

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique

Université AMAR TELIDJI « LAGHOUAT »



FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département d'Electrotechnique

**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Electromécanique

Option : Electromécanique

**Présenté par :**

BENBEY Islam

Kazouai Assem

**THEME**

Commande d'une machine asynchrone double étoile pour un véhicule électrique

**Devant le jury :**

NOUAR Allal

Président

BELKHEIRI Ahmed

Examineur

BENDJEDIA Bachir

Encadreur

**Promotion 2020**

## REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, et qui nous a donné le courage durant ces longues années d'étude.

Ce modeste travail est la résultante de la contribution de plusieurs personnes dont nous tenons à remercier vivement :

Nous tenons à remercier **Mr. Bendjedia Bachir** qui a accepté de nous encadrer, ses commentaires et réflexions nous ont permis de trouver des applications intéressantes aux travaux que nous menons. Merci pour l'aide et les conseils qu'il nous a fournis durant la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions également exprimer toute nos reconnaissances aux membres de jury **Mr. Nouar Allal** et **Mr. Belkheiri Ahmed** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour l'honneur qu'ils nous ont fait pour juger ce travail.

Nous souhaitons également à remercier le personnel du département d'électronique, de la faculté de technologie à l'université de Ammar Thelidji « Laghouat », pour les facilités qu'ils nous ont accordé.

Nous remercions aussi tous ceux qui ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nous tenons enfin, à remercier les membres de nos familles pour leur incessant soutien et plus particulièrement nos parents qui nous ont guidé sur le chemin des études.

Un grand merci à tous !

## **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents qui sont la source de mon  
éducation, mon savoir et mes principes et à cette  
occasion je vous dis merci d'avoir consacré votre vie  
pour bâtir la mienne.*

*A mes chers frères et chères sœurs pour leur soutien,  
qui m'ont aidé à tracer un tel chemin de réussite.*

*Je le dédie à ma famille et mes proches.*

*Je dédie également ce travail à mes amis qui m'ont  
soutenu pendant cette magnifique expérience.*

*A mon binôme qu'il a tant donné pour l'achèvement de  
ce mémoire.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*A toute la promotion de **Electromécanique** 2019/2020.*

**BENBEY ISLAM**

# Dédicace

## *A mes chers parents*

*Je remercie me très chers parents, qui m'ont toujours apporté le meilleur, vous avez su me guider et me conseiller tout au long de mon parcours.*

*Merci mes chers parents, qu'ALLAH vous bénisse et vous accorde une longue et heureuse vie.*

## *A mes chers frères et sœurs*

*Pour leur amour et leur soutien inestimable.*

## *A tous mes amis*

***K.ASSEM***

# Table Des Matières

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Table des matières**

**Notations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Résumé**

**Introduction générale.....1**

## **CHAPITRE I : Etat de l'art sur les chaines de tractions des véhicules électrique**

I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition et historique.....	4
I.2.1.Définition.....	4
I.2.2.Historique.....	5
I.3. Classification des véhicules électrique.....	6
I.3.1.Véhicule tout électrique.....	6
I.3.2.Le véhicule hybride.....	7
I.3.3.Avantages et inconvénients des véhicules.....	9
I.4. La chaine de traction de véhicule électrique.....	11
I.4.1.Description de la chaine de traction.....	11
I.4.2.Différentes architectures de chaine de traction.....	12
I.4.3.Les éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	15
I.4.3.1. Sources d'énergies électriques.....	15
I.4.3.2. Convertisseurs statiques.....	17
I.4.3.3. Moteurs électriques.....	18
I.5. Motorisation des véhicules électrique.....	19
I.5.1.Le moteur à courant continu (MCC).....	19
I.5.2.Le moteur à courant alternatif (MCA).....	20
I.5.2.1. Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	20
I.5.2.2. Moteur synchrone à réluctance variable (MSRV).....	20
I.5.2.3. Moteur asynchrone (MAS).....	21
I.5.2.4. Moteur asynchrone à double étoile (MASDE).....	21
I.5.3.Avantages et inconvénients des moteurs.....	22

I.5.4.Critères de choix de la motorisation.....	23
I.5.5.Choix de motorisation.....	23
I.6. Les Onduleurs.....	23
I.6.1.Description du l'onduleur.....	23
I.6.1.1. Onduleur de tension triphasé (à deux niveaux).....	24
I.6.1.2. Onduleurs multi-niveaux.....	24
I.6.2.Avantages et inconvénients des différents types des onduleurs.....	27
I.6.3.Choix d'onduleur.....	28
I.7. Conclusion.....	29

## **CHAPITRE II : Modélisation de la Machine Asynchrone Double Etoile**

II.1. Introduction.....	30
II.2. Modélisation de la MASDE.....	30
II.2.1. Description de la machine asynchrone double étoile.....	30
II.2.2. Hypothèses simplificatrices.....	31
II.2.3. Modèle triphasé de la MASDE.....	32
II.2.3.1.Equations électriques.....	32
II.2.3.2.Equation magnétiques .....	34
II.2.3.3.Expression du couple électromagnétique.....	35
II.2.3.4.Equations mécaniques.....	36
II.2.4. Modèle biphasé de la MASDE.....	36
II.2.4.1.Transformation de Park.....	36
II.2.4.2.Choix du référentiel.....	37
II.2.4.2.1. Référentiel lié au stator.....	37
II.2.4.2.2. Référentiel lié au rotor.....	37
II.2.4.2.3. Référentiel lié au champ tournant.....	38
II.2.4.3.Modèle biphasé de la MASDE lié au champ tournant.....	38
II.3. Simulation et interprétation des résultats.....	40
II.3.1. Simulation de la MASDE.....	40
II.3.2. Alimentation de la MASDE par deux sources de tension triphasées.....	42
II.3.3. Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension.....	42
II.3.3.1.Modélisation de l'onduleur à commande MLI.....	42
II.3.3.2.Stratégie de commande sinus-triangle.....	44
II.3.4. Résultats de la simulation.....	46
II.3.5. Interprétation du résultat.....	48

II.4. Conclusion.....	48
<b>CHAPITRE III : Commande de la Machine Asynchrone Double Etoile</b>	
III.1. Introduction.....	49
III.2. Principe de la commande vectorielle.....	49
III.3. Méthode d'orientation du flux.....	50
III.4. Technique de la commande vectorielle.....	51
III.4.1. Méthode directe.....	51
III.4.2. Méthode indirecte.....	52
III.4.3. Choix de la méthode.....	52
III.5. Régulation de la vitesse par la méthode indirecte.....	52
III.5.1. Synthèse des régulateurs PI.....	56
III.5.1.1. Régulateurs de courant.....	56
III.5.1.2. Régulateurs de vitesse.....	57
III.6. Simulation et interprétation des résultats.....	58
III.6.1. Simulation.....	58
III.6.2. Interprétation du résultat.....	59
III.7. Application à un véhicule électrique.....	60
III.7.1. Simulation.....	60
III.7.2. Interprétation des résultats.....	63
III.8. Conclusion.....	64
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAPHE</b>	
<b>ANNEXE</b>	

## Notations

<b>VE :</b>	Véhicule électrique
<b>VTE :</b>	Véhicule tout électrique
<b>MCC :</b>	Moteur a courant continue
<b>MSRV :</b>	Moteur synchrone a réluctance variable
<b>MSRB:</b>	Moteur synchrone a rotor bobiné
<b>MAS :</b>	Moteur a synchrone
<b>MADE :</b>	Moteur asynchrone double étoile
<b>BV :</b>	Boite vitesse
<b>DC :</b>	Courant continue
<b>AC :</b>	Courant alternatif
<b>MLI :</b>	Modulation de largeur d'impulsion
<b>NPC :</b>	clampé par le neutre (Neutral point calming)
<b>[P(<math>\theta</math>):</b>	La matrice de park modifie
<b>V<sub>a,b,cs 1,2</sub> :</b>	Tensions triphasées statoriques (étoile 1et 2)
<b>V<sub>ds1,qs1</sub> :</b>	Tensions de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q)
<b>V<sub>ds1,qs1</sub> :</b>	Tensions de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q)
<b>V<sub>dr,qr</sub> :</b>	Tensions rotoriques dans le référentiel de Park (d,q)
<b>[V<sub>s1</sub>] , [V<sub>s2</sub>] , [V<sub>r</sub>] :</b>	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques
<b>E :</b>	Tension continue
<b>i<sub>a,b,cr</sub> :</b>	Courants triphasés rotorique
<b>i<sub>a,b,cs 1,2</sub> :</b>	Courants triphasés statoriques (étoiles 1et 2)
<b>I<sub>ds1,Iqs1</sub> :</b>	Courants de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d, q)
<b>I<sub>ds2,Iqs2</sub> :</b>	Courants de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d, q)
<b>I<sub>dr</sub> , I<sub>qr</sub> :</b>	Courants rotoriques dans le référentiel de Park (d, q)
<b>[I<sub>s1</sub>] , [I<sub>s2</sub>] , [I<sub>r</sub>] :</b>	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques
<b>i<sub>a</sub> :</b>	Courant d'induit
<b>R<sub>s</sub> :</b>	Résistance du statorique
<b>R<sub>s1</sub> :</b>	Résistance d'une phase (statoriques) de l'étoile 1

$R_{s2}$ :	Résistance d'une phase (statoriques) de l'étoile 2
$L_{s1}$ :	Inductance propre d'une phase de l'étoile 1
$L_{s2}$ :	Inductance propre d'une phase de l'étoile 2
$L_{sr}$ :	Inductance mutuelle cyclique stators-rotor
$L_m$ :	Inductance mutuelle cyclique étoile1-étoile2 et le rotor
$L_{ms}$ :	Inductance mutuelle cyclique statoriques
$L_{mr}$ :	Inductance mutuelle cyclique rotorique
$L_r$ :	Inductance propre d'une phase du rotor
$\varphi_{a,b,cr}$ :	Flux triphasés rotoriques
$\varphi_{a,b,cs 1,2}$ :	Flux triphasés statoriques (étoiles 1 et 2)
$\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}$ :	Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park (d,q)
$\varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$ :	Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park (d,q)
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$ :	Flux rotoriques dans le référentiel de Park (d,q)
$\varphi_f$ :	Flux imposé par le courant d'excitation $i_f$
$[\varphi_{s1}], [\varphi_{s2}], [\varphi_r]$ :	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques
$C_r$ :	Couple de charge
$C_{em}$ :	Couple électromagnétique
$\omega_{s 1,2}$ :	Pulsation électrique statorique 1,2
$\omega_r$ :	Pulsation électrique statorique
$\omega$ :	Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor
$\omega_g$ :	Pulsation électrique du glissement
$\Omega$ :	La vitesse de rotation mécanique du rotor
$\theta_{s1}$ :	L'angle constitué par les axes $A_{s1}$ , d
$\theta_r = \theta_{s1} - \theta$ :	L'angle constitué par les axes $A_r$ , d
$\theta$ :	L'angle constitué par les axes $A_{s1}$ , $A_r$
$L_{s1} + L_m$ :	L'inductance propre cyclique de l'étoile 1
$L_{s2} + L_m$ :	L'inductance propre cyclique de l'étoile 2
$L_r + L_m$ :	L'inductance cyclique du rotor
$\alpha$ :	L'angle constitué par $A_{s1}$ , $A_{s2}$

<b><math>P_{em}</math></b> :	La puissance et le couple électromagnétique
<b><math>J</math></b> :	moment d'inertie
<b><math>f</math></b> :	coefficient de frottement visqueux
<b><math>P</math></b> :	Nombre de pair de pole
<b><math>V_r</math></b> :	vitesse de référence.
<b><math>V_p</math></b> :	Amplitude de la référence
<b><math>f_p</math></b> :	la fréquence de la modulation (porteuse)
<b><math>f</math></b> :	fréquence de la référence (modulante)
<b><math>K_p</math></b> :	Gain du régulateur proportionnel
<b><math>K_i</math></b> :	Gain du régulateur intégrateur
<b>PI</b> :	Régulateur proportionnel intégrateur
<b><math>p</math></b> :	Opérateur dérivé de Laplace

## Liste Des Figures

<b>Figure I.1</b> Chaîne de traction de VE .....	4
<b>Figure I.2</b> Histoire de VE .....	6
<b>Figure I.3</b> Architecture du véhicule tout électrique.....	6
<b>Figure I.4</b> Configuration hybride série.....	7
<b>Figure I.5</b> Configuration hybride parallèle.....	8
<b>Figure I.6</b> Configuration hybride parallèle.....	9
<b>Figure I.7</b> Composants qui peuvent faire partie d'une chaîne de traction.....	11
<b>Figure I.8</b> Chaîne de traction thermique.....	11
<b>Figure I.9</b> Chaîne de traction électrique.....	12
<b>Figure I.10</b> Exemples de chaînes de traction "tout électriques".....	13
<b>Figure I.11</b> représente la roue motrice.....	13
<b>Figure I.12</b> Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb.....	16
<b>Figure I.13</b> Structure d'un supercondensateur.....	17
<b>Figure I.14</b> Schéma conceptuel de l'onduleur.....	17
<b>Figure I.15</b> Schéma conceptuel de le hacheur série.....	18
<b>Figure I.16</b> Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE.....	19
<b>Figure I.17</b> Représentation des enroulements de la MASDE.....	21
<b>Figure I.18</b> Onduleur à deux niveaux.....	24
<b>Figure I.19</b> Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	25
<b>Figure I.20</b> Onduleur NPC à trois niveaux.....	26
<b>Figure I.21</b> Onduleur NPC à n-niveaux.....	26
<b>Figure I.22</b> Topologie multi-niveau à cellules imbriquées.....	26
<b>Figure I.23</b> Onduleur en cascade à 5 niveaux.....	27
<b>Figure II.1</b> Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile.....	31
<b>Figure II.2</b> modèle diphasé de la MASDE dans le repère de Park.....	38
<b>Figure II.3</b> schéma bloc de la MASDE dans le repère dq.....	41
<b>Figure II.4</b> schéma bloc de la transformation de Park.....	41
<b>Figure II.5</b> schéma bloc de l'association transformation de Park et la MASDE.....	41
<b>Figure II.6</b> Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension.....	42
<b>Figure II.7</b> représente le schéma d'un onduleur triphasé.....	43
<b>Figure II.8</b> représente le schéma bloc des deux onduleurs triphasé.....	43
<b>Figure II.9</b> Schéma de principe de MLI sinus-triangle.....	44

<b>Figure II.10</b>	Principe de la commande MLI.....	45
<b>Figure II.11</b>	La tension de la phase (a) la sortie de l'onduleur MLI.....	46
<b>Figure II.12</b>	L'évolution du Couple électromagnétique.....	46
<b>Figure II.13</b>	L'évolution de la vitesse.....	47
<b>Figure II.14</b>	L'évolution du courant statorique I dans le repère abc.....	47
<b>Figure III.1</b>	Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.....	50
<b>Figure III.2</b>	Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté de la MASDE.....	52
<b>Figure III.3</b>	Bloc de commande à flux Orienté.....	53
<b>Figure III.4</b>	Représentation schématique du bloc de découplage IFOC.....	55
<b>Figure III.5</b>	Schéma de régulation des courants.....	56
<b>Figure III.6</b>	Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques.....	57
<b>Figure III.7</b>	Boucle de régulation de vitesse.....	57
<b>Figure III.8</b>	vitesse de rotation.....	58
<b>Figure III.9</b>	Couple de charge.....	58
<b>Figure III.10</b>	Couple Electromagnétique.....	59
<b>Figure III.11</b>	Courant $I_{as1}$ .....	59
<b>Figure III.12</b>	courbe de la vitesse de référence et le couple de charge.....	60
<b>Figure III.13</b>	La vitesse de rotation.....	61
<b>Figure III.14</b>	Couple électromagnétique.....	61
<b>Figure III.15</b>	Courant $I_{sa1}$ .....	61
<b>Figure III.16</b>	La puissance.....	62
<b>Figure III.17</b>	Flux rotorique d,q.....	62
<b>Figure III.18</b>	Flux rotorique totale.....	62

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau I.1</b> Des avantages et des inconvénients des configurations.....	9
<b>Tableau I.2</b> Les avantages, les inconvénients des architectures.....	14
<b>Tableau I.3</b> Avantages et inconvénients des machines électriques.....	22
<b>Tableau I.4</b> Tableau comparatif des machines électriques.....	23
<b>Tableau I.5</b> Des avantages et inconvénients des onduleurs.....	27

## ملخص

في هذا العمل، نحن مهتمون بدراسة أداء سلسلة الجر لمركبة كهربائية. تم تخصيص الجزء الأول لاختيار المكونات المختلفة لسلسلة الجر ، وهي المحرك اللامتزامن سداسي الطور والمحول الثابت العاكس . بعد ذلك ، قدمنا نمذجة عناصر سلسلة الجر مع نتائج المحاكاة. تم تخصيص الجزء الثاني لدراسة التحكم بالشعاعي للمحرك اللامتزامن في ظروف سريان حقيقي .

**الكلمات الرئيسية:** مجموعة نقل الحركة ، التحكم بالنواقل ، MASDE ، سيارة كهربائية.

## Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude des performances de la chaîne de traction d'un véhicule électrique. La première partie a été consacrée au choix des différents composants de la chaîne de traction à savoir le moteur et le convertisseur statique (onduleur). Par la suite, nous avons présenté la modélisation et la simulation des éléments de la chaîne de traction. Par la suite, nous présentons les performances de la commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile dans des conditions de roulement réel d'un véhicule électrique.

**Mots clés :** chaîne de traction ; commande vectorielle ; MASDE ; Véhicule électrique.

## Abstract

This work focuses on studying the performance of the drive train of an electric vehicle. The first part was devoted to the choice of the different components for the drive train, namely the motor and the static converter (inverter). After that, we presented the modeling of the drive train components. The second part was devoted to the study of the vector control for the double star asynchronous machine. Finally, the use of a speed profile of a real use.

**Keywords :** Drive train, Vector control, DSIM, Electrical vehicle.

**INTRODUCTION**

**GENERAL**

# Introduction générale

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle est apparue une invention technologique majeure qui a considérablement modifié les sociétés de nombreux pays au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette invention n'est autre que le véhicule (automobile). À l'origine, l'automobile a d'abord été à propulsion électrique, mais avec la découverte de nombreux puits de pétrole, le véhicule à moteur thermique s'est rapidement imposé au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce véhicule utilise donc le pétrole comme vecteur d'énergie. L'automobile s'est ainsi progressivement imposée dans les pays développés comme le principal mode de transport pour la circulation des individus et des marchandises. Son industrie a été l'un des secteurs les plus importants et les plus influents depuis la fin de la seconde guerre mondiale et son essor mondial a été spectaculaire[1].

La dégradation de la qualité de l'environnement a conduit ces dernières années la majorité des Etats à prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants. Cette pollution provient principalement d'émissions gazeuses et tout particulièrement des véhicules thermiques. Pour contribuer à une amélioration de la qualité de l'air, Dans ce contexte, la propulsion électrique offre une solution sans émission à l'usage, avec l'opportunité d'être alimentée par une énergie électrique qui devient renouvelable et permet une production locale. Ce véhicule électrique, solution « idéale », est pourtant présent depuis les débuts de l'automobile. Toutefois, il souffre de limites principalement liées à l'autonomie et au coût de fabrication en comparaison avec des véhicules thermiques [1].

Il y a longtemps, le monde industriel a été dominé par les machines à courant continu car elles sont faciles à commander. Actuellement, les machines à courant alternatif occupent une place importante dans le domaine du véhicule électrique. Cela grâce au développement technologique majeur et rapide des batteries et de l'électronique de puissance durant ces décennies et au développement des commandes numériques, Cela fait le coût qui sa proche aux véhicule thermique.

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs employés le plus fréquemment dans les véhicules électriques. Ils possèdent plusieurs avantages : simplicité de construction due à l'absence du collecteur mécanique, robustesse, prix peu élevé et entretien facile.

L'association de l'ensemble machine-convertisseur statique est à l'heure actuelle, la plus utilisée dans les applications de variation de la vitesse de la machine. Cette association et son application dans des grandes puissances provoque des problèmes au niveau des interrupteurs

de commutation qui demande des courants importants, la solution est d'appliquer la segmentation de puissance au niveau de l'ensemble machine-convertisseur, et cela nécessite des machines multi-phasées alimentées par des convertisseurs statiques, l'idée est de réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentation donc la puissance totale demandée par la machine est alors réduite dans chaque phase, ce qui mène à une réduction des ondulations du couple[3].

Les études du début des années 80 ont porté sur l'amélioration de la fiabilité des machines asynchrones reposant sur le principe de redondance parallèle procuré par l'augmentation du nombre de phases statoriques (Jahns, 1980). Dans ce cas, l'essentiel des études porte sur la dégradation du couple provoquée par la perte d'une ou plusieurs phases. Cette redondance est aussi très appréciée dans la propulsion de navires électriques. Pour les machines à double étoile par exemple, 50 % de la puissance peut être préservée en cas de défaut (Filliau et al., D5620), ce qui assure la disponibilité de la motorisation[28].

Récemment les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux machines polyphasées, en particulier, la machine asynchrone à double étoile. Cette dernière présente plusieurs avantages tels que : la fiabilité, minimisation des pulsations du couple, ce qui permet d'utiliser des composants électroniques de puissance de dimensionnement réduit pour des fréquences de commutation plus élevés qu'avec les machines triphasées[3].

L'objectif de ce mémoire est la commande d'une machine asynchrone double étoile (MASDE) pour un véhicule électrique.

À cet effet, le premier chapitre sera consacré pour présenter l'état de l'art du véhicule électrique, les éléments de la chaîne de traction, la classification des moteurs et l'électronique de puissance.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone double étoile et de son alimentation. Après une description de la machine. On développe au premier lieu un modèle polyphasé de la machine asynchrone double étoile, deuxièmement le modèle biphasé basé sur la transformation de Park. Ensuite, on présente l'alimentation de la machine par deux onduleurs de tension à commande M.L.I, on commente enfin les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la machine asynchrone double étoile. Un aperçu sur le principe de la commande

vectorielle ainsi que ses différentes méthodes s'avèrent être utile. Par la suite, on passe à l'application de la méthode indirecte sur la machine. Puis, une application d'un profil de vitesse qui représente les différentes phases de vitesse dans une utilisation réel. Nous allons enfin commenter les résultats de simulation.

