République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique

Filière : électrotechnique

Spécialité : Machines électrique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Thème

Etude de la machine asynchrone à double étoile dédiée à une voiture électrique

Préparé par :

- **BOUZERIA Syphax**
- **BOUZERA Oualid**

Dérigé par :

- A. Mokrani **(encadreur)**
- K. Hamitouche **(co-encadreur)**

Examiné par :

- A.Hamasse **(Président)**
- A. Azib **(Examinateur)**

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier nos deux encadreurs,

Mr : Ahmed Mokrani

Mr : Kamel Hamitouche

Pour leurs disponibilités, enthousiasme avec la quel à proposé et suivi notre projet, et les précieux conseils qu'il nous à apportés.

Je remercie tous les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ici ma reconnaissance envers tous ceux qui ont rendu possible pour ce travail.

Dédicaces

En premier lieu, je remerciée Dieu, qui ma

Donné le courage, la force et la volonté pour

Réaliser ce modeste travail,

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont permettent d'être ce que je suis,

Ma chère sœur Massylia et mon cher frère Massi,

Ma mère, Mon père,

Toute la famille,

Tous mes enseignants,

Tous mes amis,

A tous ceux qui me sont chers.

Syphax

Dédicaces

En premier lieu, je remerciée Dieu, qui ma

Donné le courage, la force et la volonté pour

Réaliser ce modeste travail,

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont permettent d'être ce que je suis,

Toute la famille,

Tous mes enseignants,

Tous mes amis,

A tous ceux qui me sont chers.

Oualid

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

FOC : Field Oriented Control

MASDE : Machine Asynchrone a Double Etoile

MFOC : Modified Field Oriented Control

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

PI : Proportionnelle Intégrale

VE : véhicule électrique

Liste des symboles

U : Tension de la source (V)

U_S : Tension alternatif (V)

I : Courant continue (A)

I_S : Courant alternatif (A)

C_m : Couple mécanique (N.m)

Ω_m : Vitesse mécanique (rad/s)

t : Le temps (s)

as, bs, cs : Les trois phases statorique

ar, br, cr : Les trois phases rotorique

$v_{as1,bs1,cs1}$: Tension statorique de l'étoile 1[V]

$i_{as2,bs2,cs2}$: Courant statorique de l'étoile 1 [A]

$\varphi_{as1,bs1,cs1}$: Flux statorique de l'étoile 1 [Wb]

r_{s1} : Resistance statorique d'une phase de l'étoile 1 [ohm]

$v_{as2,bs2,cs2}$: Tension statorique de l'étoile 2 [V]

$i_{as2,bs2,cs2}$: Courant statorique de l'étoile 2 [A]

$\varphi_{as2,bs2,cs2}$: Flux statorique de l'etoile 2 [Wb]

r_{s2} : Resistance statorique d'une phase de l'étoile 2 [ohm]

$v_{ra,rb,rc}$: Tension rotorique [V]

$i_{ra,rb,rc}$: Courant rotorique [A]

$\varphi_{ra,rb,rc}$: Flux rotorique [Wb]

r_r : Resistance d'une phase de rotor [ohm]

$[v_{s_1}]$: Matrice de tension de l'étoile 1.

$[v_{s_2}]$: Matrice de tension de l'etoile2.

$[i_{s_1}]$: Matrice de courant de l'etoile1.

$[i_{s_2}]$: Matrice de courant de l'etoile2.

$[i_r]$: Matrice de courant de rotor.

$[\varphi_{s_1}]$: Matrice de flux de l'etoile1.

$[\varphi_{s_2}]$: Matrice de flux de l'etoile2.

$[\varphi_r]$: Matrice de flux de rotor.

$[L_{s_1s_1}]$ **:** Matrice inductance de l'étoile 1.

$[L_{s_2s_2}]$ **:** Matrice inductance de l'étoile 2.

$[L_{rr}]$ **:** Matrice inductance de rotor.

$[L_{s_1s_2}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et l'étoile 2.

$[L_{s_1\mathrm{r}}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et rotor.

$[L_{s_2s_1}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et l'étoile 1.

$[L_{s_2r}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et rotor.

$[L_{rs_1}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre rotor et l'étoile 1.

$[L_{rs_2}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre rotor et leoile2.

L_{S_1}, L_{S_2}, L_r : Les valeurs des inductances de fuites de l'étoile 1, l'étoile 2 et rotor.

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'etoile1, l'etoile2 et rotor.

$\mathrm{L_{ms}}$: Inductance mutuelle statoriques.

$\mathrm{L_{mr}}$: Inductance mutuelle rotoriques.

$\mathrm{L_{sr}}$: Inductance mutuelle cyclique entre une étoile et le rotor.

C_{em} : Couple electromagnétique [N.m]

ω_{mag} : Energie magnétique $[\frac{j}{m^3}]$

p : Nombre de pair de poles

θ_m : Angle mécanique [rad]

θ_e : Angle électrique [rad]

C_r : Couple résistant [N.m]

Ω_r : Vitesse angulaire mécanique du rotor [rad/s]

ω_r : Vitesse angulaire electrique de rotation du rotor [rad/s]

J : Inertie des parties tournantes de la machine asynchrone double étoile $[Kg/m^3]$

K_f : Coefficient de frottement de la machine asynchrone a double étoile [N.m.s/rad]

d, q : Indice de l'axe direct et en quadrature du repaire de Park

ω_s : Pulsation des courant statorique [rad/s]

ω_{gl} : Pulsation des courant rotorique [rad/s]

$v_{d,qs1}$: Tension statorique dans le repaire de Park de l'étoile 1 [V]

$v_{d,qs2}$: Tension statorique dans le repaire de Park de l'étoile 2 [V]

$v_{d,qs1}$: Courant statorique dans le repaire de Park de l'étoile 1 [A]

$v_{d,qs2}$: Courant statorique dans le repaire de Park de l'étoile 2 [A]

$\varphi_{d,qs1}$: Flux statorique dans le repaire de Park de l'étoile 1 [Wb]

$\varphi_{d,qs2}$: Flux statorique dans le repaire de Park de l'étoile 2 [Wb]

$i_{d,qr}$: Courant rotorique dans le repaire de Park [A]

$\varphi_{d,qr}$: Flux rotorique dans le repaire de Park [Wb]

P_{abs} : Puissance absorbé par la machine [W]

P_{em} : Puissance électromagnétique de la machine [W]

X : Vecteur d'état

Y : Vecteur d'entrée

φ_{md} : Flux magnétisant direct [Wb]

φ_{mq} : Flux magnétisant en quadrature [Wb]

φ_{m} : Flux magnétisant total [Wb]

E : Tension continue a l'entrée de l'onduleur [V]

V_{m} : Amplitude des tensions de référence [V]

V_{pm} : Amplitude de la porteuse [V]

T_{p} : Période de la porteuse [s]

m : Indice de modulation

r : Coefficient de réglage de la tension

f_{p} : Fréquence de la porteuse [Hz]

f : Fréquence des tensions de références [Hz]

C_{em}^{*} : Couple électromagnétique de référence [N.m]

φ_{r}^{*} : Flux rotorique de référence [Wb]

$v_{d,qs1}^{*}$: Tension statorique de référence de l'étoile 1 dans le répare de Park [V]

$v_{d,qs2}^{*}$: Tension statorique de référence de l'étoile 2 dans le répare de Park [V]

ω_{s}^{*} : Pulsation de référence des courants statorique [rad]

θ_{s}^{*} : Angle électrique de référence des courants statorique [rad]

ω_{gl}^{*} : Pulsation de référence des courant statorique [rad/s]

P : Operateur de Laplace

τ_{r} : Constante de temps rotorique [s]

K_{p} : Gain proportionnelle

K_{p} : Gain integral

m : La masse totale du véhicule en kg

g : La gravité en m/s^2

f_{ro} : La constante de la force de résistance due au déplacement.

α : L'angle de pente de la route en rad

ρ_{air} : La densité de l'air en kg/m^2

A_f : La surface frontale du véhicule m^2

C_d : Le coefficient de trainée aérodynamique

V_e : La vitesse du véhicule en m/s^2

F : La force de traction du véhicule électrique

r : Rayon de la roue

G : Gain de la réduction qui relie le moteur a l'axe

Table de matière

Introduction générale

Introduction générale

Les machines à courant alternatif jouent actuellement un role important dans les entrainements électriques. En raison de leur simplicité, Ces machines ont remplacé les machines à courant continue [1].

Ces dernières années, les recherches dans le domaine des entrainements électriques ont conduit à l'introduction des machines asynchrones en tant que moteurs, en raison de leurs avantages, notamment en ce qui concerne l'absence des collecteur mécanique.

Malheureusement, la machine asynchrone présente un inconvénient majeur, sa structure dynamique est fortement non linaire à cause de l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux ce qui complique sa commande [1].

Le problème de complexité de la commande de cet machine asynchrone à ouvert la voie à plusieurs stratégies de commande. Parmi cette technique on cite la commande vectorielle [5].

Notre objectif s'inscrit sous le cadre de faire l'extension de ces techniques de commande sur la machine asynchrone à double étoile particulièrement la commande vectorielle. Le but de cette commande est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante ou il y'à un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle qui liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une repense très rapide du couple [5].

L'étude de la MASDE dédié à un véhicule électrique, sa structure, sa modélisation, son alimentation et enfin sa commande vectorielle font l'objet de quatre chapitres qui constituent notre mémoire.

Premier chapitre sera consacré à la généralité des machines polyphasées, la présentation des déférents type de machine multi-phasée, leurs avantages et inconvénients en prenant l'exemple de la machine asynchrone double étoile, dans laquelle est principe de fonctionnement et sa description seront présentées.

Deuxième chapitre est consacré au modèle de la machine asynchrone à double étoile. Dans le cas présent il faut que la modélisation prenne en compte le régime transitoire de la machine. La modélisation PARK est la plus appropriée, elle consiste à transformer une machine triphasée équilibre en une machine biphasée équivalente.

Troisième chapitre présente la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone double étoile alimentée par un onduleur triphasé. Dans cette partie nous utilisons la méthode d'orientation du flux du rotor, qui nous permet d'obtenir un modèle MASDE similaire à un moteur à courant continue.

Quatrième chapitre, nous allons présenter la commande vectorielle d'une machine asynchrone double étoile dédie à un véhicule électrique, les résultats de simulation obtenus sont donnés également dans ce chapitre.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur la machine asynchrone double étoile

I.1 Introduction

Les machines électriques triphasées à courant alternatif dominent assez largement le domaine des machines électriques [3]. Leur alimentation est réalisée par des onduleurs de tension dont les interrupteurs sont commandés en modulation de largeurs d'impulsions (MLI) qui permet d'obtenir de bonnes performances surtout dans le cas de vitesse variable [4].

Les moteurs asynchrones sont de loin les moteurs les plus utilisés dans toutes les applications industrielles en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur petite taille, de leur rendement élevé et de leur fiabilité. Son seul point noir est le circuit magnétique (l'énergie réactive que l'entrefer magnétisant dissipe toujours).

Dans ce chapitre une présentation sera faite sur les machines asynchrone multiphasées ou multi étoile, un cas particulier des machines multi étoile est la machine asynchrone double étoile et qui fera l'objet de notre travail.

I.2 La machine asynchrone

I.2.1 Définition

La machine asynchrone est une machine électrique tournante, fonctionnant sur le réseau alternatif de fréquence f ayant $2p$ pôles, à une vitesse différente de celle du synchronisme N définie par :

$$N_S = \frac{60f}{p} \qquad (1.1)$$

I.2.2 Constitution de la machine asynchrone

- Le stator : se compose de trois enroulement (bobines) traversés par des courant alternatifs triphasé et possède p paire de pôles (nombre d'enroulement triphasés à l'intérieur du stator).

- Le rotor : partie tournant du moteur. Le rotor peut-être constitué d'un enroulement triphasé, mais la plupart il est souvent constitué d'une masse métallique qui comprend de l'aluminium pour l'alléger. On parle alors d'un rotor à cage d'écureuil.

- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

I.3 Les machines multi-phasées

On distingue habituellement deux types de machines multiphasées, suivant que le nombre de phases statoriques est ou non un multiple de trois. On peut ainsi les classer en deux groupes, qu'on nommera "machines multiphasées de type '1' et machines multiphasées de type '2'. De plus, on considère rarement les cas où le nombre de phases est un nombre pairs, sauf si celui-ci est un multiple de trois [5].

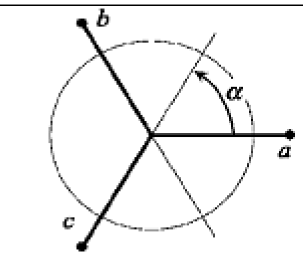
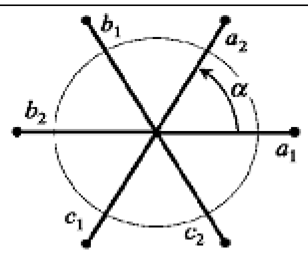
I.3.1 Machine multiphasées de « type 1 »

Les machines multiphasées de "type 1" sont des machines dont le nombre de phases statoriques q est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en $(3\boldsymbol{A})$ étoiles triphasées :

$$q = 3A \quad Avec : (A = 1,2,3,4 \dots)$$

Ces machines dont aussi appelées « multi étoile ».

On remarque qu'il est préférable, en fonctionnement normal, d'avoir autant de neutres que d'étoile, c'est-à-dire A neutre isolé. Or pour un nombre donné de phase, il peut y'avoir plusieurs configurations possible suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacente (qui correspond d'ailleurs au décalage d'étoile). En effet, une machine à double étoile (q=6) dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{6}$ a des caractéristique différent de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{3}$.

Nombre de phase (q)	Nombre équivalent de phase (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	

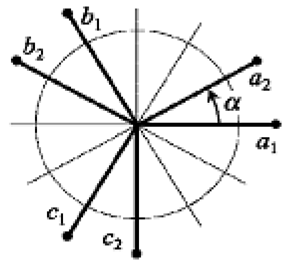
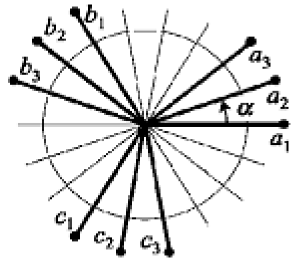
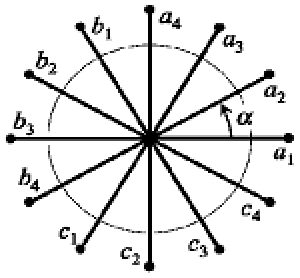
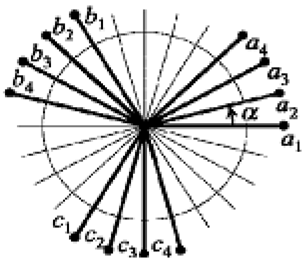
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	
12	12	$\frac{\pi}{12}$	

Tableau I. 1 : Machines multiphasées dont le nombre de phases statorique est un multiple de trois (machines multiphasées de type1)

I.3.2 Machine multiphasées de « type 2 »

Si le nombre de phase statorique des machines multiphasées est impair et différent de trois (nombre de phase n'est pas multiple de trois). C'est donc le cas des machines multiphasées de type2. Dans ce type, les phases se décalent régulièrement de $\frac{2\pi}{q} = 2\alpha$.

On à donc :

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \qquad (1.2)$$

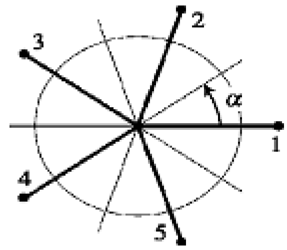
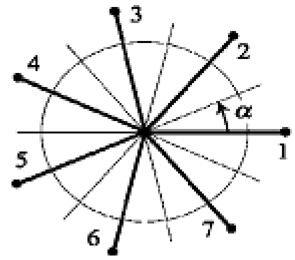
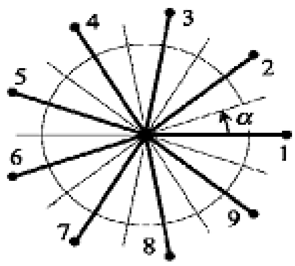
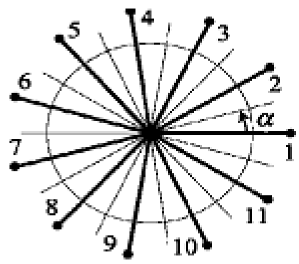
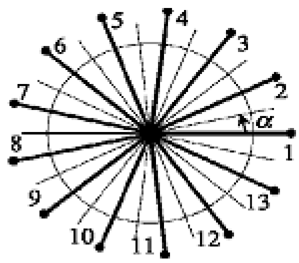
Nombre de phase (q)	Nombre équivalent de phase (q_α)	Décalage angulaire (α)	Représentation schématique, position des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

Tableau I. 2 : Machines multiphasées dont le nombre de phases statorique est un nombre impair (machines multiphasées de type2)

I.4 Application des machines multi-phasées

Les machines multi-phasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissance élevées, par exemple les alternateurs asynchrones pour générer une puissance élevées par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs, les moulins du ciment, etc [6].

I.5 Description du moteur asynchrone à double étoile

Le moteur synchrone triphasé à double stator est une machine électrique qui est composée de deux parties : une partie fixe qui est le stator (inducteur induit) et une partie mobile qui est le rotor (induit inducteur).

- **Partie fixe (stator ou inducteur induit)**

Il comporte deux stators décalés entre eux d'un angle $\alpha = 30°$chacun est composé de trois enroulements identiques. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal $2\pi/3$ dans l'espace. Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique.
Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé de courant équilibré, d'où la création d'un champ tournant glissant dans l'entrefer.
La vitesse de rotation du champ tournant est inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques tel que :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \tag{1.3}$$

- **Partie mobile (rotor ou induit inducteur)**

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de paires de pôles identique à celui du stator.
La structure électrique du rotor est supposée être un rotor à cage d'écureuil constitué de barre conductrices court circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité (barre conductrice en aluminium).
Ce choix permet d'obtenir des machine peu onéreuse, robustes, facile d'emploi et nécessitent un entretien limité.

I.6 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur l'application des principes I, II et III de l'électromagnétisme (loi d'ampère, loi de la place et la loi de faraday).

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1alimenter par des courants triphasés et l'étoile 2 alimenter par les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angule (α), La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques $\ll f_s \gg$ c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique.

La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme $\ll \omega_s \gg$. Elle est définie comme suit :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p}\left[{rad}/{s}\right] \quad (1.4)$$

I.7 Les Avenages et les inconvénients des machines Multiphasées

I.7.1 Avantage des machines Multiphasées

Les machine multiphases ont en un intérêt grandissent, et en particulier la machine asynchrone à double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées [7].

- Segmentation de puissance.
- Amélioration de la fiabilité.
- Amélioration de facteur de puissance.
- Minimisations des ondulations du couple et des pertes rotorique.
- Basse courant par phase sans réduire de la tension par phase.
- Perte de fer réduit conduisant à une amélioration de la performance globale.
- Les machine à induction polyphasés moins de bruit par rapport à ceux triphasé.

I.7.2 Inconvénient des machines Multiphasées

Ce pendant, l machine asynchrone présente des inconvénients tels que [4] :

- Le nombre de semi-conducteur augmente avec le nombre de phase, ce qui peut éventuellement augmenter le cout de l'ensemble convertisseur-machine.

- La multiplication du nombre des semi-conducteur avec la structure dynamique est fortement non linéaires et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande.

- L'inconvénient majeur des machines à double étoile est l'apparition de courant harmonique de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tentions.

I.8 Conclusion

Durant ce chapitre on donne une idée générale sur les déférents type des machine multiphasées, leurs déférentes caractéristique leurs avantage et leurs inconvénients.

Nous nous intéressons aux machines les plus courants, les machines double étoile (MASDE) et compte tenu de leur avantage, il est très intéressant de pouvoir étudier ce dernier en mode de fonctionnement (moteur).

Le chapitre suivant présent la modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) en fonctionnement moteur.

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone double étoile

II.1 Introduction

La modélisation d'une machine électrique est une phase essentielle de son développement. Les progrès de l'information et du génie logiciel permettent une modélisation et une optimisation performantes des machines électriques. Cependant, la modélisation d'une telle machine électrique est nécessaire pour l'étude et d'une part, le contrôle de ces actions, et d'autre part, lorsqu'il veut appliquer commande spéciale [5].

Apres la description et la modélisation de la machine basée sur la théorie unifiée des machines électriques classique nous étudierons dans un premier temps la MASDE directement alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibres (réseau électrique) en se basent sur la théorie unifiée des machine électrique classique, dite encore théorie généralisée ; cette dernière est basée sur l transformation de Park qui rapporte les équation électrique statorique et rotorique a des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) [9], passant ensuite vers études plus adéquate et plus performante ou on étudiera cette machine dans un repère dite (naturel).

II.2 Description de la machine asynchrone double étoile

La MASDE est constitué d'un stator à deux enroulements triphasés identique décalés d'un angle électrique $\alpha = 30°$ et d'un rotor à cage d'écureuil. Les angles $\theta_r\ et\ (\theta_r - \alpha)$ indiquent la position du rotor (phase a_r) par rapport a l'etoile1 (phase a_{r_1}) et a une étoile 2 (phase a_{r_2}). La luminosité liée aux deux étoiles (1 et 2) sera enregistrée par l'indice (1 et 2) respectivement [1].

