



République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA

Faculté De Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Mémoire De Fin De Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

Option : Commande des systèmes électriques

Thème

Étude de l'autopilotage d'une machine synchrone

à aimants permanents.

Réalisé par :

-ABDELLAOUI Kamilia

-BELAID Saloua

Encadré par:

-Mr REKIOUA Toufik

-Mme BENBOUDAUD Zahra

M'ombre du jury :

-Mr : OUARI.

-Mr : MADI.

Promotion 2017/2018

REMERCIEMENTS

Remerciements

Louange A Dieu, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être.

Nos remerciements à notre promoteur Monsieur **REKIOUA Toufik** Qui nous a guidé tout au long de notre travail, avec son expérience, son savoir-faire, sa patience, son dévouement et ces conseils précieux durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier Madame **BENBOUDAUD Zahra** pour son aide précieuse, sa lecture attentive du manuscrit, pour ses corrections et pour ses remarques qui nous ont permis d'améliorer le document final.

Un grand merci à Monsieur **MEBARKI Nasreddine** Pour son attention, ses remarques et le temps qu'il nous a consacré afin de faire avancer notre mémoire.

Nos remerciements les plus vifs vont à nos parents qui nous ont soutenus. Nous ne serons jamais assez reconnaissants envers eux. Ils ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on puisse s'épanouir dans tout ce que nous entreprenons.

Enfin, nous remercions tous les enseignants de génie électrique, et à toute personne qui nous a aidé de pré ou de loin ainsi que toute la promotion master commande.

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce modeste travail ;

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci infiniment mes parents d'être là à mes côtés durant toutes ces années.

A mes chères sœurs Katia, Chafika, Hassiba, Kahou, Siham et mon frère Louanes.

A ma chère copine Sonia.

Sans oublier toute la promotion de génie électrique 2017/2018.

A mon promoteur Monsieur T. Rekioua.

A ma binôme Kamilia et sa famille.

Dédicace

Avec une pensée profonde que je dédie ce travail :

A mes très chers parents qui m'ont vivement soutenu et encouragé tout au long de Mes études ;

A mes très précieux grands-parents ;

A mes chers frères et sœurs : Luiza, zahia, Nawal, Mourad, Youcef, Nassim ;

A toute la famille Abdellaoui ;

A mon fiancé Amine ;

A mes amis et amies ;

A ma binôme Saloua et sa famille.

TABLES DE MATIERS

Listes des figures

Nomenclature

Introduction générale

Introduction générale3

CHAPITRE I : Etat de l'art des machines à courants alternatifs

I.1 Introduction	4
I.2 Machine Asynchrone	4
I.2.1 Principe de fonctionnement.....	4
I.2.2 Les avantages de la machine asynchrone	6
I.2.3 Les Problèmes posés par la machine asynchrone	6
I.3 La machine synchrone	6
I.3.1 Machine synchrone à rotor bobiné à double étoile	7
I.3.2 Machine synchrone à aimants permanents	7
I.3.2.1 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents.....	8
I.3.2.2 L'emplacements des aimants	10
I.3.2.3 Les différents modes d'alimentations des machines synchrones à aimants permanents	11
I.3.2.4 Domaines d'emploi de la machine synchrone à aimants permanents	11
I.3.2.5 Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents.....	12
I.4 Choix de la machine synchrone à aimants permanents	13
I.5 Autopilotage de machine synchrone à aimants permanents	13
I.5.1 Principe de L'autopilotage des machines synchrones à aimants permanents	14
I.5.2 Réalisation de l'autopilotage.....	14
I.6 Conclusion	15

CHAPITRE II : modélisation de l'ensemble convertisseur-machine

II.1 Introduction	16
II.2 Description de la machine synchrone à aimants permanents	16

TABLES DE MATIERS

II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	17
II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la machine synchrone à aimants permanents	17
II.3.2 Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents	17
II.3.2.1 Les équations électriques	18
II.3.2.2 Equation magnétique	18
II.3.3 Transformation de Park	19
II.3.3.1 Application de la première transformation (Concordia T_{32})	20
II.3.3.2 Transformation Repère fixe-Repère tournant (Park)	20
II.3.3.3 Les équations mécaniques	22
II.3.3.4 Couple électromagnétique	22
II.4 Modèle d'état	24
II.4.1 Modèle d'état dans le repère tournant (d-q)	24
II.5 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé	25
II.5.1 Système d'alimentation	25
II.5.2 Définition de l'onduleur	25
II.5.3 Classification des onduleurs	25
II.5.3.1 Onduleur autonome	25
II.5.3.2 Onduleur non autonome.....	26
II.5.4 Choix des composants	26
II.5.5 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé	27
II.6. Modélisation de l'onduleur de tension autonome triphasé	28
II.7 Conclusion	29

CHAPITRE III : Interprétation des techniques de commande.

III.1 Introduction	30
III.2 Différents type de commande des interrupteurs	30
III.3 La commande pleine onde (180°)	30
III.4 Résultats de simulation de la commande pleine onde de l'ensemble machine synchrone_onduleur avec l'autopilotage.....	33
III.5 contrôle des courants par hystérésis	37

TABLES DE MATIERS

III.5.1 Les avantages et l'inconvénient de contrôle des courants par hystérésis	39
III.6 Résultats de simulation de contrôle de courants par hystérésis de l'ensemble machine synchrone_onduleur avec l'autopilotage	39
III.7 Conclusion	42

CHAPITRE IV : autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

IV.1 Introduction	43
IV.2 Présentation générale du banc d'expérimentation	43
IV.3 Circuit de puissance	44
IV.3.1 Source de tension de courant continue	44
IV.3.2 Onduleur de tension	44
IV.3.3 Machine synchrone à aimants permanents associer à une machine à courants continu.....	45
IV.3.4 Capteur de position	45
IV.4 Circuit de commande et de traitement	46
IV.4.1 Présentation de la DSPACE 1104 1104	46
IV.4.2 Le développement d'une commande dans un environnement Matlab/Simulink/ DS1104.....	48
IV.4.3 Réalisation de schéma bloc de la commande sous Matlab/ Simulink/ DS1104	49
IV.4.3.1 Mesure des deux grandeurs mécaniques caractérisant le mouvement de rotation de l'arbre d'un moteur	49
IV.4.3.2 Visualisation du courant pour l'étalonnage	52
IV.4.3.3 Commande pleine onde	53
IV.5. Interface de mesure	55
IV.5.1 Le contrôle Desk.....	55
IV.5.2 Capteur de courant à effet hall	55
IV.5.3 Capteur de tension	56
IV.6 Présentation des résultats pratiques	57
IV.6.1 Résultats obtenus pour une tension continue de 63V	57

TABLES DE MATIERS

IV.6.21 Résultats obtenus pour tension d'alimentation continue de 105V	60
IV.7 Conclusion	62

Conclusion générale

Conclusion général	63
ANNEXE A	64
ANNEXE B	65
Références Bibliographiques.....	66

LISTES DES FIGURES

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure (I.1) : Structure d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ou à rotor massif.....	4
Figure (I.2) : Schéma équivalent du moteur asynchrone.....	5
Figure (I.3) : Caractéristiques des aimants permanents.....	8
Figure (I.4) : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.....	9
Figure (I.5) : Machine à aimants permanents (MSAP).....	10
Figure (I.6) : Structure des machines synchrones autopilotées.....	14

CHAPITRE II

Figure (II.1) : Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (a, b,c).....	16
Figure (II.2) : Schéma équivalent de la MSAP dans le référentiel (a, b, c) et Référentiel (d, q).....	17
Figure (II.3) : Transformation triphasé à diphasé (Transformation de Concordia).....	19
Figure (II.4) : Transformation de Park.....	21
Figure (II.5) : Passage des composantes triphasée aux composantes de Park.....	21
Figure (II.6) : Choix des composants selon la puissance et la fréquence.....	26
Figure (II.7) : Représentation d'un onduleur triphasé de tension.....	27

CHAPITRE III

Figure (III.1) : Représentation d'un onduleur de tension triphasée à deux niveaux.....	31
Figure (III.2) : Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande à 180°.....	32
Figure (III.3) : Construction des chronogrammes de tensions composées.....	32
Figure (III.4) : Construction des chronogrammes de tensions simples.....	33
Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande plain onde avec autopilotage de la machine synchrone.....	34
Figure (III.6) : les trois signaux de commande ($S_a S_b S_c$).....	34
Figure (III.7) : Allures du courant de phase d'un moteur synchrone autopiloté.....	35

LISTES DES FIGURES

Figure (III.8) : Allure du courant totale.....	35
Figure (III.9) : Allure de la pulsation des grandeurs électriques statorique.....	36
Figure (III.10) : Allure du couple électromagnétique développé par la machine synchrone..	36
Figure (III.11) : Allure de la position angulaire du rotor de la machine synchrone.....	37
Figure (III.12) : Les tensions à la sortie de l'onduleur V_a, V_b, V_c	37
Figure (III.13) : Schémas de Principe de contrôle par hystérésis les courants de phase.....	38
Figure (III.14) : Allure du courant dans le cas de L'alimentation avec des références sinusoïdales.....	38
Figure (III.15) : Schéma bloc de contrôle de courant par hystérésis avec autopilotage de l'ensemble machine_onduleur.....	39
Figure (III.16) : Les courants de phase I_a, I_b, I_c	40
Figure (III.17) : Allure du courant total.....	40
Figure (III.18) : Allure du couple électromagnétique.....	41
Figure (III.19) : Allure de la pulsation des grandeurs électrique statorique (rad/s).....	41
Figure (III.20) : Allure du courant de quadrature de référence.....	42

CHAPITRE IV

Figure (IV.1) : Banc d'essai expérimental.....	43
Figure (IV.2) : Source de tension de courant continue.....	44
Figure (IV.3) : Onduleur de tension triphasée à deux niveaux.....	44
Figure (IV.4) : Moteur synchrone à aimants entraînant une génératrice.....	45
Figure (IV.5) : circuit de capteur de position.....	45
Figure (IV.6) : Carte dSPACE1104.....	47
Figure (IV.7) : Panneau de connexion de la dSPACE 1104.....	47
Figure (IV.8) : Les LEDs indiquant les E/S de la dSPACE 1104 utilisées.....	48
Figure (IV.9) : Support de sélection de la plate-forme dSPACE/RTI.....	48
Figure (IV.10) : Sous librairie RTI.....	49
Figure (IV.11) : Réglage nécessaire pour DS1104ENC_SETUP.....	51
Figure (IV.12) : Réglage de DS1104ENC_POS_C1.....	51
Figure (IV.13) : Réglage de DS1104ENC_HW_INDEX_C1.....	52

LISTES DES FIGURES

Figure (IV.14) :	Réglage des paramètres de DS1104ADC_C6.....	52
Figure (IV.15) :	Réglage des paramètres de DS1104BIT_IN.....	53
Figure (IV.16) :	Réglage des paramètres de logical operator.....	54
Figure (IV.17) :	Réglage des paramètres de DS1104BIT_OUT.....	54
Figure (IV.18) :	Interface du logiciel Control Desk.....	55
Figure (IV.19) :	Capteur à effet hall.....	56
Figure (IV.20) :	Capteur de tension.....	56
Figure (IV.21) :	Courant de phase I_a	57
Figure (IV.22) :	Position angulaire du rotor.....	58
Figure (IV.23) :	La vitesse de rotation de l'arbre de rotor.....	58
Figure (IV.24) :	Courant de phase I_a et tension composée U_{ab} à la sortie de l'onduleur.....	59
Figure (IV.25) :	Tension simple U_{an} à la sortie de l'onduleur.....	59
Figure (IV.26) :	Courant de phase I_a	60
Figure (IV.27) :	La vitesse de rotation et la position angulaire de l'arbre de rotor.....	61
Figure (IV.28) :	Courant de phase I_a et tension composée U_{ab} à la sortie de l'onduleur.....	61

NOMENCLATURE

Nomenclature

A, b, c : axe liés aux enroulements triphasés.

$U_s = [U_a, U_b, U_c]^T$: Tensions statoriques triphasées (V).

$I_s = [I_a, I_b, I_c]^T$: Courants statoriques triphasés (A).

$\Psi_s = [\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c]^T$: Flux magnétique ou stator (Web).

α, β : Axe de référence statorique de Concordia.

$U_{\alpha,\beta} = [U_\alpha, U_\beta]^T$: Tensions statoriques diphasées dans le repère fixe (α, β) (V).

$I_{\alpha,\beta} = [I_\alpha, I_\beta]^T$: Courants statoriques diphasés dans le repère fixe (α, β) (A).

$\Psi_{\alpha,\beta} = [\Psi_\alpha, \Psi_\beta]^T$: Flux statoriques diphasés dans le repère fixe (α, β) (Web).

d, q : axes de la référence diphasée de Park.

$U_{d,q} = [U_d, U_q]^T$: Tensions statoriques diphasées dans le repère tournant (d, q) (V).

$I_{d,q} = [I_d, I_q]^T$: Courants statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) (A).

$\Psi_{d,q} = [\Psi_d, \Psi_q]^T$: Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) (Web).

L_{ss} : Inductance statorique (H).

L_{s0} : Inductances statoriques propres (H).

M_{s0} : Mutuelle inductance entre deux phases stator (H).

R_s : Résistance statorique (Ω).

L_1 et R_F : Bobine à noyau de fer.

L_2 : Inductance de fuite (H).

$\frac{R_2}{g}$: Résistance fictive représentant la puissance transmise (Ω).

R_2 : Résistance du rotor ramené au stator (Ω).

J : moment d'inertie (moteur + charge) (Kg/m^2).

f_v : Coefficient de frottements visqueux (SI).

C_l : Couple de charge (N.m).

$C_e = T_e$: couple électromagnétique (N.m).

NOMENCLATURE

p : Nombre de paires de pôles.

N_s : vitesse de synchronisme (tr/min).

Ω : vitesse mécanique de rotation du rotor (tr/min).

Ω_s : vitesse de synchronisme (rad/s).

$\omega = p\Omega$: pulsation des grandeurs électriques statoriques (rad/s).

θ : Position angulaire du rotor (tr).

$\theta_e = p\theta$: position électrique du rotor (rad).

g : Glissement de la machine.

f : fréquence (Hz).

P_u : Puissance utile (w).

W : le travail (joule).

E : Tension continue à l'entrée de l'onduleur (V).

V_{eff} : La tension efficace (V).

$S_a, S_b, S_c, \overline{S_a}, \overline{S_b}, \overline{S_c}$: Variables logiques correspondantes à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

U_{AB}, U_{AB}, U_{AB} : Tension composé à la sortie de l'onduleur (V).

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tension simple à la sortie de l'onduleur (V).

V_{ab} : Tension composé à la sortie de l'onduleur (V).

V_{dc} : Tension discontinu à l'entrée de l'onduleur (V).

K_a : Gain de la position angulaire (rad).

K_s : gain de la mesure de vitesse (tr/min).

T_e : période d'échantillonnage (ms).

NOMENCLATURE

AC : Alternating Current.

ADC : Analog to Digital Converter.

AGV : Automotrice à Grande Vitesse.

BLDC : Moteur Brushless DC.

DAC : Digital to Analog Converter.

DC : Direct Current.

DS : Dispatche.

DSP : Digital Signal Processor.

E/S : Entrée/Sortie.

GTO : Gate Turn-Off.

I/O : In/Out.

IGBT : Integrated Gate Bipolar Transistor.

Inc : Incremental encoder.

LED : Diode Electroluminescente.

MCC : Machine à Courant Continu.

MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion.

MOSFET : Metal-Oxyde-Semiconductor Filed-Effect-Transistor.

MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanents.

PCI : Peripheral Component Interconnect.

RTI : Real Time Interface.

TGA : Train à Grande Vitesse.

UGV : Machine d'Usinage Numérique.



Introduction Générale



Introduction Générale

L'apparition des semi-conducteurs de puissance fonctionnant à des fréquences de commutation élevées est à l'origine du développement des convertisseurs statiques, donnant à l'énergie électrique la forme la mieux adaptée pour chaque utilisation. Le moteur à courant continu est le meilleur variateur de vitesse, car le couple est directement proportionnel au courant, son principe vient du collecteur mécanique, qui assure la fonction du changement de fréquence de manière à maintenir l'égalité des fréquences de rotation mécanique et des courants dans l'induit. Aussi, il assure la conversion de fréquence de courant de la source en fréquence des courants induit ainsi que l'asservissement entre fréquence du champ induit et du champ inducteur. Donc pratiquement le système collecteur-balais est remplacé par un convertisseur statique dans le cas de la machine synchrone.

L'autopilotage de la machine synchrone fonctionne selon le même principe que celui de la machine à courant continu, sachant que la commutation se fait par des semi-conducteurs. Donc, pour une variation de vitesse, il faut l'alimenter à fréquence variable et asservir cette alimentation en fréquence et en phase à la rotation du rotor.

Le but de ce travail est l'étude des performances d'une machine synchrone autopilotée alimentée par onduleur de tension.

Dans le premier chapitre, on présente l'état de l'art des machines à courant alternatif, tout en comparant les unes par rapport aux autres. La machine synchrone à aimants permanents se distingue et se favorise pour son excellent rendement, une puissance massique et volumique importante, une possibilité de fonctionner aux grandes vitesses, l'absence des contacts glissants, tout comme elle peut présenter les mêmes possibilités de contrôle que le moteur à courant continu.

Dans le deuxième chapitre, on va élaborer une modélisation de l'ensemble non linéaire machine électrique-onduleur dans le repère (a, b, c). La transformation de Park permet d'obtenir le modèle d'état linéaire dans le repère (d, q). Cette étape est primordiale pour une meilleure connaissance de la machine et pour une préparation efficace du terrain de l'application des lois de commandes souhaitées à étudier.

Dans le troisième chapitre, on aborde les différentes techniques de commande, précisément, la commande pleine onde ainsi que le contrôle du courant par hystérésis dans le but de commander la vitesse du moteur synchrone à aimants permanents autopiloté. A la fin de ce chapitre on présente les résultats de simulation.

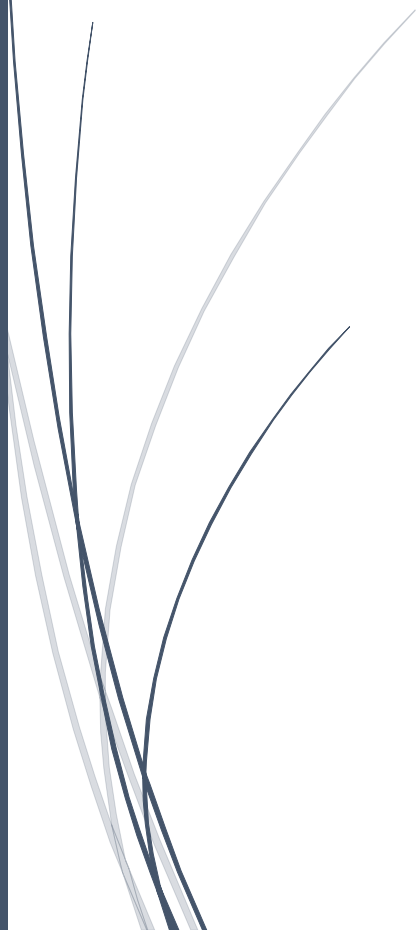
Finalement, dans le dernier chapitre on présente le banc expérimental dont le but est de valider les résultats de simulation.

En clôture, on commentera cette étude dans son intégralité, et parlera d'éventuelles perspectives de continuité.



Etat de l'art des machines à
courants alternatifs

Chapitre I



I.1 Introduction :

Les machines électriques sont nombreuses et variées, le choix est vaste. Elles présentent des avantages et des inconvénients les uns par rapport aux autres qu'elles soient du même type ou de types différents, à courant alternatif ou à courant continu [1].

Les moteurs à courant continu ont assuré pendant longtemps le fonctionnement de la plupart d'équipements industriels (robots et machines-outils). Cependant, le collecteur mécanique reste leur principal défaut que l'on tolère mal dans certaines applications. C'est pour cette raison que l'industrie s'est orientée vers l'utilisation des machines à courant alternatif afin de profiter de leurs avantages tels que, la flexibilité de variation de vitesse et la stabilité de fonctionnement [2].

Dans ce chapitre, une présentation des différents moteurs à courant alternatif sera faite.

I.2 Machine Asynchrone :

Les moteurs asynchrones aussi appelés moteur à induction, sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant [3].

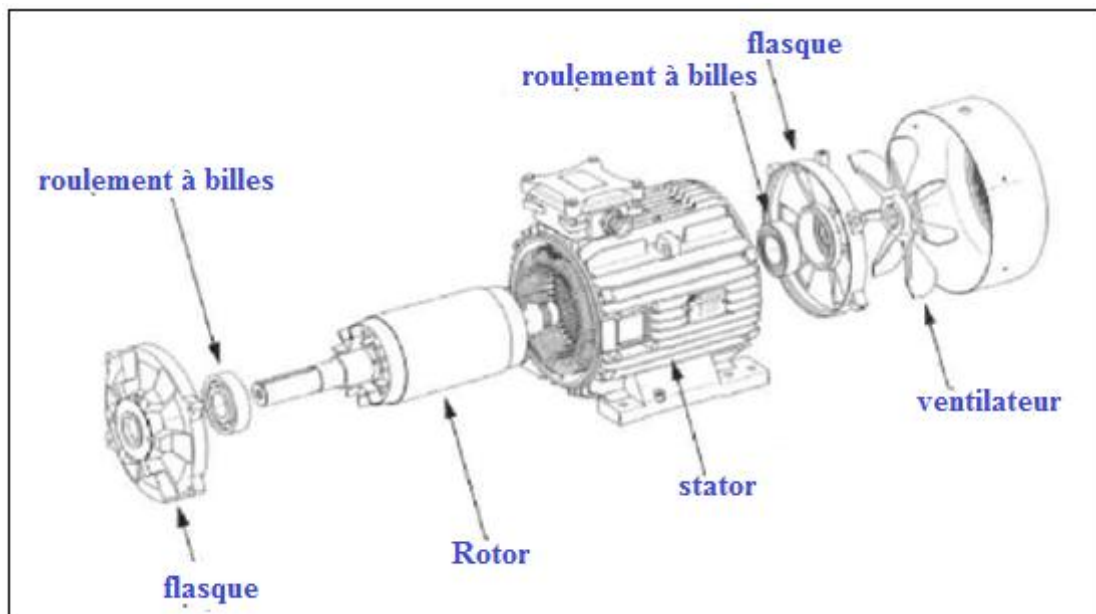


Figure (I.1) : Structure d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ou à rotor massif [1].

I.2.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du moteur asynchrone est quasiment semblable à celui du moteur synchrone. Les stators sont identiques dans les deux machines seulement le rotor d'un moteur asynchrone au lieu d'être constitué d'un aimant ou d'un électroaimant, celui-ci c'est un assemblage de deux anneaux fixés par des conducteurs appelé « cage d'écureuil » [4] [5].

Dans le cas général, le moteur tourner à la vitesse de synchronisme donnée par formule suivante :

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Ainsi lorsque le stator induit un champ magnétique tournant, le rotor tente de suivre ce champ magnétique sans toutefois atteindre la vitesse de ce dernier ; un décalage se crée alors, on parle de glissement come il est exprimé dans la formule suivante :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (\text{I.2})$$

Pour le moteur asynchrone, la vitesse du rotor n'est pas proportionnelle à la fréquence du courant qui alimente le stator.

L'équation de la vitesse de rotation en fonction de la fréquence et le nombre de pair de pôles est :

$$N_r = \frac{60f}{p} (1 - g) \quad (\text{I.3})$$

L'équation du couple à partir du la figure (I.2) est la suivante :

$$C_e = \frac{3p}{\omega_s} V^2 \frac{R_2}{\frac{R_2^2}{g} + g(L_2\omega_s)^2} \quad (\text{I.4})$$

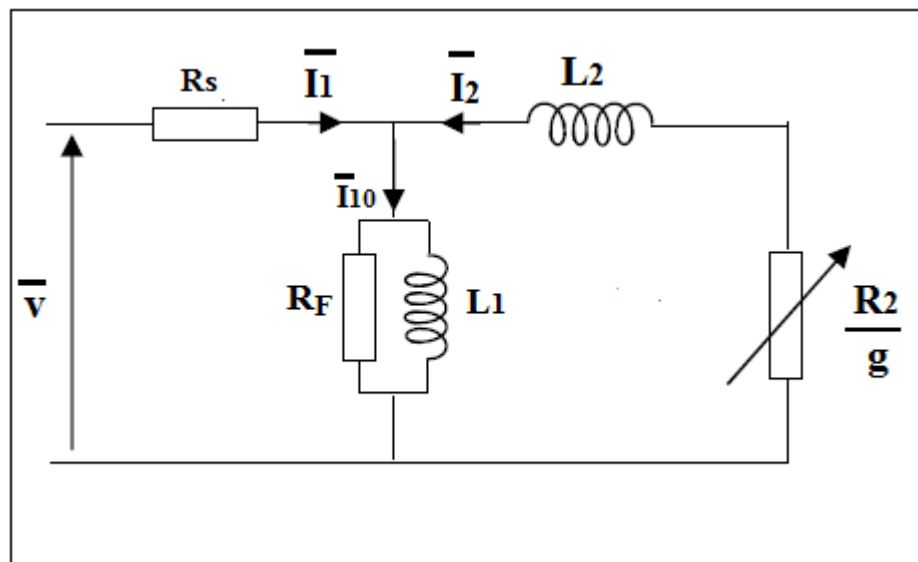


Figure (I.2) : Schéma équivalent du moteur asynchrone [6].

Avec :

R_s : Résistance du stator.

L_1 et R_F : Bobine à noyau de fer.

L_2 : Inductance de fuite.

$\frac{R_2}{g}$: Résistance fictive représentant la puissance transmise.

