الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEDR.YAHIA FARES DEMEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de
Master en Electrotechnique

Option: *Commande et Electronique Industrielle*

THEME

Implémentation d'une Commande Vectorielle indirecte de La Machine Asynchrone

Proposé et dirigé par

Dr. BOULKHRACHEF Salah
Dr. BOUDANA Djamel

Préparé et présenté
Par
MUJAMMAL Mujammal Ahmed Hasan
AISSAOUA Nora
2016 /2017

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail qui reflète nos efforts le long des années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos gratitudes et vifs remerciements à notre promoteur, Dr. BOULKHRACHEF Saleh pour son orientation et Sous-promoteur Dr. BOUDANA Djamel ces précieux conseils pendant la durée de travail sur ce projet.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Nous remercions et également Dr. MOUALDIA Abdlhafid et tous les enseignants du département génie électrique et tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les étudiants de Master 2 Génie électrique, notamment les étudiants de la 2ème Année Master commande électronique industrielle pour leur esprit de groupe et leur solidarité.

Mujammal, Nora

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut

exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience

Illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en

Témoignage de mon profond amour et respect

Pour leurs grands sacrifices.

Mes chères sœurs

«Djemaa, Malika et sa marie yacine, Horiya et sa marie taher,»,

Pour leur grand amour

Et leur soutien qu'ils trouvent ici

L'expression de ma haute gratitude.

Mes chers amies qui sans leur encouragement ce travail

Et à toutes Mes familles

NORA

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne peut

Exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience

Illimitée, leur encouragement continu, leur aide

Mes chers frères« HASSEN, Abdullah, Mohammed, Ali, Majed » et

ma chère sœur

«Assia»

Pour leur grand amour<Maroua>

Et leur soutien qu'ils trouvent ici

L'expression de ma haute gratitude.

Mes chers amies qui sans leur encouragement ce travail

N"aura jamais vu le jour.

Et à toutes Mes familles «MUJAMMAL DN DAOOD »

et à tous ceux qui m'aime.

MUJAMMAL

Notations et Abréviations

R_s : La résistance statorique par phase.

R_r : La résistance rotorique par phase.

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s: Inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_{sr}: Inductance mutuelle entre stator et rotor.

Θ : écart angulaire entre stator et rotor.

σ : Le coefficient de dispersion de Blondel.

p : Le nombre de pair de pôle.

g : glissement.

V_s: La tension simple statorique (V).

V_r : La tension simple rotorique (V).

Ω_s: La pulsation statorique (rd/s).

Ω_r: La vitesse mécanique de la machine (rd/s).

C_{em}: Le couple électromagnétique (m. N).

C_r: Le couple résistant (m. N).

J_m: Le moment d'inertie de la machine ($kg.m^2$).

s, r : Indices correspondants respectivement au enroulement statorique et rotorique.

a_s,b_s, $c_s$et a_r, b_r, C_r: Phases de l'enroulement statorique et rotorique.

d, q : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.

θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_s: Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d.

$V_{abc\,s}$: Tensions des trois phases de l'enroulement statorique.

$V_{abc\,r}$: Tensions des trois phases de l'enroulement rotorique.

$V_{dq\,s}$: Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d, q.

$V_{dq\,r}$: Tensions de l'enroulement rotorique dans l'axe d, q.

$I_{abc\,s}$: Courants des trois phases de l'enroulement statorique.

$I_{abc\,r}$: Courants des trois phases rotoriques.

$I_{dq\,s}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d, q.

$I_{dq\,r}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d, q.

L_m: Inductance mutuellecyclique entre stator et rotor ou (inductance magnétisante).

Ω: Vitesse de rotation de la machine.

$\boldsymbol{\omega}_r$, $\boldsymbol{\omega}_s$, $\boldsymbol{\omega}$: Pulsations électriques respectivement du rotor, du stator, et de glissement.

$\phi_{s\,abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement statoriques.

$\phi_{r\,abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement rotoriques.

$\phi_{s\,dq}$: Flux de l'enroulement statorique dans l'axe d, q.

$\phi_{r\,dq}$: Flux des trois phases de l'enroulement rotoriques.

W_{mag}: L'énergie magnétique.

m : L'indice de modulation.

$f_{réf}$: La fréquence de référence.

f_{por}: La fréquence de modulation (porteuse).

T_m: Le taux de modulation.

$A_{réf}$: L'amplitude de la référence.

A_{por}: L'amplitude de la porteuse.

I_a: Composante du couple.

I_f: Composante du flux.

ϕ_{dm}: Flux d'entrefer (magnétisant).

K_p, K_i : coefficients de proportionnalité et d'intégration.

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

ABREVIATIONS

MAS : Machine Asynchrone.

MCC : Machine à courant continu.

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.

FOC : Flux Oriented Control.

AC : Alternative- Current

DC : Direct Current

ملخص

نتطرق من خلال هذا العمل الى تقديم الآلة الكهربائية اللامتزامنة وذلك من خلال وضع المعادلات الكهربائية والمغناطيسية والميكانيكية التي تبين سلوك هذه الالة الكهربائية. قمنا في الجزء الأول من هذا العمل بوضع التعريف بهذه بالآلة الذي يعتمد على طريقة بارك. في الجزء الثاني من هذه المذكرة قمنا بتطبيق طريقة التحكم الشعاعي المباشر وغير المباشر في مرحلة بدء تشغيل هذه الالة الكهربائية ومرحلة تغيير اتجاه سرعتها. ثم قمنا بتطبيق طريقة التحكم الشعاعي الغير مباشر على الالة الكهربائية اللامتزامنة عمليا وعرفنا مدى صلاحية هذه الطريقة المطبقة عن طريق المقارنة بين النتائج العملية والنتائج النظرية التي بينت في النهاية صحة عملنا. في نهاية هذه المذكرة تطرقنا الى التعريف الوسيط لهذه الالة المذكور في الملحق الخاص بهذه المذكرة.

الكلمات المفتاحية

الالة المتزامنة التي تشبه قفص السنجاب، التحكم الشعاعي المباشر وغير المباشر، التعريف الوسيط.

Résumé

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est consacré à la modélisation de la machine asynchrone et la commande vectorielle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Le but de la première partie est le développement du modèle de la MAS à cage d'écureuil dans le référentiel de Park. Dans le deuxième parie, nous avons appliqué la machine asynchrone la méthode de commande vectorielle indirecte et directe à démarrage et par l'inversion de vitesse

Ensuite, nous avons appliqué la méthode de commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone pratiquement et la validité de cette méthode proposée a été testée par la comparaison entre les résultats de la simulation et relevées expérimentaux. Enfin, un petit rappel sur l'identification de la machine asynchrone motionné dans l'annexe de cette mémoire.

Les mots clés

Machine asynchrone à cage d'écureuil, la commande vectorielle directe et indirecte, l'identification des paramètres.

Abstract

This work is consist of three parts, the first part is about the modelling of the machine asynchronous by putting the equations electrics, magnetics and mechanic. The second part of this memory interested by the vectorial control direct and indirect of this machine during the stage of start-up and during the opposition of the direction of movement to this machine. The third part of this memory interested with experiment this method practical and we tested the validity of this method during the comparison between the resultants practical and the resultants theoretical. Finally we mentioned the identification parameter of the machine asynchronous in the addition of this memory.

Key-word

Induction machine asynchronous, vectorial control direct and indi

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : LA MOD2LISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Figure I.1:Représentation des axes de la MAS dans le repère abc ……...…..05

Figure I.2:Modèle de Park de la MAS ……...…….08

Figure I.3:Schéma de principe de l'association convertisseur-machine ……....…10

Figure I.4:Représentation de la redresseuse triphasée double alternance à diodes ……....11

Figure I.5: Représentation du filtre ……..……...…….…...…12

Figure I.6:Représentation de l'ensemble onduleur + machine asynchrone [Aib09]……...13

Figure I.7:Les tensions de référence et la tension de porteuse pour m=21……..……...14

Figure I.8: La tension V_a (volt) d'onduleur à deux niveaux…….....15

Figure I.9 :Performances de l'association MAS-Onduleur ……..……...…...16

Chapitre II : COMANDE VECTORIELLE DE LA MAS

Figure II. 1 : Principe de la commande vectorielle de la MAS……..……19

Figure II. 2 : Orientation de flux (rotorique, statorique ou entrefer)……..…20

Figure II. 3 : Principe d'orientation du flux rotorique……21

Figure II. 4 : Schéma de principe de la commande vectorielle directe ……..24

Figure II.5 : Schéma bloc de régulation du courant i_{qs} ……..25

Figure II. 6 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation ω_r…… 27

Figure II.7 : Schéma de la commande vectorielle indirecte……...……28

Figure II.8 : Structure de la commande vectorielle indirecte avec contrôle des courants…...30

Figure II.9 : Les signaux du démarrage de la machine asynchrone résultants par la commande vectorielle directe du flux orienté…….....31

Figure II.10: Signaux de la simulation de la MAS par la commande vectorielle par la méthode directe du flux orienté alimenté en tension (MATLAB/Simulink)……...32

Chapitre III : ASPECTS PRATIQUES ET VALIDATION EXPERIMENTALE

Figure III. 1 : Schéma générale sur le banc d'essai…….……36

Figure III. 2 : Banc d'essai de la MAS ……...37

Figure III. 3 : Machine asynchrone à rotor bobiné …….38

Figure III. 4 : Capteur de vitesse.……38

Figure III. 5 : Le convertisseur AC/DC/AC ……...39

Figure III. 6 : Capteurs de mesure des courants et de tension.……40

Figure III. 7 : Carte d'acquisition des mesures Autobox (dSPACE 1103)…….40

Figure III. 8 : Fenêtre SIMULINK d'une commande à exécuter……41

Figure III.9 : Visualisation des signaux en temps réel de la commande de la MAS……...42

Figure III.10: Performances de la commande vectorielle indirecte de la MAS……..43

Figure III.11 : la tension simple alimentant la MAS…….....44

Figure III.12 : les signaux pratiques de la MAS pour une inversion de vitesse……..45

Table des matières

Liste des figures……I

Liste des tableaux……...III

Liste des acronymes……...IV

Liste des symboles……..V

INTRODUCTION GENERALE……..

CHAPITRE I : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1.INTRODUCTION ……..……...…02

I.2. HISTORIQUE DES MACHINES ELECTRIQUES …….……03

I.3.MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE…….……..03

I.3.1.Hypothèses simplificatrices …….……04

I.3.2.les équations électriques …….…….06

I.3.3.Les équations magnétiques …….…….....06

I.3.4.L'équation Mécanique…….…….....06

I.3.5.Changement de repère …….…….....07

I.3.6.Equations de la machine dans le modèle de Park…….…….… .09

I.4.MODELISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MACHINE…….……..10

I.4.1.Modélisation du redresseur…….……..10

I.4.2.Modélisation du Filtre……..11

I.4.3.Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux……..12

I.4.3.1.Commande triangulo-sinusoïdale de l'onduleur……..14

I.5.LES RESULTATS DE SIMULATION…….……...……..15

I.6. CONCLUSION……...17

CHAPITRE II : COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

II.1.INTRODUCTION……...18

II.2.PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE…….……18

II. 3. ORIENTATION DU FLUX ROTORIQUE…….21

II.4. COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE …….....22

II.4.1.Régulateur du courant i_{qs}…….……..25

II.4.2.Régulateur du courant i_{ds}…….……26

II.4.3.Réglage de la vitesse …….....26

II. 5.COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE……..27

II.5.1.Commande vectorielle indirecte basée sur le modèle simplifié……...27

II.5.2.Commande vectorielle indirecte avec contrôle des courants…….....29

II.6.RESULTATS DE SIMULATION…….……30

II.7.CONCLUSION……...……34

CHAPITRE III : ASPECTS PRATIQUES ET VALIDATION EXPERIMENTAL

III.1.INTRODUCTION…….35

III.2.PRESENTATION DU BANC D'ESSAI……..35

III.2.1.Description générale…….……..35

III.2.2.La chaine électromécanique…..……...36

III.2.3. La chaine de puissance……..38

III.2.4.La chaine de commande…….39

III.3.LES RESULTATS PRATIQUES…….……....41

III.4.CONCLUSION…….……45

Les machines à courant continu et alternatives inclus synchrone et asynchrone'' ont de tout temps servi les besoins de l'industrie. Traditionnellement, ces machines électriques ont été commandées manuellement et les équipements pour ces opérations sont complexes et couteux.

Le développement des convertisseurs et l'avancement rapide des semi-conducteurs ont permis durant ces trois derniers décennies une intense activité de recherche sur le développement de l'entrainement des machines électriques à vitesse variable. Contrairement aux moteurs à courant continu et aux moteurs synchrones, les moteurs asynchrones présentent de nombreux avantages, notamment en ce qui concerne la simplicité de conception et sa robustesse qui est due à l'absence du collecteur mécanique. Malheureusement, la machine asynchrone présente un inconvénient majeur, sa structure est fortement non linéaire, et les variables internes tels que le couple et le flux sont fortement couplées.

Dans les années 70s, la commande vectorielle a été réalisée par Blaschke, dite commande vectorielle à flux orienté, (Field Oriented Control : FOC). Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit de la machine asynchrone, donc elle permet d'obtenir un fonctionnement semblable à celui d'une machine à courant continu.

Dans ce cadre, le premier chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone alimentée par un convertisseur AC/DC/AC en utilisant l'onduleur à deux niveaux.

Le deuxième chapitre présente la commande vectorielle directe et indirecte de la machine asynchrone. Puis, on montre les performances de l'asservissement en vitesse en utilisant des correcteurs PI.

Afin d'enrichir la présente thèse, le dernier chapitre est dédié à la validation expérimentale de la commande vectorielle indirecte d'une MAS alimentée par un convertisseur AC/DC/AC. Dans ce cadre, nous commençons par description générale du banc d'essais à base d'une MAS. Par la suite, nous présentons les résultats expérimentaux relatifs à cette commande.

I.1.INTRODUCTION :

La modélisation des machines électriques est primordiale aussi bien pour la conception que pour la commande. Au niveau de la conception l'utilisateur a recours au calcul de champ afin d'analyser finement le comportement de la machine électrique. Sur un aspect commande, un modèle basé sur les équations des circuits est en général suffisant pour faire la synthèse de la commande. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts.

Cependant, la précision des résultats de simulation est évidement tributaire du modèle employé. Plus que ce dernier est fin, plus que la précision des résultats obtenus est meilleure. Toutefois la complexité des machines électriques aboutit rapidement si on veut tenir compte de tous les phénomènes, et à des modèles difficilement exploitables et particulièrement couteux en temps de calcul. Aussi il est nécessaire de cibler parmi les phénomènes physiques présents ceux qui sont prépondérants.

Le modèle triphasé d'une machine électrique est établi en moyennant certaines hypothèses simplificatrices. La structure symétrique et équilibrée de la machine permet de passer à une représentation biphasée grâce à la transformation de Park.

I.2. HISTORIQUE DES MACHINES ELECTRIQUES :

Ce bref rappel historique des machines électriques en 1821 le premier moteur électromagnétique est réalisé par Michael Faraday, et en 1822 Peter Barlow lui ajointe une roue dentée.

En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. En parallèle le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.

Une année plus tard, dans le cadre d'une collaboration Ampère et le constructeur français Hippolyate Paxi ont réalisé la génératrice à courant continu.

En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalise une machine dont la structure est inversée par rapport à celle des Paxii / Ampère, où le commutateur redresseur est amélioré.

