de charge.

La version de série de la Toyota Prius III hybride rechargeable a été présentée au salon de l'automobile de Francfort en septembre 2011 et sa commercialisation a débuté en Europe au cours de l'été 2012.

Ce nouveau modèle est équipé d'une batterie lithium-ion de 4,4 kWh qui autorise jusqu'à 23 km d'autonomie en mode électrique. Le temps de recharge via une prise classique est de 90 minutes. Cette version rechargeable est dotée des mêmes moteurs que la Prius III classique: à essence 1,8 L de 89 ch, associé à un moteur électrique de 36 ch. Au total, la combinaison des deux moteurs offre une puissance de 136 ch. Toyota annonce une consommation moyenne en cycle mixte de 2,21 l/100 km et un taux de CO<sub>2</sub> de 49 g/km (chiffres en cours d'homologation européenne).

### 3.1.5. Prius + (2012)

La Prius + ou PRIUS α (ZVW40W) est une Prius monospace a été présentée au salon de Détroit en 2011. Lancée en mai 2011 au Japon sous le nom de « Prius Alpha », elle est commercialisée à partir de juin 2012 en Europe sous le nom de « Prius + ». Comme les Prius rechargeables elle bénéficie de la technique des batteries Litium-ion plus compactes que celles des Prius non-rechargeables. Ces

batteries sont donc placées entre des deux sièges avant pour faire place à deux sièges supplémentaires dans le coffre, tout au moins sur les versions européennes [14].

La figure (I.8) représente une photo de la Toyota Prius +.



Figure I.8: Photo de la Toyota Prius +

### 3.1.6. Quatrième génération (2016)

La Toyota Prius IV (ZVW50R) existe en hybride et en hybride rechargeable. En septembre 2015, ce véhicule a été présenté pour la première fois au public lors du salon de Francfort 2015. Elle repose sur une toute nouvelle plateforme technique baptisée TNGA GA-C (Toyota New Global Architecture) modèles compacts. La Prius est le premier modèle Toyota à bénéficier de cette nouvelle plateforme. Elle est présentée au salon de Tokyo 2015 qui a lieu du 29 Octobre au 8 novembre 2015 [14].

Dans la figure (I.9) nous représentons la photo de cette génération est représentée à la figure.



Figure I.9: Toyota Prius IV Business Edition+ PHEV

Tableau I.6: Caractéristiques techniques de la Prius IV [9] [15]

<b>Moteur et transmission</b>	
Énergie	Essence et électrique
Moteur	4-cylindres
Cylindrée	1 798 cm <sup>3</sup>
Puissance maximale	98 (thermique) ; 122 (combiné) ch Euro 6 (66 kW)
Transmission	Traction AV, intégrale
Boîte de vitesses	E-CVT
<b>Poids et performances</b>	
Poids à vide	1 280 à 1 388 kg
Vitesse maximale	180 km/h
Consommation mixte	1,42 à 5,35 L/100 km
Émission de <u>CO<sub>2</sub></u>	32 à 144 g/km

Au salon de Los Angeles 2018, Toyota présente la phase deux de la quatrième génération de Prius, avec une version E-Four à quatre roues motrices. Elle a une retouche à la fois cosmétique et technologique. Extérieurement, le style de la face avant devient plus « sage ». Finis les feux tarabiscotés, place à des optiques un peu plus conventionnelles. Le bouclier avant est aussi redessiné. On se rapproche de la version rechargeable de la Prius. A l'arrière en revanche, on « tarabiscote ». Très verticaux sur l'ancienne version, les feux passent à l'horizontale avec une partie qui débord sur le hayon. En forme de « Z », ils sont sans doute moins sujets à la casse lors d'un léger choc sur le pare-choc [16]. C'est aussi techniquement que cette Toyota Prius évolue. En effet, elle bénéficie de ce que Toyota appelle le « Hybrid AWD-i: hybride quatre roues motrices-i ». C'est un nouveau système 4×4 hybride électrique intelligent qui amène une conduite plus sûre et plus apaisante. En gros, un autre moteur électrique est placé sur l'essieu arrière [16].



Figure I.10: Toyota Prius restylée à Los Angeles en 2019

Pour avoir une idée sur des caractéristiques de conception et des spécifications publiées des Prius nous représentons dans le tableau I.6 des comparaisons des VEH Prius 2008 LS 600h, Hybrid Camry, Prius 2004 et Prius 2004.

Tableau I.6: Comparaison des caractéristiques de conception VEH et des spécifications publiées [15]

Caractéristiques de conception	2008 LS 600h	Camry Hybrid	Prius 2004	Prius 2010
<b>Puissance de pointe du moteur</b>	165KW @ 5250 Révolutions par minute	105KW @ 4500 tr/min	50KW @ 1200- 1540 tr/min	60 KW
<b>Couple nominal de pointe du moteur</b>	300 Nm	270 Nm	400 Nm	207 Nm
<b>Indice de vitesse de rotation</b>	10.230 tr/min	14.000 tr/min	6.000 tr/min	13.500 tr/min
<b>Générateur séparé utilisé</b>	oui	oui	oui	oui
<b>Source de puissance MG2</b>	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur	Batterie et / ou ICE via générateur
<b>Conception du rotor de la MSAP</b>	AP intérieurs avec configuration triangulaire	PM intérieurs Avec configuration en «V»	Similaire à Camry	Similaire à Camry
<b>Configuration de l'enroulement du moteur</b>	Parallèle	Parallèle	Série	Série
<b>Nombre de pôles du rotor</b>	8	8	8	8
<b>Bi-directional dc-dc convertier output voltage</b>	~288-650 Vdc	250-650 Vdc	200-500 Vdc	200-650 Vdc
<b>Tension de sortie du convertisseur DC-DC bidirectionnel</b>	36.5 Kw	30 Kw	20 Kw	27 Kw
<b>Refroidissement de la MSAP</b>	Identique à Camry encore avec des gicleurs d'huile pour stator	Circulation d'huile et eau / glycol échangeur de chaleur	Similaire à Camry	Identique à Camry pourtant pas de direct échangeur de chaleur
<b>Refroidissement du convertisseur</b>	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol	boucle eau/glycol
<b>Transmission hybride</b>	Identique à Camry pourtant ravigneaux haut et bas rapport utilisé pour la réduction de vitesse	Engrenage planétaire utilisé pour la réduction de vitesse et la division du pouvoir	Un seul engrenage planétaire utilisé pour la répartition de la vitesse et de la puissance	Similaire à Camry
<b>Batterie de haute tension (HV) Ni-MH Refroidi par ventilateur</b>	288V, 6.5 Ah, 36.5 Kw	244.8V, 6.5 Ah, 30 Kw	201.6V, 6.5 Ah 20 Kw	201.6V, 6.5 Ah, 27 Kw

### 3.2. Conception et conditionnement du système d'entraînement de Prius

Dans ce paragraphe nous décrivons les évaluations des caractéristiques de conception et d'emballage des sous-systèmes de VEH Toyota Prius III et IV. Après avoir fourni une description générale de la conception du véhicule, des explications sur les fonctionnalités du système hybride sont présentées avec des illustrations et des photographies d'accompagnement.

#### 3.2.1. Unité de contrôle de puissance (PCU)

L'unité de contrôle de puissance (PCU) de la Prius III est un dispositif associé à un convertisseur DC-DC bidirectionnel, un convertisseur pour moteur et un convertisseur pour la génératrice, leurs emplacements généraux sont illustrés à la figure (I.11).

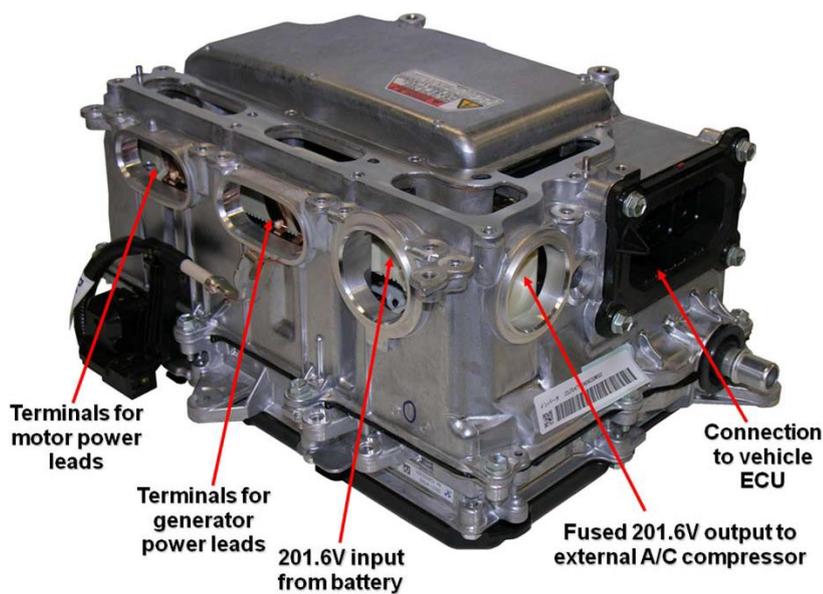


Figure I.11: Compartiments de l'ensemble onduleur et convertisseur dans la Prius III [15]

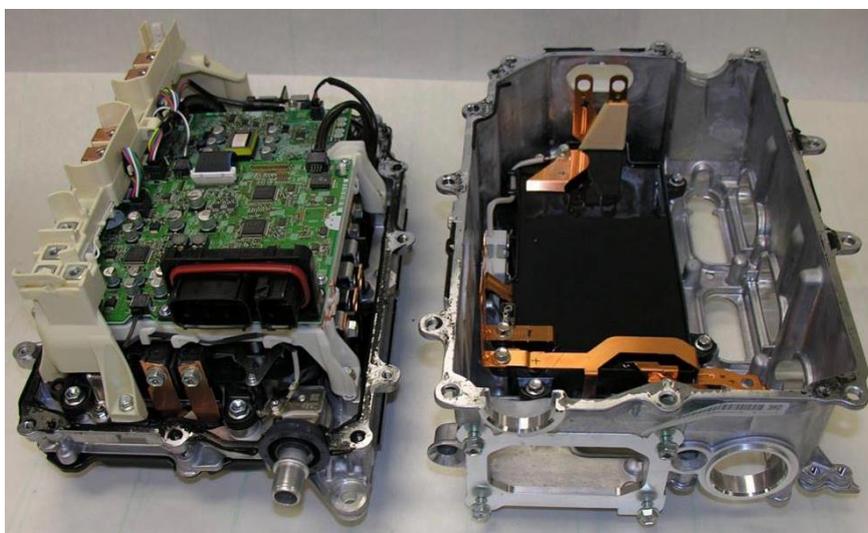


Figure I.12: Photo de la PCU séparé de la Prius III [15]

L'architecture d'hybridation adoptée dans Toyota Prius II, III, IV et Prius  $\alpha$  est l'architecture série-parallèle Full-hybrid sans transmission standard. Mais dans la deuxième phase de la Prius IV le système de traction adopte une autre architecture avec quatre roues. Au lieu de cela, un petit ensemble d'engrenages planétaires (train épicycloïdal), appelé "Power Split Device" (PSD) sert de mécanisme pour entraîner les roues du véhicule d'une manière qui simule une transmission à variation continue. Des commandes électroniques complexes gèrent le PSD, c'est pourquoi s'appelle une transmission électronique à variation continue (ECVT) [17].

Comme son nom l'indique, il répartit la puissance motrice entre les roues et le générateur. De cette façon, la puissance émanant du moteur thermique peut suivre deux voies, l'une mécanique et l'autre électrique. C'est également lui qui assure la transmission de couple du moteur électrique aux roues [12].

La chaîne de traction électrique étudiée dans ce travail est celle du Toyota Prius III dont le principe illustré à la figure (I.13) [12] [18] [17].

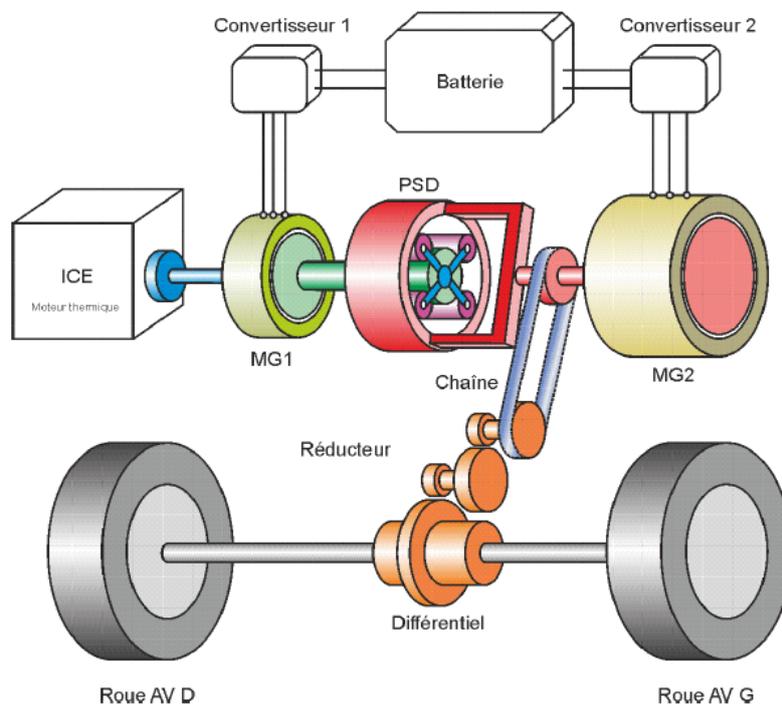


Figure I.13 : Configuration de la chaîne de traction de la Prius [11] [18] [17].

Comme le montre le diagramme ci-dessous, le train planétaire différentiel est fixé à l'arbre du moteur thermique, l'engrenage attaché au plus petit générateur/moteur électrique MG1 entraîné par l'ICE (Internal Combustion Engine). Il sert à recharger la batterie HV et à fournir du courant électrique au MG2. Il sert également de démarreur du moteur thermique. MG2 est le moteur d'entraînement,

alimentant les roues avec ou sans l'aide de l'ICE à l'aide le biais de quelques réducteurs et d'un différentiel standard.

Le système hybride utilise les forces motrices fournies par le moteur thermique et par le moteur électrique MG2, et il utilise le MG1 comme générateur.

Le répartiteur de puissance "PSD", est intégré à la transmission hybride au même titre que le générateur, le moteur électrique et les réducteurs [18] [17].

### 3.2.2. Groupe motopropulseur hybride TNGA pour la nouvelle Prius

Le constructeur automobile japonais, Toyota, a exposé les détails techniques du nouveau groupe motopropulseur (GMP) Moteurs, Transmission et Calculateurs, de la nouvelle Prius IV en 2016. Il est issu de la conception TNGA (Toyota New Global Architecture), le but étant de partager le plus de composants possibles entre les véhicules.

Pour pouvoir être équipé sur d'autres véhicules TNGA, la nouvelle motorisation hybride est plus compacte, tout en réduisant les pertes d'énergie de 20%.

Toute fois, les ingénieurs considèrent cette nouvelle motorisation comme une évolution normale: le principe ICE, MG1 et MG2 n'est pas modifié, les fondamentaux du programme de contrôle sont donc presque utilisés tels quels [19]. La figure (I.14) représente une photo comparant le groupe motopropulseur hybride pour la Prius III et ce lui de la Prius IV.

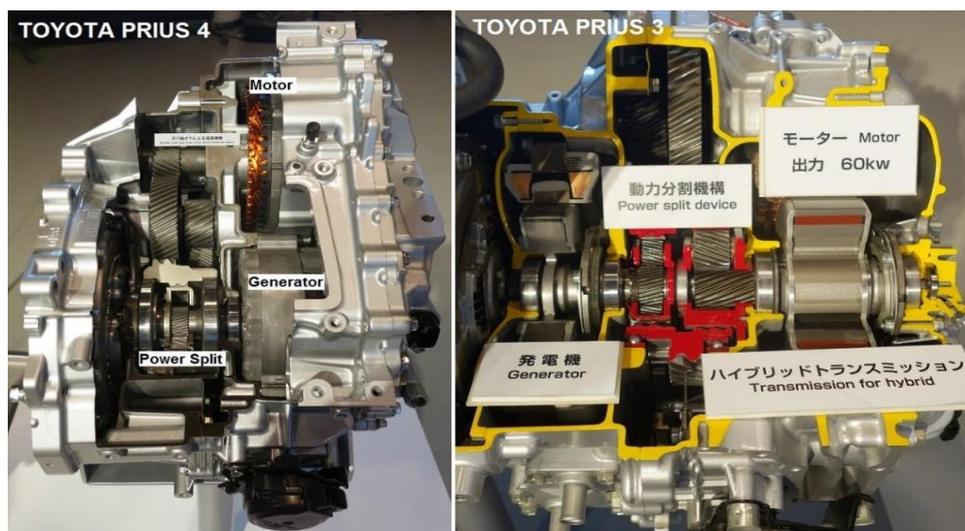


Figure I.14: Comparaison de l'architecture de transmission de Toyota Prius III 2009 et Toyota Prius IV 2016 [20] [19]

La grande évolution dans la quatrième génération provient de l'architecture des axes parallèles, alors que les deux moteurs électriques (MG1 et MG2) de la troisième génération précédente partagent le même axe, via un train épicycloïdal. Ce nouvel arrangement a permis de réduire la largeur de la transmission de 47 mm (11%), passant de 409 à 362 mm.