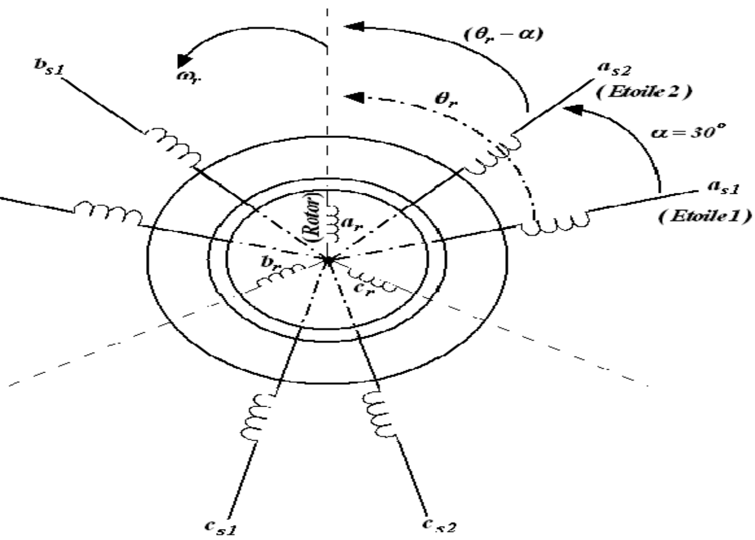


Figure II. 1 : Représentation schématique des enroulements de la MASDE

II.3 Modélisation de la machine asynchrone double étoile

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplification suivant [10] :

- Le circuit magnétique est non saturé.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les force magnétomotrice crée par chacun des phases des deux armatures sont a répartition sinusoïdale d'où résulte que l'entrefer est constant, que l'inductance propres sont des constante et que l'inductance mutuelle entre des enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau [11] [12].
- La machine est constitution symétrique.

II.3.2 Modèle de la machine asynchrone triphasée à double étoile

II.3.2.1 Équations électriques

Les équations des tensions de la machine asynchrone à double étoile représentent pour chaqueenroulement la somme de la chute ohmique et la chute inductive due au flux.

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} v_{sa_1} = r_{s1} i_{sa1} + \frac{d\varphi_{sa1}}{dt} \\ v_{sb_1} = r_{s1} i_{sb1} + \frac{d\varphi_{sb1}}{dt} \\ v_{sc_1} = r_{s1} i_{sc1} + \frac{d\varphi_{sc1}}{dt} \end{cases} \tag{2.1}$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} v_{sa_2} = r_{s2} i_{sa2} + \frac{d\varphi_{sa_2}}{dt} \\ v_{sb_2} = r_{s2} i_{sb2} + \frac{d\varphi_{sb_2}}{dt} \\ v_{sc_2} = r_{s2} i_{sc2} + \frac{d\varphi_{sc_2}}{dt} \end{cases} \tag{2.2}$$

Pour rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = r_{ra} i_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = r_r i_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \tag{2.3}$$

La forme matricielle est la suivante :

$$[v_{s_1}] = [r_{s_1}][i_{s_1}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s_1}] \quad (2.4)$$

$$[v_{s_2}] = [r_{s_2}][i_{s_2}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s_2}] \quad (2.5)$$

$$[v_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (2.6)$$

On pose :

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

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

$$[r_{s_1}] = \begin{bmatrix} r_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s1} \end{bmatrix}, \quad [R_{s_2}] = \begin{bmatrix} r_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{s2} \end{bmatrix}, \quad [R_r]\begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Avec :

$[r_{s_1}]$: Résistance d’une phase de l’étoile 1.

$[r_{s_2}]$: Résistance d’une phase de l’étoile 2.

$[r_r]$: Résistance d’une phase de rotor.

$$[v_{s_1}]\begin{bmatrix} v_{sa_1} \\ v_{sb_1} \\ v_{sc_1} \end{bmatrix}, \qquad [v_{s_2}]\begin{bmatrix} v_{sa_2} \\ v_{sb_2} \\ v_{sc_2} \end{bmatrix}$$

$[v_{s_1}]$: Matrice de tension de l’étoile 1.

$[v_{s_2}]$: Matrice de tension de l’etoile2.

$$[i_{s_1}]\begin{bmatrix} i_{sa_1} \\ i_{sb_1} \\ i_{sc_1} \end{bmatrix}; \ [i_{s_2}]\begin{bmatrix} i_{sa_2} \\ i_{sb_2} \\ i_{sc_2} \end{bmatrix}; \quad [i_r]\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$[i_{s_1}]$: Matrice de courant de l’etoile1.

$[i_{s_2}]$: Matrice de courant de l’etoile2.

$[i_r]$: Matrice de courant de rotor.

$$[\varphi_{s_1}]\begin{bmatrix}\varphi_{sa_1}\\ \varphi_{sb_1}\\ \varphi_{sc_1}\end{bmatrix},\quad [\varphi_{s_2}]\begin{bmatrix}\varphi_{sa_2}\\ \varphi_{sb_2}\\ \varphi_{sc_2}\end{bmatrix},\quad [\varphi_r]\begin{bmatrix}\varphi_{ra}\\ \varphi_{rb}\\ \varphi_{rc}\end{bmatrix}$$

$[\varphi_{s_1}]$: Matrice de flux de l'etoile1.

$[\varphi_{s_2}]$: Matrice de flux de l'etoile2.

$[\varphi_r]$: Matrice de flux de rotor.

II.3.2.2 Équation magnétique

C'est à partir de la matrice $[L_{(q)}]$ qu'on obtient les équations de flux en fonctions des courants [10] [11].

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{s_1s_1} & L_{s_1s_2} & L_{s_1\mathrm{r}} \\ L_{s_2s_1} & L_{s_2s_2} & L_{s_2r} \\ L_{rs_1} & L_{rs_2} & L_{rr} \end{bmatrix}$$

L'écriture matricielle qui résume les équations de flux statorique et rotorique est :

$$\begin{bmatrix}\varphi_{s_1}\\ \varphi_{s_2}\\ \varphi_r\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s_1s_1} & L_{s_1s_2} & L_{s_1\mathrm{r}} \\ L_{s_2s_1} & L_{s_2s_2} & L_{s_2r} \\ L_{rs_1} & L_{rs_2} & L_{rr} \end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{s_1}\\ i_{s_2}\\ i_r\end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$[L_{s_1s_1}]$ **:** Matrice inductance de l'étoile 1.

$[L_{s_2s_2}]$ **:** Matrice inductance de l'étoile 2.

$[L_{rr}]$ **:** Matrice inductance de rotor.

$[L_{s_1s_2}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et l'étoile 2.

$[L_{s_1\mathrm{r}}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et rotor.

$[L_{s_2s_1}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et l'étoile 1.

$[L_{s_2r}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et rotor.

$[L_{rs_1}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre rotor et l'étoile 1.

$[L_{rs_2}]$ **:** Matrice inductance mutuelle entre rotor et leoile2.

Les sous matrices de la matrice d'inductance sont :

$$[L_{S_1S_1}] = \begin{bmatrix} (L_{S_1} + L_{ms}) & L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{S_1} + L_{ms}) & L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{S_1} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{S_2S_2}] = \begin{bmatrix} (L_{S_2} + L_{ms}) & L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{S_2} + L_{ms}) & L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{S_2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} (L_{r} + L_{mr}) & L_{mr}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{mr}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{r} + L_{mr}) & L_{mr}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{mr}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{mr}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{r} + L_{mr}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s_1s_2}] = \begin{bmatrix} L_{ms}\cos(\alpha) & L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos(\alpha) & L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms}\cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s_1r}] = \begin{bmatrix} L_{sr}\cos(\theta_r) & L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos(\theta_r) & L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s_2r}] = \begin{bmatrix} L_{sr}\cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr}\cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

Les sous matrice :

$$[L_{S_1S_2}] = [L_{S_2S_1}]^t, \quad [L_{S_1r}] = [L_{rS_1}]^t, \quad [L_{S_2r}] = [L_{rS_2}]^t$$

Avec :

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

L_{S_1}, L_{S_2}, L_r : Les valeurs des inductances de fuites de l'étoile 1, l'étoile 2 et rotor.

L_m : Inductance mutuelle cyclique entre l'etoile1, l'etoile2 et rotor.

L_{ms} : Inductance mutuelle statoriques.

L_{mr} : Inductance mutuelle rotoriques.

L_{sr} : Inductance mutuelle cyclique entre une étoile et le rotor.

II.3.2.3 Expression du couple électromagnétique

Il est donné par la drivée Partielle de l'énergie par rapport a l'angle mécanique [8].

$$C_{em} = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_m} = P \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_e} \tag{2.8}$$

L'énergie magnétique est donne par l'expression suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2}\{[i_{s1}]^t[\phi_{s1}] + [i_{s2}]^t[\phi_{s2}] + [i_r]^t[\phi_r]\} \tag{2.9}$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{P}{2}\left\{[i_{S_1}]\frac{d}{d\theta_r}[L_{S_1r}][i_r]^t + [i_{S_2}]\frac{d}{d\theta_r}[L_{S_2r}][i_r]^t\right\} \tag{2.10}$$

p : Nombre de paire de pole.

θ_m : Angle mécanique.

θ_e : Angle électrique.

II.3.2.4 Equation mécanique

L'équation mécanique est la solution de l'équation fondamentale de la dynamique [12] :

$$C_{em} - C_r = \mathcal{J}\frac{d\Omega}{dt} + K_f\Omega \tag{2.11}$$

Ou :

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \tag{2.12}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \tag{2.13}$$

Ω : Vitesse de rotation de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant (couple de charge).

K_f : Coefficient de frottement.

$\mathcal{J}$: Moment d'inertie.

II.3.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoile

II.3.3.1 Transformation de base de Park

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes (a, d et c) en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes (d, q) et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forcesmagnétomotrices [13].

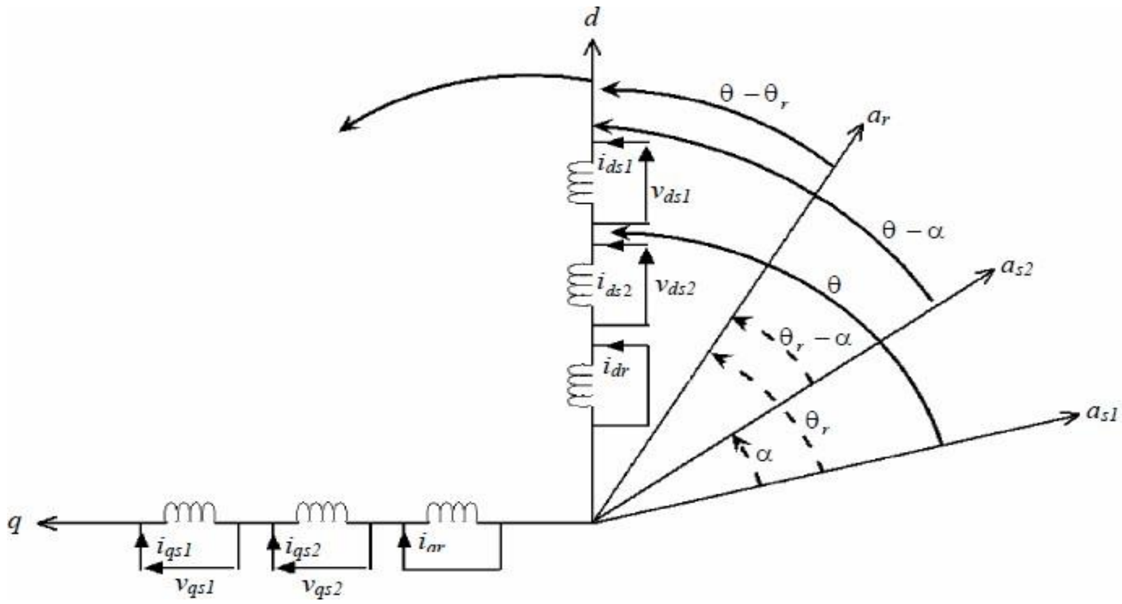


Figure II. 2 : Représentation du modèle généralisé de la MASDE sur l'axe « u,v »

La matrice Park en générale :

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

La matrice inverse de Park : $[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[G_{dq0}]$

Sachant que :

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^{t}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On transforme le système triphasé en un système biphasé tournant :

La matrice de Park pour l'etoile1 :

$$\left[P(\theta)_{s_1}\right] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad (2.14)$$

La matrice de Park pour l'etoile2 :

$$\left[P(\theta)_{s_2}\right] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad (2.15)$$

La matrice de Park pour le rotor :

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad (2.16)$$

$\left[P(\theta)_{s_1}\right]$: Matrice de transformation de premier enroulement statorique (étoile 1).

$\left[P(\theta)_{s_2}\right]$: Matrice de transformation de deuxième enroulement statorique (étoile 2).

$\left[P(\theta_{r)}\right]$: Matrice de transformation d'enroulement rotorique.

II.3.3.2 Choix de référentiel

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème àétudier.

- **Référentiel lie au stator**

La première phase de la première étoile (A_1) coïncide avec l'axe direct (d), pour ce modèle $\theta_{s=0}\ et\ \omega_s = 0$.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0\ avec\ \theta_s = \theta_r + \theta$$

Donc :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega$$

- **Référentiel lie au rotor**

C'est un référentiel souvent utilisé dans le régime transitoire ou la vitesse de rotation est considérée constante.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

La vitesse électrique de repère « d-q » est égale a la pulsation électrique du rotor.

- **Référentiel lie au champ tournant**

C'est un référentiel qui n'introduit pas des simplifications dans la transformation de l'équation électrique.

Donc :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

La vitesse du repère « d-q » est égale à la vitesse du champ tournant w_s.

Le choix d'étude : L'étude de la MASDE se fera avec un référentiel « d-q » lie aux champs tournant.

II.3.3.3 Equations électrique et magnétique

N appliquant la transformation de Park aux équations électrique et magnétique de la machine, on aura le système d'équation suivant [14] :

$$\begin{cases} v_{ds_1} = r_{s_1} i_{ds_1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds_1} - \omega_s \varphi_{qs_1} \\ v_{qs_1} = r_{s_1} i_{qs_1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs_1} + \omega_s \varphi_{ds_1} \\ v_{ds_2} = r_{s_2} i_{ds_2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds_2} - \omega_s \varphi_{qs_2} \\ v_{qs_2} = r_{s_1} i_{qs_2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs_2} + \omega_s \varphi_{ds_2} \\ 0 = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ 0 = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} + \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{cases} \tag{2.17}$$

Ou :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r \tag{2.18}$$

Les composant de flux statorique et rotorique sont exprimé par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds_1} = L_{s_1} i_{ds_1} + L_m\left(i_{ds_1} + i_{ds_1} + i_{dr}\right) \\ \varphi_{qs_1} = L_{s_1} i_{qs_1} + L_m\left(i_{qs_1} + i_{qs_1} + i_{qr}\right) \\ \varphi_{ds_2} = L_{s_2} i_{ds_2} + L_m\left(i_{ds_2} + i_{ds_2} + i_{dr}\right) \\ \varphi_{qs_2} = L_{s_2} i_{ds_2} + L_m\left(i_{ds_2} + i_{ds_2} + i_{dr}\right) \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m\left(i_{ds_1} + i_{ds_2} + i_{dr}\right) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m\left(i_{qs_1} + i_{qs_2} + i_{dr}\right) \end{cases} \tag{2.19}$$

II.3.3.4 Puissance absorbé et couple électromagnétique

La transformation de PARK repose sur l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de transformation, ce qui de toute évidence conduit a leur équivalence physique, en négligent la composante homopolaire, la puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axe (d, q) est exprimée par [15] :

$$P_{abc} = v_{ds_1} i_{ds_1} + v_{qs_1} i_{qs_1} + v_{ds_2} i_{ds_2} + v_{qs_2} i_{s_2} \tag{2.20}$$

En remplaçant les expressions de tensions $(v_{ds_1}, v_{qs_1}, v_{ds_2},\ v_{qs_2})$ par leurs expressions, on trouve :

$$P_{abc} = \left(r_{s_1} i^2{}_{ds_1} + r_{s_1} i^2{}_{qs_1} + r_{s_2} i^2{}_{ds_2} + r_{s_2} i^2{}_{qs_2}\right) + \left(\frac{d\varphi_{ds_1}}{dt} i_{ds_1} + \frac{d\varphi_{qs_1}}{dt} i_{qs_1} + \frac{d\varphi_{ds_2}}{dt} i_{ds_2} + \frac{d\varphi_{qs_2}}{dt} i_{qs_2}\right) + \omega_s(\varphi_{ds_1} i_{ds_1} + \varphi_{qs_1} i_{qs_1} + \varphi_{ds_2} i_{ds_2} + \varphi_{qs_2} i_{qs_2}) \tag{2.21}$$

Cette expression se compose de trois termes, le premier correspond aux pertes par effet joule, le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) et le dernier représente la puissance électromagnétique (P_{em}) :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p\frac{P_{em}}{\omega_s} \tag{2.22}$$

En remplaçant la puissance électromagnétique, on aura :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds_1} i_{ds_1} - \varphi_{qs_1} i_{qs_1} + \varphi_{ds_2} i_{ds_2} - \varphi_{qs_2} i_{qs_2}) \quad (2.23)$$

En remplaçant les expressions des flux $(\varphi_{dr_1}, \varphi_{qr_1}, \varphi_{dr_2}, \varphi_{qr_2})$ données par (2.19) dans (2.23), on obtient :

$$C_{em} = pL_m[(i_{qs_1} + i_{qs_2})i_{dr} - (i_{ds_1} + i_{ds_2})i_{qr}] \quad (2.24)$$

A partir des expressions des flux rotorique $(\varphi_{dr}, \varphi_{qr})$ exprimée dans (2.19) dans (2.23), on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\varphi_{dr} - L_m(i_{ds_1} + i_{ds_2})] \quad (2.25)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\varphi_{qr} - L_m(i_{qs_1} + i_{qs_2})] \quad (2.26)$$

En introduisant les expressions des courants (I_{dr}, I_{qr}) dans l'expression de couple électromagnétique (2.24), on obtient :

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m + L_r}[(i_{qs_1} + i_{qs_2})\varphi_{dr} - (i_{ds_1} + i_{ds_2})\varphi_{qr}] \quad (2.27)$$

II.3.3.5 Représentation d'états de la MASDE

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous forme :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BY \quad (2.28)$$

Avec :

$X = [\varphi_{ds_1} \quad \varphi_{ds_2} \quad \varphi_{qs_1} \quad \varphi_{qs_2} \quad \varphi_{dr} \quad \varphi_{qr}]^t$: Vecteur d'etat

$X = [v_{ds_1} \quad v_{ds_2} \quad v_{qs_1} \quad v_{qs_2} \quad 0 \quad 0]^t$: Vecteur d'entrée

Le flux magnétisant φ_m est la somme des deux flux magnétisants direct φ_{md} et en quadrature φ_{mq} , d'où :

$$\varphi_m = \sqrt{{\varphi_{md}}^2 + {\varphi_{mq}}^2} \quad (2.29)$$

A partir de système d'équations (2.19) les différents courants s'expriment comme suite :

$$\begin{cases} i_{ds_1} = \frac{\varphi_{ds_1} - \varphi_{md}}{L_{s_1}} \\ i_{ds_2} = \frac{\varphi_{ds_2} - \varphi_{md}}{L_{s_2}} \\ i_{qs_1} = \frac{\varphi_{qs_1} - \varphi_{mq}}{L_{s_1}} \\ i_{qs_2} = \frac{\varphi_{qs_2} - \varphi_{mq}}{L_{s_2}} \\ i_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - \varphi_{md}}{L_r} \\ i_{qr} = \frac{\varphi_{qr} - \varphi_{mq}}{L_r} \end{cases} \tag{2.30}$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = L_m\left(i_{ds_1} + i_{ds_2} + i_{dr}\right) \\ \varphi_{mq} = L_m\left(i_{qs_1} + i_{qs_2} + i_{qr}\right) \end{cases} \tag{2.31}$$

En introduisant les expressions des courants (2.30) dans (2.31), en auras :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = (\frac{\varphi_{ds_1}}{L_{s_1}} + \frac{\varphi_{ds_2}}{L_{s_2}} + \frac{\varphi_{dr}}{L_r})L_a \\ \varphi_{mq} = (\frac{\varphi_{qs_1}}{L_{s_1}} + \frac{\varphi_{qs_2}}{L_{s_2}} + \frac{\varphi_{qr}}{L_r})L_a \end{cases} \tag{2.32}$$

Avec :

$$L_a = \frac{1}{\frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{s_1}} + \frac{1}{L_{s_2}} + \frac{1}{L_r}} \tag{2.33}$$

En remplaçant le système d'équation (2.30) dans le système d'équation (2.17) et on le met sous forme d'un système d'équation d'état, en aura :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\varphi_{ds_1} = v_{ds_1} - \frac{r_{s_1}}{L_{s_1}}\left(\varphi_{ds_1} - \varphi_{md}\right) + \omega_s\varphi_{qs_1} \\ \frac{d}{dt}\varphi_{qs_1} = v_{qs_1} - \frac{r_{s_1}}{L_{s_1}}\left(\varphi_{qs_1} - \varphi_{mq}\right) - \omega_s\varphi_{ds_1} \\ \frac{d}{dt}\varphi_{ds_2} = v_{ds_2} - \frac{r_{s_2}}{L_{s_2}}\left(\varphi_{ds_2} - \varphi_{md}\right) + \omega_s\varphi_{qs_2} \\ \frac{d}{dt}\varphi_{qs_2} = v_{qs_2} - \frac{r_{s_2}}{L_{s_2}}\left(\varphi_{qs_2} - \varphi_{mq}\right) + \omega_s\varphi_{ds_2} \\ \frac{d}{dt}\varphi_{dr} = 0 - \frac{r_r}{L_r}\left(\varphi_{dr} - \varphi_{md}\right) - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ \frac{d}{dt}\varphi_{qr} = 0 - \frac{r_r}{L_r}\left(\varphi_{qr} - \varphi_{mq}\right) + \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{cases} \tag{2.34}$$