R_2 : Résistance du rotor ramené au stator.

En conclusion la variation de vitesse de la machine asynchrone se fait par variation de la fréquence d'alimentation, du nombre de paires de pôles, du glissement et de la tension d'alimentation.

I.2.2 Les avantages de la machine asynchrone :

Le moteur asynchrone à cage est le moteur le plus répandu dans l'industrie par sa robustesse, fiabilité, est faible coût de revient. Il est également apprécié pour sa très bonne standardisation et sa simplicité de fabrication [1] [7].

I.2.3 Les Problèmes posés par la machine asynchrone:

Dans le moteur asynchrone, le courant statorique sert à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus [7].

D'autre part, on ne peut connaître les variables internes du rotor à cage (I_1 par exemple) qu'à travers le stator. L'inaccessibilité du rotor nous amènera à modifier l'équation vectorielle rotorique pour exprimer les grandeurs rotoriques à travers leurs actions sur le stator.

La simplicité structurelle cache donc une grande complexité fonctionnelle due aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées mais également aux non-linéarités, à la difficulté d'identification et aux variations des paramètres.

I.3 La machine synchrone :

Le moteur synchrone est une machine à courant alternatif, elle se compose d'un dispositif inducteur créant un flux magnétique à travers l'induit, placé au rotor. Cet inducteur peut être un aimant permanent, ou un bobinage parcouru par un courant continu [8]. On distingue plusieurs types de machine synchrone, à savoir :

- Machine synchrone à reluctance variable.
- Machine synchrone à rotor bobine
- Machine synchrone à aimants permanents.

Dans cette partie nous aborderons la machine synchrone à aimants permanents et à rotor bobine.

I.3.1 Machine synchrone à rotor bobiné :

Pour les machines synchrones à rotor bobiné; Il existe une grande ressemblance entre cette machine et la machine à courants continu, mais elles diffèrent seulement par la manière de commuter le courant ; commutation mécanique pour la machine à courant continu et commutation électronique pour la machine synchrone à rotor bobiné, les contacts glissants et l'usure des balais limite le fonctionnement à haute vitesse de la machine à rotor bobiné mais à un degré moins importants que la machine à courant continu [1].

❖ Avantage :

- Un défluxage aisé par réduction du courant d'excitation.
- Elle à un domaine d'exploitation plus étendu que celui des machines synchrones à aimants permanents, avec une loi de commande qui permet d'optimiser le rendement.

❖ Inconvénients :

- Son rapport de couple sur la masse est relativement plus faible que celui des machines synchrones à aimants permanents.
- Un contact glissants limitant les vitesses de rotation.
- Elle à un nombre de pôles limité.
- A cause des pertes au rotor, la machine synchrone à rotor bobiné à un rendement plus faible que les machines synchrones à aimants permanents.
- Elle nécessite un capteur de position à cause de la complexité de son électronique de commande.

I.3.2 Machine synchrone à aimants permanents :

Le moteur synchrone est devenu un concurrent très intéressant du moteur à courant continu depuis l'invention de la commande autopiloté ce mode de commande permet d'obtenir une gamme de vitesse élevée et un contrôle de la vitesse ou du positionnement, souvent bien meilleur que son équivalent avec une machine à courant continu [8].

Les avantages procurés par les aimants permanents de type terre rare (SmCo, NdFeB) qui ont une induction rémanente et un champ coercitif plus élevés que celui des aimants à alliages métalliques (figure (I.4)), permettent la réalisation des machines synchrones à aimants permanents très performantes. De ce fait, la puissance électrique d'une machine à aimants permanents est directement proportionnelle à la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant.

Cette densité est cinq à six fois plus importante dans les aimants à terre rare que dans les aimants à ferrites et trois fois plus importante que dans les aimants métalliques. Il est certain que l'utilisation de tels aimants entraînera une réduction importante du poids et de l'encombrement de la machine pour une même puissance. Il en résultera de même un rapport couple-inertie élevé [12].

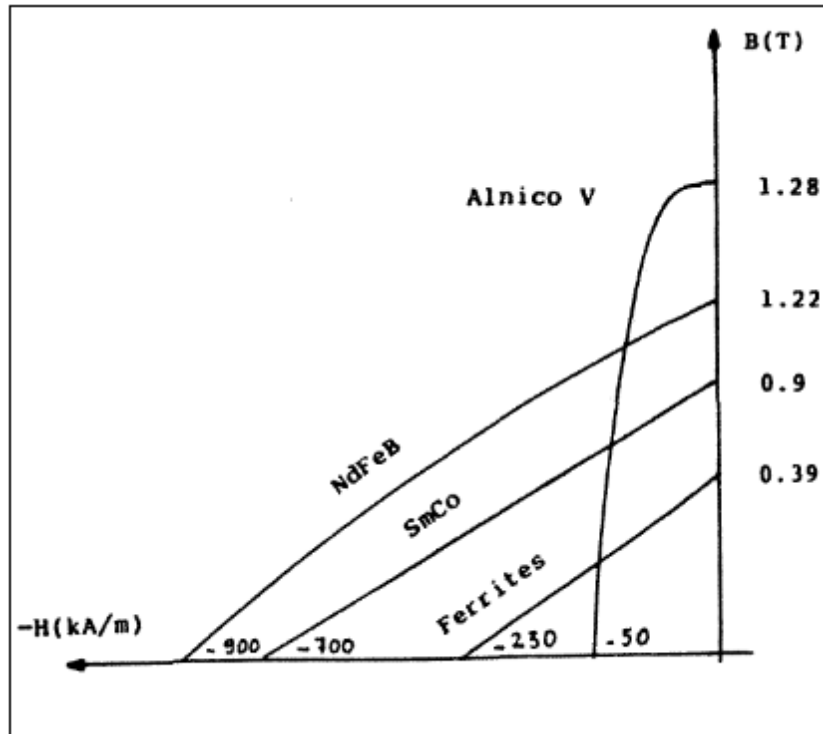


Figure (I.3) : Caractéristiques des aimants permanents [12].

I.3.2.1 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents :

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements oriente le rotor qui est constitué par des aimants. La Figure (I.3) représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator comportant une paire de pôles. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θ_p comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta_p = 90^\circ$ ceci correspond au passage de la Figure (I.3.a) à la Figure (I.4.c). Les demi-pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (Figure (1.2.b)). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure [9].

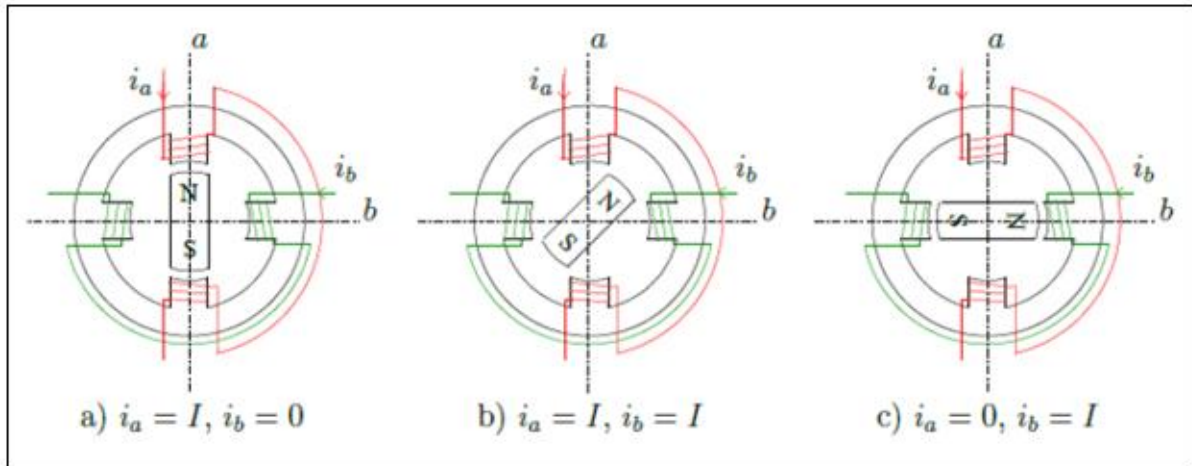


Figure (I.4) : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents [9].

A. Création du champ tournant :

Les trois enroulements statoriques sont géométriquement décalés de $\frac{2\pi}{3}$, ils sont alimentés chacun par une des phases d'un réseau triphasé alternatif. Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs, présentant le même décalage électrique, qui produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal. Ce champ, toujours dirigé suivant le même axe, est maximal quand le courant dans l'enroulement est maximal [10].

B. Vitesse de synchronisme :

Comme l'indique son nom, la machine synchrone à un rotor (inducteur) dont la rotation est synchronisée sur le champ tournant produit par le stator (induit), elle n'a pas de glissement [11].

La vitesse Ω_s ou N_s est directement liée à la fréquence f de l'alimentation et au nombre de paires de pôles p :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \text{ en (rad /s)} \quad (\text{I.5})$$

$$N_s = \frac{60f}{p} \text{ en (tr/min)} \quad (\text{I.6})$$

N_s : vitesse de synchronisme en tr/min.

f : fréquence en Hz.

p : nombre de pair de pôles.

I.3.2.2 L'emplacements des aimants :

En distingue plusieurs configurations d'emplacement des aimants comme le montre la figure (I.5), chacune à ses avantages et inconvénients.

La figure (I.5.a) représente une machine à aimants collés en surface à pôles lisses (l'inductance d'axe directe est égale à l'inductance d'axe en quadrature) ($L_d = L_q$), elle se caractérise par son grand entrefer.

La figure (I.5.b) représente une machine à aimants insérés en surface, elle est caractérisée par une saillance directe ($L_d < L_q$) donc l'effet de saillance provoque l'augmentation du couple max.

La figure (I.5.c) représente une machine à aimants enterrés au rotor, appelé aussi à concentration de flux elle est caractérisée par une saillance inversée ($L_d > L_q$).

Les aimants en surface (figure (I.5.a)) ont l'avantage d'être simples à mettre en place. Cette configuration n'est pas bien adaptée à haute vitesse, car avec la force centrifuge, les aimants vont se décoller. Pour remédier à ce problème, il est préconisé de recourir soit à un rotor extérieur avec aimants étant plaqués à la surface grâce à la force centrifuge soit à frotter les aimants. En plus de supprimer les problèmes de découlement à haute vitesse, les aimants enterrés peuvent être utilisés en concentration de flux ainsi, leur utilisation est optimisée. Sachant qu'en plaçant les aimant de cette manière, les courants de Foucault dans les aimants sont diminués [10].

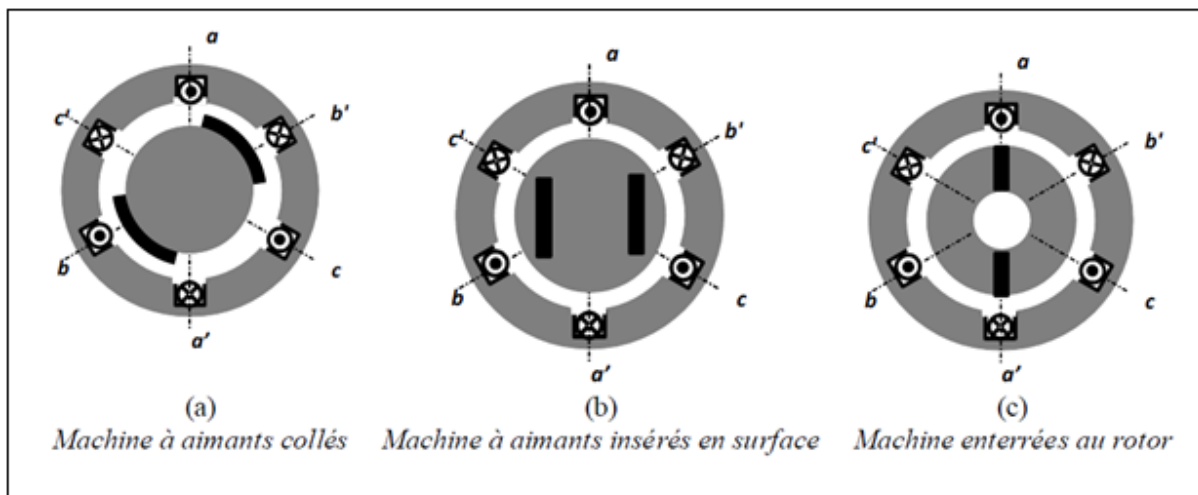


Figure (I.5) : Machine à aimants permanents (MSAP) [10].

I.3.2.3 Les différents modes d'alimentations des machines synchrones à aimants permanents :

Dans le cas d'une machine synchrone alimentée par un onduleur de tension, le convertisseur peut être modélisé par une matrice de connexion tenant compte de tous les modes de fonctionnement [10].

Dans notre cas, ces modes sont les suivants:

❖ Mode 1 : alimentation étoile ou triangle :

La machine ayant ses trois phases statoriques connectées en étoile à neutre isolé, ou machine ayant ses trois phases couplées en triangle. Dans ces deux cas les trois phases sont alimentées, le modèle de Park est le mieux adapté [12].

❖ Mode 2 : alimentation de deux phases en étoiles :

La machine ayant ses trois phases statoriques couplées en étoile, sans liaison de neutre, une des phases étant en circuit ouvert. Dans ce cas la tension aux bornes de la phase en circuit ouvert n'est plus imposée par la source et n'est plus fonction que des courants dans les autres enroulements. Elle ne pourra être connue qu'après résolution des équations de la machine. Il n'est donc pas possible d'utiliser le modèle de Park [12].

I.3.2.4 Domaines d'emploi de la machine synchrone à aimants permanents :

A. Applications aux petites puissances (de 1 W à 100 W environ) :

Les moteurs Brushless sont pour la plupart utilisés en mode courant continu et appelés moteurs Brushless DC (BLDC). Un capteur électronique, intégré au moteur, permet la détection de la position rotorique et assure la commutation du courant qui en dépend. L'avantage d'un tel système est qu'aucun variateur de vitesse supplémentaire n'est nécessaire [11] [12].

Ces moteurs sont utilisés pour des systèmes qui nécessitent des contrôles de position précis.

Entraînement de programmeur horaire, ventilateur sur micro-ordinateur, enregistrement et reproduction audio - vidéo, modélisme (auto, trains et engins volants). Instrumentation médicale, micro mécanismes automobile, modélisme, mini drone...

B. Applications aux moyennes puissances (entre 500W et 100kW) :

Dans cette partie, il est susceptible d'utiliser des machines synchrones à aimants permanents. Ces machines sont pour la plupart polyphasées (généralement triphasées) et associées à un onduleur de tension commandé en courant afin d'assurer l'autopilotage. Machines d'usinage numérique (UGV), commande de mécanismes (aéronautique et espace...). Alternateur automobile classique (1 à 3 kW), entraînement direct du tambour des lave-linge

modernes... Motorisation de véhicules électriques ou hybrides (vélo à assistance électrique, scooter, Prius Toyota...) [11] [13].

C. Applications aux fortes puissances (de 100 kW à 1,5 GW environ) :

Malgré le coût élevé des aimants, les machines synchrones à aimants permanents sont de plus en plus utilisées ou envisagées pour des équipements de plus forte puissance où les contraintes d'encombrement sont importantes comme la traction électrique ou la propulsion navale. L'AGV (Automotrice à Grande Vitesse) d'Alstom utilise ainsi des machines synchrones à aimants permanents pour la traction et le freinage électrodynamique du train. Ce successeur du TGV concilie la structure des rames articulées (comme le TGV) avec une motorisation répartie sur toute la rame. Cette répartition conduit à une réduction de consommation de 15% et à une modulation du train en terme de nombre de voitures et donc de puissance. Le rapport puissance/poids de la rame est de 22kW/tonne et la vitesse de croisière du train est de 360 km/h (contre 320 km/h pour le TGV).

Les moteurs utilisés ont une puissance nominale de 720 kW et un rapport puissance/poids de 1 kW/kg (contre maximum 0.7kW/kg pour le moteur asynchrone du TGV-POS) [14].

De même, les machines synchrones à aimants permanents peuvent être employées pour la propulsion navale. Dans ce cadre, les moteurs utilisés doivent en effet être compacts, légers, fiables, résistants à l'environnement marin (vibrations, humidité, salinité, températures ...) et le plus discret possible s'ils sont utilisés dans un cadre militaire. Bien que les moteurs qui génèrent une forte puissance soient assez chères à fabriquer, on en trouve sur les sous-marins et certains bateaux militaires ainsi que sur certains navires de croisière. Cette partie a proposé un aperçu des différents systèmes propices à l'utilisation des machines synchrones à aimants permanents. Ces systèmes utilisent pour la plupart plusieurs machines électriques autopilotées, reliées chacune à son propre convertisseur électrique [11] [13].

I.3.2.5 Les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents :

A. Les avantages :

On cite les avantages suivants [15] :

- Un rendement et un facteur de puissance élevés.
- Une Puissance massique et volumique important.
- Augmentation de la fiabilité.
- Absences des contacts glissants.

B. Les inconvénients :

Comme inconvénients on indique :

- Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante.
- Pertes par courants de Foucault dans les aimants.

I.4 Choix de la machine synchrone à aimants permanents :

Nous avons présenté, dans ce qui précède, les différents types de machines électriques à courants alternatifs. Cette liste est loin d'être finie, tellement le domaine de ces machines est vaste [1].

Parmi les machines à courant alternatif utilisées dans les entraînements, la machine à aimants permanents qui est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes tout comme les pertes au rotor sont nulles, et une grande capacité de surcharge et surtout à cause de son couple massique élevé comparé aux machines asynchrone et synchrone à rotor bobiné. Ces avantages lui donnent la supériorité aux autres types de machines. Elle est souvent appelée machine à courant continu sans balais car lorsqu'elle est autopilotée, ses caractéristiques coïncident avec celles d'un moteur à courant continu à excitation shunt. Par ailleurs, les travaux effectués sur celle-ci ont montré la similitude de ses caractéristiques avec celles du moteur à courant continu et que les lois de commande s'appliquent facilement sur cette machine. Cependant, l'autopilotage nécessite l'utilisation d'un onduleur et un capteur de position [2].

Pour notre étude on choisit une machine synchrone à aimants enterrés au rotor, appelée aussi à concentration de flux.

I.5 Autopilotage de machine synchrone à aimants permanents :

La structure générale de l'alimentation par convertisseur statique des machines synchrones à vitesse variable est donnée par la figure (I.6). Les interrupteurs utilisés dans ces convertisseurs (onduleurs) sont commandés de manière à imposer une tension ou un courant alternatif dans les enroulements statoriques de la machine. Pour réaliser l'autopilotage, les interrupteurs du convertisseur sont commandés suivant une loi qui est en fonction de la position du rotor, de manière à imposer un contrôle du couple. Plusieurs variantes de ce principe existent qui prennent en compte le type de machine et le type de convertisseur [12].

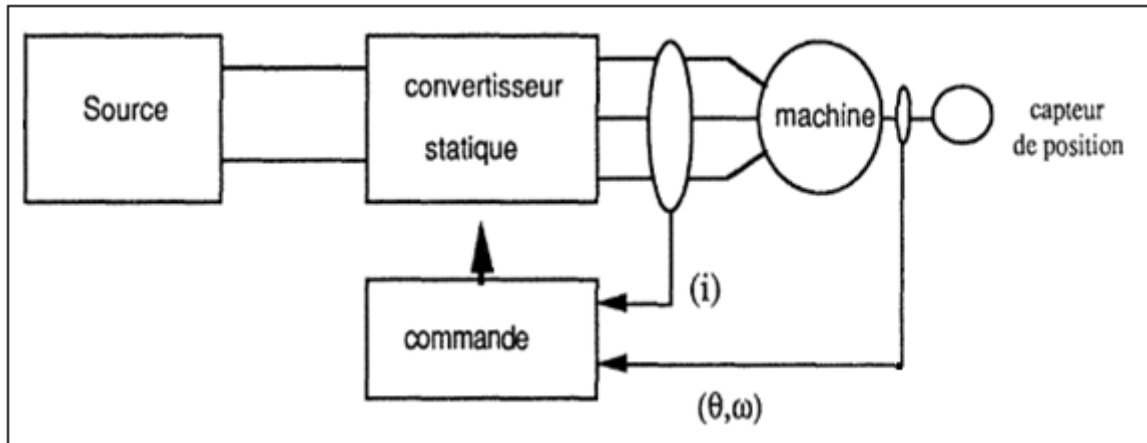


Figure (I.6) : Structure des machines synchrones autopilotées [12].

I.5.1 Principe de L'autopilotage des machines synchrones à aimants permanents :

La machine synchrone est de loin la plus facile à piloter car le flux magnétique du rotor est créé uniquement soit par le moment magnétique de l'aimant permanent du rotor, soit par le courant inducteur continu envoyé dans le bobinage rotorique de ce fait l'autopilotage de cette machine consiste à maintenir constant ou peu variable le décalage angulaire entre les force électromotrice de celle-ci et les courants statoriques .Avec cette condition le couple électromagnétique développé par la machine peut être contrôlé et une boucle d'asservissement de position ou de vitesse peut être réalisée autour de la boucle de commande du couple de la machine .Pour réaliser cette tâche, le synchronisme de la machine doit être contrôlé par un capteur de position lié au rotor .Cela permet d'imposer le courant ou la tension qu'il faut afin d'assurer le contrôle du couple de la machine, l'autopilotage permet aussi d'éviter le décrochage du moteur [16].

Avec l'utilisation de ce principe, plusieurs variantes existent, dans lesquelles le type de la machine et du convertisseur est pris en compte.

Un pilotage complet donne lieu à un ensemble dit Brushless (traduction mot à mot « sans balais »), par comparaison à la fonction réalisée par l'ensemble collecteur + balais d'une Machine à courant continu.

I.5.2 Réalisation de l'autopilotage :

Pour contrôler la rotation du rotor à vitesse variable, il faut à tout instant contrôler la vitesse par un onduleur de tension. Le capteur de position règle l'instant d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur de tension de manière à avoir le θ voulu. La vitesse de rotation fixe la fréquence d'alimentation de la machine et impose la synchronisation de la vitesse de champs tournant à la vitesse de rotor [16].

I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on décrit brièvement les différentes machines électriques à courants alternatifs avec leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres. De ce fait notre choix c'est posé sur la machine synchrone à aimants permanents.

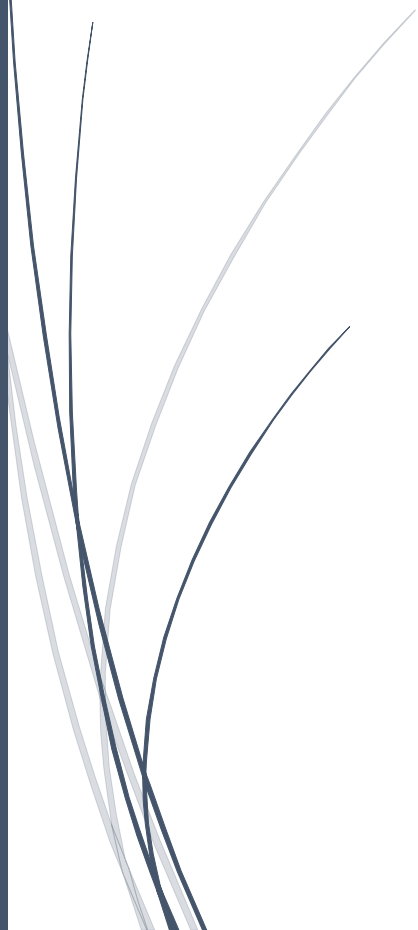
En second lieu on a abordé le principe de l'autopilotage de la machine synchrone.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la simulation d'une machine synchrone à aimants permanents associée à un onduleur de tension.



**Modélisation de
l'ensemble
convertisseur-machine**

Chapitre II



II.1 Introduction :

Avant d'aborder les différentes commandes pour l'autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents il faut élaborer le modèle de l'ensemble convertisseur-machine.

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents associée à un onduleur de tension va nous permettre de comprendre son principe de fonctionnement et d'établir un modèle d'action pour ces commandes.

Le convertisseur à étudier est l'onduleur de tension triphasée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la commande de ces interrupteurs. Le procédé utilisé pour la variation de vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents est la modulation de largeur d'impulsions (MLI), la commande plaine onde et la commande 120°, ainsi que le contrôle des courants par hystérésis.

II.2 Description de la machine synchrone à aimants permanents :

Le moteur utilisé dans notre étude, est un moteur synchrone à pôles saillant à aimants permanents monter en surface avec six pôles et elle ne possède pas d'enroulements amortisseurs.

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte au stator un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre de $\frac{2\pi}{3}$ électrique (figure (II.1)) et au rotor des aimants permanents son excitation [15].

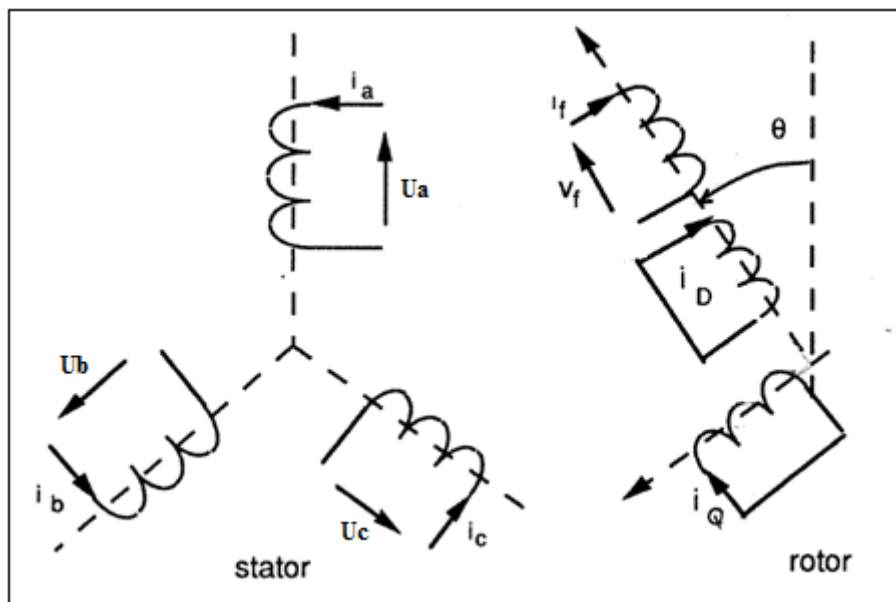


Figure (II.1) : Modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (a, b, c) [12].