Avec des engrenages simples, les surfaces de contact sont diminuées (donc moins de frottement), tout en réduisant le nombre de composants de 80% [19].

- Le Moteur électrique MG2 est relié à la réduction finale via l'engrenage à axe parallèle.
- La génératrice MG1 et moteur thermique (ICE) sont reliés à la réduction finale via le train épicycloïdal (*pas de changement*).

Comme les précédentes Prius: Si on est peu sollicité et qu'on est dans le régime optimal du moteur, le surplus d'énergie produit par le moteur thermique est transmis au générateur (via le train épicycloïdal) pour recharger la batterie du véhicule. Si on a une forte sollicitation, le moteur électrique (MG2) et le moteur thermique (ICE) fournissent ensemble la puissance nécessaire.

Par ailleurs, la nouvelle Prius IV a revu le contrôle de motorisation hybride: la vitesse maximale en 100% EV passe de 70 Km/h à 110 Km/h, ce qui améliore légèrement la consommation sur route [19].

### 3.3. Modes de fonctionnement de base

La gestion optimale des modes de fonctionnement du système hybride permet d'optimiser la consommation d'énergie chimique. La vitesse du moteur thermique est asservie (par le biais d'un asservissement de la vitesse de la génératrice) à des valeurs optimales définies par le calculateur. Le moteur électrique est ainsi exploité à son rendement maximal. On distingue quatre modes [11]:

**Mode tout électrique:** Fonctionnement uniquement électrique, le moteur électrique MG2 entraîne le véhicule en puisant de la batterie (pollution nulle, silence de fonctionnement) avec une vitesse  $< 50\text{km/h}$  ; *2km maxi*. Le moteur thermique est arrêté.

**Mode hybride:** Le moteur thermique entraîne directement les roues du véhicule. La puissance du moteur thermique en fonctionnement se répartit dans le train épicycloïdal entre:

- La puissance directement transmise aux roues;
- La puissance transmise à la génératrice MG1 qui maintient la batterie chargée, L'ICE peut être assisté par le moteur électrique MG2 en cas de demande de puissance instantanée.

**Mode récupération d'énergie:** Le moteur MG2 se transforme en générateur lors des décélérations. Il est entraîné par le véhicule, récupère une partie de l'énergie cinétique et la convertit en énergie électrique qui recharge la batterie.

**Mode mixte:** Le moteur électrique et le moteur thermique entraînent le véhicule, lors de fortes accélérations. Dans ce mode, le moteur électrique MG2 est alimenté non seulement par l'énergie délivrée par la génératrice MG1 mais aussi par la batterie.

# **Chapitre II**

## **Motorisation électrique dans la Toyota Prius**

## 1. Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre à la présentation des différents éléments composant la chaîne de traction hybride, et particulièrement ce travail est destiné à l'étude de la chaîne de traction de la Toyota Prius.

La chaîne de traction électrique est généralement composée des sources (batteries, piles à combustible (PàC) ou super condensateur (SC)) et des récepteurs (moteur de traction et des auxiliaires). La gestion d'énergie entre ces deux derniers nécessite l'utilisation des convertisseurs statiques pour conditionner le flux d'énergie entre eux.

La source de stockage d'énergie est la batterie bien évidemment, cette dernière, est associée à un convertisseur continu/continu qui doit être bidirectionnel.

Le stockage de l'énergie est un obstacle majeur à une vaste adoption des véhicules électriques. La densité énergétique des batteries est inférieure à celle des produits pétroliers ce qui résulte en un poids supérieur pour une autonomie moindre.

Le coût des batteries et leur rechargement bien plus long qu'un passage à la pompe à essence est encore un autre frein [21].

## 2. Batteries des VEHS

La batterie est une réaction chimique pour le stockage d'énergie d'électricité, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), il peut y avoir soit libération d'énergie soit accumulation, est 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 [21] [5].

La figure (II.1) représente la vue interne d'une batterie.

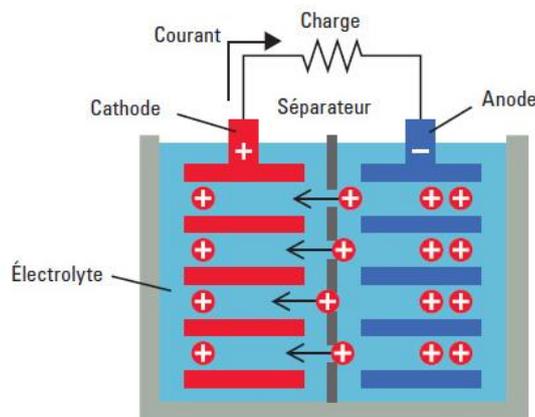


Figure II.1: Vue interne d'une batterie

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 [23].

Une batterie est modélisée comme un générateur de tension parfait en série avec la résistance interne de la batterie, comme dans la figure (II.2).

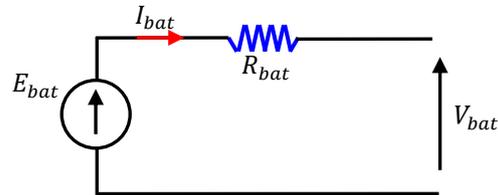


Figure II.2: Modèle statique équivalent de la batterie

Pour calculer la tension de la batterie on utilise l'équation suivante:

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{bat}I_{bat} \quad (II.1)$$

Tel que:  $R_{bat}$  est la résistance interne, et  $I_{bat}$  est le courant fourni par la batterie.

### 2.1. Types des batteries

Il existe des batteries de différentes formes (structure ou technologie), par contre l'utilisation des 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.

Parmi ces différentes technologies de batteries, certaines batteries peuvent être utilisées sur les véhicules électriques notamment [5]:

- La batterie Plomb (Pb) utilisée sur la C15 électrique.
- La batterie nickel cadmium (Ni Cd) utilisée sur Saxo électriques.

- La batterie Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride: Ni-MH) est utilisée sur les véhicules japonais et américains.
- La batterie Lithium-ion (Li-ion) est montée sur le prototype 106 Vedlic qui embarque 25000Wh pour 250 kg de batterie.

Le tableau (II.1) résumant les principales caractéristiques des batteries utilisées ou à l'étude pour la traction d'un véhicule terrestre [5] [22].

Tableau II.1: Caractéristiques pratiques des technologies de batteries les plus courantes

	Plomb	Ni-Cd	Ni -MH	Lithium phosphate	Zebra	Li-ion	Lithium polymère
Energie Spécifique (Wh/Kg)	30 – 50	45 - 80	60 – 110	120	120-140	150-190	150-199
Densité D'énergie (Wh/Litre)	75 - 120	80 - 150	220 - 330	180	190 - 220	220 - 330	220 - 330
Puissance En pointe (W/kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre De cycles	400-600 <sup>2</sup> 1500 <sup>3</sup>	2000	1500	800	>2000	500-1000	200-300
Auto décharge par mois	5%	20%	30%	12% Par jour	5%	10%	10%
Tension nominal d'un élément	2V	1.2V	1.2V	2.6V	3.2V	3.6V	3.7V
Gamme de température de fonctionnement	-20°C à 60°C	-40°C à 60°C	-20°C à 60°C	-20°C à 50°C	-0°C à 60°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible court	Fiabilité Performance à froid	Très bonne densité énergétique	Bonne densité énergétique bonne cyclabilité	Très bonne densité énergie sécurité court cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batterie minces possibles
Inconvénient	Faible énergie mort subite	Relativement basse énergie toxicité	Coûts des matériaux danger en cas de température élevée	Puissance limitée auto consommation	Charge à température positif	Sécurité des gros élément cout	Performance à froid cout
Coûts indicatifs (€/KWh) <sup>3</sup>	200 à 250	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

Les couples nickel-hydrure métallique (Ni-MH) et lithium-ion (Li-ion) présentent des énergies massiques et des densités énergétiques très supérieures à celles des batteries traditionnelles plomb ou nickel-cadmium (Ni-Cd). Ces couples électrochimiques sont très utilisés dans les appareils nomades portatifs (téléphones mobiles, ordinateurs portables). 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 [5] [22].

La technologie des batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride Ni-MH) 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 véhicules 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 [21].

Les batteries Li-ion présentent les énergies spécifiques les plus élevées (jusqu'à 190 Wh/kg) avec des tensions nominales supérieures à 3V contre 1,2V pour les batteries Ni-Cd et Ni-MH. Ces dernières rivalisent cependant avec les batteries Li-ion en termes de densité d'énergie volumique. Les batteries Ni-MH ont l'inconvénient de s'auto-décharger rapidement, mais sont très peu toxiques et ne posent pas de problème de sécurité majeur.

## 2.2. Batterie utilisée dans la Prius

Le système THS-II (Hybrid Synergy Drive) a adopté des batteries étanches hydrure de métal-nickel (Ni-MH) pour la batterie HV. Cette batterie HV possède des caractéristiques une densité à haute puissance, elle est légère et possède une remarquable longévité spécifiquement conçue aux caractéristiques du système THS-II.

Une prise de service chargée de couper le circuit est installée en intermédiaire de 28 modules (entre le module no.19 et le module no.20). Avant de procéder à des travaux d'entretien de n'importe quelle partie du circuit haute tension, il ne faut pas oublier de débrancher au préalable la prise de service [11].

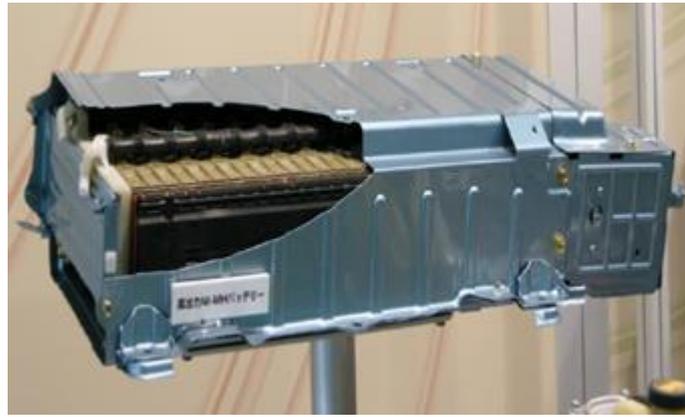


Figure II.3: Batterie Ni-MH de la Toyota Prius

La batterie utilisée par le système hybride de la Prius se compose de 228 éléments NiMH (Nickel Métal Hydrure) regroupés dans un bloc placé sous les sièges arrière avec une masse totale de 52 kg (figure (II.4)).



Figure II.4: Emplacement de la batterie dans la Toyota Prius

Chaque élément présente une tension d'environ 1,2 V et une capacité de 6,5 Ah.

Le courant maximal est de 80 A à la décharge et de 50 A à la charge.

Tension totale de la batterie :  $U = 228 \times 1,2 = 273,6 V$ .

### 3. Modélisation de l'onduleur de traction dans la Prius

Dans cette partie nous allons faire une exposition approfondie commence par l'unité de contrôle de puissance (PCU: power control unit), dans lequel les composants du convertisseur et de l'onduleur tels que les dispositifs EP et les condensateurs sont entièrement examinés. Enfin, la conception du PMSM et les caractéristiques PM est soigneusement revue.

Le choix de la technologie des composants de puissance est généralement resté à faire sur les calibres en courant, tension, puissance ainsi que sur les fréquences de découpage. Deux grandes familles de transistors sont utilisées aujourd'hui pour l'électronique de puissance des véhicules: MOSFET et IGBT. Les onduleurs (DC/AC) constitués découpent un signal continu pour le rendre alternatif à des fréquences entre 5 et 20 kHz dans l'automobile. Ce découpage est généralement réalisé par une méthode de MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) [24].

L'onduleur du Toyota Prius est à base de Si IGBT, avec une fréquence de découpage de 16 kHz et une tension batterie d'environ 201.6V, et une puissance de 21 kW [25]. Ces transistors sont également utilisés pour le chargeur de batterie du véhicule.

La figure (II.5) représente le schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius [15] [14].

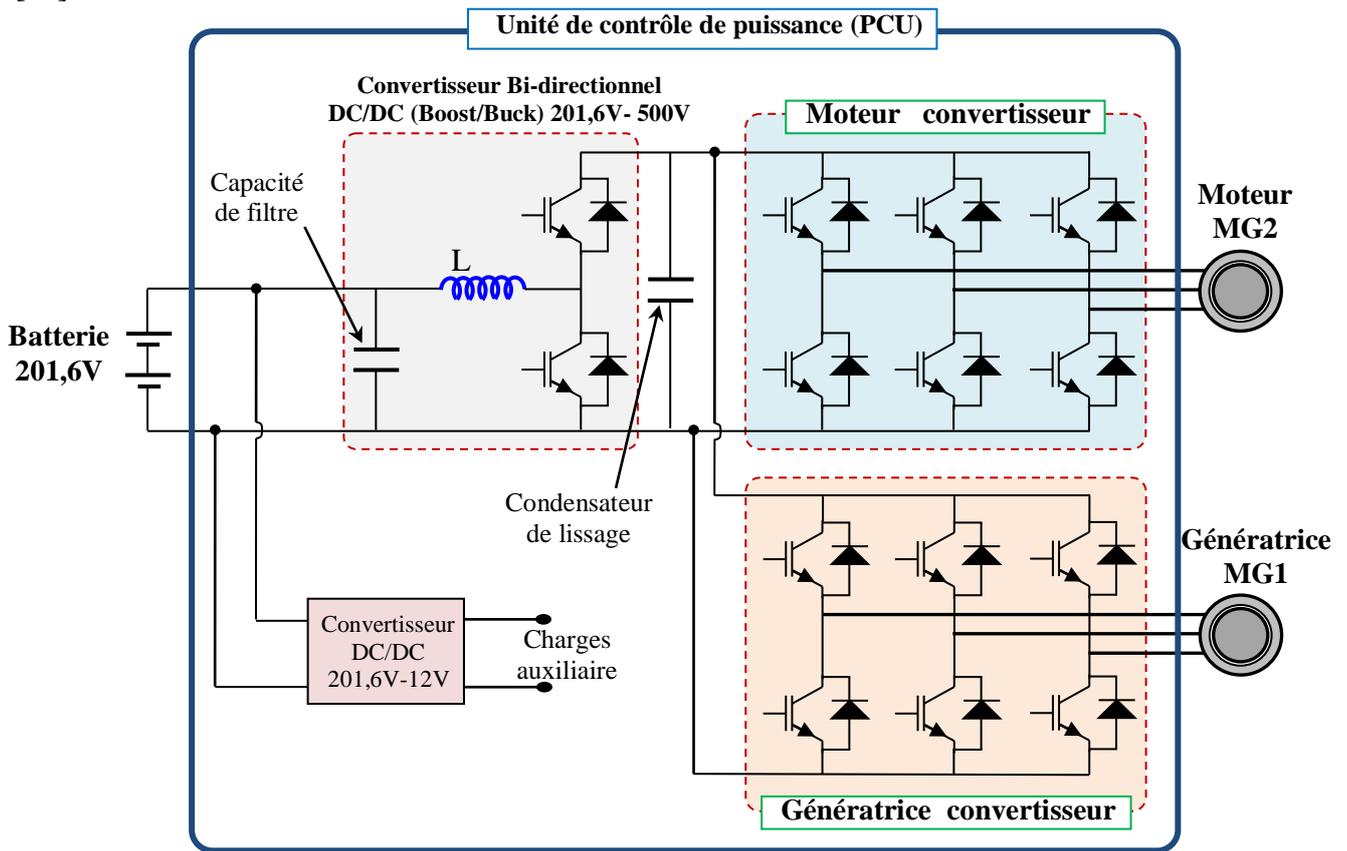


Figure II.5: Schéma de principe de l'unité de contrôle de puissance de la Prius

Le convertisseur DC/DC est hacheur Buck/Boost IPM (Intelligent Power Module) à base d'un IGBT. L'ECU de contrôle HV commande les IGBTs, qui contrôlent le courant dans l'inductance. Le convertisseur Boost augmente le courant continu haute tension évalué à 201,6 V à une tension de courant continu approximative de 500V. L'onduleur convertit la tension qui a été augmentée par le

convertisseur Boost en courant alternatif, qui est utilisé pour piloter le MG1 / MG2. Lorsque le MG1 / MG2 fonctionne comme un générateur, le courant alternatif d'environ 500V du MG1 / MG2 est converti en courant continu par l'onduleur, puis le convertisseur Buck fait chuter cette tension à une tension de courant continu de dans l'ordre de 201,6 V pour charger la batterie HV. L'ECU de commande HV utilise un capteur de tension intégré au convertisseur élévateur pour détecter la haute tension (VL) avant qu'elle ne soit amplifiée. En outre, il utilise un capteur de tension intégré à l'onduleur pour détecter la haute tension (VH) après son augmentation. Contrôler le fonctionnement du convertisseur élévateur.