En développant ce système d'équation et en introduisant l'expression de φ_{md} et φ_{mq}, on trouvera :

$$\begin{cases}
\frac{d}{dt}\varphi_{ds_1} = v_{ds_1} - \left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right)\varphi_{ds_1} + \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}}\varphi_{ds_2} + \omega_s\varphi_{qs_1} + \frac{r_{s_1}L_a}{L_rL_{s_1}}\varphi_{dr} \\
\frac{d}{dt}\varphi_{qs_1} = -\left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right)\varphi_{qs_1} + v_{qs_1} + \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}}\varphi_{qs_2} - \omega_s\varphi_{ds_1} + \frac{r_{s_1}L_a}{L_rL_{s_1}}\varphi_{qr} \\
\frac{d}{dt}\varphi_{ds_2} = -\left(\frac{r_{s_2}}{L_{s_2}} - \frac{r_{s_2}L_a}{L^2{}_{s_2}}\right)\varphi_{ds_2} + v_{ds_2} + \frac{r_{s_2}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}}\varphi_{ds_2} + \omega_s\varphi_{qs_2} + \frac{r_{s_2}L_a}{L_rL_{s_2}}\varphi_{dr} \\
\frac{d}{dt}\varphi_{qs_2} = -\left(\frac{r_{s_2}}{L_{s_2}} - \frac{r_{s_2}L_a}{L^2{}_{s_2}}\right)\varphi_{qs_2} + v_{qs_2} + \frac{r_{s_2}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}}\varphi_{qs_2} - \omega_s\varphi_{ds_2} + \frac{r_{s_2}L_a}{L_rL_{s_2}}\varphi_{qr} \\
\frac{d}{dt}\varphi_{dr} = -\left(\frac{r_r}{L_r} - \frac{r_rL_a}{L^2{}_r}\right)\varphi_{dr} + \frac{r_rL_a}{L_rL_{s_1}}\varphi_{ds_1} + \omega_{gl}\varphi_{qr} + \frac{r_rL_a}{L_rL_{s_2}}\varphi_{ds_2} \\
\frac{d}{dt}\varphi_{qr} = -\left(\frac{r_r}{L_r} - \frac{r_rL_a}{L^2{}_r}\right)\varphi_{qr} + \frac{r_rL_a}{L_rL_{s_1}}\varphi_{qs_1} - \omega_{gl}\varphi_{dr} + \frac{r_rL_a}{L_rL_{s_2}}\varphi_{qs_2}
\end{cases} \tag{2.35}$$

On a alors :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix}
-\left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right) & \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & \omega_s & 0 & \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & 0 \\
\frac{r_{s_2}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & -\left(\frac{r_{s_2}}{L_{s_2}} - \frac{r_{s_2}L_a}{L^2{}_{s_2}}\right) & 0 & \frac{r_{s_2}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & \frac{r_{s_2}L_a}{L_rL_{s_2}} & 0 \\
-\omega_s & 0 & -\left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right) & -\frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & 0 & \frac{r_{s_1}L_a}{L_rL_{s_1}} \\
0 & -\omega_s & \omega_s & -\left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right) & 0 & \frac{r_{s_2}L_a}{L_rL_{s_2}} \\
\frac{r_{s_2}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & 0 & 0 & -\left(\frac{r_{s_2}}{L_{s_2}} - \frac{r_{s_2}L_a}{L^2{}_{s_2}}\right) & \omega_{gl} \\
0 & 0 & \frac{r_{s_1}L_a}{L_{s_1}L_{s_2}} & -\frac{r_rL_a}{L_rL_{s_2}} & -\omega_{gl} & -\left(\frac{r_{s_1}}{L_{s_1}} - \frac{r_{s_1}L_a}{L^2{}_{s_1}}\right)
\end{bmatrix}$$

II.3.3.6 Simulation numérique

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des machines électrique. Elle nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes utilisant beaucoup de précision. De nos jours il existe toute une série de programmes pour machine électrique.

Afin de simuler la MASDE, nous avons opté pour logiciel MATLAB. Les données de la machine utilisée en simulation sont données par la figure (II.3). Nous avons simulé la MASDE alimenté par deux sources de tension exprimées comme suite :

$$\begin{cases}
v_{sa_1} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t) \\
v_{sb_1} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
v_{sc_1} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{sa_2} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t - \alpha) \\ v_{sb_2} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t - \alpha - \dfrac{2\pi}{3}\right) \\ v_{sc_2} = \sqrt{2}V_s \sin\left(\omega_s t - \alpha + \dfrac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Avec :

V_s : La valeur efficace de tension.

ω_s : Pulsation d'alimentation.

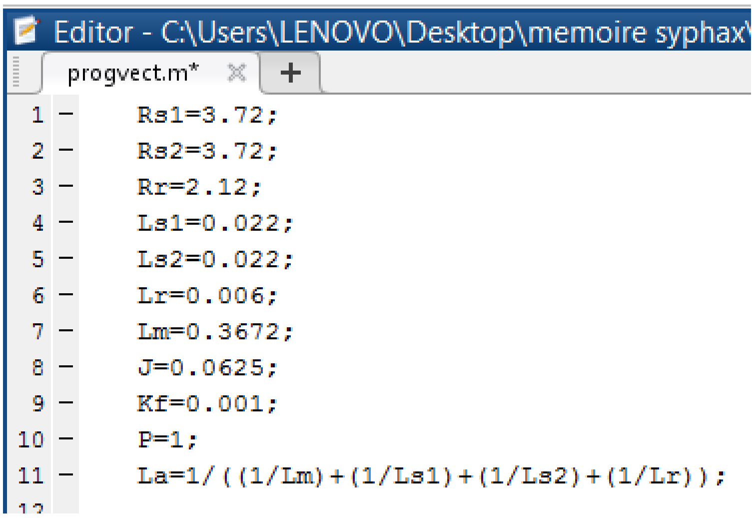


Figure II. 3 : Les données de la machine

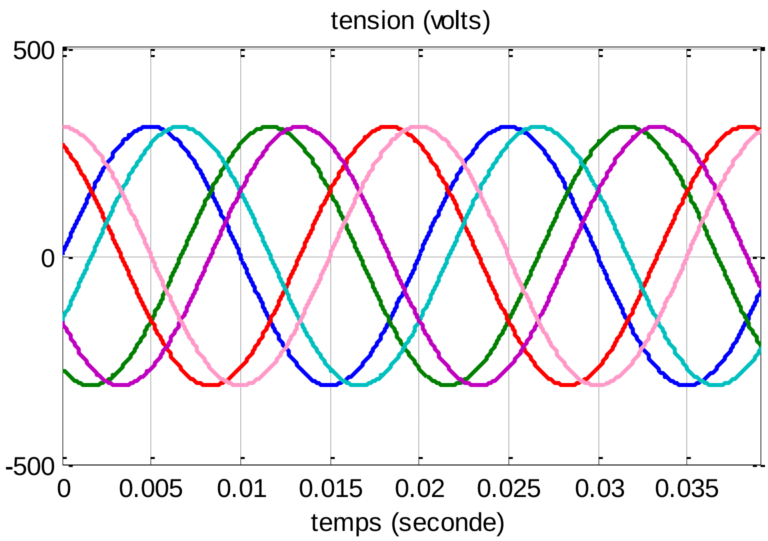
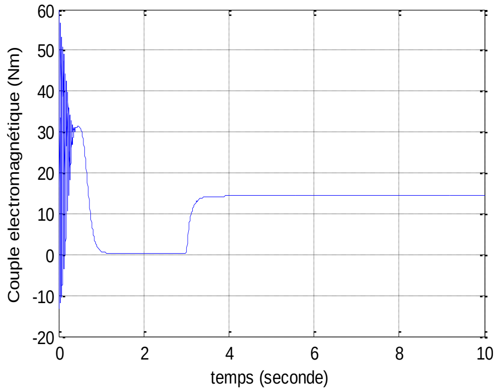
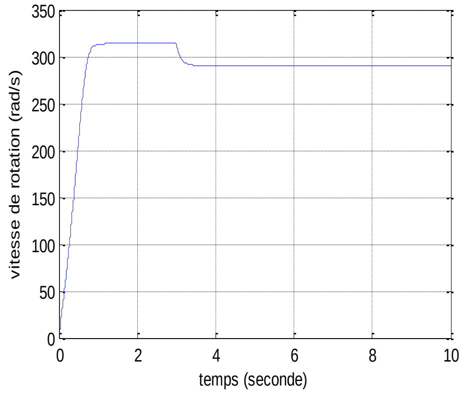


Figure II. 4 : Source de tenions triphasées décalées de 30°

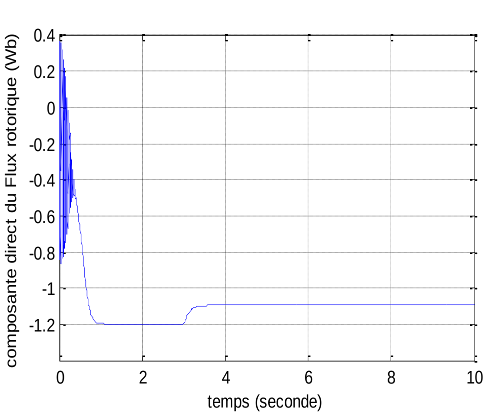
Les figures suivantes montreront clairement les résultats des simulations obtenus a partir d'un démarrage à vide du MASDE alimentée par deux systèmes de tension triphasées (220V-50) suivi de l'application d'une charge de 14 N.m a l'instant 3s.



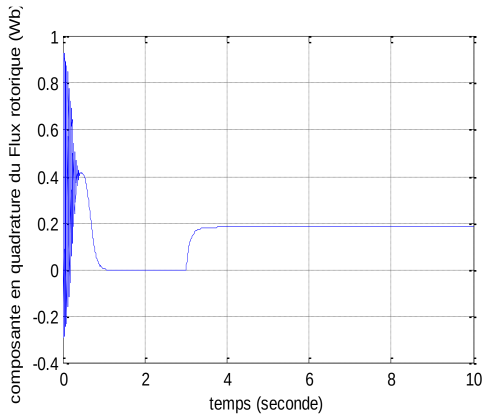
(a)



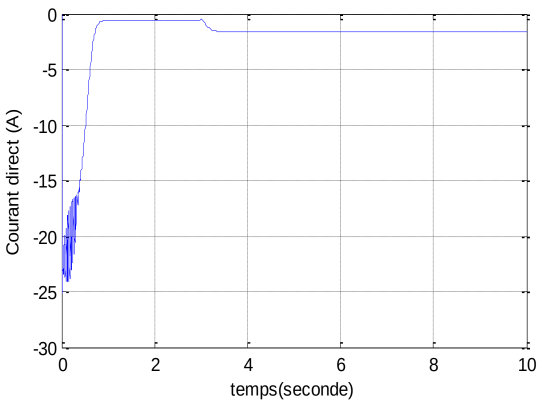
(b)



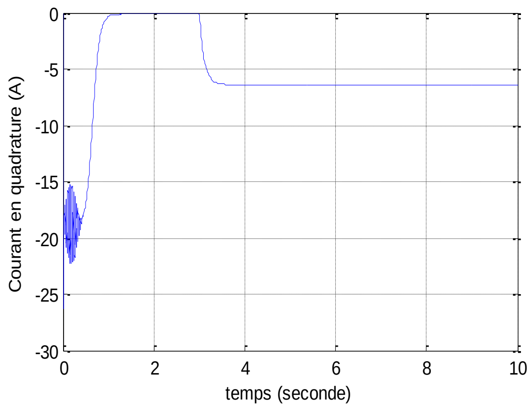
(c)



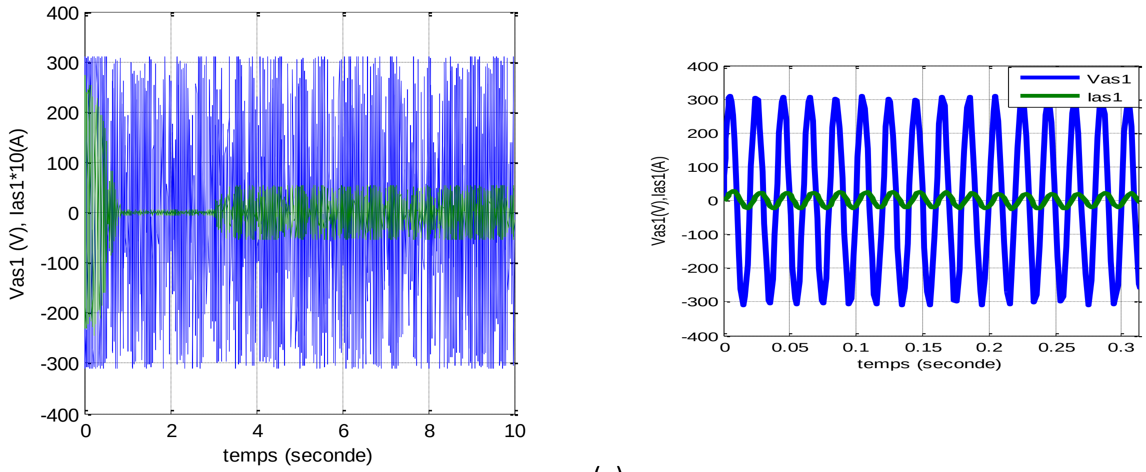
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure II. 5 : Performance de la MASDE alimentée par le réseau électrique

Interprétation des résultats

Les performances de la conduite de la machine asynchrone double étoile en fonctionnement en charge montrent que :

En appliquant une charge 14 N.m à t=3s, le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant en régime permanant. On remarque une diminution de la vitesse de la rotation et une augmentation du courant statorique et du courant de barre à l'instant d'application du couple résistant.

Les courants statoriques i_{as_1} et i_{as_2} des deux étoiles sont déphasés de 30° et leurs amplitudes maximales sont égales. La forme des courants statoriques en régime permanant est parfaitement sinusoïdale.

II.3.4 Alimentation de la MASDE par onduleur de tension a commande MLI

II.3.4.1 Modélisation de l'onduleur

Un onduleur autonome, a commande adjacente ou MLI, est un conservateur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut-être a fréquence fixe ou variable [15] [16].

Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, a base d'onduleur de tension a fréquence variable. Chaque étoile de la MASDE est connectée a un onduleur triphasée a commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposées parfaits et dont les commande sont disjonctes et complémentaires, chaque interrupteur est présentée par une paire transistordiode, qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivant :

$$f_i = \begin{cases} +1 \text{ si } k_i \text{ est fermé , } k'_i \text{ est ouvert} \\ 0 \text{ si } k_i \text{ est ouvert , } k'_i \text{ est fermé} \end{cases}$$

Avec :

$$f_i + \overline{f_i} = 1 \text{ est } i = 1 \dots 3$$

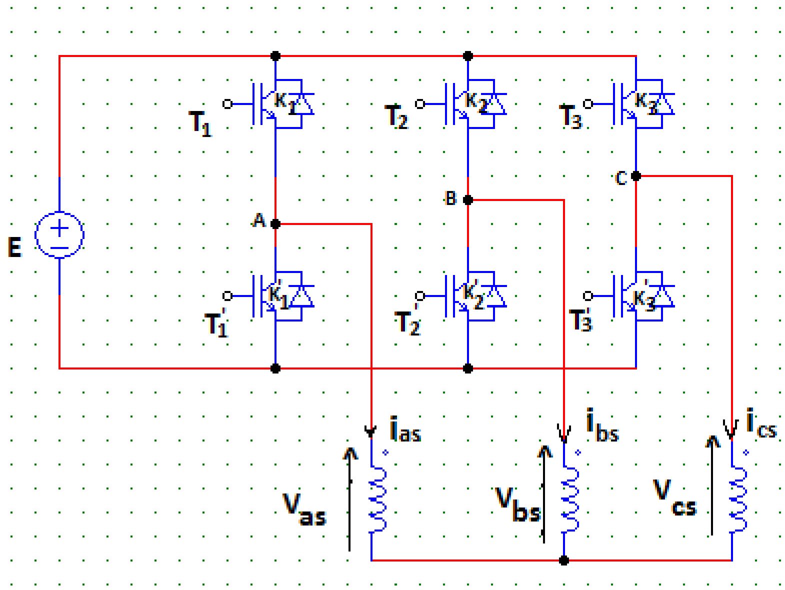


Figure II. 6 : schéma onduleur de tension triphasée

Ainsi les tenions composées sont données par :

$$V_{AB} = v_{sa_1} - v_{bs_1} = E\left(f_1 - f_2\right) \tag{2.36}$$

$$V_{BC} = v_{bs_1} - v_{cs_1} = E\left(f_2 - f_3\right) \tag{2.37}$$

$$V_{CA} = v_{cs_1} - v_{as_1} = E\left(f_3 - f_1\right) \tag{2.38}$$

Les tensions simple $v_{as_1}, v_{bs_1}, v_{cs_1}$ forment un système triphasée équilibre, tel que :

$$v_{as_1} + v_{bs_1} + v_{cs_1} = 0 \tag{2.39}$$

La résolution des équations (2.36), (2.37), (2.38) et (2.39) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as_1} \\ v_{bs_1} \\ v_{cs_1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

Pour la seconde onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as_2} \\ v_{bs_2} \\ v_{cs_2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

II.3.4.2 Commande par modulation sinus-triangle

La MLI sinus-triangle elle est réalisée en comparant une onde modulante de basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse de forme triangulaire de haute fréquence.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et le moduler. La fréquence de commutation des commutateurs est fixée par porteuse [10].

Les tensions de référence sinusoïdales sont exprimées par :

- Pour la première étoile :

$$\begin{cases} v_{réfa_1} = V_m \ sin(2\pi ft) \\ v_{réfb_1} = V_m \ sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} \\ v_{réfc_1} = V_m \ sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \tag{2.42}$$

- Pour la deuxième étoile :

$$\begin{cases} v_{réfa_2} = V_m \ sin(2\pi ft - \alpha) \\ v_{réfb_2} = V_m \ sin(2\pi ft - \alpha - \frac{2\pi}{3} \\ v_{réfc_2} = V_m \ sin(2\pi ft - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \tag{2.43}$$

Equation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p\,(t) = \begin{cases} V_{pm}\left[4(t/T_p) - 1\right] & si \quad 0 \le t \le T_p/2 \\ V_{pm}\ \left[-4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3\right] & si \quad T_p/2 \le t \le T_p \end{cases} \tag{2.44}$$

Ou :

T_p : Période de la porteuse.

V_{pm} : Amplitude de la porteuse.

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation m représente le rapport de la fréquence modulation (f_p) sur la fréquence de référence. $m = \frac{f_p}{f}$

- Le coefficient de réglage en tension r représente le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) a la valeur crête de l'onde de modulation(V_{pm}).

$$r = \frac{v_m}{v_{pm}}$$

II.3.4.3 Association de la MASDE-onduleurs de tension a commande MLI

La représentions schématique de la MASDE avec deux onduleurs de tenions a commande MLI sinus-triangle est illustré par la figure suivante :

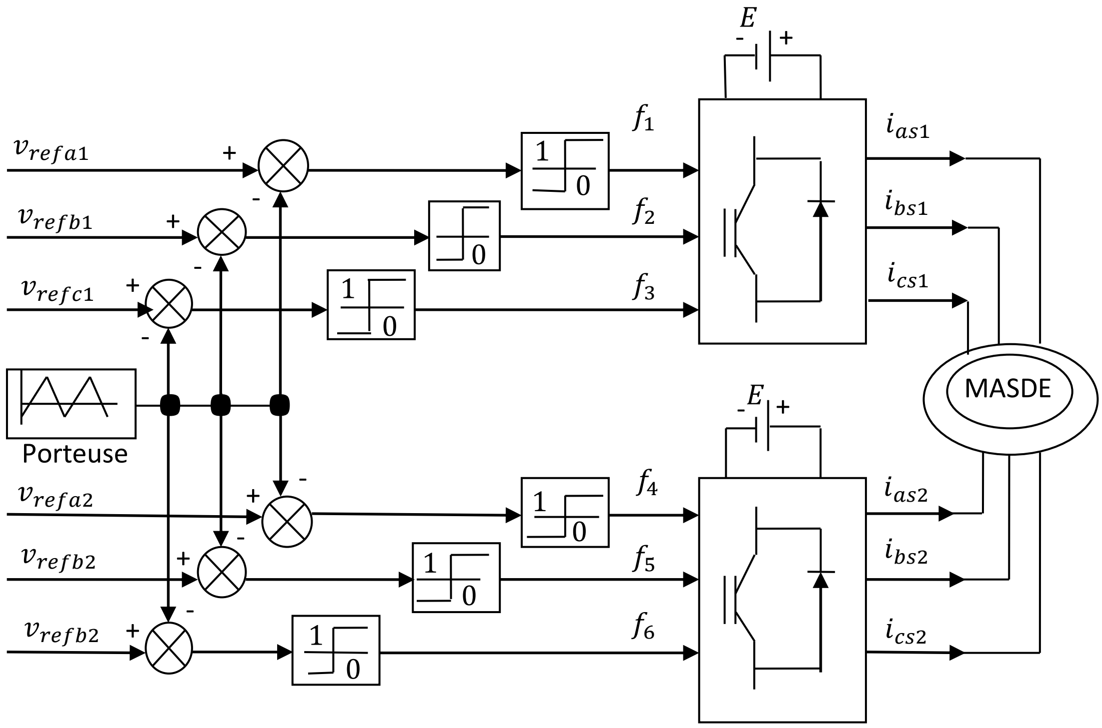


Figure II. 7 : Association MASDE-sources sinusoïdales

Pour la simulation, on va implanter le modèle électrique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink. La simulation est effectuée avec un décalage angulaire$\alpha = 30°$.