En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable.

En1888 Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a eu un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique.

En 1889 l'Allemand Michael Doliv-Dobrowolski fabrique la première machine asynchrone triphasée, cette dernière elle était la plus simple à construire, la moins couteuse, la moins exigeante en termes de maintenance et avec une puissance élevée.

Depuis la fin de l'années 1920, les machines à deux enroulements triphasé au stator été introduites pour accroitre la puissance des alternateurs synchrones des très fortes puissances.

I.3.MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE :

La machine asynchrone comporte une partie fixe, dite stator, constituée par un empilage de tôles à faible taux de perte, supportant un bobinage symétrique triphasé alimenté en alternatif. Le rôle principal du bobinage statorique est la création d'un champ électromagnétique tournant à une vitesse appelée la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone est composée aussi d'une autre partie mobile, dite rotor, et on distingue deux types :

- **Rotor Bobinée (à bagues)** muni d'un enroulement généralement triphasé en court-circuit ou connecté à des bagues sur lesquelles frottent des balais.

- **Rotor a cage d'écureuil** : formé d'un ensemble des bagues conductrices reliées entre elles à chaque extrémité des anneaux circulaires.

Indépendamment de la technique employée, le rotor est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques et en court – circuit. Pour atteindre de bonnes performances dynamiques dans la commande de la machine asynchrone, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui représente fidèlement le comportement de la machine non seulement en régime permanents mais également en régime transitoires.

I.3.1. Hypothèses simplificatrices :

Pour pouvoir développer le modèle électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère triphasé a, b, c il est nécessaire de faire les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

1- Le circuit magnétique est linéaire, non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonction linéaire des courants.
2- L'hystérésis du circuit magnétique ainsi que les courant de Foucault sont négligés.
3- La répartition des enroulements et l'entrefer lisse conduisent au fait que les inductances propres sont indépendantes de la position de rotor par rapport au stator et que les inductances mutuelle entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre les axes magnétiques.

4- les harmoniques d'encoches et l'espace ne sont pas pris en compte.
5- L'effet peau et les effets thermiques sont négligeables.

La machine asynchrone est représentée sur la figure (I.1) par six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (*OAR*) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (*OAS*).

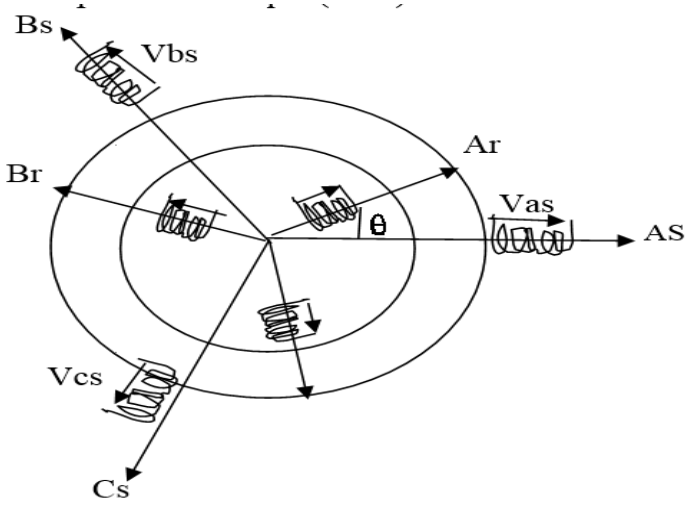


Figure I.1 : Représentation des axes de la MAS dans le repère abc

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

I. 3. 2. les équations électriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \dfrac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d}{dt}[\Phi_r] = 0 \end{cases} \quad \text{(I.1)}$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{(I.2)}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = 0; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_r] \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{(I.3)}$$

I.3. 3. Les équations magnétiques :

L'absence de saturation et la limitation au premier harmonique d'espace nous permettent d'écrire les expressions des flux statorique et rotoriques comme suit :

$$\begin{bmatrix}[\Phi_s]\\ [\Phi_r]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}[L_s] & [M_{sr}]\\ [M_{rs}] & [L_r]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}[I_s]\\ [I_r]\end{bmatrix} \tag{I.4}$$

Les quatre sous matrices d'inductances s'écrivent :

$$[L_s]=\begin{bmatrix}I_s & M_s & M_s\\ M_s & I_s & M_s\\ M_s & M_s & I_s\end{bmatrix};[L_r]=\begin{bmatrix}I_r & M_r & M_r\\ M_r & I_r & M_r\\ M_r & M_r & I_r\end{bmatrix} \tag{I.5}$$

$$[M_{rs}]=[M_{sr}]=M_{sr}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta+\frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{2\Pi}{3})\\ \cos(\theta-\frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta+\frac{2\Pi}{3})\\ \cos(\theta+\frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta)\end{bmatrix} \tag{I.6}$$

Avec:

Ls : inductance propre d'une phase statorique

Lr : inductance propre d'une phase rotorique.

Ms : inductance mutuelle entre phases statoriques.

Mr : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Mrs : inductance mutuelle entre stator et rotor.

Θ: écart angulaire entre stator et rotor.

I. 3. 4 L'équation Mécanique :

En appliquant les lois fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique sera donnée par la relation suivante :

$$J_m\frac{d\Omega_r}{dt}+f_m\Omega_r=C_{em}-C_r \tag{I.7}$$

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

$$C_{em} = \frac{\partial w_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = n_p \frac{\partial w_{mag}}{\partial \theta_{élect}} \tag{I.8}$$

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2}\left([I_s]^T [\Phi_s] + [I_r]^T [\Phi_r]\right) \tag{I.9}$$

Nous constatons la complexité des équations électriques et de l'équation mécanique de la machine asynchrone. Ces équations ne peuvent être facilement exploitées, à cause des dimensions des matrices entrant dans le calcul et de la dépendance de la matrice inductance à la position variable du rotor.

I.3.5 Changement de repère :

R.H. Park(1929) est le premier qui a introduit cette nouvelle approche dans l'analyse des machines électriques. Son idée consiste à transformer les grandeurs statoriques (tension, flux, courants) d'une machine synchrone à un référentiel lié au rotor.A.C.STANLY en 1938 employer lors de l'étude de la machine asynchrone un référentiel lié au stator (stationnaire). G.KRON a introduit un autre changement de variable en utilisant référentiel lié au champ tournant [Bsa01].

Depuis, ces transformations (PARK, STANLEY, KYRON …etc) et même d'autre ont traités séparément dans la littérature scientifique. En 1965 P.C. KRAUSE et C.H.THOMAS ont montré que toutes ces transformations sont incluses dans une seule transformation générale. Le système d'axe d. q. 0 de cette dernière transformation tourne alors à une pulsation arbitraire w. cette transformation générale conduit aux transformations usuelles (PARK, STANLEY, KYRON …etc) selon la valeur de la pulsation [Bsa01].

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquence particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature.

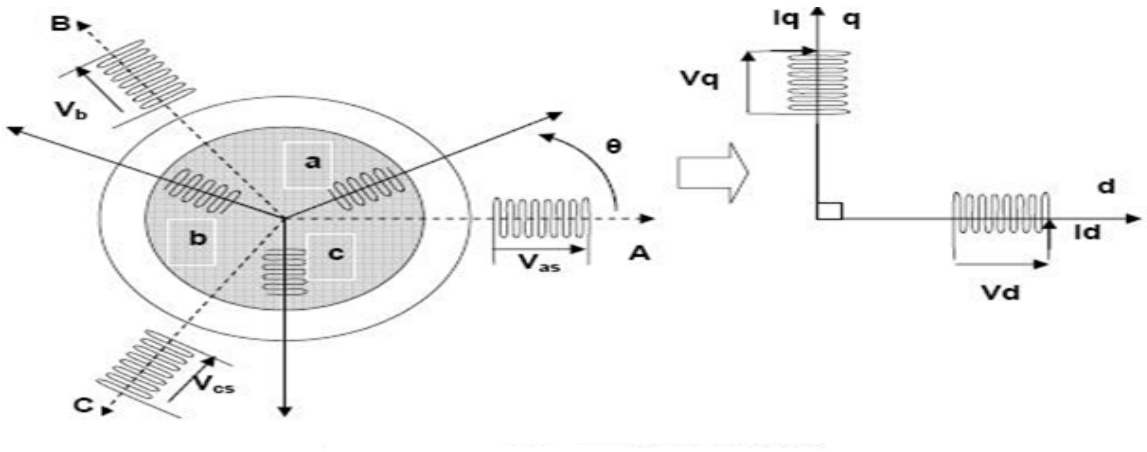


Figure I. 2 : Modèle de Park de la MAS

La transformation de Park est caractérisée par la matrice orthogonale suivante :

$$[P]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3)\\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta+2\pi/3)\\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2}\end{bmatrix} \qquad \text{(I.10)}$$

Le passage des variables $X_{a,b,c}$aux variables $X_{d,q}$s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix}X_d\\ X_q\\ X_0\end{bmatrix}=[\mathrm{P}\ (\theta)]\begin{bmatrix}X_a\\ X_b\\ X_c\end{bmatrix} \qquad \text{(I.11)}$$

En absence de la composante homopolaire c'est -à- dire Ia+Ib+Ic=0 et Va+Vb+Vc=0; les composantes I0 et V0 sont nulles.

Ce dernier peut être lié au stator: $\theta = 0; \quad (\frac{d\theta}{dt} = 0 \ et \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = -\omega \ )$

Au rotor : $\theta = \theta_r ; \quad (\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \ et \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = 0)$

Ou au champ tournant: $\theta = \theta_s ; \quad (\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \ \ et \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = \omega_s - \omega \ )$

En général, cette dernière solution est retenue pour réaliser le pilotage vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues dans ce référentiel. Pour agir sur les grandeurs réelles, il faut alors opérer un changement de référentiel c'est-à-dire la transformation inverse de PARK.

Dans ces travaux, nous nous intéressons à une commande en tension. Avec orientation du repère (d, q) lié au champ tournant.

I.3. 6. Equations de la machine dans le modèle de Park

Dans un repère dq lié au champ tournant le modèle mathématique de la machine asynchrone sous les hypothèses citées et avec une alimentation en tension, en fonction des variables d'état est donné par le système suivant :

$$\begin{cases} \dfrac{di_{ds}}{dt} = -\dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \dfrac{M_{sr}R_r}{\sigma L_s L_r^2}\Phi_{dr} + \dfrac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r}\Phi_{qr}\omega + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{ds} \\ \dfrac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{qs} - \dfrac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r}\Phi_{dr}\omega + \dfrac{M_{sr}R_r}{\sigma L_s L_r^2}\Phi_{qr} + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{qs} \\ \dfrac{d\Phi_{dr}}{dt} = \dfrac{M_{sr}R_r}{L_r}i_{ds} - \dfrac{R_r}{L_r}\Phi_{dr} + \omega_g\Phi_{qr} \\ \dfrac{d\Phi_{qr}}{dt} = \dfrac{M_{sr}R_r}{L_r}i_{qs} - \omega_g\Phi_{dr} - \dfrac{R_r}{L_r}\Phi_{qr} \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{p^2M_{sr}}{jL_r}\Phi_{dr}i_{qs} - \dfrac{p^2M_{sr}}{jL_r}\Phi_{qr}i_{ds} - \dfrac{f}{j}\omega - \dfrac{p}{j}C_r \end{cases} \quad (I.12)$$

I.4. MODELISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MACHINE

Le réglage de la vitesse du rotor d'une machine asynchrone se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et la tension (ou le courant) statorique. Par conséquent, pour se donner les moyens de cette action, il faut disposer d'une source d'alimentation capable de délivrer une tension (ou courant) d'amplitude et de fréquence réglable en valeur instantanées, selon des critères liés aux performances dynamiques souhaitées.

La figure (I.3) présente un système électromécanique mettant en œuvre une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension [Aib09], [Cmu97], [Lba03/04], [Pba04], [Kms]

.

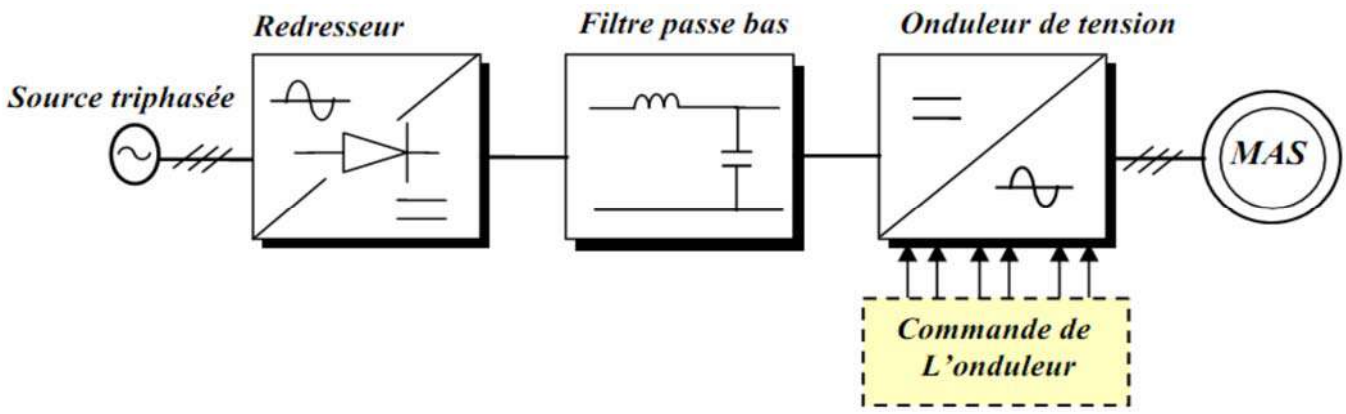


Figure I .3: Schéma de principe de l'association convertisseur-machine

I.4.1. Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur alternatif/continu. On utilise le plus souvent le pont à six diodes représenté par la figure (I.4).

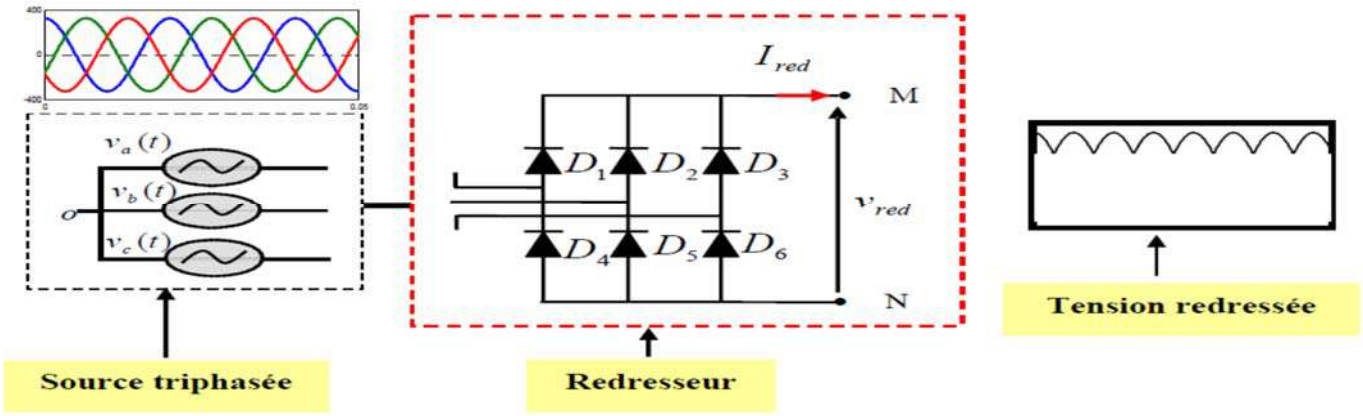


Figure I.4 : Représentation du redresseur triphasé double alternance à diodes

Et la tension de sortie est définie comme suit :

$$v_{red} = Max\left[v_a(t), v_b(t), v_c(t)\right] - Min\left[v_a(t), v_b(t), v_c(t)\right] \quad \text{(I.13)}$$

La tension redressée est assez ondulée, ce qui nécessite une opération de filtrage.