Bien qu'une autre puissance supplémentaire de 12 V soit utilisée pour faire fonctionner des accessoires tels que le réseau auxiliaire, l'onduleur de traction, le chargeur des batteries et des équipements de communication. La tension de fonctionnement réelle est normalement comprise entre 13 V et 14 V, car il s'agit de la tension nominale de la batterie lorsqu'elle est chargée par l'alternateur du véhicule. Un convertisseur DC/DC à base des transistors MOSFET est utilisé pour convertir une tension de 201.6V DC en 12V DC avec une bonne efficacité et une sortie de 150W à 12VDC.

L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative, l'utilisation des onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs triphasés, les alimentations de secours, ... etc.

Grâce au développement technologique des semi-conducteurs, et l'apparition des nouvelles techniques de commandes les onduleurs sont devenus plus performants. D'autre part la forme de tension de sortie d'un onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde pour la quelle le taux d'harmoniques soit le plus faible possible, cette dernière dépend largement de la technique de commande utilisée [26] [27] [28].

Dans le tableau (II.2) on représente les spécifications des composantes des convertisseurs statiques dans la Prius.

**Tableau I.2: Spécifications des composantes des convertisseurs statiques dans la Prius [15]**

<b>Caractéristique de conception</b>	<b>Valeurs</b>
Puissance nominale du convertisseur DC-DC	27 kW
Voltage de batterie	201.6V
Condensateur de filtre (côté BT)	470 Vdc, 315 $\mu$ F
Inductance	225.6 $\mu$ H à 1 kHz
Petite résistance (côté HT)	53.8 k $\Omega$
Petit condensateur de filtre (côté HT)	860 Vdc, 0.562 $\mu$ F 900 Vdc, 0.8 $\mu$ F 950 Vdc, 0.562 $\mu$ F
Condensateur de lissage (côté HT)	750 Vdc, 888 $\mu$ F

3.1. Onduleur de tension triphasée à commande MLI

Un onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor, la sortie correspondant au point milieu du bras. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras, il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

L'onduleur de tension est alimenté par une source de tension continue d'impédance interne négligeable, sa tension n'est pas affectée par les variations du courant qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie [26] [27] [29].

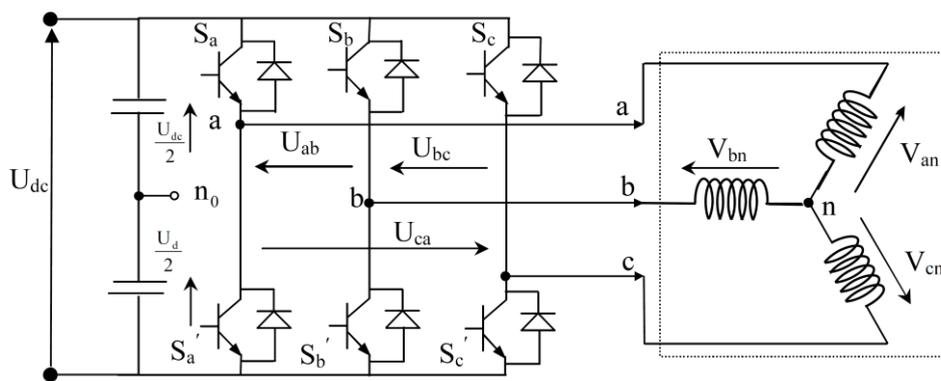


Figure II.6: Schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

L'état des interrupteurs, supposées parfaites peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i$  ( $i = abc$ )

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables  $S_i = 1$ .
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables  $S_i = 0$ .

Pour simplifier l'étude, on supposera que [30] [31]:

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions composées, on obtiendra [123] [125] [201]:

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} \\ U_{bc} = U_{bo} + U_{oc} = U_{bo} - U_{co} \\ U_{ca} = U_{co} + U_{oa} = U_{co} - U_{ao} \end{cases} \quad (II.2)$$

$U_{ao}$ ,  $U_{bo}$  et  $U_{co}$  peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit "  $n$ " l'indice du point neutre du coté alternatif, nous avons:

$$\begin{cases} U_{ao} = U_{an} + U_{no} \\ U_{bo} = U_{bn} + U_{no} \\ U_{co} = U_{cn} + U_{no} \end{cases} \quad (II.3)$$

$U_{an}$ ,  $U_{bn}$  et  $U_{cn}$  sont les tensions simples de la machine.

$U_{no}$  est la tension fictive entre le neutre de la MSAP et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors on aura :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \quad (II.4)$$

De (II.3) et (II.4) on aboutira à :

$$U_{no} = \frac{1}{3}(U_{ao} + U_{bo} + U_{co}) \quad (II.5)$$

En remplaçant (II.5) dans (II.3), on obtient :

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{2}{3}U_{ao} - \frac{1}{3}U_{bo} - \frac{1}{3}U_{co} \\ U_{bn} = -\frac{1}{3}U_{ao} + \frac{2}{3}U_{bo} - \frac{1}{3}U_{co} \\ U_{cn} = -\frac{1}{3}U_{ao} - \frac{1}{3}U_{bo} + \frac{2}{3}U_{co} \end{cases} \quad (II.6)$$

Alors

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{U_{dc}}{3}(2s_a - s_b - s_c) \\ U_{bn} = \frac{U_{dc}}{3}(-s_a + 2s_b - s_c) \\ U_{cn} = \frac{U_{dc}}{3}(-s_a - s_b + 2s_c) \end{cases} \quad (II.7)$$

On peut écrire l'équation (II.7) sous forme matricielle suivante (appelée matrice de connexion):

$$\begin{bmatrix} U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possible. Pour l'onduleur de notre système de commande, nous utilisons la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) sinus-triangle.

### 3.2. Commande MLI Sinus-Triangle

La commande MLI permet de former à la sortie d'un onduleur chaque alternance de la tension à l'aide d'une succession de créneaux rectangulaires, dont la largeur varie suivant une loi de commande qui a pour but de [30] [31].

- Repousser les fréquences des harmoniques en haut pour faciliter leur filtrage.
- Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.

Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de puissance et par les séquences de fonctionnement. La loi de modulation est une comparaison entre une tension de référence sinusoïdale  $V_{ref}(t)$  et une onde triangulaire appelée porteuse d'une fréquence  $f'$ , l'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs des sorties de l'onduleur [31] [33].

La figure (II.7) illustre le schéma de principe de réalisation d'un signal MLI.

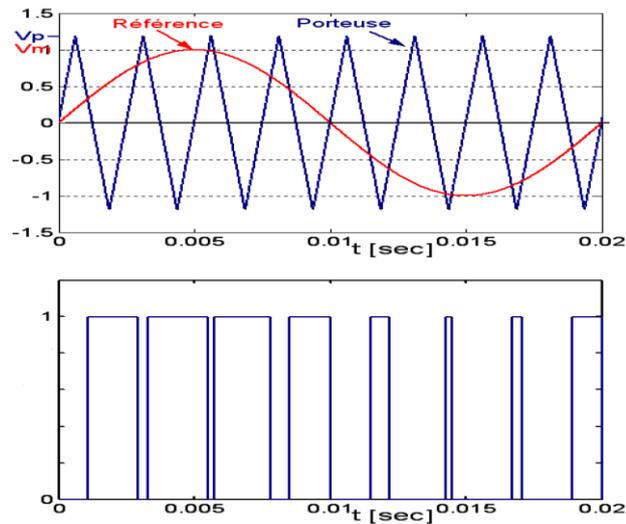


Figure II.7: Principe de commande MLI sinus-triangle

Deux paramètres caractérisent cette commande [33] [34]:

$$m = \frac{f_p}{f_r}, \quad r = \frac{V_r}{V_p} \tag{II.9}$$

Avec :

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

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

### 3.3. Modélisation du filtre d'entrée

Il est important de rappeler que le filtrage est l'opération qui consiste à séparer les composantes d'un signal selon leurs fréquences. Cette opération est réalisée par un circuit électrique appelé filtre qui est caractérisé par un certain comportement en fonction de la fréquence du signal d'entrée. On distingue deux types des filtres, les filtres passifs constitués uniquement d'éléments passifs (résistances, condensateurs, bobines) et les filtres actifs constitués d'éléments passifs et actifs

(transistors, amplificateurs opérationnels). Cependant, malgré l'apparition de nouveaux systèmes de filtrage actif, les structures passives restent les plus utilisées.

Dans notre travail on utilise un filtre LC passe-bas pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est illustré à la figure (II.8).

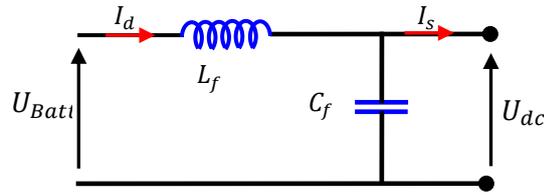


Figure II.8: Structure d'un filtre passe-bas de type Γ

Le modèle du filtre est défini par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} U_{re}(t) = L_f \frac{dI_d(t)}{dt} + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} [I_d(t) - I_s(t)] \end{cases} \quad (II. 10)$$

La fonction du transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_{rd}(s)} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L_f C_f} s)^2} \quad (II. 11)$$

Le rôle de la capacité  $C_f$  est d'assurer le caractère de la source de tension à l'entrée de l'onduleur, de fournir de l'énergie réactive à la machine, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.

Le rôle de l'inductance  $L_f$  est de lisser le courant  $I_d$  à travers la source de tension.

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (II. 12)$$

#### 4. Motorisation électrique dans la Prius

Il existe principalement deux types de motorisation électrique destiné aux véhicules électriques et hybride, la motorisation à courant continu et la motorisation à courant alternatif. La figure (II.9) résume respectivement ses deux familles de technologies.

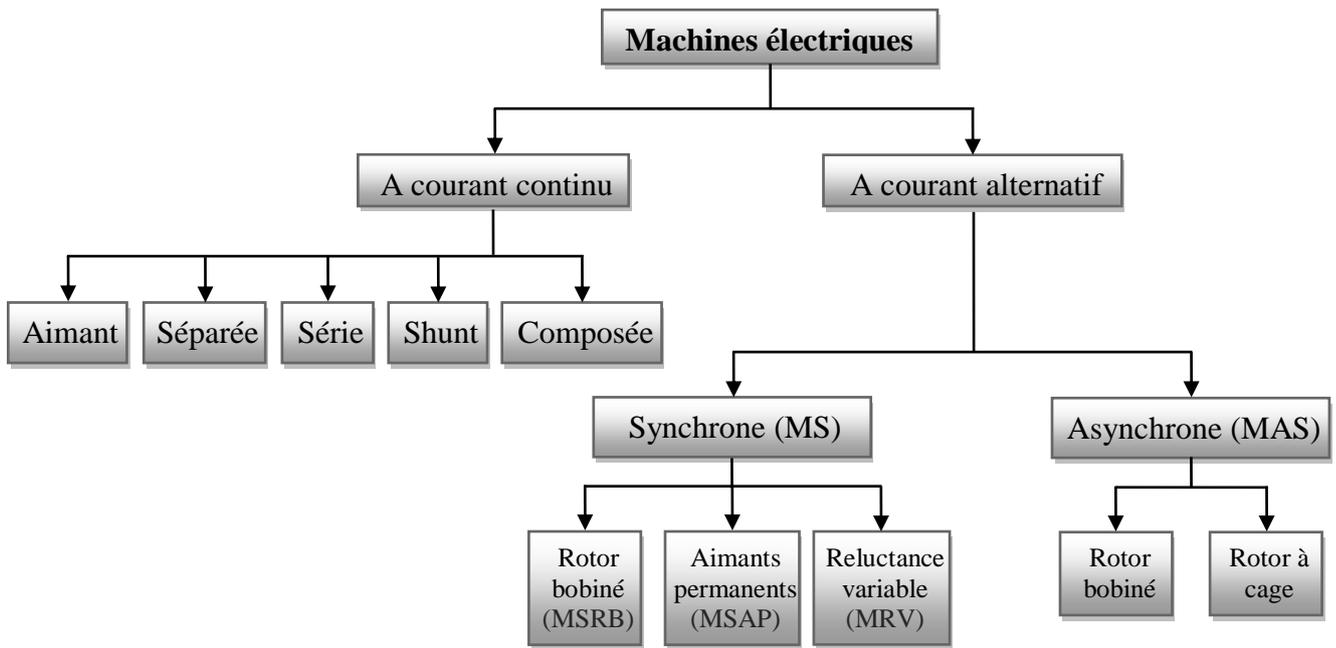


Figure II.9: Arbre des différentes familles des machines électriques

Le tableau (II.3) présente quelques applications des différentes technologies pour différents modèles de voitures [5].

Tableau II.3: Exemples de motorisations dans les VE

Modèles EVs	Type de motorisation
Fiat panda elettra	MCC série
Mazda Bongo	MCC séparé
Conceptor G-Van	MCC à excitation séparé
Suzuki senior tricycle	AM MCC
GM EV1	Moteur Asynchrone
<b>TOYOTA PRUIS</b>	<b>MSAP</b>
Chloride Lucas	Moteur à RV

Le bon choix de la partie électrique du véhicule électrique hybride est l'élément majeur pour la réussite au couplage entre le thermique et l'électrique.

Très utilisé depuis seizième siècle, la machine électrique est le composant principal du véhicule électrique, elle est souple, silencieux, ne pollue pas et elle s'adapte à toutes les situations.

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

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

Ces performances sont représentées sur une courbe que l'on appelle la caractéristique couple/vitesse du véhicule en mode moteur. La figure (II.10) présente ces caractéristiques pour des moteurs électriques dédiés à l'entraînement direct dans le domaine du transport. On distingue deux zones

de fonctionnement: dans la première, le moteur électrique fournit un couple constant afin de ramener le véhicule à une première vitesse de croisière appelée «vitesse de base,  $\Omega_{max}$ ». Une fois que la limite du système d'alimentation électronique est atteinte, on fait fonctionner celui-ci en puissance absorbée constante. Ceci se traduit par une diminution du couple et une accélération si l'on réduit le flux d'excitation du moteur. Dans la deuxième zone, le régime de fonctionnement atteint une vitesse  $\chi\Omega_{max}$ . Le paramètre  $\chi$  supérieur à 1, est le coefficient de survitesse par rapport à la vitesse de base [5] [7].

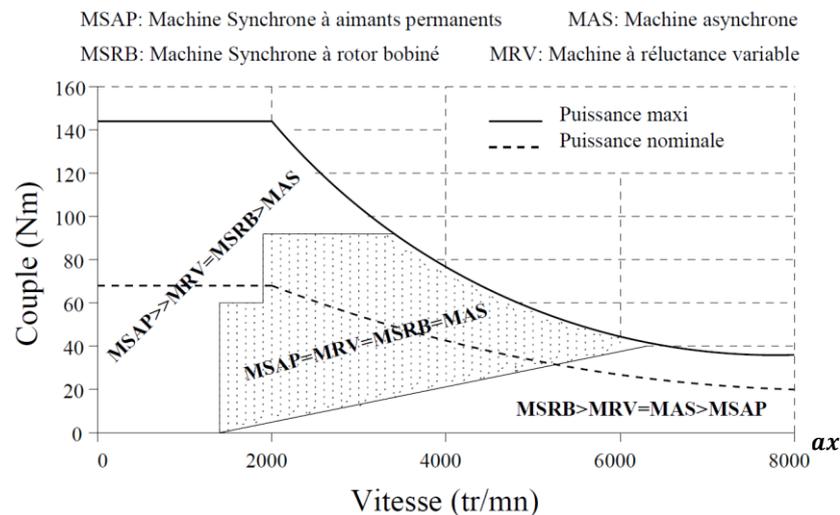


Figure II.10: Caractéristique Couple/Vitesse d'engins moteurs

Donc en fonction du type du véhicule fabriqué, les constructeurs orientent leurs choix sur trois principaux types des moteurs électriques:

- Machine à courant continu,
- Machine synchrone,
- Machine asynchrone.