II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la machine synchrone à aimants permanents :

Pour faire la modélisation et réduire la complexité du modèle de la machine synchrone à aimants permanents, on adopte certaines hypothèses simplificatrices [8] :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la force magnétomotrice créée par les enroulements est sinusoïdale.

L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistances ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux.

II.3.2 Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents :

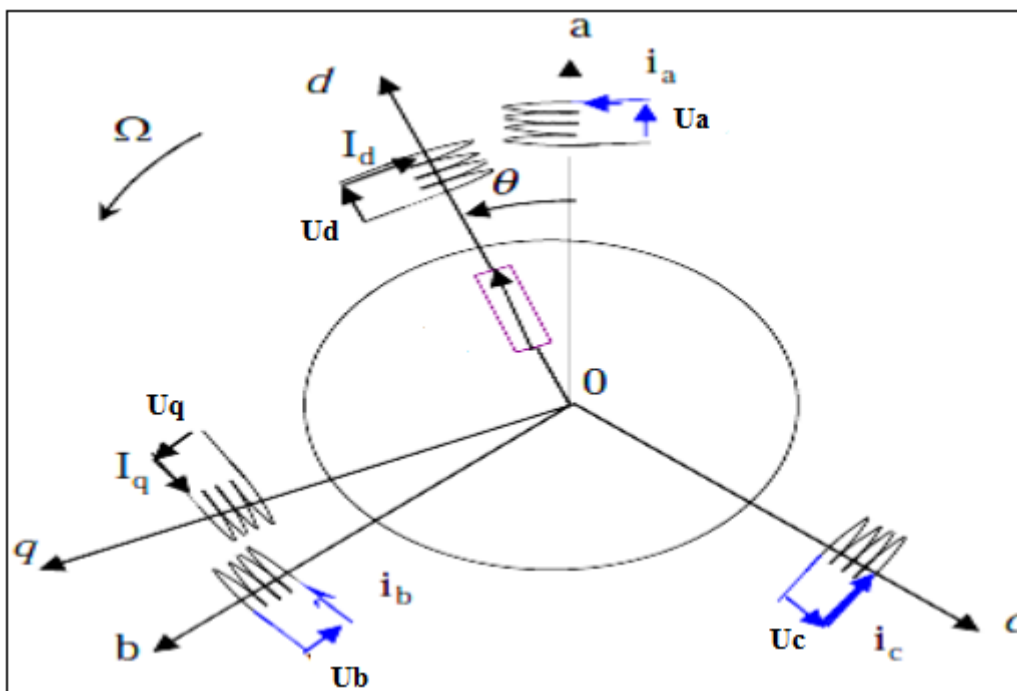


Figure (II.2) : Schéma équivalent de la MSAP dans le référentiel (a, b, c) et Référentiel (d, q) [11].

A partir de la figure (II.2), nous écrivons les équations relatives au stator et au rotor :

II.3.2.1 Les équations électriques :

Les équations triphasées des tensions statoriques s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$[U_a \ U_b \ U_c]^T$: les tensions des phases statoriques.

R_s : La résistance statorique.

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$: les courants des phases statoriques.

$[\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$: sont les flux totaux statoriques.

II.3.2.2 Equation magnétique :

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{af} \\ \Psi_{bf} \\ \Psi_{cf} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{af} \\ \Psi_{bf} \\ \Psi_{cf} \end{bmatrix} = \Psi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Ψ_{af} : L'amplitude du flux produit par les aimants permanents.

Dans le cas général, c'est-à-dire, les machines à pôles saillants (sans amortisseurs), la matrice $[L_{ss}]$ se compose de termes variables et de termes constants. Elle peut s'écrire comme suit :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{sv}] \quad (\text{II.4})$$

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Et

$$[L_{sv}] = L_{sv} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) & \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e) \\ \cos(2\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta_e) & \cos(2\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Où L_{s0} , L_{sv} et M_{s0} sont les inductances propres et mutuelles respectivement. Elles sont constantes.

II.3.3 Transformation de Park :

Afin de modéliser les machines triphasés, la transformation de Park est couramment utilisée pour obtenir l'expression des variables dans un repère tournant d-q. Cette transformation rend les équations dynamiques des machines à courant alternatif plus simples, ce qui facilite leur étude et leur analyse. Cette méthode se décompose en deux étapes :

1. Transformation Triphasée-Diphasée (dans un repère fixe) (Concordia).
2. Transformation Repère fixe-Repère tournant (Park).

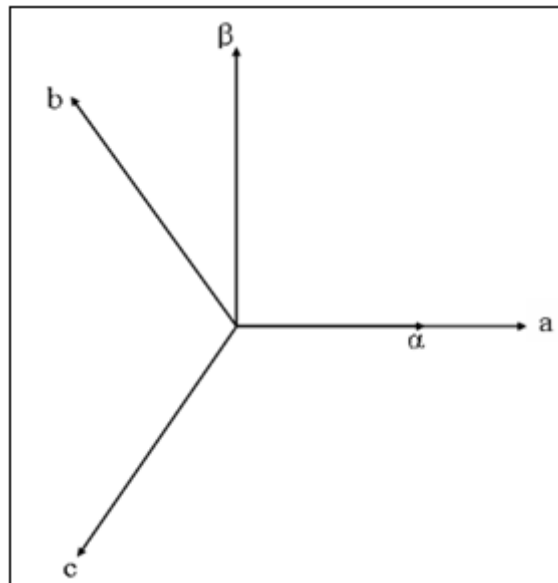


Figure (II.3) : Transformation triphasé à diphasé (Transformation de Concordia) [12].

II.3.3.1 Application de la première transformation (Concordia T_{32}) :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La transformation de Concordia présente les propriétés suivantes :

- Elle est orthogonale.
- Elle est normée et conserve donc la puissance.

Donc :

$$[X_{abc}] = [T_{32}] [X_{\alpha\beta 0}] \quad (\text{II.9})$$

Où X peut être une variable réelle comme la tension, le courant et le flux, on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

II.3.3.2 Transformation Repère fixe-Repère tournant (Park) :

La méthode consiste à transformer le système d'enroulements triphasé statoriques d'axes (a, b, c) en un système de deux enroulements biphasés sur les axes (d, q), en raison de la possibilité de créer une même force magnétomotrice différemment par des systèmes de courants diphasés ou triphasés. Le passage vers Park est donné par une matrice de rotation p (θ).

L'application de la transformation de Park P au système d'équations (II.9) donne :

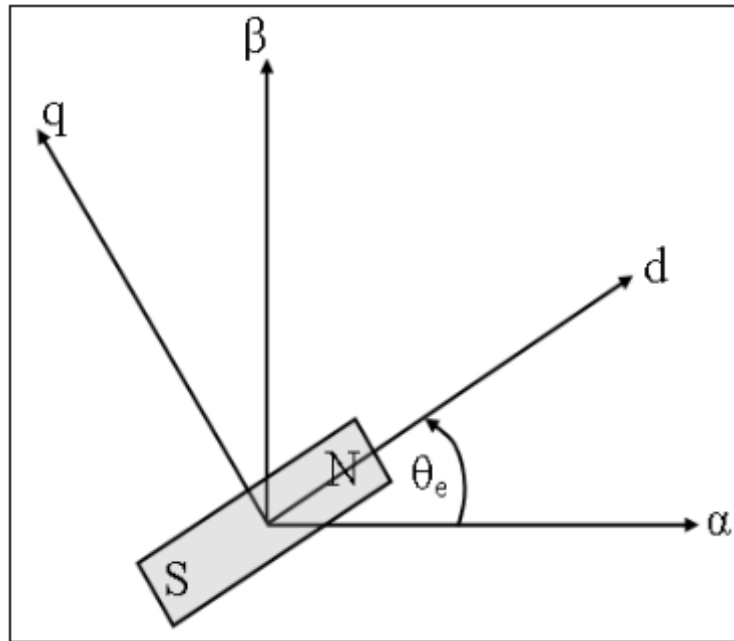


Figure (II.4) : Transformation de Park [12].

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = p(-\theta_e) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Où

$$p(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

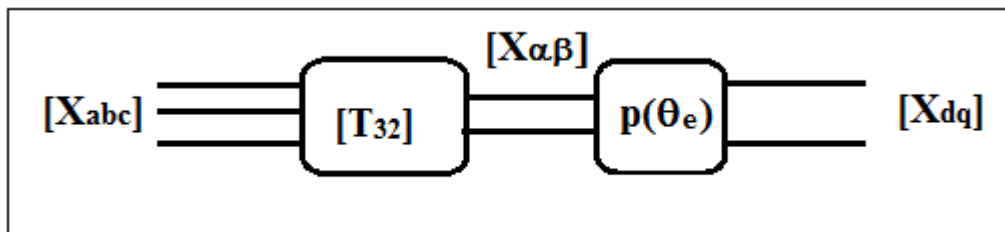


Figure (II.5) : Passage des composantes triphasée aux composantes de Park [17].

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, Ψ_d et Ψ_q sont des fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

De l'équation (II.13) et de l'équation (II.14), l'équation suivante est obtenue :

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & \omega L_q \\ -\omega L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

II.3.3.3 Les équations mécaniques :

La position électrique du rotor, c'est-à-dire θ_e est l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator, est calculée par :

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \omega \quad (\text{II.16})$$

L'équation de la vitesse du rotor est :

$$j \frac{d\Omega}{dt} + f_v = C_e - C_l \quad (\text{II.17})$$

Avec :

C_l : Couple moteur.

j : Moment d'inertie totale de la machine.

f_v : Frottement.

C_e : Couple électromagnétique.

II.3.3.4 Couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les forces magnétomotrices statoriques dans l'entrefer qui sont générées par les courants statoriques. Ce couple développé par les machines synchrones à force électromotrice sinusoïdale peut être exprimé par :

$$C_e = p \frac{dW}{d\theta} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

W : Le travail (joule).

La puissance électrique absorbée par la machine est exprimée par :

$$p_e = U_a i_a + U_b i_b + U_c i_c \quad (\text{II.19})$$

Chapitre II: Modélisation de l'ensemble convertisseur-machine

Dans le référentiel de Park, cette puissance s'écrit :

$$p_e(t) = \frac{3}{2}(U_d i_d + U_q i_q + 2U_0 i_0) \quad (\text{II.20})$$

Pour un système équilibré on a : $U_0 = i_0 = 0$

$$p_e(t) = \frac{3}{2}(U_d i_d + U_q i_q) \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant les courants et les tensions dans cette expression par leurs similaires dans le système (d, q) , La puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park devient :

$$p_e = \frac{3}{2} \left[-R_s(i_d^2 - i_q^2) - \left(i_d \frac{d\Psi_d}{dt} + i_q \frac{d\Psi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \right] \quad (\text{II.22})$$

- $\frac{3}{2} [-R_s(i_d^2 - i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en perte joule dans les enroulements du stator.
- $\frac{3}{2} \left[\left(i_d \frac{d\Psi_d}{dt} + i_q \frac{d\Psi_q}{dt} \right) \right]$: Représente la variation d'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.
- $\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \right]$: Représente la puissance électromagnétique.

$$C_e = \frac{p_e}{\omega} \quad (\text{II.23})$$

D'où en remplaçant l'équation (II.22) dans l'équation (II.23) en aura :

$$C_e = \frac{3}{2} p \left[(L_d - L_q) i_d i_q + \Psi_f i_q \right] \quad (\text{II.24})$$

Dans le cas où la machine est à pôles lisses ($L_d = L_q$), le terme $(p(L_d - L_q))$ formant le couple de réductance est nul. L'équation du couple se simplifie en :

$$C_e = \frac{3}{2} p \Psi_f i_q \quad (\text{II.25})$$

L'équation (II.24) montre que le couple est proportionnel à un produit vectoriel représentant une expression non linéaire.

En revanche, l'équation (II.25) montre que le couple est proportionnel au courant de l'axe q . Cela confirme l'analogie entre cette machine et la machine à courant continu.

En combinant les équations électriques avec les équations mécaniques, le modèle complet de la machine synchrone à aimants permanents peut être obtenu.

II.4 Modèle d'état :

Généralement, pour présenter un modèle d'état, il faut définir le vecteur d'état x , le vecteur d'entrée u et le vecteur de sortie y . Le vecteur d'entrée est composé des tensions statoriques. Le vecteur d'état est constitué des grandeurs électriques (courants) et grandeur mécanique (vitesse et / ou position).

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)U \\ y = h(x) \end{cases}$$

II.4.1 Modèle d'état dans le repère tournant (d-q) :

A noter que si la machine synchrone à aimants permanents est à pôles lisses, ($L_d = L_q = L_s$).

Dans le cas d'une régulation de couple ou de vitesse angulaire, en développant l'équation (II.11) le modèle non linéaire d'état dans le repère tournant d-q est décrit par le système ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Ri_d}{L_d} + p\frac{L_q}{L_d}i_q\Omega \\ -\frac{Ri_q}{L_q} - p\frac{L_d}{L_q}i_d\Omega - p\frac{\Psi_f}{L_q}\Omega \\ p\frac{\Psi_f}{J}i_q - p\frac{(L_q-L_d)}{J}i_d\dot{i}_d - \frac{f}{J}\Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ C_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Dans le cas d'une régulation de la position θ du rotor, il faut prendre celle-ci comme une nouvelle variable d'état et donc le nouveau modèle d'état s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Ri_d}{L_d} + p\frac{L_q}{L_d}i_q\Omega \\ -\frac{Ri_q}{L_q} - p\frac{L_d}{L_q}i_d\Omega - p\frac{\Psi_f}{L_q}\Omega \\ p\frac{\Psi_f}{J}i_q - p\frac{(L_q-L_d)}{J}i_d\dot{i}_d - \frac{f}{J}\Omega \\ \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ C_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

II.5 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé :

II.5.1 Système d'alimentation :

Les avantages de l'association des machines synchrones à aimants permanents avec des convertisseurs statiques sont nombreux [2] :

- Variation de l'amplitude de la tension d'alimentation de la machine.
- Variation de la vitesse de synchronisme par la variation de la fréquence du convertisseur.
- Autopilotage de la fréquence du convertisseur par le capteur de position. Le réglage de la vitesse (ou de position) du rotor d'une machine synchrone se réalise logiquement par action sur la fréquence de 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 à fréquence variable.

II.5.2 Définition de l'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif, (AC-DC). Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonomes et onduleur autonome. Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance » [18].

II.5.3 Classification des onduleurs :

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs [3] [18].

II.5.3.1 Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes, la charge est quelconque et cet onduleur n'est pas réversible [3].

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté, cela conduit à distinguer plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
 - onduleurs de tension.
 - Commutateur de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.),
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

II.5.3.2 Onduleur non autonome :

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables [3].

II.5.4 Choix des composants :

Les composants de l'électronique de puissances (interrupteurs) sont déterminés par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible.

Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantage plus puissants (quelques kHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 kHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO commutent très lentement les grandes puissances. Les composants indiqués sont du type commandable le à l'ouverture et à la fermeture ; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique [3].

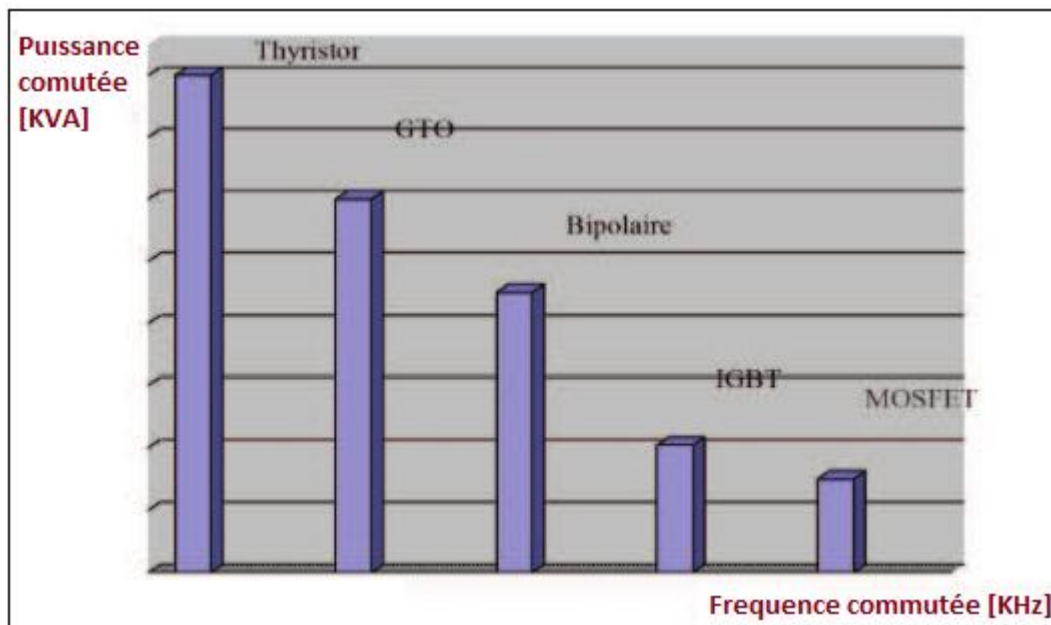


Figure (II.6) : Choix des composants selon la puissance et la fréquence [3].

II.5.5 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé :

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la figure (II.7), Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif i_a i_b i_c , les interrupteur K1, K2, K3 et K4, K5 et K6 doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de T/3 sur le précédent.

- En commande pleine onde on ferme donc :

- K1 pour $\omega t = 0$ K2 pour $\omega t = \pi$
- K3 pour $\omega t = \frac{2\pi}{3}$ K4 pour $\omega t = \pi + \frac{2\pi}{3}$
- K5 pour $\omega t = \frac{4\pi}{3}$ K6 pour $\omega t = \pi + \frac{4\pi}{3}$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre figure (II.7).

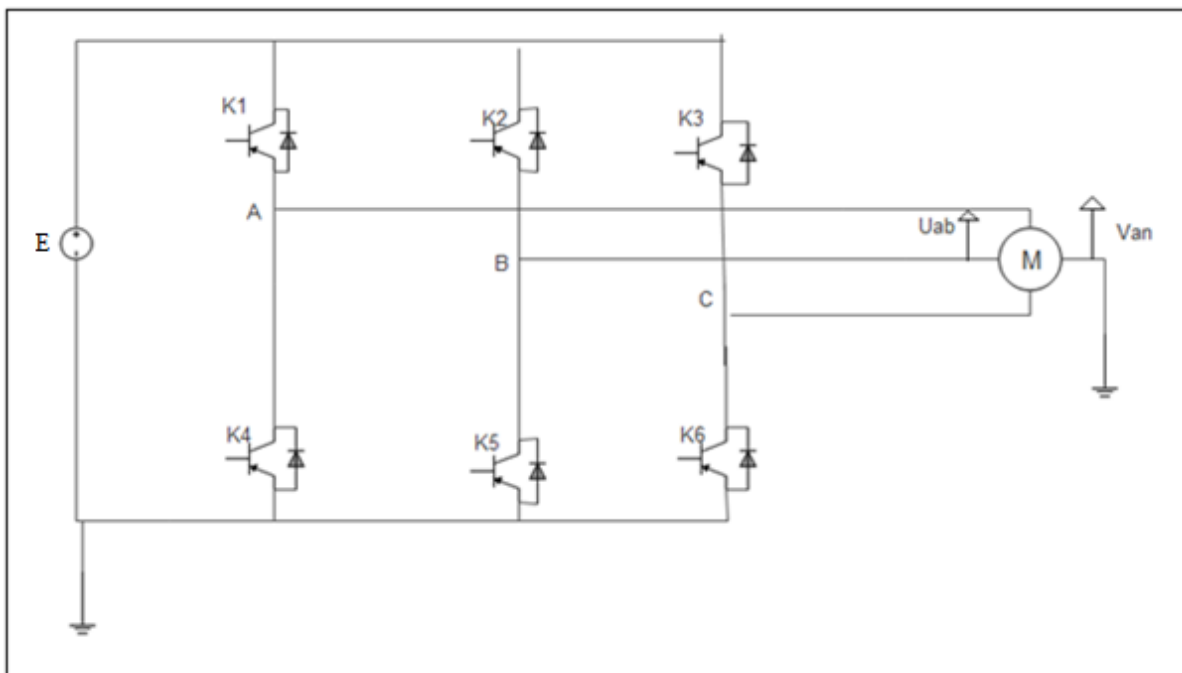


Figure (II.7) : Représentation d'un onduleur triphasé de tension.

II.6 Modélisation de l'onduleur de tension autonome triphasé :

Pour modéliser l'onduleur de tension (Figure (II.7)) Un certain nombre de remarques s'imposent dès à présent [2] :

- Parmi les 4 possibilités d'allumage des semi-conducteurs d'une branche, deux sont interdites :
 - ✓ L'allumage simultané, parce qu'il conduit au court-circuit de la source de tension et donc à la destruction des semi-conducteurs de la branche si une protection efficace n'entre pas en action.
 - ✓ L'extinction simultanée, parce que la tension sur cette phase de la machine n'est alors plus imposée par l'onduleur, ce que l'on rejette par principe.
- Chaque semi-conducteur doit être muni d'une diode antiparallèle ; en effet lorsqu'on permute l'état de conduction des semi-conducteurs d'une branche, la tension de phase s'inverse, mais pas le courant puisque la machine est inductive ; c'est alors la diode antiparallèle du semi-conducteur qui vient de s'éteindre qui véhiculera le courant tant que celui-ci ne sera pas inversé.
- La variation de la fréquence statorique est facile à obtenir puisqu'elle résulte directement de la variation de la fréquence de commutation des semi-conducteurs.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peuvent être définis par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i=a, b, c$) [9] :

- $S_i=1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i=0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces cas on peut écrire les tensions v_{in} en fonction des signaux de commande S_i et en tenant compte du point fictif représenté sur la figure (II.7) :

$$v_{in} = E \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{II.28})$$

Soit 'n' le point neutre du coté alternative (MSAP), alors les trois tensions composées : U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} sont définies par les relations suivantes [10] :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{an} - V_{bn} = E(S_a - S_b) \\ U_{bc} &= V_{bs} - V_{cs} = E(S_b - S_c) \\ U_{ca} &= V_{cs} - V_{as} = E(S_c - S_a) \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

Chapitre II: Modélisation de l'ensemble convertisseur-machine

Les tensions V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , forment un système de tension triphasée équilibrées alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.30})$$

De (II.30), (II.31) on aura :

$$\begin{aligned} U_{an} &= \frac{E}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_{bn} &= \frac{E}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ U_{cn} &= \frac{E}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

L'utilisation de l'expression (II.28) permet d'établir les équations des tensions instantanées simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté et modélisé l'ensemble machine-onduleur.

En utilisant la transformation de Park, le modèle dynamique du moteur synchrone à aimants permanents devient plus simple. Les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles.

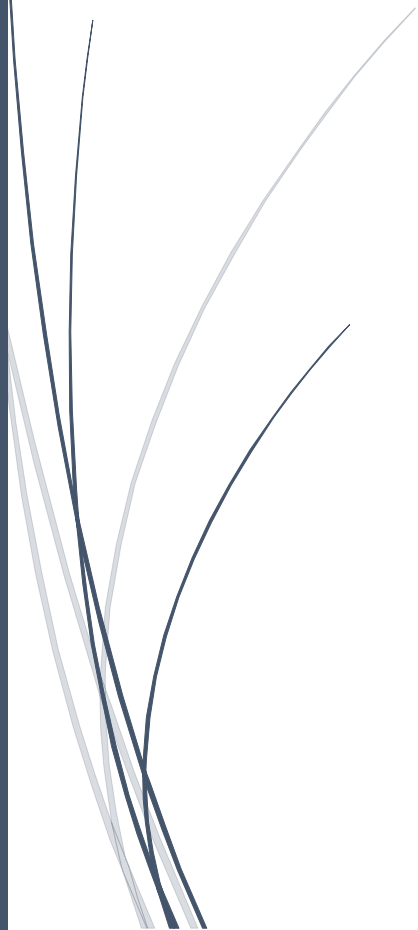
Tout comme on a modélisé l'onduleur de tension triphasée qui va être associé à la machine synchrone à aimants permanents pour élaborer les différentes techniques pour la commande.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la machine synchrone à aimants permanents dans le cas de la commande pleine onde (180°) et dans le cas de contrôle des courants par hystérésis.



Interprétation des
techniques de commande

Chapitre III



III.1 Introduction :

La mise en œuvre proprement dite l'autopilotage se fait par l'intermédiaire d'une source de tension de courant continue, un onduleur de tension triphasée à deux niveaux et un dispositif de commande de cet onduleur qui, à partir de la position du rotor de la machine synchrone à aimants permanents, on détermine les séquences d'alimentation des différentes phases de la machine.

Dans ce qui suit on a élaboré les différentes techniques de commande et le contrôle de courant tout en précisant la commande pleine onde et le contrôle de courant par hystérésis.

III.2 Différents type de commande des interrupteurs :

Parmi les différents types de commande, on trouve :

- ✓ La commande à plein onde (180°).
- ✓ Commande à 120° .
- ✓ Contrôle du courant par la modulation de largeur d'impulsions (MLI).
- ✓ Contrôle du courant par hystérésis.