I.4.2. Modélisation du Filtre

Le filtre est constitué par une inductance en série et une capacité en parallèle, comme il est représenté à la figure I.5.

Le modèle est caractérisé par le système d'équations différentielles suivant:

$$\begin{cases} V_{red}(t) = L_f \dfrac{dI_{red}}{t} + E(t) \\ \dfrac{dE(t)}{t} = \dfrac{1}{C_f}\left(I_{red}(t) - I_{dc}(t)\right) \end{cases} \quad \text{(I.14)}$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$\mathbf{F(s)} = \frac{\mathbf{E(s)}}{\mathbf{V_{red}(s)}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}+(\sqrt{\mathbf{L_f C_f}}\mathbf{S})^{\mathbf{2}}} \quad \text{(I.15)}$$

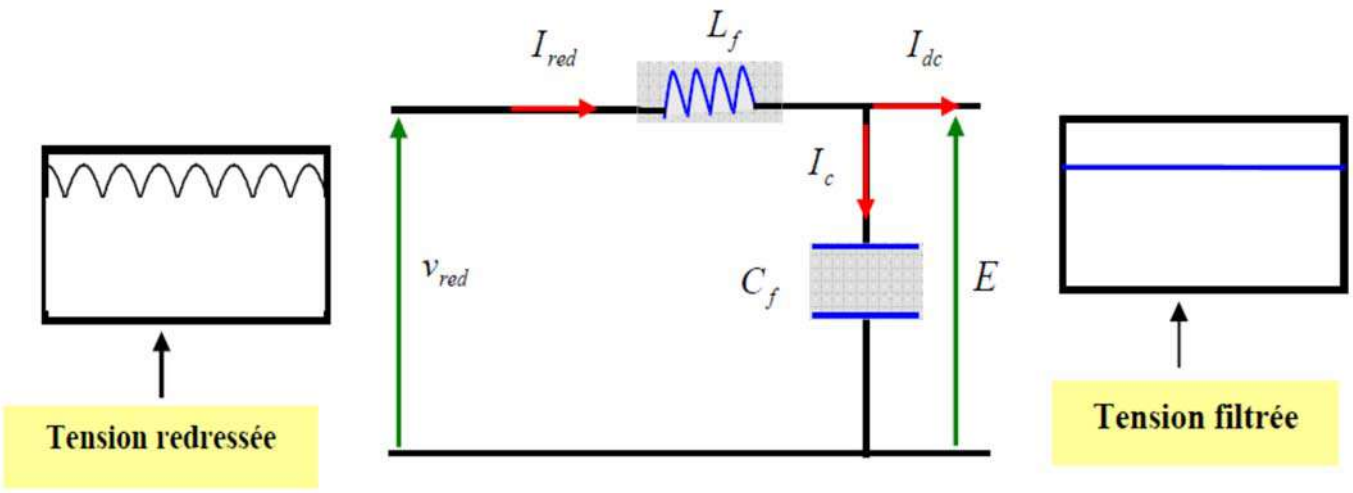


Figure I.5:Représentation du filtre

Pour dimensionner ce filtre, on doit placer sa fréquence de coupure *fc* - dessous de la fréquence de la première harmonique de $V_{red}(t)$ .Cette condition nous permet de déterminer L_f et C_f. La fréquence de coupure est égale à :

$$\mathbf{f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}} \qquad \text{(I.16)}$$

I.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

L'onduleur peut être considéré comme un amplificateur de puissance, et il est constitué de trois bras, contenant deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source. Les interrupteurs K_i, K_i^- (i = 1, 2, 3) doivent être contrôlés de manière complémentaire. Les six diodes (*Di*, *Di*) (i = 1, 2, 3) sont des diodes de roue libre assurant la protection des transistors [Aib09], [Tec3642]. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique alimentant le stator de la machine est illustré par la figure(I.6):

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c'est -t- dire $(Ki,\overline{Ki})$;$(i = 1, 2,3)$ supposés idéales.

- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Chaque interrupteur est représenté par une paire de transistor – diode, modélisée par deux états définis par la fonction de connexion suivante : [Aib09]

$$f_i = \begin{cases} 1 & Ki\ conduit\ et\ \overline{Ki}\ bloqué \\ 0 & Ki\ bloqué\ et\ \overline{Ki}\ conduit \end{cases}$$

Avec : $fi + \overline{fi} = 0$; i=1, 2, 3

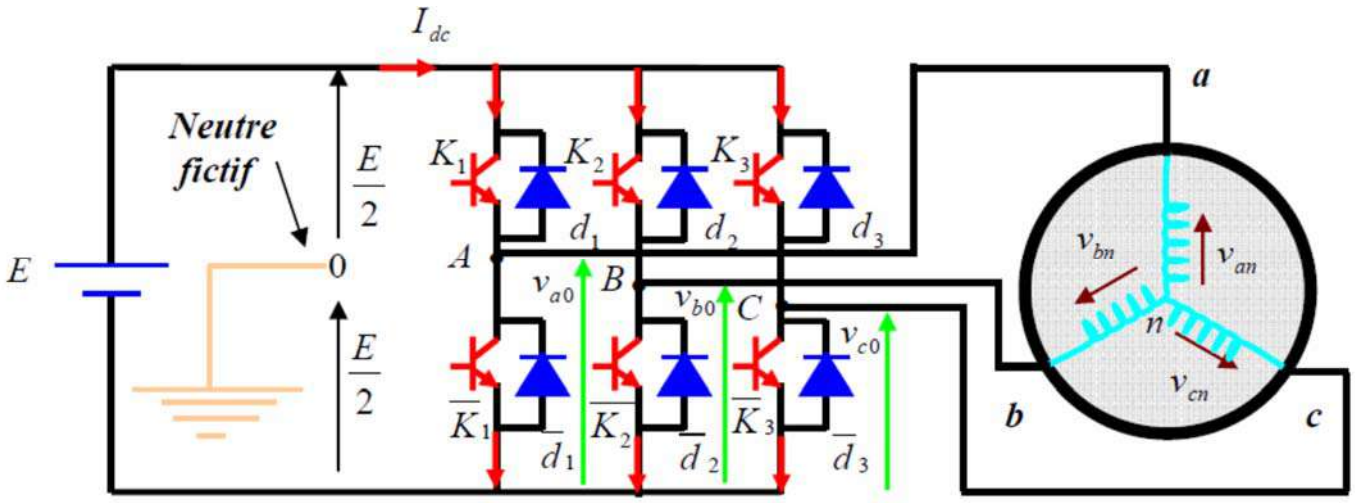


Figure I.6: Représentation de l'ensemble onduleur + machine asynchrone [Aib09].

Les tensions composées sont :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{as} - V_{bs} = E.(f1 - f2) \\ V_{BC} = V_{bs} - V_{cs} = E.(f2 - f3) \\ V_{CA} = V_{cs} - V_{as} = E.(f3 - f1) \end{cases} \quad (I.17)$$

Sachant que le système est équilibré :

$$Va+Vb+Vc=0 \quad (I.18)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

I.4.3.1. Commande triangulo-sinusoïdale de l'onduleur

La M.L.I sinus - triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [Aib09], [Pba04], [Gse77].

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

On distingue pour cette commande MLI deux paramètres:

- L'indice de modulation (*m)* égale au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la référence.

$$m=\frac{f_{réf}}{fpor} \tag{I.20}$$

- Le taux de modulation $\boldsymbol{r}$ égal au rapport de l'amplitude de la modulante sur celle de la porteuse.

$$r = \frac{A_{réf}}{A_{por}} \tag{I.21}$$

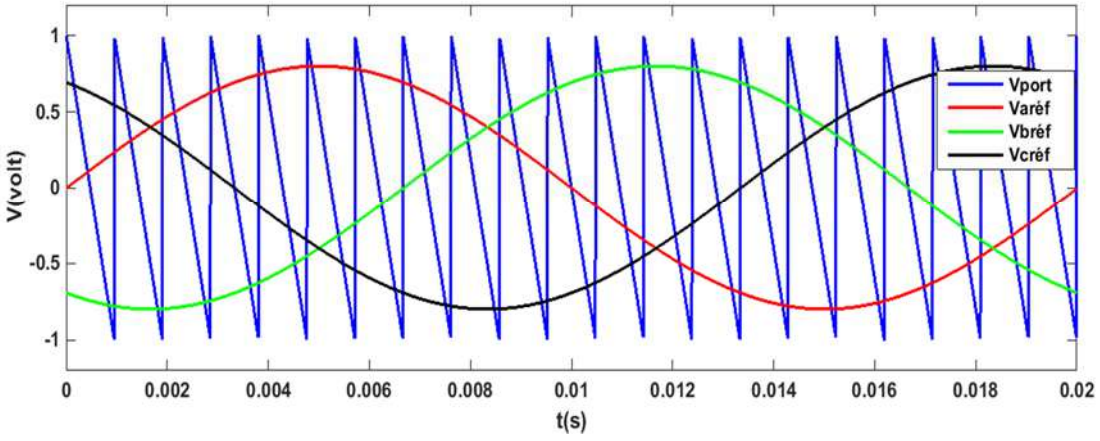


Figure I.7 : Les tensions de référence et la tension de porteuse pour m=21

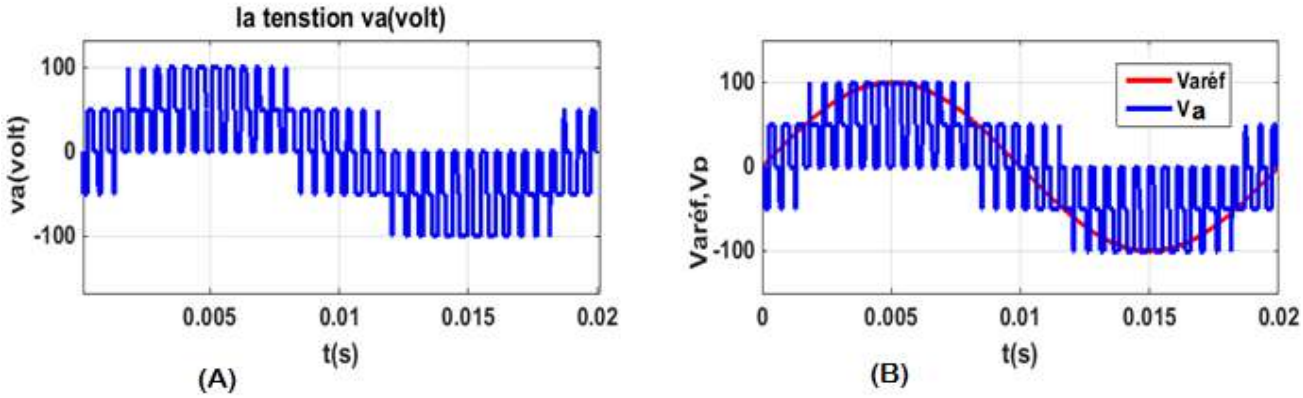


Figure I.8 : La tension V_a (volt) d'onduleur à deux niveaux

La figure(I.7) illustre les trois tensions de références sinusoïdaux (V_a, V_b, V_c) décalées entre elles par un angle de ($2\pi/3$) et d'amplitude ($V_{réfmax}$= 0.8) et la porteuse de fréquence 21 Hz et d'amplitude ($V_{portmax}$=1).

Les points d'intersection entre la porteuse et les trois tensions de référence représentent les instants de fermeture ou ouverture des interrupteurs qui donne (V_a, V_b, V_c) ondulées comme V_a illustrée par la figure I.9.A et la figure I.9.B.

I.5. LES RESULTATS DE SIMULATION

Les résultats présentés dans cette partie auront pour but d'illustrer le comportement de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux, dont les paramètres sont définies en Annexe A, les simulations sont effectuées pour une période d'échantillonnage T_e égale à 100µs.

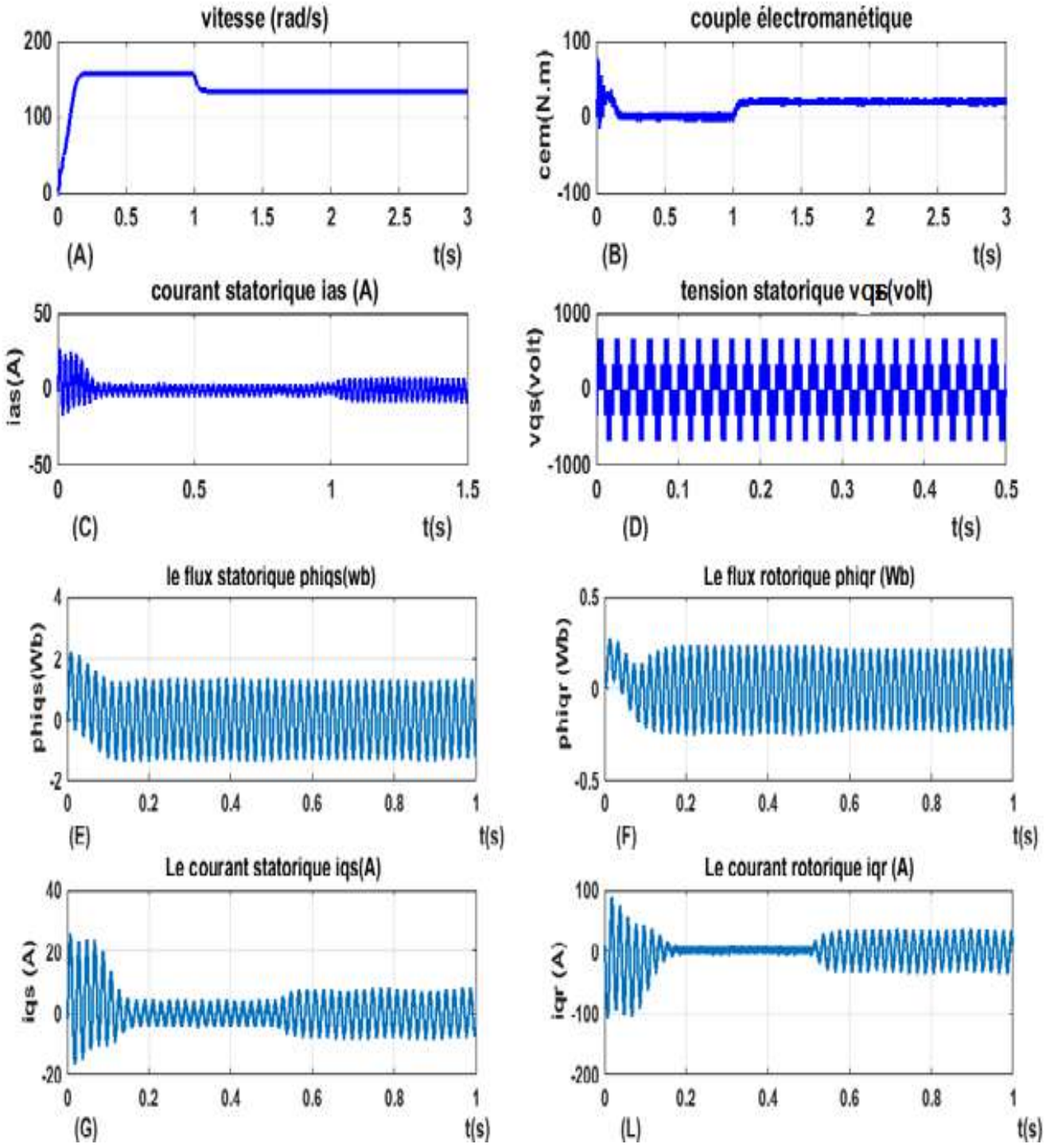


Figure I.9 : performances de l'association MAS-Onduleur

La figure (I.13.A) représente la vitesse de la MAS pour un démarrage à vide, puis l'application d'une charge de 10 (N.m) à l'instant (t=1s).