En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu (excitation série ou parallèle), mais l'évolution d'électronique de puissance et les matériaux tels que les aimants permanents conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations synchrone ou asynchrone [5].

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) plus performant et plus compact grâce à sa puissance massique élevée. C'est la technologie de machine qui a les meilleures performances en couple et en dynamique [5]. Pour ce la, cette machine semble à plus d'un titre, la solution la plus

adaptée pour une traction automobile grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. Elle a été retenue par Toyota dans la Prius pour les raisons suivantes [20]:

- Bon rendement
- Bonnes performances dynamiques grâce à la faiblesse des inductances statoriques due à la largeur importante de l'entrefer apparent;
- Champ magnétique important dans l'entrefer;
- Pas de source de tension continue pour l'excitation;
- Elle dispose d'excellentes performances en couple et puissance;
- Inertie du rotor très faible.

#### 4.1. Présentation de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents se composent d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents.

Les moteurs à aimants permanents peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électroniques, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple). L'excitation, dans ce cas, est créée par les aimants permanents. Le couple instantané (dans n'importe quelle configuration de machine à aimants) est la somme de trois couples élémentaires : le couple réactif, le couple hybride et le couple de détente [31].

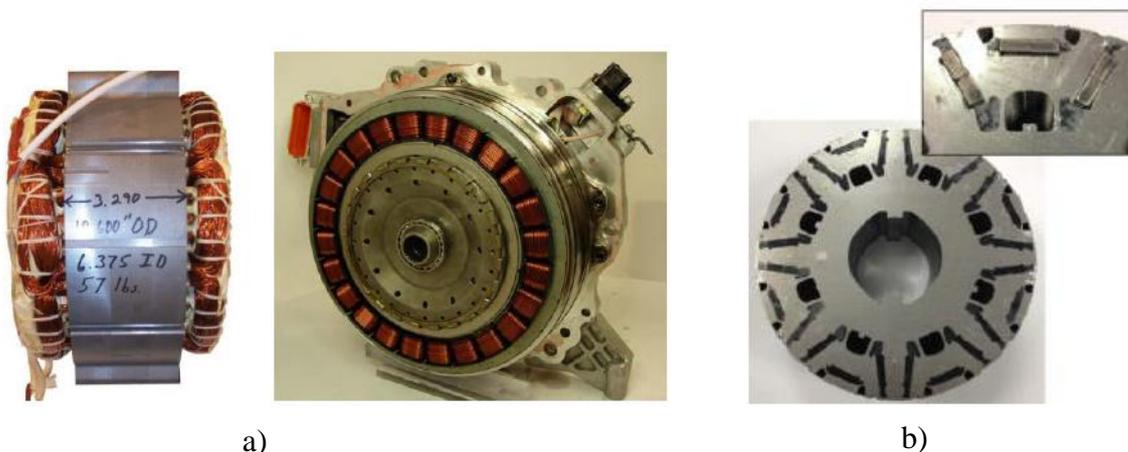


Figure II.11 : MSAP utilisée dans la Prius: a) Stator, b) Rotor

#### 4.2. Modélisation de la MASP triphasée

La modélisation de la MSAP passe par une représentation d'état du deuxième ordre en utilisant la transformation de Park. Cette représentation est nécessaire car les entrées et les sorties du modèle de la machine synchrone sont exprimées dans le référentiel  $a,b,c$ . La transformation de Park permet de convertir les tensions et les courants pour chaque bobine dans le référentiel  $a,b,c$  en deux composantes dans le référentiel  $d,q,0$  (Figure (II.12)).

L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement. L'établissement des équations du modèle repose sur les hypothèses habituelles suivantes [30] [34] [35]:

- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale.
- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé.
- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés.

Le comportement de toute machine électrique est entièrement déterminé par les équations électriques, magnétiques et mécaniques. La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est illustré figure (II.12) [12] [30] [35] [36].

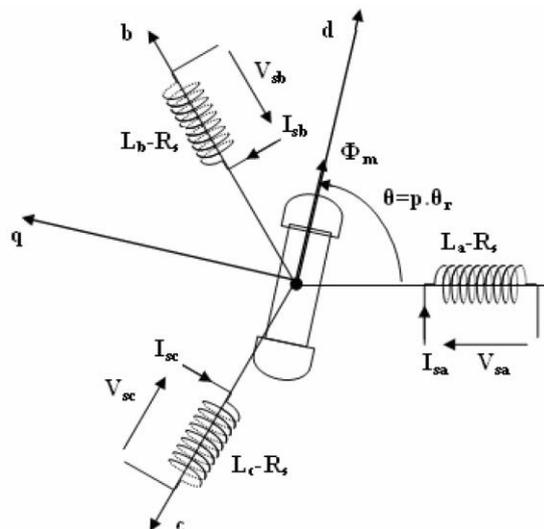


Figure II.12: Représentation de la MASP dans l'espace électrique

Le stator comporte trois phases a, b et c identiques et décalées l'une par rapport à l'autre par un angle électrique de  $(\frac{2\pi}{3})$ , par contre le rotor comprend deux axes caractérisés par:

- Un axe inter polaire en quadrature ( $q$ ), déphasé de  $(2\pi\theta)$  par rapport à l'axe ( $d$ ).
- Un axe d'aimantation rotorique longitudinale ( $d$ ).

La position du rotor est repérée par l'angle électrique.

$V_{sa}, V_{sb}$  et  $V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques..

$L_a, L_b$  et  $L_c$  : Inductances propres du stator.

$R_a = R_b = R_c = R_s$  : Résistances du stator.

$\varphi_f$  : Flux de l'aimant magnétique.

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit.

#### 4.2.1. Equations électriques

Les équations électriques régissant le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator ( $a, b, c$ ) s'écrivent sous la forme suivante [30] [34] [35]:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II. 13)$$

En désignant par :

$I_{sa}, I_{sb}$  et  $I_{sc}$ : les courants qui traversent les bobines statorique.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}$  et  $\varphi_{sc}$ : les flux totaux à travers ces enroulements.

Les équations (II.13) peuvent s'écrire sous forme matricielle [30] [34]:

$$[V_{s,abc}] = [R_s][I_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s,abc}] \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II. 14)$$

#### 4.2.2. Equations magnétique

Les flux totalisés  $\varphi_s$  des phases statoriques s'écrivent dans le repère lié au stator sous la forme matricielle suivante [30] [34] [35]:

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = L_{aa}I_{sa} + L_{ab}I_{sb} + L_{ac}I_{sc} + \varphi_{fa} \\ \varphi_{sb} = L_{ab}I_{sa} + L_{bb}I_{sb} + L_{bc}I_{sc} + \varphi_{fb} \\ \varphi_{sc} = L_{ac}I_{sa} + L_{bc}I_{sb} + L_{cc}I_{sc} + \varphi_{fc} \end{cases} \quad (II.15)$$

Le flux produit dans chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes.

Pour la phase `a`, le flux  $\varphi_{sa}$  est la somme des termes:

$L_{aa}I_{sa}$ : Flux propre de la phase `a` sur `a`.

$L_{ab}I_{sb}$ : Flux propre de la phase `b` sur `a`.

$L_{ac}I_{sc}$ : Flux propre de la phase `c` sur `a`.

$\varphi_{fi}$ : Flux mutuel de l'aimant sur la phase 'i',  $i = (a, b, c)$ .

Les flux totalisés  $\varphi_{si}$  sont exprimés sous forme matricielle suivante [30] [34] [35]:

$$[\varphi_{s abc}] = [L_{ss}][I_{s abc}] + [\varphi_f abc] \quad (II.16)$$

D'après les équations (II.15) (II.16) on trouve:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

### 4.2.3. Equation mécanique

A fin de simuler la machine, en plus des équations électriques il faut ajouter l'équation du mouvement du système. Ce mouvement est assuré par un couple électromagnétique tenant en compte les différents couples agissant sur le rotor comme il est illustré à la figure (II.13).

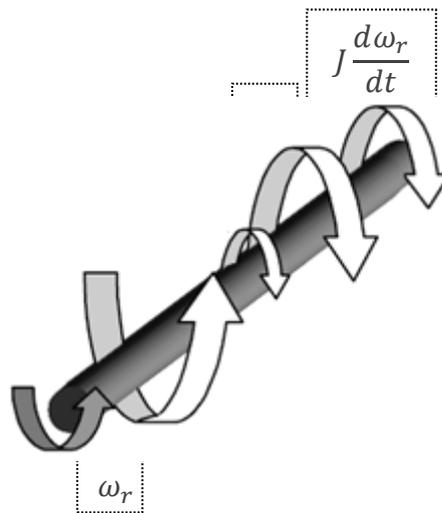


Figure II.13: Différents couples agissant sur le rotor

Le couple électromagnétique est donné par la dérivée partielle de la coénergie par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator [30] [34] [35].

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega_r \quad (II. 18)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes (kg. m<sup>2</sup>).

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine (N.m).

$C_p$  : Couple de pertes, ( $C_p$  négligé) (N.m).

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

$\omega_r$  : Vitesse mécanique de rotation ( $\omega_r = \frac{\omega}{p}$ ) (rad/s).

$\omega$  : Pulsation électrique (rad/s).

$f$  : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

La puissance instantanée d'entrée est exprimée par l'équation suivante:

$$P(t) = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} \quad (II. 19)$$

#### 4.2.4. Modèle de Park

La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasée équilibrée (trois phases d'axes fixes du stator ( $a, b, c$ )) à une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes  $d$ - $q$ , à condition que le champ où les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservées. En effet, on considère l'enroulement équivalent formé de deux bobinages d'axes perpendiculaires ( $d, q$ ) tournant à la vitesse  $\omega_s$  par rapport au stator et à la vitesse  $\omega_r$  par rapport au rotor (Figure (II.14)) [2] [37] [38].

Cette transformation d'état offre en effet un certain nombre d'avantages, parmi lesquels le fait que dans ce nouveau repère, le couple électromagnétique est une image directe de la composante en quadrature ( $q$ ) du courant statorique.

La matrice de Park  $[P(\theta)]$  est donnée sous la forme suivante:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II. 20)$$

Où  $\theta$  l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator.

Son inverse  $[P(\theta)]^{-1}$  est donnée par:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 21})$$

La transformation de Park consiste donc à transformer les enroulements statoriques en enroulements orthogonaux équivalents. La représentation de la MSAP dans le système d'axe biphasé d-q est illustrée à la figure (II.14).

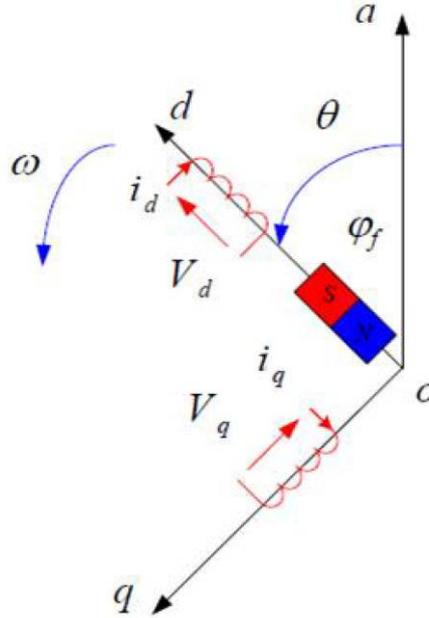


Figure II.14: Représentation de la MSAP dans le système d'axe biphasé d-q

#### 4.2.4.1. Equations électriques dans le référentiel de Park [30] [34] [35]

En appliquant la transformation de Park à l'équation (II.12) on obtient :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][V_{s abc}] = [P(\theta)] \left( [R_s][I_{s abc}] + \frac{d(\varphi_{f abc})}{dt} \right) \quad (\text{II. 22})$$

Telle que :

$V_{dq0}$  : sont les composantes directes, en quadrature et homopolaire de la tension.

Après développement on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

Quand le système est équilibré  $V_0 = 0$ , on obtient finalement le modèle électrique biphasé équivalent:

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

Equations électromagnétiques :

$$[\phi_{dqo}] = [P(\theta)][\phi_{s abc}] \quad (\text{II. 25})$$

$\varphi_{dqo}$ : sont les composantes directes, en quadrature et homopolaire du flux, on a:

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 26})$$

Alors :

$$[P^{-1}](\theta) \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} [P^{-1}](\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{max} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

On multiplie par la matrice  $[P](\theta)$  on obtient:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = [P](\theta) \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} [P^{-1}](\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \varphi_{max} [P](\theta) \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

Après développement:

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} + \varphi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

Donc les équations du flux d'axe directe (d) et en quadratique (q) s'écrivent:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

Où  $\varphi_f$  est le flux d'excitation constant des aimants permanents.

#### 4.2.4.2. Equations mécaniques dans le référentiel de Park [30] [33] [34] [35]

a) **Puissance instantanée:** Le calcul du couple mécanique de la machine synchrone se base sur la connaissance de la puissance instantanée  $P_a(t)$  absorbée par la machine dans le système équilibré.

Soit:

$$P_a(t) = V_{sa} I_{sa} + V_{sb} I_{sb} + V_{sc} I_{sc} \quad (\text{II. 31})$$

Dans le plan de Park cette puissance s'écrit:

$$P_a = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II. 32})$$

En remplaçant (II.24) dans (II.32) on trouve :

$$P_a = \frac{3}{2} \left[ \left( R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \right) I_d + \left( R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \right) I_q \right] \quad (\text{II. 33})$$

D'où:

$$P_a = \frac{3}{2} \left[ (R_s (I_d^2 + I_q^2)) + \left[ I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right] + \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \right] \quad (\text{II. 34})$$

Avec :  $\omega = p\omega_r$

$\frac{3}{2} [(R_s (I_d^2 + I_q^2))]$ : Représente les pertes par effet de Joules dans les enroulements statoriques.

$\frac{3}{2} [I_d \frac{d\varphi_d}{dt} + I_q \frac{d\varphi_q}{dt}]$ : Représente les variations de l'énergie magnétique emmagasiné dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d]$ : Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine (puissance électromagnétique  $P_{em}$ ).

Donc l'expression de la puissance électromagnétique est donnée par l'équation suivante:

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] = \frac{3}{2} p\omega_r [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (\text{II. 35})$$

**b) Couple:** Le rôle du couple électromagnétique est justement d'équilibrer à tout instant l'action résultante exercée sur l'arbre du rotor par:

- Le couple résistant (ou statique) imposé par la charge mécanique :  $C_r$
- Le couple des frottements visqueux:  $f\omega_r$ .
- Le couple d'inertie des masses en rotation rapporté au diamètre du rotor :  $J \frac{d\omega_r}{dt}$ .

Le couple électromagnétique peut être exprimé par plusieurs expressions, dont on retient la suivante qui convient à la commande directe de cette machine:

$$C_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + C_r + f\omega_r \quad (\text{II. 36})$$

Avec:

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3}{2} p [\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q + \varphi_f I_q] \quad (\text{II. 37})$$

### 4.3. Equations d'état de la MSAP

Le modèle général d'entrée-sortie de la machine synchrone à aimants permanent dans le référentiel  $d-q$  en fonctionnement normal, c'est-à-dire l'unique perturbation inconnue c'est le couple de charge appliqué à la machine, est lié au choix du vecteur d'état. Dans le cas des équations électriques dans le

repère lié au rotor, les composantes du vecteur d'entrée (grandeurs de commande) de la MSAP sont les tensions ( $V_d$ ) et ( $V_q$ ) et le flux d'excitation ( $\varphi_f$ ) et les courants ( $I_d$ ) et ( $I_q$ ) statoriques sont les composantes du vecteur d'état. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre l'équation (II.16) sous une forme d'équation d'état [30] [35] [39]:

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega L_q I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{L_q}{L_d} \omega I_q + \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{dI_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d}{L_q} \omega I_d - \frac{1}{L_q} \omega \varphi_f + \frac{V_q}{L_q} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

Sa forme matricielle est:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{1}{L_q} \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

Nous pouvons exprimer le modèle non linéaire dans le repère tournant (d-q) qui est décrit dans le système matriciel:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{pL_q}{L_d} i_q \omega_r \\ -\frac{R_s}{L_d} i_q + \frac{pL_d}{L_q} i_d \omega_r - \frac{p\varphi_f f}{L_q} \omega_r \\ \frac{3p}{2J} [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f f i_q] - \frac{f}{J} \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

#### 4.4. Commande Vectorielle de la MASP alimentée en tension

Le véhicule électrique hybride Toyota Prius équipe d'un moteur synchrone à aimant permanent, il est nécessaire alors d'interposer entre la source d'énergie (de type batterie) et le moteur de traction un convertisseur statique, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

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

#### 4.4.1. Principe de la commande Vectorielle du MASP

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes  $d$  et  $q$ . Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant.