On s'intéressera dans notre travail à la commande pleine onde (180°).

III.3 La commande pleine onde (180°) :

Cette commande est conçue de façon à ce que les interrupteurs soient commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais leurs conductions sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$, tel que :

- À tout instant trois interrupteurs sont en état de conduire et les trois autres sont bloqués.
- Deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuité la source de tension.

La figure (III.2) montre les six séquences de conduction obtenues par période, et les allures des tensions composées sont représentées dans la (figure (III.3)).

La figure (III.4) montre le détail de cette construction. Sur ces chronogrammes on voit que les trois tensions simples ont une forme en marches d'escalier, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées, d'amplitude $\frac{2}{3} E$, de période T égale à celles des tensions composées [19]. Les commandes des interrupteurs d'une même branche sont adjacentes, et

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

l'angle de déphasage entre chaque signal de commande de deux interrupteurs de deux bras qui se suivent est de $\frac{2\pi}{3}$.

Les expressions des valeurs efficaces sont :

Pour les tensions composées :

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3}} E \quad (III.1)$$

Pour les tensions simples :

$$V_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} E \quad (III.2)$$

Ce qui conduit au rapport :

$$U_{eff} = \sqrt{3} V_{eff} \quad (III.3)$$

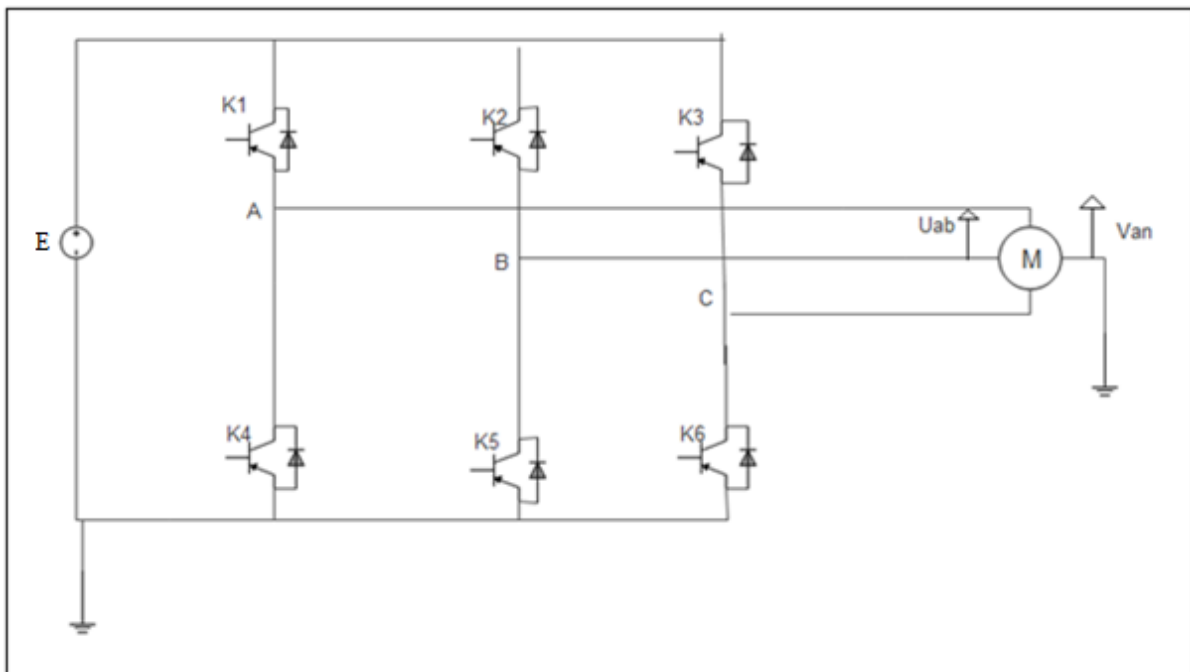


Figure (III.1) : Représentation d'un onduleur de tension triphasée à deux niveaux.

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

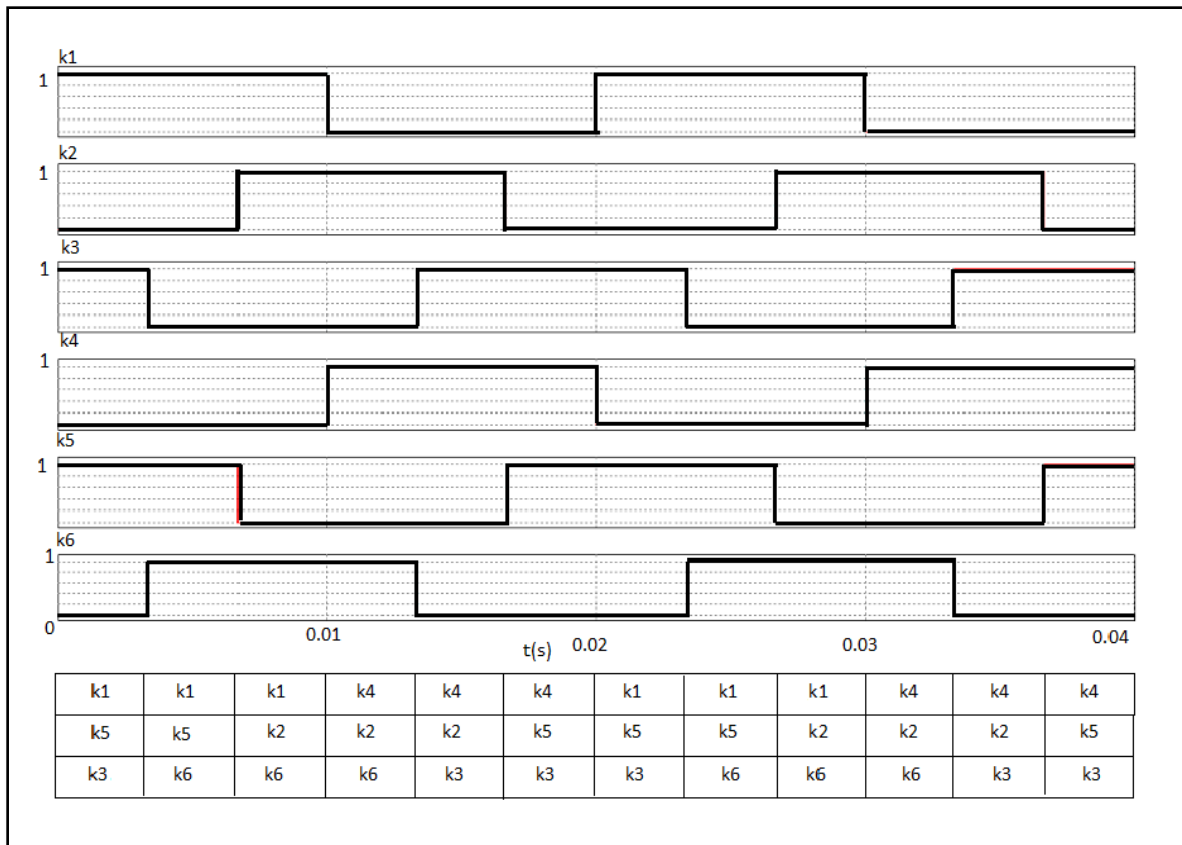


Figure (III.2) : Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande à 180°.

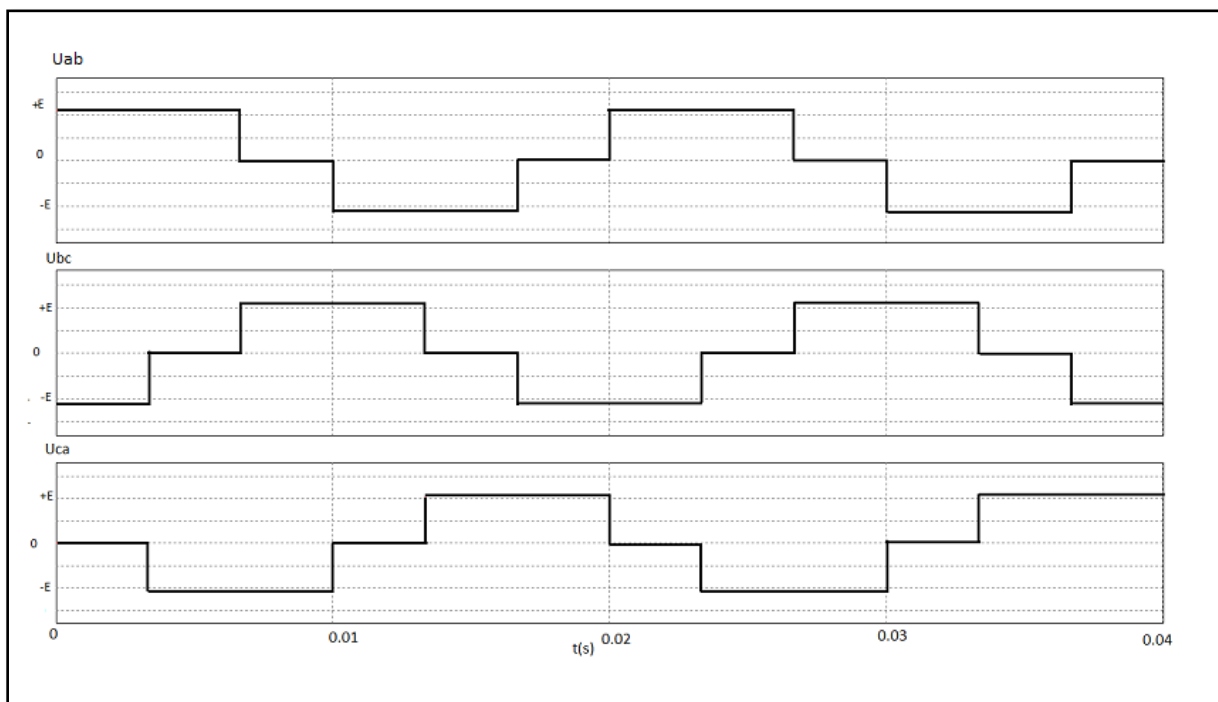


Figure (III.3) : Construction des chronogrammes de tensions composées.

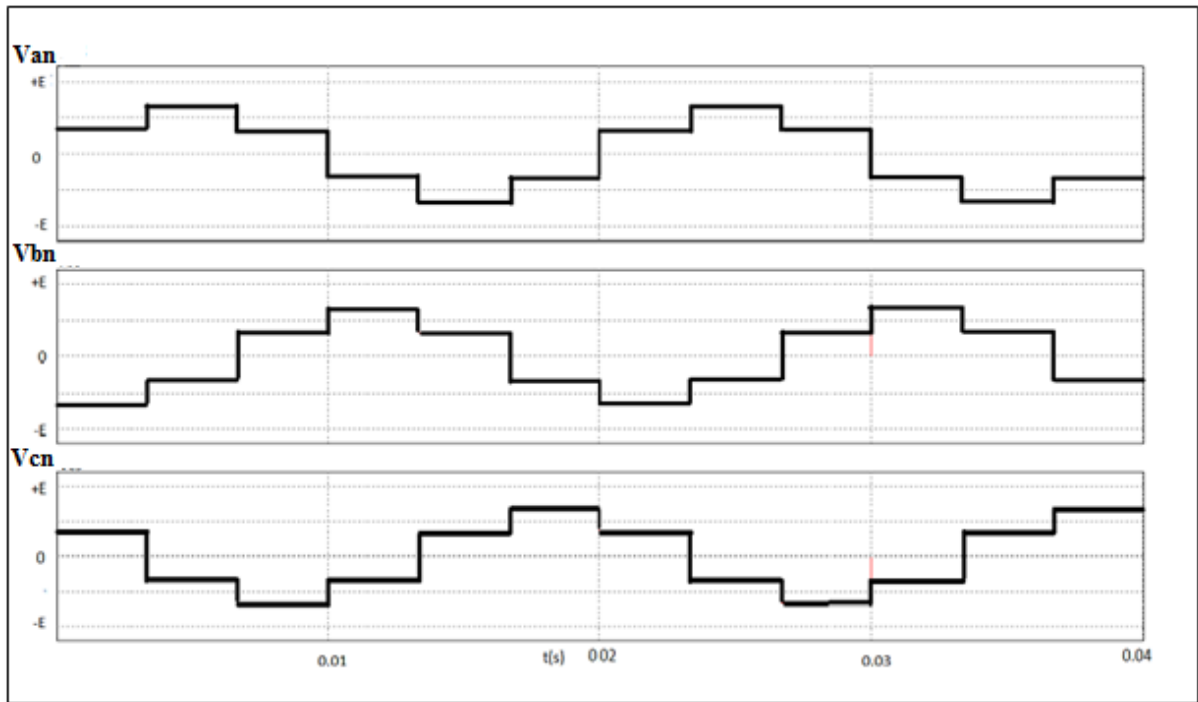


Figure (III.4) : Construction des chronogrammes de tensions simples.

III.4 Résultats de simulation de la commande plaine onde de l'ensemble machine synchrone_onduleur avec l'autopilotage :

Après la modélisation de l'ensemble machine onduleur on a abouti au schéma bloqué de la figure (III.5) à l'aide de Matlab_Simulink.

Le système global à étudier est constitué de :

- Matlab function.
- Un onduleur de tension triphasée.
- Un moteur synchrone à aimants permanents.

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

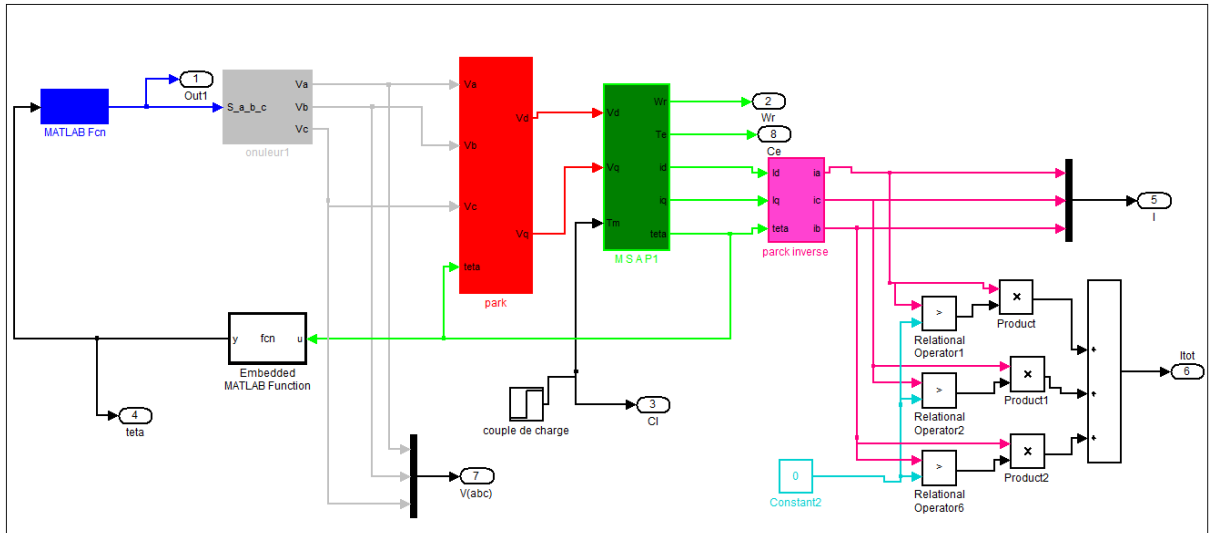


Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande pleine onde avec autopilotage de la machine synchrone.

Dans ce qui suit, on visualisera l'allure de la vitesse mécanique, du couple électromagnétique, des signaux de commande, les courants de sortie ainsi que le courant total à partir du bloc de la figure (III.5).

On impose une tension continue de 63V à l'entrée de l'onduleur et un couple de charge de 5 (N.m) sachant que ce dernier ne doit pas dépassée la valeur du couple nominal ($C_e=8.7N.m$):

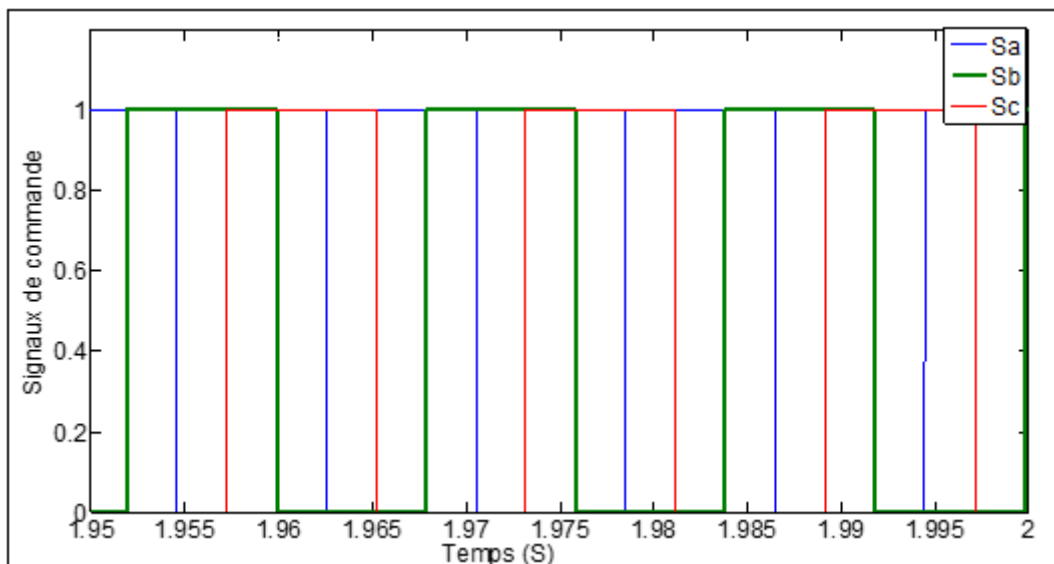


Figure (III.6) : les trois signaux de commande ($S_a S_b S_c$).

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

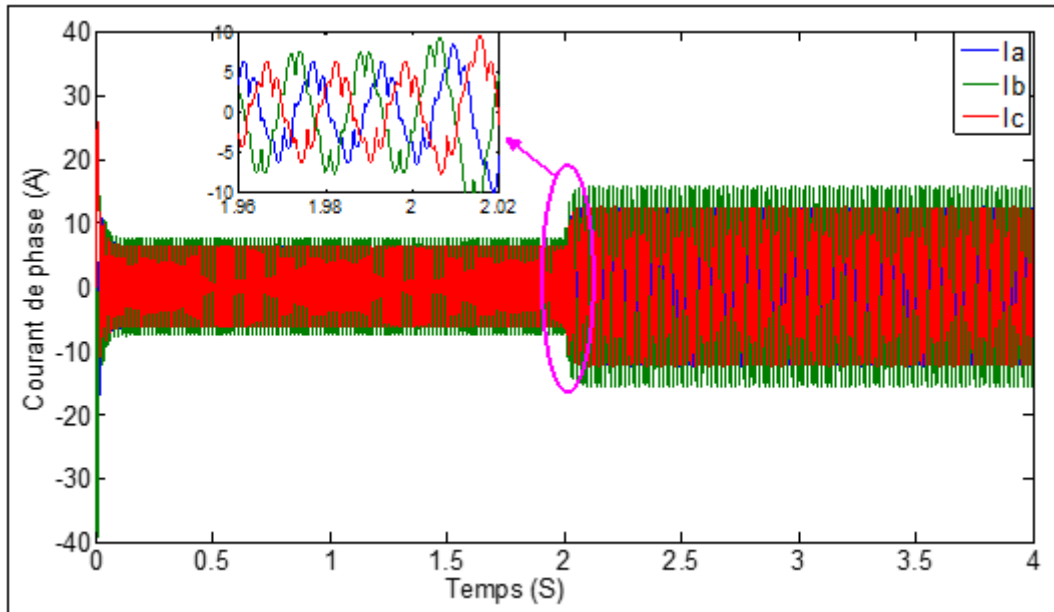


Figure (III.7) : Allures du courant de phase d'un moteur synchrone autopiloté.

Les courants statoriques sont de forme sinusoïdale avec présence des harmoniques, en appliquant un couple de charge de 5N.m ou niveau de 2s en remarque augmentation des courants.

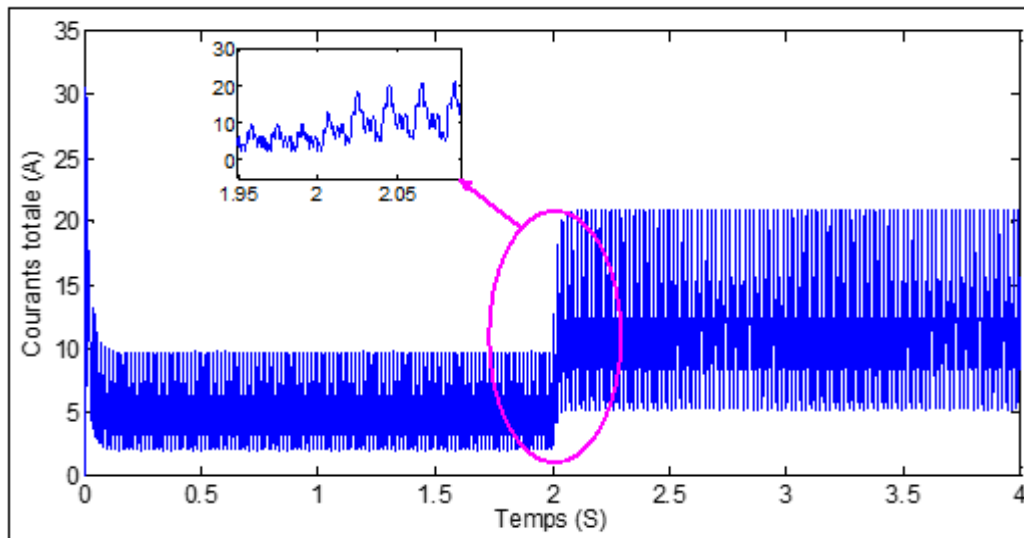


Figure (III.8) : Allure du courant total.

Le courant total c'est la somme des courants statoriques positive ou négative. En appliquant un couple de charge de 5N.m à 2s on remarque que le courant total augmente.

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

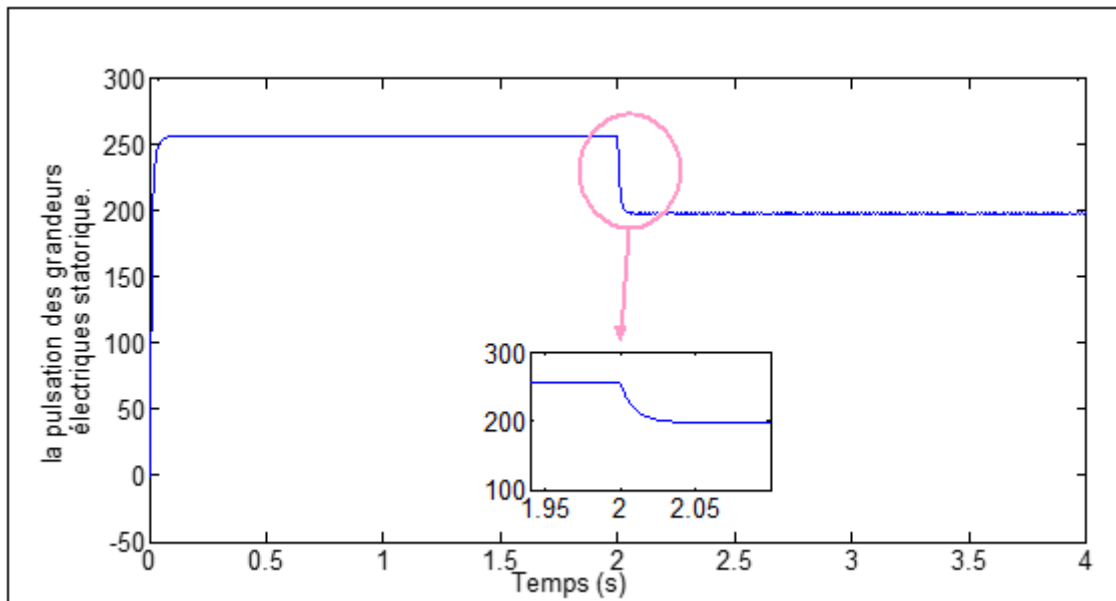


Figure (III.9) : Allure de la pulsation des grandeurs électriques statorique.

La pulsation des grandeurs électriques statorique ne doit pas dépasser $2\pi f=314$ rad/s, on appliquant un couple de charge de 5N.m à 2s on remarque qu'elle diminue.

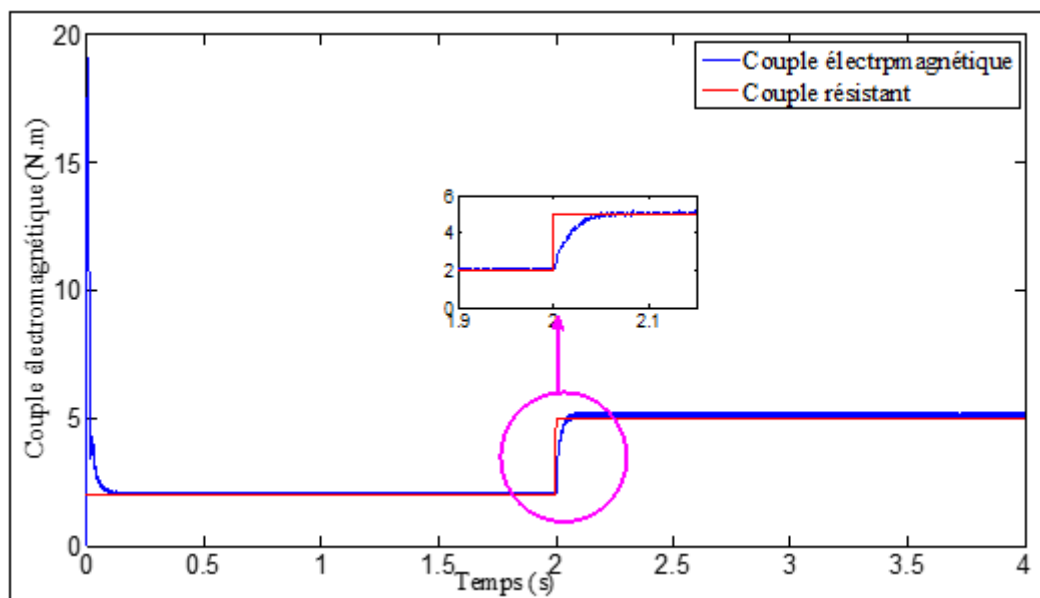


Figure (III.10) : Allure du couple électromagnétique développé par la machine synchrone.