Finalement, une conclusion générale et quelques perspectives de notre travail seront présentés.

# CHAPITRE I

*Etat de l'art sur les chaines de tractions  
des véhicules électrique*

## I.1. Introduction

Depuis plusieurs années, deux phénomènes tendent à faire évoluer le marché de l'automobile, d'une part la prise de conscience sur l'environnement, et d'autre part l'augmentation du prix des carburants. C'est dans ce contexte que s'est lancée une véritable chasse aux grammes de CO<sub>2</sub> chez les constructeurs automobiles, en raison du fait que le taux de CO<sub>2</sub> rejeté est intimement lié à la consommation du véhicule. C'est pourquoi, un moyen de transport propre indépendant des ressources fossiles et non émetteur de gaz à effet de serre est d'un enjeu mondial. Cependant, l'utilisation des sources propres et renouvelables semble apporter une réponse convaincante.[4]

Dans ce chapitre nous présentons l'évolution des véhicules électrique depuis leur apparition, leur constitution ainsi que l'importance de leurs systèmes de propulsion. Ensuite, nous discutons les principaux composants de la chaine de traction (batterie, motorisation ...). Enfin, nous terminons par une présentation des composants de la chaine de traction qu'on a adoptée pour notre application.

## I.2. Définition et historique

### I.2.1. Définition

Le système de propulsion électrique est le cœur des véhicules électriques et hybrides. Ils se composent des moteurs électriques, de convertisseurs de puissance et de leurs contrôles/commandes. Le moteur électrique est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source d'énergie électrique utilisée pour propulser le véhicule ou inversement pour permettre la récupération d'énergie pendant le freinage. Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale devient le récepteur. On peut dire alors que la voiture électrique est composée de trois principaux éléments [1] :

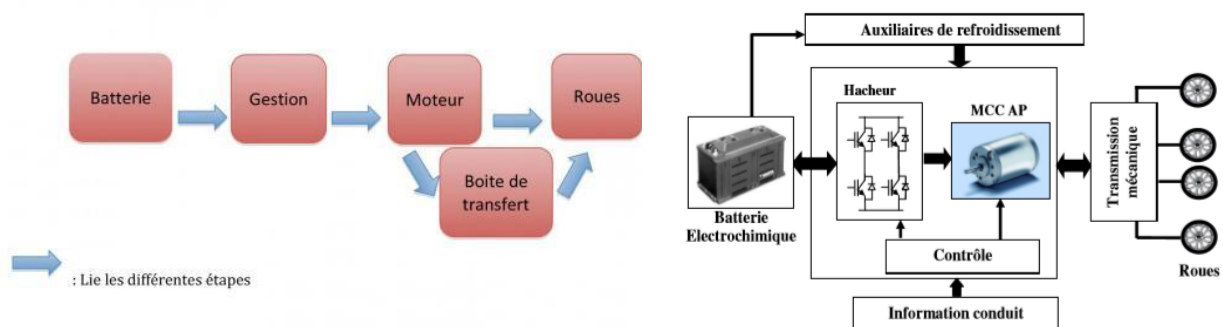


Figure I.1 Chaîne de traction de VE

- Le moteur
- L'électronique de puissance
- Source d'énergie

### I.2.2. Historique

- (1832-1839), Premier véhicule électrique inventé par Robert Anderson (Homme d'affaire écossais).
- 1835, Construction d'une petite locomotive électrique par Thomas Davenport (américain)
- 1838, Un modèle similaire roule jusqu'à 6 km/h par Robert Anderson.
- 1859, Invention de la batterie rechargeable au plomb acide par Gaston Planté (Français).
- 1891, La première vraie voiture électrique par William Morrison (américain)
- 1897, Les premiers taxis électriques dans les rues de New York.
- 1912, la production des véhicules électriques est à son crête, mais, l'introduction de la Ford Model T à essence en 1908 va commencer à se faire sentir.
- 1966, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air.
- 1976, le Congrès américain adopte le Electric and Hybrid Vehicle Research, Développement, and Démonstration Act.
- En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires seront vendus au Japon la première année.
- A partir de 2000 la voiture électrique va remourir à nouveau.
- En 2003 en France, Renault fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride Kangoo Electrode mais abandonnera la production après environ 500 véhicules.
- En 2003-2004, c'est la fin de l'EV1. GM va récupérer un par un tous les véhicules pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.
- En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.
- En mars 2009, Vincent Bolloré annonce la sortie pour 2010 en location mensuelle à 330 euros de la Pininfarina Blue Car.

- 2014, tesla annonce des plans pour construire une batterie ‘gigafactory’ afin de s’assurer qu’elle dispose suffisamment de batteries pour ses véhicule actuels et à venir.
- 2017, Consumer Reports a désigné tesla comme la première marque automobile aux États-Unis et la classe au 8<sup>ème</sup> rang parmi les constructeurs automobiles mondiaux.



Thomas Parker, 1884 dans une carriole électrique[23]



Première véhicule électrique a dépasser les 100kmh 1899 [24]



Tesla model s 2019[25]

Figure I.2 Histoire de VE

### I.3. Classification des véhicules électrique

#### I.3.1. Véhicule tout électrique (VTE)

Il s’agit d’un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d’énergie pour la propulsion. La structure de base du VTE est donnée par le schéma de (la figure I.3) qui se caractérise par une chaîne de puissance électrique : source-convertisseur-moteur. On constate que sa structure reste très proche de celle du véhicule thermique conventionnel où le réservoir à carburant est remplacé par des packs de batterie, le moteur électrique remplace le moteur à combustion interne, et la transmission mécanique réalisée par l’intermédiaire d’un embrayage, d’une boîte à vitesse et d’un différentielle est évolué vers d’autres systèmes de transmission sans boîte de vitesse, du multimoteurs électriques qui éliminent le différentiel mécanique jusqu’aux solutions à moteur-roue.

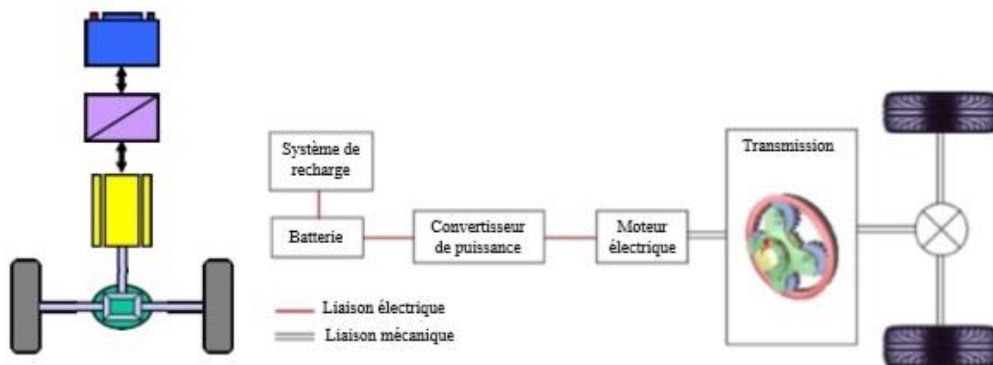


Figure I.3 : Architecture du véhicule tout électrique

Dans un véhicule électrique pur, l'énergie peut être récupérée dans les phases de freinage ou de décélération. Dans ce cas, le moteur électrique fonctionne en générateur et réinjecte dans les batteries l'énergie cinétique du véhicule transformée en énergie électrique. Pour les batteries de type standard, le courant maximal de charge est plus faible que le courant maximal de décharge. La puissance de freinage qui peut être récupérée est directement liée au courant maximal de recharge de l'élément de stockage d'énergie électrique ; de ce fait, il arrive que l'on ne récupère pas toute l'énergie du freinage, en cycle urbain, le freinage récupératif permet d'accroître sensiblement l'autonomie d'environ 20% [6].

### I.3.2. Le véhicule électrique hybride

Les deux principales raisons pour lesquelles les concepts hybrides sont intéressants sont l'économie de l'énergie et la diminution des polluants. Nous pouvons les classer en trois groupes.

➤ Configuration hybride série

Dans la configuration série, représentée en Figure (I.4), seule la machine électrique est connectée directement à la transmission et donc aux roues. 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 un élément de stockage tel qu'une batterie électrochimique ou être utilisée par le moteur électrique pour propulser le véhicule.[8]

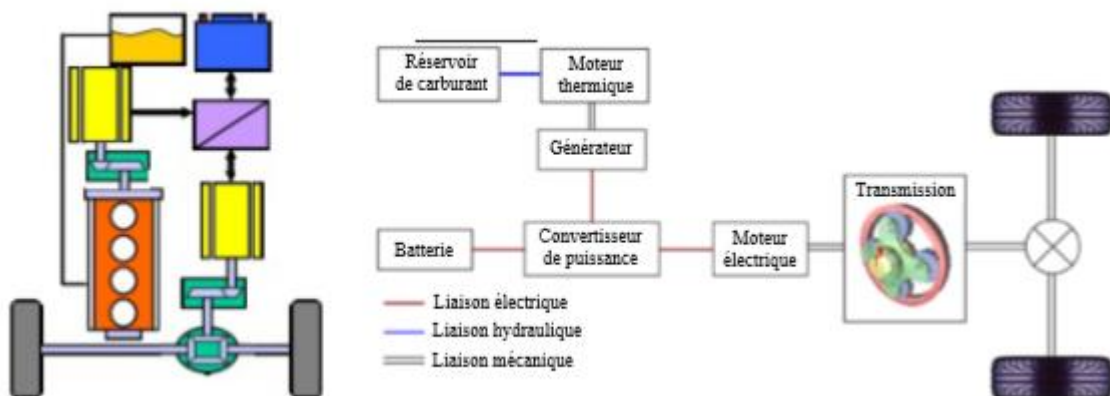


Figure I.4 : Configuration hybride série

➤ Configuration hybride parallèle

Dans la configuration parallèle (Figure I.5) les deux moteurs, thermique et électrique, sont liés directement à la transmission et donc aux roues. Ils peuvent participer à la traction du

véhicule d'une façon parallèle car les flux énergétiques provenant des deux sources d'énergie arrivent simultanément aux roues. Des liaisons mécaniques entre l'arbre du moteur électrique et l'arbre du moteur thermique via une boîte à vitesse permettent d'assurer la transmission de la puissance aux roues.[7]

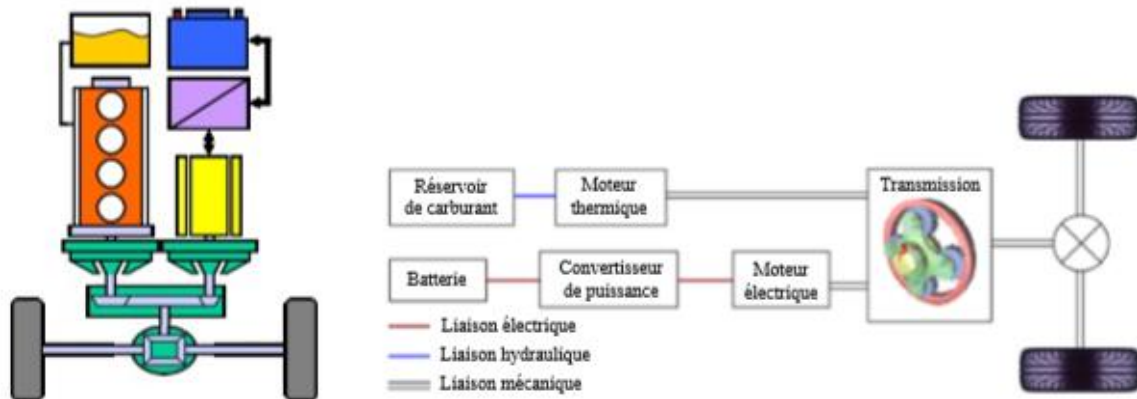


Figure I.5 : configuration hybride parallèle

Dans ce type d'hybridation, le moteur thermique est principalement utilisé pour déplacer le véhicule. La machine électrique qui utilise l'énergie de la batterie permet un fonctionnement en mode boost et temporairement en mode tout électrique pour éviter des situations où le moteur thermique est peu efficace. La recharge des batteries est assurée par la récupération de l'énergie cinétique pendant les phases de décélération et de freinage du véhicule.[8]

➤ Configuration hybride série-parallèle (Combiné)

Cette architecture série-parallèle est appelée aussi « hybride parallèle à dérivation de puissance », elle intègre un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique (Figure I.13). Utilisant une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler le régime de fonctionnement avec le maximum de rendement concernant le moteur thermique et de partager la puissance entre les demandes du véhicule (charge) et la recharge de la batterie. Les combinaisons entre les avantages de la configuration série et les avantages de la configuration parallèle permettent de tirer un bon parti de cette configuration. L'architecture série-parallèle nécessite au moins deux moteurs électriques en plus du moteur thermique ce qui la rend onéreuse et augmente la complexité de la structure contrôle-commande.[7]

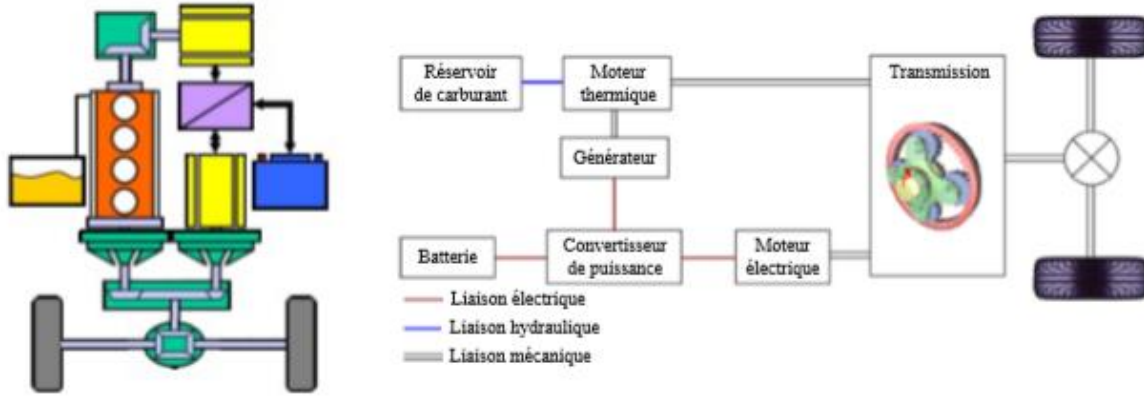


Figure I.6: configuration hybride parallèle

### I.3.3. Avantages et inconvénients des véhicules électriques

On présente un tableau des avantages et des inconvénients de toutes les configurations. [6]

Configuration du véhicule		Avantages	Inconvénients
Hybride Série		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomie</li> <li>• Puissance comparable au véhicule thermique</li> <li>• Batterie largement sous-dimensionnée</li> <li>• Fonctionnement en mode zéro émission</li> <li>• Bon rendement énergétique aux faibles vitesses (mode tout électrique en zone urbaine)</li> <li>• Très bon contrôle du moteur thermique</li> <li>• Bonnes performances dynamiques de la machine électrique de traction (confort d'utilisation)</li> <li>• Gestion relativement facile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Système de motorisation important</li> <li>• Masse élevée</li> <li>• Coût élevé</li> <li>• Faible rendement énergétique de la chaîne cinématique globale (zone extra-urbaine)</li> <li>• Utilisation de 3 machines dont une (la machine électrique de traction) est au moins de forte puissance (encombrement maximal)</li> <li>• Mode tout thermique impossible.</li> </ul>
	(VHS)		

Hybride Parallèle	(VHP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomie et performance</li> <li>• Taux d'émission zéro en mode électrique</li> <li>• Moins polluant</li> <li>• Bon rendement énergétique</li> <li>• Utilisation d'une seule machine électrique</li> <li>• Mode tout thermique et tout électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encombrement élevé du système de motorisation</li> <li>• Coût et masse élevés</li> <li>• Fonctionnement du moteur thermique plus accru : dynamiques mauvaises</li> </ul>
Hybride Combiné	(VHC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomie élevée</li> <li>• Le plus commercialisé</li> <li>• Comparable aux ICE véhicule</li> <li>• Moins polluant</li> <li>• Bon rendement énergétique</li> <li>• Très bonne répartition de l'énergie</li> <li>• Souplesse du véhicule : tous les modes sont autorisés</li> <li>• Pas de rupture de couple à la roue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexité de la gestion de l'énergie</li> <li>• Complexité d'agencement entre ses composants</li> <li>• Coût et masse élevés</li> <li>• Gestion très délicate</li> <li>• Couplage très complexe</li> </ul>
Tout Electrique	(VTE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zéro émission</li> <li>• Silencieux</li> <li>• Confort d'utilisation</li> <li>• Dépendances d'entretiens réduites à 40%</li> <li>• Occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problème d'autonomie</li> <li>• Utilisation urbaine</li> <li>• Coût élevé</li> </ul>

Tableau (I.1) des avantages et des inconvénients des configurations

## I.4. La chaîne de traction du véhicule électrique

### I.4.1. Description de la chaîne de traction

La Figure I.7 présente les symboles des composants qui seront utilisés pour expliciter le principe des différentes chaînes de traction présentées.[9]

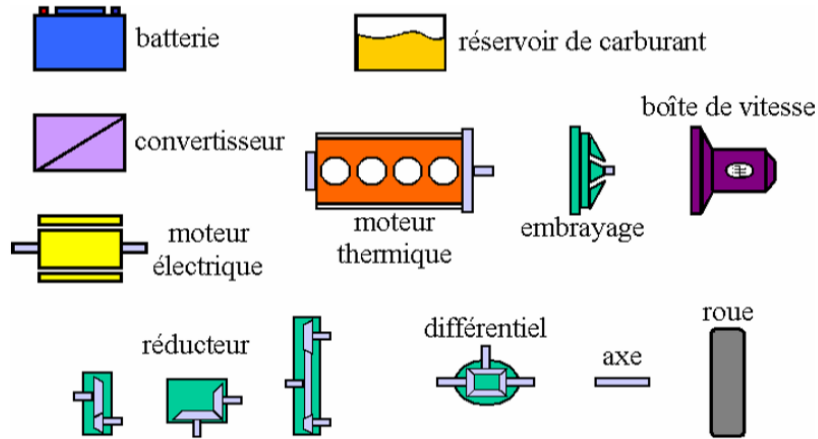


Figure 1.7. Composants qui peuvent faire partie d'une chaîne de traction

La chaîne de traction classique à moteur à combustion interne est présentée sur la Figure (I.8). Elle est centrée autour d'un moteur thermique alimenté en combustible par un réservoir de carburant. La rotation du moteur est transmise aux roues à travers l'embrayage, la boîte de vitesse, le différentiel et les cardans.

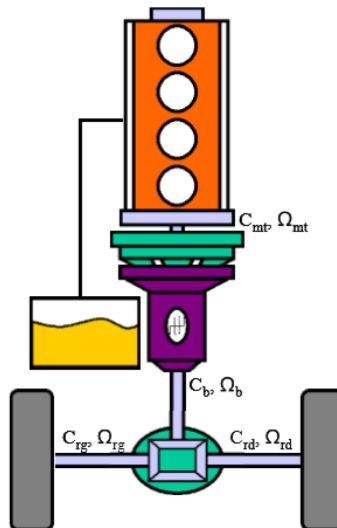


Figure 1.8. Chaîne de traction thermique

La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique englobant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la Figure (I.9).

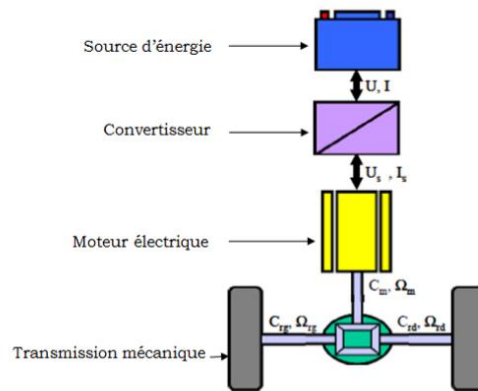


Figure 1.9. Chaîne de traction électrique

## I.4.2. Différentes architectures de chaîne de traction

Nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique (à rapport fixe), la boîte de vitesses (BV) et éventuellement le différentiel. Nous avons exclu arbitrairement les transmissions hydrauliques, La figure (I.10) montre quatre exemples schématiques de motorisations "tout électriques".[10]

### ➤ Architecture monomoteur

On peut envisager deux solutions de la transmission mécanique pour cette architecture

S1- un seul moteur électrique + BV + différentiel (2 ou 4 roues motrices, dans ce dernier cas pont arrière nécessaire).

S2- un seul moteur électrique + réducteur fixe + différentiel.

### ➤ Architecture multi-moteurs

S3- un moteur électrique + réducteur par roue motrice, soit deux ou quatre moto-réducteurs.

S4- un moteur électrique à entraînement direct par roue motrice, soit deux ou quatre moteurs.

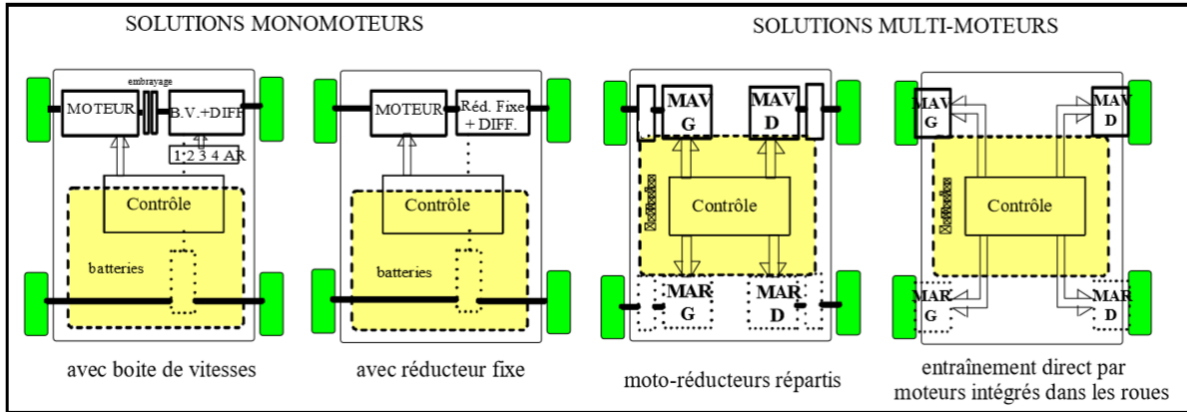


Figure I.10 Exemples de chaînes de traction "tout électriques".[10]

- Le moteur rue électrique (utilisées dans la solution 4) est très proche d'un moteur "normal". La seule déférence repose sur son agencement. Au lieu d'avoir un seul moteur placé sous le capot, deux (voir quatre) moteurs de plus petites tailles sont insérés directement dans les roues du véhicule. On notera que les batteries restent placées à l'intérieur de la voiture.[11].

Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénérateur.[11]

L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées de la transmission, de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule[11].

Cette grande liberté permet un contrôle indépendant du couple ce qui peut améliorer la sécurité de transport. Les inconvénients de ce type de moteur sont l'augmentation de la masse non-suspendue et la difficulté d'intégrer un réducteur. Ainsi, l'introduction d'un moteur à fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule.[11] la Figure (I.11) représente la roue motrice



Figure I.11 représente la roue motrice [26][27]

On représente dans ce tableau les avantages, les inconvénients et les schémas de chaque architecture.[12]

Différents architecture		Avantages	Inconvénients	Schéma
Monomoteur	S1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solution très proche des véhicules thermiques</li> <li>• Réduction du couple max et de puissance max</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creux de couple</li> <li>• La nécessité d'un embrayage avec sa commande (pièces d'usure)</li> <li>• Mauvaise utilisation des propriétés intrinsèques des entraînements électrique</li> <li>• Pas de contrôle indépendant de chaque roue</li> </ul>	
	S2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suppression de l'embrayage</li> <li>• Simplicité de la technologie</li> <li>• Le cout est réduit</li> <li>• Facilité de maintenance</li> <li>• Solution toujours très proche d'un véhicule traditionnel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encombrement de la fonction motrice</li> <li>• Rendement, bruit et fiabilité de la transmission</li> <li>• Pas de contrôle indépendant de chaque roue</li> </ul>	

Multi-moteurs	S3	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Contrôle indépendant des roues</li> <li>•Utilisation possible d'un réducteur de façon simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Architecture véhicule en rupture</li> <li>•Rendement du réducteur</li> <li>•Encombrement local</li> </ul>	
	S4	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Contrôle indépendant des roues</li> <li>•Grande compacité de la fonction motrice</li> <li>•Rendement optimale de la transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Difficultés d'intégration</li> <li>•Contraintes importantes sur le moteur (surtout en l'absence de réducteur)</li> </ul>	

Tableau I.2 les avantages, les inconvénients des architectures.

### I.4.3. Les éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique

#### I.4.3.1. Sources d'énergies électriques

##### a) Batteries

La batterie est un réservoir d'énergie électrique qui se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient. On distingue plusieurs types de batteries, mais pour les véhicules électriques actuels on utilise fréquemment, les batteries Lithium-ion, Plomb-Acide et Nickel Cadmium [4].

##### ➤ Principe de fonctionnement

Le courant est produit par la circulation d'électrons entre 2 plaques ou électrodes :

- Une électrode positive capable de céder ou de capter les électrons,
- Une électrode négative capable de céder ou de capter les électrons.

Le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons qui se déplacent de l'électrode positive à l'électrode négative en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter un récepteur. Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte partant de la cathode pour rejoindre l'anode. La batterie se décharge.[14]

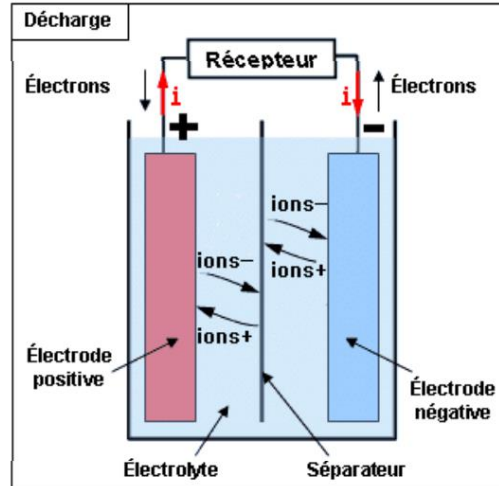


Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb[14]

## b) Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie capable de fournir des salves de très haute puissance avec des temps de rechargement très rapides [Mah-10]. Ils sont utilisés dans les véhicules électriques pour fournir suffisamment de puissance aux moteurs-roues lors des phases d'accélération et pour récupérer l'énergie cinétique lors du freinage pour la stocker. Il ne peut pas stocker autant d'énergie par unité de masse qu'une batterie mais il la délivre beaucoup plus vite. On parle ainsi improprement de source de puissance[6].

Les supercondensateurs les plus utilisés sont ceux qui utilisent la technologie au charbon actif. Ils sont particulièrement destinés à fournir des pics de puissance pendant un temps très court, à compenser les déséquilibres entre la puissance disponible et la puissance instantanée nécessaire. Ils peuvent permettre de réduire la taille, d'améliorer les performances dynamiques et la fiabilité des systèmes de stockage[29].

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels. Cette surface associée à la faible épaisseur de la double couche permet d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000F). L'utilisation de structures série parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés[29].

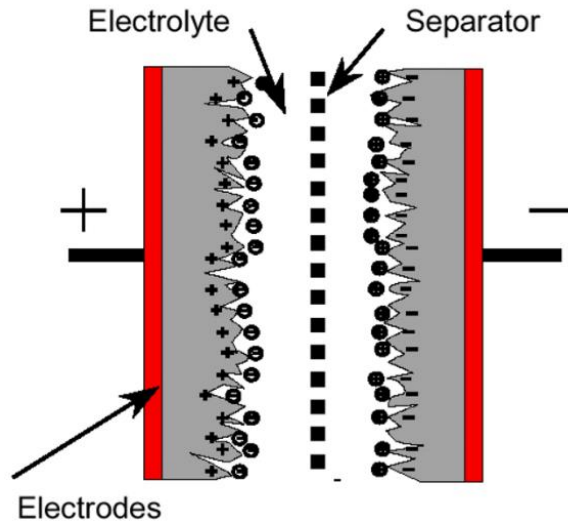


Figure I.13 : Structure d'un supercondensateur[29]

### I.4.3.2. Convertisseurs statiques

Les convertisseurs les plus utilisés dans un véhicule électrique sont les convertisseurs DC/AC et DC/DC

#### ➤ Convertisseur DC/AC

Le convertisseur DC/AC ou l'onduleur s'agit d'un convertisseur électronique permettant d'alimenter le moteur électrique en tensions triphasées, à fréquence variable à partir de la tension continue de la batterie. Ainsi, la récupération d'énergie fournie par la machine qui est en fonction génératrice en cas de freinage régénératif [15]. Le schéma de principe de base du convertisseur est représenté dans la figure (I.14)

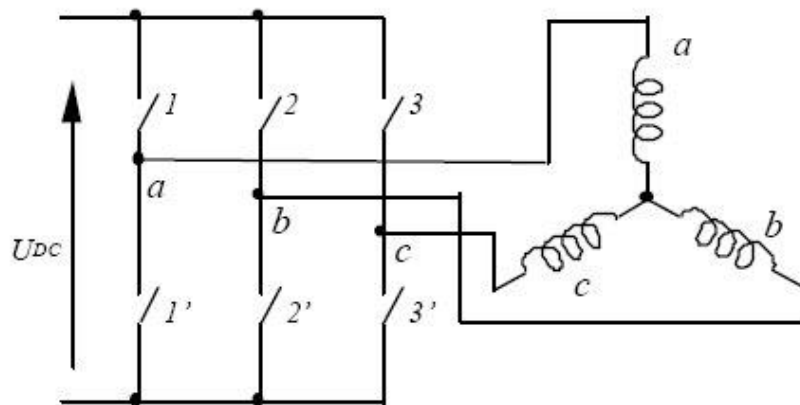


Figure. I.14: Schéma conceptuel de l'onduleur[30].

➤ Convertisseur DC/DC

Le convertisseur statique DC/DC, où hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne réglable. La tension d'entrée du convertisseur DC/DC est la tension de la batterie. La tension de sortie est une tension régulée et très élevée.[15] Le schéma de principe de base du convertisseur est représenté dans la figure (I.15)

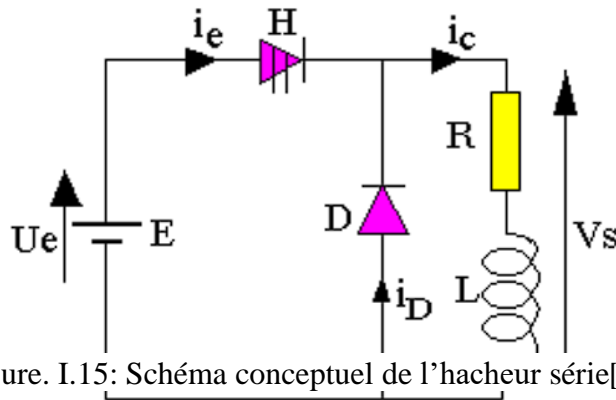


Figure. I.15: Schéma conceptuel de l'hacheur série[31].

### I.4.3.3. Moteurs électriques

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [4] :

- Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé)
- Obtenir une vitesse maximale
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la figure (I.16) exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse.[4]

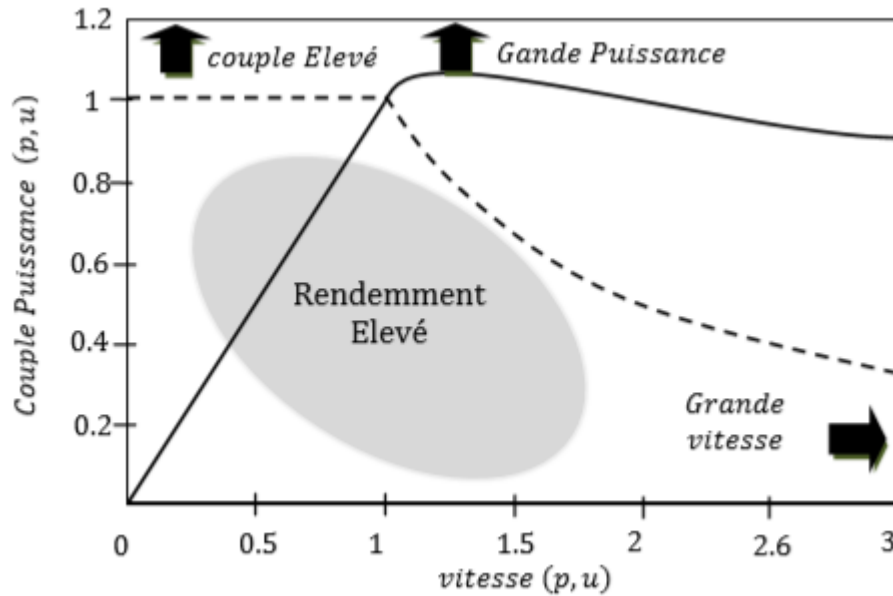


Figure 1.16 Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE

## I.5. Motorisation des véhicules électriques

Les premiers moteurs électriques à être utilisés sur les véhicules électriques furent les moteurs à courant continu, car c'était le moteur le plus facile à piloter en vitesse. Grâce au développement de l'électronique de puissance, différentes gammes de moteurs électriques sont utilisées pour la propulsion des véhicules électriques [1].

Donc suivant leurs sources d'alimentation, on distingue deux grandes familles de moteurs électriques pour les VE :[6]

- Moteurs à courant continu (MCC)
- Moteurs à courant alternatif (MCA)

### I.5.1. Moteurs à courant continu (MCC)

Le moteur à courant continu est la technologie la plus ancienne utilisée dans le domaine automobile. Elle est classique et peu chère (en tenant compte de l'électronique) car elle bénéficie d'une production importante. Mais ses performances sont limitées.[ 16]

Parmi les différents types de moteurs à courant continu, c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et un hacheur d'inducteur de plus faible puissance. Mais cette technologie comporte les inconvénients suivants [4] :

- La difficulté de refroidissement de l'induit tournant ce qui limite l'obtention des possibilités d'un couple massique élevé

- La vitesse de rotation de l'induit est limitée par sa constitution
- L'usure des balais nécessitant un entretien périodique pour enlever les poussières conductrices qui nuisent à l'isolement du collecteur
- Le coût de construction est élevé car la machine est complexe : collecteur, bobinage de l'induit.

### **I.5.2. Moteur à courant alternatif (MCA)**

L'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant les moteurs à courant alternatif beaucoup plus préférables que les entraînements traditionnels avec des moteurs à courant continu. Car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins d'entretien que les moteurs à courant continu. Néanmoins, l'électronique de contrôle et les contrôleurs sont plus onéreux et plus complexes. Le choix s'oriente donc plus vers cette solution, car des évolutions notables sur l'électronique sont plus probables que celles concernant la technologie de moteurs. Ces facteurs sont d'importance primordiale pour un système de propulsion de véhicules électriques. Dans ce cas, quatre principaux types de moteurs peuvent se discerner[6].

#### **I.5.2.1. Moteur synchrone à rotor bobiné (MSRB)**

Généralement alimenté par un onduleur en pont à six transistors. C'est le moteur dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles du MCC à excitation indépendante, il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux et le courant d'induit). Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse.[1]

#### **I.5.2.2. Moteur synchrone à réluctance variable (MSRV)**

Constitue une solution développée par FIAT. Il s'agit d'un moteur synchrone à bobinage triphasé réparti et alimenté par onduleur triphasé en pont classique. Pour obtenir des performances satisfaisantes aussi bien en terme de couple/pertes, de facteur de puissance que de plage de fonctionnement à puissance maximale constante, il est nécessaire d'avoir un grand rapport des inductances directes en transversales. Un rapport supérieur ou égal à 10 (satisfaisant) est atteint grâce à la construction de rotors spéciaux dits "axialement laminés".

De tels rotors sont constitués de paquets de tôles intercalés entre des couches amagnétiques et montés axialement de telle façon que le flux, dans l'axe direct, passe aisément d'un pôle à

l'autre. Les performances de ces moteurs sont supérieures à celles des moteurs asynchrones mais cette technologie de rotor reste aujourd'hui délicate à réaliser et il reste à trouver des solutions pour la fabrication en série[17].

### I.5.2.3. Moteur asynchrone (MAS)

La machine asynchrone est une machine électrique tournante à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas toujours synchronisée à la fréquence des courants qui les traversent[2].

La machine asynchrone, de part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Par ailleurs, ces machines possèdent un couple massique, un rendement et un facteur de puissance plus faible que les machines à aimants [11].

### I.5.2.4. Moteur asynchrone à double étoile (MASDE)

La MASDE se compose de deux enroulements triphasés identiques décalés l'un par rapport à l'autre d'un angle électrique  $\alpha$ .

Les phases de l'étoile une et de l'étoile deux sont décalées d'un angle  $2\pi/3$  ; le rotor est identique à celui d'une machine asynchrone triphasé (rotor à cage d'écureuil)[3].

La figure (I.17) représente la MASDE dont (as1, bs1, cs1) étant les phases de la première étoile,

(as2, bs2, cs2) les phases de la deuxième étoile et (ar, br, cr) les phases du rotor.

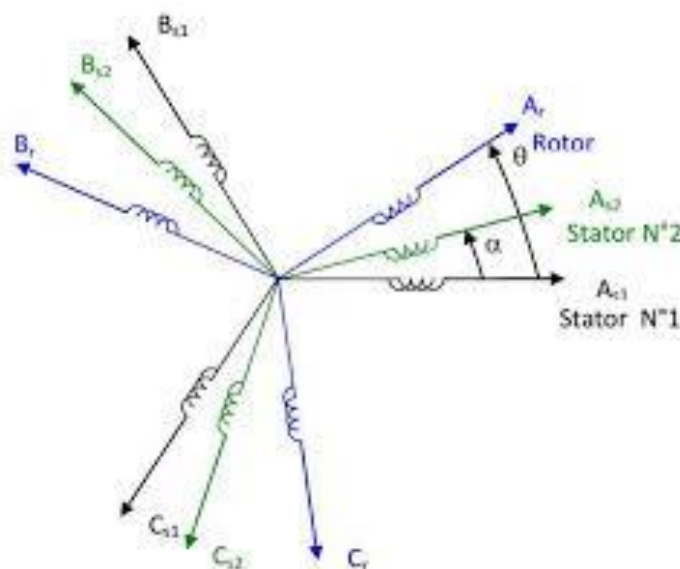


Figure. I.17. Représentation des enroulements de la MASDE

### I.5.3. Avantages et inconvénients des moteurs

Le tableau ci-dessous présente les avantages et les inconvénients des machines précédant.

Type de machine	Avantages	Inconvénients
MCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il bénéficie d'une grande maturité industrielle</li> <li>• Commande est très simple, tout comme son alimentation</li> <li>• Un cout faible</li> <li>• Haut performance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une inertie importante et est limitée en vitesse maximale, du fait du frottement des balais et du rotor bobiné</li> <li>• Nécessite entretien régulier</li> <li>• Puissance massique faible</li> <li>• Dangereuse en milieu explosif</li> </ul>
MSRB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les meilleures performances en couple et en dynamique</li> <li>• Rendement élevé</li> <li>• Freinage dynamique relativement facile</li> <li>• Puissance massique élevée</li> <li>• L'inertie du rotor est très faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé relativement à la qualité des aimants</li> <li>• Démagnétise des aimants aux hautes températures</li> <li>• Risque de décrochage</li> <li>• Electronique de commande assez compliquée</li> </ul>
MSRV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance massique élevé</li> <li>• Une large gamme de vitesse est possible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvais facteur de puissance</li> <li>• Prix de l'électronique de puissance élevé</li> <li>• Entretien périodique et couteux</li> </ul>
MAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moteur robuste</li> <li>• Fiable</li> <li>• Rendement acceptable</li> <li>• Cout moins chère</li> <li>• Puissance massique élevée</li> <li>• Très bonne performance a puissance et vitesse maximale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le couple maximal est assez faible</li> <li>• Courant très important intensité de démarrage</li> <li>• Démarrage brutal</li> <li>• Tension d'alimentation élevée</li> </ul>
MASDE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques</li> <li>• Rendement élevé</li> <li>• Segmentation de puissance</li> <li>• Amélioration de la fiabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts élevés</li> <li>• Complication du système de commande, cela est du à la multiplication du nombre de semi-conducteurs</li> <li>• L'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux.</li> </ul>

Tableau I.4 Avantages et inconvénients des machines électriques

### I.5.4. Critères de choix de la motorisation

La sélection du moteur de traction pour un système de véhicule électrique est une étape essentielle dans la conception du système global. De nombreuses caractéristiques doivent être prises en considération [12].

Le tableau ci-dessous montre une comparaison des machines précédentes :

	MCC	MSRB	MRV	MAS	MASDE
Construction	Simple	Complexe	Assez complexe	Simple	Assez complexe
Rendement	Moyen	Bon	Bon	Bon	Très bon
Vitesse maximale	Passable	Bonne	Bon	Bonne	Passable
Fiabilité	Bonne	Bonne	Bonne	Excellente	Bonne
Mode dégradé	/	/	/	/	Bonne
Coût du moteur	Passable	Moyen	Très bon	Bon	Passable
Coût électronique de puissance	Très bon	Moyen	Bon	Moyen	Moyen

Tableau I.5 Tableau comparatif des machines électriques

### I.5.5. Choix de motorisation

Chacun des moteurs présentés a des avantages et des inconvénients, nous avons choisi le moteur asynchrone double étoile en raison de son rendement élevé et le mode dégradé.

## I.6. Les onduleurs

### I.6.1. Description de l'onduleur

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, 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.

On distingue 2 types :

- Les onduleurs autonomes : la fréquence des grandeurs de sortie dépend de la commande.
- Les onduleurs non autonomes ou assisté : ce qui est différent de l'ondeur assisté où la fréquence est imposée par la fréquence du réseau

Il existe de nombreux convertisseurs de puissance qui sont basés sur des topologies diverses et variées applicables pour la chaîne de traction de véhicules. On peut distinguer dans la littérature deux types d'onduleurs de différentes topologies : les onduleurs de tension triphasée et les onduleurs avec une électronique de puissance plus modernes que l'on nomme onduleurs multi niveaux.[12]

### I.6.1.1. Onduleur de tension triphasé (à deux niveaux)

Le schéma de la structure de puissance est représenté sur la figure (I.18). l'ondeur est alimenté par une source de tension continue qui est la batterie du véhicule. Le coté alternatif est réalisé à l'aide de trios bars d'ondeur qui son connectés sure les trois phases du moteur[12]

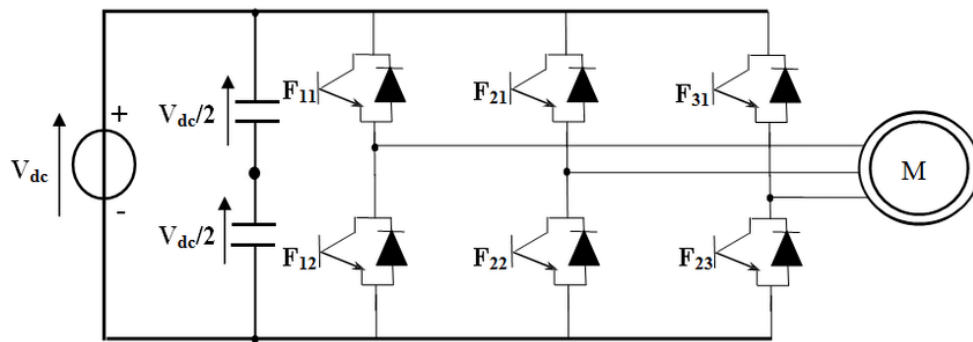


Figure I.18 Onduleur à deux niveaux

Le principe de commande est basé sur des techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Plusieurs techniques MLI existent dans la littérature, la plus connue est sans doute la MLI. Le but est de comparer une basse fréquence (le plus souvent sinusoïdale) avec une porteuse haute fréquence (le plus souvent triangulaire) qui représente la fréquence de découpage des interrupteurs. [12]

### I.6.1.2. Onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé.

D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques[19].