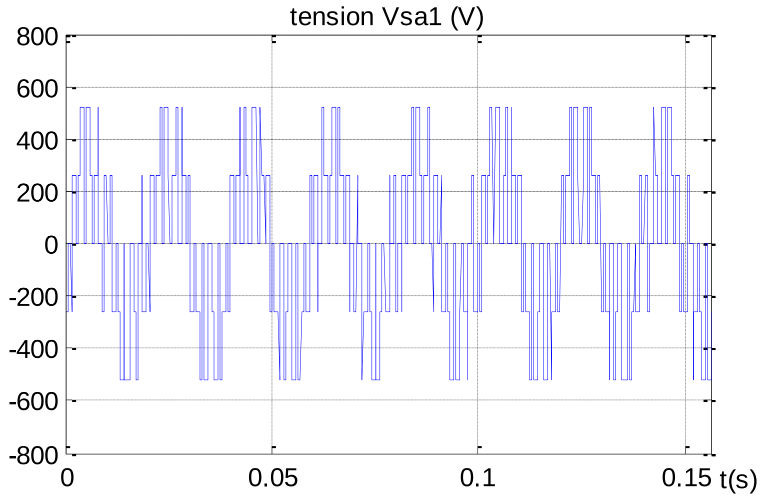


Figure II. 8 : Les fonctions sinus-triangle

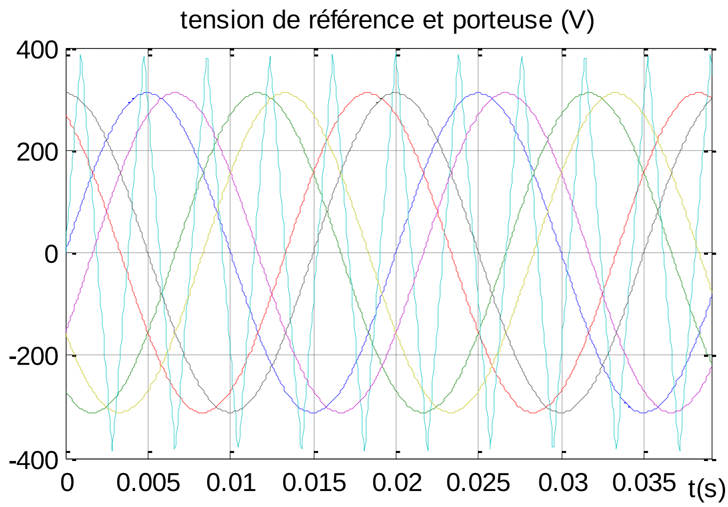


Figure II. 9 : Tension simple Vas

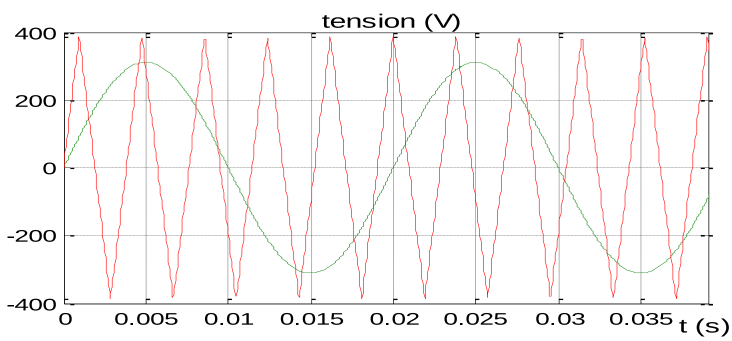
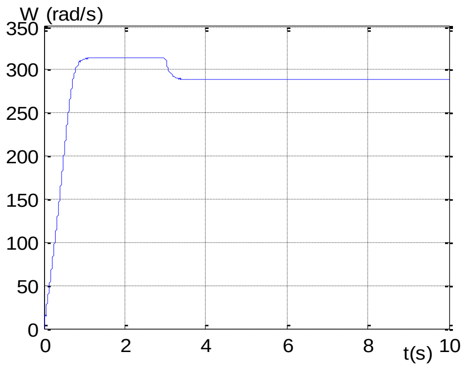
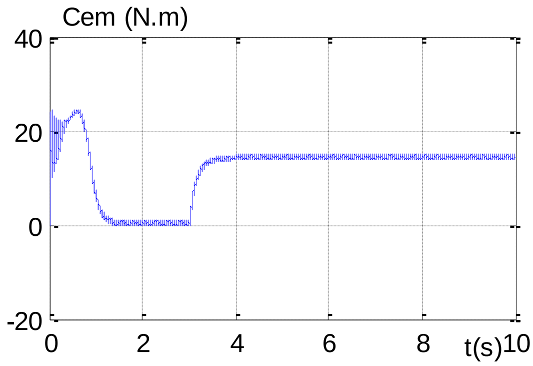


Figure II. 10 : Intersection tensions de référence et la porteuse

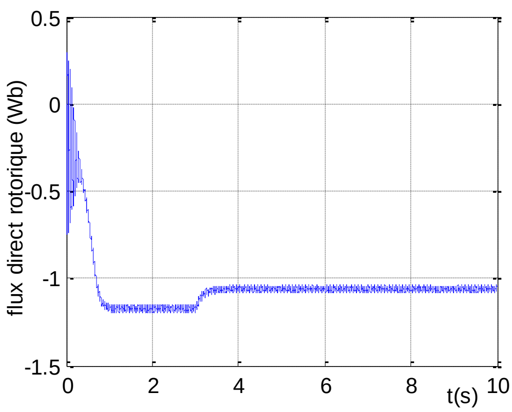
Pour les besoins industrielle, la machine est alimentée via des onduleurs de tensions. En effet les deux système d'enroulement logés dans la partie fixe de la machine sont alimentée par deux onduleurs commandés par moduulation de largeurs d'impulsions sinus triangle. Aprés un demarage a vide, la machine est testée pour un fonctionnement en mode moteur, par l'application d'un couple résistant égale a « Cr= 14 Nm », dans un laps de temps [3sec].



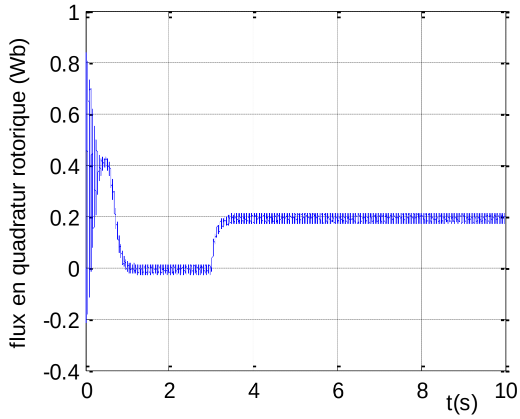
(a)



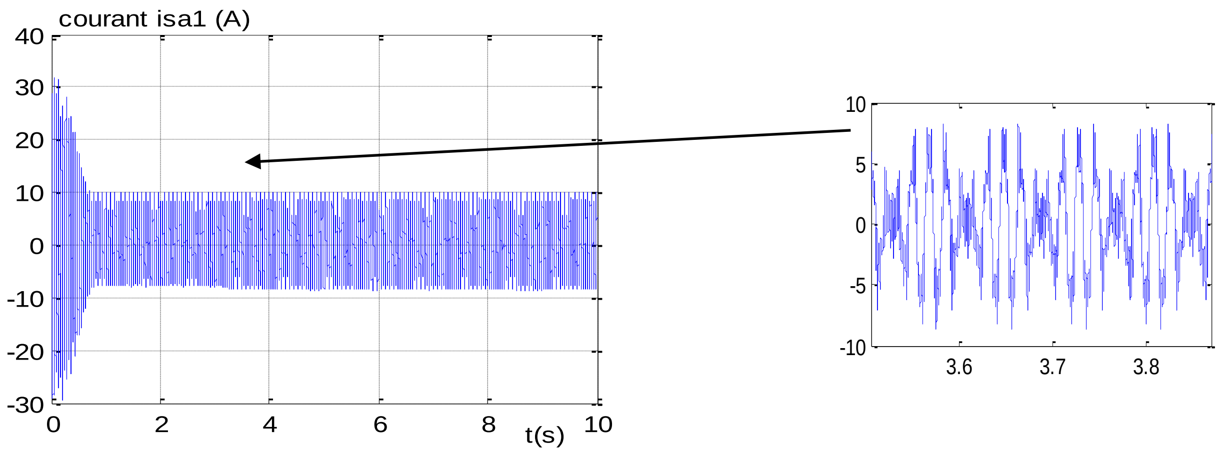
(b)



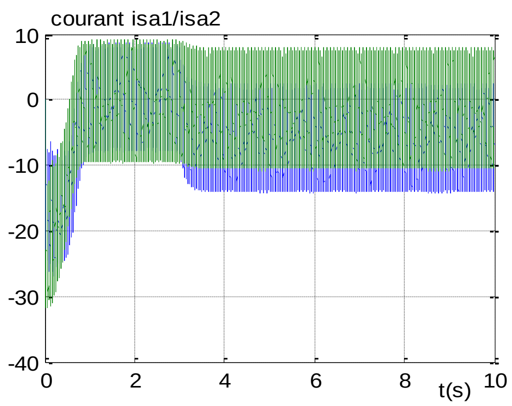
(c)



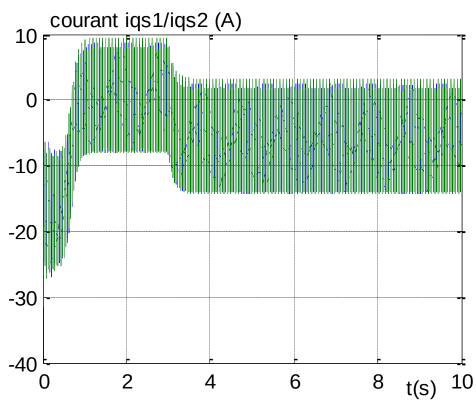
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure II. 11 : Performance de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension en charge

Interprétation des résultats

La vitesse a la même allure que pour le test effectué avec la machine alimentée directement par les sources de tension. La figure (II.11) montre qu'au démarrage, la vitesse attient « $N = 313.58\,rd/s$ » avant que la charge ne soit connectée ou que la vitesse de rotation chute a « $N = 290.30\,rd/s$ » a partir de « t=3s ».

Pour une alimentation par onduleur de tension, le couple circule exactement de la même manière que pour une alimentation secteur qui équilibre modes de fonctionnement de la machine. Cependant, il n'est pas possible de ne pas remarquer les ondulations de couple autour de la valeur rapportée par la charge. Les ondulations entre « - 4 Nm » et « 4 Nm» sont principalement dues a la présence d'harmonique crées par onduleurs de tension.

L'apparence du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature concorde de très prés avec l'allure du couple électromagnétique.

Tableau II. 1 : Performance de la MASDE alimentée par deux onduleurs de tension en charge

	Vide $[0sec - 3sec]$	Charge $[3sec - +\infty]$
Flux direct rotorique $\varphi\_dr\ [Wb]$	-1.22	-1.09
Flux en quadrature rotorique $\varphi\_qr\ [Wb]$	-0.005	0.18

Les courants direct et en quadrature évoluent de manière similaire a la vitesse de rotation. Selon le mode de fonctionnement, les valeurs des deux composantes du courant rotorique varient en fonction de la forme de la vitesse. La figures (II.11) ou est tracé les courants direct et en quadratures montreront très clairement les ondulations autour du « consigne ».

Au démarrage, tout comme lors de l'alimentation direct de la machine sur le réseau électrique, les courant absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de quatre a cinq fois les valeur nominales, ce qui peut endommager la machine. L'état stable est rapidement attient après une période de « t= 0.4 seconde ». Les valeurs obtenues lors de ce test sont légèrement supérieures à celle constatées lors de l'alimentation directe sur le réseau électrique. Ainsi à vide, la machine absorbe un courant de presque « 2 A » et en charge, le courant absorbé est de « 4 A ». Ces ondulations et cette légère augmentation des valeurs des courants sont essentiellement dues à l'alimentation de la machine par des onduleurs de tension.

II.4 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la création d'un modèle mathématique de la MASDE basé sur une théorie unifiée des machines électriques avec des centaines hypothèses simplificatrices.

L'étude des caractéristiques de la MASDE alimenté directement à partir des sources sinusoïdales, puis à partir des onduleurs de tensions avec commande MLI à été accomplie.

Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge à été simulé par le logiciel MATLAB/ SIMULINK.

L'insertion de la charge dans les deux cas d'alimentations engendre une variation de la vitesse, ce qui nécessite une régulation.

Dans le chapitre suivant on s'intéressent à la régulation de vitesse de la machine par la commande vectorielle.

Chapitre III

Commande vectorielle de la machine asynchrone à double étoile

III.1 Introduction

La commande vectorielle à été introduite pour la premiere fois par Blascke en 1972 [17]. Ce pendant, il n'à pu être mis en œuvre et effectivement utilisé que grâce aux progrès de la micro-électronique. En effet, il nécessite des calculs de transformée de Park, d'évaluation de fonctions trigonométrique, des intégrations, des régulations etc., ce qui ne pourrait se faire en analogique pur.

L'objet de ce chapitre est de permettre l'application de ces techniques de commande à une machine asynchrone double étoile, notamment la commande vectorielle pour régler la vitesse de la machine.

III.2 Origines de la commande vectorielle

Les débuts de la commande vectorielle, contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du XIXème siècle et aux travaux d'A. Blondel sur la théorie de la réaction à deux axes. Cependant, compte tenu de la technologie de l'époque, il n'était pas question de transférer cette théorie au contrôle des machines électriques. Ce n'est qu'a la fin des années 1950 que l'idée du contrôle vectorielle, également connu sous le nom de contrôle orienté flux, à germé en raison de l'utilisation de la méthode temporelle en Europe de l'Est [18].

III.3 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle (ou commande de flux orienté) est de diriger l'une des composantes de flux du stator, du rotor ou de l'entrefer vers l'axe du référentiel tournant a la vitesse ω_s.

Ce principe de commande d'écoulée, conditionnant le fonctionnement stable du moteur asynchrone est la principale caractéristique de la commande vectorielle conduisant aux hautes performances industrielles des entrainements asynchrone (machine de papeterie, laminoirs, traction électrique etc.) supportant les perturbations de la charge [18] [19].

Pour la machine asynchrone double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs génératrices du couple électromagnétique et du flux rotorique. Pour cela, il faut choisir de la commande et un système d'axes assure le decouplage du fllux et du couple.

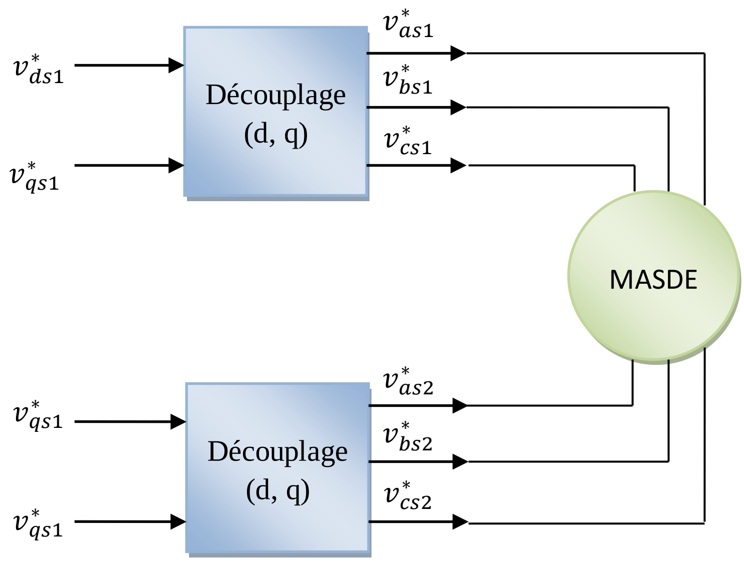


Figure III. 1 : Principe de pilotage vectoriel de la MASDE

Sachant que l'expression du couple électromagnétique (2.27) de la machine asynchrone à double étoile est en fonction des courants statorique et des flux rotorique. En choisissant l'orientation du flux rotorique suivant l'axe direct d ($\varphi_{dr} = \varphi_r, \varphi_{qr} = 0$), on aura la forme du couple suivante :

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m+L_r}\varphi_r\left(i_{qs_1} + i_{qs_2}\right) = K''\varphi_r i_{qs} \tag{3.1}$$

Avec :

$$K'' = p\frac{L_m}{L_m + L_r}, \quad et \quad i_{qs} = \left(i_{qs_1} + i_{qs_2}\right)$$

D'après l'équation (3.1), nous constant que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant.

III.4 Choix d'orientation du flux

Il existe trois types d'orientation du flux :

- Orientation de flux rotorique avec les conditions :

$$\psi_{dr} = \psi_r \qquad \psi_{qr} = 0 \tag{3.2}$$

- Orientation de flux statorique avec les conditions :

$$\psi_{ds} = \psi_s \qquad \psi_{qs} = 0 \tag{3.3}$$

- Orientation de flux d'entrefer avec les conditions :

$$\psi_{dm} = \psi_m \qquad \psi_{qm} = 0 \tag{3.4}$$

Pour le MASDE, nous avons choisi l'orientation du flux du rotor car elle permet la protection d'un variateur de vitesse ou le flux et le couple électromagnétique sont contrôlés indépendamment par les courant statorique.

Si on considère le flux rotorique avec l'axe (d) de référentiel lie au champ tournant, c'est-à-dire :

$$\psi_{dr} = \psi_r \quad ; \quad \psi_{qr} = 0$$

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m+L_r}\left[\left(i_{qs_1} + i_{qs_2}\right)\psi_{dr} - \left(i_{ds_1} + i_{ds_2}\right)\psi_{qr}\right] \tag{3.5}$$

L'équation devient :

$$C_{em} = p\frac{L_m}{L_m+L_r}\left[\left(i_{qs_1} + i_{qs_2}\right)\psi_{dr} = K\psi_r i_{qs}\right] \tag{3.6}$$

Avec :

$$i_{qs} = i_{qs_1} + i_{qs_2}$$

$$K = p\frac{L_m}{L_m + L_r}$$

D'après l'équation nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression fait référence au couple de la machine à courant continue à excitation séparée. On en conclu donc que le fonctionnement de la machine asynchrone double étoile, avec sa commande vectorielle est similaire à celui de la machine à courant continue à excitation séparée.

III.5 Méthode de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherche menés sur le sujet utilisant deux méthodes principales. La première méthode dite directe à été initiée par F.Blaschke et la seconde connue sous le nom de méthode indirecte elle à été introduite par k.Hasse.

III.5.1 Méthode direct

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase, qui doit être vérifié quel que soit le régime de fonctionnement [20]. Soit que deux procédés sont utilisés :

- la mesure du flux dans l'entrefer de la machine à laide de capteur. L'inconvénient principal de cette technique réside dans le ait que les capteurs du flux sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas fonctionner dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs.
- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématique. Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

III.5.2 Méthode indirecte

Le principe de cette méthode et qu'on n'utilise pas l'amplitude du flux de rotor, mais seulement sa position. La description 'méthode indirecte' signifie que l'on peut éliminer estimateur du flux, mais cela nécessite la présence d'un capteur de position du rotor. Cette méthode est sensible au changement des paramètres de la machine [21].

III.6 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les lois de commande sont obtenue à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et sont dérivées de la relation donnant la vitesse de glissent par la direction du flux rotorique ou la position du flux. Le flux rotorique φ_r^* et le couple electromagnétique C_{em}^* sont considérés comme des grandeurs de référence. La figure (III.2) montre un schéma bloc simplifie de la commande à flux orienté.