Le couple électromagnétique tente de suivre l'allure du couple de charge.

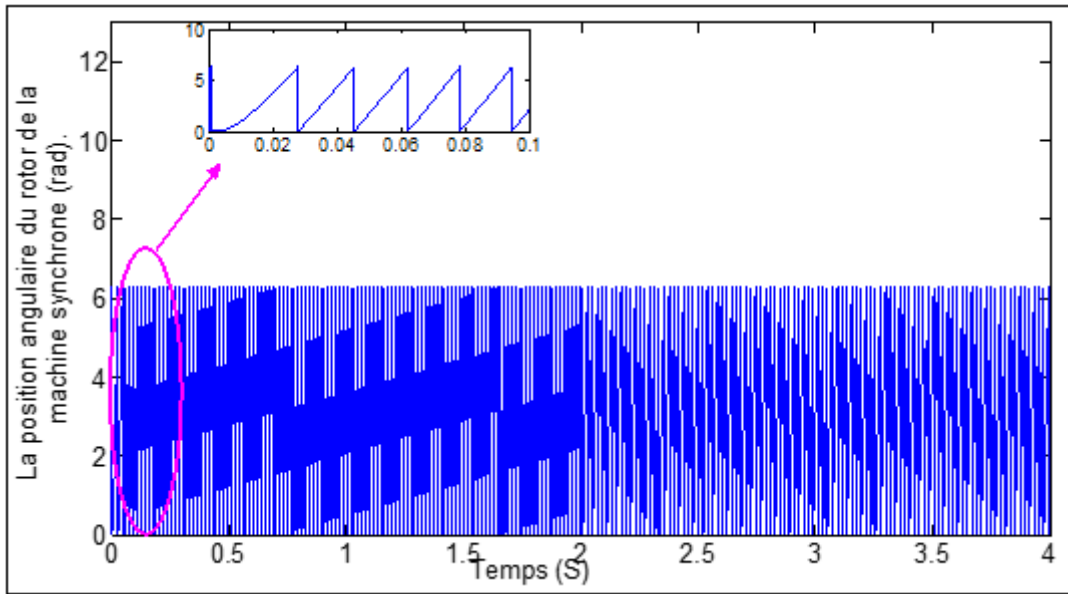


Figure (III.11) : Allure de la position angulaire du rotor de la machine synchrone.

L'allure de la position angulaire est de forme triangulaire, sa valeur varie jusqu'à 6.2 rad qui est équivalent à une période (2π) puis elle revient à zéro.

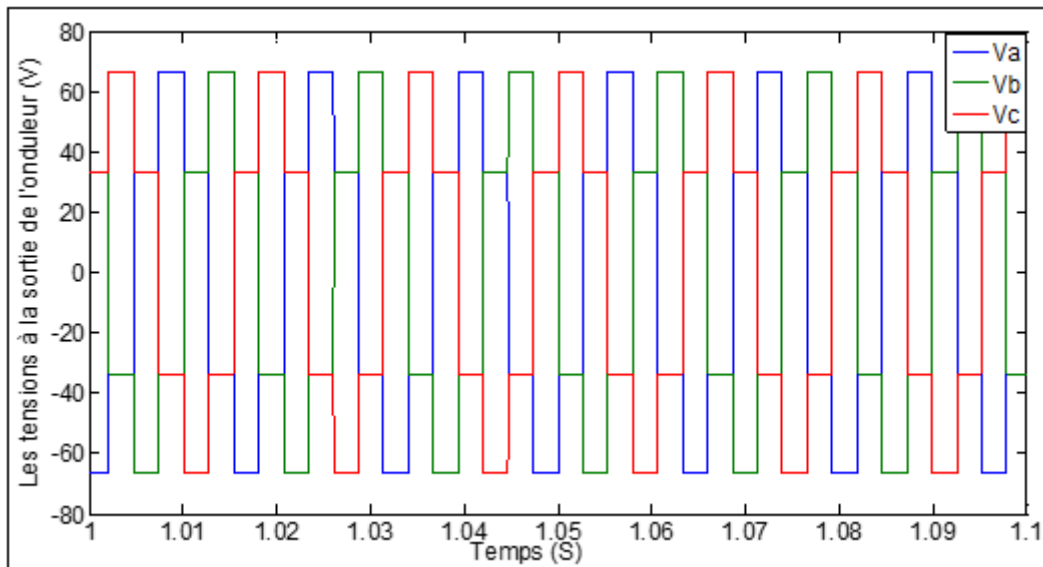


Figure (III.12) : Les tensions à la sortie de l'onduleur V_a, V_b, V_c .

III.5 contrôle des courants par hystérésis :

Cette méthode, certainement la plus simple, a souvent été employée pour l'alimentation des machines à courant alternatif. La figure (III.13) présente le schéma de principe de cette

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

méthode. Elle utilise trois régulateurs à hystérésis indépendants, un par phase. La fonction d'autopilotage est assurée par la génération des références de courants sinusoïdales [20].

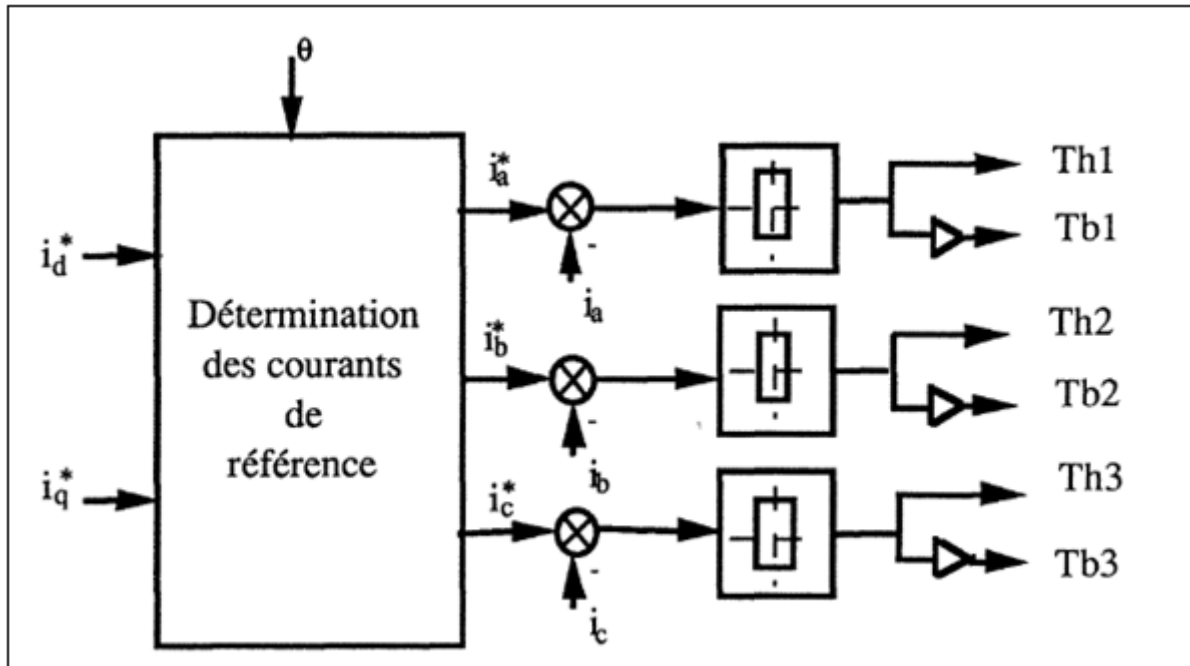


Figure (III.13) : Schémas de Principe de contrôle par hystérésis les courants de phase [12].

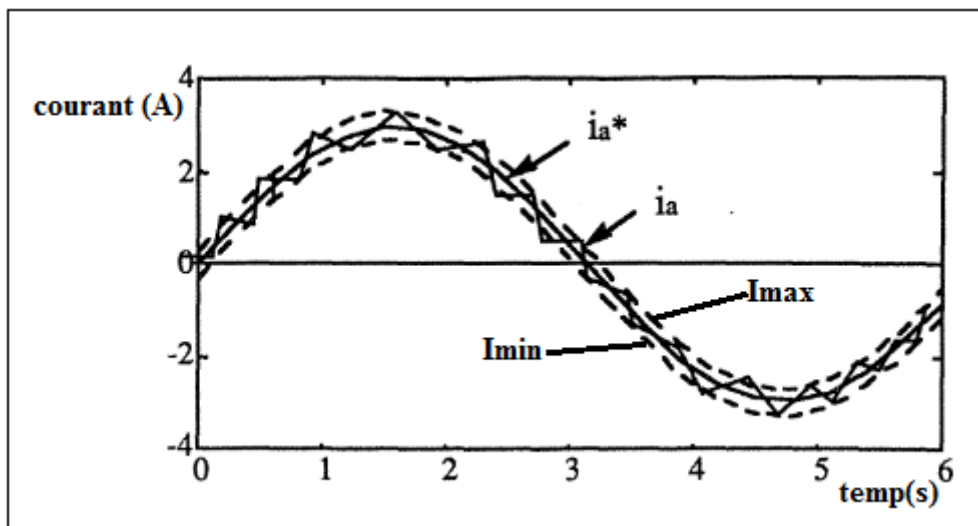


Figure (III.14) : Allure du courant dans le cas de l'alimentation avec des références sinusoïdales [12].

Le principe de contrôle des courants par hystérésis est basé sur la commande des interrupteurs de l'onduleur de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase du moteur soient limitées dans une bande encadrant les références des courants figure (III.14).

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références de courants ; la sortie des comparateurs est reliée à la logique de commande de l'onduleur de manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte de la valeur d'hystérésis de sa référence.

Les références de courant sont rectangulaires dans le cas des moteurs à force électromotrice trapézoïdale ; elles sont de référence sinusoïdale dans le cas des moteurs à force électromoteurs sinusoïdaux.

Dans notre cas, chaque courant de phase est comparé à sa référence sinusoïdale à l'aide d'un comparateur à hystérésis dont la sortie est liée au circuit de commande des interrupteurs.

Les ondulations du courant sont fixées par la valeur de la bande [12].

III.5.1 Les avantages et l'inconvénient de contrôle des courants par hystérésis :

La méthode de contrôle des courants par hystérésis est actuellement la plus utilisée dans l'industrie.

Cette technique est caractérisée par sa rapidité, sa robustesse, sa simplicité de mise au point et elle offre une plage de variation de vitesse à couple constant plus étroite. Elle ne nécessite pas de connaître les valeurs des paramètres internes de la machine, mais présente l'inconvénient d'une variation aléatoire de la fréquence de commutation des interrupteurs suivant les conditions de fonctionnement [12].

III.6 Résultats de simulation de contrôle de courants par hystérésis de l'ensemble machine synchrone_onduleur avec l'autopilotage :

A l'aide de Matlab_Simulink, le schéma bloc global à étudier représenté par la figure (III.15) :

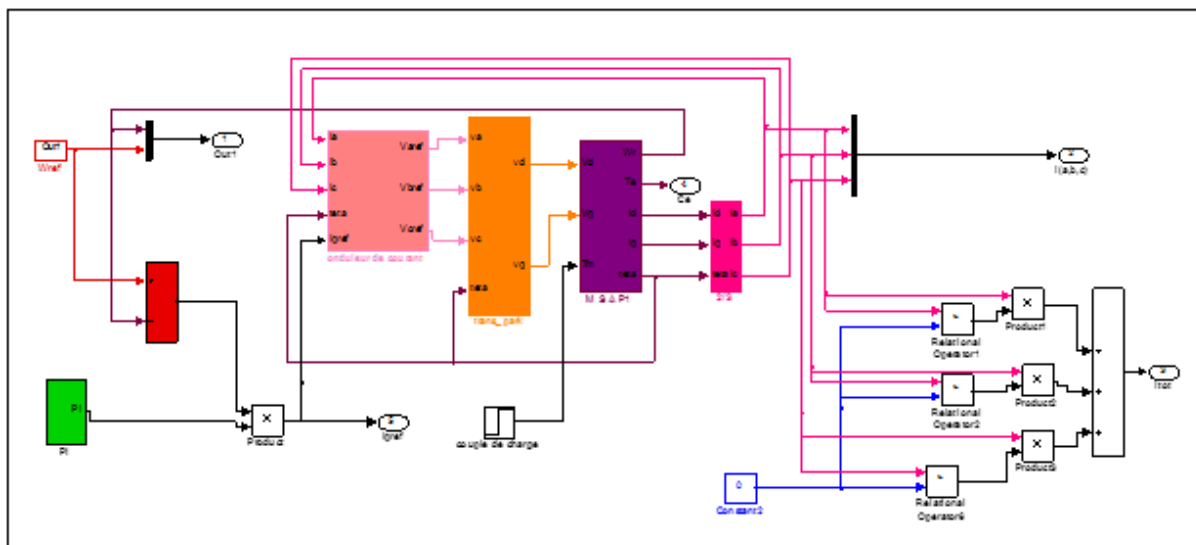


Figure (III.15) : Schéma bloc de contrôle de courant par hystérésis avec autopilotage de l'ensemble Machine_onduleur.

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

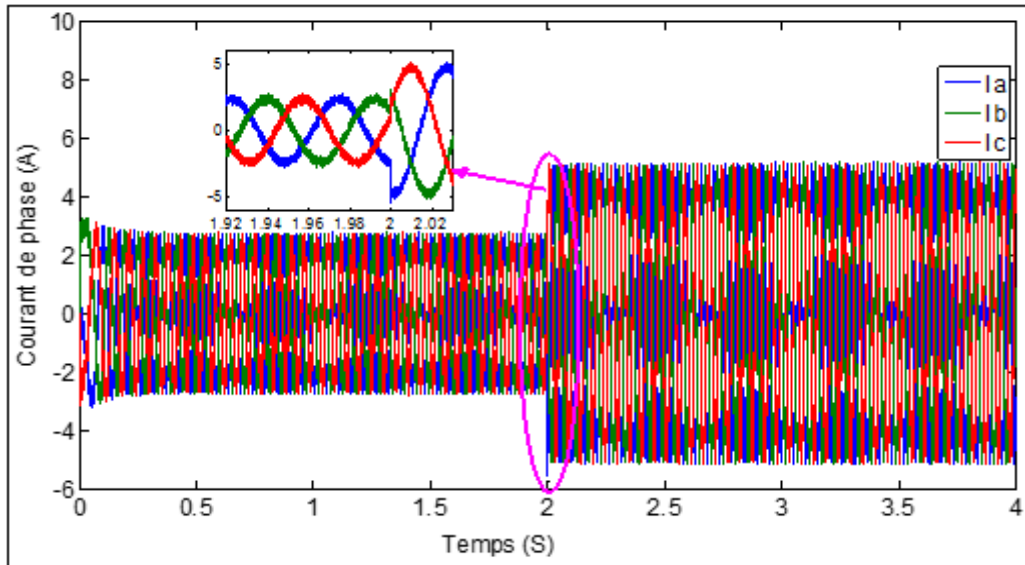


Figure (III.16) : Les courants de phase I_a , I_b , I_c .

Les courants statoriques sont de forme sinusoïdale. On appliquant un couple de charge de 4N.m à 2s on remarque l'augmentation des courants.

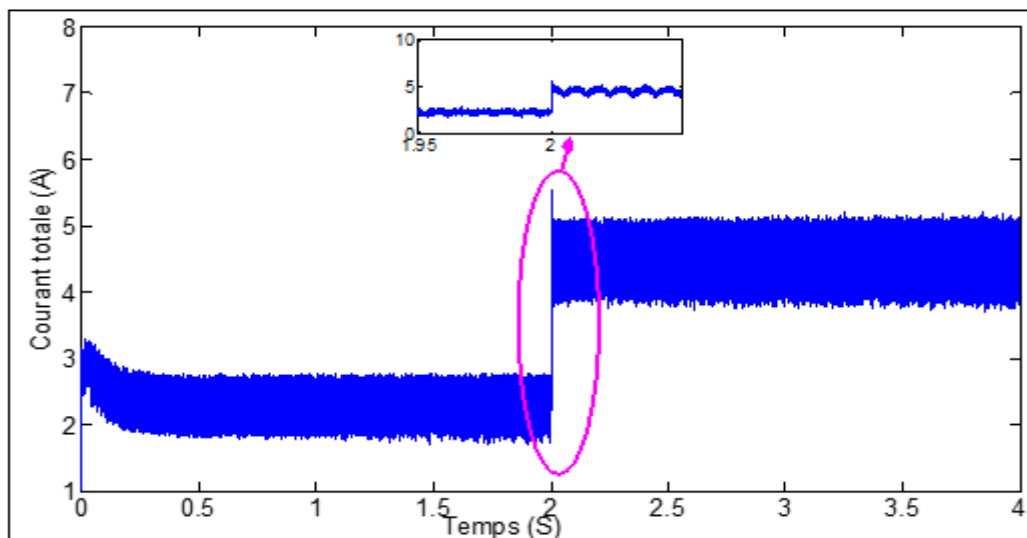


Figure (III.17) : Allure du courant totale.

La valeur du courant totale qui est la somme des courants positive ou négative varie dans une bande, on appliquant un couple de charge de 4N.m à 2s sa valeur augmente.

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

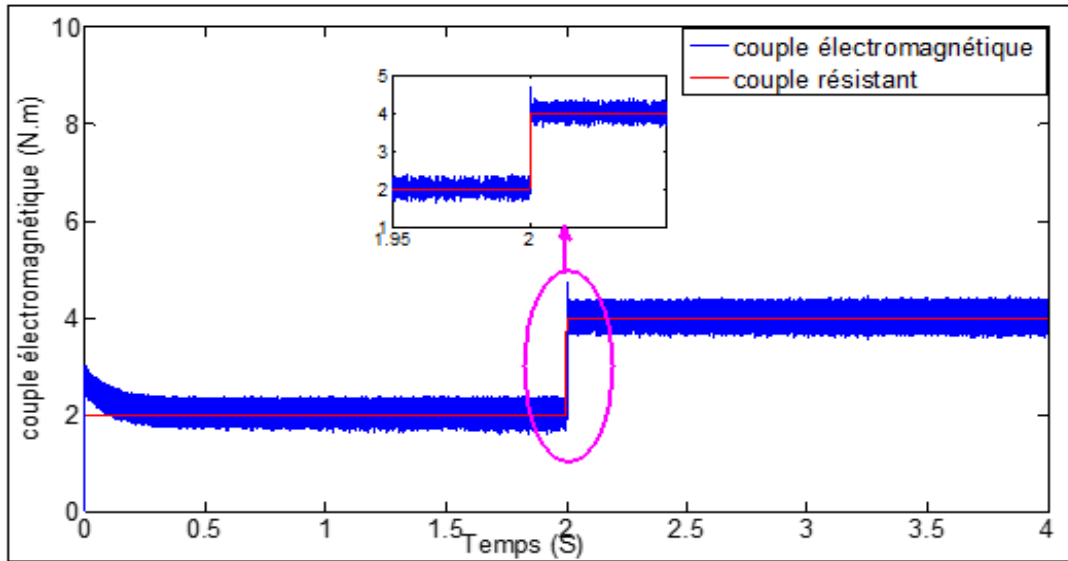


Figure (III.18) : Allure du couple électromagnétique et couple résistant.

Le couple électromagnétique tente de suivre l'allure du couple de charge.

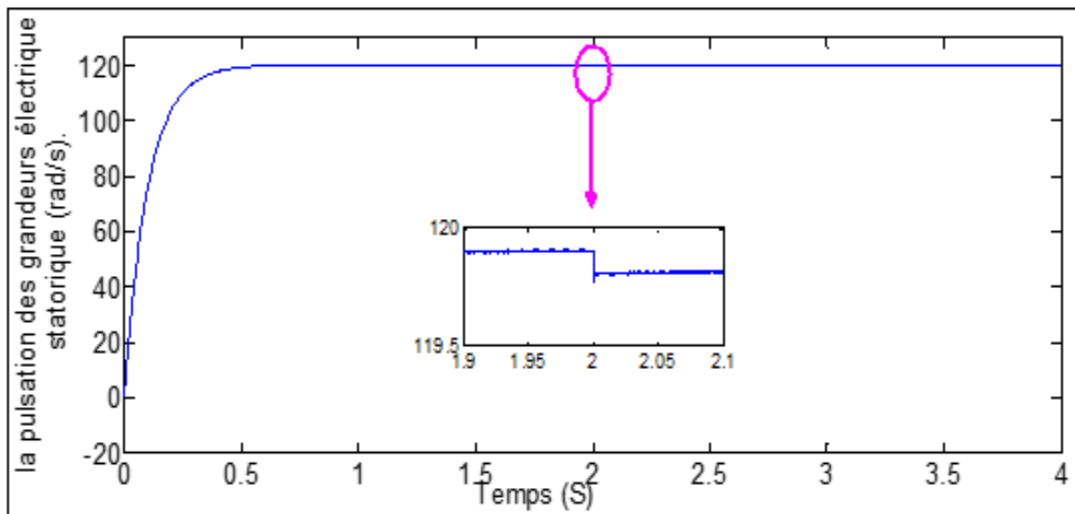


Figure (III.19) : Allure de la pulsation des grandeurs électrique statorique (rad/s).

Chapitre III: Technique de commande appliquée à la machine synchrone à aimants permanents

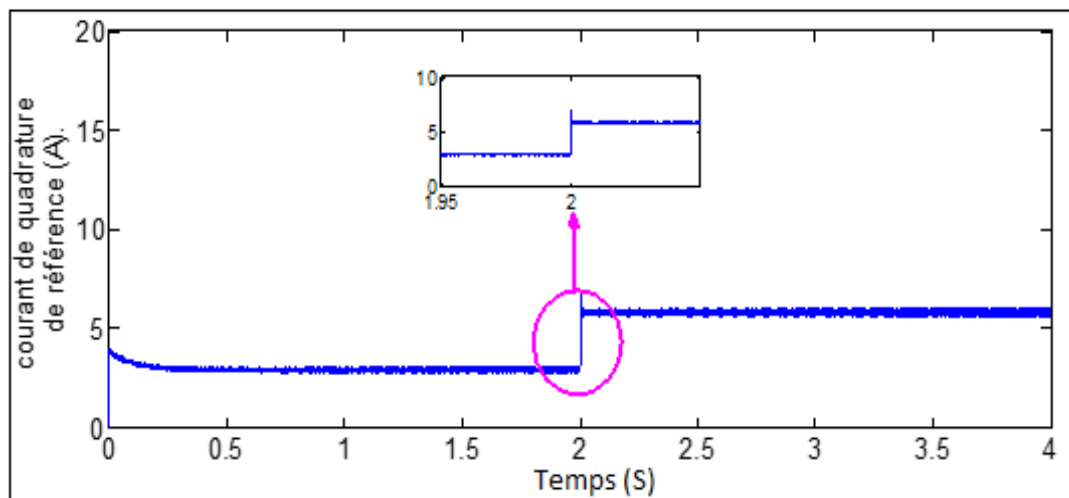


Figure (III.20) : Allure du courant de quadrature de référence.

Le courant de quadrature de référence augmente lorsqu'on applique un couple de charge de 4N.m à 2s.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, après la modélisation de l'ensemble machine_onduleur nous avons élaboré les différentes techniques de commande pour l'autopilotage de machine synchrone. Parmi toutes les techniques, on a spécifié la commande pleine onde ainsi que le contrôle du courant par hystérésis.

La commande pleine onde est la stratégie de commande la plus facile à mettre en œuvre mais elle présente l'inconvénient de la présence des harmoniques.

Le contrôle de courant par hystérésis semble la technique la mieux adaptée pour une commande robuste, car elle ne nécessite pas la connaissance des paramètres électriques de la machine tout comme elle minimise les harmoniques.

A dark blue vertical bar runs along the left edge of the page. At the bottom of this bar, several thin, curved lines in shades of blue and grey extend upwards and outwards, creating an abstract, organic shape.

**Autopilotage de la machine
synchrone à aimants permanents
via la carte dSPACE 1104**

Chapitre IV

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons le banc d'essais que nous avons réalisé ainsi que les résultats expérimentaux faites sur la commande pleine onde (180°) de l'ensemble convertisseur statique (onduleur), machine (MSAP).

Le traitement numérique de la commande et l'acquisition des grandeurs d'entrée et le pilotage des interrupteurs de l'onduleur de tension sont effectués via une carte DSP dSPACE 1104.

Ce banc d'essais nous permet une expérimentation en temps réel de la commande 180° pour l'autopilotage de la MSAP. Les résultats expérimentaux vont être comparé ou résultats théoriques de simulation qui sont présentés dans le chapitre précédant.

IV.2 Présentation générale du banc d'expérimentation :

Le banc d'essais présenté en figure (IV.1) comprend :

1. Un circuit de commande : la carte dSPACE 1104 (6).
2. Un circuit de puissance : onduleur de tension (2), machine synchrone à aimants permanents (4) qui entraîne une génératrice à courants continu (7).
3. Une interface de mesure : capteur de courant (1) et capteur de tension (3).