La figure (I.13.B) illustre la variation du couple électromagnétique de la machine, il prend une grande valeur au démarrage (régime transitoires).En régime permanent le couple se stabilise à une valeur afin de compenser le couple de charge.

La figure (I.13.C) montre la variation du courant statorique ias(A), on observe que lors du démarrage de la machine il est élevé. A l'instant (t=1s) le courant augmente avec la charge.

La figure (I.13.D) représente la tension de la machine v_{as}, elle a deux niveaux et symétrique.

Les figures (I.13.E, F, et G) représentent respectivement la variation du flux statorique et rotorique de la MAS.

I.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons modélisé la machine asynchrone à rotor bobiné en court-circuit en basant sur quelques hypothèses simplificatrices. La transformation de Park utilisé nous a permet de réduire la complexité du model triphasé, et le remplacer par un model biphasé équivalent.

Le comportement électrique, magnétique et mécanique de la MAS en régime transitoire et permanent, à vide et en charge est présenté. L'alimentation de la MAS par un onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie MLI, nous a permet un contrôle précis de la fréquence de la tension d'alimentation de la machine.

II.1- INTRODUCTION:

La commande des machines électrique à courant alternatif a connu ces dernières années, un essor considérable. En effet les exigences technologiques actuelles nécessitent des performances de plus en plus élevés. Ainsi, afin d'améliorer les performances, la machine asynchrone fait l'objet de nombreuses études depuis longtemps. Elle présente l'avantage d'être robuste, peu couteuse et de construction simple. Cependant, la difficulté réside dans la non-linéarité du modèle et le fort couplage entre les grandeurs statoriques et les grandeurs rotoriques rend la machine comme un système complexe et multi variable.

Pour surmonter les contraintes dues au fort couplage magnétique entre le stator et le rotor, HASS (1970) et BLACSHKE (1972) ont présentés le principe du découplage entre le flux et le couple de la machine asynchrone, qui permet d'assimiler cette dernière à une machine à courant continu. Ce principe consiste à orienter le flux vers une direction déterminée, d'où l'appellation commande à flux orienté.

II.2-PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE :

Dans une machine à courant continu l'inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple, comme la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumit à un champ magnétique est égal au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ.

Le principe d'orientation du flux, qui est la base de la commande vectorielle, a été développé par BLASCHKE au début des années 70, il consiste à orienter le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine asynchrone analogue à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (figure.II.1). IL s'agit de placer le référentiel (dq) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante.

Or le couple est donné par :

$$C_e = p\left(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}\right) = \frac{pM_{sr}}{L_r}\left(\emptyset \Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}\right) \qquad \text{(II. 1)}$$

Donc si le flux rotorique est orienté sur l'axe ***d*** $(\phi_{dr} = \phi_r \quad \text{Et} \quad \phi_{qr} = 0)$

Dans un repère lie au champ tournant, $(\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt})$ le couple devient :

$$C_e = \frac{pM_{sr}}{L_r}(\Phi I_{qs}) \qquad (II.2)$$

Et l'évolution du flux est donnée par :

$$T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M_{sr} I_{ds} \qquad (II.3)$$

Le courant I_{ds} fixe le flux et la composante I_{qs} fixe le couple. On retrouve le comportement d'une machine à courant continu, la liaison du repère d, q avec le champ tournant $(\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt})$ est *assurée* par l'autopilotage de la machine :

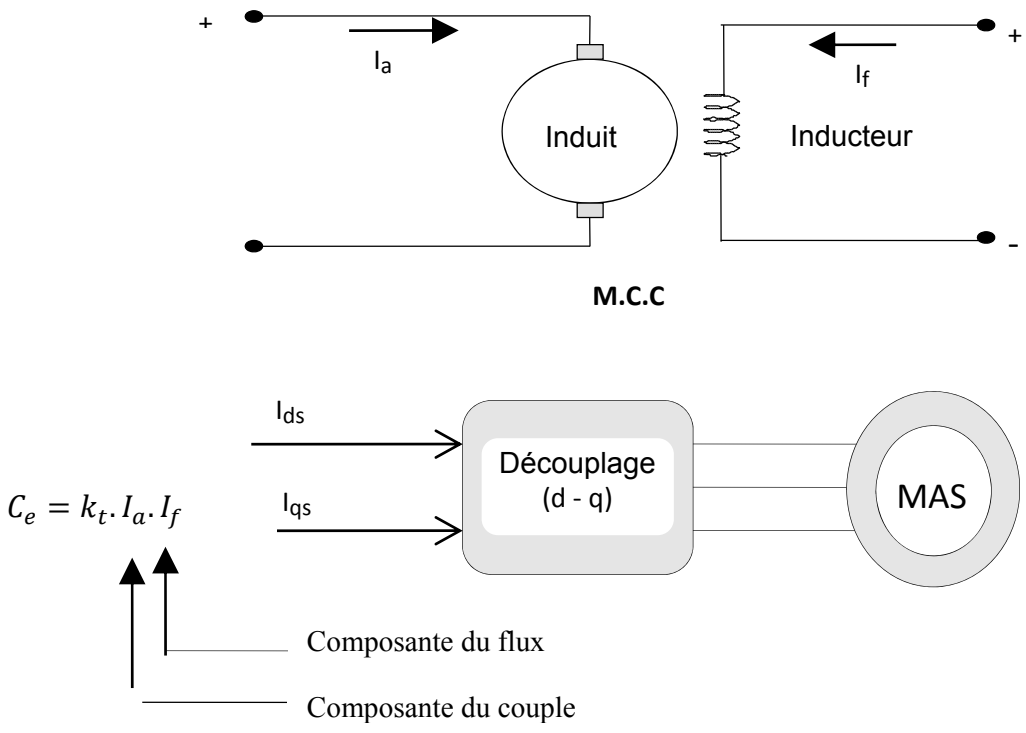


Figure II.1 : principe de la commande vectorielle de la MAS

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence, d'après le modèle de la machine asynchrone représenté par les équations biphasées, nous choisissons un référentiel lié au champ tournant tel que l'axe (d) coïncide avec la direction désirée du flux (rotorique, statorique ou entrefer).

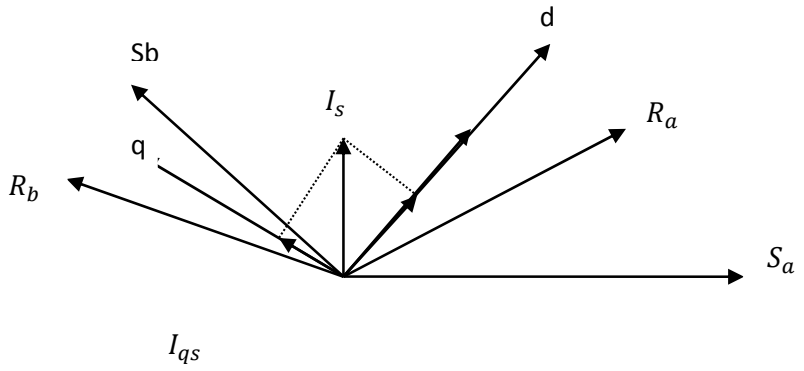


Figure II.2 :Orientation de flux (Rotorique, Statorique ou Entrefer)

Afin de transformer l'expression du couple électromagnétique sous forme simplifiée, trois choix d'orientation de flux sont envisageable.

- orientation du flux rotorique qui se caractérise par :

  $\Phi_{rd} = \Phi_r \quad \text{Et} \quad \Phi_{rq} = 0$

- orientation du flux statorique qui se caractérise par :

  $\Phi_{sd} = \Phi_s \quad \text{Et} \quad \Phi_{sd} = 0$

- orientation du flux d'entrefer (magnétisant) qui se caractérise par :

  $\Phi_{md} = \Phi_m \quad \text{Et} \quad \Phi_{md} = 0$

La synthèse d'une commande vectorielle se déroule en plusieurs phases [Bsa01]:

- Choisir la machine et son alimentation (source et convertisseur…),
- Choisir la nature des consignes (flux et couple, flux et glissement…),
- Déterminer le repère d, q et les natures de l'orientation (du flux rotorique sur l'axe d par exemple),

- En déduire les variables de commande (courants i_{ds}, i_{qs}, pulsation ω_{gl}…) adaptées au type d'alimentation, un modèle d'état de la machine faisant apparaître la variable intervenant dans l'orientation (le courant, le flux…),
- Déterminer, à partir du modèle d'état, la loi de commande assurant le découplage du flux et du couple et l'autopilotage réalisant l'orientation du repère.
-

II. 3. ORIENTATION DU FLUX ROTORIQUE

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park [Bsa01].

Il s'agit d'imposer la pulsation de glissement comme suit :

$$\omega_g = \frac{M_{sr} R_r}{L_r \Phi_{dr}} i_{qs} \qquad \text{(II.4)}$$

Ainsi, nous obtenons :

$$\Phi_r = \Phi_{dr} \quad \text{et} \quad \Phi_{qr} = 0$$

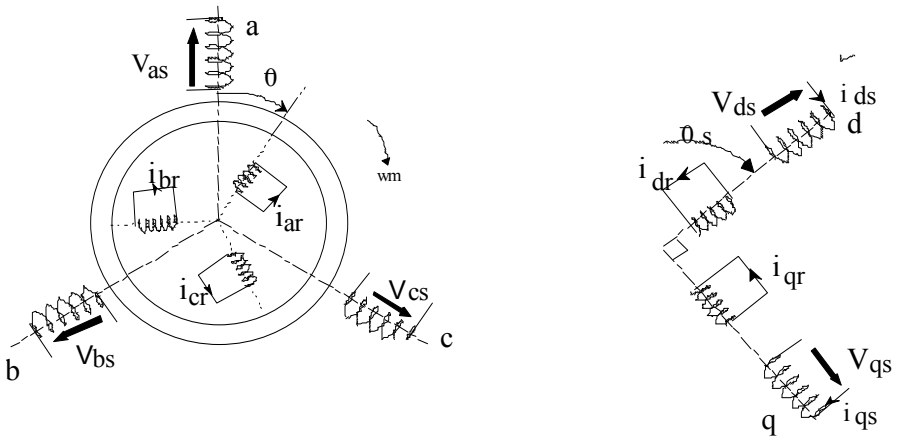


Figure II.3 : Principe d'orientation du flux rotorique

Le modèle devient :

$$\begin{cases} \dfrac{di_{ds}}{dt} = -\dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \dfrac{M_{sr}R_r}{\sigma L_s L_r^2}\Phi_r + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{ds} \\ \dfrac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{qs} - \dfrac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r}\Phi_r\omega + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{qs} \\ \dfrac{d\Phi_r}{dt} = \dfrac{M_{sr}R_r}{L_r}i_{ds} - \dfrac{R_r}{L_r}\Phi_r \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{p^2 M_{sr}}{jL_r}\Phi_r i_{qs} - \dfrac{f}{j}\omega - \dfrac{p}{j}C_r \end{cases} \quad (II.5)$$

Après transformation de Laplace, nous pouvons écrire :

$$\Phi_r = \frac{M_{sr}}{1 + \dfrac{L_r}{R_r}s}i_{ds}$$
$$C_e = \frac{pM_{sr}}{L_r}\Phi_r i_{qs} \quad (II.6)$$

D'après les équations (II.6), nous constatons qu'il est possible d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes du courant statorique i_{ds} et i_{qs} respectivement.

La principale difficulté de la mise en œuvre de la commande vectorielle de la machine asynchrone réside dans la détermination de la position et l'amplitude du flux rotorique, car ces deux grandeurs ne sont pas mesurables. Or la connaissance de ces deux grandeurs est nécessaire pour contrôler le régime dynamique de la machine [Bsa01].

II.4. COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE :

Afin de déterminer la position et l'amplitude du flux rotorique, l'idée est de mesurer le flux dans la machine à l'aide d'un bobinage supplémentaire ou avec un capteur à effet Hall. Ceci fragilise le moteur et nécessite une construction spéciale de la machine.

Devant la complexité posée par l'installation des capteurs servant à mesurer le flux rotorique. Hasse a proposé une méthode basant sur le modèle dynamique du flux, qui nécessite des grandeurs facilement mesurables tel que les courants, les tensions statoriques et la vitesse de rotation [Vas 90].

Pour déterminer la position et le module du flux, on utilise souvent le modèle de la machine

$$\begin{aligned}\frac{d\Phi_r}{dt} &= \frac{M_{sr}R_r}{L_r}i_{ds} - \frac{R_r}{L_r}\Phi_r \\ \frac{d\theta_s}{dt} &= \omega + \frac{M_{sr}R_r}{L_r\Phi_r}i_{qs}\end{aligned} \tag{II.7}$$

Le module du flux rotorique et du couple électromagnétique seront contrôlés par contre-réaction. Alors que la pulsation de glissement est directement calculée par l'expression (II.4), à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.

Les tensions statoriques sont obtenues à partir du système suivant :

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s i_{ds} + \sigma L_s s i_{ds} + \frac{M_{sr}}{L_r}s\Phi_r - \sigma L_s\omega_s i_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \sigma L_s s i_{qs} + \frac{M_{sr}}{L_r}\omega_s\Phi_r + \sigma L_s\omega_s i_{ds}\end{aligned} \tag{II.8}$$

Afin d'éviter le couplage entre les deux équations, nous utilisons une méthode de compensation statique. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs de courant pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage [Bsa01]. Les termes supplémentaires sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les courants correspondants.