La figure (I.18) représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

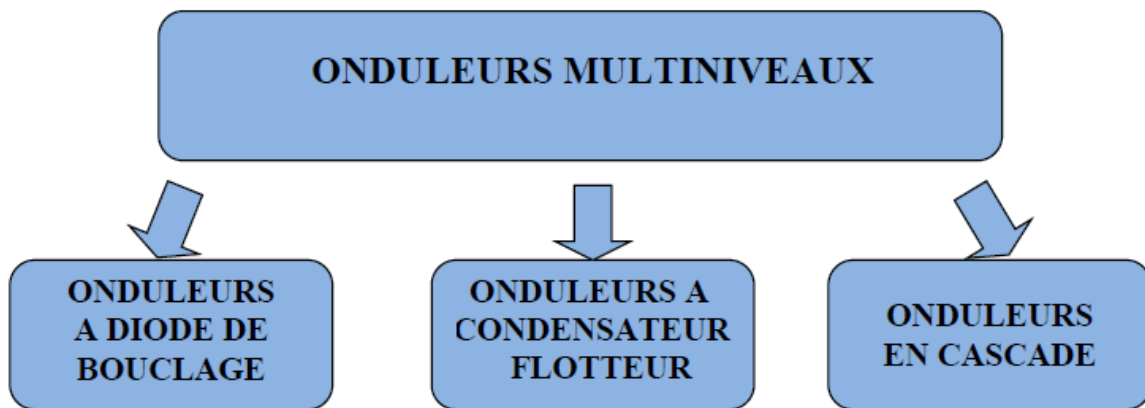


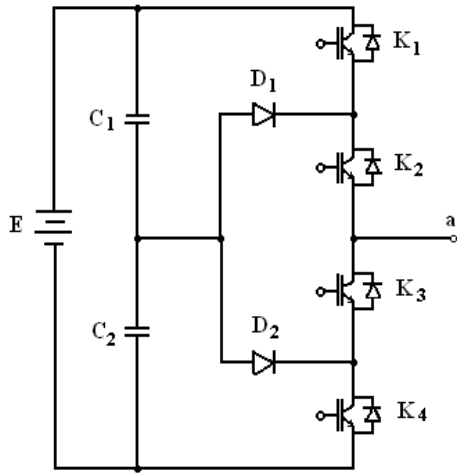
Figure I.19 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette partie est de donner une vue générale des quatre topologies de base des onduleurs multi-niveaux[19] :

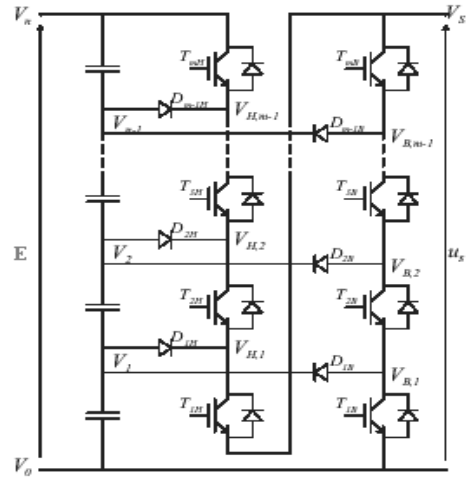
- la topologie à diode de bouclage (NPC),
- la topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- la topologie en cascade,

➤ **Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC) :**

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle a été proposée, la première fois en 1980, par Nabae et Al[19]. L'onduleur NPC à trois niveaux est donné par la figure(I.19),figure(I.20)[19].



Figure(I.20): Onduleur NPC à trois niveaux



Figure(I.21): Onduleur NPC à n-niveaux

➤ **Onduleur de tension à cellules imbriquées :**

Dans un convertisseur à deux niveaux de tension, chaque phase est constituée d'une paire d'interrupteurs de puissance montée en parallèle aux bornes d'un condensateur. Ils sont souvent commandés de façon complémentaire, si bien que la tension de sortie de la branche est reliée soit à la borne positive, soit à la borne négative de ce condensateur.[19]

Dans la topologie multi-niveau proposée en 1992 par T. Meynard et H. Foch [20], elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multi level inverter » dans la littérature anglo-saxonne,

Plusieurs cellules « condensateur et paire d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la figure (I.21)[19].

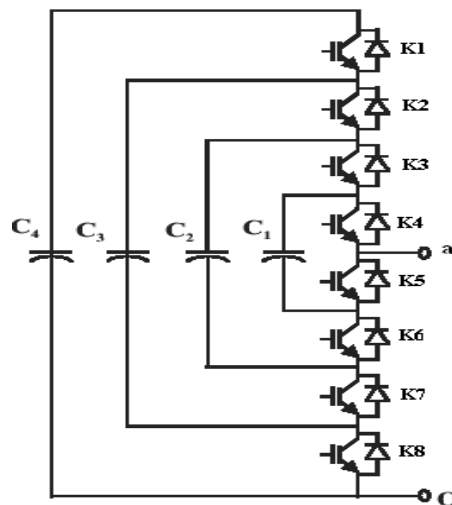


Figure (I.22) : Topologie multi-niveau à cellules imbriquées

➤ **Onduleur de tension en cascade :**

Une des premières applications des connexions en série des topologies des convertisseurs monophasés en pont était pour la stabilisation de plasma en 1988 [21]. Cette approche modulaire a été étendue pour inclure aussi les systèmes triphasés.

Sans conteste, les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction molaire.

L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système.

La figure (I.22) représente un onduleur monophasé en cascade à cinq niveaux.

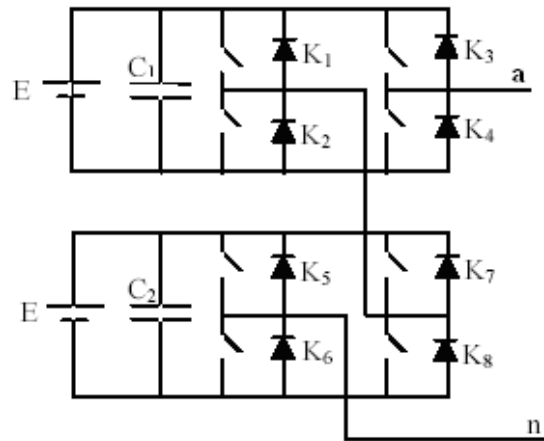


Figure (I.23) : Onduleur en cascade à 5 niveaux

**I.6.1. Les avantages et inconvénients des différents types des onduleurs**

Le tableau (I.6) résume les avantages et inconvénients de différents structures d'onduleurs utilisées pour les véhicules électrique.

Déférents les onduleurs	Avantages	Inconvénients
Onduleur de tension triphasé a deux niveaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins chère.</li> <li>• Mons léger.</li> <li>• Simple de modulation et sa commande</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les tensions de sortie produisent les harmoniques.</li> <li>• Créent des courants de palier dans les roulements du moteur et dégradent les isolants.</li> </ul>

Onduleurs à multi niveau	Onduleur de tension clampé par le neutre (NPC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.</li> <li>• Limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance.</li> <li>• L'amplitude des harmoniques est moins élevée qu'à deux niveaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin de diode de haute tension pour bloquer les tensions inverses</li> <li>• Augmentation des niveaux il nécessite d'augmentation nombre de diodes GTO et condensateurs donc plus lourds.</li> </ul>
	Onduleur de tension à cellules imbriquées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation de courant qui circule quand augmente nombre de niveaux.</li> <li>• Augmentation de niveaux il nécessite d'augmentation nombre des condensateurs et de GTO</li> </ul>
	Onduleur de tension en cascade (pont H)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilite la maintenance.</li> <li>• Facilite d'augmenter le nombre de niveaux dans le système</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complications de chaque niveau demande une source.</li> </ul>

Le tableau (I.6) des avantages et inconvénients des onduleurs[12]

### I.6.2. Choix d'onduleur

Pour notre application, nous pouvons alimenter le moteur par deux onduleur de tension triphasé à deux niveaux d'après cette synthèse. Le contrôle des courants s'effectue au moyen de régulateurs assurent le suivi d'une référence à fréquence et amplitude variables.

## **I.7. Conclusions**

Dans ce chapitre on a présenté les chaînes de tractions des véhicules électrique. Après avoir présenté un bref historique et un aperçu du VE et V hybride, leurs différentes architectures et les avantages et les inconvénients, nous avons aussi cité les différents éléments de la chaîne de traction d'VE et les différentes machines électriques pouvant être utilisées dans la traction du VE avec les avantages et les inconvénients de chaque machine

Après une étude générale, nous adoptons une chaîne de traction constituée par un onduleur à deux niveaux, un moteur asynchrone à double étoile et une traction mono-moteur avec réducteur. Nous avons choisi cette chaîne en prenant en considération le poids le cout et rendement globale du système global.

Le chapitre suivant est consacré à la modélisation et la simulation des différents éléments qui constitue cette chaîne de traction.

# CHAPITRE II

*Modélisation de la Machine Asynchrone*

*Double Etoile*

## II.1. Introduction

Par l'observation et l'analyse des différentes évolutions des grandeurs d'un système, le modéliser est une étape primordiale en vue de le contrôler ou de le maîtriser. La modélisation des machines électriques fait appel à des équations en général très complexes. En effet, La machine asynchrone à double étoile n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, tel que la répartition des enroulements, la saturation, l'effet de peau, etc. Mais quel que soit la complexité de la géométrie de ces machines, il est indispensable de développer un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel. Cependant, certaines hypothèses simplificatrices permettent de contourner cette difficulté.

Après la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques classiques, dites encore théorie généralisée ; cette dernière est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) [18].

Pour vérifier le modèle de la MASDE, on simule, sous l'environnement MATLAB / Simulink, dans un premier temps le fonctionnement de la MASDE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées. On passe ensuite à alimentation de cette dernière par deux onduleurs de tension à commande MLI.

Dans les deux cas, l'étude sera menée avec un décalage angulaire  $\alpha = 30^\circ$ .

Enfin, Nous présentons la simulation et les interprétations des résultats.

## II.2. Modélisation de la MASDE

### II.2.1. Description de la machine asynchrone double étoile (rappels)

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique  $\alpha$  (dans cette modélisation on prend  $\alpha = 30^\circ$ ) et un rotor soit bobinée soit à cage d'écureuil. Pour simplifier l'étude, nous considérons les

circuits électriques du rotor comme équivalant à un enroulement triphasé en court-circuit. La (Figure. II.1) donne la position des axes d'enroulement des neuf phases constituant la machine. Six phases pour le stator et trois phases pour le rotor [22].

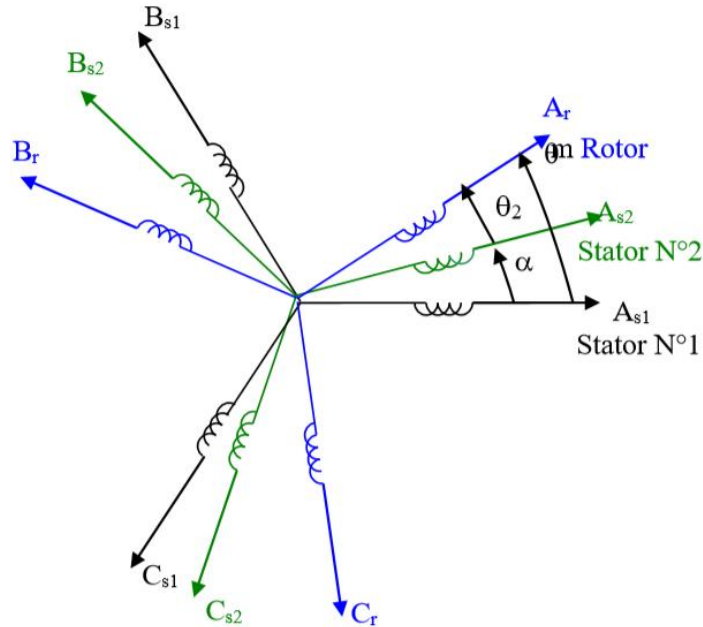


Figure.II.1. Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoile  
Avec :

$A_{s1}, B_{s1}, C_{s1}, A_{s2}, B_{s2}, C_{s2}, A_r, B_r, C_r$  : Indices correspondants respectivement aux deux systèmes de phases statoriques 1, 2 et de phase rotorique.

$\alpha$  : angle de décalage entre les deux étoiles.

$\theta_m$  : la position du rotor par rapport à l'étoile 1.

$\theta_2$  : la position du rotor par rapport à l'étoile 2.

### II.2.2.Hypothèses simplificatrices

La MASDE avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices suivants [2]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable
- Force magnétomotrice est à répartition spatiale sinusoïdale
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire)
- L'inductance de fuite mutuelle commune aux deux circuits (étoile 1 et 2) est négligeable.

## II.2.3. Modèle triphasé de la MASDE

### II.2.3.1. Equations électrique

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase, les équations de tension des six phases pour le stator et trois phases pour le rotor, s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et "r" pour le rotor

Les équations de la tension s'écrivent comme suit :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} V_{as1} = R_{s1}I_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dx} \\ V_{bs1} = R_{s1}I_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dx} \\ V_{cs1} = R_{s1}I_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dx} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} V_{as2} = R_{s2}I_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dx} \\ V_{bs2} = R_{s2}I_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dx} \\ V_{cs2} = R_{s2}I_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dx} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dx} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dx} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dx} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

La forme matricielle s'écrivent comme suit :

Pour l'étoile 1 :

$$[V_{s1}] = [R_{s1}][i_{s1}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s1}] \quad (\text{II.4})$$

Pour l'étoile 2 :

$$[V_{s2}] = [R_{s2}][i_{s2}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s2}] \quad (\text{II.5})$$

Pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (\text{II.6})$$

On pose :

$$R_{sa1} = R_{sb1} = R_{sc1} = R_{s1}$$

$$R_{sa2} = R_{sb2} = R_{sc2} = R_{s2}$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r$$

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix}, [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$R_{s1}$  : Résistance d'une phase de l'étoile 1

$R_{s2}$  : Résistance d'une phase de l'étoile 2

$R_r$  : Résistance d'une phase de rotor

$$[V_{s1}] = \begin{bmatrix} V_{sa1} \\ V_{sb1} \\ V_{sc1} \end{bmatrix}, [V_{s2}] = \begin{bmatrix} V_{sa2} \\ V_{sb2} \\ V_{sc2} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$[V_{s1}]$  : Vecteur de tension de l'étoile 1

$[V_{s2}]$  : Vecteur de tension de l'étoile 2

$[V_r]$  : Vecteur de tension de rotor

$$[i_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{sa1} \\ i_{sb1} \\ i_{sc1} \end{bmatrix}, [i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{sa2} \\ i_{sb2} \\ i_{sc2} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$[i_{s1}]$  : Vecteur de courant de l'étoile 1

$[i_{s2}]$  : Vecteur de courant de l'étoile 2

$[i_r]$  : Vecteur de courant de rotor

$$[\phi_{s1}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa1} \\ \phi_{sb1} \\ \phi_{sc1} \end{bmatrix}, [\phi_{s2}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa2} \\ \phi_{sb2} \\ \phi_{sc2} \end{bmatrix}, [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$[\phi_{s1}]$  : Vecteur de flux de l'étoile 1

$[\phi_{s2}]$  : Vecteur de flux de l'étoile 2

$[\phi_r]$  : Vecteur de flux de rotor

### II.2.3.2. Equations magnétique

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotorique en fonction des courants sous forme matricielle sont données par [2]:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.7}) \\
 [L_{s1,s1}] &= \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \\
 [L_{s1,s2}] &= \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix} \\
 [L_{s2,s2}] &= \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \\
 [L_{s1,r}] &= \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \\
 [L_{r,r}] &= \begin{bmatrix} (L_r + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{ms}) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$[L_{s2,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t \quad [L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t \quad [L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$$

$$L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3} L_m$$

$[L_{s1,s1}]$  : Matrice inductance de l'étoile 1.

$[L_{s2,s2}]$  : Matrice inductance de l'étoile 2.

$[L_{r,r}]$  : Matrice inductance de rotor.

$[L_{s1,s2}]$  : Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et l'étoile 2.

$[L_{s1,r}]$  : Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et le rotor.

$[L_{s2,s1}]$  : Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et l'étoile 1.

$[L_{s2,r}]$  : Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor.

$[L_{r,s1}]$  : Matrice inductance mutuelle entre le rotor et l'étoile 1.

$[L_{r,s2}]$  : Matrice inductance mutuelle entre le rotor et l'étoile 2.

$L_{s1}$ ,  $L_{s2}$ ,  $L_r$  : Valeurs maximales des coefficients d'inductances propres de l'étoile 1, l'étoile 2 et le rotor.

$L_{ms}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles statoriques.

$L_{mr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles rotoriques.

$L_{sr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre une étoile et le rotor.

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor.

### II.2.3.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial W}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.8})$$

$$W_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\phi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\phi_{s2}] + [I_r]^t [\phi_r]) \quad (\text{II.9})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left( [I_{s1}]^t \frac{d[L_{s1,r}]}{d\theta_r} [I_r]^t + [I_{s2}]^t \frac{d[L_{s2,r}]}{d\theta_r} [I_r]^t \right) \quad (\text{II.10})$$

### II.2.3.4. Equations mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine asynchrone double étoile est donnée par :

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + k_f \Omega \quad (\text{II.11})$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega = \frac{\omega_r}{p} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

$$(\text{II.13})$$

$j$ : Inertie totale des parties tournante et  $K_f$ : coefficient de frottement.

### II.2.4. Modèle biphasé de la MASDE

Les systèmes d'équations présentées précédemment sont à coefficients variables car la matrice des inductances mutuelles contient des termes qui sont en fonction de  $\theta$  donc en fonction du temps. Ce qui rend sa résolution complexe et difficile. Pour remédier à ce problème, on fait appel à la transformation de Park pour avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants.

#### II.2.4.1. Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer un système triphasé (abc) en un système diphasé équivalent (dq0).. La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (dq)[2].

La matrice de transformation de Park pour l'étoile 1 est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

La matrice de transformation de Park pour l'étoile 2 est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

La matrice de transformation de Park pour le rotor est définie comme suit :

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

### II.2.4.2. Choix du référentiel

Les équations de la MASDE peuvent être exprimées dans différents référentiels selon la vitesse attribuée au repère (d,q).

#### II.2.4.2.1. Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator ( $\omega_s = 0$ ). Dans ce cas, la phase  $A_{s1}$  et d coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel.

L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif[18].

### II.2.4.2. Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_r$  donc ( $\omega_s = \omega_r$ ).

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [18].

### II.2.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créée par les deux étoiles du stator ( $\omega_s = \omega_s$ ). Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue [18].

### II.2.4.3. Modèle biphasé de la MASDE lié au champ tournant

La figure II.2 représente le modèle de la MASDE selon le système d'axes (d, q) tournant.

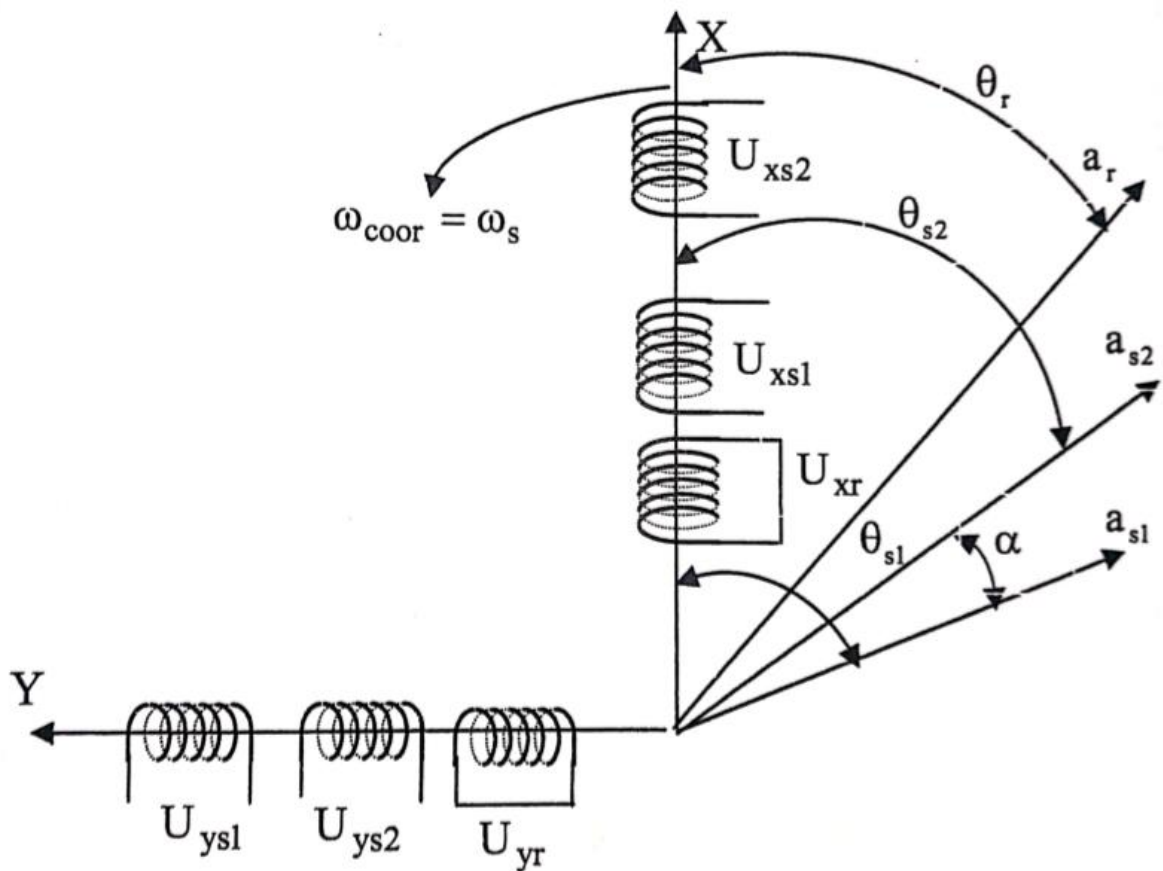


Figure II.2 : modèle diphasé de la MASDE dans le repère de Park

### • Equations des tensions

Par l'application de la transformation de Park aux systèmes d'équations des tensions a,b et c on obtient[2] :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1}I_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - \omega_s\varphi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1}I_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs1} + \omega_s\varphi_{ds1} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} V_{ds2} = R_{s2}I_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2}I_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs2} + \omega_s\varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} + (\omega_s - \omega_r)\varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$\omega_{s1,2}$  : Pulsation électrique des grandeurs statoriques 1,2.