Le cœur de ce banc est la carte dSPACE 1104, branchée à un micro-ordinateur (5) équipé d'un logiciel de programmation Matlab/Simulink.

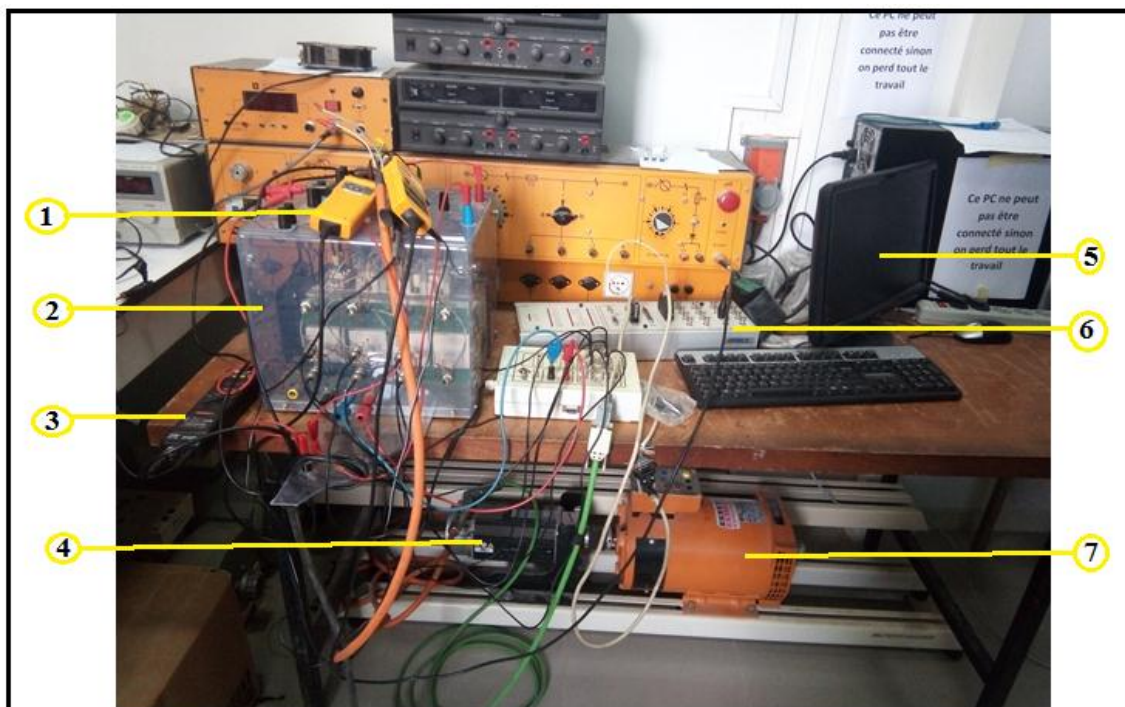


Figure (IV.1) : Banc d'essai expérimental.

IV.3 Circuit de puissance :

Le circuit de puissance contient une source de tension de courant continu E qui vas alimenter l'onduleur de tension triphasée autonome, ce dernier et connecté à un moteur synchrone à aimants permanents couplé à une génératrice à courant continu sachant que cette dernière n'est pas alimentée, donc nos essais seront à vide.

Le capteur de position à six secteurs montés au bout de l'arbre du moteur, il détermine la position du rotor par rapport ou stator.

IV.3.1 Source de tension de courant continue :

Cette source est de type « Sorens » pouvant délivrer une tension allant jusqu'à 400V.



Figure (IV.2) : Source de tension de courant continue.

IV.3.2 Onduleur de tension :

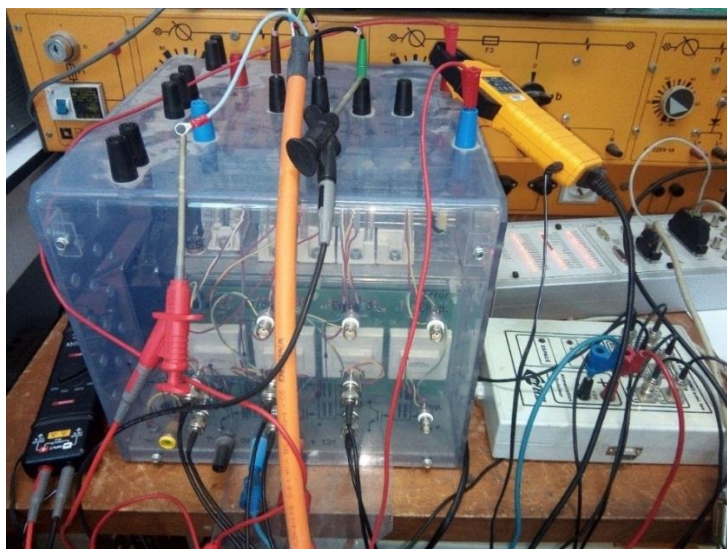


Figure (IV.3) : Onduleur de tension triphasée à deux niveaux.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

IV.3.3 Machine synchrone à aimants permanents associée à une machine à courants continus :

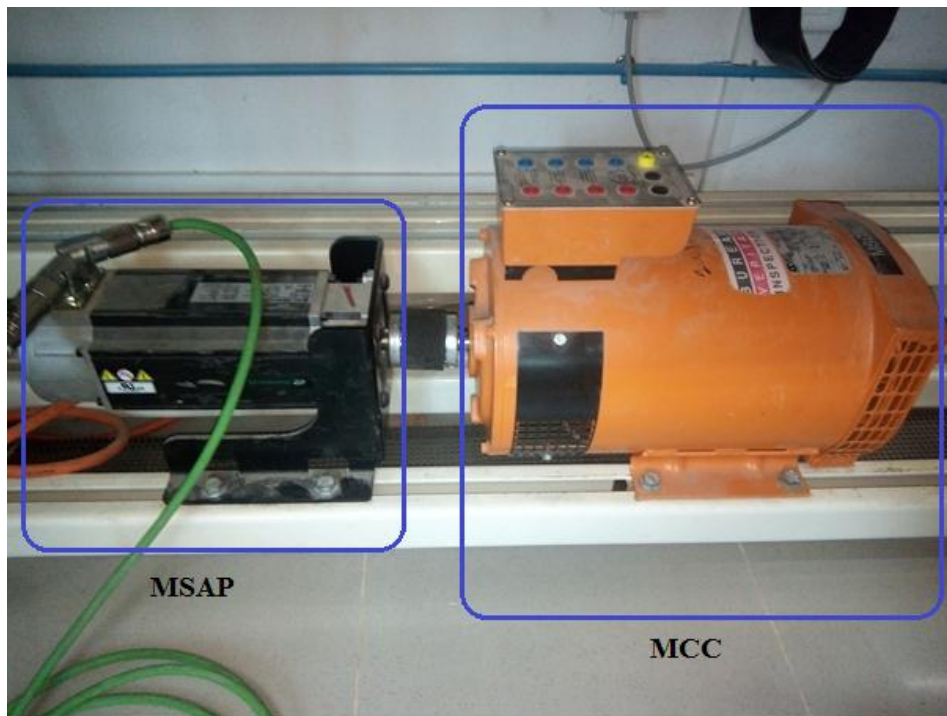


Figure (IV.4) : Moteur synchrone à aimants entraînant une génératrice.

IV.3.4 Capteur de position :

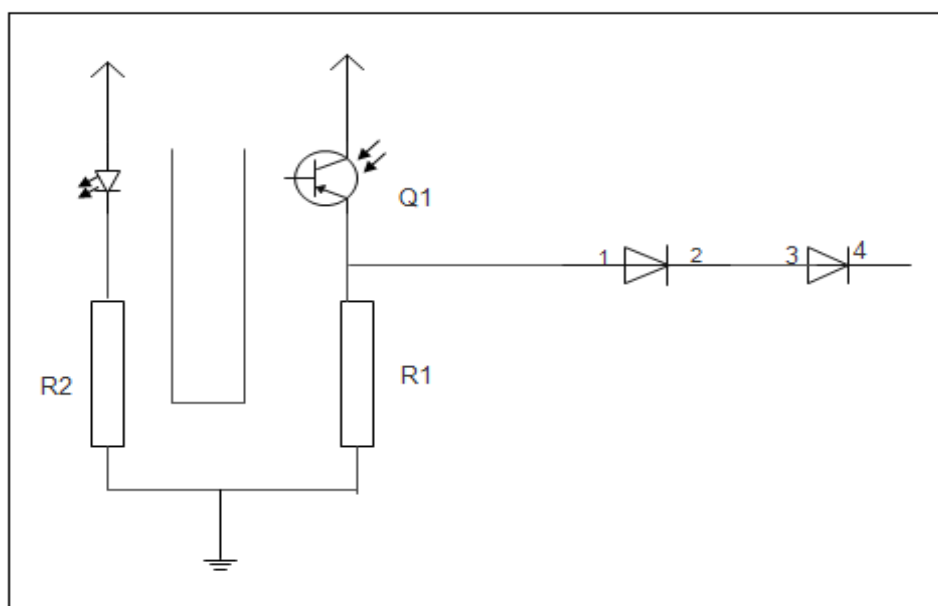


Figure (IV.5) : Circuit de capteur de position.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

Le capteur de position réalisé uniquement dans le cas de moteur synchrone, son objectif pour l'autopilotage c'est d'asservir la vitesse du rotor du moteur synchrone, à la fréquence de commutation de l'onduleur pour obtenir un synchronisme qui assure un fonctionnement stable à une vitesse variable.

Le capteur de position est composé d'un ensemble d'émetteurs / récepteurs photoélectrique et de la moitié d'un disque solidaire au rotor.

L'émetteur composé de 3 LEDs (diode électroluminescente) infrarouge décalées de $\frac{2\pi}{3}$ et le récepteur est constitué par trois photodiode montés en face des émetteurs. Le signal issu de diode est mis en forme grâce à deux inverseurs qui réalisent une bonne amplification. Tout le système électronique est compris dans la boîte du capteur.

Les signaux délivrés par le capteur de position sont de largeur de $\frac{\pi}{2}$ et un décalage de $\frac{2\pi}{3}$ à une fréquence de rotation de l'arbre.

Ces signaux sont envoyés à la carte de commande, qui utilise ces entrées « capture / comparateur » de DSP pour générer des interruptions à chaque changement du secteur [21].

IV.4 Circuit de commande et de traitement :

Le circuit de commande est une carte dSPACE 1104 qui est une interface entre l'ordinateur, le circuit d'attaque et les systèmes de conversion, comprenant des convertisseurs analogique-numérique (A/N) et numérique-analogique (N/A), interface série, capteurs etc.

IV.4.1 Présentation de la dSPACE 1104 :

Développée par la société allemande 'dSPACE', c'est une carte de prototypage rapide de loi de commande, sa puissance de calcul et ses E/S sont primordiales pour les applications.

Utilisée avec le Real-Time Interface (RTI), cette carte est entièrement programmable à partir de l'environnement de Matlab/Simulink.

On peut configurer toutes les E/S graphiquement en utilisant la RTI. C'est une façon simple et rapide d'implémenter les fonctions de commande.

La carte dSPACE 1104, peut être installée pratiquement sur tous les micro-ordinateurs, possédant une prise PCI libre [22].

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

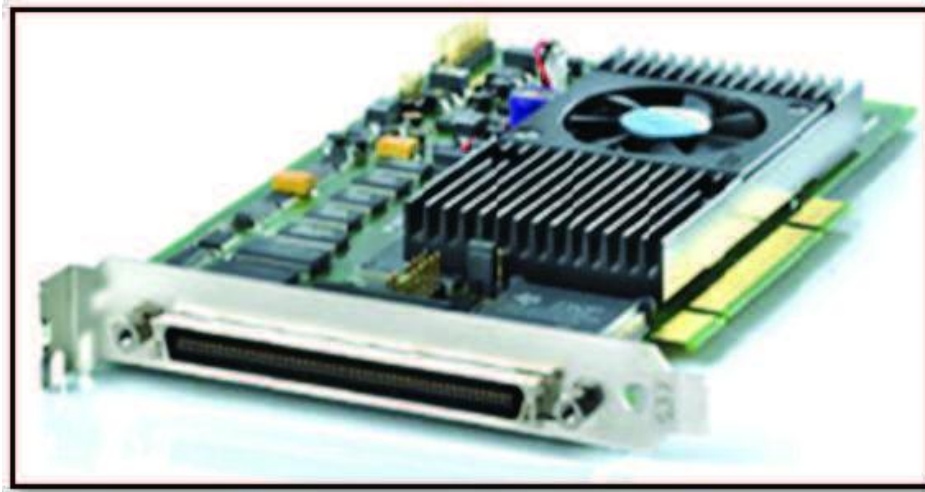


Figure (IV.6) : Carte dSPACE 1104 [22].

La carte est dotée d'un panneau de connexion qui comporte les périphériques des E/S qui permettent la communication avec le système physique. Les figures suivantes montrent les périphériques utilisés pour notre essai expérimental.

- Digital I/O : Interface d'entrées sorties numériques, utilisé pour les langages de programmations figure (IV.7).
- Inc1 : Codeurs permettent la communication avec les capteurs de position figure (IV.7).
- Ornée également d'une quarantaine de lampes LEDs indiquant les portes actives sur le panneau pour notre essai c'est les LEDs 13, 14, 15 comme le montre la figure (IV.8).

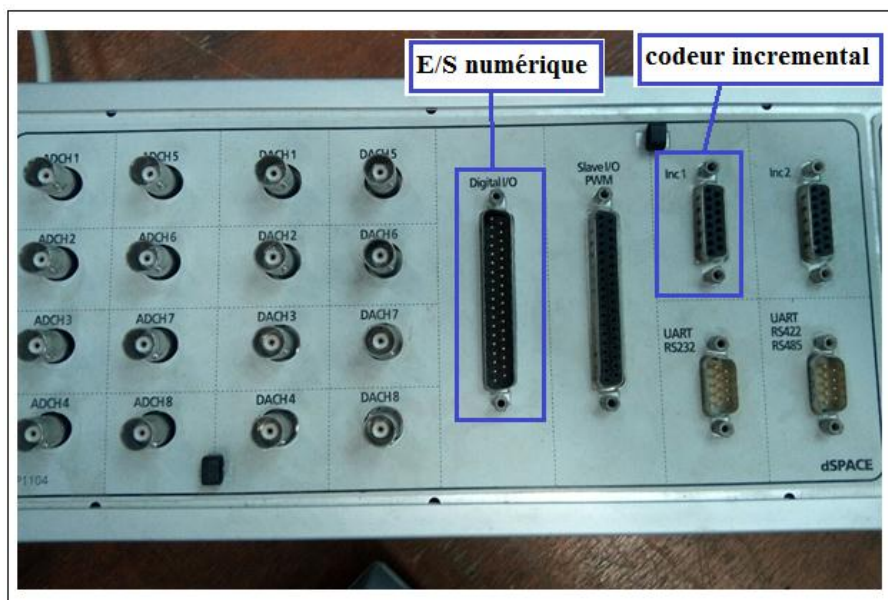


Figure (IV.7) : Panneau de connexion de la dSPACE 1104.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

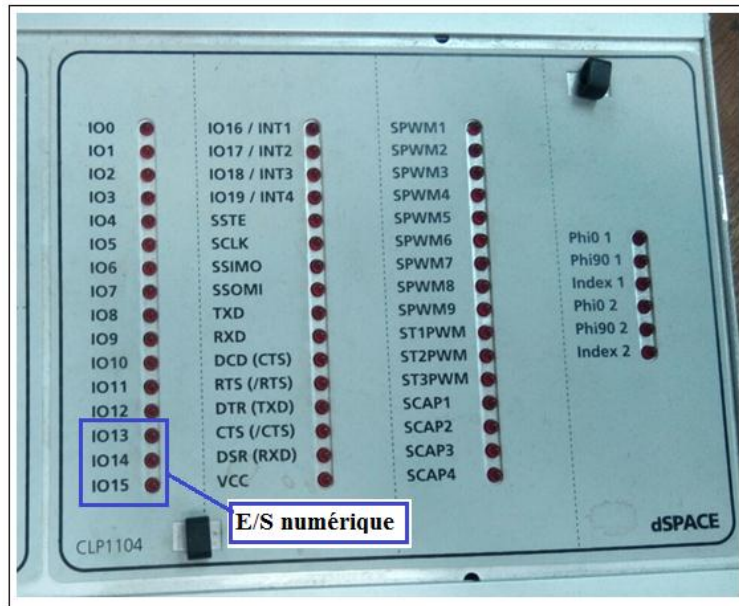


Figure (IV.8) : Les LEDs indiquant les E/S de la dSPACE 1104 utilisées.

IV.4.2 Le développement d'une commande dans un environnement Matlab/Simulink/DS1104 :

Pour un développement d'une commande sur un environnement Matlab / Simulink / DS1104 on doit suivre les procédures suivantes :

1. Le choix de la carte de commande à utiliser. La fenêtre de la sélection s'affiche automatiquement après l'ouverture de Matlab/RTI, pour l'activation de la carte il faudra sélectionner une des cartes disponibles figure (IV.9).

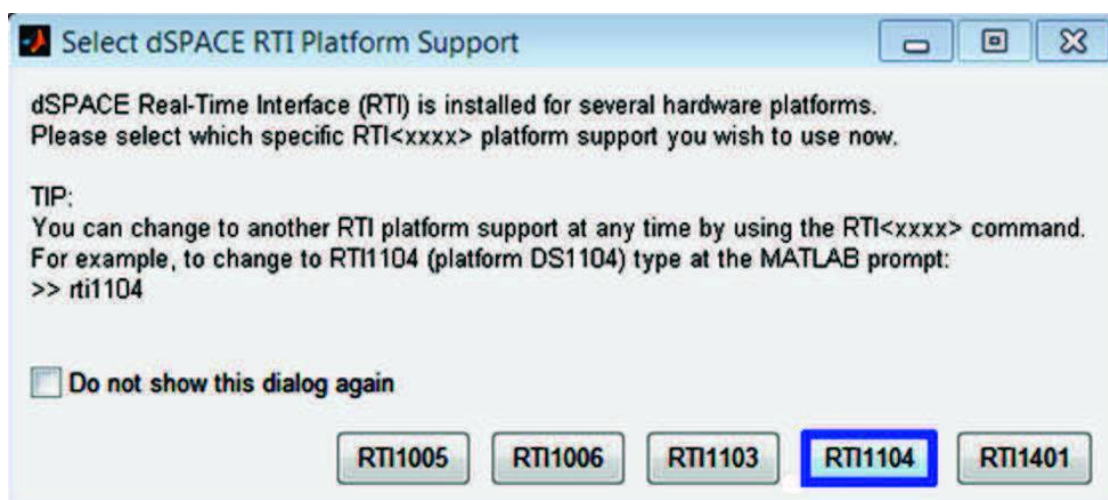


Figure (IV.9) : Support de sélection de la plate-forme dSPACE/RTI.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

2. Construction du système de commande en utilisant les blocs de Simulink pour établir le modèle et produire automatiquement le code C et le télécharger dans la mémoire du DSP. Une librairie supplémentaire (librairie RTI1104) est mise à notre disposition pour l'élaboration du modèle, figure (IV.10).

Avants cela en doit configurer les paramètres sur le solver comme suite :

- Mettre **0.0** dans la case de **Start time**.
- Mettre **inf** dans la case de **Stop time** (Pour que le système soit exécuté continuellement).
- Choisir **fixed step** pour le **Type** et **onde4 (rung-kutta)** pour le **Slave**.
- Prendre **0.0001** pour le **Fixed step size**.

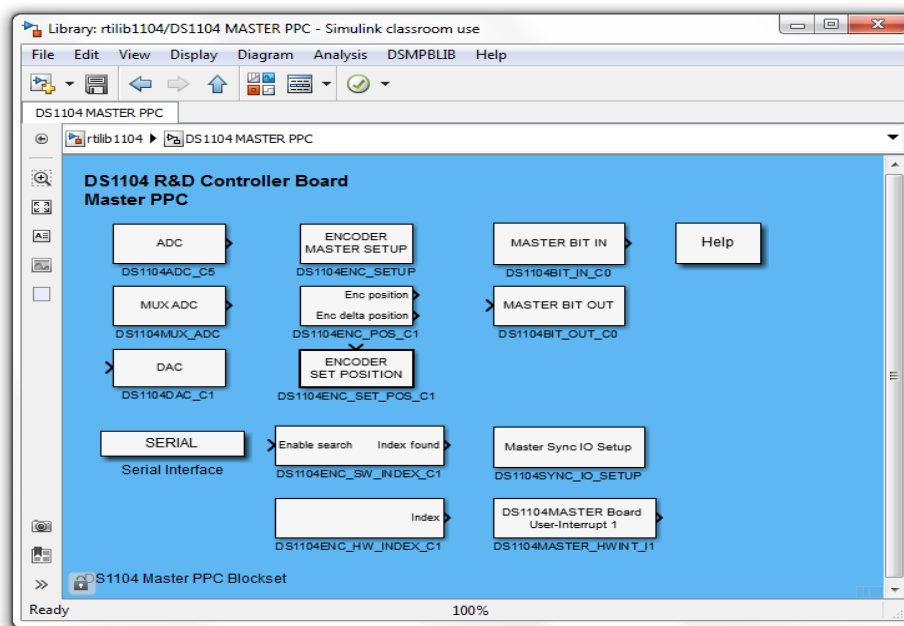


Figure (IV.10) : Sous librairie RTI.

IV.4.3 Réalisation de schéma bloc de la commande sous Matlab/ Simulink/ DS1104

IV.4.3.1 Mesure des deux grandeurs mécaniques caractérisant le mouvement de rotation de l'arbre d'un moteur :

- La position angulaire de l'arbre en rad.
- La vitesse de rotation de l'arbre en tr/min.

L'encodeur est lié mécaniquement à l'arbre du moteur qui l'entraîne et le câble qui fournit les signaux A, B et Z est connecté à la carte.

La mise en marche de l'encodeur est réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink grâce à l'interface temps réel RTI1104 de la carte DS1104.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

Pour élaborer le schéma bloc qui va permettre de traiter les signaux provenant de l'encodeur connecté à la carte (Inc), on ramène de la librairie les blocs suivants :

- ENCODER MASTER SETUP : DS1104ENC_SETUP Figure (IV.11)

Choisir le type 'singel-ended'.

- ENC position/delta position : DS1104ENC_POS_C1/2 Figure (IV.12)

Initialization (initial position value) : de -2097152 à +2097152 (221)

Choisir 'Channel 1 and initial position value = 0'.

- INDEX : DS1104ENC_HW_INDEX_C1/2 Figure (IV.13)

Unit: Channel number 1 or 2.

Paramètres :

Action on index detection (Reset position count): never / once / always

Output after index detection: kipt high / current index

Choisir 'always and current index'.

Dans cette expérience, le bloc 'Index' ne joue aucun rôle à part l'activation de la détection du signale Z d'initialisation. Sa sortie n'est pas exploitée.

Pour l'adaptation des unités des mesures, La carte permet la détection des fronts montants et descendants des signaux A et B.

Par conséquent, nous avons les résultats suivants :

❖ Résolution : 4069

❖ Précision : $\frac{2\pi}{4069} = 0.00157$ rad ou $\frac{360^\circ}{4069} = 0.09^\circ$

Pour avoir une mesure de la position angulaire en *rad* il faut utiliser le gain :

$$K_a = \frac{2\pi}{4069} \quad (\text{IV.1})$$

La mesure de vitesse est obtenue en utilisant le gain :

$$K_s = \frac{2\pi}{4069} * \frac{1}{T_e} \quad (\text{rad/min}) \quad (\text{IV.2})$$

Ou

$$K_s = \frac{60}{4069} * \frac{1}{T_e} \quad (\text{tr/min}) \quad (\text{IV.3})$$

T_e : période d'échantillonnage (la valeur choisie dans cet atelier est $T_e = 1\text{ms}$).

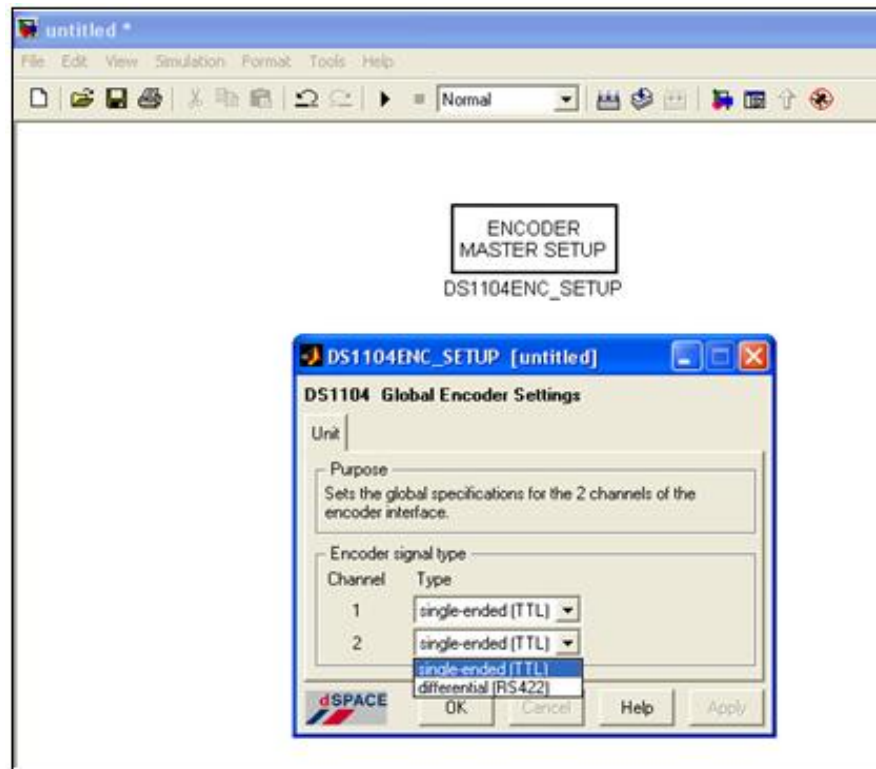


Figure (IV.11) : Réglage nécessaire pour DS1104ENC_SETUP.