Les tensions à la sortie des régulateurs sont données par :

$$\begin{aligned}v_{ds}^{r} &= R_s i_{ds} + \sigma L_s s i_{ds} \\ v_{qs}^{r} &= R_s i_{qs} + \sigma L_s s i_{qs}\end{aligned} \tag{II.9}$$

Les tensions de couplage sont données par :

$$\begin{aligned}v_{ds}^{c} &= -\sigma L_s\omega_s i_{qs} \\ v_{qs}^{c} &= \frac{M_{sr}}{L_r}\omega_s\Phi_r + \sigma L_s\omega_s i_{ds}\end{aligned} \tag{II.10}$$

D'où les tensions de référence nécessaires pour le réglage sont:

$$\begin{aligned} v_{ds}^{*} &= v_{ds}^{c} + v_{ds}^{r} \\ v_{qs}^{*} &= v_{qs}^{c} + v_{qs}^{r} \end{aligned} \qquad \text{(II.11)}$$

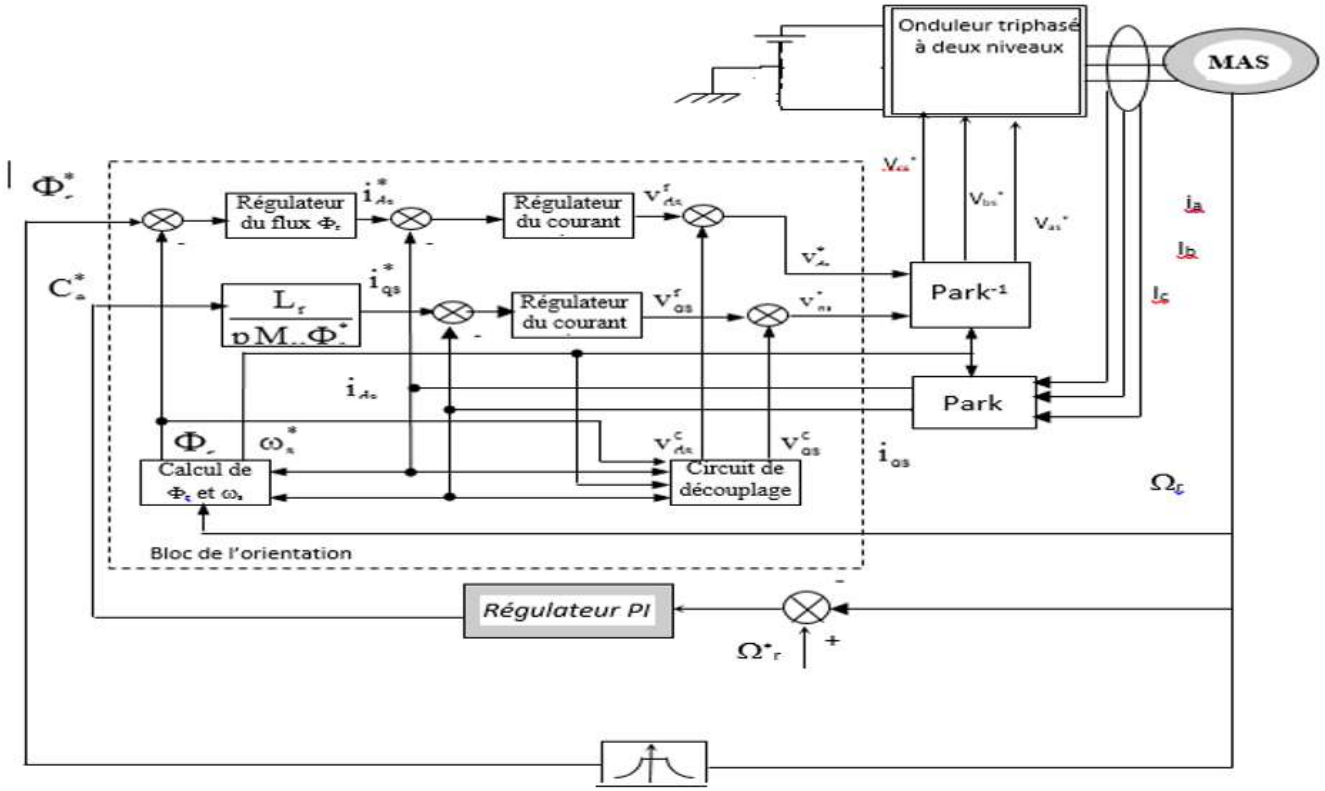


Figure II.4 : Schéma de principe de la commande vectorielle directe

II.4.1. Régulateur du courant i_{qs}:

Le régulateur du courant en quadrature en fournit la tension V_{qs}^{r} nécessaire pour maintenir le couple à sa valeur de référence.

La fonction de transfert $\frac{i_{qs}}{V_{qs}^{r}}$ est donnée par :

$$\frac{i_{qs}}{V_{qs}^{r}} = \frac{\frac{1}{\sigma L_s}}{S + \rho_s} \qquad (II.12)$$

Avec : $\rho_s = R_s/(\sigma L_s)$

La boucle de régulation du courant est représentée par la figure (II.5)

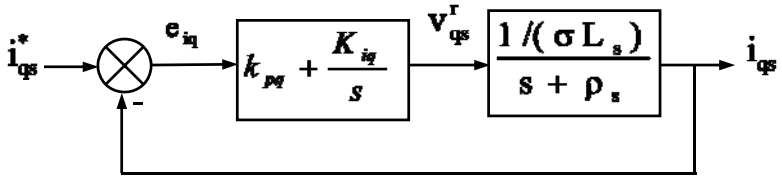


Figure II.5 : Schéma bloc de régulation du courant i_{qs}

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{i_{qs}}{i_{qs}^{*}} = \frac{\frac{K_{iq}+SK_{pq}}{\sigma L_s}}{S^2 + S\left(\rho_s + \frac{K_{pq}}{\sigma L_s}\right) + \frac{K_{iq}}{\sigma L_s}} \qquad (II.13)$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimal, les pôles sont choisis complexes conjuguée avec partie réelle égale à la partie imaginaire [Bsa01].

En imposant les pôles $S_{1,2} = -\rho \pm j\rho$, le polynôme caractéristique s'écrit comme suit :

$$P(S) = S^2 + 2\rho S + 2\rho^2 \qquad \text{(II. 14)}$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$K_{iq} = 2\rho^2 L_s \sigma \qquad K_{pq} = (2\rho - \rho_s)\sigma L_s \qquad \text{(II. 15)}$$

II.4.2.Régulateur du courant i_{ds}

Le régulateur du courant direct fournit la tension V_{ds}^r nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur référence.

La fonction de transfert $\frac{i_{ds}}{V_{ds}^r}$ est donnée par :

$$\frac{i_{ds}}{V_{ds}^r} = \frac{1/(\sigma L_s)}{S+\rho_s} \qquad \text{(II.16)}$$

Les mêmes calculs effectués pour le régulateur du courant i_{qs} sont appliqués à ce régulateur. Les paramètres sont donc les mêmes. Ils sont donnés par :

$$K_{id} = 2\rho^2 L_s \sigma \qquad K_{pq} = (2\rho - \rho_s) \qquad \text{(II. 17)}$$

II.4.3 Réglage de la vitesse :

La boucle la plus externe est la boucle de régulation de la vitesse ou de la position (la grandeur ayant une dynamique la plus lente). Pour cette raison, les pôles imposés pour la boucle externe sont plus proches à l'origine du plan des racines par rapport aux pôles de la boucle interne.

D'après l'équation mécanique, nous avons :

$$\frac{\omega}{C_e} = \frac{p/j}{s+\rho_m} \qquad \text{(II.18)}$$

Avec : $\rho_m = \frac{f}{j}$

D'où le schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse :

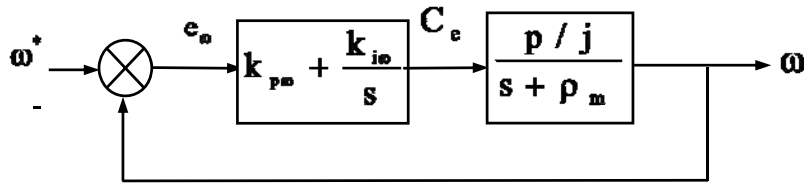


Figure II.6 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotationω_r

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega}{C_e^*} = \frac{(K_{i\omega}+SK_{p\omega})P/j}{S^2+S\left(\rho_m+K_{p\omega}\frac{P}{j}\right)+K_{i\omega}\frac{P}{j}} \qquad \text{(II.19)}$$

Par imposition des pôles en boucles fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur.

$$K_{i\omega} = \frac{2\rho^2 j}{P} \qquad K_{p\omega} = \frac{(2\rho-\rho_m)j}{P} \qquad \text{(II.20)}$$

II. 5. COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE

II. 5. 1. Commande vectorielle indirecte basée sur le modèle simplifié

Le principe de cette méthode de contrôle consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais simplement sa position calculée en fonction des grandeurs de référence. Cette méthode élimine donc le besoin d'utiliser un capteur de flux (capteur physique ou modèle dynamique) mais nécessite l'utilisation d'un capteur de la vitesse rotorique.

Le schéma représentatif de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux est donné par la figure suivante.

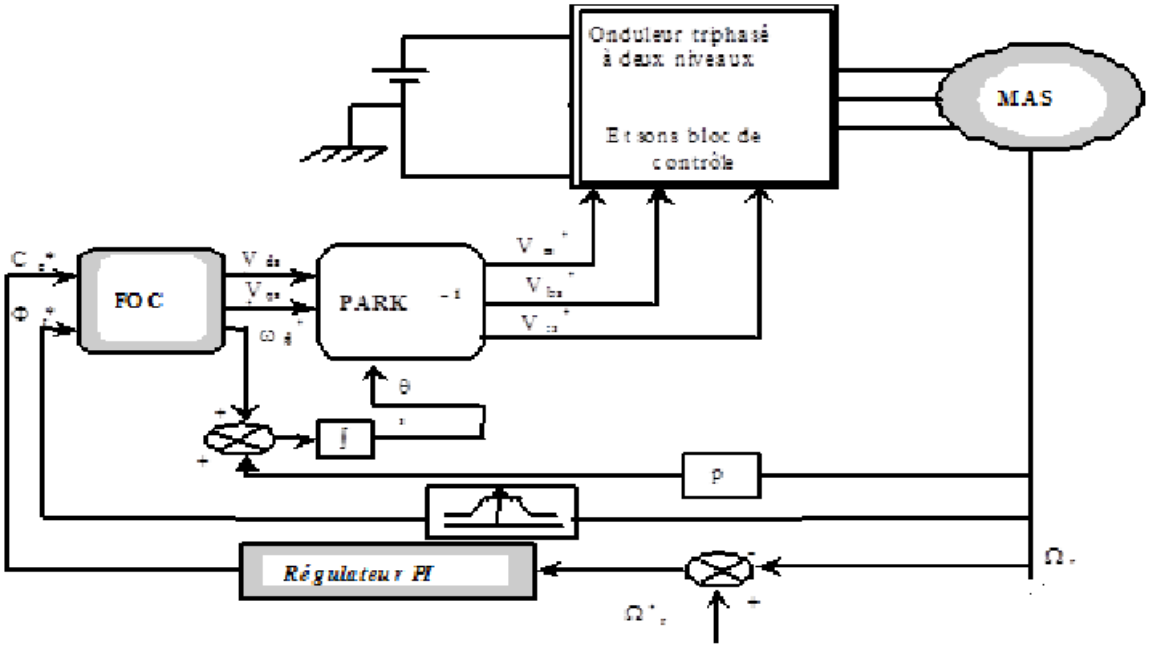


Figure II.7 : Schéma de la commande vectorielle indirecte

Le bloc de contrôle FOC (field oriented control) est un bloc qui calcule les trois sorties (v_{ds}^*, v_{qs}^*, ω_s^*) donnant les trois tensions de référence, en fonction des deux entrées de référence (C_e^*, Φ_r^*) qui assurent le découplage. Les équations (II.21) du FOC sont définies en considérant le régime statique pour lequel le flux rotorique et le couple électromagnétique sont égaux à leurs valeurs de référence.

D'après le modèle (II.5) en régime établi, nous tirons :

$$\begin{cases} v_{ds}^* = R_s i_{ds}^* - \sigma L_s \omega_s i_{qs}^* \\ v_{qs}^* = R_s i_{qs}^* + \sigma L_s \omega_s i_{ds}^* \\ \omega_s^* = \omega + \dfrac{M_{sr} R_r}{L_r \Phi_r} i_{qs}^* \end{cases} \qquad \text{(II.21)}$$

Avec :

$$\begin{aligned} i_{ds}^* &= \frac{\Phi_r^*}{M_{sr}} \\ i_{qs}^* &= \frac{L_r C_e^*}{p M_{sr} \Phi_r^*} \end{aligned} \qquad \text{(II.22)}$$

Le calcul des régulateurs de vitesse et de position est identique à celui présenté précédemment pour la commande vectorielle directe.

Les courants de référence i_{ds}^* et i_{qs}^* ne sont déterminés qu'à partir des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées [Bsa01].

II. 5. 2. Commande vectorielle indirecte avec contrôle des courants

La méthode de commande indirecte est caractérisée par le fait qu'aucune estimation du couple ou du flux n'est nécessaire. Cela permet d'allier la simplicité du contrôle vectoriel.

Outre la sensibilité vis-à-vis des variations des paramètres de la machine et en particulier de la constante de temps rotorique T_r, la méthode basée sur le modèle simplifié repose en grande partie sur la capacité de l'onduleur et de sa commande à imposer les courants désirés dans la machine. En effet, à partir de l'instant où le système n'impose pas les courants désirés, cette commande perde sa principale propriété de découplage entre le flux et le couple donc de commande vectorielle. Pour remédier ce problème, une commande vectorielle indirecte basée sur le contrôle des courants est utilisée. Du point de vue pratique cette méthode offre la possibilité de limiter le courant absorbé par la machine.

La figure II.10, donne la structure générale de cette commande.

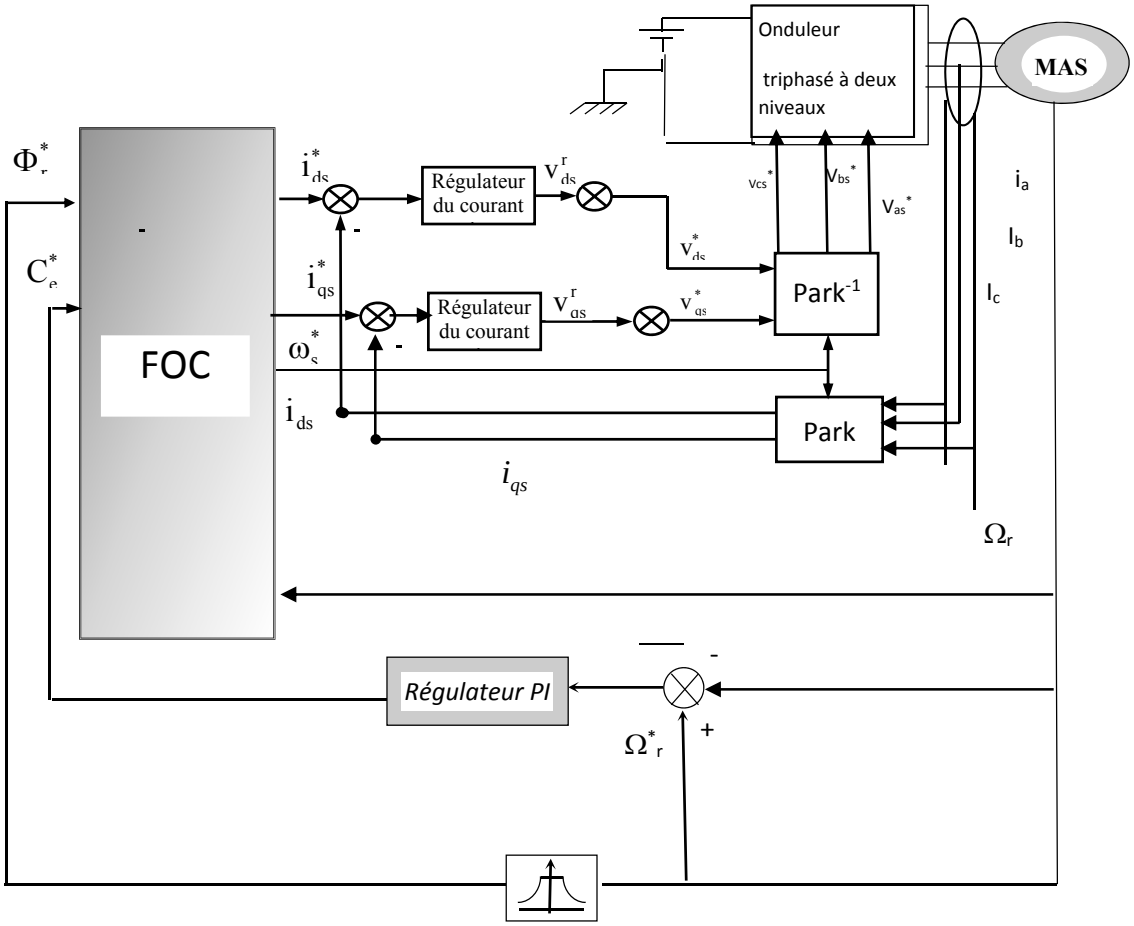


Figure II.8 : Structure de la commande vectorielle indirecte avec contrôle des courants

II.6 RESULTATS DE SIMULATION :

Les régulateurs utilisés pour les deux boucles de vitesse et de courant sont donnés par la table suivante :

Boucle de régulation	k_p	k_i
Courants (i_{ds}, i_{qs})	2000	10
Vitesse (ω)	2	1

Les simulations présentées par la figure II.11 montrent les performances du réglage en vitesse de la machine asynchrone, alimentée par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux, commandée par

la méthode indirecte du flux orienté. Nous avons simulé un démarrage à vide accompagné d'un fonctionnement pour différents niveaux de vitesse.