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

En utilisant le système d'équations du couple (II.29), on constate que le modèle est non linéaire et les grandeurs électriques sont couplées. En effet, le couple électromagnétique dépend à la fois des grandeurs  $I_d$  et  $I_q$ .

Plusieurs stratégies existent pour la commande des machines à aimants permanents: Commande directe du couple (DTC: Direct Torque Control), la commande par flux orienté (FOC: Field Oriented Control), la commande adaptative avec modèle de référence et la commande backstepping.

La commande par flux orienté est une expression qui apparait de nos jours dans la littérature traitent les techniques de contrôle des moteurs électriques, cette stratégie consiste a maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation comme cela est le cas dans une machine a courant continue [32] [40] [41].

Le principe de cette commande est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Elle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axe  $(d, q)$  et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple [33].

La figure (II.15) représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de la MSAP alimentée en tension et commandée par orientation du flux [29] [33] [41].

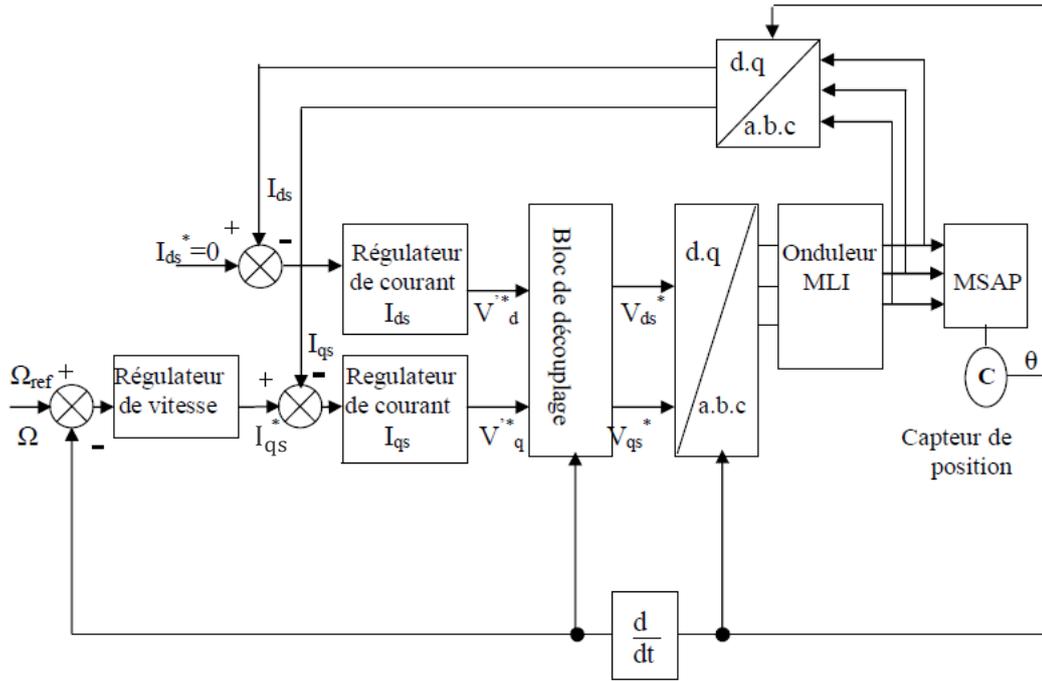


Figure II.15: Schémas de principe de la commande par orientation du flux de la MSAP alimentée en tension

Cette stratégie consiste à maintenir le courant  $I_d$  à une valeur nulle. Elle permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant.

D'autre part, si le courant  $I_d$  est maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents [33].

Les principaux constituants dans la commande vectorielle sont la boucle de régulation de vitesse, celle des courants mesurés  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  et la transformation directe et inverse de Park.

La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc, la sortie de son régulateur est le couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  ou le courant de référence  $I_{qs}^*$ . Il est limité de manière à tenir compte des caractéristiques de l'onduleur et de la surcharge de la machine.

Le courant  $I_{qs}^*$  est comparé à la valeur  $I_{qs}$  issue de la mesure des courants réels, l'erreur sollicite l'entrée du régulateur de référence  $V_{qs}^*$ .

En parallèle avec cette boucle interne, on trouve une boucle de régulation de  $I_{ds}$ . Le courant  $I_{ds}^*$  de référence est maintenu à zéro.

Les sorties des régulateurs de courant  $I_d$  et  $I_q$  sont appliquées à un bloc de découplage qui donnent les tensions de référence  $V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  et par la transformation de Park inverse, on obtient les tensions qui sont les tensions  $V_{as}^*$ ,  $V_{bs}^*$  et  $V_{cs}^*$  de la commande de l'onduleur à commande MLI.

#### 4.4.2. Couplage des grandeurs électrique dans la MSAP

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires  $w_r$ ,  $I_d$  et  $I_q$  [31] [32] [41]. Nous pouvons le remarquer à partir de l'expression (II.38).

La figure (II.16) représente le couplage entre les axes  $d$  et  $q$ .

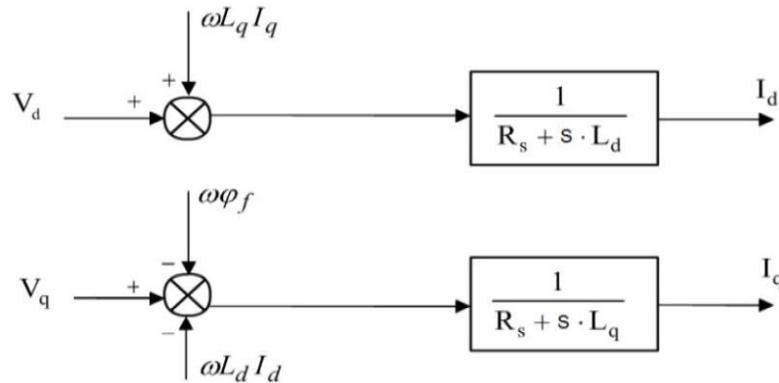


Figure II.16: Description des couplages dans la MSAP

Les tensions  $V_d$  et  $V_q$  dépendent à la fois des courants sur les axes  $d$  et  $q$ , en effet, des techniques de découplage permet de découpler complètement le système en deux sous systèmes: l'un ayant une dynamique lente, et l'autre une dynamique rapide. Ainsi, il est possible de contrôler indépendamment la vitesse et le courant direct  $I_d$ . Plusieurs méthodes de commande sont proposées dans la littérature, parmi elles nous avons [31] [32] [41]:

- Découplage par compensation.
- Commande vectorielle indirecte.
- Découplages par régulateur PI.

Dans notre travail nous avons adopté le découplage par compensation, qui a retenu notre attention par la simplicité de son algorithme de réglage.

#### 4.4.3. Découplage par compensation

A partir des équations (II.38), il est possible de définir les termes de découplage  $e_d$  et  $e_q$  qui sont considérés, dans la suite, comme des perturbations vis-à-vis des régulations. Les termes  $e_d$  et  $e_q$  représentent les *f.e.m* qu'il faut compenser.

Le découplage est réalisé de la manière suivante en basant sur les termes compensatoires  $e_d$  et  $e_q$  [29] [32] [41]:

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q I_q \\ e_q = \omega(L_d I_d + \phi_f) \end{cases} \quad (II.41)$$

Avec:

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (II.42)$$

Alors:

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)I_q \end{cases} \quad (II.43)$$

On constate maintenant que les courants  $I_d$  et  $I_q$  sont découplés. Le courant  $I_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$ , et  $I_q$  ne dépend que  $V_{q1}$ .

À partir de l'équation (II.43) les courant  $I_d$  et  $I_q$  sont exprimés par les expressions suivantes:

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (II.44)$$

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure (II.17):

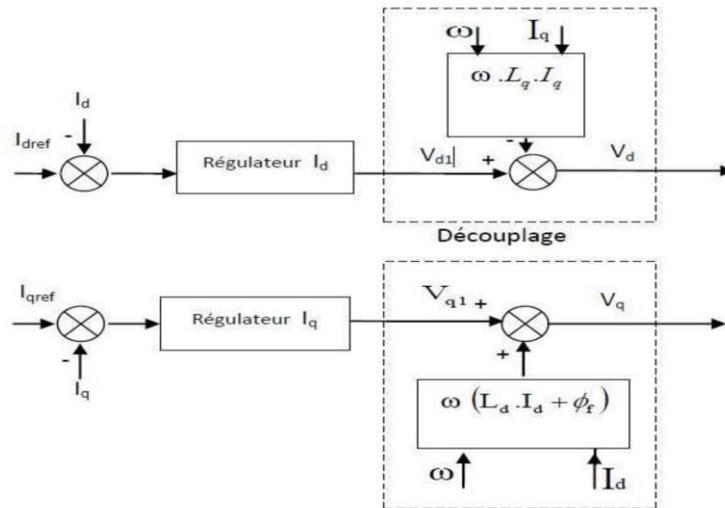


Figure II.17: Principe de découplages par compensation

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

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

Les actions sur les axes  $d$  et  $q$  sont donc découplés et illustrées à la figure (II.18):

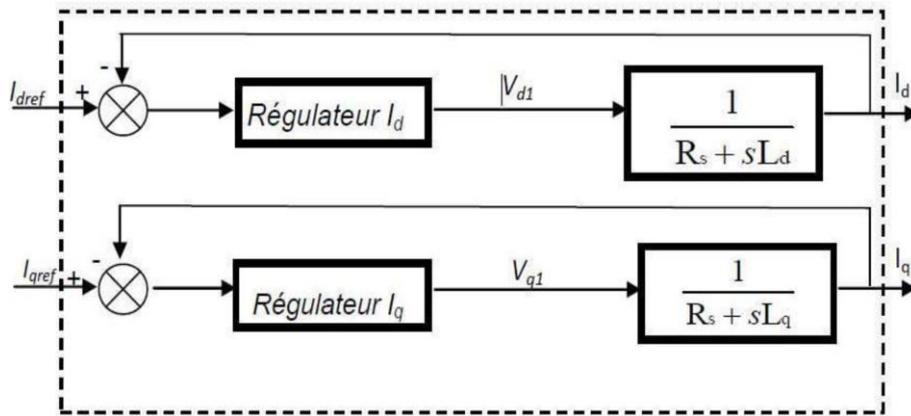


Figure II.18: Commande découplée

4.4.4. Synthèse des régulateurs des courants et de vitesse

Dans tel contexte, des simples régulateurs, comme des régulateurs P, PI et PID, peuvent convenablement satisfaire ses contraintes.

Nous considérons que la machine est orientée vectoriellement et complètement découplée. Ceci nous permet d’écrire les équations de la machine d’une manière simple et de calculer les coefficients des régulateurs.

Nous nous contentons de régulateurs classiques de type PI dans une structure par boucle imbriquée. Dans ce cas, nous pouvons distinguer deux modes :

- Le mode électrique (mode rapide : boucle interne).
- Le mode mécanique (mode lent : boucle externe).

Pour chacune des boucles de courant, nous proposons de commander la machine par des régulateurs classiques Proportionnel Intégrateur (PI) pour compenser la perturbation du couple résistant au niveau de la réponse de la vitesse de rotation, c'est-à-dire ; ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l’erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne [32].

Le régulateur (PI) est la mise en parallèle des actions proportionnelle et intégrale, comme il est illustré à la figure (II.19).

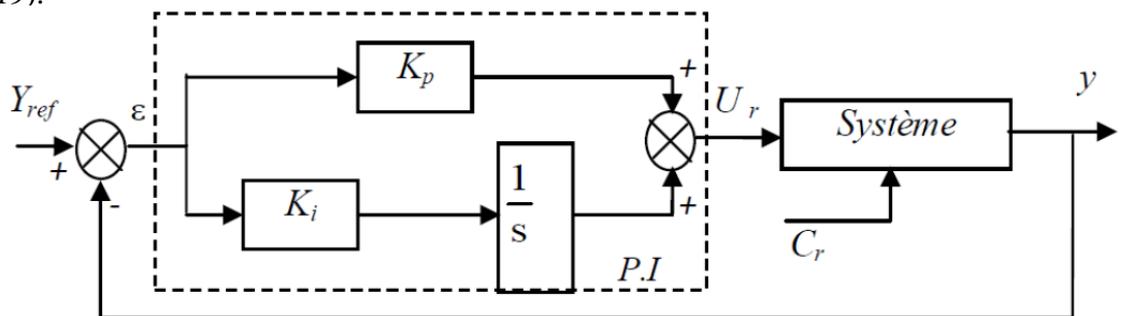


Figure II.19: Schéma de principe d'un régulateur

La relation entre la sortie  $U_r(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est donnée par la relation suivante:

$$U_r(t) = k_p \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (II.45)$$

La fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral est donnée sous forme générale par l'équation pour les deux axes  $d$  et  $q$ :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{s} \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (II.46)$$

On peut aussi écrire le régulateur sous la forme suivante:

$$PI \rightarrow \frac{U_r}{\varepsilon} = \frac{1 + sT_1}{sT_2} \quad (II.47)$$

Avec:

$$\begin{cases} k_p = \frac{T_1}{T_2} \\ k_i = \frac{1}{T_2} \end{cases} \quad (II.48)$$

La commande de la MSAP s'effectue en contrôlant les courants  $I_d$  et  $I_q$ , le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence  $I_{qref}$ , le courant  $I_d$  est maintenu nul, la commande est effectuée par les régulateurs PI pour avoir l'erreur statique nulle ( $\varepsilon = 0$ ).

Les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés ici au moyen des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires [29] [33].

a) **Régulateur de courant  $I_q$  [29] [32]**

Et que la forme générale du régulateur (équation (II.47)) est:

$$\frac{U_r}{\varepsilon} = \frac{1 + sT_1}{sT_2}$$

La boucle de régulation du courant  $I_q$  est illustrée à la figure (II.20).

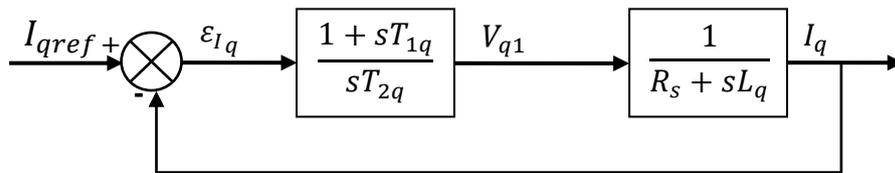


Figure II.20: Boucle de régulation du courant  $I_q$

La fonction de transfert en boucle ouvert (FTBO) est:

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sT_{2q}(R_s + sL_q)} \quad (II.49)$$

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1q}}{sT_{2q}R_s(1 + s\frac{L_q}{R_s})} \quad (\text{II. 50})$$

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

$$1 + sT_{1q} = 1 + s\frac{L_q}{R_s}$$

À condition que:

$$\frac{L_q}{R_s} = T_{1q} = \tau_q$$

$\tau_q$  Constante de temps électrique en boucle ouverte.

En remplaçant la constante  $T_{1q}$  par sa valeur dans l'équation (II.49), on obtient:

$$FTBO = \frac{1}{sR_sT_{2q}} \quad (\text{II. 51})$$

Pour la fonction de Transfer en boucle fermé (FTBF):

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO}, \quad FTBF = \frac{1}{1 + R_sT_{2q}s} \quad (\text{II. 52})$$

Nous pouvons réécrire l'équation FTBF sous la forme:

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_q s} \quad (\text{II. 53})$$

Par identifications on trouve que:

$$\tau_q = R_sT_{2q} \Rightarrow T_{2q} = \frac{\tau_q}{R_s} \quad (\text{II. 54})$$

On imposant le temps de référence:  $T_r = 3\tau_q$  (critère de  $\pm 5\%$ ).

$$T_{2q} = \frac{T_r}{3R_s} \quad (\text{II. 55})$$

Avec:

$T_r$ : Temps de réponse imposé et  $\tau_q = \frac{L_q}{R_s}$  constante de temps électrique de l'axe  $q$  de la machine.