En expriment que :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^* \tag{3.7}$$

$$\varphi_{qr} = 0 \tag{3.8}$$

Et en remplaçant (3.7), (3.8) dans les équations de tension rotorique (2.17), on obtient :

$$r_r i_{dr} = 0 \Rightarrow I_{dr} = 0 \tag{3.9}$$

$$r_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \varphi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = \frac{\omega_{gl}^* \varphi_r^*}{R_r} \tag{3.10}$$

Et à partir des équations (2.25) et (2.26), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m+L_r}[\varphi_r^* - L_m(i_{ds_1} + i_{ds_2})] \tag{3.11}$$

$$i_{qr} = -\frac{1}{L_m+L_r}(i_{qs_1} + i_{qs_2}) \tag{3.12}$$

En introduisant (3.11) et (3.12) dans le système d'équations des flux statorique (2.19), on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{ds_1} = \lambda_1 i_{ds_1} + L_r\mu i_{ds_2} + \mu\varphi_r^* \\ \varphi_{qs_1} = \lambda_1 i_{qs_1} + L_r\mu i_{qs_2} \\ \varphi_{ds_2} = \lambda_2 i_{ds_2} + L_r\mu i_{ds_1} + \mu\varphi_r^* \\ \varphi_{qs_2} = \lambda_2 i_{qs_2} + L_r\mu i_{qs_1} \end{cases} \tag{3.13}$$

Avec :

$$\mu = \frac{L_m}{L_m+L_r} \quad et \quad \lambda_{1,2} = L_{s1,2} + L_r\mu$$

En substituant (3.9) dans (3.11), on tire :

$$\varphi_r^* = L_m(i_{ds_1} + i_{ds_2}) \tag{3.14}$$

A partir de l'équation (3.12), on trouve :

$$L_m(i_{qs_1} + i_{qs_2}) = -(L_m + L_r)i_{qr} \tag{3.15}$$

En remplaçant (3.13) a (3.15) dans le système d'équations des tensions statorique (2.17) et en introduisant l'expression (3.10), on obtient :

$$\begin{cases} {v_{ds_1}}^* = r_1 i_{ds_1} + L_{s_1}Pi_{ds_1} - \omega_s^*(L_{s_1}i_{qs_1} + \tau_r\varphi_r^*\omega_{gl}^*) \\ {v_{qs_1}}^* = r_{s_1}i_{qs_1} + L_{s_1}Pi_{qs_1} + \omega_s^*(L_{s_1}i_{ds_1} + \varphi_r^*) \\ {v_{ds_2}}^* = r_{s_2}i_{ds_2} + L_{s_2}Pi_{ds_2} - \omega_s^*(L_{s_2}i_{qs_2} + \tau_r\varphi_r^*\omega_{gl}^*) \\ {v_{qs_2}}^* = r_{s_2}i_{qs_2} + L_{s_2}Pi_{qs_2} + \omega_s^*(L_{s_2}i_{ds_2} + \varphi_r^*) \end{cases} \tag{3.16}$$

Avec : $\tau_r = \frac{L_r}{r_r}$ et $\omega_{gl}^* = \omega_s^* - \omega_r$

P : Operateur de la Laplace.

En introduisant l'équation (3.10) dans (3.12), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{r_r L_r}{(L_m+L_r)}\frac{(i_{qs_1}+i_{qs_2})}{\varphi_r^*} \tag{3.17}$$

A partir de la relation (3.3), on trouve :

$$\left(i_{qs_1} + i_{qs_2}\right) = \frac{(L_m + L_r)}{PL_m} \frac{C_{em}^*}{\varphi_r^*} \tag{3.18}$$

Le système d'équation électrique (3.16) montre que les tensions (${v_{ds_1}}^*, {v_{qs_1}}^*, {v_{ds_2}}^*$, ${v_{qs_2}}^*$) influent au même temps sur les composantes des courants statorique directes et en quadrature(${i_{ds_1}}^*, {i_{qs_1}}^*, {i_{ds_2}}^*,\ {i_{qs_2}}^*$), donc sur le flux et sur le couple. Il est alors nécessaire de réaliser un découplage. Cela en définissant de nouvelle variable $V_{ds_{1r}}, V_{qs_{1r}}, V_{ds_{2r}}\ et\ V_{qs_{2r}}$ n'agissant respectivement que sur $I_{ds_1}, I_{qs_1}, I_{ds_2},\ I_{qs_2}$ tels que :

$$\begin{cases} v_{ds_{1r}} = r_{s_1} i_{ds_1} + L_{s_1} P i_{ds_1} \\ v_{qs_{1r}} = r_{s_1} i_{qs_1} + L_{s_1} P i_{qs_1} \\ v_{ds_{2r}} = r_{s_2} i_{ds_2} + L_{s_2} P i_{ds_2} \\ v_{2r} = r_{s_2} i_{qs_2} + L_{s_2} P i_{qs_2} \end{cases} \tag{3.19}$$

Afin de composer l'erreur introduite lors de découplage, les tensions statorique de référence a flux constant sont exprimées par :

$$\begin{cases} {v_1}^* = v_{ds_{1r}} - v_{ds_{1c}} \\ {v_{qs_1}}^* = v_{qs_{1r}} + v_{qs_{1c}} \\ {v_{ds_2}}^* = v_{ds_{2r}} - v_{ds_{2c}} \\ {v_{qs_2}}^* = v_{qs_{2r}} + v_{qs_{2c}} \end{cases} \tag{3.20}$$

$$\begin{cases} v_{ds_{1c}} = \omega_s^* (L_{s_1} i_{qs_1} + \tau_r \varphi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs_{1c}} = \omega_s^* \left(L_{s_1} i_{ds_1} + \varphi_r^*\right) \\ v_{ds_{2c}} = \omega_s^* (L_{s_2} i_{qs_2} + \tau_r \varphi_r^* \omega_{gl}^*) \\ v_{qs_{2c}} = \omega_s^* \left(L_{s_2} i_{ds_2} + \varphi_r^*\right) \end{cases} \tag{3.21}$$

III.6.1 Identifications des paramètres des régulateurs PI

L'identification des paramètres des régulateurs PI des systèmes dont la fonction de transfert est du première ordre, telle que :

$$H(P) = \frac{1}{\alpha P + b} \tag{3.22}$$

Se fait d'une manière générale comme suit :

La fonction de transfert de régulateur PI est donnée par :

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \tag{3.23}$$

Le schéma représentatif de la boucle de régulation d'un système asservi du premier ordre à retour unitaire régulé par un PI est donné par la figure (III.2).

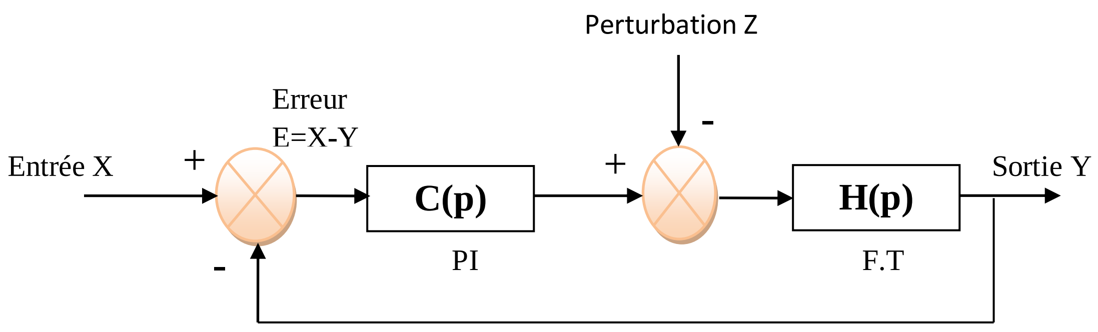


Figure III. 2 : Schéma d'un système asservi de premier ordre régulé par un PI

La perturbation est négligée dans les étapes d'identification des paramètres des régulateurs. La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi est :

$$T(P) = C(P)H(P) = \frac{K_p P + K_i}{\alpha P^2 + bP} \tag{3.24}$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(P) = \frac{T(P)}{1+T(P)} = \frac{K_P P + K_i}{\alpha P^2 + (b+K_P)P + K_i} \tag{3.25}$$

$$C(P) = \frac{1}{TP+1} \tag{3.26}$$

Il suffit d'identifier (3.25) et (3.26) comme suit :

$$\frac{K_P P + K_i}{\alpha P^2 + (b+K_P)P + K_i} = \frac{1}{TP+1} \tag{3.27}$$

Ce qui donne :

$$K_P T P^2 + (K_i T + K_P)P + K_i = \alpha P^2 + (b + K_P)P + K_i \tag{3.28}$$

D'où :

$$\begin{cases} K_P = \frac{\alpha}{T} \\ K_i = \frac{b}{T} \end{cases} \tag{3.29}$$

Le schéma de la boucle de régulation des courants statorique (étoile 1 et 2) :

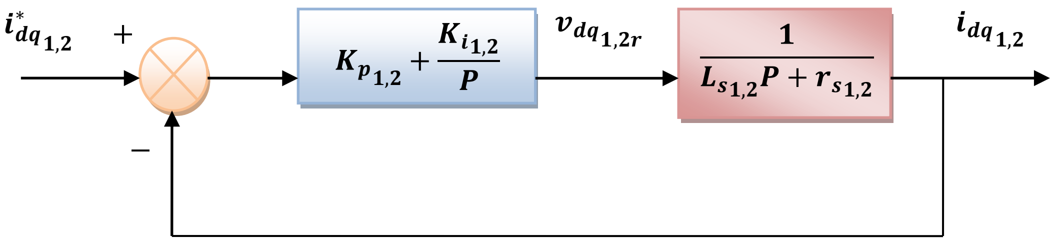


Figure III. 3 : Schéma de la boucle de régulation des courants statorique

Avec :

$$\begin{cases} K_{Ps_1} = \frac{L_{s_1}}{T} \\ K_{is_1} = \frac{r_{s_1}}{T} \end{cases} \quad et \quad \begin{cases} K_{Ps_2} = \frac{L_{s_2}}{T} \\ K_{is_2} = \frac{r_{s_2}}{T} \end{cases} \tag{3.30}$$

Pour avoir une dynamique du processus, on prend $T = \frac{\tau_r}{6}$, avec $\tau_r = \frac{L_r}{r_r}$ représente la constante de temps électrique (rotorique) du système.

III.6.2 Applications de la commande vectorielle indirecte sur la MASDE

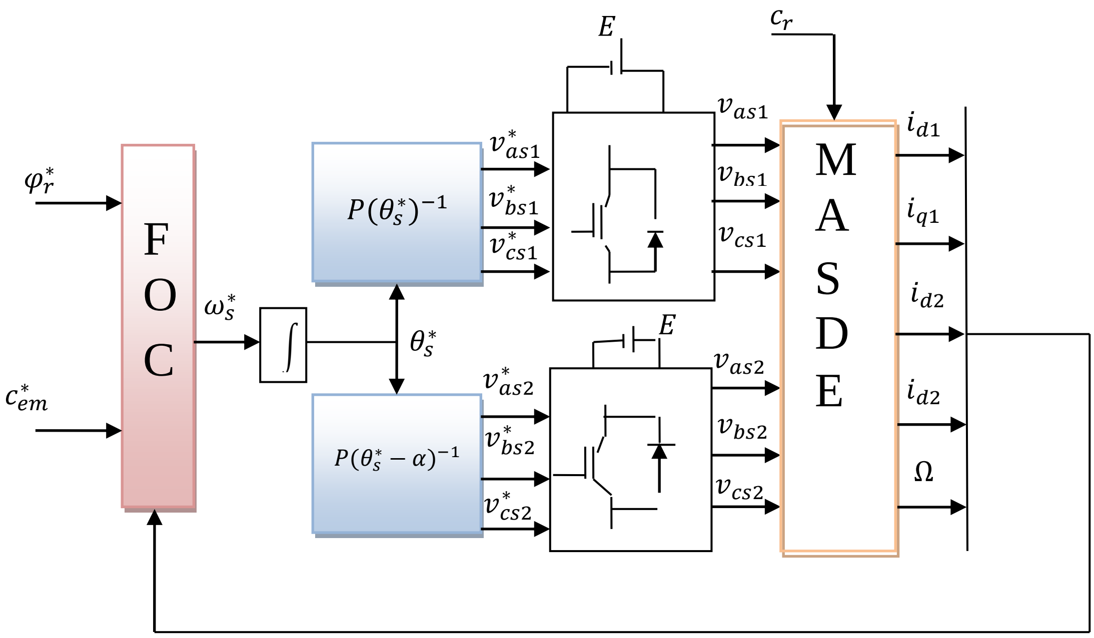


Figure III. 4 : Représentations schématique de la commande FOC sur la MASDE

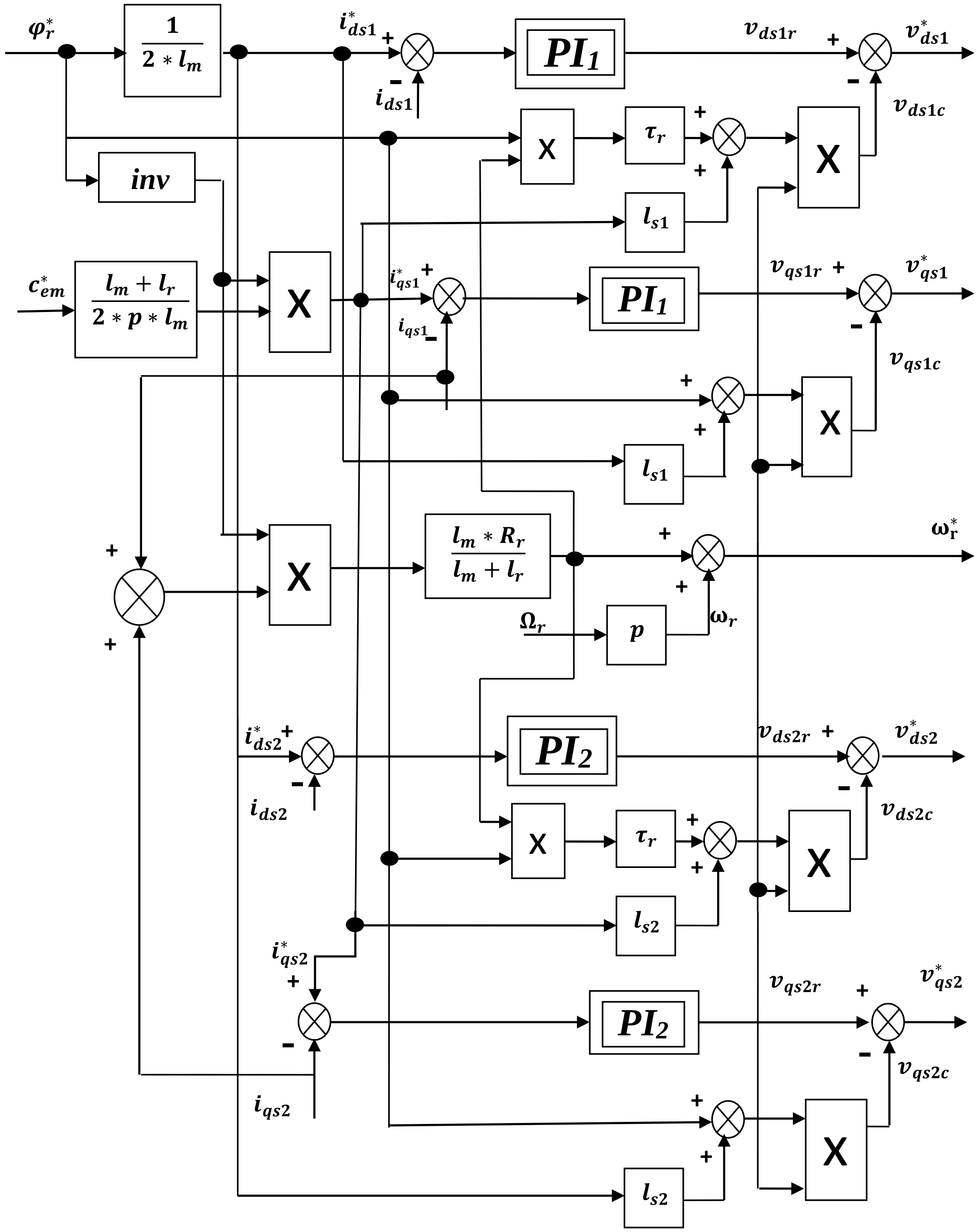


Figure III. 5 : Représentation schématique du bloc de découplage FOC

III.6.3 Simulation

La figure (III.6) représente l'évolution des caractéristique de la MASDE par la commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse (par orientation du flux rotorique), en commandent le flux de référence ${\varphi_r}^* = 1\,Wb$, et le couple électromagnétique de référence sous forme de créneaux ${C_{em}}^* = [14, -14, 10]N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [0\ 2]s, [2\ 4]s, [4\ 6]s$.

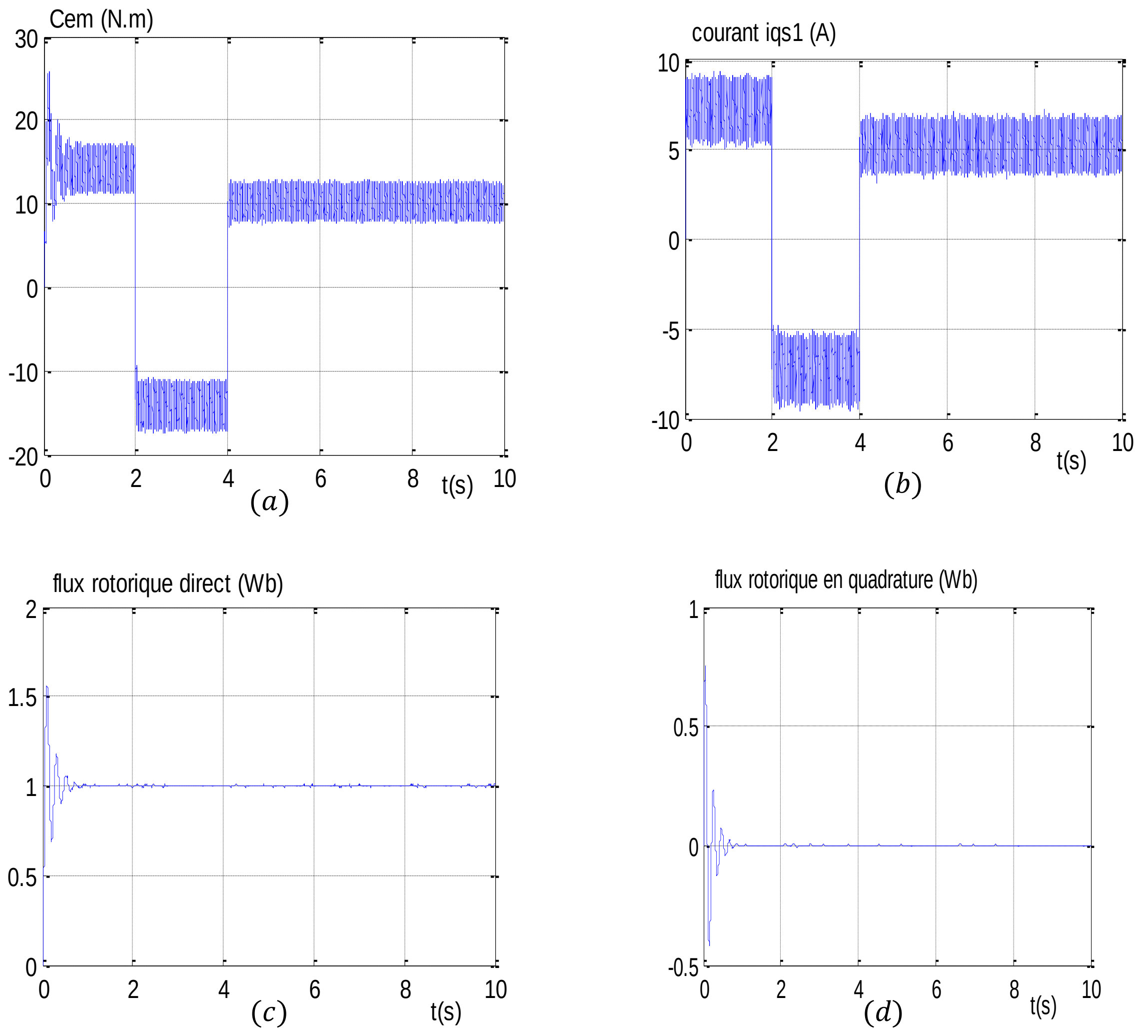


Figure III. 6 : L'évolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

D'après les résultats obtenue on remarque qu'en régime permanant le couple électromagnétique suit parfaitement le couple de référence imposé, le flux rotorique suivant l'axe direct demeure stable et égale à la valeur imposé (1Wb), celui en quadrature s'annule.

Nous remarquons que la valeur brusque du couple électromagnétique n'influe pas sur le flux rotorique représenté par les composantes $\varphi_{dr}\ et\ \varphi_{qr}$, le courant en quadrature I_{qr} varie d'une manière identique à celle du couple électromagnétique. Le découplage est assuré, du fait que le flux rotorique est régulé indépendamment du couple électromagnétique régulé par les composantes des courants statorique en quadrature.

III.7 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode, consiste a déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela est réalisable pour un bloc de défuxage défini par la fonction non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \varphi_r{}^* = \phi_n & \text{si} \quad |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r{}^* = \phi_n = \frac{\Omega_n}{|\Omega|} & \text{si} \quad |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \tag{3.31}$$

Il est schématisé par la figure III.7 suivante :

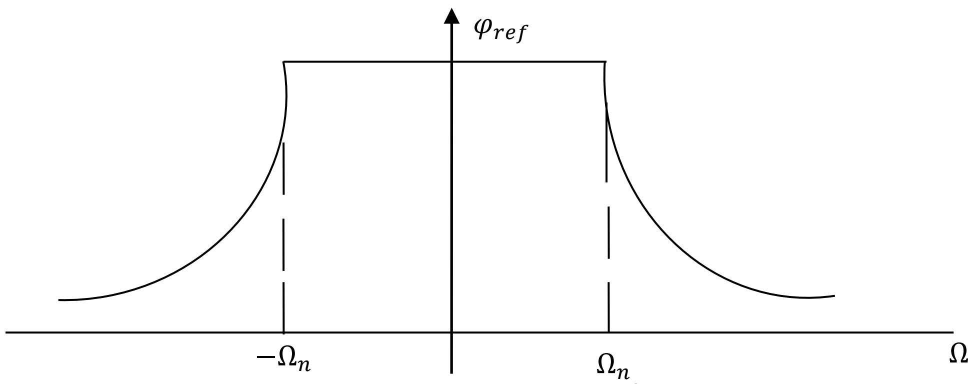


Figure III. 7 : Schéma de dé-fluxage

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale, pour des vitesses rotorique inferieures ou égales à la vitesse nominale de la machine ω_n , pour des vitesses supérieures le flux décroit lorsque la vitesse augmente affin de limiter la tension aux bornes de la machine.