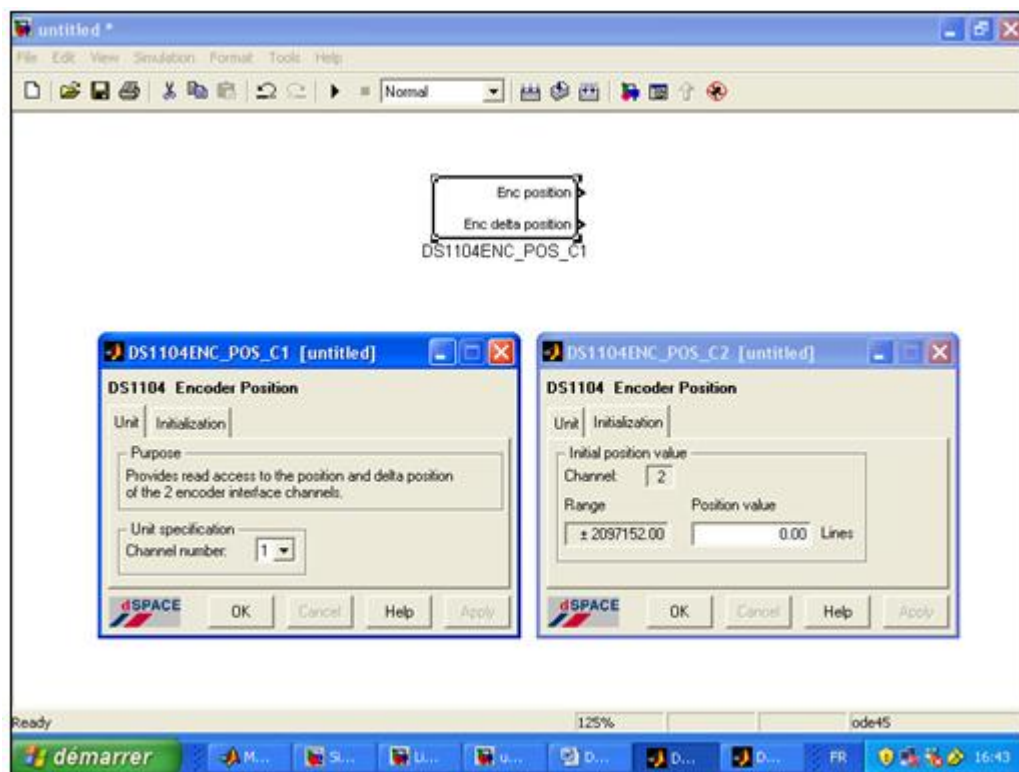


Figure (IV.12) : Réglage de DS1104ENC_POS_C1.

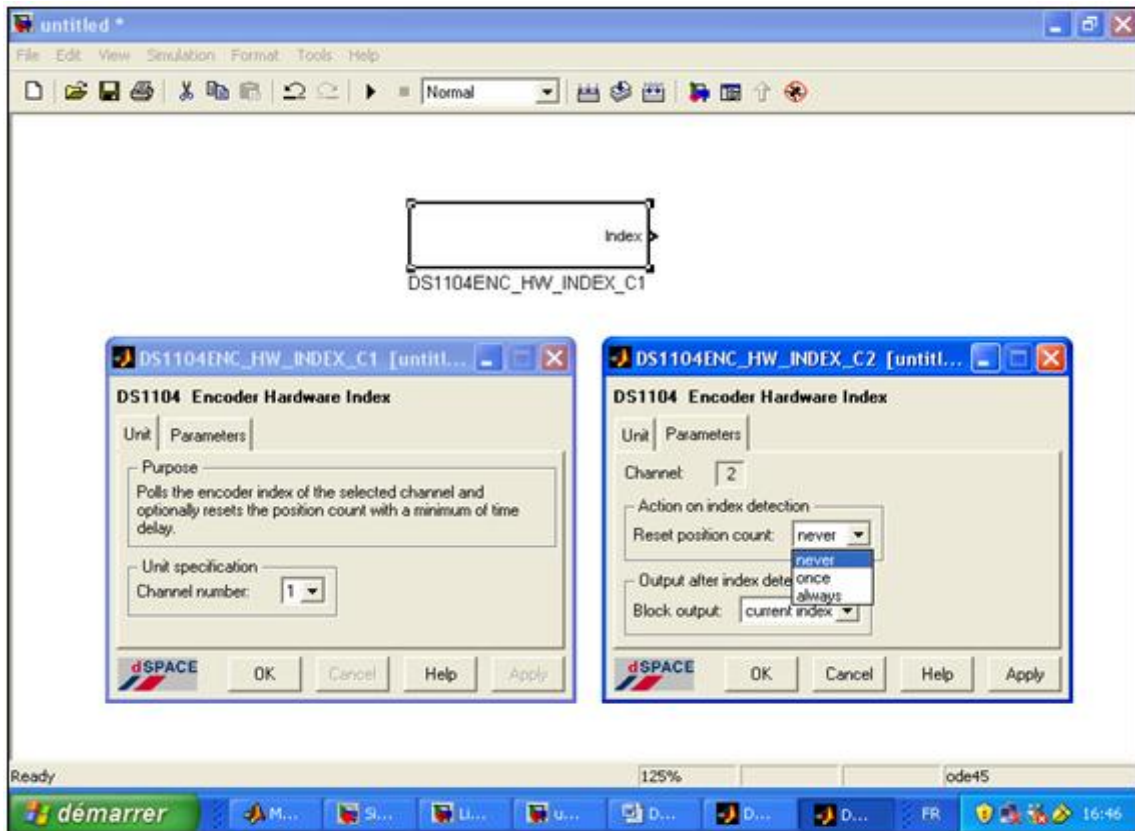


Figure (IV.13) : Réglage de DS1104ENC_HW_INDEX_C1.

IV.4.3.2 Visualisation du courant pour l'étalonnage :

- ADC : DS1104_ADC_C6 figure (IV.14)
Unit : Channel number 6. Pour avoir des signaux il faudra multiplier par un gain de 10.

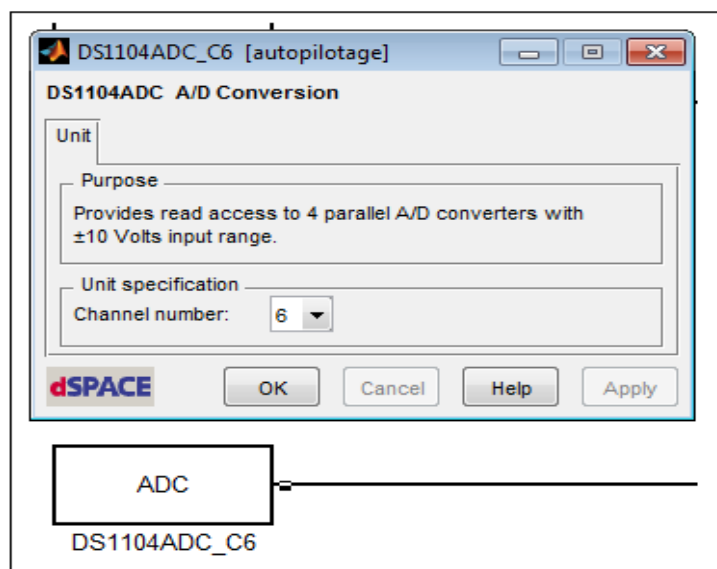


Figure (IV.14) : Réglage des paramètres de DS1104ADC_C6.

IV.4.3.3 Commande pleine onde :

Pour élaborer la commande 180° on utilise les blocs suivants :

- MASTER BIT IN: DS1104BIT_IN_C13. Figure (IV.15)
Unit: Channel number 13.
- MASTER BIT IN: DS1104BIT_IN_C14.
Unit: Channel number 14.
- MASTER BIT IN: DS1104BIT_IN_C15.
Unit: Channel number 15.
- NOT: logical operator. Figure (IV.12)
- MASTER BIT OUT: DS1104BIT_OUT_C0. Figure (IV.16)
Unit: Channel number 0.
- MASTER BIT OUT: DS1104BIT_OUT_C1. figure (IV.17)
Unit: Channel number 1.
- MASTER BIT OUT: DS1104BIT_OUT_C2.
Unit: Channel number 2.

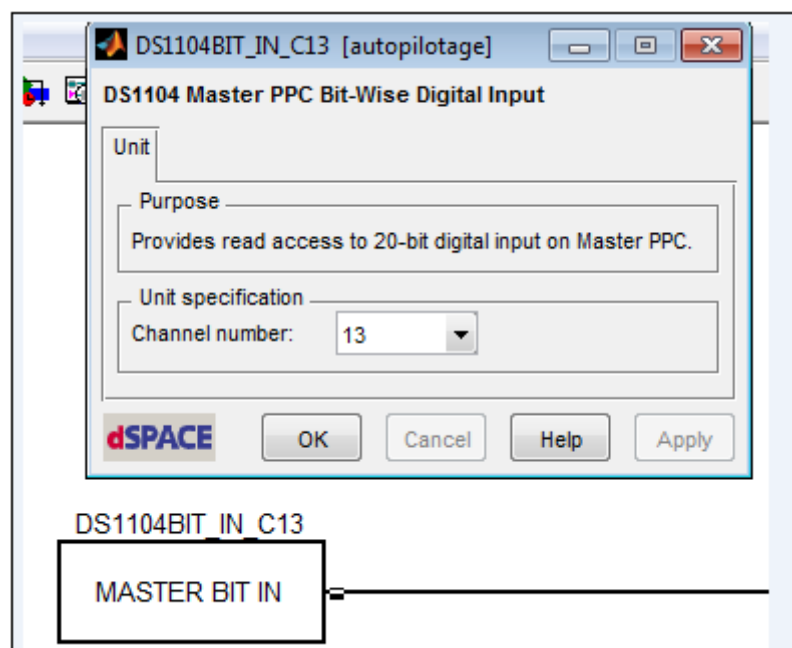


Figure (IV.15) : Réglage des paramètres de DS1104BIT_IN.

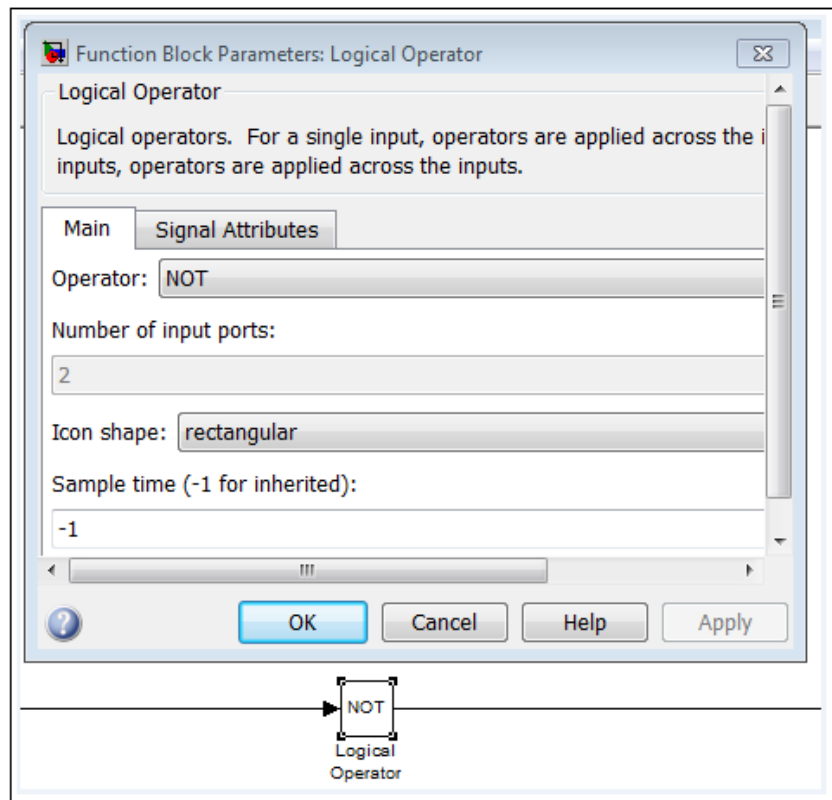


Figure (IV.16) : Réglage des paramètres de logical operator.

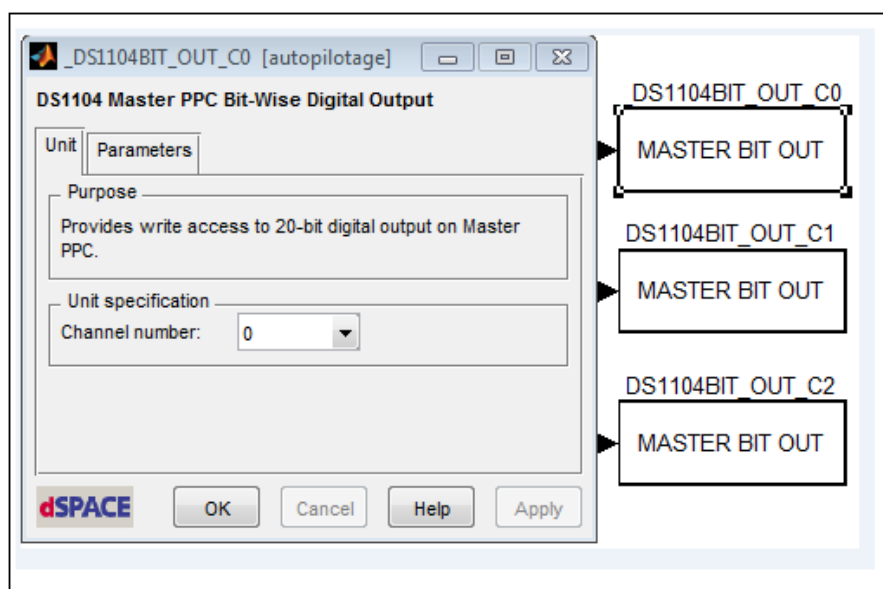


Figure (IV.17) : Réglage des paramètres de DS1104BIT_OUT.

Chapitre IV : Autopilotage de la machine synchrone à aimants permanents via la carte dSPACE 1104

IV.5. Interface de mesure :

IV.5.1 Le contrôle Desk :

C'est le logiciel d'expérimentation qui permet de construire aisément une interface graphique. Ainsi il donne la possibilité de visualiser en temps réel les grandeurs physiques mesurées et de voir leurs comportements.

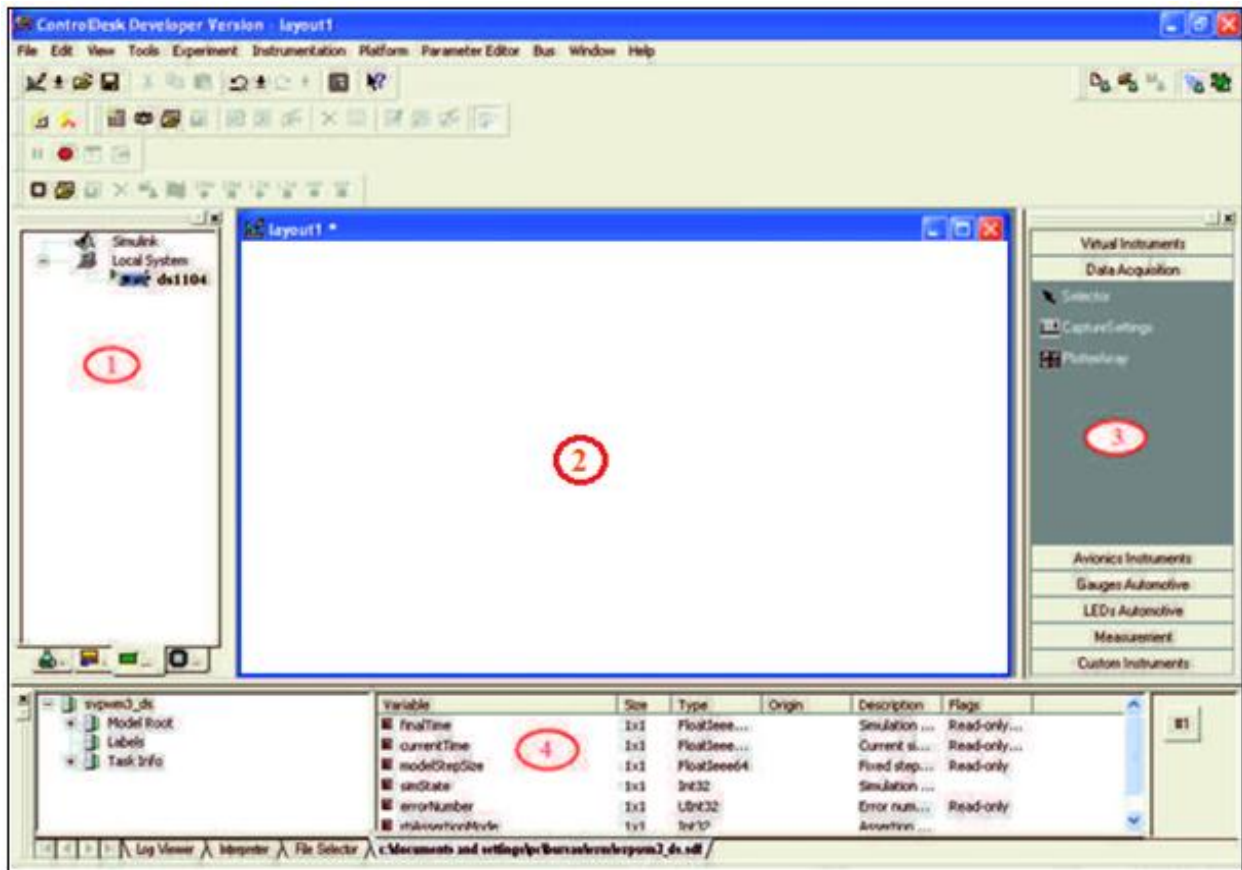


Figure (IV.18) : Interface du logiciel Control Desk.

Les différentes fenêtres rencontrées sur Control Desk sont :

- (1) La fenêtre de navigation (Navigator).
- (2) L'air de travail contenant la layout.
- (3) Le choix d'instrument (instrument selector).
- (4) La fenêtre d'outils (toolwindow) : Elle permet de charger les différentes variables à partir du bloc réalisé sous Matlab/Simulink.

IV.5.2 Capteur de courant à effet hall :

L'étalonnage est réalisé à l'aide de deux capteurs de courant à effet hall, un est connecté à la dSPACE 1104 par le canal 6 l'autre et connecter à l'appareil de mesure (l'oscilloscope).



Figure (IV.19) : Capteur à effet hall.

IV.5.3 Capteur de tension :

Ce capteur figure (IV.20) va nous permettre de visualiser les tensions simple et composée à la sortie de l'onduleur.



Figure (IV.20) : Capteur de tension.

IV.6 Présentation des résultats pratiques :

Dans cette partie, on a effectué deux essais : un essai avec tension continue de 63V et l'autre avec une tension continue de 105V.

IV.6.1 Résultats obtenus pour une tension continue de 63V :

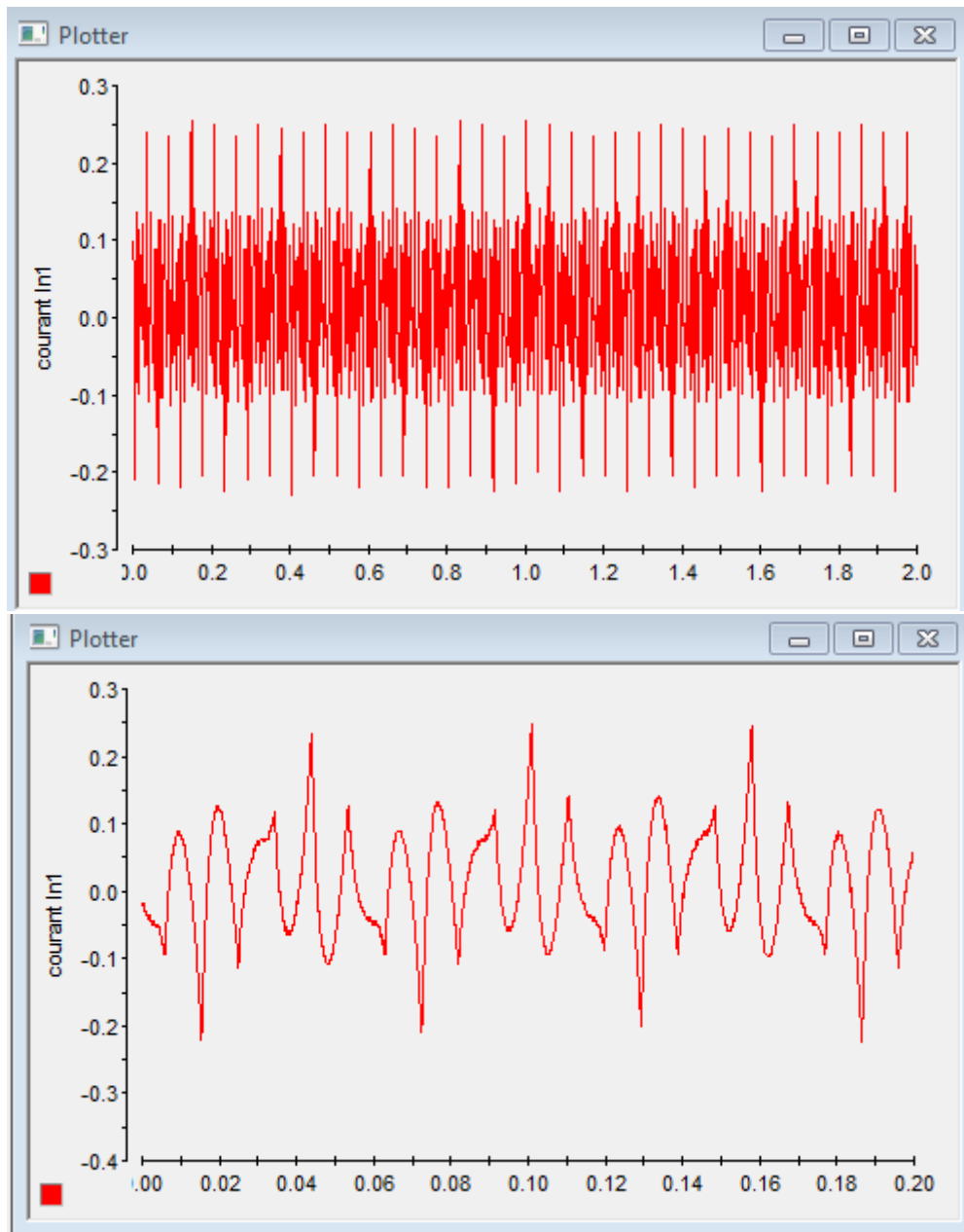


Figure (IV.21) : Courant de phase I_a .

On remarque que l'allure du courant d'une phase I_a est de forme sinusoïdale mais avec quelque oscillation.

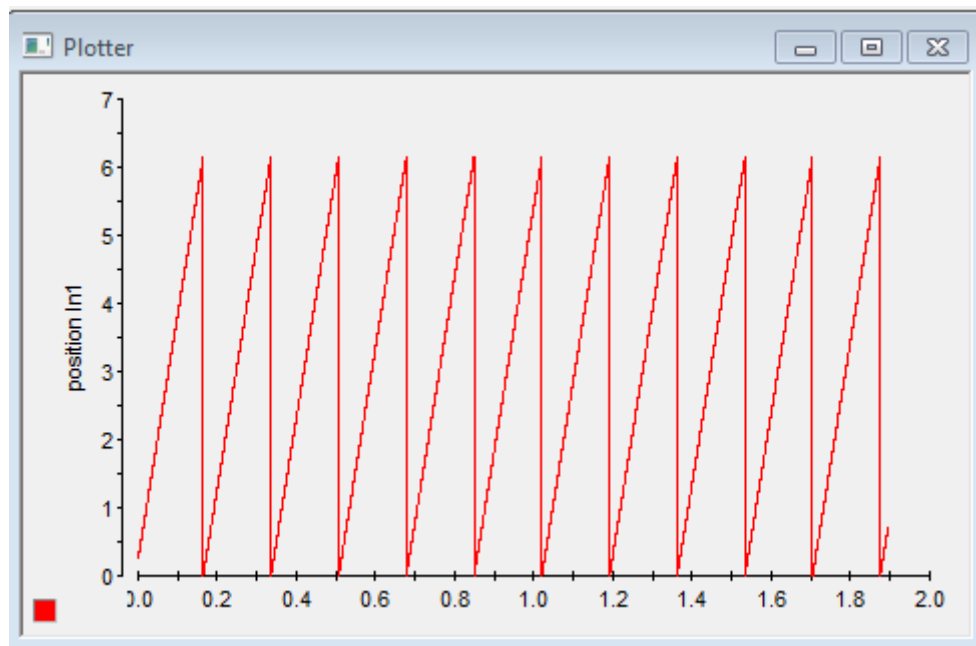


Figure (IV.22) : Position angulaire du rotor.

L'allure de la position angulaire du rotor est la même que celle de la simulation des deux techniques de commande.