$\omega_r$  : Pulsation électrique des grandeurs rotoriques.

### • Equations du flux

Par l'application de la transformation de Park sur le système d'équation de flux a,b et c on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}I_{ds1} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}I_{qs1} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \varphi_{ds2} = L_{s2}I_{ds2} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}I_{qs2} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m(I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m(I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

### • Equations mécanique

L'hors du changement de repère, il faut trouver l'expression du couple électromagnétique dans le nouveau repère.

Pour calculer l'expression du couple instantanée, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée. La puissance instantanée absorbée par la MASDE est donnée par l'expression suivante :

$$P_{abs} = V_{as1}I_{as1} + V_{bs1}I_{bs1} + V_{cs1}I_{cs1} + V_{as2}I_{as2} + V_{bs2}I_{bs2} + V_{cs2}I_{cs2} \quad (\text{II.21})$$

Comme la transformation de Park utilisée permet de conserver la puissance, on peut écrire

:

$$P_{abs} = V_{ds1}I_{ds1} + V_{qs1}I_{qs1} + V_{ds2}I_{ds2} + V_{qs2}I_{qs2} \quad (\text{II.22})$$

On remplace les tensions d'axes (d, q) dans le système d'équation de tension (II.22) par leurs expressions (II.17),(II.18),(II.19), on trouve l'expression de la puissance absorbée instantanée suivante :

$$\begin{aligned} P_{abs} = & [R_{s1}I_{ds1}^2 + R_{s1}I_{qs1}^2 + R_{s2}I_{ds2}^2 + R_{s2}I_{qs2}^2] + \\ & [\omega_s(\varphi_{ds1}I_{qs1} - \varphi_{qs1}I_{ds1} + \varphi_{ds2}I_{qs2} - \varphi_{qs2}I_{ds2})] + \\ & \left[ \frac{d\varphi_{ds1}}{dt}I_{ds1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt}I_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt}I_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt}I_{qs2} \right] \quad (\text{II.23}) \end{aligned}$$

La puissance instantanée développée se compose de trois termes :

- Le premier terme est identifiable aux pertes joules statoriques.
- Le second terme correspond à la puissance électromagnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

La puissance et le couple électromagnétique peuvent s'écrire sous la forme universelle :

$$P_{em} = \Omega C_{em} \quad (\text{II.24})$$

On a dans l'expression de la puissance absorbée le deuxième terme qui représente la puissance électromagnétique.

$$P_{em} = \omega_s(\varphi_{ds1}I_{qs1} - \varphi_{qs1}I_{ds1} + \varphi_{ds2}I_{qs2} - \varphi_{qs2}I_{ds2}) \quad (\text{II.25})$$

D'après l'équation de la puissance électromagnétique il est clair que le couple électromagnétique est de la forme suivante :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds1}I_{qs1} - \varphi_{qs1}I_{ds1} + \varphi_{ds2}I_{qs2} - \varphi_{qs2}I_{ds2}) \quad (\text{II.26})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantanée en utilisant les expressions des flux statoriques et en remplaçant le système d'équation de flux (II.20) dans l'expression du couple électromagnétique, on obtient :

$$C_{em} = pL_m((I_{qs1} + I_{qs2})I_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2})I_{qr}) \quad (\text{II.27})$$

Enfin l'équation mécanique de la machine peut s'écrire comme suite :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (\text{II.28})$$

## II.3. Simulation et interprétation des résultats

### II.3.1. Simulation de la MASDE

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle de la MASDE sous l'environnement MATLAB / Simulink. Les paramètres de la machine utilisée sont indiqués dans l'annexe (A).

La figure II.3 suivante présente le schéma block de la simulation de la MASDE dans le repère dq.

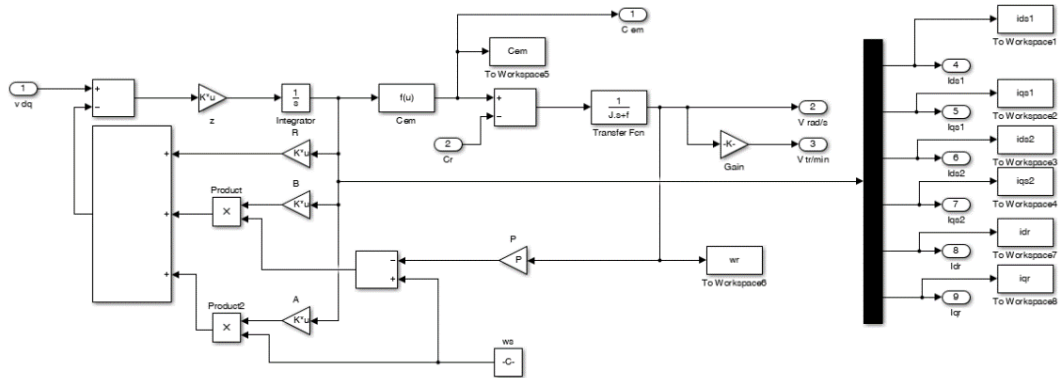


Figure II.3 Schéma bloc de la MASDE dans le repère dq

La figure II.4 suivante présente le schéma block de la simulation de la transformation de Park.

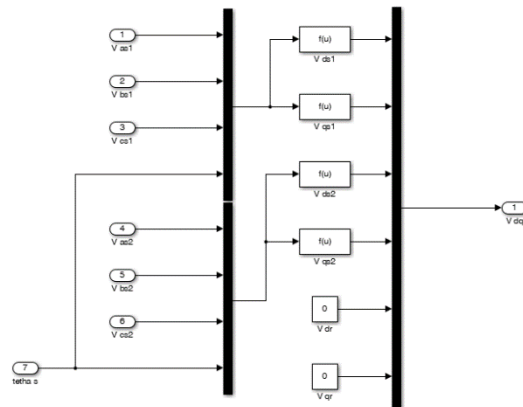


Figure II.4 Schéma bloc de la transformation de Park

La figure II.5 suivante présente le schéma block de la simulation de l'association transformation de Park et la MASDE.

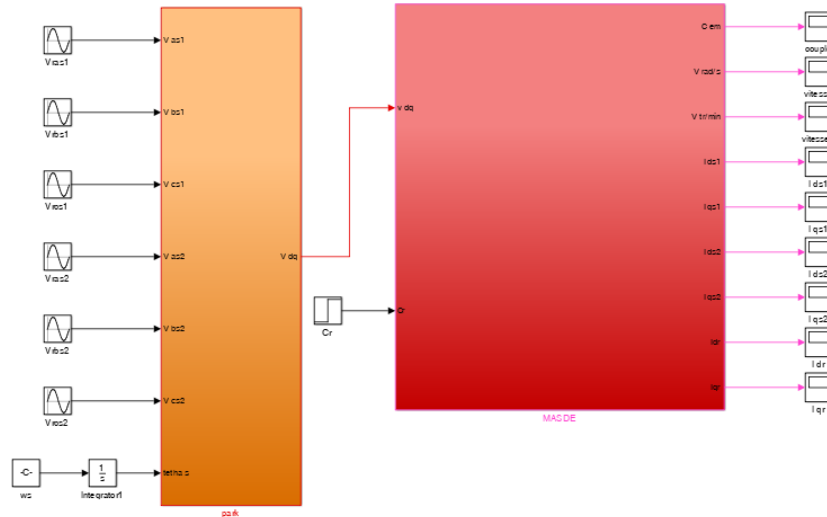


Figure II.5 Schéma bloc de l'association transformation de Park et la MASDE.

### II.3.2. Alimentation de la MASDE par deux sources de tension triphasées

La MASDE est alimentée par deux sources sinusoïdales et équilibrées.

Pour la première étoile :

$$\begin{cases} V_{as1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{bs1} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cs1} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Pour la deuxième étoile :

$$\begin{cases} V_{as1} = V_m \sin(\omega t - \alpha) \\ V_{bs1} = V_m \sin\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cs1} = V_m \sin\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ ,  $V_m = \sqrt{2}V_{eff}$

Pour le rotor les tensions rotoriques sont nulles (rotors à cage d'écureuil).

### II.3.3. Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension

La figure II.6 représente l'association de la MASDE avec deux onduleurs de tension triphasés à commande MLI, les tensions de référence sont sinusoïdales.

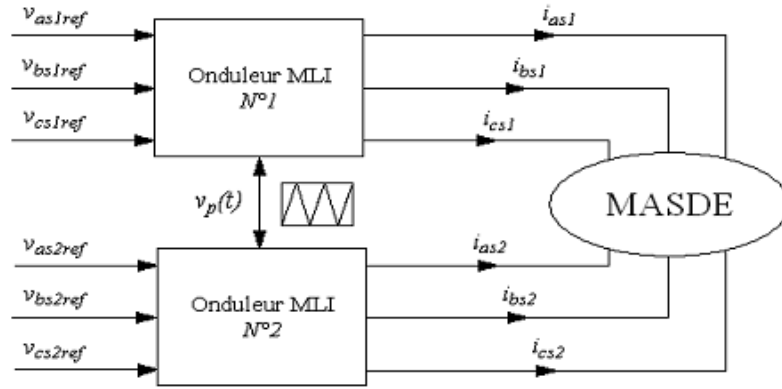


Figure II.6 Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension

### II.3.3.1. Modélisation de l'onduleur à commande MLI

Un onduleur autonome à commande M.L.I est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable [2].

Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposes parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélise par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante [1] :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } k_i \text{ conduit } \bar{k}_i \text{ bloqué} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } k_i \text{ conduit } \bar{k}_i \text{ bloqué} \end{cases}$$

Avec  $f_i + \bar{f}_i = 1$  et  $i = 1 \dots 3$

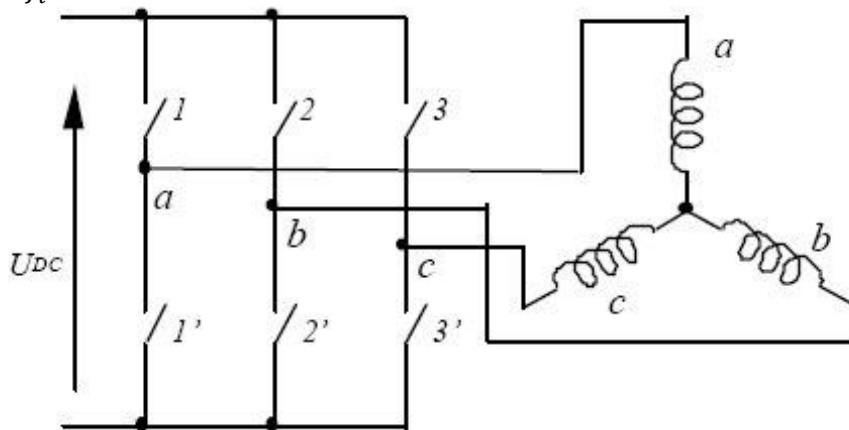


Figure.II.7 représente le schéma d'un onduleur triphasé [30]

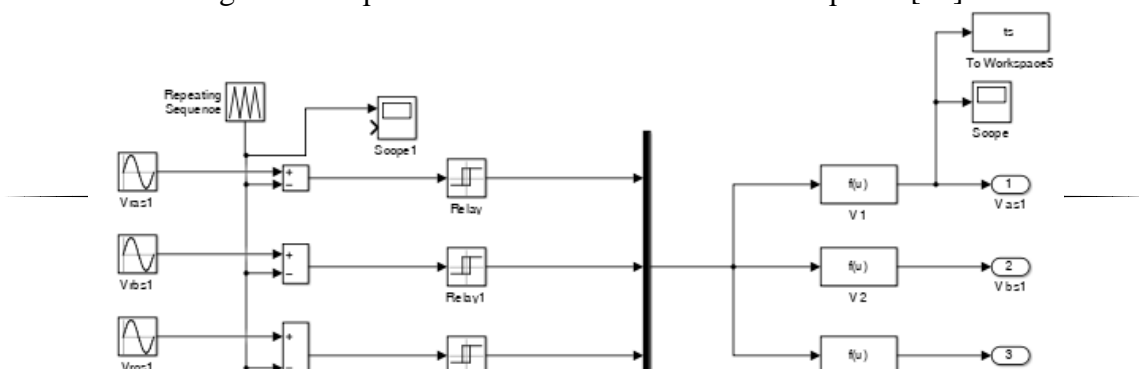


Figure II.8 : représente le schéma bloc des deux onduleurs triphasés

Les tensions composées sont

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{as1} - V_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{bc} = V_{bs1} - V_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{ca} = V_{cs1} - V_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Les tensions simples  $V_{as1}$ ,  $V_{bs1}$ ,  $V_{cs1}$  forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$V_{as1} + V_{bs1} + V_{cs1} = 0 \quad (\text{II.32})$$

La résolution d'équations (II.31) et (II.32) nous donne :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Pour le second onduleur, on obtient

$$\begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

### II.3.3.2. Stratégie de commande sinus-triangle

La M.L.I (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points

d'intersection entre la porteuse et la modulante [11]. Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure II.9.

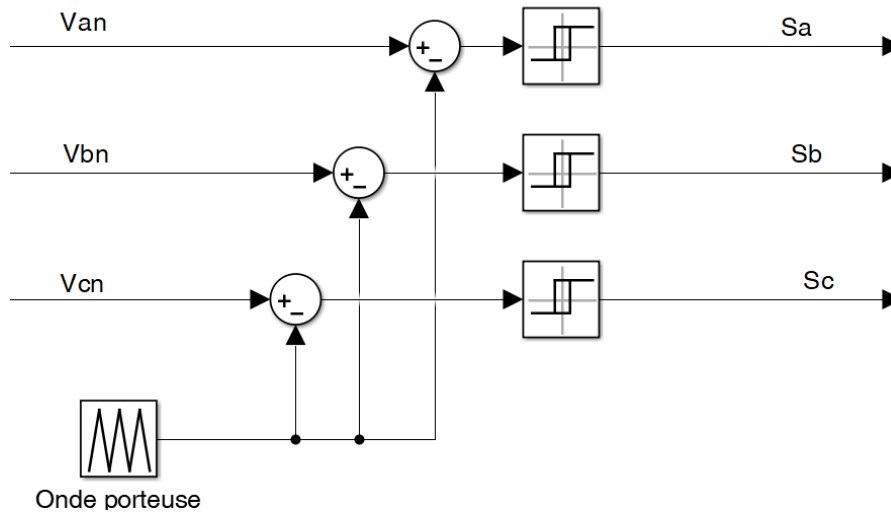


Figure II.9. Schéma de principe de MLI sinus-triangle

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence  $f$ .
- Le second appelé signal de la porteuse, détermine la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence  $f_p$  par rapport au signal de référence de fréquence  $f$  tel que :  $f_p \gg f$ .

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs (la figure II.10).

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad m > 1$$

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

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad 0 < r < 1$$

$r$  : 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.

L'équation de la porteuse est donnée par:

$$V_p = \begin{cases} V_{pm} \left[ 4 \left( \frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[ -4 \left( \frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$V_{pm}$  : l'amplitude max de la porteuse.

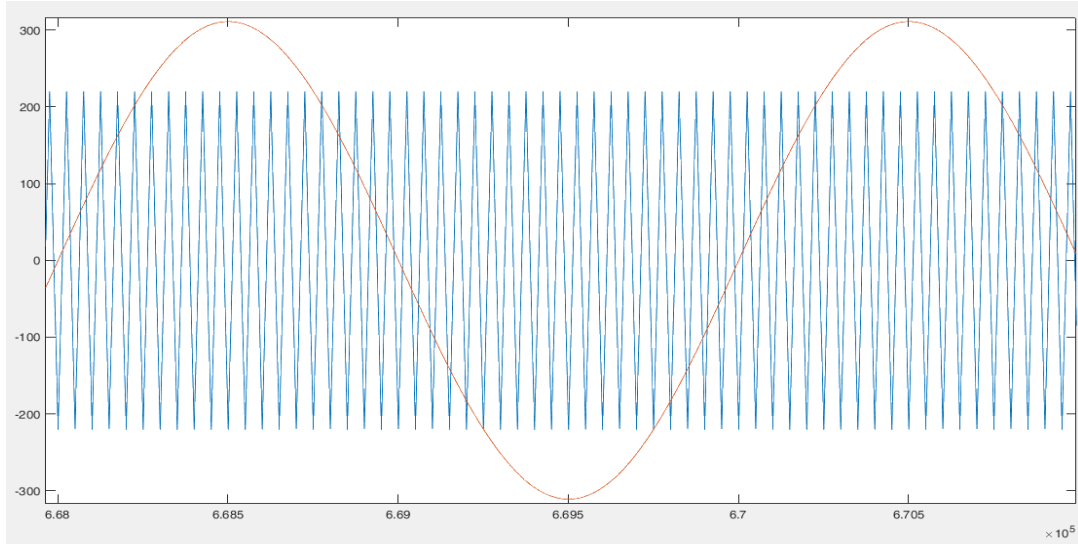


Figure II.10 : Principe de la commande MLI  $m = 80$  ,  $r = 0.9$

### II.3.4. Résultats de la simulation

Nous présentons la tension de la phase (a) la sortie de l'onduleur MLI, courbes d'évolution du couple électromagnétique, courbes d'évolution de la vitesse et les courbes de courant statorique de l'étoile 1 dans le repère abc.

Chaque courbe présenté l'évolution avec et sans l'onduleur avec un couple de charge  $Cr = 14 \text{ N.m}$  à  $t = 4 \text{ sec}$

Le courbe bleu : l'évolution avec l'onduleur.

Le courbe orange : l'évolution sans l'onduleur.

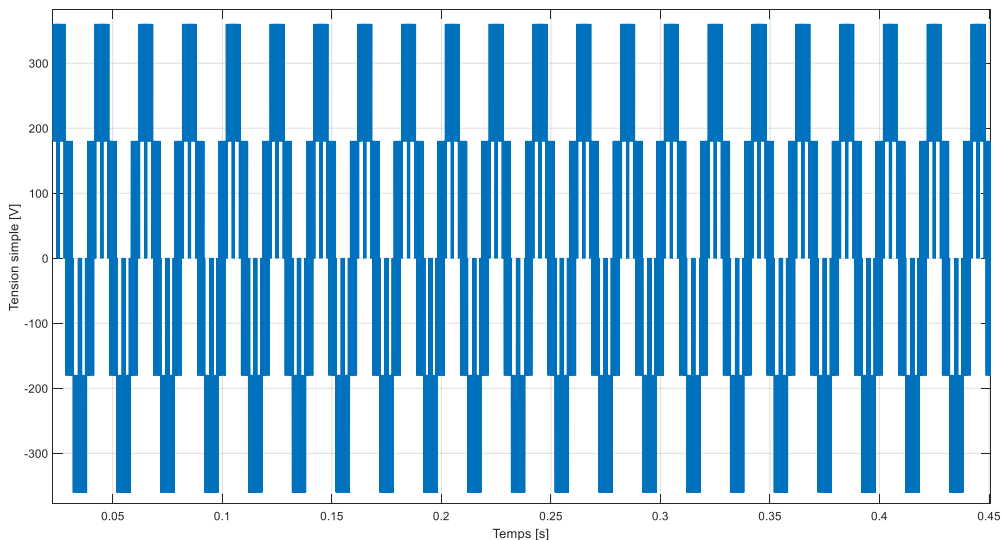


Figure II.11 : La tension de la phase (a) la sortie de l'onduleur MLI.