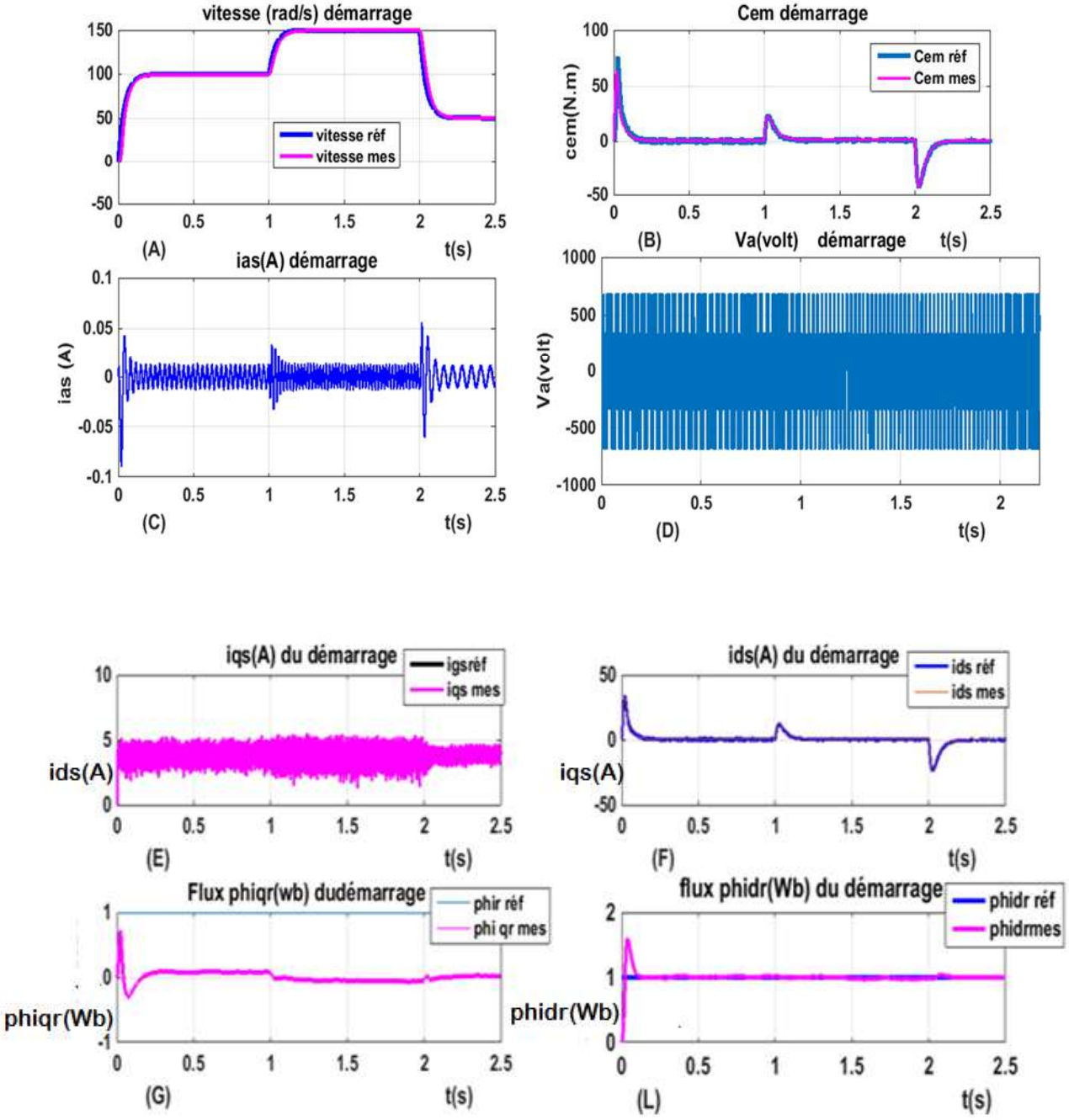


Figure II.9 : Les performances de la machine asynchrone contrôlée par la commande vectorielle indirecte

$$\Omega_{ref} = \begin{cases} 100\,\text{rad/s} & t < 1\text{s} \\ 150\,\text{rad/s} & 1 < t < 2\,\text{s} \\ 50\,\text{rad/s} & 2\text{s} < t \end{cases}$$

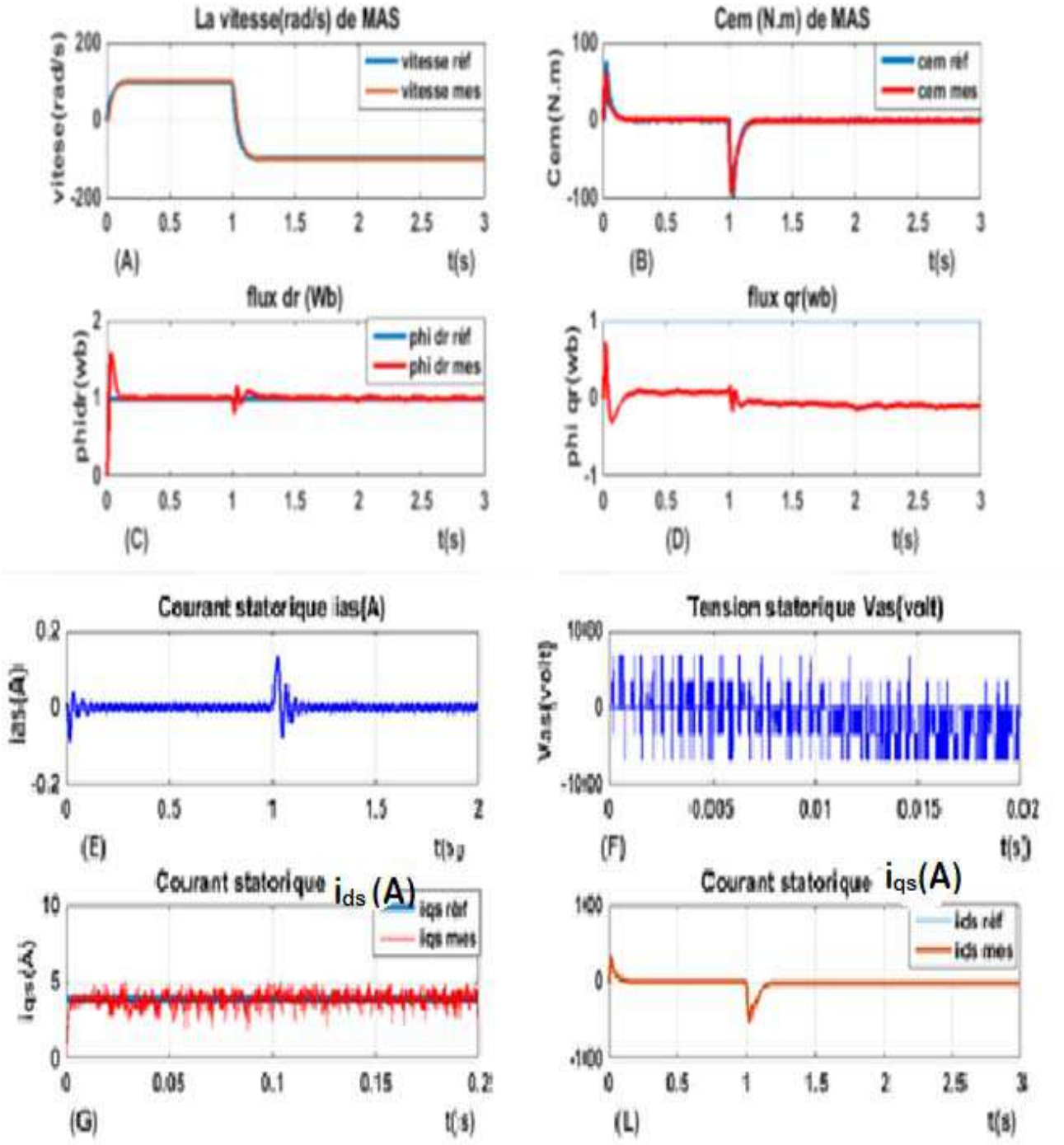


Figure II.10: Performances de la MAS contrôlée par la commande vectorielle indirecte du flux orienté pour inversion de vitesse.

$$\Omega_{ref} = \begin{cases} 100\,\text{rad/s} & t < 1\text{s} \\ -100\,\text{rad/s} & t > 1\text{s} \end{cases}$$

La figure II.11, montre les performances de la MAS pour plusieurs gammas de consigne de vitesse. On note les très bonnes performances du contrôle vectoriel indirect. La vitesse suit sa valeur de référence, ainsi la possibilité de l'inversion du sens de rotation par le même correcteur PI. Le flux suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante en quadrature pratiquement nulle.

De même, le courant statorique répond bien aux variations imposées sur le couple, et conserve une forme proche de la sinusoïde, comme le montre la figure II.11.

Il est remarquable aussi que le courant soit toujours limité à sa valeur admissible. Cependant, le découplage pour ce type de commande est plus affecté dans le cas de l'inversion de vitesse. Ceci revient directement à l'absence de la boucle fermée de régulation du flux.

II.7. CONCLUSION

L'orientation suivant l'axe direct du repère d'observation (d, q) a eu pour but d'obtenir des modèles de contrôle réduits et découplés, semblables à ceux de la machine à courant continu à excitation indépendante.

Nous avons vu qu'un découplage parfait entre les axes d et q conduit à transformer notre système initial, comportant deux entrées et deux sorties, en deux sous système mono-entrée mono-sortie. Comme principaux avantages, de cette mise en équation, est l'obtention de deux systèmes mono-variables au lieu d'un système multi-variable, qu'est la machine asynchrone.

On note aussi que les régulateurs classiques dépendent fortement des paramètres de la machine, et une erreur d'identification de paramètre ou d'estimation des grandeurs à contrôler conduiront obligatoirement à une détérioration des performances de la commande.

Par ailleurs, l'inconvénient majeur de la méthode indirecte c'est que le calcul de la vitesse de glissement ω_{gl} nécessite la connaissance de la constante du temps rotorique T_r de la machine. Cette constante de temps varie durant le fonctionnement de la machine asynchrone, principalement à cause de la variation de la résistance rotorique avec la température, mais aussi à cause de la saturation du circuit magnétique de la machine. Cette imprécision sur la valeur de T_r conduit à une erreur sur la détermination de la position du flux rotorique, ce qui introduit un couplage entre le flux et le couple.

III.1. INTRODUCTION

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la commande vectorielle de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux. Une comparaison entre deux types de cette commande est effectuée, où la commande vectorielle directe présente de meilleures performances par rapport à la commande indirecte. Afin, de valider ces résultats théoriques, nous présentons dans ce dernier chapitre les résultats expérimentaux relatifs à la loi de commande vectorielle indirecte. Ces résultats expérimentaux sont obtenus en exploitant un banc d'essais à base d'une machine asynchrone de puissance 1.5Kw.

III.2. PRESENTATION DU BANC D'ESSAI

III.2.1. Description générale

Le banc d'essais, utilisé dans le cadre de ces travaux est réalisé au sein du laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique (LREA) de l'université de Médéa. Il est constitué de trois parties principales : la chaine électromécanique, baie de puissance et la chaine de commande.

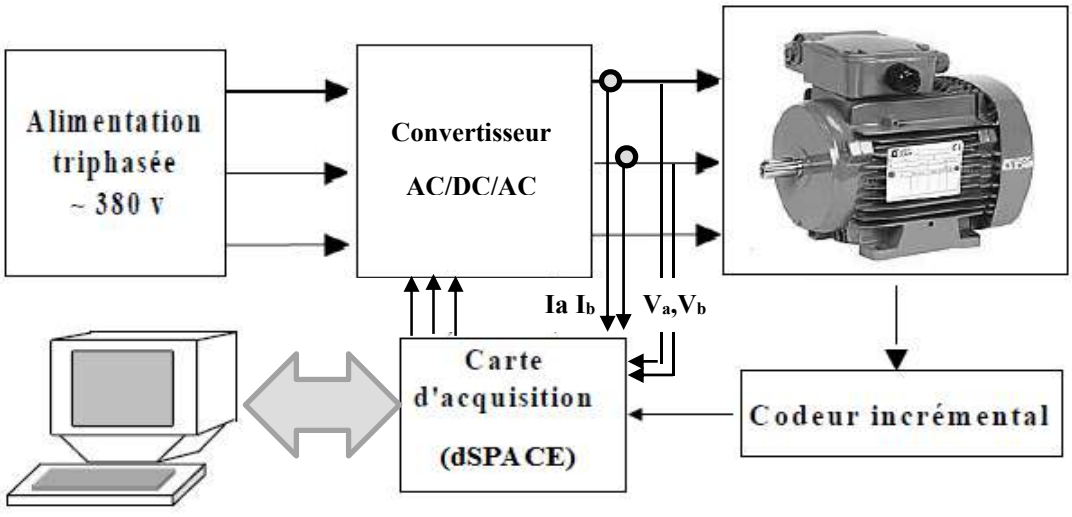


Figure III.1 : Schéma générale sur le banc d'essai

Le schéma synoptique de notre banc d'essais au laboratoire est présenté par la figure suivante :



Figure III.2 Banc d'essai de la MAS

III.2.2. La chaine électromécanique

La chaine électromécanique du banc est une machine asynchrone, de marque…….. , et de puissance 1.5Kw. Les paramètres de cette machine sont identifiées au sein de notre laboratoire, dans le cadre d'un travail de master l'année passée [Bmh16], l'identification a été faite à base de trois méthodes, une est basée sur les essais classique de la MAS, la deuxième c'est la méthode du gradient et la troisième elle utilise les algorithmes génétiques. Et l'annexe 1 résume tous les paramètres de la machine en question.

Figure III.3 montre la MAS et sa plaque signalétique, sur laquelle en peut lire :

- Volt (220-240) ampère (6.4) pour le couplage étoile.
- Volt (380-420) ampère (3.7) pour le couplage triangle.

- Nombre de phase [PH]= 3
- La fréquence 50 Hz
- La puissance : 1.5Kw
- Le nombre de pair de pôle(2).