En remplaçant (II.54) dans (II.48), on obtient:

$$\begin{cases} k_{pq} = \frac{3L_q}{T_r} \\ k_{iq} = \frac{3R_s}{T_r} \end{cases} \quad (\text{II. 56})$$

b) Régulateur de courant  $I_d$  [29] [32]

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

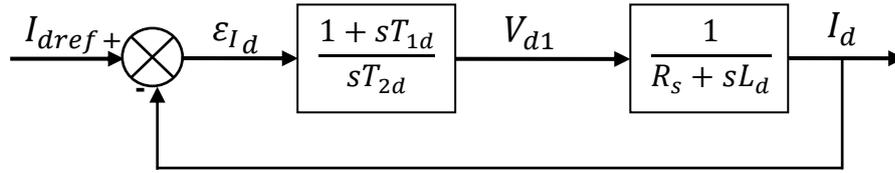


Figure II.21: Boucle de régulation du courant  $I_d$

Pour la régulation du courant  $I_d$  on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant  $I_q$ .

$$FTBO = \frac{1 + sT_{1d}}{sT_{2d}R_s(1 + s\frac{L_d}{R_s})} \tag{II.57}$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + sR_sT_{2d}} \tag{II.58}$$

$$\frac{L_d}{R_s} = T_{1d} = \tau_d \tag{II.59}$$

On suppose que:

$$T_r = 3\tau_d \tag{II.60}$$

$$\tau_d = R_sT_{2d} \Rightarrow T_{2d} = \frac{\tau_d}{R_s} \tag{II.61}$$

En remplaçant (II.59) dans (II.60), on obtient:

$$T_{2d} = \frac{T_r}{3R_s} \tag{II.62}$$

$\tau_d = \frac{L_d}{R_s}$  constante de temps électrique de l'axe  $d$  de la machine.

c) Régulateur de la vitesse [29] [32]

Le processus à commander est décomposé en deux sous système:

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

La boucle de régulation de la vitesse est représentée par la figure (II.22):

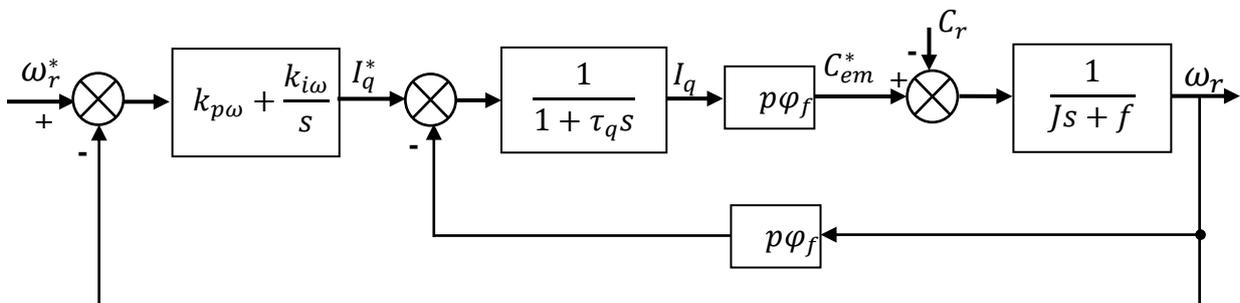


Figure II.22 : Boucle de régulation de la vitesse

On appelle  $F_w(s)$  la fonction de transfert du correcteur de vitesse avec:

$$F_{\omega}(S) = k_{p\omega} + \frac{k_{i\omega}}{s} = \frac{1 + sT_{1\omega}}{sT_{2\omega}} \quad (\text{II. 63})$$

Avec:

$$\begin{cases} k_{p\omega} = \frac{T_{1\omega}}{T_{2\omega}} \\ k_{i\omega} = \frac{1}{T_{2\omega}} \end{cases} \quad (\text{II. 64})$$

Et  $F_0(s)$  la fonction de transfert en boucle ouverte avec:

$$F_0(S) = \frac{p\varphi_f}{f(1 + s\tau_q) + (1 + s\tau_m)} \quad (\text{II. 65})$$

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

La FTBF est donnée par:

$$F_{BF}(s) = \frac{F_{\omega}(s)F_0(s)}{1 + F_{\omega}(s)F_0(s)} \quad (\text{II. 66})$$

Après les calculs on trouve:

$$F_{BF}(S) = \frac{p\varphi_f(k_{p\omega}s + k_{i\omega})}{J\tau_q s^2 + (J + f\tau_q)s^2 + (p\varphi_f k_{p\omega} + f)s + p\varphi_f k_{i\omega}} \quad (\text{II. 67})$$

En négligeant  $(J \cdot \tau_q)$  et  $(J \cdot f)$  devant  $J$ , le polynôme de la fonction devient:

$$p(s) = Js^2 + (f + p\varphi_f k_{p\omega})s + p\varphi_f k_{i\omega} \quad (\text{II. 68})$$

En imposant au polynôme caractéristique en boucle fermée deux pôles complexes conjugués  $s_1, s_2$  avec :

$$s_{1,2} = \rho(1 \pm j)$$

Le polynôme de la fonction devient:

$$p(s) = s^2 + 2\rho s + 2\rho^2 \quad (\text{II. 69})$$

Par identification terme à terme entre l'équation (II.68) et (II.69) on trouve:

$$\begin{cases} k_{p\omega} = \frac{2J\rho - f}{p\varphi_f} \\ k_{i\omega} = \frac{2J\rho^2}{p\varphi_f} \end{cases} \quad (\text{II. 70})$$

ou  $\rho = \xi\omega_n$

$\omega_n$  : Pulsation propre du système.

$\xi$  : Facteur d'amortissement.

# **Chapitre III**

## **Simulations et interprétations des résultats**

## 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'exploitation en simulation des différents modèles des dispositifs inclus dans la chaîne de traction de la Toyota Prius étudiés précédemment, à savoir le convertisseur bidirectionnel DC/DC, la machine de traction MSAP notée MG2 et l'onduleur en adoptant la commande vectorielle.

La simulation du système est effectuée sous l'environnement MATLAB/SIMULINK est tout à fait justifiable en raison de ses divers avantages uniques comme la facilité et l'efficacité de programmation élevées, l'interface graphique élégante et son architecture nouvelle permettant l'adaptation à un grand nombre de cas.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude de la commande vectorielle appliquée à l'association onduleur à deux niveaux-MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse. Ceci nous permet l'approche des performances analogiques à celle du moteur à courant continu.

## 2. Simulation du convertisseur DC/DC bidirectionnel

L'électronique de puissance utilisée dans la traction de Toyota Prius est présentée dans la figure (III.1). C'est le schéma du convertisseur bidirectionnel DC/DC. La batterie utilisée est de technologie NiMH d'une tension nominale  $V_{batt.} = 201,6 V$ . La ligne DC haute tension est  $V_{hv} = 500 V$ . Le convertisseur bidirectionnel a une inductance de  $L = 370 \mu H$ ,  $C = 25 \mu F$  et  $R_{ch} = 50 \Omega$ , il fonctionne à une fréquence de découpage  $f_s = 8 kHz$ .

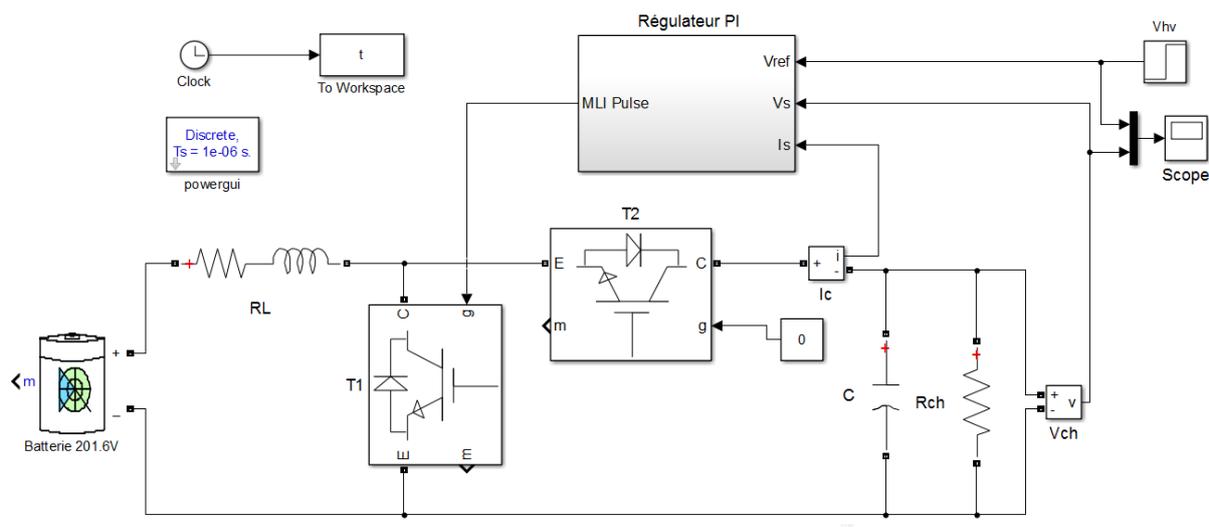


Figure III.1: Schéma de simulation de convertisseur DC/DC en mode Boost

Dans les figures (III.2) et (III.3) nous représentons la tension à la sortie de convertisseur DC/DC et son zoom respectivement.

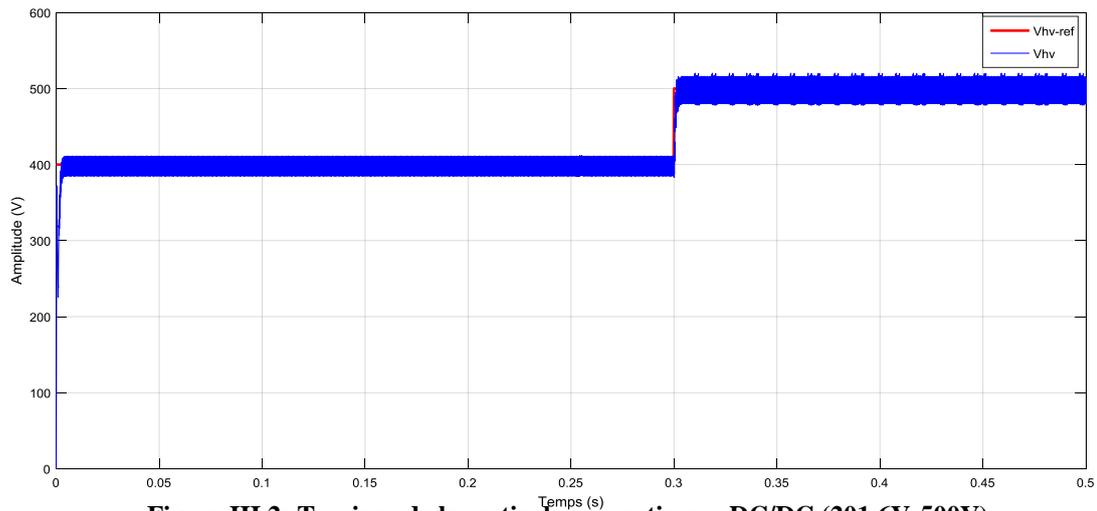


Figure III.2: Tensions de la sortie de convertisseur DC/DC (201.6V-500V)

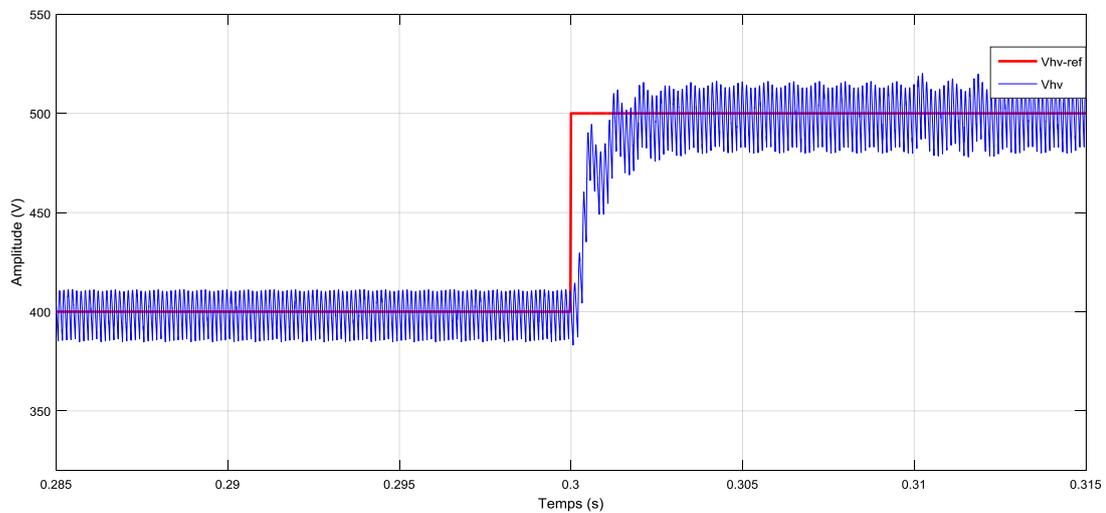


Figure III.3: Zoom de tensions de la sortie de convertisseur DC/DC (201.6V-500V)

### 3. Simulation du modèle de la MSAP avec $I_d = 0$

Nous avons simulé dans un premier temps le modèle de la MSAP à vide sans onduleur en imposant  $I_d = 0$ , les tensions d'alimentation de la machine sont des sources sinusoïdaux:  $\omega = 2\pi 50$ ,  $V_{eff} = 220$ . Le schéma de modèle simulé est illustré à la figure (III.4).

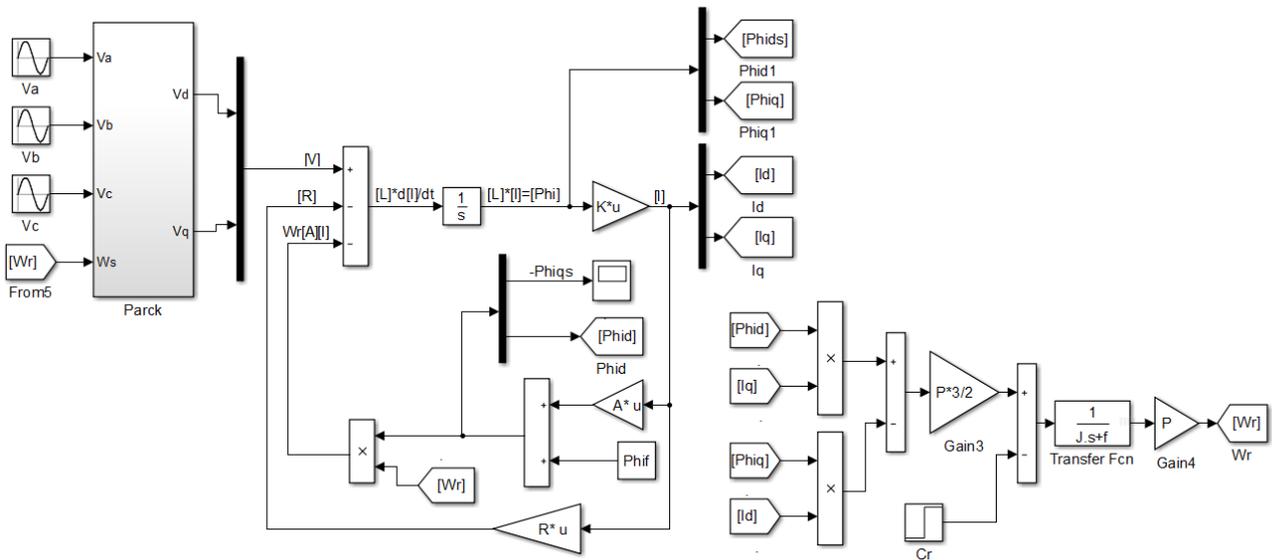


Figure III.4: Modèle de la MSAP dans le repère d-q en imposant  $I_d = 0$

Les résultats issus de notre simulation sont illustrés aux figures (III.5), (III.6), (III.7) et (III.8).