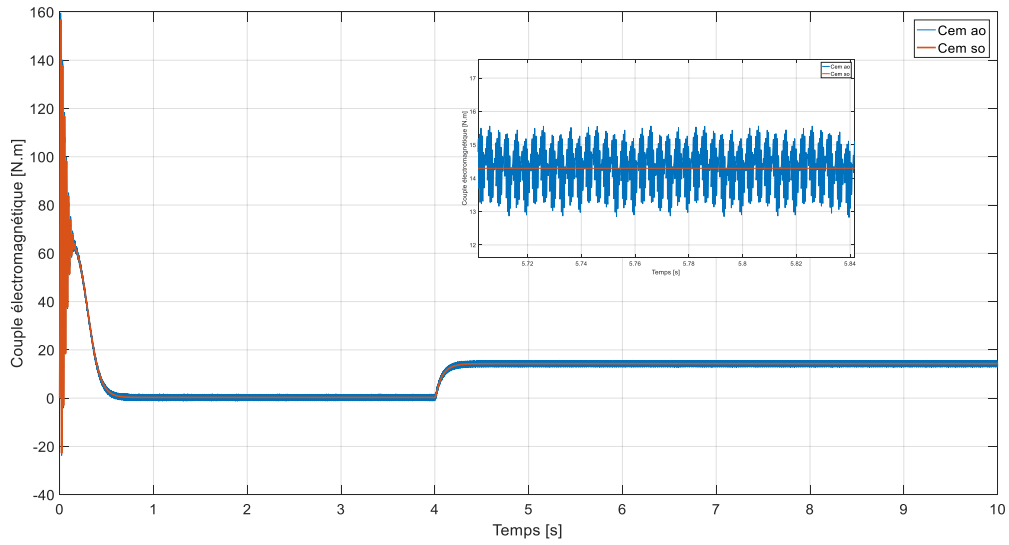


Figure II.12 : L'évolution du Couple électromagnétique

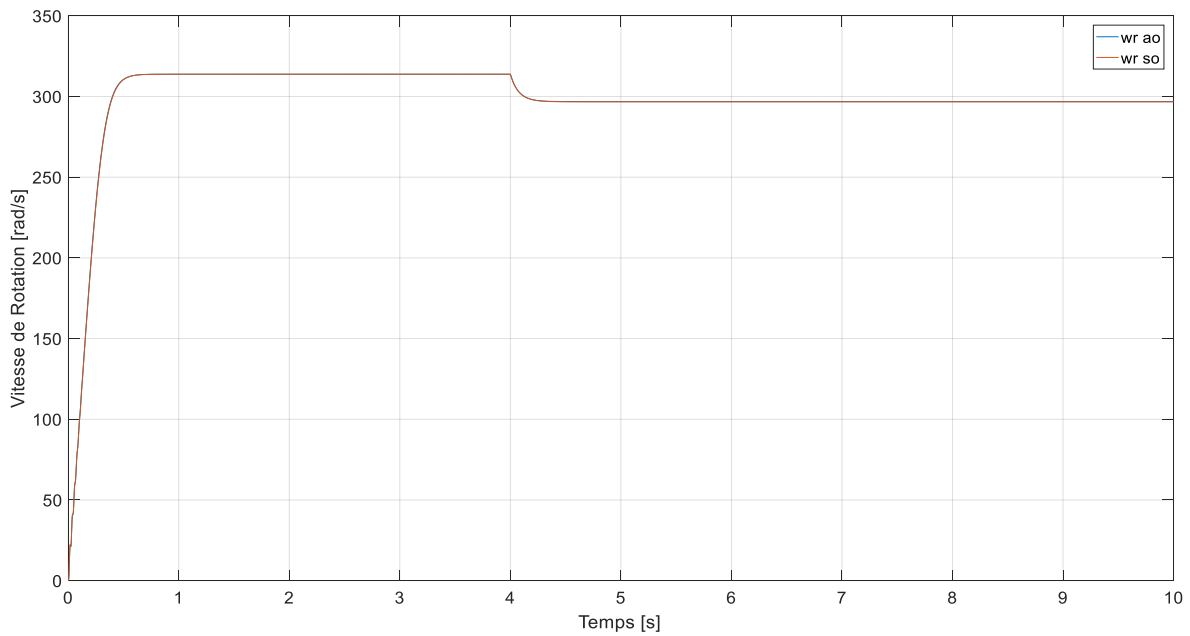
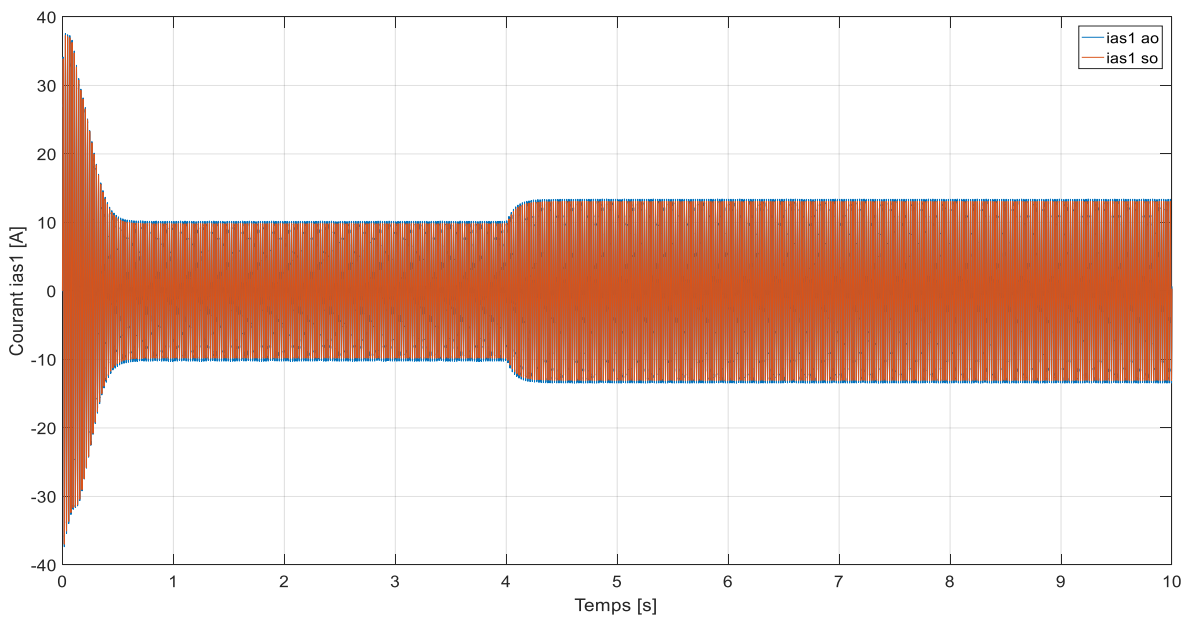


Figure II.13 : L'évolution de la vitesse

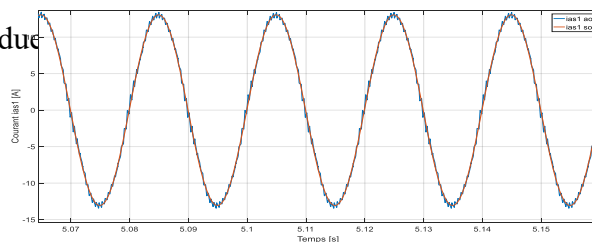
Figure II.14 : L'évolution du courant statorique 1 dans le repère abc

### II.3.5. Interprétation du résultat

- Les figures précédentes représentent les résultats de simulation de la MASDE alimentée par le réseau directement et par deux onduleurs de tension à commande MLI avec l'application d'une charge  $C_r = 14 \text{ N.m}$  à  $t = 4 \text{ s}$ .
- Les résultats montrent que les courbes sont similaires à celles obtenues par alimentation directe, Cependant, On constate qu'il y a une apparition nette d'ondulations surtout dans les allures du couple électromagnétique et des courants statoriques. Ces ondulations sont



principalement due



tension.

### II.4. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'établissement d'un modèle mathématique de la MASDE, basé sur la théorie unifiée des machines électriques tout en adoptant certaines hypothèses

simplificatrices, et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

Par la suite on a étudié les caractéristiques de la MASDE directement alimentée par des sources sinusoïdales, puis par des onduleurs de tensions à commande M.L.I à vide et en charge.

Cette étude montre que l'insertion de la charge dans les deux cas d'alimentations engendre une variation de la vitesse (diminution en fonctionnement moteur).

Afin de remédier à ce problème, nous proposons dans le chapitre suivant la technique de régulation par la commande vectorielle.

# CHAPITRE III

*Commande de la Machine Asynchrone*

*Double Etoile*

### III.1. Introduction

La difficulté du contrôle de la machine asynchrone a restreint pendant longtemps son utilisation dans le domaine de la vitesse variable. Cette difficulté réside essentiellement dans le couplage des grandeurs de contrôle à savoir le flux et le couple électromagnétique.

Depuis une vingtaine d'années, des contrôles spécifiques assurent un découplage de ces grandeurs de contrôles par l'utilisation de repères appropriés. Ces méthodes appelées vectorielles assurent des performances dynamiques équivalentes à celles obtenues par la machine à courant continu.[32].

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique sur la MASDE. On présente au premier lieu un rappel sur son principe et les différentes méthodes de la commande vectorielle, et enfin on commente les performances apportées par ce type de réglage après l'obtention et l'illustration des résultats de simulation.

### III.2. Principe de la commande vectorielle

La technique de la commande vectorielle repose sur le fait d'introduire une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage du couple similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Cette dernière présente une qualité intrinsèque, car elle permet un contrôle séparé du flux et du couple [33].

$$C_{em} = K\varphi_f i_a = K' i_f i_a \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$k, k'$  : constantes

$\varphi_f$  : Flux imposé par le courant d'excitation  $i_f$

$i_a$  : Courant d'induit

A flux constant, le couple peut être réglé par  $i_a$ . La production du couple et la création du flux sont indépendantes et c'est l'objectif d'un pilotage vectoriel [33].

Le principe de pilotage vectoriel de la MASDE est analogue à celui de la MCC à excitation séparée. La figure (III.1) représente le schéma du principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

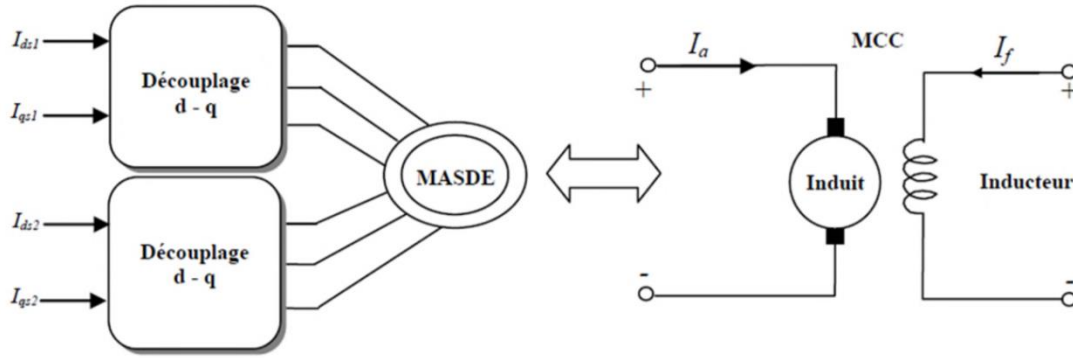


Figure III.1 : Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE [2]

### III.3. Méthode d'orientation du flux

La modélisation de la MASDE vue dans le deuxième chapitre est basée sur l'alimentation en tension et le repère choisi est lié au champ tournant « d,q », de ce fait les choix concernant l'alimentation et le repère ont été accomplis. Alors, l'étape suivante du raisonnement consiste à fixer l'orientation du flux. Pour cela, trois choix sont possibles [33] :

- Orientation du flux rotorique

$$\varphi_{dr} = \varphi_r, \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{III.2})$$

- Orientation du flux statorique

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{III.3})$$

- Orientation du flux d'entrefer

$$\varphi_{dg} = \varphi_g, \varphi_{qg} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Beaucoup de chercheurs utilisent l'orientation du flux rotorique pour la commande de la machine asynchrone [34]. Dans notre étude, nous avons opté pour la technique d'orientation du flux rotorique. Pour la machine asynchrone double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Dans l'expression du couple électromagnétique de la MASDE (Eq.II.26), si on coïncide le flux rotorique avec l'axe (d) du référentiel lié au champ tournant, c'est-à-dire  $\varphi_{dr} = \varphi_r, \varphi_{qr} = 0$  ; on aura :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{l_m + L_r} ((I_{qs1} + I_{qs2})\varphi_{dr} - (I_{ds1} + I_{ds2})\varphi_{qr}) \quad (\text{III.5})$$

L'équation (III.5) devient :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2}) \varphi_{dr} = k \varphi_r i_{qs} \quad (\text{III.6})$$

Avec  $k = \frac{L_m}{L_m + L_r}$ ,  $i_{qs} = i_{qs1} + i_{qs2}$

D'après l'équation (III.6) nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée. On déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone double étoile avec sa commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée.

### III.4. Technique de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherche effectués sur le sujet utilisent deux principales méthodes. La première appelée méthode directe a été initiée par F. Blaschke et la seconde connue sous le nom méthode indirecte a été introduite par K. Hasse [34].

#### III.4.1. Méthode directe

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quelle que soit le régime de fonctionnement, pour cela deux procédés sont utilisés [2]:

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase.
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes [35]:

- La non fiabilité de la mesure du flux
- Problème de filtrage du signal mesuré.
- Précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs + filtre).

### III.4.2. Méthode indirecte

Cette méthode n'utilise pas l'amplitude du flux de rotor mais seulement sa position, elle n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor [33].

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de la température, surtout la constante de temps rotorique [33].

### III.4.3. Choix de la méthode

Dans notre travail, nous avons choisi la méthode indirecte à raison de la simplicité d'application et l'abandonnement du capteur de flux rotorique.

### III.5. Régulation de la vitesse par la méthode indirecte

Le schéma globale de réglage de la vitesse de la MASDE et donné par la figure (III.2).

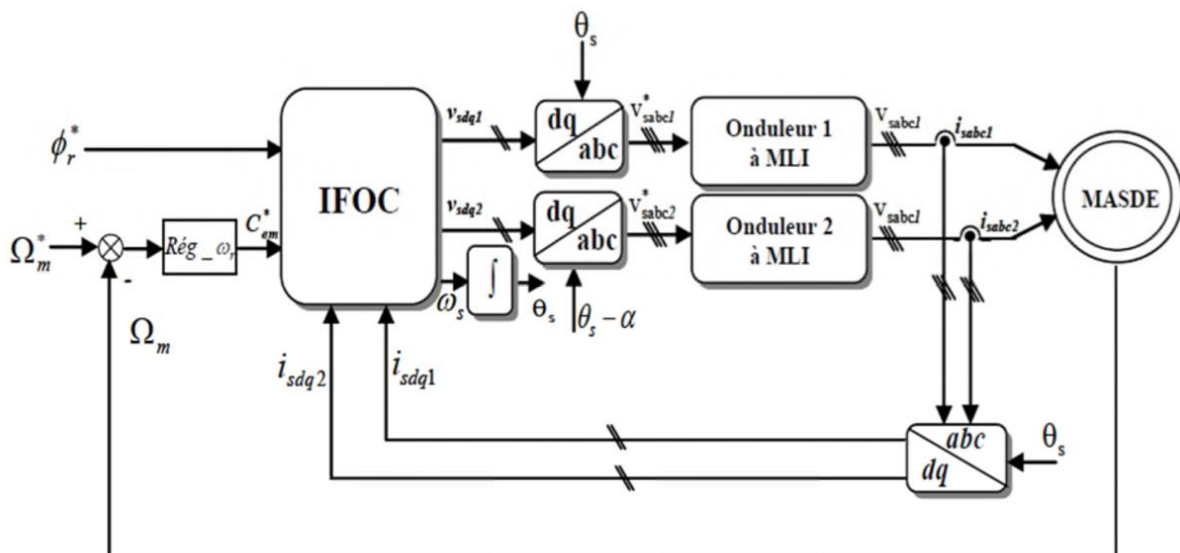


Figure III.2 : Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté de la MASDE.[2]

Cette commande se base sur les équations qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à double étoile avec orientation du flux.[2]

Le schéma bloc de cette méthode est donné par la figure (III.3), où le flux rotorique  $\phi_{r\ ref}$  et le couple électromagnétique  $C_{em\ ref}$  sont considérés comme des références de commande.



Figure III.3 : Bloc de commande à flux Orienté.

En considérant comme grandeurs de références le flux rotorique  $\varphi_r^*$  et le couple  $C_{em}^*$  et en exprimant que

$$\begin{aligned} \varphi_{dr} &= \varphi_r \\ \varphi_{qr} &= 0 \\ p\varphi_r^* &= 0 \end{aligned} \quad (III.7)$$

Avec  $p = \frac{d}{dt}$  operateur de Laplace

En remplaçant (III.7) dans les équations des tensions rotoriques (II.19), on obtient

$$R_r I_{dr} = 0 \Rightarrow I_{dr} = 0 \quad (III.8)$$

$$R_r I_{qr} + \omega_g \varphi_r^* = 0 \Rightarrow I_{qr} = -\frac{\omega_g \varphi_r^*}{R_r} \quad (III.9)$$

Avec  $\omega_g = \omega_s - \omega_r$

Et à partir de l'équation (II.19), on trouve :

$$I_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_r^* - L_m (I_{ds1} + I_{ds2})] \quad (III.10)$$

$$I_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2}) \quad (III.11)$$

En remplaçant (III.10), (III.11) dans le système d'équations des flux (II.20), on aura:

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 I_{ds1} + L_r \eta I_{ds2} + \eta \varphi_r^* \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 I_{qs1} + L_r \eta I_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 I_{ds2} + L_r \eta I_{ds1} + \eta \varphi_r^* \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 I_{qs2} + L_r \eta I_{qs1} \end{cases} \quad (III.12)$$

Avec  $\eta = \frac{L_m}{L_m + L_r}$ ,  $\lambda_{1,2} = L_{s1,2} + \eta L_r$

En substituant (III.8) dans (III.10), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m (I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (III.13)$$

A partir de l'équation (III.11), on trouve :

$$L_m (I_{qs1} + I_{qs2}) = -(L_m + L_r) I_{qr} \quad (III.14)$$

En remplaçant (III.12) et (III.3) et (III.14) dans le système d'équations des tensions statoriques (II.17) et (III.18) on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds1}^* = R_s I_{ds1} + L_{s1} p I_{ds1} - \omega_s (L_{s1} I_{qs1} + \tau_r \varphi_r^* \omega_g) \\ V_{qs1}^* = R_s I_{qs1} + L_{s1} p I_{qs1} + \omega_s (L_{s1} I_{qs1} + \tau_r \varphi_r^*) \\ V_{ds2}^* = R_s I_{ds2} + L_{s2} p I_{ds2} - \omega_s (L_{s2} I_{qs2} + \tau_r \varphi_r^* \omega_g) \\ V_{qs2}^* = R_s I_{qs2} + L_{s2} p I_{qs2} + \omega_s (L_{s2} I_{qs2} + \tau_r \varphi_r^*) \end{cases} \quad (III.15)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \text{ et } \omega_g = \omega_s - \omega_r$$

L'expression du couple électromagnétique donné par :

$$C_{em}^* = P \frac{L_m}{(L_m + L_r)} [(I_{qs1} + I_{qs2}) \varphi_r^*] \quad (III.16)$$

En introduisant l'équation (III.11) dans (III.9), on tire:

$$\omega_g^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r)} \frac{(I_{qs1} + I_{qs2})}{\varphi_r^*} \quad (III.17)$$

A partir de la relation (III.16), on trouve :

$$(I_{qs1} + I_{qs2}) = \frac{(L_m + L_r) C_{em}^*}{P L_m \varphi_r^*} \quad (III.18)$$

Dans le système d'équations (III.15), on prend les premières parties linéaires (III.19) et on ajoute les boucles de régulation des courants statoriques pour faire un découplage parfait.

$$\begin{cases} V_{ds1r} = R_s I_{ds1} + L_{s1} \frac{dI_{ds1}}{dt} \\ V_{qs1r} = R_s I_{qs1} + L_{s1} \frac{dI_{qs1}}{dt} \\ V_{ds2r} = R_s I_{ds2} + L_{s2} \frac{dI_{ds2}}{dt} \\ V_{qs2r} = R_s I_{qs2} + L_{s2} \frac{dI_{qs2}}{dt} \end{cases} \quad (III.19)$$

Le système (III.19) montre que les tensions statoriques ( $V_{ds1r}, V_{qs1r}, V_{ds2r}, V_{qs2r}$ ) sont directement reliées aux courants statoriques ( $I_{ds1r}, I_{qs1r}, I_{ds2r}, I_{qs2r}$ ). Pour compenser l'erreur introduite lors du découplage, les tensions statoriques de références ( $V_{ds1}^*, V_{qs1}^*, V_{ds2}^*, V_{qs2}^*$ ) à flux constant sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds1}^* = V_{ds1r} + V_{ds1c} \\ V_{qs1}^* = V_{qs1r} + V_{qs1c} \\ V_{ds2}^* = V_{ds2r} + V_{ds2c} \\ V_{qs2}^* = V_{qs2r} + V_{qs2c} \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{ds1c} = -\omega_s(L_{s1}I_{qs1} + \tau_r\phi_r^*\omega_g) \\ V_{qs1c} = \omega_s(L_{s1}I_{ds1} + \tau_r\phi_r^*) \\ V_{ds2c} = -\omega_s(L_{s2}I_{qs2} + \tau_r\phi_r^*\omega_g) \\ V_{qs2c} = \omega_s(L_{s2}I_{ds2} + \tau_r\phi_r^*) \end{cases} \quad (III.21)$$

Les deux enroulements statoriques sont identiques, donc les puissances fournies pas les deux systèmes d'enroulements sont égales d'où :

$$\begin{cases} I_{ds1}^* = I_{ds2}^* = \frac{\phi_r^*}{2L_m} \\ I_{qs1}^* = I_{qs2}^* = -\frac{L_m+L_r}{2PL_m} C_{em}^* \end{cases} \quad (III.22)$$

A partir des équations (III.17), (III.19), (III.20), (III.21), (III.22), on obtient le schéma bloc de découplage en tension IFOC (figure III.4).