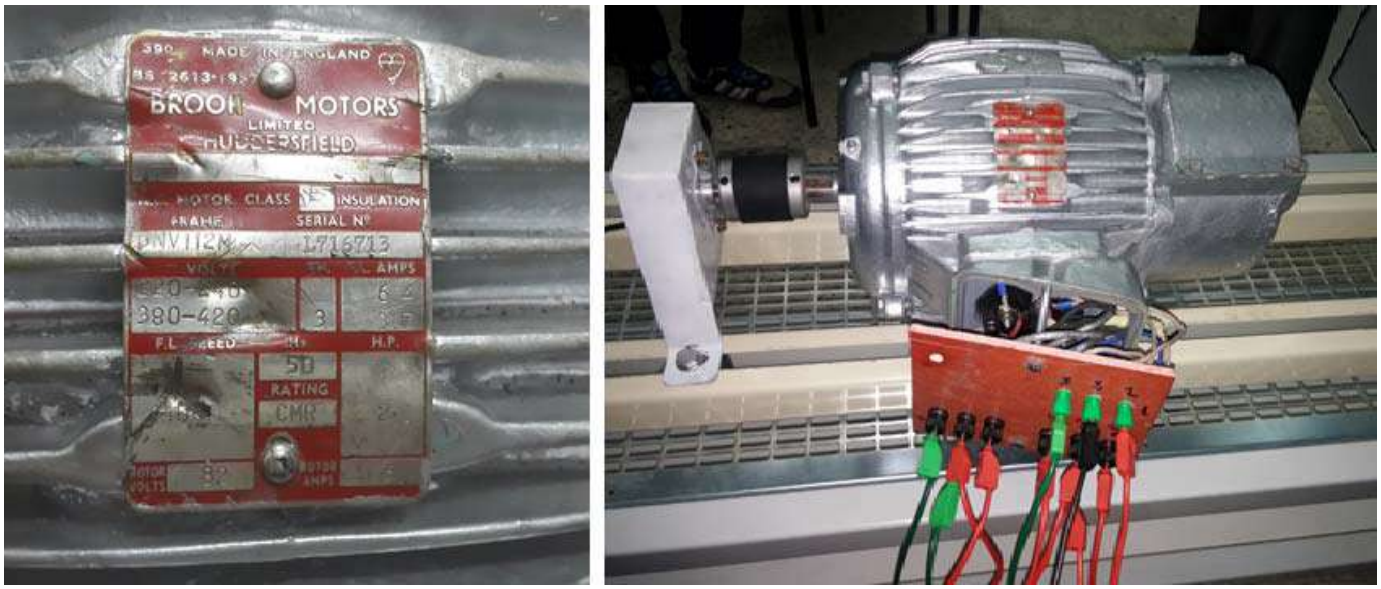


Figure. III.3 : Machine asynchrone à rotor bobiné.

Par ailleurs, cette chaine est équipée d'un capteur de vitesse de marque Baumer, donné par la figure III.4.



Figure III.4 : Capteur de vitesse.

III.2.3. La chaine de puissance

Cette partie est pour assurer l'alimentation et la commande de la MAS. A cet effet, le rotor est en court-circuit. Le stator est alimenté par une source de tension alternative par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC. Cette baie comporte également

- Un filtre LC, placé à l'entrée de l'onduleur DC/AC, permettant le filtrage du bus continue du redresseur.

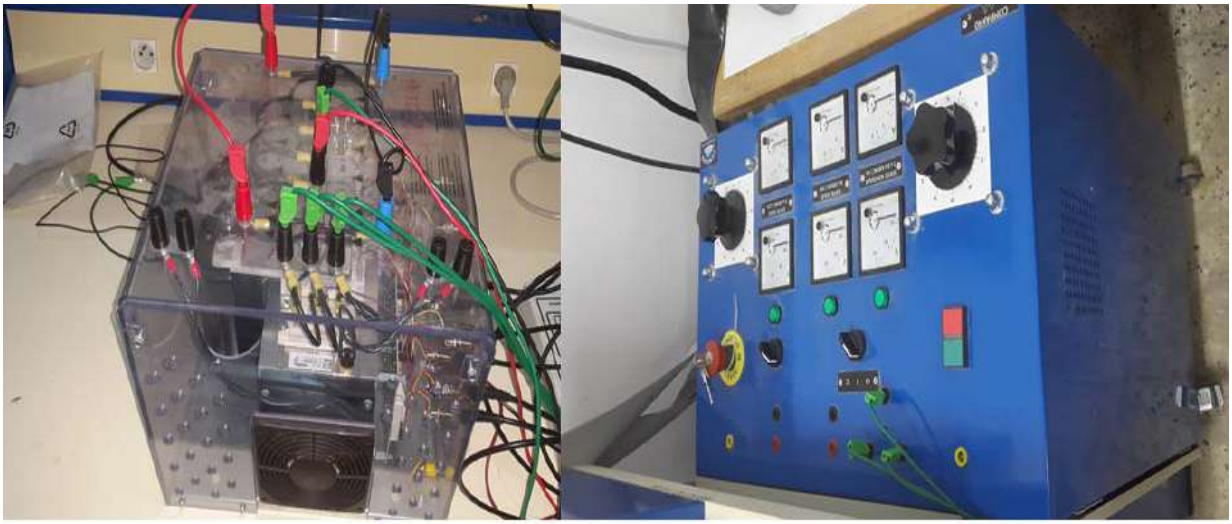


Figure III.5 le convertisseur AC/DC/AC

- **Mesure des tensions et des courants** par l'intermédiaire des :
  - Capteurs de tension Alternative
  - Capteurs des courants.
  - Ampèremètre et voltmètre.
  - Un oscilloscope pour visualiser la forme de la tension de sortie de l'onduleur.

Les capteurs sont des éléments sensibles à des grandeurs physiques qu'ils transforment en grandeur électrique (en général une tension). Ils sont souvent intégrés à chaîne d'acquisition permettant à la grandeur mesurée d'être conditionnée afin que la mesure (ou signal de sortie) donne une estimation optimisée de la mérande [Hho].

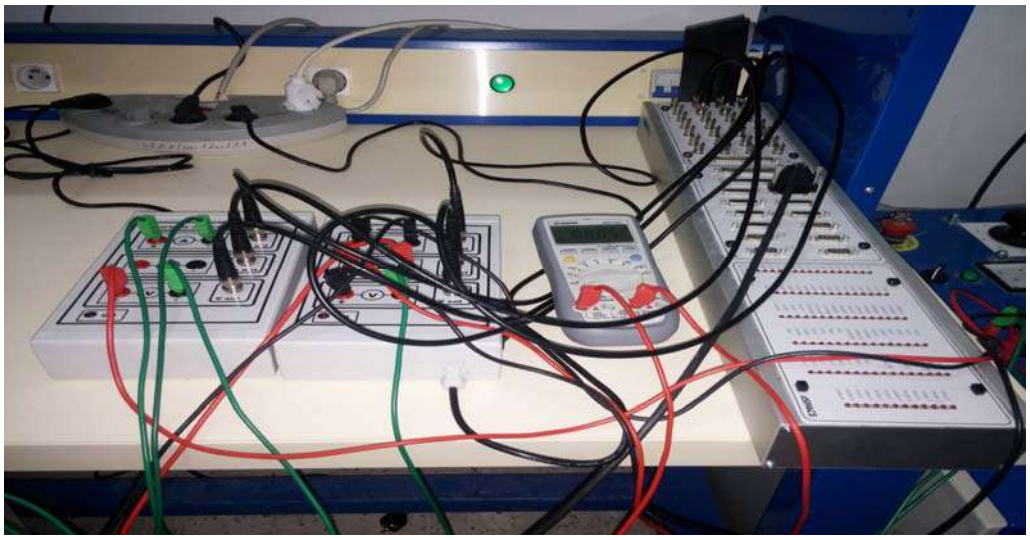


Figure. III.6 : Capteurs de mesure des courants et de tension.

III.2.4. La chaine de commande

Elle est constituée d'une interface d'acquisition et d'un système permettant d'introduire des consignes et des lois de commande au système à piloter. On distingue :

- **Un système dSPACE RTI 1103** qui est composé de :

  - Une carte mère de processeur DS1005ppc board.
  - Une carte d'acquisition des mesures Autobox.
  - Une carte de 39 entrées/sorties logiques DS4003.

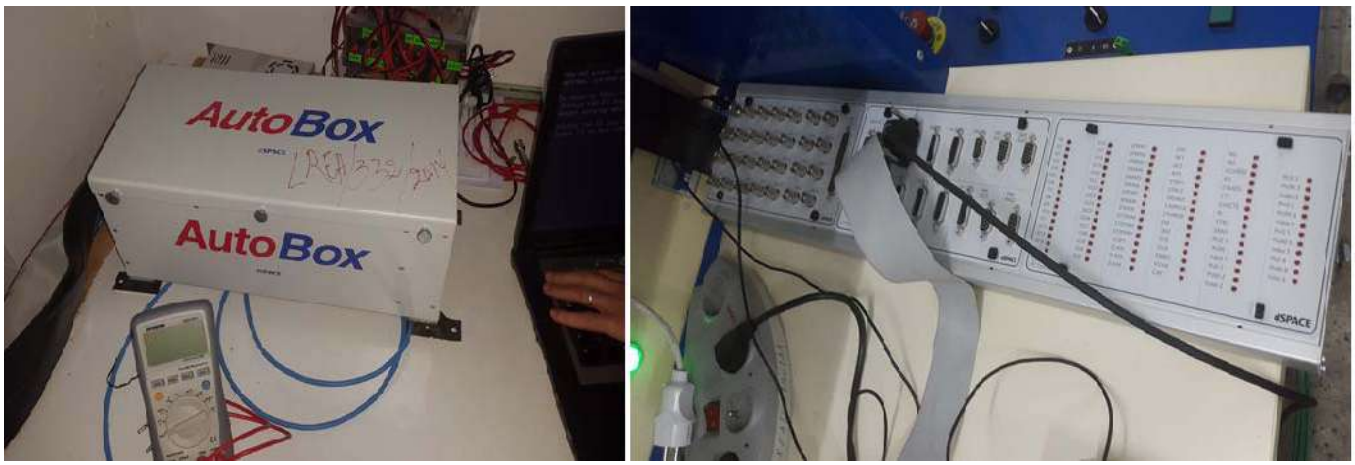


Figure III.7. Carte d'acquisition des mesures Autobox (dSPACE 1103)

- **L'interface Homme-Machine :** c'est un ordinateur, qui donne la possibilité de changer les paramètres de commande de l'onduleur et des correcteurs, de fournir les références relatives à la commande de la MAS et l'implémentation des lois de commande. Cet ordinateur est muni de logiciel MATLAB-SIMULINK permet aussi de :
  - Récupérer les différents signaux mesurés.
  - Introduire l'approche de commande.
  - Fournir la commande PWM nécessaire pour le pilotage du convertisseur AC/DC/AC.
  - Visualiser les différents signaux en temps réel via une application ControlDesk

La figure III.8 illustre une fenêtre SIMULINK d'une commande de la MAS.

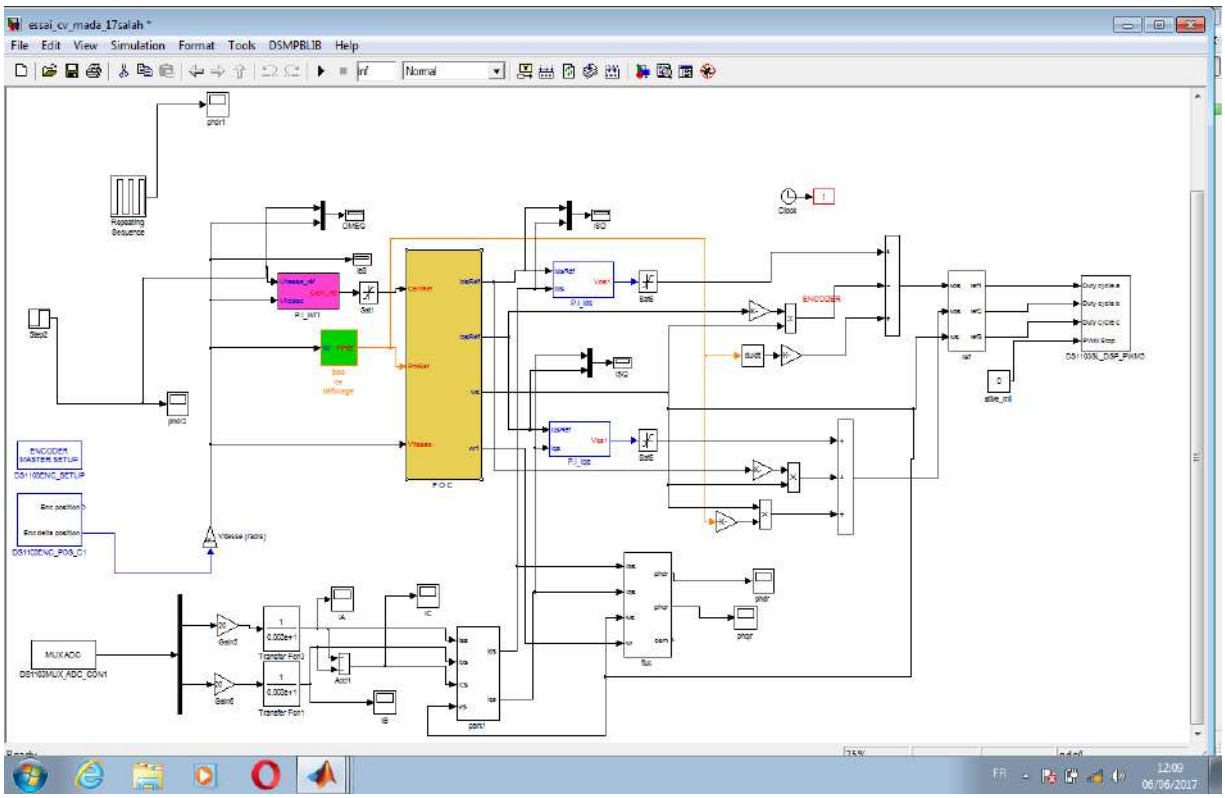


Figure III.8 Fenêtre SIMULINK d'une commande à exécuter



Figure I.9 : Visualisation des signaux en temps réel de la commande de la MAS

III.3. LES RESULTATS PRATIQUES

Les résultats pratiques dans notre projet représentent le cœur de cette étude, ils montrent le comportement réel de la machine telle que la vitesse, le couple électromagnétique et le courant statorique. Les gains des régulateurs pour la boucle de vitesse et des courants sont les même utilisés dans le chapitre précédente. Kp=2 et Ki=1 pour la vitesse, et pour les courants Kp=10 Ki=2000.