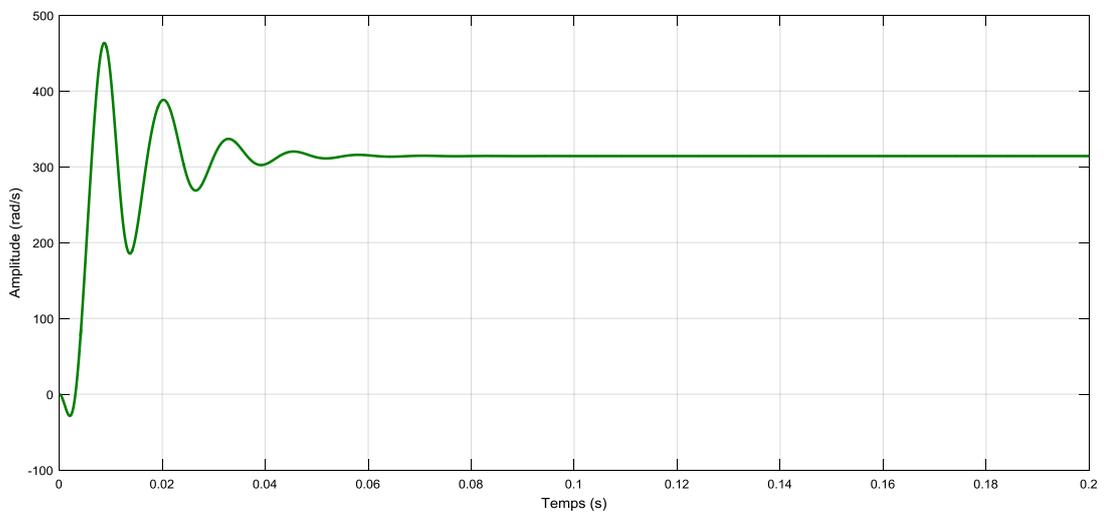


Figure III.5: Evolution de la vitesse mécanique  $\omega_r$  en boucle ouverte avec  $I_d = 0$

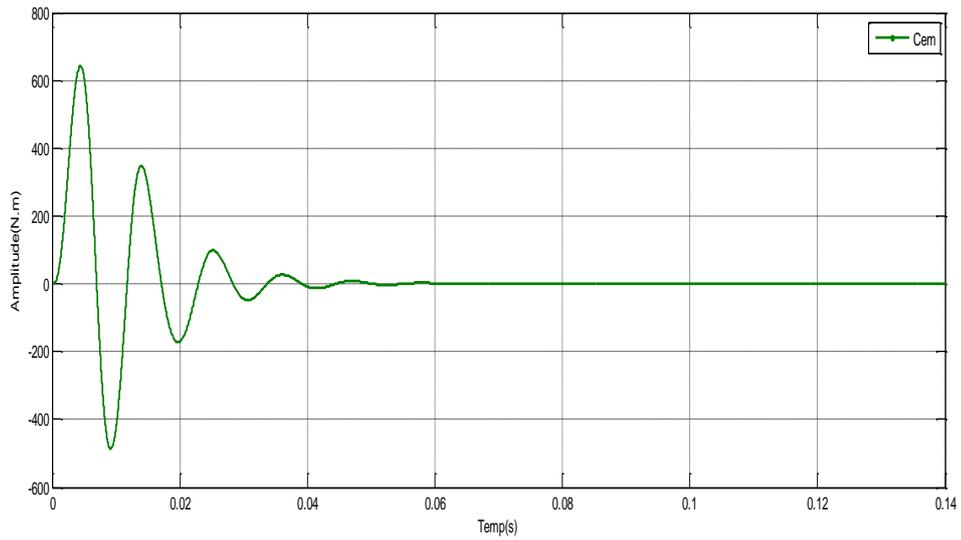


Figure III.6: Evolution du couple électromagnétique  $C_{em}$

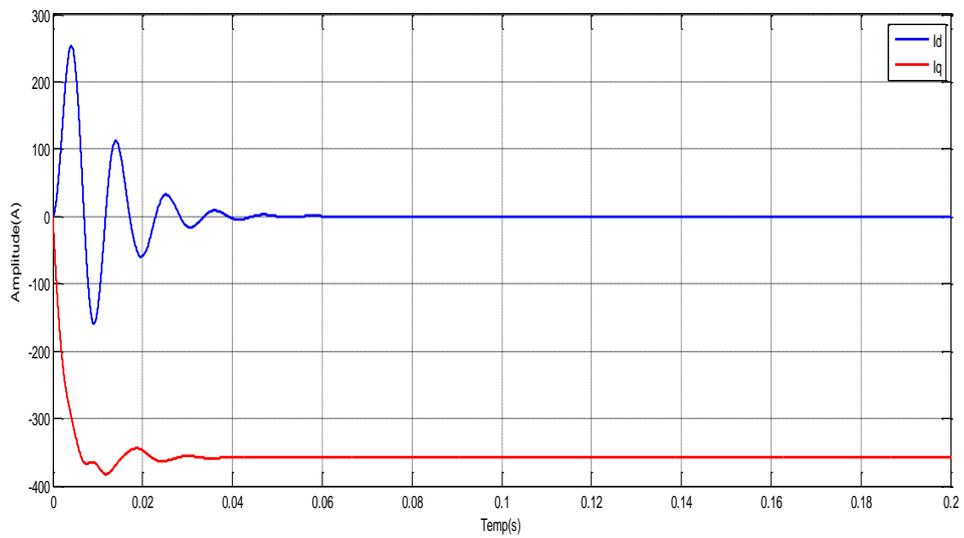


Figure III .7: Représentation des courants du Park  $I_d$  et  $I_q$

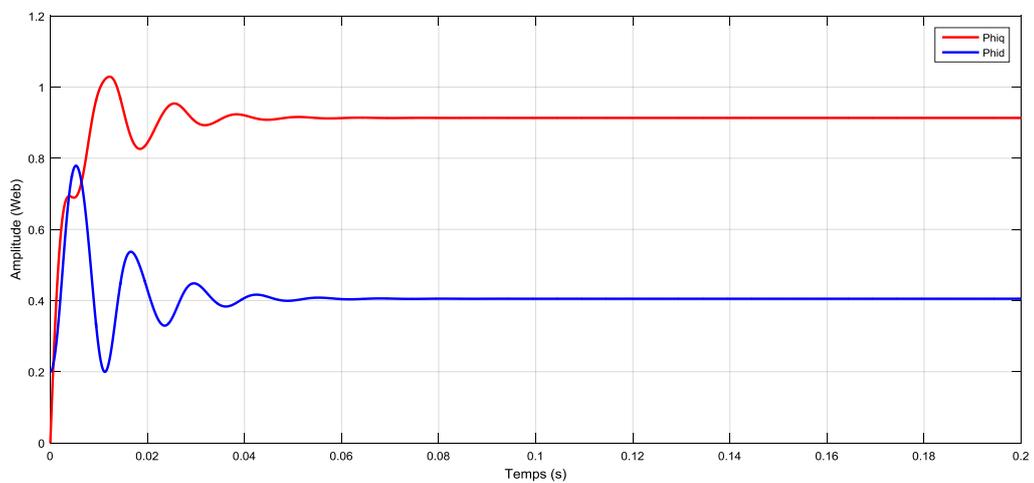


Figure III.8: Représentation du flux directe et le flux quadratique

A partir des résultats obtenu on constate qu’après un démarrage oscillant, la machine se stabilise autour ces point de fonctionnement (Courant, couple et vitesse), ces résultat n’apporte pas beaucoup d’information sur notre commande, mais elles confirment la validité du modèle de MSAP étudié.

Lorsqu’on charge la machine avec un couple nominale on remarque que les deux courant de Park change de valeur, mais inversement, la machine développe un couple pour suit la nouvelle perturbation, mais la vitesse reste la même (vitesse de synchronisme).

On remarque aussi que la vitesse 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.

**4. Simulation de l’association MSAP- Onduleur en utilisant commande vectorielle**

Après réalisation du découplage et la synthèse des régulateurs, et afin de tester les performances de la commande vectorielle appliquée à une MSAP, nous avons simulé le fonctionnement de l’ensemble Onduleur-Machine.

**4.1. Modélisation de la MSAP**

Dans la figure (III.9) nous représentons le modèle de la MSAP simulé.

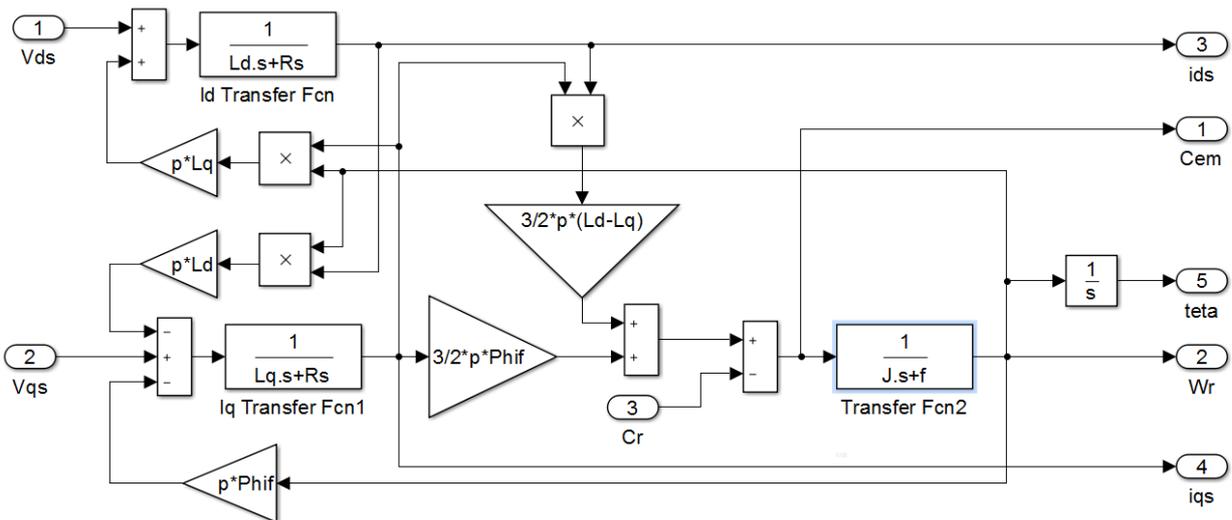


Figure III.9: Modèle de la MSAP dans le repère d-q

**4.2. Principe de la technique MLI sinus-triangle**

Plusieurs méthodes ont été développées avec l’objectif de générer à la sortie de l’onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d’harmoniques possible. Pour l’onduleur de notre système de commande, nous utilisons la technique de la modulation de largeur d’impulsion (MLI sinus-triangle).

Le principe de réalisation de telle technique est montré à la figure (III.10), sachant que l'onduleur est modélisé par la  $T$  donnée par la formule (II.8).

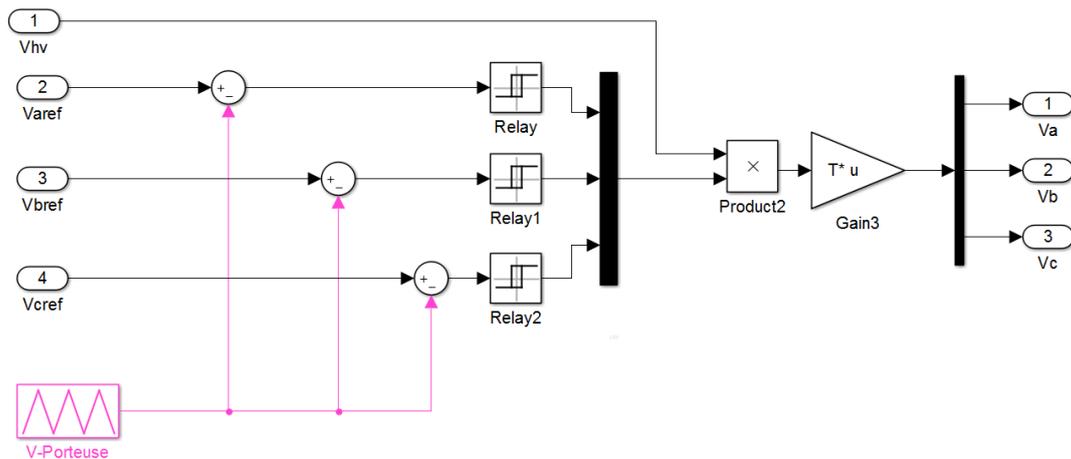


Figure III.10: Schéma de principe de simulation d'un onduleur à MLI sinus-triangle

### 4.3. Description du système global

Le principe de la commande vectorielle de la MSAP est basé sur le contrôle des courants  $I_d$  et  $I_q$ , le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse, qui impose la référence  $I_{qref}$ , le courant  $I_d$  est maintenu nul grâce à un régulateurs PI sachant que la référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée à une valeur nulle. La sortie du régulateur de vitesse  $I_{qref}$  nous permet d'obtenir la consigne de couple  $C_{em}$ .

Les références des courants  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$  sont comparées séparément avec les courants réels de la machine  $I_d$  et  $I_q$ .

Les erreurs entre  $I_{dref}$  et  $I_d$  d'une part et entre  $I_{qref}$  et  $I_q$  d'autre part sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_d^*$  et  $V_q^*$ .

Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{qref}$  alors que le courant  $I_{dref}$  est imposé nul.

Chaque axe découplé est représenté par un bloc de correction  $C_i(s)$  avec ( $i = d, q$ ).

Les simulations sont effectuées pour les paramètres nominaux de la machine: 400 Nm à 0 tr/min, 26.8kW,  $V_{hv} = 500V$ .

Dans la figure (III.11) nous représentons le schéma global de la commande vectorielle d'une machine synchrone à aimants permanents avec compensation dans le repère  $(d, q)$ . Nous avons



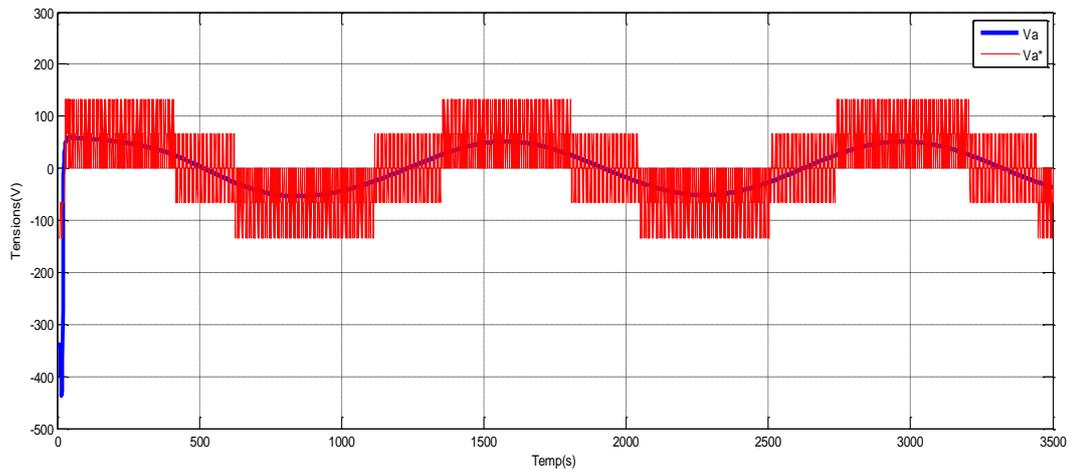


Figure III.13: Représentation de la tension d'une à la sortie de l'onduleur et sa tension de référence