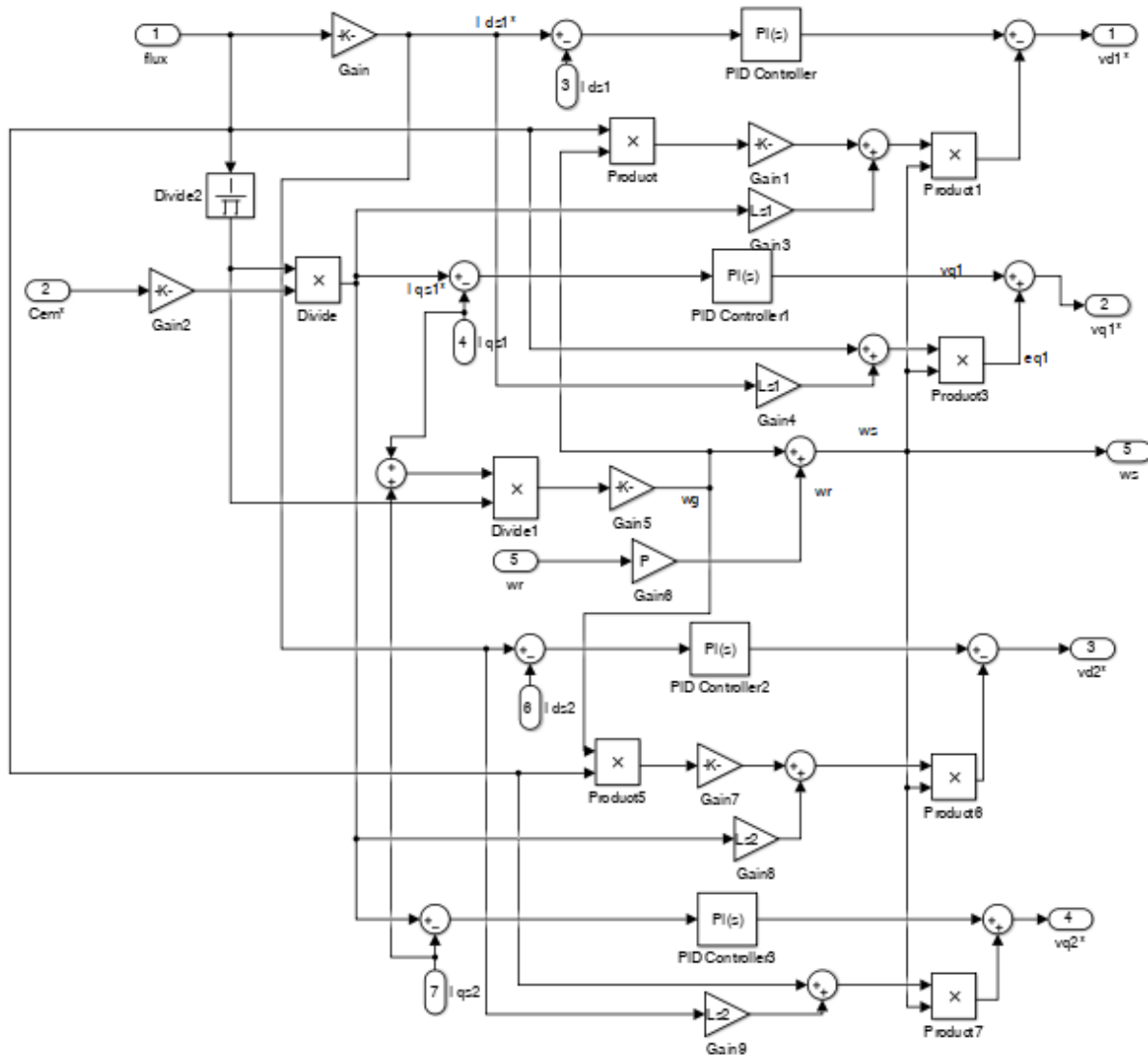


Figure III.4 : Représentation schématique du bloc de découplage IFOC.

Les régulateurs des courants et de la vitesse (figure III.4) utilisés sont des régulateurs classiques de type PI dont la synthèse est la suivante :

### III.5.1. Synthèse des régulateurs PI :

Le but d'utilisation des régulateurs est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des Perturbations internes ou externes.

#### III.5.1.1. Régulateurs de courant :

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, telle que, [33]

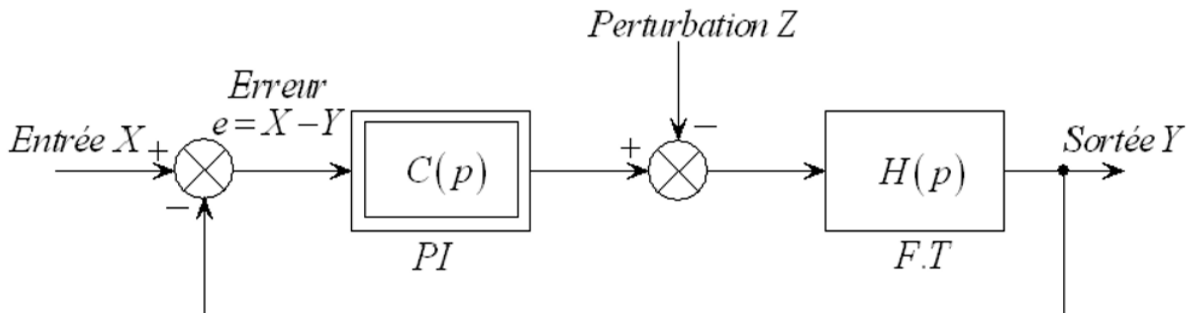
$$H(p) = \frac{1}{ap+b} \quad (\text{III.23})$$

Se fait d'une manière générale comme suit

La fonction de transfert du PI est :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III.24})$$

Le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre a retour unitaire régulé par un PI est donné par la figure III.5



La figure III.5 : Schéma de régulation des courants.

La perturbation est généralement négligée dans les étapes d'identification des paramètres des régulateurs.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est:

$$T(p) = C(p)H(p) = \frac{K_p p + K_i}{ap^2 + bp} \quad (\text{III.25})$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(p) = \frac{T(p)}{1+T(p)} = \frac{K_p p + K_i}{ap^2 + (b+K_p)p + K_i} \quad (\text{III.26})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{\tau p + 1} \quad (\text{III.27})$$

Il suffit d'identifier (III.26) à (III.27) comme suit :

$$\frac{K_p p + K_i}{ap^2 + (b + K_p)p + K_i} = \frac{1}{\tau p + 1} \quad (\text{III.28})$$

Ce qui donne

$$K_p \tau p^2 + (K_i \tau + K_p)p + K_i = ap^2 + (b + K_p)p + K_i \quad (\text{III.29})$$

D'où

$$\begin{cases} k_p = a/\tau \\ k_i = b/\tau \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

La figure III.6 représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques (étoiles 1 et 2)

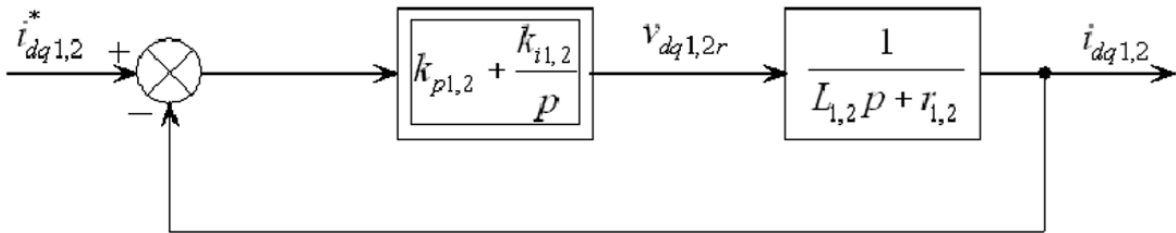


Figure III.6 : Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

Avec :

$$\begin{cases} k_{p1} = L_{s1}/\tau \\ k_{i1} = R_s/\tau \end{cases}, \quad \begin{cases} k_{p2} = L_{s2}/\tau \\ k_{i2} = R_s/\tau \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

On prend  $\tau = \tau_r/6$  pour avoir une dynamique du processus rapide, avec  $\tau_r = L_r/R_r$  est constante de temps électrique (rotorique) du système.

### III.5.1.2. Régulateurs de vitesse :

Le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure III.7

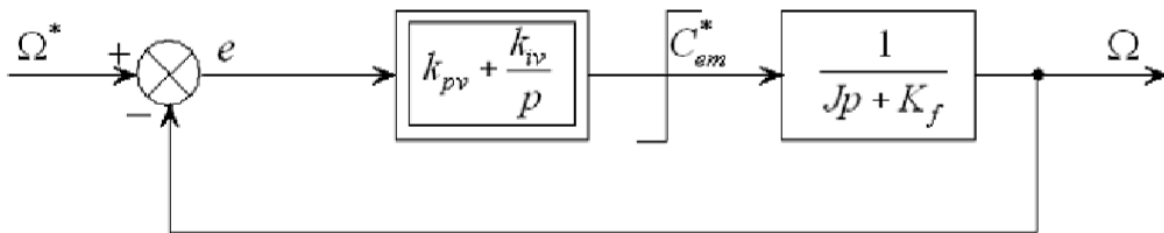


Figure III.7 : Boucle de régulation de vitesse.

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} k_{pv} = J/\tau \\ k_{iv} = f/\tau \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

La commande doit être limitée par un dispositif de saturation définie par :

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* & si |C_{em}^*| \leq C_{em}^{max} \\ C_{em}^{max} \text{ sing}(C_{em}^*) & si |C_{em}^*| \geq C_{em}^{max} \end{cases} \quad (III.33)$$

Le couple maximal adopté est  $C_{em}^{max} = 30 \text{ N.m}$ .

### III.6. Simulation et interprétation des résultats

#### III.6.1. Simulation

Les performances de la commande indirecte de la MASDE ont été visualisées pour le teste de robuste suivant :

Réponse à un échelon de vitesse de (200 rad/s) puis une inversion de vitesse (-200 rad/s) à partir de l'instant  $t = 5\text{s}$ , avec l'application des charges  $C_r = 14$  et  $-14\text{N.m}$  respectivement entre les intervalles de temps  $t = [2.5, 3.5]$  s et  $[7.5, 8.5]$  s.

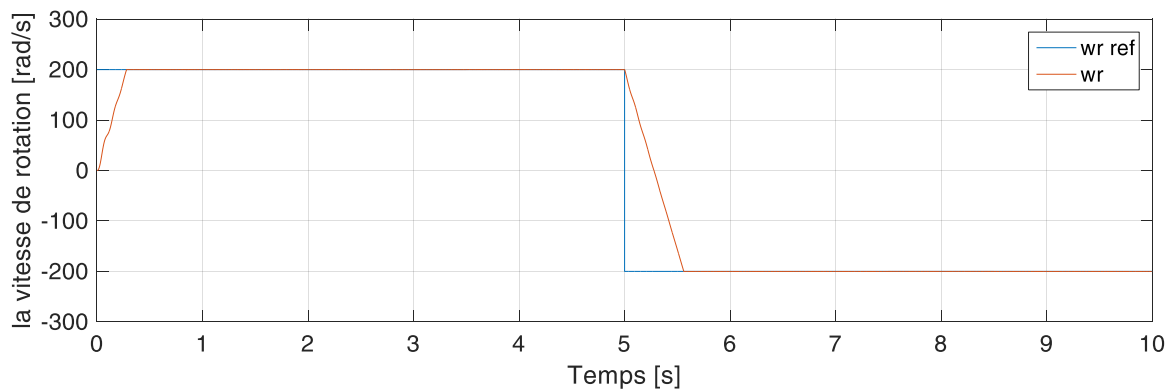


Figure III.8 : vitesse de rotation

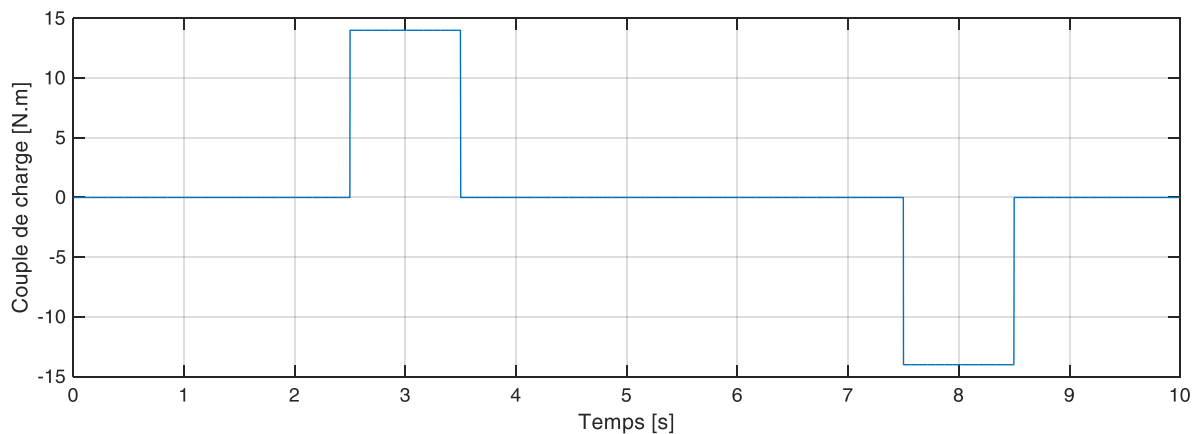


Figure III.9 : Couple de charge

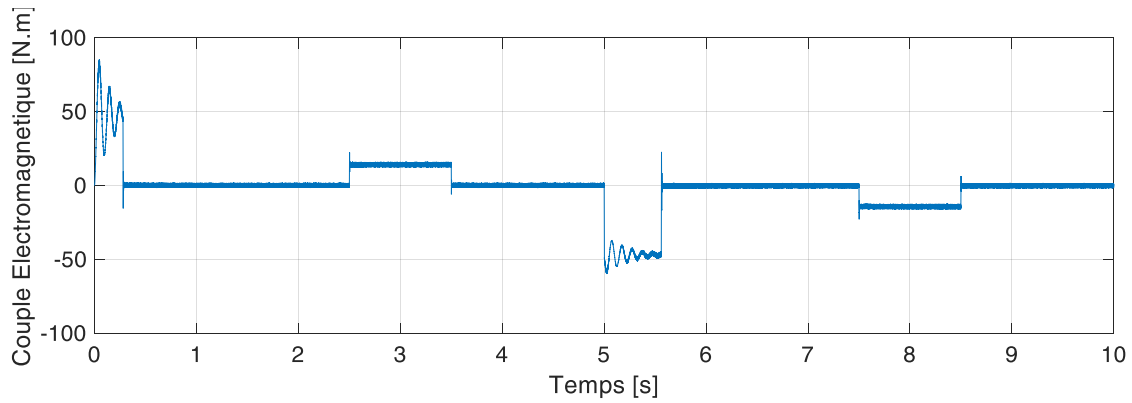


Figure III.10 : Couple Electromagnétique

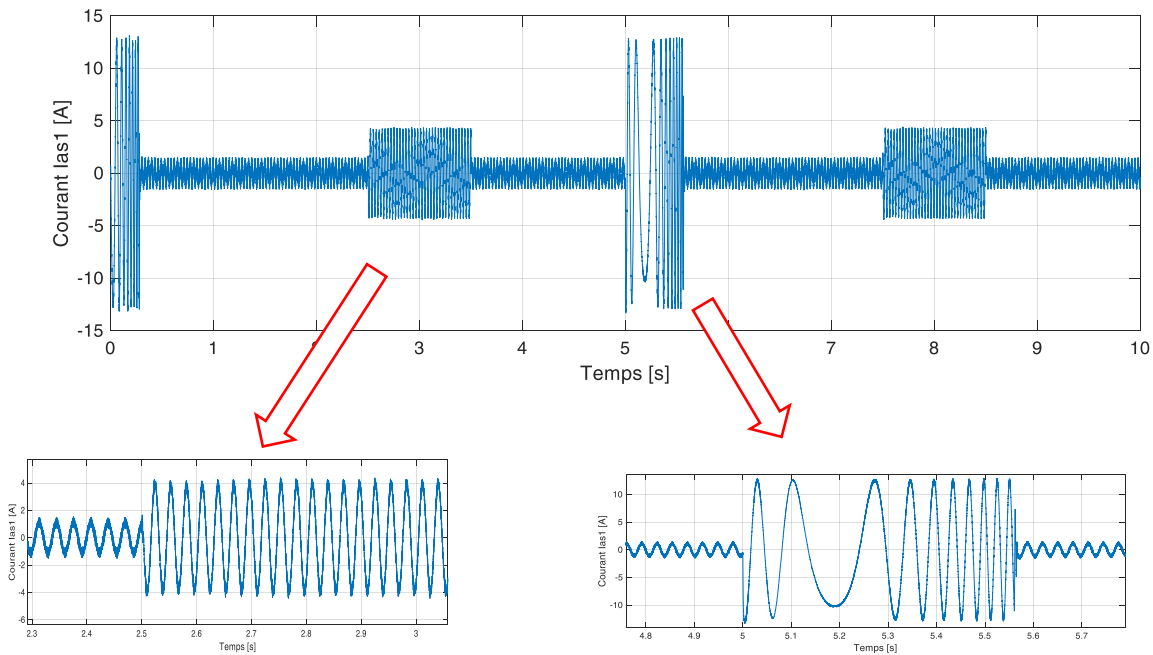


Figure III.11 : Courant  $I_{as1}$

### III.6.2. Interprétation du résultat

La figure III.8 : La vitesse suit parfaitement sa consigne et atteint sa valeur de référence au bout de  $t=0.3s$ , L'application de la charge fait une perturbation négligeable n'est pas visible dans la courbe de la vitesse.

La figure III.10 : Le couple électromagnétique dans le régime transitoire présente une valeur crête au démarrage, puis oscille autour de zéro lorsque la vitesse atteint sa valeur de référence. Après l'application de la charge le couple compense le couple de la charge. Pendant l'inversion de la vitesse le couple atteint une valeur moyenne ( $-46.5 N.m$ ), puis il se stabilise à sa valeur de référence nulle et il compense le couple après l'application de couple de charge ( $C_r=-14N.m$ ).

La figure III.11 : Un appel de courant statoriques ( $I_{as1}$ ) d'environ deux fois le courant nominal, et puis durant le régime permanent ils évoluent d'une façon sinusoïdale, lorsque on a applique un couple ( $C_r=14Nm$ ) à  $t=2.5s$  le courant augment et atteint sa valeur nominale rapidement, a l'instant de l'inversion de la vitesse dans la présence de la charge une augmentation au niveau du courant d'une grandeur identique à celle observée durant le régime transitoire initiale.

### III.7. Application à un véhicule électrique

#### III.7.1. Simulation

Dans cette partie on présentons le profil de vitesse appliqué qui consiste en trois phase (phase d'accélération, phase à vitesse constante et phase de freinage).

La figure III.12 présenter le profil de vitesse et le couple de charge qui on a appliqué.