III.7.1 Identifications des paramètres du régulateur de vitesse

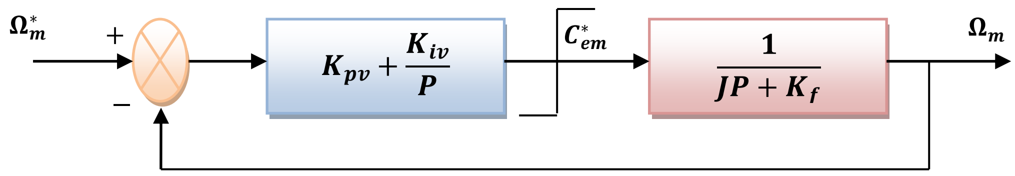


Figure III. 8 : Schéma de la boucle de régulation de vitesse

L'identification nous donne :

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{J}{T} \\ K_{iv} = \frac{K_f}{T} \end{cases} \tag{3.32}$$

On prend : $T = \tau_r$

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

$$C_{em}{}^*(\text{lim}) = \begin{cases} C_{em}{}^* & si \quad |C_{em}{}^*| \leq C_{emMAX} \\ C_{emMAX}\, sign(C_{em}{}^*) & si \quad |C_{em}{}^*| \leq C_{emMAX} \end{cases} \tag{3.33}$$

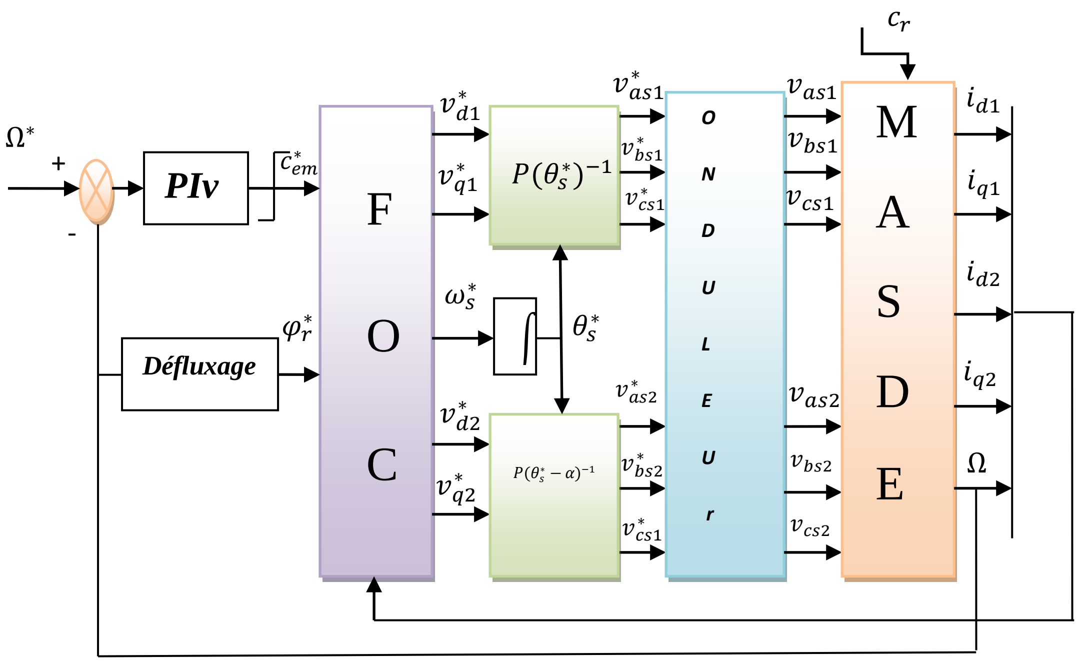
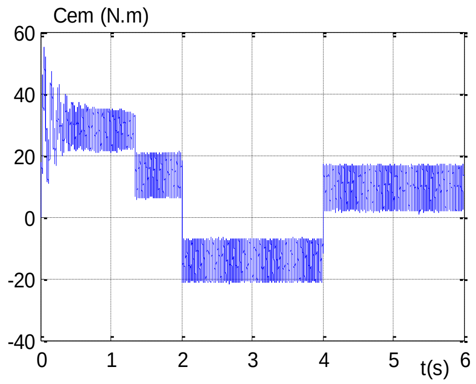


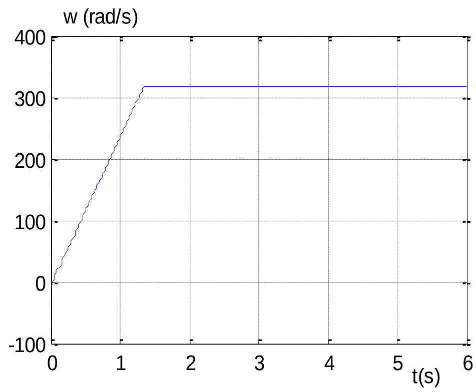
Figure III. 9 : Représentation schématique de la commande FOC avec régulation de vitesse

III.7.2 Simulations

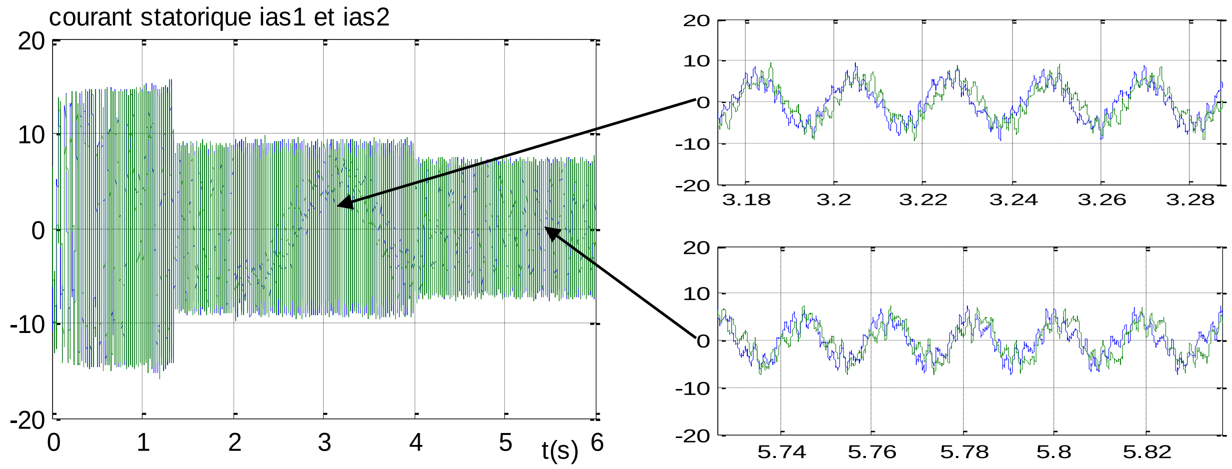
La figure (III.10) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la régulation de vitesse par la méthode de commande indirecte et par application d'une charge nominale $C_r = 14\ N.m,\ C_r = -14\ et\ C_r = 10N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [1\ 2]s,\ [2\ 4]s\ \ et\ \ [4\ 6]s$ et en imposant la vitesse de référence $\Omega_r^* = 314\ rad/s$.



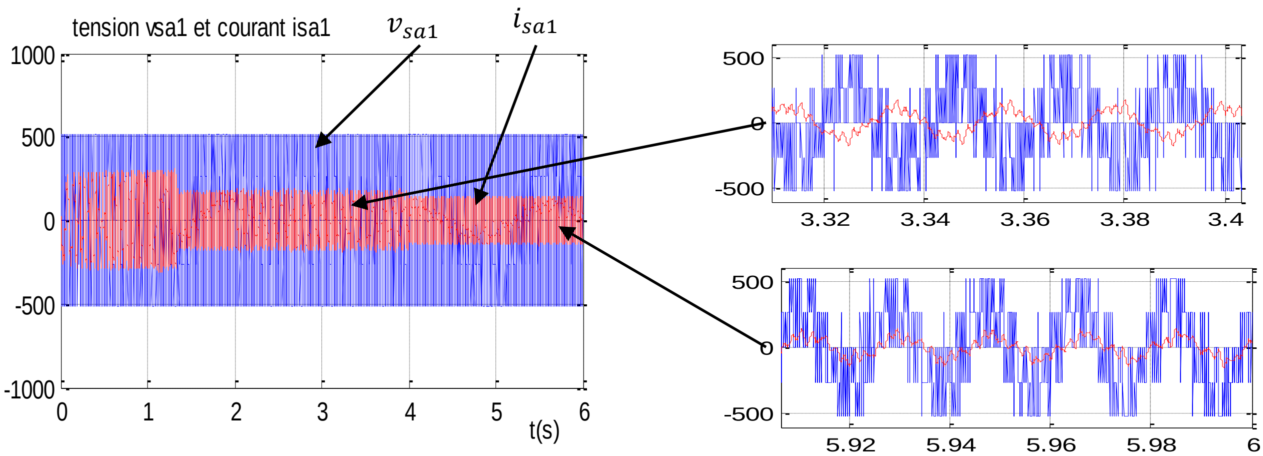
(a)



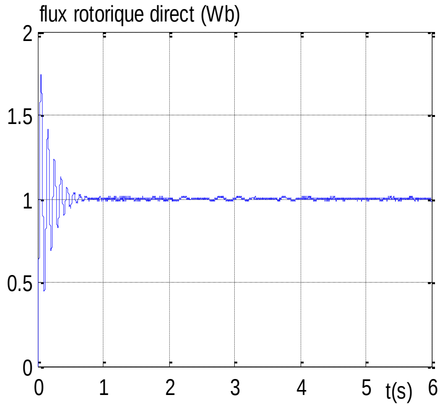
(b)



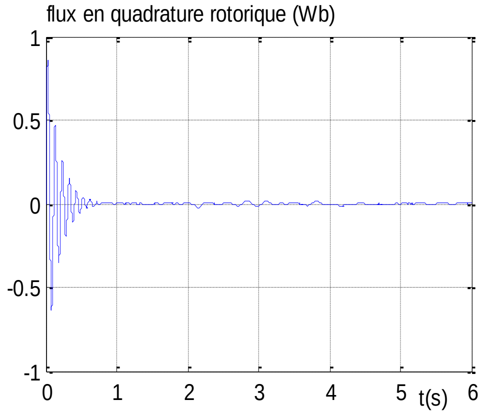
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure III. 10 : L'évolution des caractéristiques de la MASDE par la commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les résultats de simulation montrant que les changements de couple résistant n'affectent pas la vitesse de la MASDE et restent a son point de consigne tout au long, le couple électromagnétique suit les changements du couple résistant sans dépassement après le régime transitoire qui dure 1.4s. En régime permanant, le flux direct rotorique prend sa valeur de consigne après un dépassement de 1.74 Wb et le flux en quadrature s'annule.

Lorsqu'une charge positive est appliquée, le courant du stator est légèrement en retard par rapport a la tension, auquel cas le moteur tire de la puissance active et réactive de la source. Lors de l'application d'une charge négative, le courant est décalé de prés de 180° par rapport a la tension, produit du courant et de la tension négative, ainsi la machine fournit de la puissance active a la source et absorbe une partie de la puissance réactive pour sa magnétisation.

Le courant en quadrature statorique varié avec le couple électromagnétique et le courant rotorique subit une augmentation pendant la charge. Maintenez toujours le décalage du courant statorique de la première étoile par rapport à la deuxième. La régulation de la vitesse est bien faite.

III.8 Commande vectorielle direct avec régulation de vitesse

Le flux est régulé par contre-réaction et est estimé a partir des courant statorique et de la pulsation des courants rotorique de la machine. Dans cette application le bloc de découplage (FOC) est modifie.la figure (3.11) schématise le principe de la commande a flux orienté modifie (MFOC).

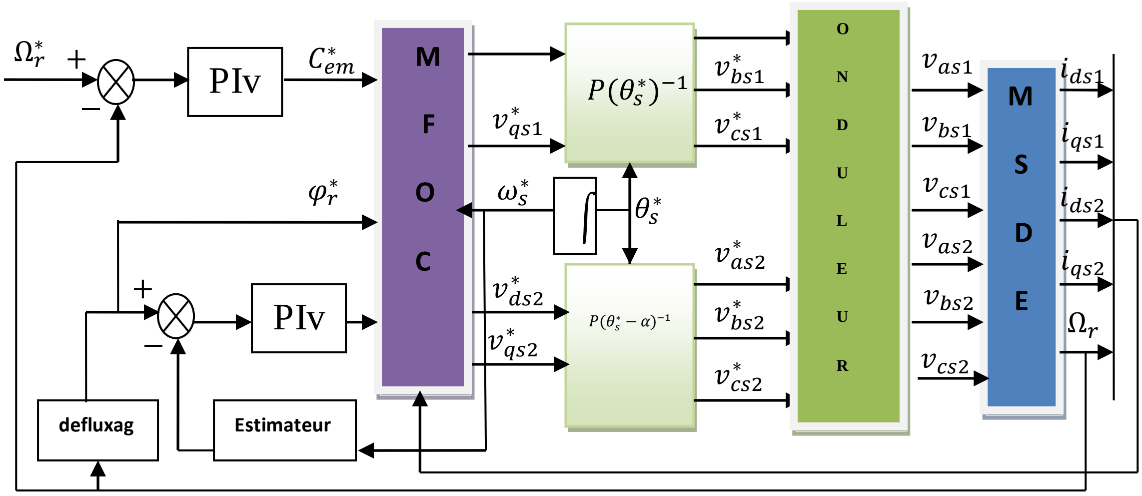


Figure III. 11 : Représentation de la commande MFOC sur la MASDE

III.8.1 Estimateur de flux rotorique

A partir des équations des tensions rotorique (2.17), on tire :

$$\frac{d}{dt}\varphi_{dr} = -R_r l_{dr} + \omega_{gl}\varphi_{qr} \tag{3.34}$$

$$\frac{d}{dt}\varphi_{qr} = -R_r l_{qr} - \omega_{gl}\varphi_{dr} \tag{3.35}$$

Et des équations des flux rotorique (2.19), on obtient :

$$l_{dr} = \frac{1}{L_r+L_m}[\varphi_{drest} - L_m(l_{ds1} + l_{ds2})] \tag{3.36}$$

$$l_{qr} = \frac{1}{L_r+L_m}[\varphi_{qrest} - L_m(l_{qs1} + l_{qs2})] \tag{3.37}$$

En remplaçant (III.34) dans (III.31) et (III.35) dans (III.32), on trouve :

$$\frac{d}{dt}\varphi_{drest} = \frac{R_r l_m}{L_r+L_m}(l_{ds1} + l_{ds2}) - \frac{R_r}{L_r+L_m}\varphi_{drest} + \omega_{gl}\varphi_{qrest} \tag{3.38}$$

$$\frac{d}{dt}\varphi_{qrest} = \frac{R_r l_m}{L_r+L_m}(l_{qs1} + l_{qs2}) - \frac{R_r}{L_r+L_m}\varphi_{qrest} + \omega_{gl}\varphi_{drest} \tag{3.39}$$

D'où, le module du flux rotorique estimé est :

$$\varphi_{rest} = \sqrt{{\varphi_{drest}}^2 + {\varphi_{qrest}}^2} \tag{3.40}$$

III.8.2 Identification des paramètres du régulateur de flux

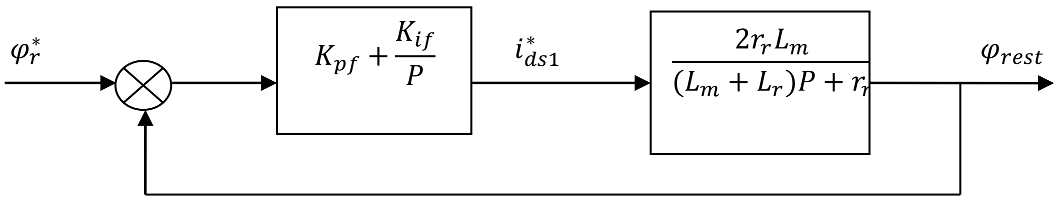


Figure III. 12 : Boucle de régulation de flux

L'identification de ce dernier, nous donne :

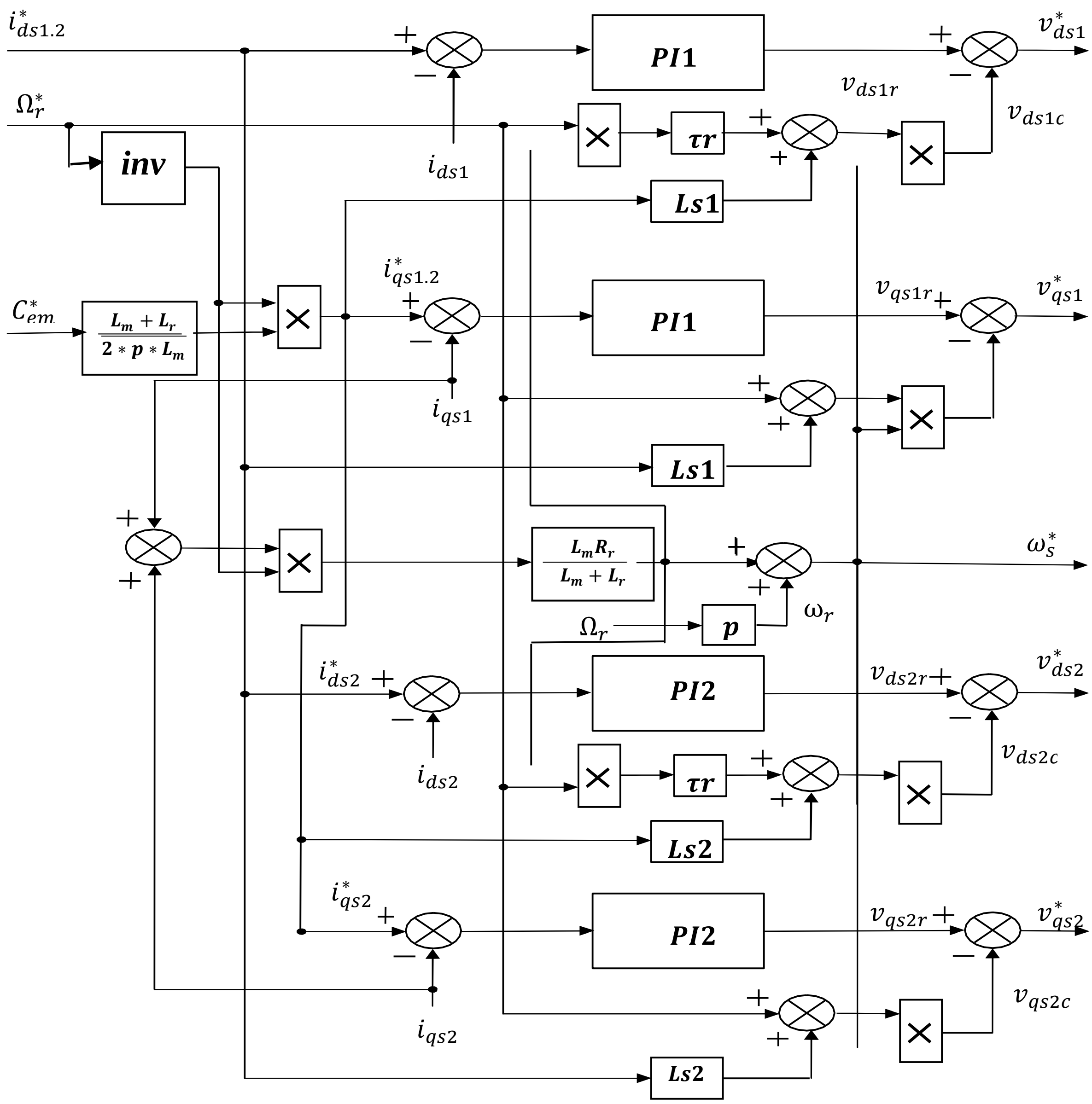
$$\begin{cases} K_{pf} = \frac{L_r + L_m}{2R_r L_m T} \\ K_{if} = \frac{1}{2L_m T} \end{cases} \tag{3.41}$$

On prend : $T = \tau_r$

III.8.3 Simulation et interprétation des résultats

La figure III.14 represente l'evolution des caracteristique de la MASDE avec regulation de la vitesse par la methode de commande directe, suivi de l'application de la charge $C_r = 14\ N.m$, $C_r = -14\ N.m\ et\ C_r = 10\ N.m$ respectivement entre les intervalles de temps $t = [1\ 2], [2\ 4]\ et\ [4\ 6]s$ et en imposant la vitesse de referance $\Omega_r^* = 314$ rad/s.