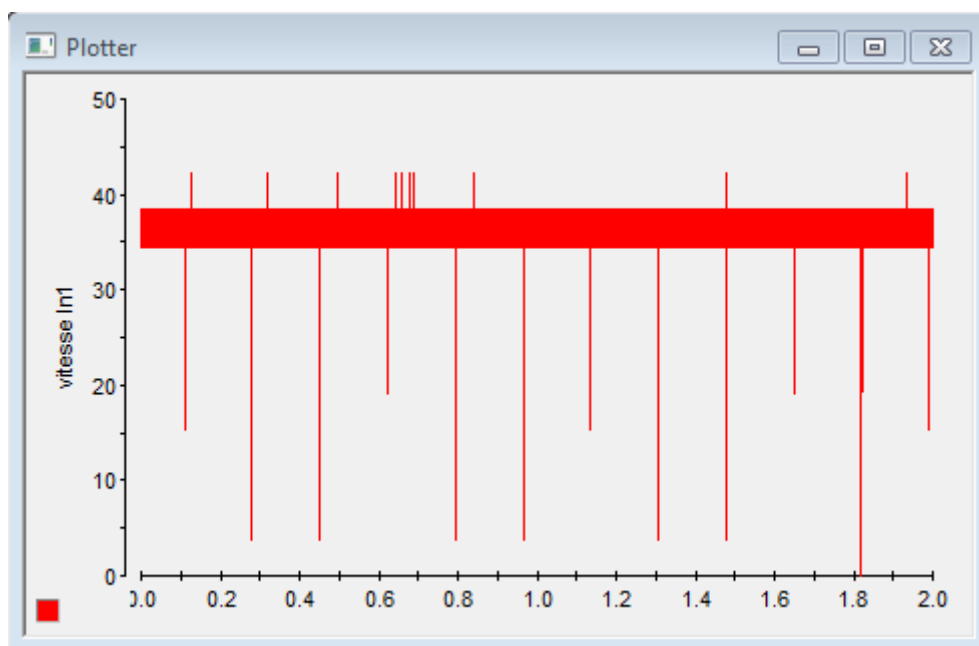


Figure (IV.23) : La vitesse de rotation de l'arbre de rotor.

On remarque que la vitesse de rotation de l'arbre de rotor est presque constante elle est ou alentour de 40tr/min.

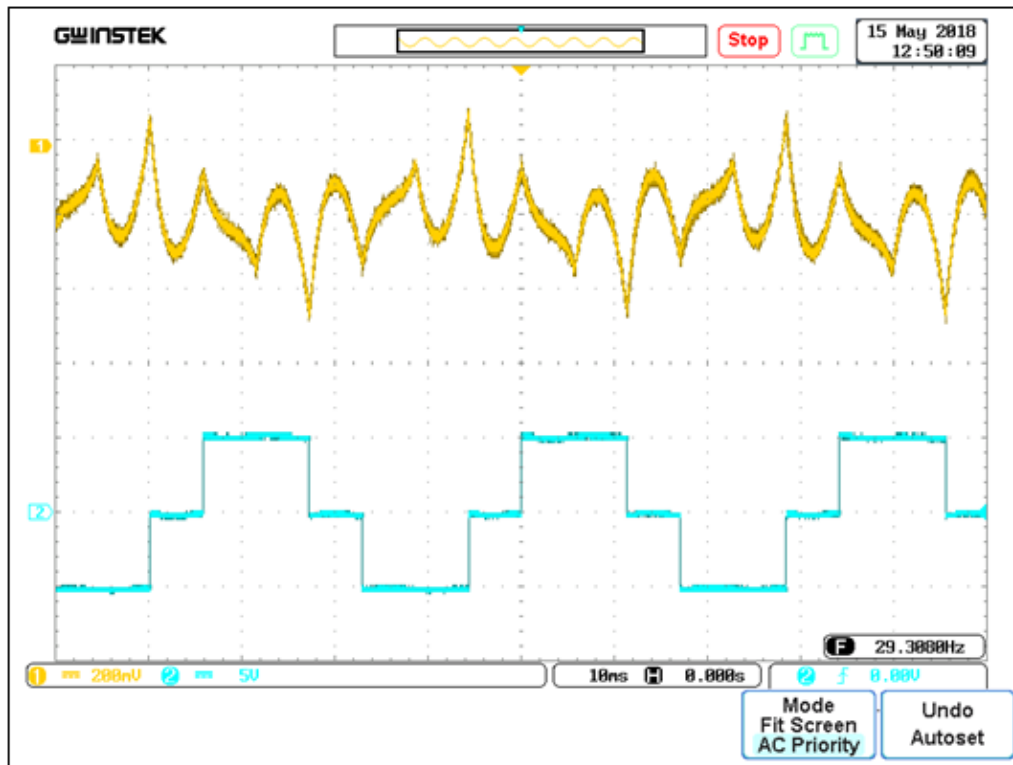


Figure (IV.24) : Courant de phase I_a et tension composée U_{ab} à la sortie de l'onduleur.

L'allure du courant d'une phase statorique visualisé par un oscilloscope et le même que celui obtenu par contrôle desk.

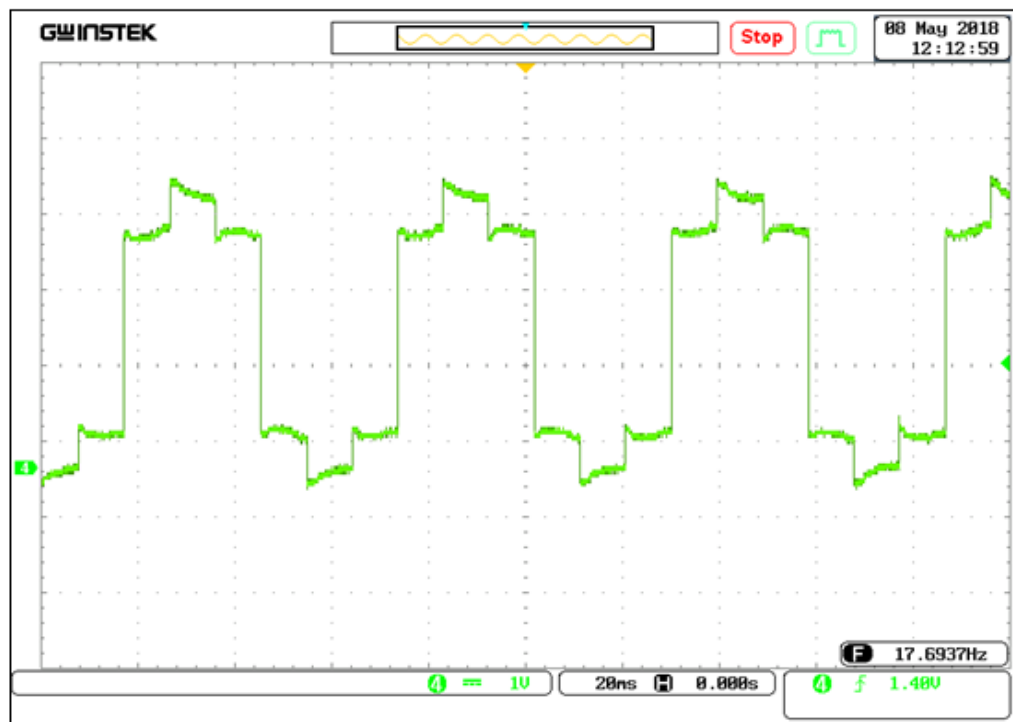


Figure (IV.25) : Tension simple U_{an} à la sortie de l'onduleur.

IV.6.2 Pour une tension d'alimentation continue de 105V :

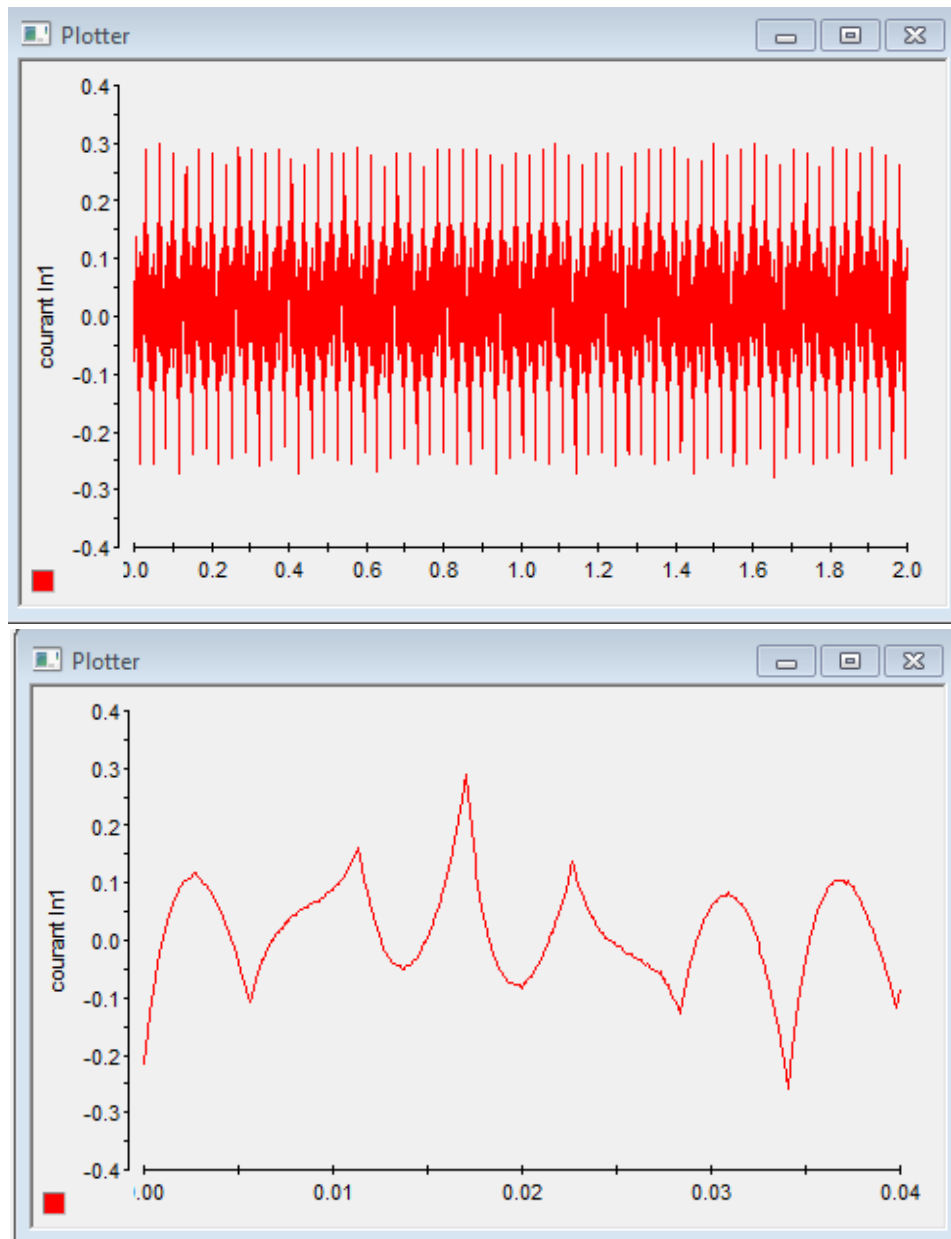


Figure (IV.26) : Courant de phase I_a .

On augmentant la tension continu de l'alimentation l'allure du courant d'une phase statorique et la même elle change uniquement en amplitude.

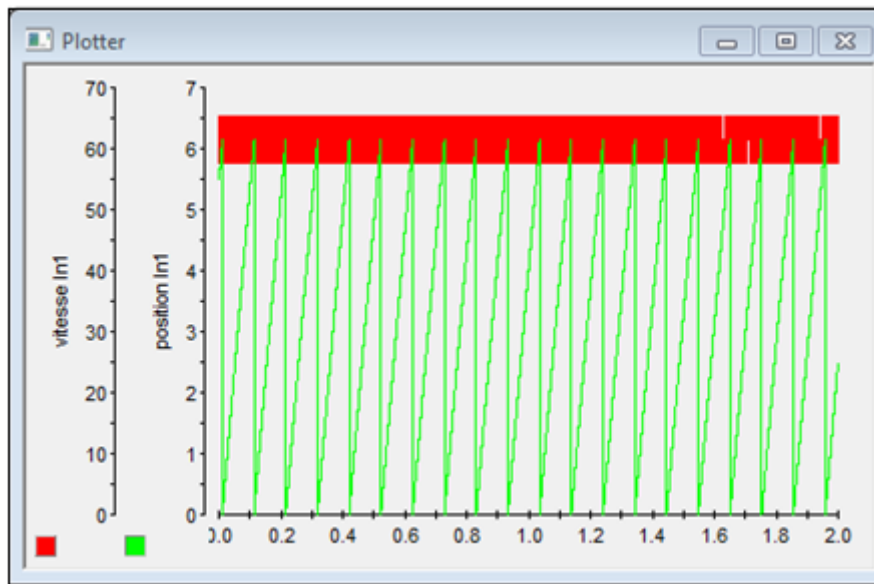


Figure (IV.27) : La vitesse de rotation et la position angulaire de l'arbre de rotor.

L'allure de la position angulaire est la même que celle du premier essai.

La vitesse de rotation de l'arbre de rotor elle augmente ou alentour de 70tr/min parce que la tension continue d'alimentation a augmenté par rapport au premier essai.

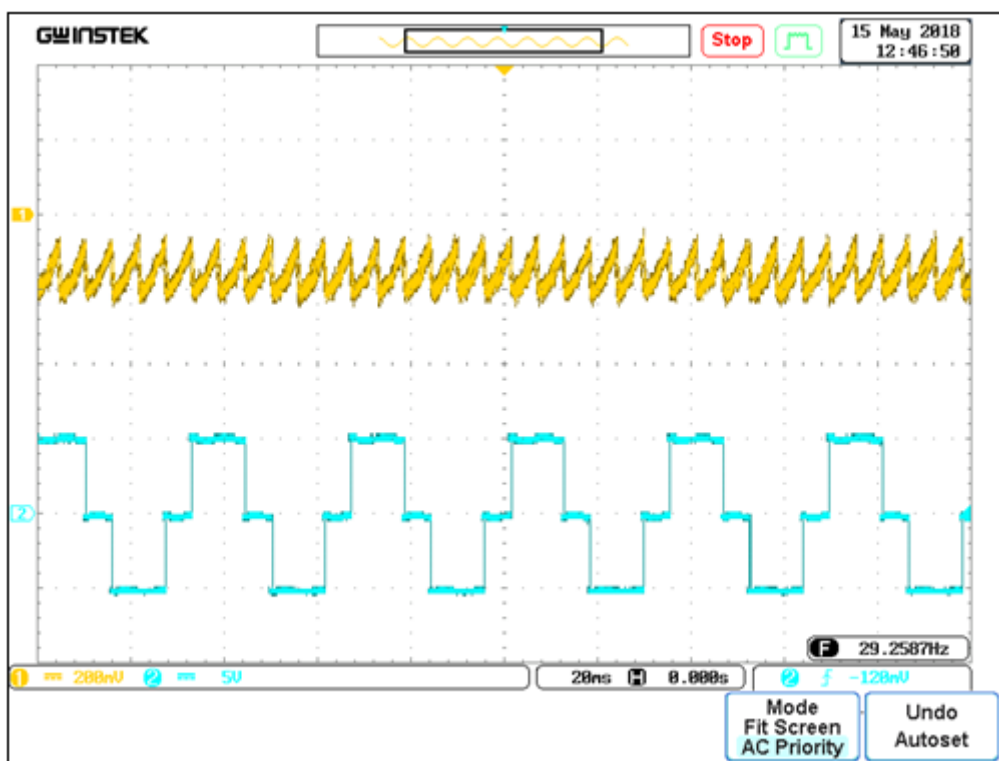


Figure (IV.28) : Courant de phase I_a et tension composée U_{ab} à la sortie de l'onduleur.

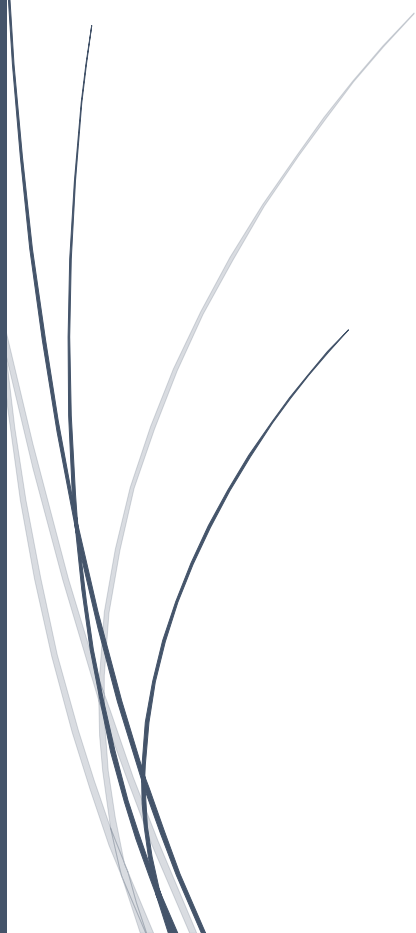
IV.7 Conclusion :

Les résultats de l'implémentation de la commande pleine onde ne font que confirmer les résultats de la simulation présentés dans le chapitre précédant et par conséquent la validation du modèle de notre commande.

En effet les allures des tensions simples et composés captées pendant l'implémentation sont similaires à celles captées durant la simulation.

L'utilisation d'une carte dSPACE 1104 permet de donner une grande souplesse de commande de notre machine synchrone à aimants permanents.

Conclusion Générale



CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une contribution à l'étude de l'association des machines électriques et les convertisseurs statiques.

Dans le premier chapitre, on a présenté les différentes machines à courant alternatif, et la meilleure adaptée pour l'autopilotage, de ce fait notre choix c'est posé sur la machine synchrone à aimants permanents.

Dans le second chapitre, on a décrit le modèle de la machine synchrone, où on a présenté les modèles mathématiques utilisés par l'adaptation de la transformation de Park afin de modéliser la MSAP associée à un onduleur de tension dans le but d'une linéarisation de l'ensemble.

Dans le troisième chapitre, après une étude théorique de l'ensemble machine_onduleur et leur modélisation, afin de réaliser l'autopilotage pour la variation de vitesse, on a choisi la commande pleine onde comme technique de commande de l'onduleur.

En second lieu on a présenté la technique de contrôle de courant par hystérésis où les essais effectués vérifient le bon fonctionnement du dispositif de commande. Toutefois, on a noté la simplicité et la facilité de son élaboration avec l'inconvénient d'une variation aléatoire de la fréquence de commutation des interrupteurs suivant les conditions de fonctionnement.

Des résultats de simulation ont été présentés à l'aide de Matlab/Simulink. Ces résultats obtenus vérifient le bon fonctionnement du système global et assurent que la variation de vitesse a bien été effectuée.

Finalement, un banc expérimental pratique a été effectué dans le but de valider les résultats de simulation théorique. Les résultats ont été présentés à l'aide de Matlab/Simulink/Control Desk dSPACE1104.

En conclusion, les résultats expérimentaux confirment les prévisions théoriques obtenues par simulations.

Comme perspective, on envisage la réalisation de l'implémentation de la commande par hystérésis en boucle fermée.

Annexe A

A-1 moteur synchrone :

Plaque signalétique	Paramètres électriques et mécaniques
Machine synchrone triphasée sans amortisseurs	$f=3.8818 \cdot 10^{-4} \text{Nm/rad/s}$
Tension 380V	$L_d=0.0058 \text{ H}$
Puissance nominal 1.82 Kw	$L_q=0.0066 \text{ H}$
Couple nominal 8.7 N.m	$J=0.00176 \text{Nm/rad/s}^2$
Résolution 4069	$\Psi =0.0.1546 \text{ web}$

Capteur de courant :

Le capteur choisi est de type 'transformateur de courant' il permet une mesure de courant dont la forme d'onde comporte des harmonique de rang élevé. Ce type de capteur utilise un transformateur, un générateur à effet hall et un amplificateur à grand gain figure (IV.22).

Son principe consiste à détecter le champ produit par un enroulement primaire traversé par le courant à mesurer et à compenser ce champ jusqu'à l'annuler par un courant traversant un enroulement secondaire [20].

. Ce courant de compensation est alors une image du courant à mesurer et isolé galvaniquement de celui-ci :

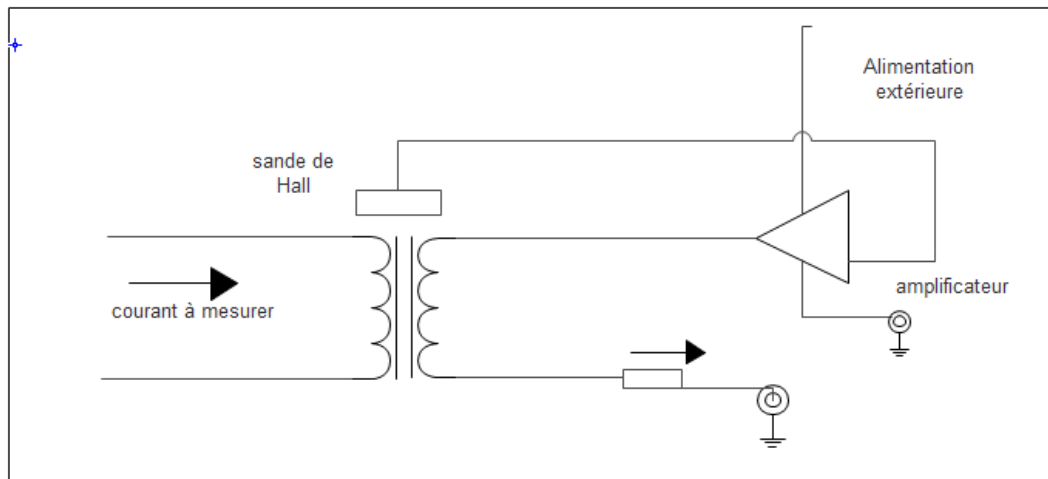


Figure (IV.25) : principe du capteur de courant [20].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

[1] : [HACHEMI KADOUR « étude de la machine synchrone autopilotée : modélisation et simulation » Thèse de Doctorat, spécialité électrotechnique, l'université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, juillet 2012].

[2] : [CHOUGH NOREDDINE, « étude de la robustesse des contrôleurs flous d'une machine synchrone à aimants permanents avec pilotage vectoriel » mémoire de magister en électrotechnique, université de M'Sila, 2011].

[3] : [Y. DIAF, DJ. BEN ANTER « modélisation et commande d'un onduleur triphasé pilote par MLI a structure multiniveaux » mémoire de magister en électrotechnique industriel à l'Université de Kasdi Merbah-Ouargla, 2011/2012].

[4] : [<http://tpe-tlm-sfa-bam.e-monsite.com/pages/anexe-notion-de-cours/b-le-moteur-synchrone.html>].

[5] : [RADOUANE BOUSSEKSOU « modélisation analytique des machines asynchrone application au diagnostic » mémoire de magister en électrotechnique, à l'Université Mentouri Constantine, 2007].

[6] : [M. ALLOUACH, N. ANNOUN « étude et analyse de fonctionnement de TGBT cogénération CEVITAL » mémoire de fin de cycle en électrotechnique, à l'université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017].

[7] : [RABIA LAKHDA « Modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage » mémoire de magister en électrotechnique industrielle, université Kasdi Merbah Ouargla, 08/06/2015].

[8] : [BOUCHAHED ADEL « amélioration de la gamme de vitesse du moteur synchrone a vitesse variable » mémoire de magister en électromécanique, université Badji Mokhtar-Annaba, 2009].

[9] : [NORDDINE BOUNASLA, « commande par mode de glissement supérieur de la machine synchrone à aimants permanents » mémoire de magister en électrotechnique, commande électrique, université de Ferhat Abbas Sétif, 2014].

[10] : [SEDDAR MOUSSA, « commande CBP-AIA d'un MSAP alimenté par un onduleur à commande SVM » mémoire de master en génie électrique université de Bejaia].

[11] : [http://www.fltsi.fr/tsi/archives_14_15/tsi/tsi2/Cours%20et%20TD%20par%20centres_d'interet_TSI2/CI22_Machines_alternatives_et_leur_controle/Cours%20M%20Synchrone/CI22%20Machine%20synchrone%20%2Bvectoriel.pdf].

[12] : [TOUFIK RIKIOUA, « contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents » thèse doctorat à l'I.N.P.L en génie électrique, institut national polytechnique de lorraine, 1991].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[13] : [DALILA SATOR-NAMANE, « machines à courants alternatifs, machines asynchrones et machines synchrones, convertisseurs électromécaniques » livre chargée de cours écoles national polytechnique d'Alger, ellipses].

[14] : [AGV Performance et modularité, Fiche technique de l'AGV sur le site internet Alstom Transport, juin 2007].

[15] : [ZEGHOUDI SOUHILA, « commande par passivité de la machine synchrone à aimants permanents » mémoire de magister en électrotechnique, université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2014/2015].

[16] : [DAMIEN BIDART, « commande coopérative des systèmes mono convertisseurs multi machines synchrones », thèse doctorat en génie électrique, délivré par l'institut national polytechnique de Toulouse, 1 juin 2011].

[17] : [<https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-moteur-asynchrone-principe-de-fonctionnement> 200].

[18] : [BERREZZEK FARID, « étude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à un machine asynchrone » mémoire de magister en électrotechnique, option commande des machines électriques, université d'Annaba, 2006].

[19] : [<https://fr.scribd.com/doc/117692869/Chpitre-II-onduleur-triphas>].

[20] : [OUARI KAMEL, « commande robuste de la vitesse des machines électrique alimentées par convertisseurs statiques » mémoire de magister en électrotechnique, option machine électrique, université de Bejaia].

[21] : [BRAHIM METIDJI, « contrôle direct du couple (DTC) des machines à courant alternatif avec minimisation des ondulations du couple par carte DSP » mémoire de magister en électrotechnique, option commande électrique, université de Bejaia].

[22] : [L. BENYOUB, H ADRAR, « Contrôle Direct Du Couple D'une Machine Asynchrone En Utilisant La Carte DSPACE 1104 » mémoire de magister en électrotechnique, option commande électrique, université de Bejaia].