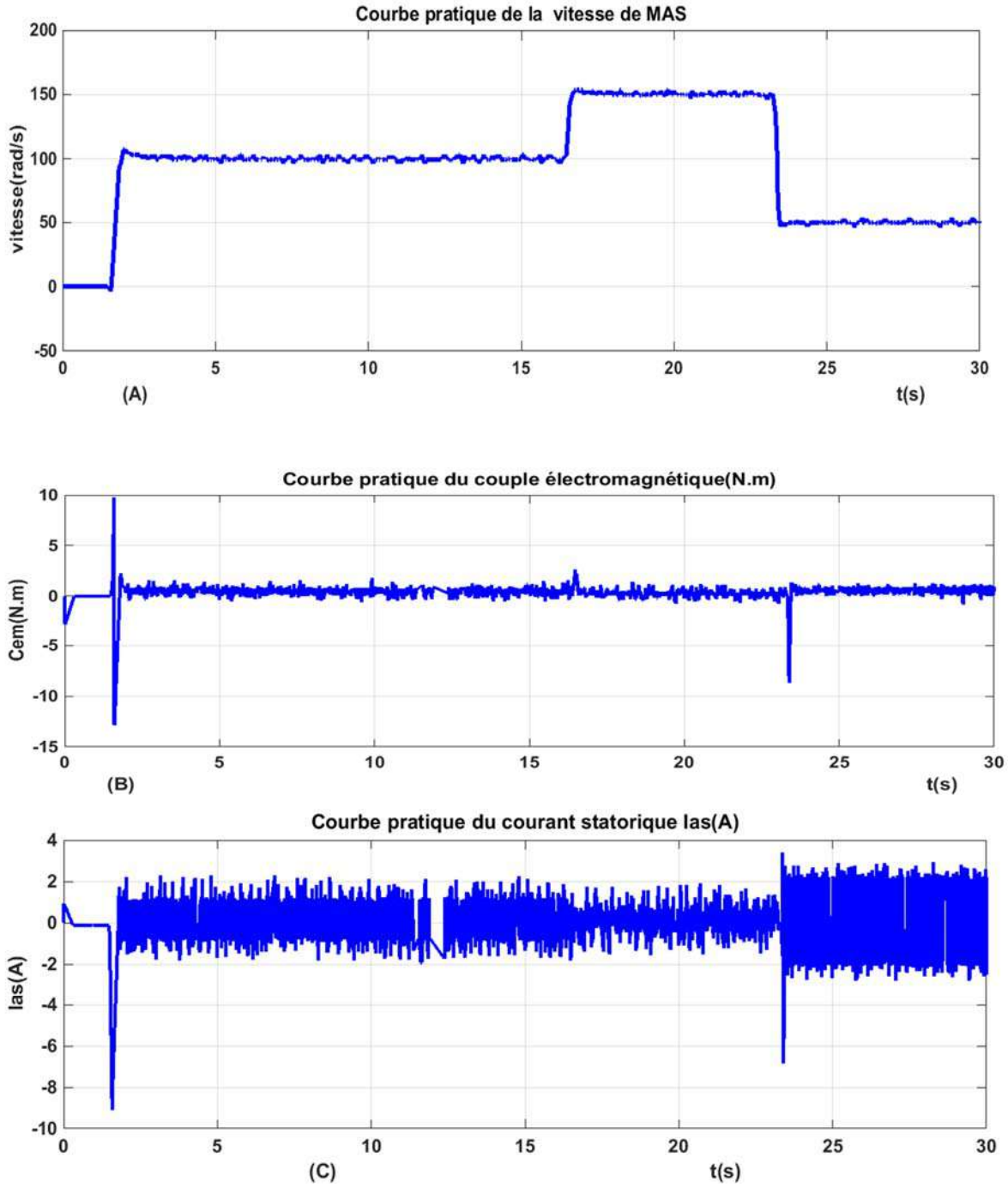


Figure III.10: Performances de la commande vectorielle indirecte de la MAS

(Résultats pratiques)

La figure III.10 illustre les courbes pratiques de la vitesse de la machine, le couple électromagnétique et le courant statorique. La MAS est contrôlé par la commande vectorielle indirecte pour une consigne de vitesse variable. Les résultats montrent que la vitesse suit sa référence. Le couple électromagnétique se stabilise à une valeur faible sauf aux instants de variation de vitesse. Le courant repend aux exigences imposé par la vitesse. Ces résultats confirment expérimentalement la faisabilité de cette commande.

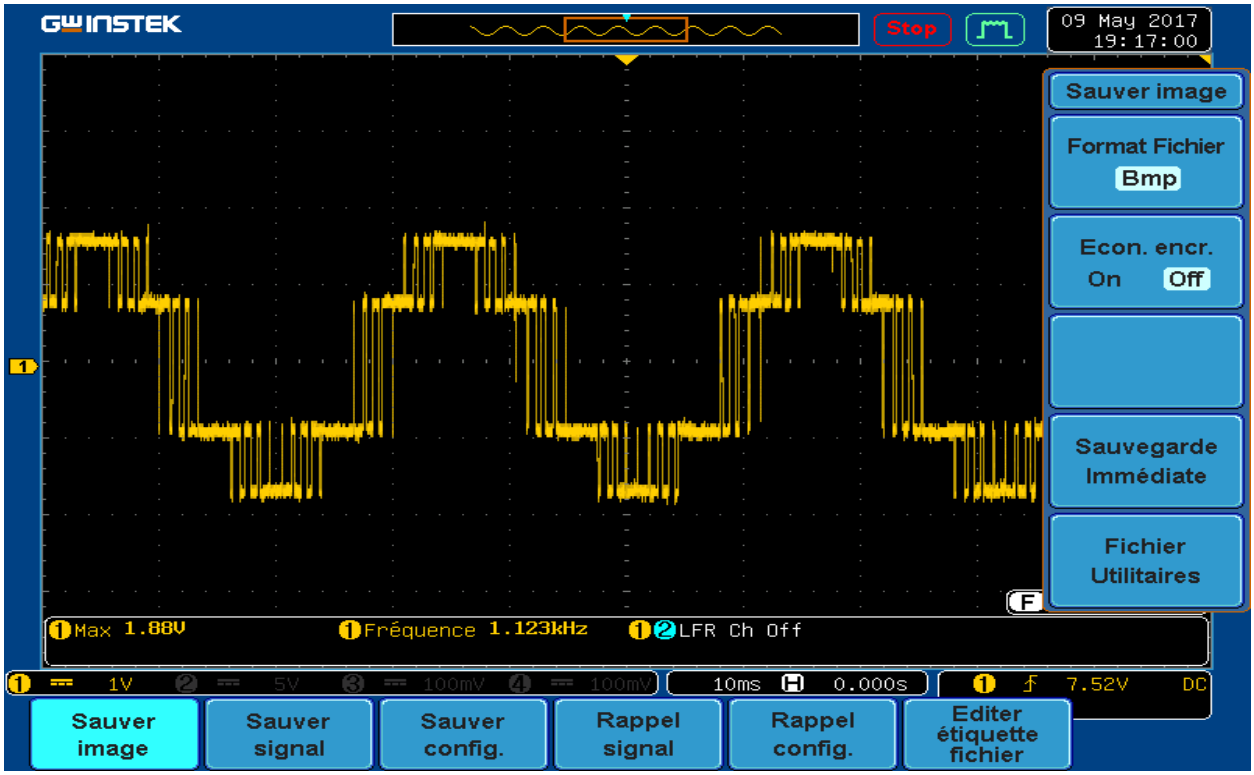


Figure III.11 : la tension simple alimentant la MAS

Figure III.11 indique la tension simple pratique qui alimente la MAS au stator, si on compare entre la tension pratique et la tension de la simulation, les deux sont similaires.

Afin, de visualiser l'entrainement de la MAS à faible vitesse, un essai d'inversion de vitesse est testé, et les résultats obtenus sont donnés par la figure III.12. Les résultats sont satisfaisants et confirme la possibilité de réalisation d'un variateur asynchrone par la commande vectorielle indirecte.

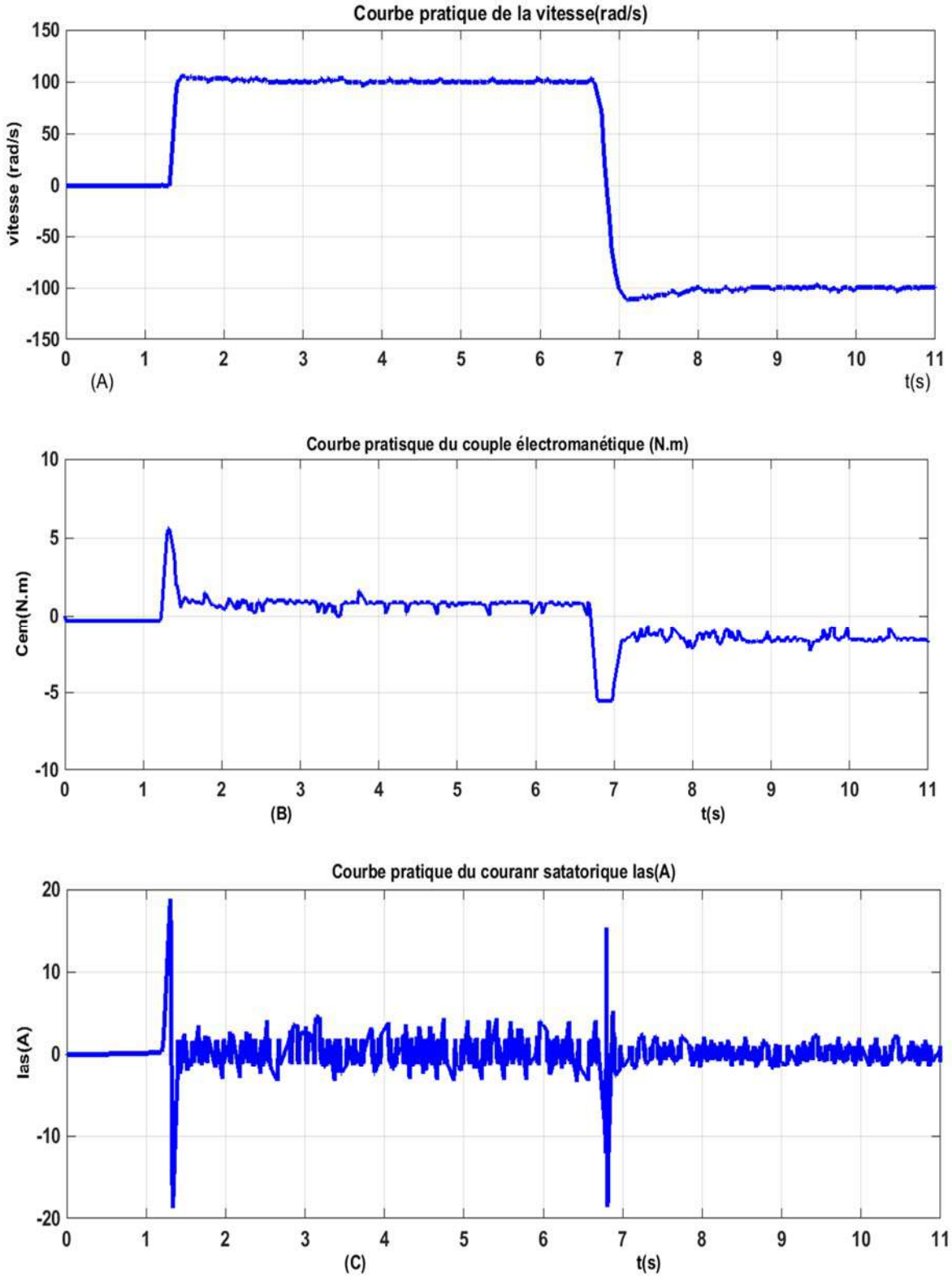


Figure III.12 : les signaux pratiques de la MAS pour une inversion de vitesse

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la description d'un banc d'essais à base d'une machine asynchrone en mode moteur, afin de tester expérimentalement la faisabilité de la commande vectorielle indirecte présentée au chapitre 2. Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement la validité de l'algorithme de commande utilisé pour le variateur asynchrone.

Les résultats obtenus confirment aussi la validité des paramètres identifiés de la MAS, ainsi la méthode utilisée pour cette identification.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des travaux menés au Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et en Automatique de notre université. La partie expérimentale de ce travail a été réalisée au sein de ce laboratoire. Elle présente l'implémentation de la commande vectorielle indirecte d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à deux niveaux. Il est à noter aussi que ce travail est une continuité des travaux d'identification effectués sur cette machine.

Nous avons commencé cette thèse par la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné en court-circuit. Nous avons également présenté la modélisation du convertisseur AC/DC/AC alimentant la machine, ainsi la commande triangulo-sinusoïdale de l'onduleur, qui ont été ensuite exploités pour la simulation de la commande présentée.

Le modèle d'état de la machine asynchrone est un modèle non linéaire, fortement couplé. Pour remédier ce problème, nous avons utilisé la commande vectorielle, cette dernière basée sur l'orientation du flux rotorique est une technique de commande permettant d'assimilé la MAS à une machine à courant continu à excitation séparée.

Deux variantes de commande vectorielle ont été présentées, le premier est une commande directe basée sur le contrôle directe du flux, la deuxième est une commande vectorielle indirecte. Cette dernière a permis de réduire la complexité de la commande en gardant des performances satisfaisantes de la MAS.

Nous avons terminé notre thèse par une validation expérimentale de la loi de commande vectorielle indirecte. Pour le faire, nous avons exploité un banc d'essais à base d'une MAS de 1.5Kw commandée en vitesse en utilisant des régulateurs PI. Les résultats expérimentaux obtenus ont bien montrés la faisabilité de cette commande pour différentes référence de vitesse de rotation.

Comme perspectives, le présent travail peut être amélioré en proposant des commandes intelligentes, tel que la commande floue, commande par mode glissant et la commande DTC pour les deux modes de fonctionnement (moteur ou génératrice).

Références Bibliographiques :

[Aib09] : A. Aibeche, « Commande vectorielle robuste de la machine asynchrone avec estimation du flux rotorique en temps réel ». Thèse de Magister. Université M'hamed Bougara-Boumerdes. Faculté Des Hydrocarbures et de La Chimie.2009.

[Bmh16] : BENHADJ Imen «Identification et commande des puissances de la machine asynchrone à double alimentation» Thèse de Master. Université Médéa, 2016.

[Bsa01] : Dr. BOULKHRACHEF Salah « Analyse et Commande d'onduleur à cinq niveaux à NPC. Application à MAS Commandée par la logique floue » Thèse de Magister. Université ENP Algie, 2001

[Cmu97]: C. Munong, «Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink » Parentice Hall PTR. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1997.

[Gse77] : G.Seguier, F.Notlet., « Electrotechnique industrielle », Technique et documentation Lavoisier, 1977.

[Hho] : Hélène HORSIN MOLINARO - Eric VOURC'H – Jean-Pierre BARBOT

[Kms] : K. M. Subrata, K. B. Bimal, J. O. O. Pinto, « Space vector pulse width modulation ofthree-level inverter extending operation into over modulation region », IEEE Transactions on Industry Applications, 2.

[Lba03/04] : L. Baghli., « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Notes de cours, IUFM de Lorraine – UHP 2003 /2004.

[Pba04]: P. Balazovic, « 56F8300 Hybrid controller used in control of electro-mechanical brake », Freescale Semiconductor, 2004.

[Slc01] : S. L. Capitaneanu, M. Fadel, J. Faucher, A. Aleida., « Graphical and algebraic synthesis for PWM methods », Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, ENSEEIHT/INP Toulouse, EPE Journal Vol.11 N°. 03, Août 2001.

[Tec3642] : Technique de l'ingénieur. « Convertisseurs et machines électriques : Commande numérique des machines – Système triphasé en régime permanent », D3642.

[Xke] : X. Kestelyn, S. Eric, A. Bouscayrol, J. P Hautier., « Multi-phase system supplied by PWM VSI.A new technique to compute the duty cycles », University Lille, Laboratoire L2EP.www. Univ-lille1.fr/l2ep.

.