Figure III. 13 : Représentation schématique du bloc de découplage



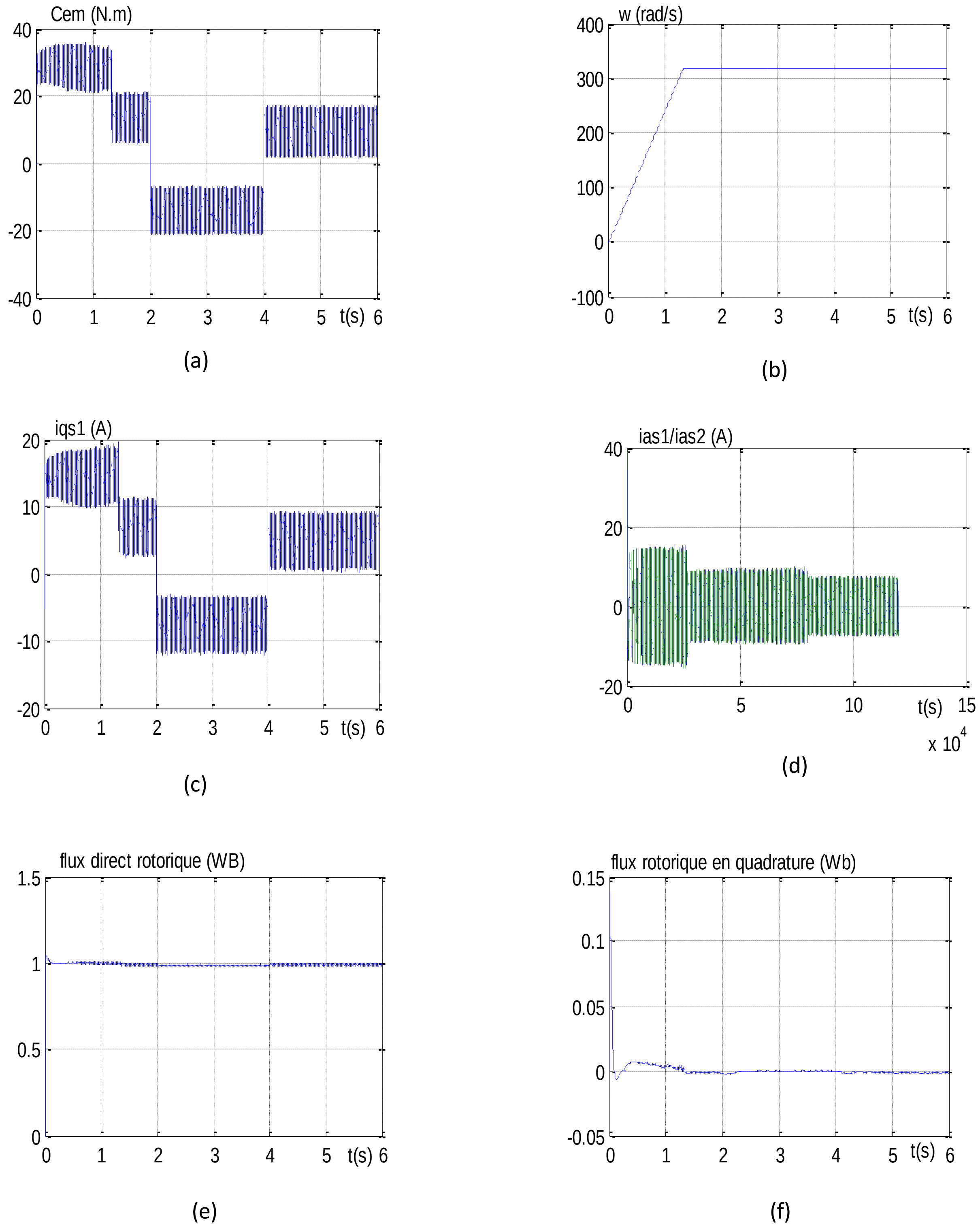


Figure III. 14 : L'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la régulation de la vitesse par la méthode de commande directe

Les résultats de simulation pour la commande directe sont plus précis que pour la commande indirecte.

Le comportement de la MASDE pour la commande vectorielle direct est identique a la commande indirect.

La vitesse de la machine suit la référence imposée et le flux rotorique direct prend sa valeur de consigne au bout de 0.2s et presque sans dépassement, l'allure de courant statorique en quadrature se fait presque de la même façon que le couple électromagnétique.

III.9 Conclusion

Ce chapitre est consacré de la commande vectorielle par orientation de flux rotorique de MASDE pour la régulation de la vitesse. L'étude de cette commande nous permet de mieux caractériser commande vectorielle sur la MASDE.

Par rapport à la commande indirecte, les performances de régulation de vitesse de la commande vectorielle directe sont meilleures. Ces en termes de précision et de stabilité.

Si les exigences en matière de précision er de plate-forme ne sont pas trop élevées, des algorithmes de réglage classique (par exemple les PI) peuvent suffire

Chapitre IV

Application sur un véhicule électrique

IV.1 Introduction

Les véhicules électriques et hybrides (véhicules légers, poind lourds, transport, quadricycles, tricycles et vélos) sont en passe de révolutionner les transports terrestres. Les moteurs à combustion interne sont obligés décéder la place à ces véhicules dites dé-carbonés, qui peuvent réduire la dépendance aux carburants fossiles grâce à des moteurs moins polluants. Une combinaison de programmes d'incitation gouvernementaux en Europe, en Amérique de Nord et en Asie, et le rythme rapide du développement technologique, suggèrent que cette percée est amorcée.

Un véhicule « tout électrique » est un véhicule tracté par un moteur électrique alimenté par une batterie.

Dans ce chapitre, nous appliquerons un couple résistant d'un véhicule électrique dans la machine asynchrone double étoile (MASDE) pilotée par la technique de commande vectorielle.

IV.2 Modélisation du véhicule électrique

Un véhicule électrique (VE) est un système complexe composé de plusieurs composants différents en interaction (mécanique, électrique, électrochimique, etc.). De ce fait, son comportement est sensible à toute variation des caractéristiques de l'un de ces composants. Pour savoir modéliser des véhicules électriques, il est nécessaire de déterminer l'équilibre des forces exercées sur le véhicule lorsqu'il se déplace sur une pente, comme indiquer sur la figure (IV.1).

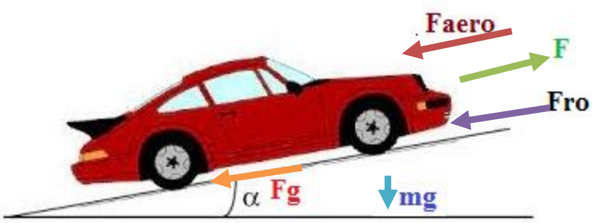


Figure IV. 1 : Représentation des forces agissent sur le véhicule électrique de masse (m) se déplaçant sur une pente

IV.2.1 Force de résistance au roulement

La force de résistance au roulement (F_{ro}) due principalement à la fraction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule, elle est donnée par l'équation :

$$F_{ro} = mg * f_{ro} * \cos(\alpha) \tag{4.1}$$

Avec :

m : La masse totale du véhicule en kg

g : La gravité en m/s^2

f_{ro} : La constante de la force de résistance due au déplacement.

α : L'angle de pente de la route en rad

IV.2.2 Force résistante a la pénétration dans l'air

La force résistante à la pénétration dans l'aire (F_{aero}) engendrée par le frottement de l'aire sur l'ensemble de la carcasse du véhicule en se déplaçant est donnée par :

$$F_{aero} = \frac{1}{2}\rho_{air} A_f C_d V_e^2 \tag{4.2}$$

Tel que :

ρ_{air} : La densité de l'air en kg/m^2

A_f : La surface frontale du véhicule m^2

C_d : Le coefficient de trainée aérodynamique

V_e : La vitesse du véhicule en m/s^2

IV.2.3 Force résistante due à la pente

La force résistante due à la pente à gravir (F_g) qui est proportionnelle a la masse m_g du véhicule et dépend de la route, elle est donnée par :

$$F_g = m\ g \sin(\alpha) \tag{4.3}$$

D'après ces trois forces en désigne la force résistive total qui est donnée par l'équation suivante :

$$F_{res} = F_g + F_{aero} + F_{ro} \tag{4.4}$$

IV.2.4 L'équation du mouvement

L'équation du mouvement serait donnée par :

$$m\frac{dV_e}{dt} = F - F_{res} \tag{4.5}$$

Avec :

F : La force de traction du véhicule électrique, elle est assurée par le moteur.

IV.2.5 Le couple résistant du véhicule

L'expression du couple résistant qui est dû aux forces résistantes est exprimer par :

$$C_r = F_{res}\frac{r}{G_r} \tag{4.6}$$

Avec :

r : Rayon de la roue

G : Gain de la réduction qui relie le moteur a l'axe

La figure suivante représente le diagramme fonctionnel du couple résistant calculé à partir des forces résistantes :

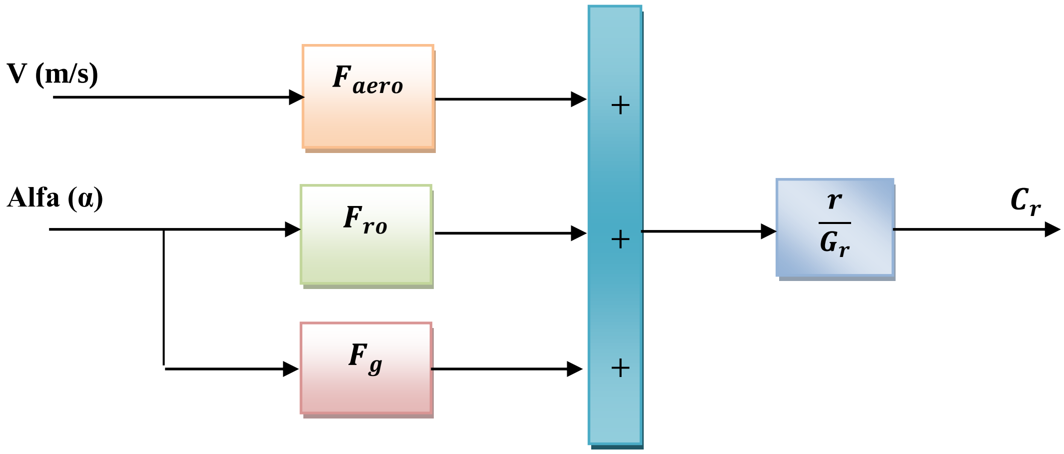


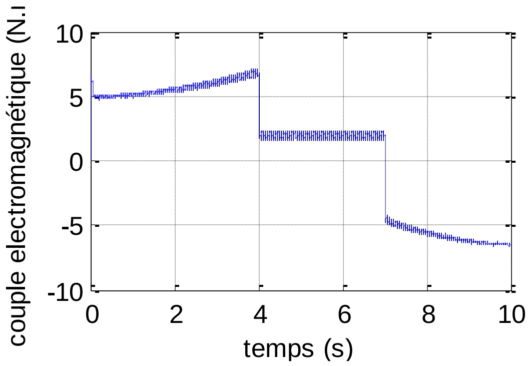
Figure IV. 2 : Schéma de la dynamique d'un couple résistant d'un véhicule électrique

IV.3 Application de la MASDE sur un véhicule électrique

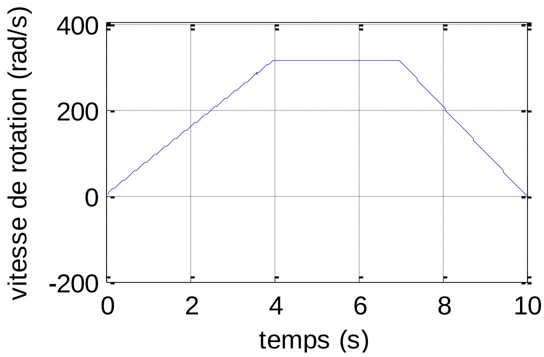
Notre application sera faite par trois essaie pour un véhicule électrique de masse $m = 1300\ kg$ et de gain $Gr = 1000$.

IV.3.1 Influence de profil de vitesse

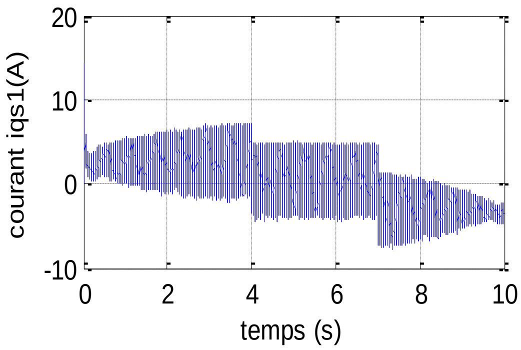
Ce test de simulation s'effectue sur un itinéraire reliant deux station d'arrêt, le véhicule démarre à partir de la première avec une accélération de $a = 25.12\ m/s^2$ jusqu'à la vitesse nominale $100.48 m/s$, il garde cette vitesse pendant un temps de [4 7] s, enfin, il ralenti avec décélération de $a = -33.49\ m/s^2$ pour qu'il s'arrête définitivement en arrivant à la deuxième station.



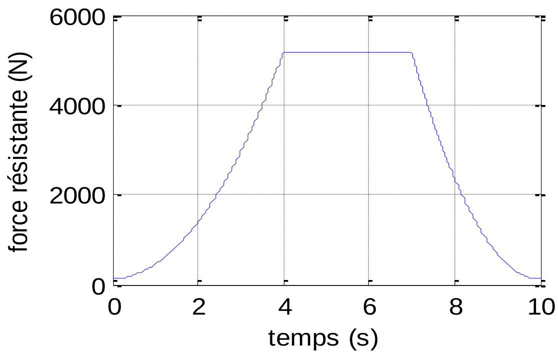
(a)



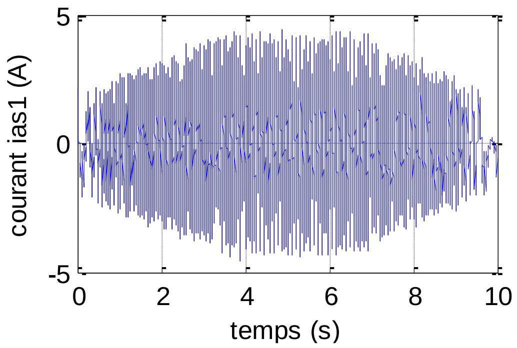
(b)



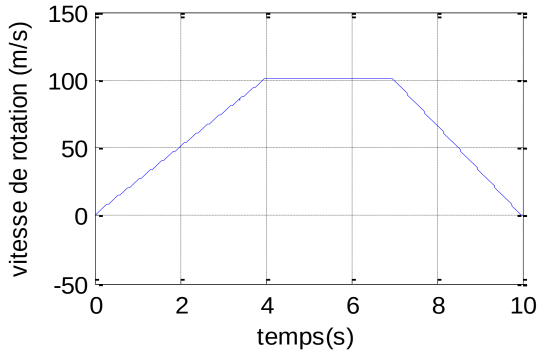
(c)



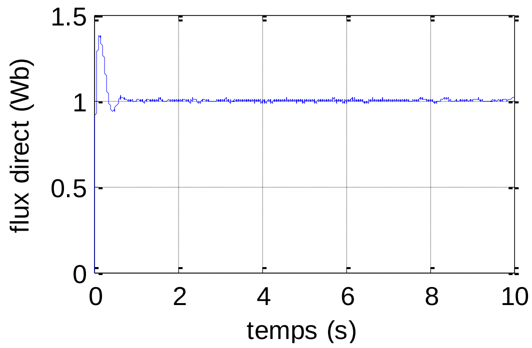
(d)

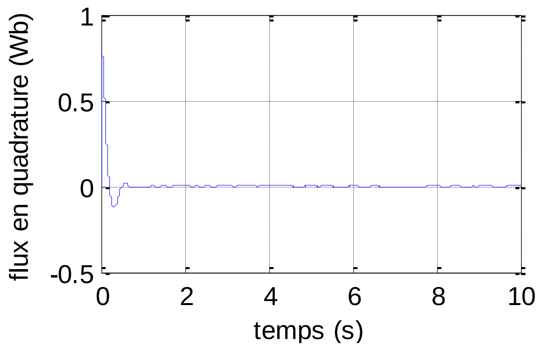


(e)

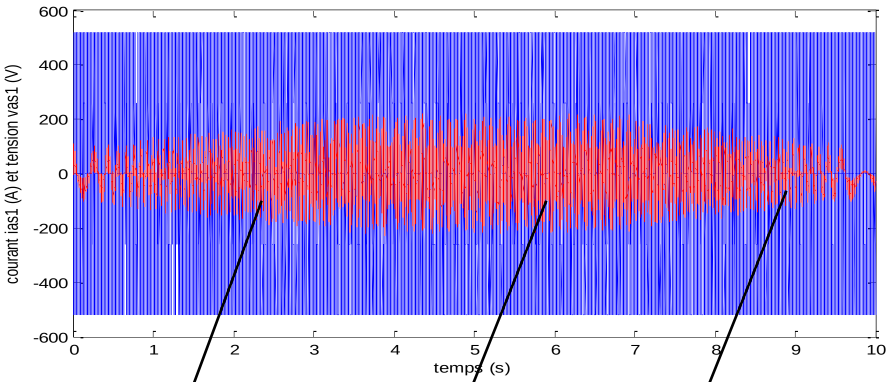


(f)





(g) (h)



(i)

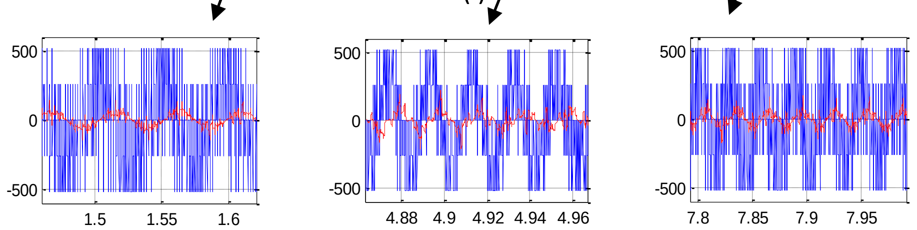


Figure IV. 3 : Simulation de l’influence de profil de vitesse sur un véhicule électrique

Interprétation des résultats

Les courbes de simulation de la MASDE montrent qu’au démarrage la vitesse de la machine avance linéairement jusqu'à atteindre une valeur nominale $314\,rad/s$ soit $100.48\,m/s$ en suivant le profil de la vitesse, et décélère lorsque qu’on applique la décélération.

Le couple électromagnétique a l’instant de démarrage prend une valeur qui correspond au couple résistant propre de la machine, il augmente d’une manière presque linéaire correspond au couple produit par la force résistant f_{res} qui évolue suivant la vitesse de la machine et se stabilise a sa valeur nominale des que cette dernière prend une valeur constante, pendant la décélération, le couple électromagnétique diminue progressivement pour rejoindre la partie négative dans ce cas le couple électromagnétique s'oppose au mouvement de véhicule, la force d'avancement progresse d'une manière identique au couple électromagnétique, elle prend des valeur qui correspond à la force résistant.

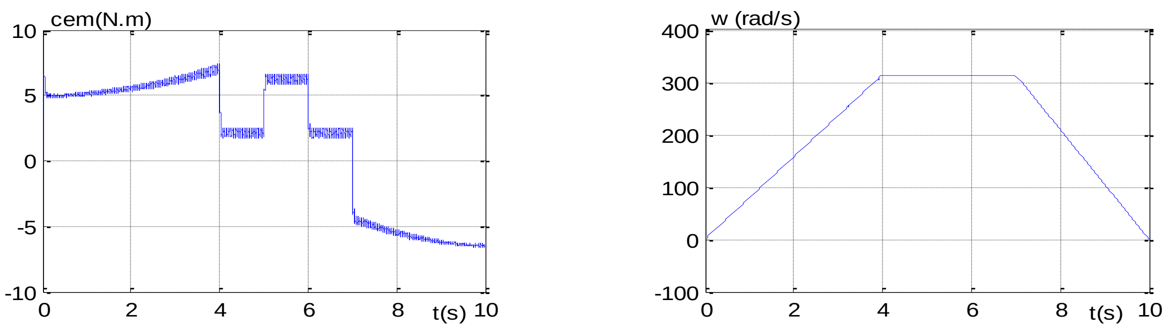
Les courants statorique progressent linéairement pendant l'accélération, prennent leurs valeurs nominales au régime établie, et diminue progressivement pendant la décélération, les courant en quadrature statoriques évoluent identiquement au couple électromagnétique.

Le flux rotorique direct suit entièrement la référence imposée de $1Wb$ après $0.83s$, sans dépassement, et le flux rotorique en quadrature présente un pic au démarrage pendant une fraction de seconde et se stabiliser autour de zéro ($0\ Wb$).

Lors du démarrage et pendant le régime permanant les courants statorique sont légèrement en retard par rapport à la tension, la MASDE absorbe la puissance active et réactive. Lors de la décélération, le courant statorique est décale de presque$180°$ par rapport à la tension, la MASDE fournit de la puissance active et absorbe une partie de la puissance réactive pour la magnétisation, ce qui correspond au freinage par récupération de l'énergie.

IV.3.2 Essai de simulation en pente

Sur le même trajet, le véhicule circule dans une zone libre à une vitesse nominale de 100.48 m/s, en maintenant cette vitesse et passe par une ponte d'affranchissement de $\beta = 20°$. Entre l'intervalle de temps $t = [5\ 6]s$, Les résultats de simulation sont présentés dans la Figure (VI.4).