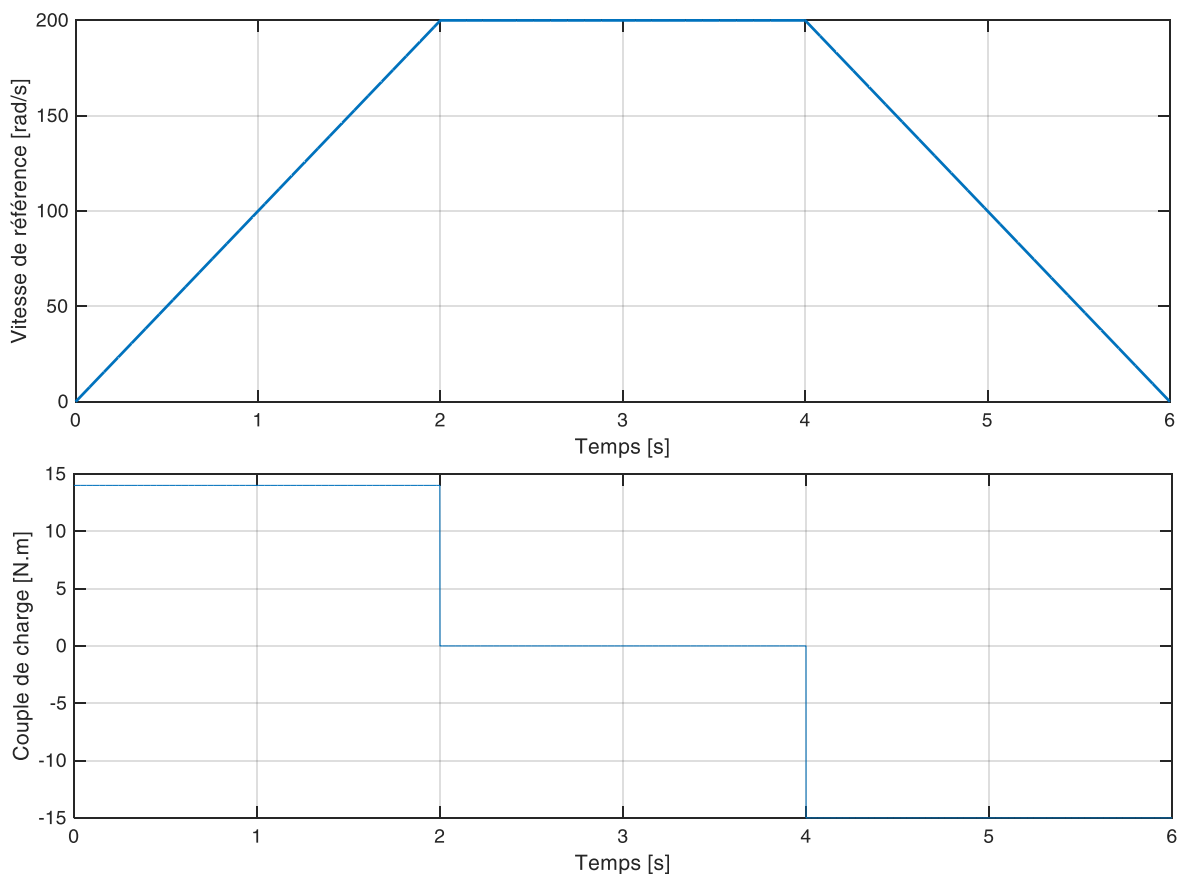


Figure III.12 : courbe de la vitesse de référence et le couple de charge

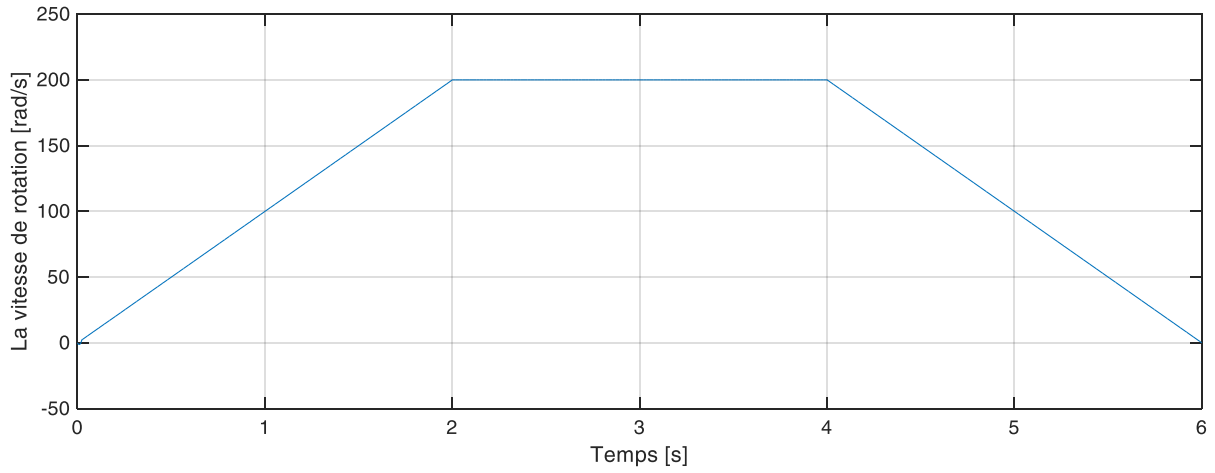


Figure III.13 : La vitesse de rotation

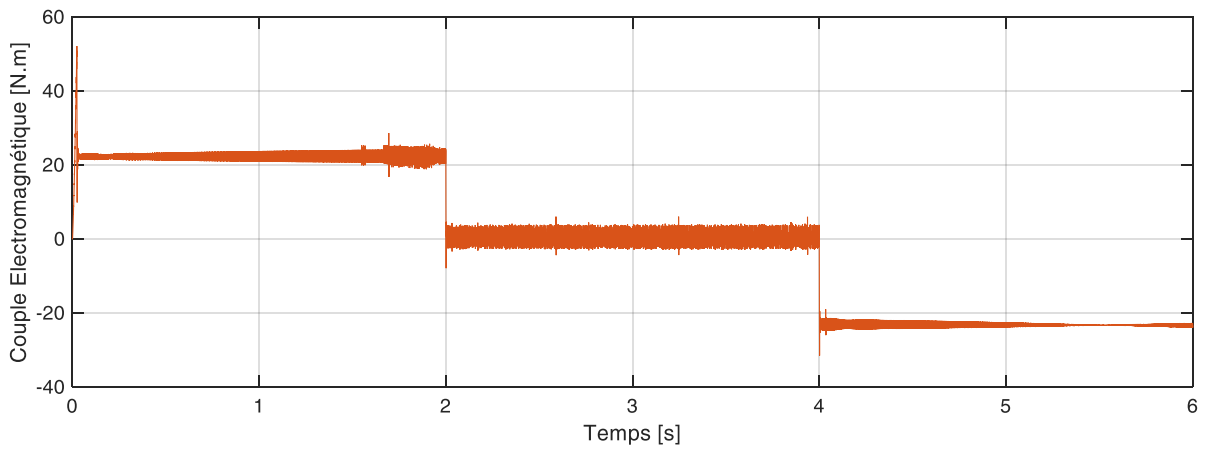


Figure III.14 : Couple électromagnétique

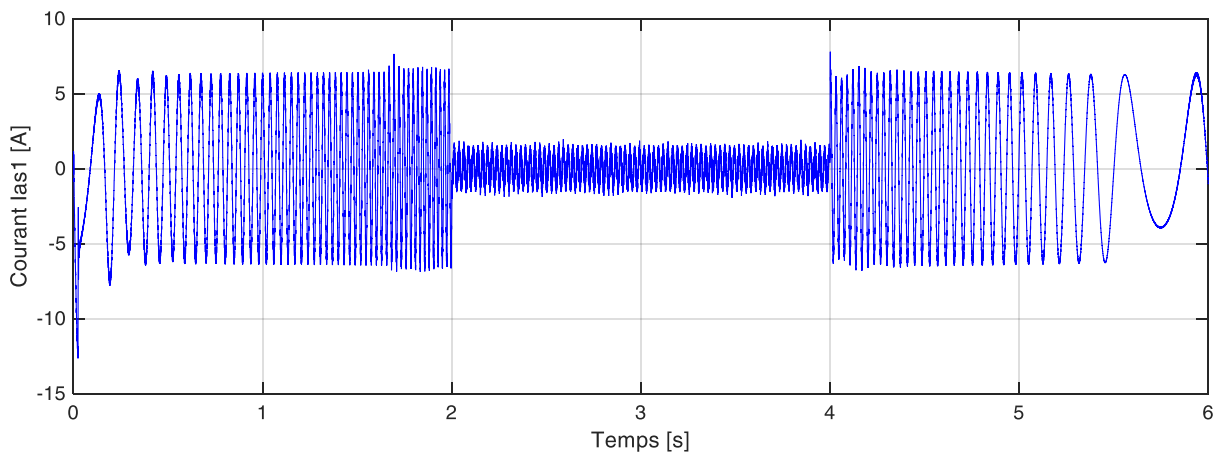


Figure III.15 : Courant Ias1

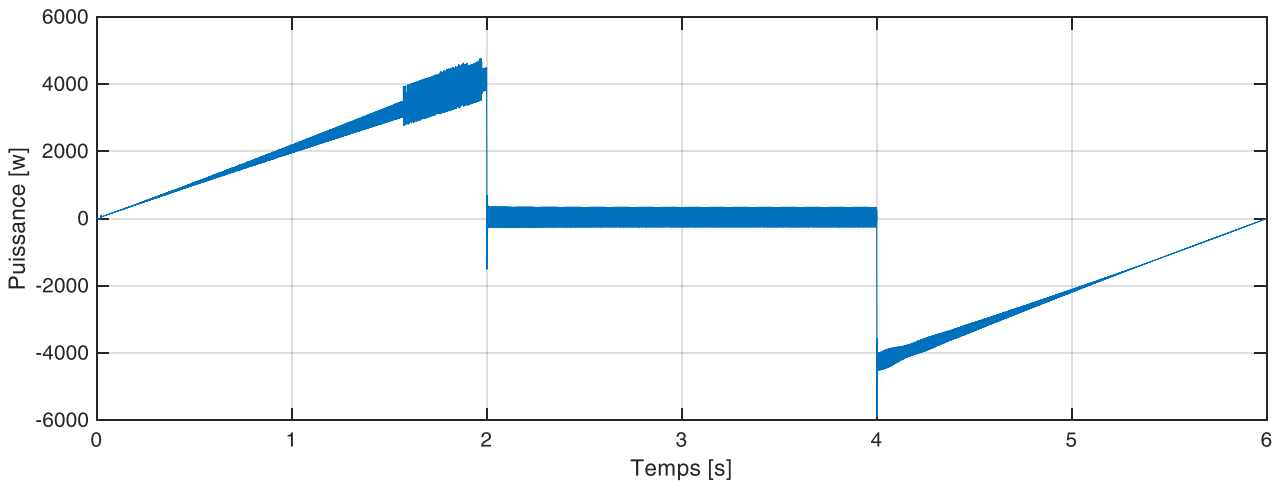


Figure III.16 : La Puissance

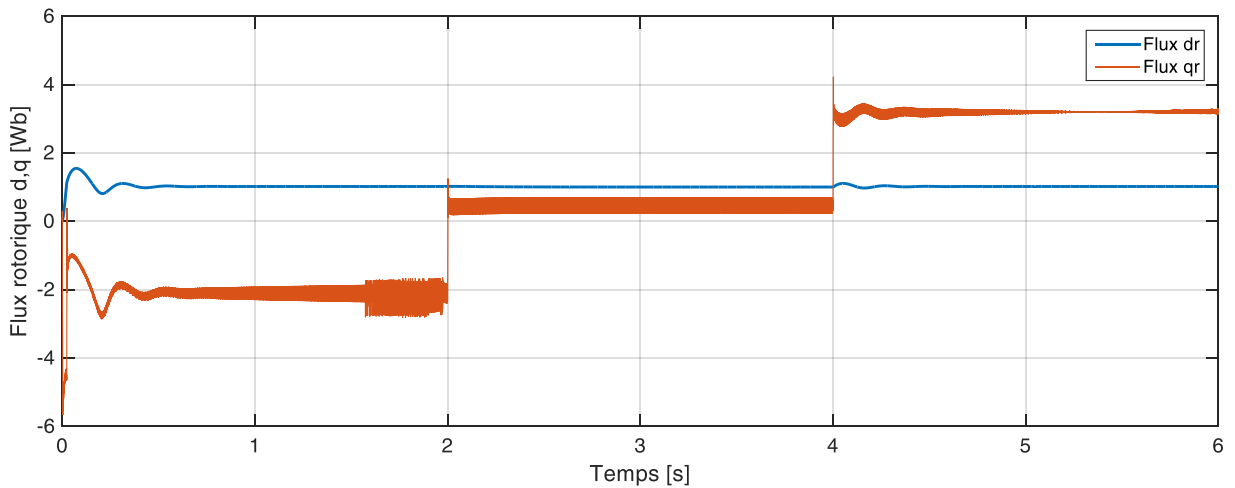


Figure III.17 : Flux rotorique d,q

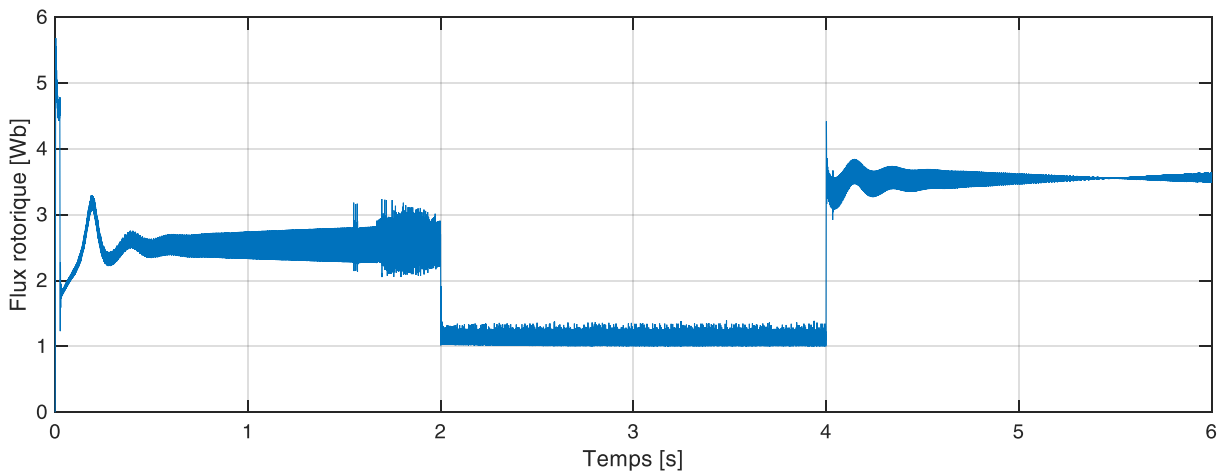


Figure III.18 : Flux rotorique totale

### III.7.2. Interprétation des résultats

Figure III.12 : de  $t = 0s$  à  $t = 2s$  la vitesse croissante alors c'est la phase d'accélération, le couple de charge  $C_r = 14 \text{ N.m}$ .

De  $t = 2s$  à  $t = 4s$  la vitesse stable alors c'est la phase à vitesse constante, le couple de charge  $C_r = 0 \text{ N.m}$ .

De  $t = 4s$  à  $t = 6s$  la vitesse décroissante alors c'est la phase de freinage, le couple de charge  $C_r = -15 \text{ N.m}$ .

Figure III.13 : Toujours la vitesse de rotation Suivre la vitesse de référence.

Figure III.14 : Le couple électromagnétique prend 3 valeurs 21 0 -21 correspondant à couple de charge.

Figure III.15 : Les courants de phase stator ont une forme sinusoïdale et la même amplitude de 6 A lorsque le couple de charge égal 14 et -15 par contre à vide amplitude égale 4A.

Figure III.16 : D'après les résultats (Figure III.13, III.14) et l'équation de la puissance ( $P = C \Omega$ ), on peut déduire la puissance demandée par le véhicule comme montré à la Figure III.16.

De  $t = 0s$  à  $t = 2s$  la vitesse croissante la machine fonction en mode moteur donc la puissance est positive.

De  $t = 2s$  à  $t = 4s$  la vitesse stable donc Ne consommez pas d'énergie et la puissance prend la valeur 0.

De  $t = 4s$  à  $t = 6s$  c'est la phase de freinage la machine fonction comme génératrice donc la puissance est négative.

Figure III.17 : Le flux  $d_r$  marque un pic au démarrage puis il se stabilise à la valeur de 1 Wb (flux de référence) à  $t = 4 \text{ sec}$  il y a une perturbation à cause de changement de fonctionnement de la machine. Le flux  $q_r$  dans la phase d'accélération, marque des oscillations ou tour de valeur -2 puis il augmente et oscille ou tour de valeur 0 dans la phase à vitesse constante, dans phase de freinage le flux  $q_r$  oscille ou tour de valeur 3.5 wb.

Figure III.18 : le flux total est la racine carrée de deux valeurs  $d_r$  et  $q_r$

### **III.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la commande vectorielle à base des régulateur PI appliquée à la machine asynchrone double étoile. Cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ce qui rend la machine asynchrone double étoile similaire à machine courant continu à excitation séparé.

Les résultats de simulation nous montrent que les réponses avec la commande vectorielle permettent d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes.

En fin, on a appliqué un profil de vitesse qui représente les différentes phases de vitesse dans une utilisation réel

**CONCLUSION**

**GENERAL**

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail consiste à présenter une étude sur une chaîne de traction d'un véhicule électrique équipée d'un moteur asynchrone double étoile alimentée par deux onduleurs à deux niveaux. Le pilotage de la machine asynchrone double étoile (MASDE) est assuré par la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté.

Dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur véhicule électrique, les éléments de la chaîne de traction, la classification des moteurs et l'électronique de puissance ou on a opté pour le choix des éléments de la chaîne de traction à savoir MASDE, onduleurs à deux niveaux et le réducteur.

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation de la modélisation et la simulation de la machine asynchrone double étoile, l'onduleur à deux niveaux ainsi que leur association. D'après l'étude comparative entre la machine alimenté par le réseau triphasé et la machine ou par deux onduleur à deux niveaux, on a constaté que l'utilisation de l'onduleur nous permet de varier la vitesse du moteur en variant la fréquence mais en injectant des harmoniques de tension et de courant.

Dans le troisième chapitre, on a abordé l'application de commande vectorielle par orientation du flux rotorique et présenter une application de cette commande pour commander la vitesse de la machine asynchrone double étoile. Par la suite, nous avons présenté les résultats de simulation de l'application d'un profil de vitesse qui représente les différentes phases de vitesse dans une utilisation réel.

Les résultats de simulation nous montrent que les réponses avec la commande vectorielle permettent d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes.

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. CHELGHOU, R. HADDAD .2019. « Véhicule électrique à base d'un moteur synchrone à aimants permanents double étoile ». Université A.MIRA-BEJAIA. Département de Génie Electrique.
- [2] O. IDER, F. YAHIA. 2017. « Etude et commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile » Université A.Mira de Bejaia. Département de Génie Electrique.
- [3] K. SLAOUTI, N. MAKHLOUFI. 2012. « Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile alimentée par Convertisseurs Matriciels Indirects ». Université A.Mira de Bejaia. Département de Génie Electrique.
- [4] K. HOUACINE. 2016. « COMMANDE NEURO-FLOUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE DANS UNE CHAINE DE PROPULSION D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE » UNIVERSITÉ MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU, DÉPARTEMENT D'AUTOMATIQUE.
- [5] A. BOUCHA « Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué » Université d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [6] N. BOUCHETATA. 2017. « Intitulé Contribution à la commande d'un véhicule électrique à quatre roues motrices » Université d'Oran Mohamed Boudiaf, Département d'Electrotechnique.
- [7] A. FLORESCU, 2006. « Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique » UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, Spécialité de Génie Électrique.
- [8] G. SOUFFRAN. 2012. « Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission » UNIVERSITÉ DE NANTES, ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE MATHÉMATIQUES.
- [9] V. MEŞTER. 2007. « Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique » Ecole Centrale de Lille, Spécialité de Génie Electrique.
- [10] Bernard Multon, Laurent Hirsinger. 2012. Problème de lamotorisation d'un véhicule électrique, 2<sup>ème</sup> partie. revue 3EI, 1996, pp.55-64. <hal-00673999>.
- [11] I. MARIF, H. ABDAT. 2019. « La commande en vitesse d'un véhicule électrique » Université de Tlemcen, Département de Génie Electrique et Electronique.
- [12] L. BAADJ, A. IBRAHIMIBRAHIMI. 2018. « Etude d'une chaine de traction d'un véhicule électrique » Université de Laghouat, Département d'Electrotechnique.
- [13] SCHWARZ (V.), GINDROZ (B.) . 2005.- Le stockage électrochimique. - MINES-ENERGIE Dossier Stockage de l'Énergie, janv.-fév.
- [14] J. PRENSIER, C. LUSSEAU, 2004. « Principe de fonctionnement et constituants d'une batterie » CACHAN.
- [15] H. AOUZELLAG, 2013. « Stratégies de Commande d'un Véhicule Hybride » Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Département de Génie Electrique.
- [16] A. BOUCHERIT, 2011. « Conception d' un convertisseur de puissance pour les véhicules électriques multi-sources » Université de Technologie de Belfort -Montbéliard.

- [17] K. NABTI, 2010. « Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone » UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE.
- [18] H. GUERARI, 2016. « COMMANDE PAR ORIENTATION DE FLUX ROTORIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE A BASE D'UN REGULATEUR GLISSANT » UNIVERSITE MOUHAMED BOUDIAF – M'SILA, DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE.
- [19] H. BRIGHEN, S. HALAIMIA, 2016. « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale » UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA-, Département de Génie des Mines.
- [20] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, August 2007. «Multilevel Power Converters », the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering.
- [21] K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, S.H. Hosseini, April 1999. « Distribution System Compensation Using a New Binary Multilevel Voltage Source Inverter », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N°2, pp. 459-464.
- [22] A.YAHDOU , 2011. « Commande et observation par modes glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique » UNIVERSITE Hssiba Benbouali de Chlef, Département d'Electrotechnique.
- [23] [www.avery-france.org/Site/Article/?article\\_id=5871&from\\_espace\\_adherent=0](http://www.avery-france.org/Site/Article/?article_id=5871&from_espace_adherent=0)
- [24] [fr.wikipedia.org/wiki/Voiture\\_électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_électrique)
- [25] [https://www.tesla.com/fr\\_fr/models](https://www.tesla.com/fr_fr/models)
- [26] [www.planete-sciences.org/blogs/defissolaires/2018\\_co\\_fabre1/2018/04/30/moteur-roue-electrique-porsche/](http://www.planete-sciences.org/blogs/defissolaires/2018_co_fabre1/2018/04/30/moteur-roue-electrique-porsche/)
- [27] [www.industrie-techno.com/article/le-moteur-se-glisse-dans-la-roue.8363](http://www.industrie-techno.com/article/le-moteur-se-glisse-dans-la-roue.8363)
- [28] Yvan Crévits, Xavier Kestelyn, Betty Lemaire-Semail, Eric Semail, « Modélisation causale pour la commande auto adaptée de machines alternatives triphasées en mode dégradé », Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille.
- [29] Guven ALCICEK, 2014, « Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique », UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD, Discipline : Génie Électrique.
- [30] Jean-Yves KAISER, Thierry PAUWELS, Cédric SIMON, Benjamin WINDAL, 2004, «Commande de moteurs "Brushless" », Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées
- [31] <https://www.mongosukulu.com/index.php?contenu=genie-electrique4electronique-de-puissance550-les-hacheurshowall=1>

- [32] SLAOUTI Kheirddine, MAKHLOUFI Nassim, 2012, « Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile alimentée par Convertisseurs Matriciels Indirects », UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA, DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE.
- [33] BOUAMRA Dhia Elhak, BEDDI Nasser, 2014 « Etude d'une Machine Asynchrone Double Etoile : (Modélisation, Alimentation et Commande) », Université d'EL-Oued, Filière: Génie Électrique.
- [34] ZOUAOUID MED NABIL, MESSAI MED TEDJANI,2018, « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à double stator », Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi-,Département de Génie Electrique.
- [35] Alia Salim, Guedda Smail, 2018 , « Commande Vectorielle d'une Machine à Induction », Université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued, Filière : Electrotechnique.

# ANNEXE

### Annexe A : Paramètre de la MASDE

Puissance nominale	$P_n = 4.7 \text{ KW}$
Tension nominale	$V_n = 220 \text{ V}$
Courant nominal	$I_n = 4.5 \text{ A}$
Fréquence	$F_s = 50 \text{ Hz}$
Résistance d'une phase statorique ( étoile 1 et 2)	$R_{s1} = R_{s2} = R_s = 3.72 \ \Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = 2.12 \ \Omega$
Inductance de fuite d'une phase (étoile 1 et2)	$L_{s1} = L_{s2} = 0.022 \text{ H}$
Inductance de fuite d'une phase rotorique	$L_r = 0.006 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$L_m = 0.3672 \text{ H}$
Nombre de paires de pôles	$P = 1$
Moment d'inertie	$J = 0.0662 \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$f=0.001 \text{ N.m.s/rd}$

### Annexe B : Programme de simulation (Fichier m)

```

clear all
clc
Rs=3.72;
Rr=2.12;
Ls1=0.022;
Ls2=Ls1;
Lr=0.006;
Lm=0.3672;
J=0.0662;
P=1;
f=0.001;
ws=(2*pi*50);
R=[Rs 0 0 0 0 0; 0 Rs 0 0 0 0; 0 0 Rs 0 0 0; 0 0 0 Rs 0 0;0 0 0 0 Rr 0;0 0
0 0 0 Rr];
L=[(Ls1+Lm) 0 Lm 0 Lm 0;0 (Ls1+Lm) 0 Lm 0 Lm ;Lm 0 (Ls2+Lm) 0 Lm 0;0 Lm 0
(Ls2+Lm) 0 Lm;Lm 0 Lm 0 (Lr+Lm) 0;0 Lm 0 Lm 0 (Lr+Lm)];
A=[ 0 -(Ls1+Lm) 0 -Lm 0 -Lm;(Ls1+Lm) 0 Lm 0 Lm 0; 0 -Lm 0 -(Ls2+Lm) 0 -Lm;
Lm 0 (Ls2+Lm) 0 Lm 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0];
B=[ 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0; 0 0 0 0 0 0;0 -(Lr+Lm) 0 -Lm 0 -
Lm;(Lr+Lm) 0 Lm 0 Lm 0];
Z=inv(L);
E=540;
tor=((Lr)/Rr);
to=tor/6;
Kp1=(Ls1/to);
Kp2=(Ls2/to);
Ki1=(Rs/to);
Ki2=(Rs/to);
Ki=(f/to)*0.01;
Kp=(J/to);

```

# Annexe C : Simulation