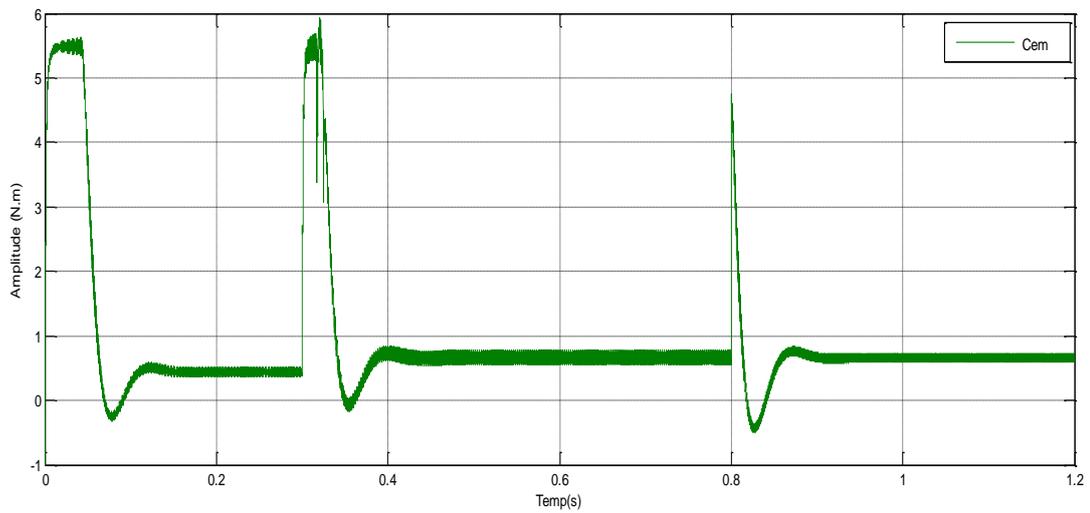


Figure III.14: Représentation du couple électromagnétique  $C_{em}$

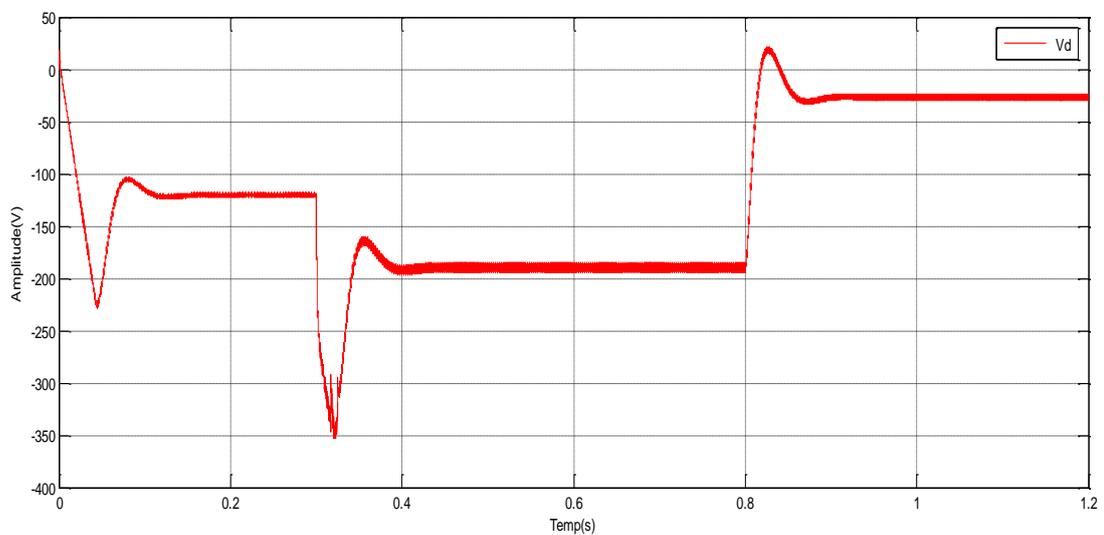


Figure III.15: Représentation de la tension  $V_d$

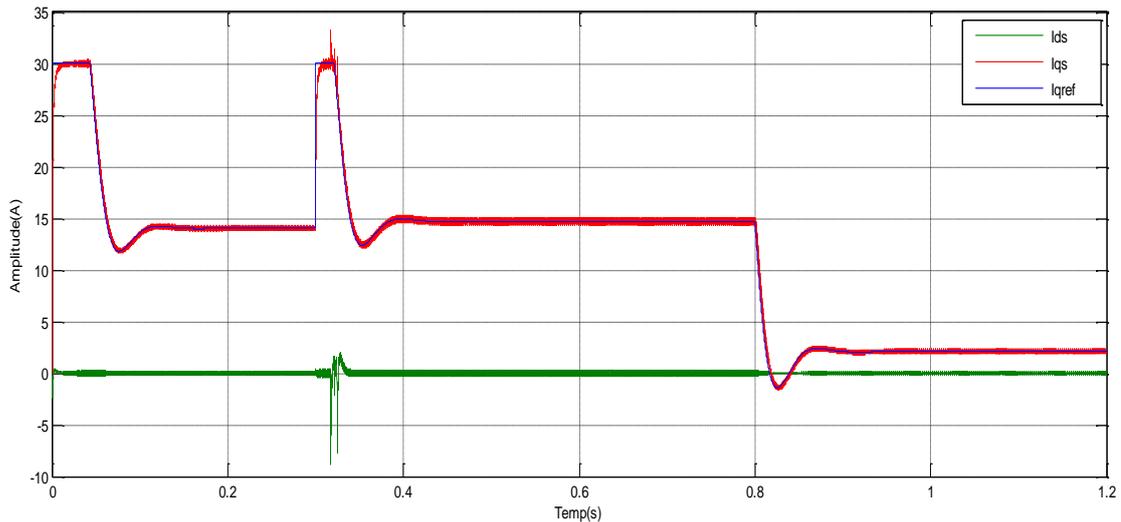


Figure III.16: Représentation des courants de Park  $I_d$  et  $I_q$

D'après les résultats de simulations obtenus, les performances de la commande proposée ont été testées par simulation dans le cas du régulateur classique d'une MSAP alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux, avec un régulateur PI face à une vitesse de référence de  $314 \text{ rad/s}$  et de  $471 \text{ rad/s}$  suivie d'une application d'un couple résistante de  $4 \text{ Nm}$ , en suite nous avons l'annulé à l'instant  $0.8 \text{ s}$ . On remarque ici que la machine garde sa vitesse relative à celui de la référence.

Les résultats de simulation montrent que le découplage est maintenu quelque soit la variation de la charge (dans le régime permanent). L'onduleur engendre des fluctuations qui sont ressenties au niveau du couple.

On remarque aussi que le courant  $I_d$  après le régime transitoire revient à sa valeur zéro (valeur de référence  $I_{dref}$ ).

On constate que la variation de la vitesse est rapide avec très petite dépassement et sans erreur statique, le rejet de perturbation est aussi rapide avec un temps de réponse très rapide.

## 5. Conclusion

Les résultats obtenus en simulation numérique mettent en évidence les performances du système de commande de la MSAP adoptée dans notre travail. Montrant un démarrage à vide de la machine avec un pic notable du couple électromagnétique et du courant (Le couple et le courant ont la même forme d'allure). Après application d'un couple de charge, on remarque que la commande répond à l'échelon de charge avec une dynamique presque instantanée, de très faible dépassement et sans oscillations.

Nous avons conclu que la réponse de la vitesse de la machine synchrone à aimants permanents à vide semblable à celle d'un système du premier ordre (sans dépassements), avec un temps de réponse de l'ordre de 0.05 s.

Le bon choix des coefficients de réglage du régulateur de courant maintient la composante toujours égale à zéro, par contre la composante la même dynamique que celle du couple électromagnétique et cela pour répondre au couple de charge.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Après ce modeste travail nous avons pu mettre en évidence que les technologies de VEHs se séparent en trois catégories, dépendant du niveau d'assistance du moteur électrique. Nous avons parlé de chaînes de traction micro-hybride, mild-hybride et full-hybride. Nous avons montré aussi que le véhicule électrique hybride rechargeable «VEHR» (Plug-in Hybrid Electric Vehicle «PHEV» en anglais) est très semblable au full-hybride, avec les deux motorisations (électrique et thermique) de puissance équivalente.

La nouveauté pour cette technologie est de permettre la recharge de la batterie sur une source électrique via des chargeurs qui jouent un rôle d'un onduleur qui commande la machine de traction (noté MG2) des VEHRs. Un onduleur doit être alors efficace et fiable, avec une densité de puissance élevée, un faible coût, un faible volume et un faible poids.

A partir de cette étude modeste, nous avons acquis plusieurs informations intéressantes, concernant l'utilisation de la chaîne l'entraînement électrique de la **Toyota Prius** et la commande vectorielle de vitesse et de courant appliquée à la machine de traction (MSAP).

L'électronique de puissance, les machines synchrones MSAP, la commande des machines ont été synthétisée dans notre travail.

Dans la partie de simulation, nous avons utilisé Matlab-Simulink pour tirer les évolutions des graphes électrique et mécanique dans la chaîne de traction de la Prius (couple, de vitesse et du courant. On a remarqué que le MSAP un bon couple de démarrage avec un onduleur MLI vectorielle.

Lors de l'application du couple résistant sur le moteur, la chute de la vitesse de rotation augmente avec l'augmentation du couple et par conséquent du courant. Pour restaurer la vitesse à sa valeur originale, l'utilisation le correcteur (PI) a été imminente.

Nous avons accompli ce travail et ce fut l'occasion pour moi de me souvenir et de consolider mes connaissances dans la formation que j'avais précédemment reçue au ENSET d'ORAN en plus des plusieurs informations que j'ai reçue de certains des professeurs l'université d'Ibn Khaldoun.

### Bibliographie

- [1] Babak Nahid Mobarakeh, " Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machine Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification en Ligne des Paramètres ", Thèse de Doctorat Institut National Polytechnique de Lorraine décembre 2001.
- [2] Leila Parsa, "Performance Improvement of Permanent Magnet AC Motors" Thesis of doctoral, University of Science and Technology, Tehran, Iran, May 2005.
- [3] M. P. Kazmierkowski, M. Zelechowski, D. Swierczynski "Simple DTC-SVM Control Scheme for Induction and PMSynchronous Motor" XVII International Conference on Electrical Machines, ICEM 2006 September 2-5, 2006 Chania, Crete Island, Greece.
- [4] Zhuqiang Lu, Honggang Sheng, Herbert L. Hess, Kevin M Buck, " The Modeling and Simulation of a Permanent MegnetSynchronous Motor with Direct Torque Control Based on Matlab/Simulink ", University of Idaho, Moscow, USA, 2005 IEEE.
- [5] Ahmed Boucherit, "Conception d'un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multi-sources" Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort Montbéliard, Décembre 2011.
- [6] Gwenaëlle SOUFFRAN, "Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission" Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [7] AIMAN NOUH, "Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers " Thèse de doctorat, laboratoire Systèmes et Transports (SeT), UTBM, Belfort, France-Mars 2008.
- [8] Samantha Lacroix, " Modélisation et commande d'une chaine de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries" Thèse de doctorat, Université de Paris-sud. École doctorale, Stits, Laboratoire de Génie Electrique de Paris29/05/2013.
- [9] Arif Ali, "Amélioration des performances d'un véhicule électrique alimenté par une source photovoltaïque" diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Kheider, Biskra, Novembre 2013.
- [10] LHOMME Walter, "Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique" Mémoire de Magister, Université des Sciences et Technologies de Lille-École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur, Novembre 2007.
- [11] Cours, "Technologies des véhicules hybrides", STS M.V, 2ème année.
- [12] Aiman Nouh "Contribution Au Développement D'un Simulateur Pour Les Véhicules Électriques Routiers" Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Mars 2008.
- [13] Mounir MARZOUK, "Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in" Thèse de doctorat, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), France, Octobre 2015.
- [15] T. A. Burress, S. L. Campbell, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system", Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, March 2011.
- [16] Thibaut Emme, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone" Los Angeles novembre 2018.
- [17] Cours "Toyota Hybrid Synergy Drive".

## Bibliographie

---

- [18] L. BAGHLI, E. GOUDA, S. MEZANI, A. REZZOUG, "Hybrid vehicle with a magnetic planetary gear "Vandoeuvre-lès-Nancy, France, January 2010.
- [19] Félix Wong "Détails du nouveau groupe Motopropulseur hybride TNGA pour la nouvelle Prius4", Publié en Octobre 2015.
- [20] Guenidi Sif Eddine, "Modélisation, commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride" <https://www.researchgate.net/publication/233414895>, Laboratoire de Commande des Processus (LCP), Ecole Nationale Polytechnique - El Harrach, Alger, Algérie Juin 2011.
- [21] Zaouzaou Sabrina, Meziani Sabrina, "Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique", mémoire de master, université de Bejaia, 2017.
- [22] Saeid Haghbin, "Integrated Motor Drives and Battery Chargers for Electric or Plug-in Hybrid Electric Vehicles" Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment Chalmers, University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.
- [23] AOUZELLAG Haroun, "Stratégies de commande d'un véhicule hybride", mémoire de master : université A-Mira Bejaia, 2013.
- [24] Pierre CAILLAR "Conception par optimisation d'une chaine de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique" Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lill, Novembre 2015.
- [25] Oak Ridge National Laboratory & Mitch Olszewski, Program Manager, " Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System" U.S. Department of Energy Freedom CAR and Vehicle Technologies, EE-2G, 1000 Independence Avenue, S. W. Washington, D.C. 20585-0121May 2005.
- [26] D. Swierczynski, M. Kazmierkowski, F Blaabjerg, "DSP Based Direct Torque Control of a Permanent Magnet synchronous Motor (PMSM) Using Space Vector Modulation (DTC-SVM)", 2002 IEEE.
- [27] A. Kaddouri, "Etude d'une Commande Non-Linéaire Adaptative d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval Québec, Nov 2000.
- [28] T. Hanene, "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone "Mémoire de Magister, Université de Batna 2006.
- [30] Khenfour S., Smaili Y. " Contrôle commande d'un véhicule électrique à base d'un moteur synchrone à aimants permanents". Master en Electromécanique, Université Bouira, 2018.
- [31] Ould Elemine Ould V. A., Issoufou Karsani T., "Commande vectorielle de la machine synchrone a aimants permanents", Mémoire de Master - Université Ibn Khaldoun, Tiaret, 2015.
- [32] MAAROUK Abdelatif, "Commande dynamique d'une Machine synchrone à aimants Permanents alimentée en tension" Mémoire de Master Université M'hamed Bougara, Boumerdes Juin 2016.
- [33] SENHADJI Nawe, CHALABI Ammaria, " Commande du moteur synchrone a aimants permanents par backstepping " Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen, juin 2015.
- [34] Zegueb Boubaker, " Commande d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse. Utilisation d'Un Observateur Non Linéaire" Mémoire de Magister, Université de Batna 2008.
- [35] Amor KHLAIEF, "Contribution à la Commande Vectorielle sans Capteur Mécanique des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) " Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, Juillet 2012.

## Bibliographie

---

- [36] Mohamad KOTEICH, " Modélisation et Observabilité des Machines Électriques en vue de la commande sans capteur mécanique " Thèse de doctorat, L'Université Paris-Saclay Préparée à Centrale Supélec, Mai 2016.
- [37] S. Baris Ozturk, "Modelling, Simulation and Analysis of Low-Cost Direct Torque Control Of PMSM using Hall-Effect Sensors ", Thèse de doctorat de l'université de Texas USA, December 2005.
- [38] R.Abdessemmed, M.Kadjoudj, "Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna ,1997.
- [39] Takieddine KHEDIRI- Brahim Salem DEIDIH, "Commande Flou sans Capteur de Vitesse d'une Machine synchrone à Aiment Permanents" Mémoire de Master, Universite Larbi Tebessi, Tebessa, 2016.
- [40] W. Hachelfi, Y.MENASRIA, D. Rahem, A. Djouambi "Commande Adaptative par Modèle de Référence Appliquée à la Machine Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur d'Etat" International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), Copyright IPCO-2015.
- [41] Hachemi kaddour, "Etude de la machine synchrone Autopilotée : Modélisation et simulation" Thèse de doctorat d'état, Université des sciences et de la technologie d'Oran, Juillet 2012.

## ملخص:

العمل المقدم في هذه الأطروحة يتمحور حول دراسة و نمذجة سلسلة القيادة الكهربائية للسيارة Toyota-Prius . ولقد تم التطرق إلى المكونات الداخلية للسيارة وخصائصها وذلك بدراسة مثل البطارية , المحول والمحرك الكهربائي المستعمل فيها و كذا كيفية التحكم فيه بواسطة التحكم الشعاعي .

حيث أجريت دراسة محاكاة باستعمال برنامج MATLAB-SIMULINK ثم التحصل على النتائج .

## الكلمات المفتاحية :

المحرك التزامني ذو مغناطيس دائم - التحكم في عرض النبضة MLI - السيارة الكهربائية الهجينة - التحكم الشعاعي

## Résumé

Le travail présenté dans cette mémoire porte sur l'étude et la modélisation de la chaîne l'entraînement électrique du véhicule électrique hybride rechargeable Toyota Prius.

Les composants internes et les caractéristiques de ce véhicule ont été étudiés tels que la batterie, l'onduleur et le moteur électrique qui est utilisé. Ainsi que la façon de le contrôler au moyen d'un contrôle radial.

Cette étude a été menée à l'aide d'un logiciel MATLAB-SUMILIN et ensuite obtenu les résultats.

## Les mots clés :

Véhicule électrique hybride – Machine synchrone à aimant permanent – Commande MLI –Commande vectorielle – Onduleur de tension triphasé.