(a) (b)

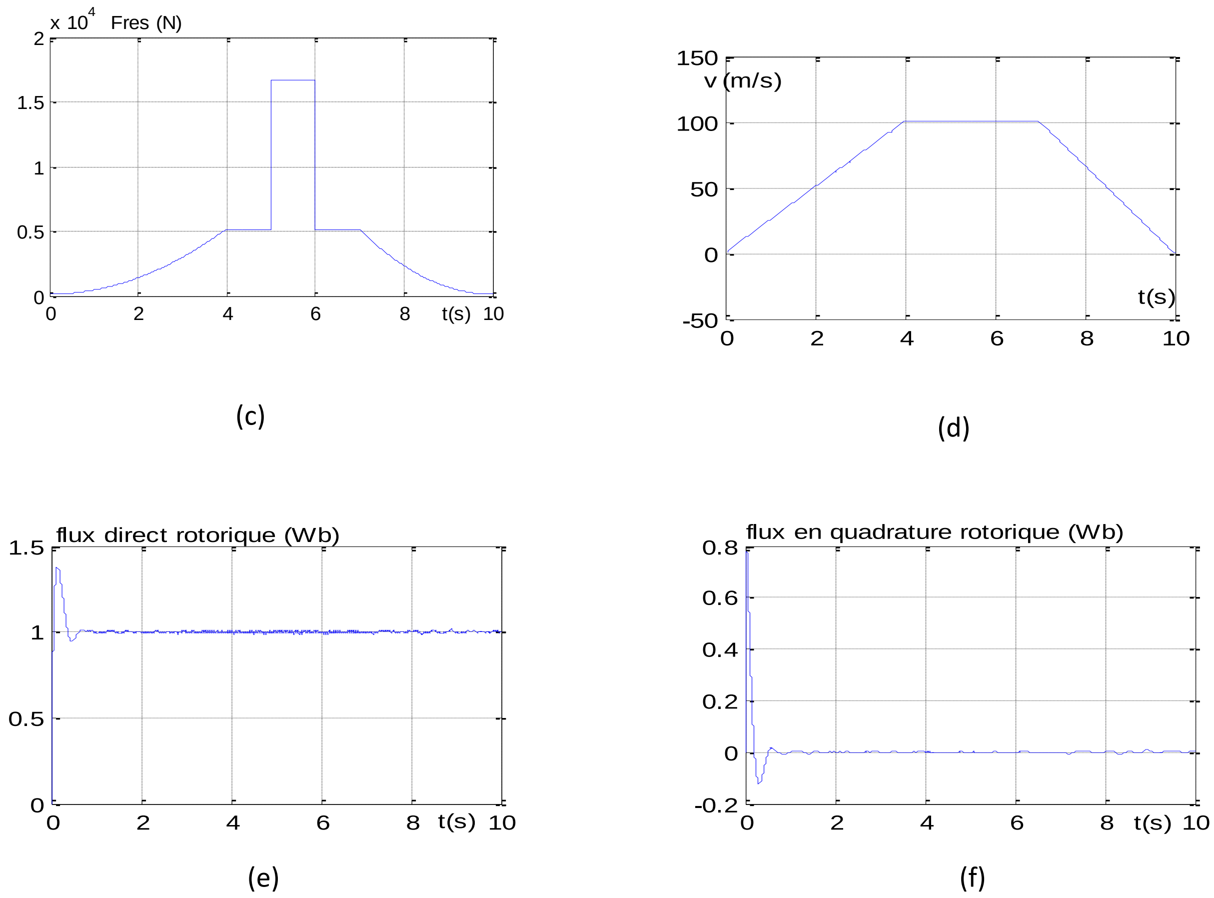


Figure IV. 4 : Simulation d'un véhicule travers une pente de 20°

Interprétation des résultats

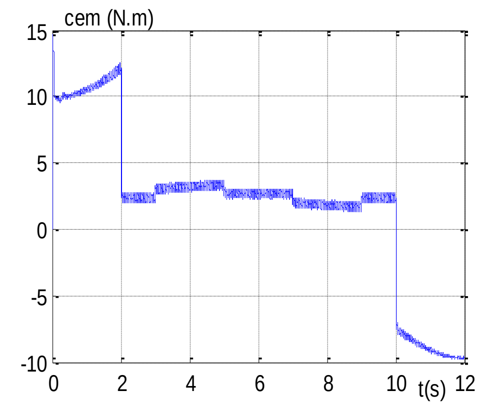
Les résultats de simulation montrent que la force de résistante à l'avancement augmente approximativement lorsque le véhicule franchit une pente de $\alpha = 20°$, ce qui explique l'augmentation du couple électromagnétique généré par la machine, la force à l'avancement du véhicule et du courant statorique absorbé, la vitesse du véhicule reste constante et suit toujours la référence imposé. Selon le principe de la commande en découplage. Les courants statoriques en quadrature suivant l'évolution du couple électromagnétique.

Lors d'un fonctionnement en pente, nous constatons que les flux rotorique conversent leurs valeurs de référence.

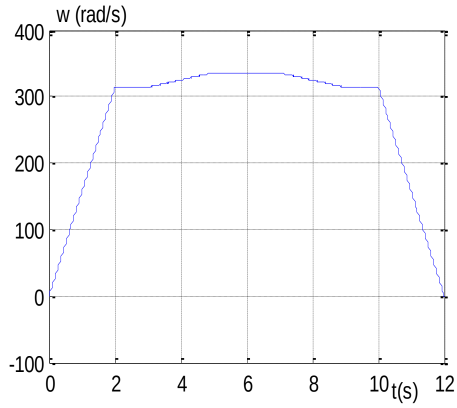
IV.3.3 Essai de simulation du véhicule électrique en survitesse

Dans cette essai, le véhicule est entrainer à une vitesse supérieur à la vitesse nominale, il maintient cette vitesse de 335.9 rad ou $V_e = 107.5\ m/s$ pendant un intervalle de temps

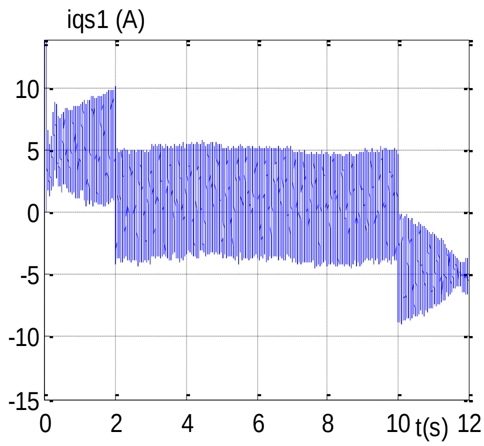
$t = [5\ 7]s$, puis il fait une décélération jusqu'à l'arrêt total en arrivant à la deuxième station, les résultats de simulation sont montrés sur la Figure (VI.5).



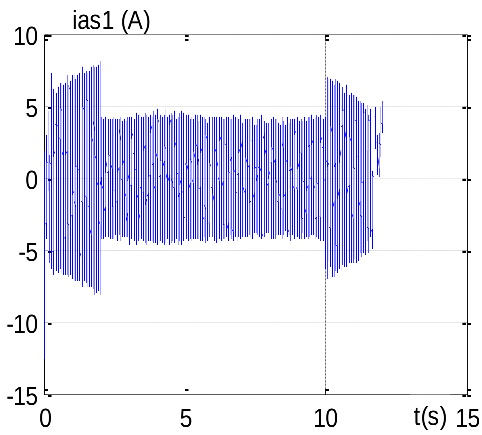
(a)



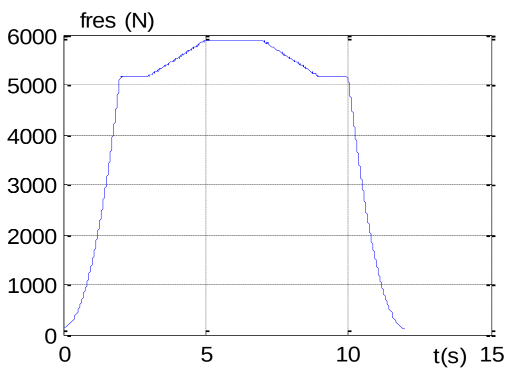
(b)



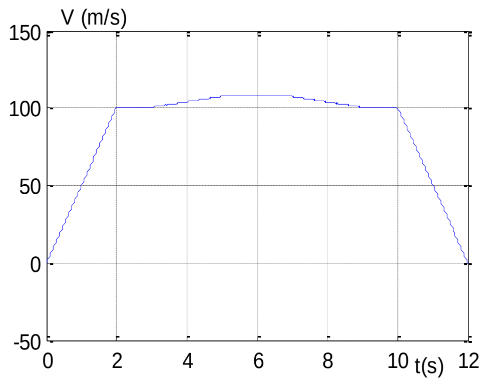
(c)



(d)



(e)



(f)

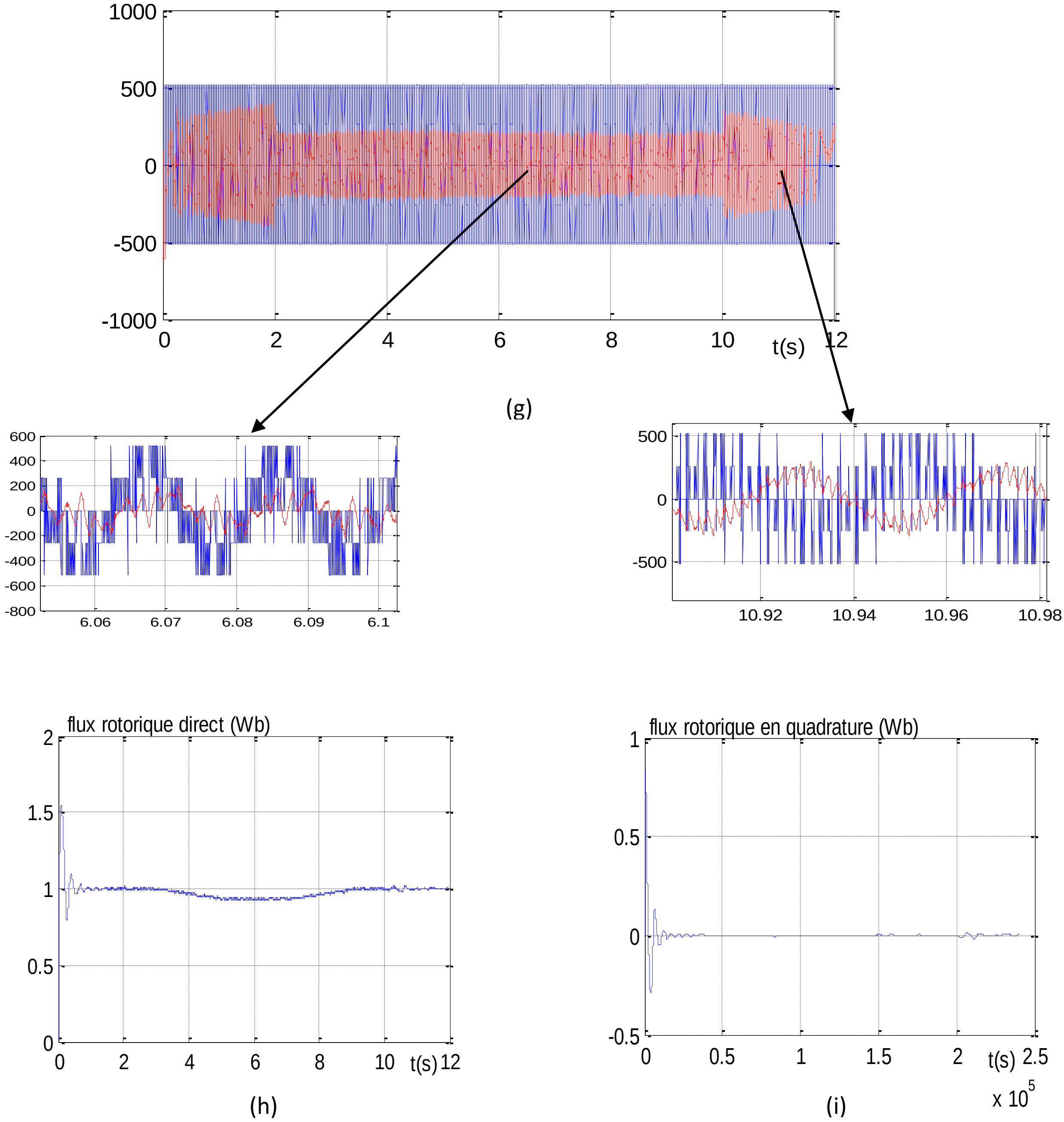


Figure IV. 5 : Simulation d’un véhicule en survitesse pendant l’intervalle de temps t= [5 7] s

Pendant l’augmentation de la vitesse, le couple électromagnétique connait aussi une élévation due à l’augmentation de la force résistante a l’avancement de $7.02\ N$, le courant statorique connait une augmentation après un pic causé par l’accélération du véhicule, le courant statorique en quadrature suis l’évolution du couple électromagnétique après le régime transitoire, la force de l’avancement du véhicule suis avec la même grandeur la variation de la force résistante a l’avancement, cependant, la décélération du véhicule entraine des diminutions aux niveaux du couple électromagnétique, des courants statorique et de la force a l’avancement causées par la diminution de la force résistante a l’avancement.

L'entrainement de la MASDE au-delà de la vitesse nominale entraine la machine a fonctionner en dé-fluxage, toute fois, le flux rotorique directe diminue progressivement pour se stabiliser a $0.93\ Wb$ pendant le régime de survitesse, afin de diminue les pertes fer et pour éviter la saturation de la machine, le flux rotorique en quadrature se stabilise autour de zéro.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué un couple résistant d'un véhicule électrique a la machine asynchrone double étoile, en présentent dans un premier lieu la modélisation d'un véhicule électrique et les différentes forces qui agissent sur le véhicule, après la simulation du véhicule sur un profil de vitesse, nous avons effectué deux essai de simulation en zones critiques, à savoir le passage d'un véhicule par une pente, et un fonctionnement en régime de survitesse, les résultats de simulations ont montrées que le couple électromagnétique suit la variation du couple résistant en maintenant les flux rotorique dans leur valeur de consignes, ce qui montre la bon réponse de la commande vectorielle et l'applicabilité de la MASDE dans un véhicule électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche dans le domaine des machines tournantes ne cesse d'évoluer. En effet depuis l'avènement de l'électricité, l'humanité a, toujours, prôné une philosophie d'une manière à subvenir à ses continuels besoins et de s'imposer en maitre des lieux. Le moteur à courant continu qui, jadis, était la fierté de l'industrie, cède sa place au moteur asynchrone triphasé, puis, vient le moteur multiphasée surplomber le tout, avec ses qualités de haute fiabilité, d'une segmentation de puissance, d'un pouvoir d'élimination d'harmoniques d'espace, de minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques. Le moteur asynchrone à double étoile est identique au moteur asynchrone triphasé, avec la particularité de posséder une étoile supplémentaire au stator, décalée d'un angle de trente degrés par rapport à la première étoile.

L'alimentation, via deux onduleurs de tension, avec commande MLI, Apres avoir modélisé ces derniers. Est une obligation dans le milieu industriel. La commande vectorielle par orientation du flux rotorique, est responsable des ondulations qui surviennent sur le couple, la vitesse, les flux rétorques et les courants du moteurs.

Dans la perspective, nous sommes intéressées a l'application de la MASDE sur un véhicule éclectique, en commençant par la modélisation et la présentation des différends force agissent sur le véhicule, puis pour valider cette dernière étude, deux tests de simulations sont effectues, le premier consiste à prévoir le véhicule lorsqu'il traverse une pente et le deuxième lorsqu'il fonctionne en survitesse, on obtient les résultats de simulation, il est légitime de choisir un véhicule éclectique comme application à ce moteur.

D'autres points sont sciemment, ni étudiés, ni cités dans ce manuscrit. Une manière de les reporter en perspective pour améliorer ce travail, compte tenu que ce projet n'est qu'une introduction à la recherche.

Néanmoins, quelques perspectives sont citées, avec l'espoir de pouvoir les réaliser à l'avenir, tels que :

- Etude de l'influence des harmoniques d'espace.
- Etude des stratégies de commande de la MASDE
- Utilisation d'onduleur multi-niveaux.
- Remplacement des onduleurs par des convertisseurs matriciels.

L'effort de contribuer à l'étude de la machine asynchrone à double étoile s'achève dans ces notes. Il reste, tout de même, la possibilité d'espérer de poursuivre les recherches liées à sa structure, à son alimentation et aux différentes commandes qui peuvent lui être associées.

Paramètre utilisé

Tableau 1 : Paramètre de la Machine Asynchrone Double Etoile

Paramètre	Valeurs
Puissance nominale	$P_n = 4.5$ kW
Courant nominale	$I_n = 6.5$A
Tension nominale	$V_n = 220$ V
Vitesse nominale (synchronisme)	$v_n = 3000 \mathrm{tr/min}$
Moment d'inertie	$J = 0.0625 \ \mathrm{kg.m^2}$
Coefficient de frottement	$K_f = 0.001 \ \mathrm{N.m.s/rad}$
Fréquence nominale	$f_s = 50$Hz
Resistance rotorique	$r_r = 2.12 \ \Omega$
Resistance des enroulements de l'étoile 1	$r_{s1} = 3.72 \ \Omega$
Resistance des enroulements de l'étoile 2	$r_{s2} = 3.72 \ \Omega$
Inductance de fuite des enroulements de l'étoile 1	$L_{s1} = 0.022$ H
Inductance de fuite des enroulements de l'étoile 2	$L_{s2} = 0.022$ H
Inductance rotorique	$L_r = 0.006$ H
Inductance mutuelle cyclique	$Lm = 0.3672$ H
Nombre de paire de pole	$p = 1$

Tableau 2 : Elément de cahier de charge d'un véhicule électrique

Paramètre	Valeurs
Masse du véhicule	$m = 1300$ kg
Rayon de la roue	$r = 0.32$ m
Surface frontale du véhicule	$A_f = 2.6\ m^2$
Constante de la force de résistance due au déplacement	$f_{ro} = 0.01$
Densité de l'air	$\rho_{aero} = 1.2\ kg/m^2$
Coefficient de trainé aérodynamique	$C_d = 0.32$
Machine utilisée	**MASDE**

[1] https://electrotoile.eu/reseau_triphase.php

[2] Bernard MULTON, « Historique des machines électrique et plus particulièrement des machine a reluctance variable », la revue 3 E. I, société de l'électricité de l'électronique et des technologie de l'information et de la communication, 1995,pp.3-8. Hal-00674038.

[3] Smail AZZI et Belkacem AZZI, « Etude et Modélisation de la machine asynchrone Double étoile : Application à la traction Electrique », Mémoire de Master, Université de TIZI-OUZOU, 2014.

[4] G. SALLOUM, « contribution à la commande robuste de la machine asynchrone double étoile », Docteur de l'Institut National polytechnique de Toulouse, 2007.

[5] CHEKKAL et HAMITOUCHE. « Étude, identification, modélisation et commande de la machine asynchrone double étoile », Mémoire d'Ingéniorat Université de Bejaïa, 2007.

[6] BENRABIA et BENDIB, « simulation numérique d'un moteur asynchrone a double étoile commande par onduleur multi niveaux », Mémoire d'Ingéniorat Université de M'sila, 2005.

[7] MERABET « commande Floue Adaptative d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université de Batna, 2008.

[8] HADIOUCHE, « contribution a l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure », these de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, France, Décembre 2001.

[9] G. Grellet, G. Clerc, actionneur électrique, Edition Eyrolles, Paris, France, 1997.

[10] HAMMACHE, Etude et réalisation d'une machine asynchrone double étoile : conception, alimentation et commande, Mémoire de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Janvier 2007.

[11] Z. Oudjebour, E. M. Berkouk, N. Sami, S. Belgasmi, S. Arezki, I. Messaif, « indirect space vector contrôl of a double star induction machine fed by two five-levels NPC VSI », Internationel Conference on Electric Machine, ICEM'04, poland, 2004.

[12] H. Ney, « Equipement de puissance », Edition Fernaud Nathan, Paris, 1988.

[13] K.HAMITOUCHE, « Contribution à l'Amélioration des Performances d'une Chaine de Traction Ferroviare », Mémoire de Magister, Bejaia,2013.

[14] S. Chekkal, D. Aouzellag, K.Ghedamsi, H.amimmeur, « New Control Strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator », 10th International

Conference on Environement and Electrical Engineering EEEIC'11, c 2011 IEEE, pp. 268-271, Rome, Italy, 2011.

[15] H. Amimmeur, « contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile », these de Doctorat de l'Université de Batna, 2012.

[16] H. Ney, « Equipement de puissance », Edition Fernaud Nathan, Paris, 1988.

[17] H. Amimeur mémoire magister en électrotechnique, « contribution a la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement », 28-05-2008.

[18] L. Baghli, « contribution a la commande d'une machine asynchrone, utilisation des logique floue, des réseau de neurones et des algorithme génétiques », these de Doctorat d'Université Henri Poincaré de Nancy I, France, janvier 1999.

[19] G. A. Capolino, H. H'enao V. T. Nguyen Phuoc, « méthode de conception d'une commande vectorielle pour machine a induction », SEE Journée d'étude a Lille, pp. 1-19, Lille, Décembre 1992.

[20] Y. Y. Ho. Edward, C. S. Paresh, « decoupling control motor drives », IEEE Trans on Indu Elec, vol. 35, no. 2, pp. 253-262, May 1988.

[21] A. Boglietti, P.Ferraris, M. Pastorlli, C. Zimaglia, « Induction motors field oriented control based on averaged parameters », In IEEE, 0-7803-1/94, pp. 81-87, 1994.