



UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE DÉPARTEMENT DE
GÉNIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présentés par :

ADRAR Walid

GUENDOUZ Walid

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option :

Commandes Électriques

Thème

RÉGULATION EN COURANT D'UN ONDULEUR DE TENSION

Encadré par :

Pr. REKIOUA Toufik

Membres du jury :

Président : **TARAFT Saci.**

Examineur : **OUARI Kamel.**

Remerciements

Le travail de ce mémoire à été réalisé au *laboratoire de Technologie Industrielle et de l'information*(LTII) de l'université de Béjaia sous la direction du professeur **REKIOUA Toufik**.

Nous tenons particulièrement à remercier le professeur **REKIOUA Toufik**, pour nous avoir encadrés et nous avoir transmis ses compétences théoriques et surtout pratiques tout au long de notre travail au sein du laboratoire(LTII).

Un grand merci pour **MEBARKI Nasser-eddine** doctorant à l'Université Abderrahmane Mira pour son aide tout au long de notre travail au laboratoire.

Nous tenons à remercier **TAIB Nabil** maitre de conférence classe A à l'Université de Béjaia pour l'aide et les discussions que nous avons eues.

Nous tenons à remercier aussi **AZIL Abdelghani, ZIANE Djamal**, pour leurs aides.

Nous tenons à remercier le professeur **REKIOUA Djamila** pour son aide et sa contribution qui ont fait avancer nos travaux dans le bon sens.

Nous tenons à remercier **TAZERART Farid** maitre de conférence classe B à l'Université de Béjaia pour ces conseils et son aide.

Nous tenons à remercier **OUBELAID Adel** doctorant à l'université de Béjaia pour son aide et ces conseils.

Nous tenons à remercier le président des jurys d'avoir accepté de présider la soutenance.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Que tous nos enseignants trouvent notre profonde reconnaissance pour leur contribution à notre formation.

Nous tenons à remercier nos parents pour tout ce qu'ils ont fait et leurs sacrifices, pour que nous devenions ce que nous sommes aujourd'hui.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de ma chère maman

À mon père et mes frères et sœurs,

À les deux petites Waris et Razan

À tous mes amis (es) et tous ce qui me sont chers.

À toutes personnes qui m'ont encouragé et aidé tout au long de mes études.

Walid.G

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents,

A mon frère et ma sœur,

A toutes personnes qui m'ont encouragé et aidé tout au long de mes études.

Walid.A

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil

1.1 Introduction.....2

1.2 Définition.....2

1.3 Constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....2

1.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....3

1.5 Le glissement.....3

1.6 Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....4

1.7 Techniques de variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....5

1.7.1 Entraînement à tension variable et fréquence fixe.....5

1.7.2 Entraînements à tension et fréquence variable.....6

1.8 Techniques de régulation du courant dans le cas d'un onduleur de tension.....7

1.8.1 Contrôle du courant par hystérésis.....7

1.8.1.1 Cas d'une alimentation sinusoïdale.....8

1.8.2 Contrôle des courants par M.L.I.....9

1.8.2.1 M.L.I à échantillonnage naturel.....9

1.8.2.2 M.L.I symétrique.....10

1.9 Conclusion.....10

Chapitre 2 : Modélisation et simulation du moteur asynchrone alimentée par onduleur de tension

2.1 Introduction.....11

2.2 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	11
2.2.1 Hypothèses de travail.....	11
2.2.2 Équations aux tensions.....	12
2.2.3 Équation mécanique.....	12
2.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	13
2.5 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone.....	14
2.5.1 Équations des tensions.....	14
2.5.2 Équations du flux.....	14
2.5.3 Choix du référentiel.....	14
2.6 Onduleur de tension et de courant.....	15
2.6.1 Onduleurs de tension.....	15
2.6.2 Onduleur de courant.....	15
2.7 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension.....	16
2.8 Modélisation de l'onduleur de tension.....	16
2.9 La commande pleine onde (commande 180°).....	17
2.9.1 Principe.....	17
2.9.2 Tableau logique de la commande pleine onde (180°).....	18
2.10 Résultat de la simulation.....	19
2.10.1 Schéma bloc de simulation.....	19
2.10.2 Résultats de simulation de la commande 180°.....	19
2.10.3 Interprétation des résultats obtenue avec la commande 180°.....	22
2.11 Résultats de simulation de la commande M.L.I.....	23
2.11.1 Schéma bloc de la simulation.....	23

2.11.2 Interprétation des résultats obtenus avec la commande M.L.I.....26

2.12 Conclusion.....27

Chapitre 3 : Commande par hystérésis d'un moteur asynchrone à cage alimentée par onduleur de tension

3.1 Introduction.....28

3.2 Description du système global.....28

3.3 Commande du courant total.....28

3.4 Principe de fonctionnement du régulateur de courant.....31

3.5 Résultats de simulation numériques.....33

3.5.1 Résultats de simulation avec régulation d'hystérésis.....34

3.5.2 Interprétation des résultats.....37

3.6 Résultats de simulation avec la commande M.L.I.....37

3.6.1 Schéma bloc de simulation sous l'environnement Simulink.....37

3.6.2 Interprétation des résultats.....40

3.7 Conclusion.....41

Chapitre 4 : Réalisation pratique de la carte de commande

4.1 Introduction.....42

4.2 Le circuit de commande.....42

4.3 Commande logique de l'onduleur.....43

4.3.1 Commande 180°.....43

4.3.2 Le circuit de commande logique (commande 180°).....44

Table des matières

4.3.2.1 Le timer NE555.....	44
4.3.2.2 Le Compteur diviseur.....	44
4.4 Régulateur à hystérésis.....	46
4.5 Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	51
Annexe A.....	53

Nomenclature

N_s : Vitesse de synchronisme en [tr/min].

f : Fréquence d'alimentation en [Hz].

P : Nombre de paire de pôles de la machine asynchrone.

g : Glissement.

Ω_s : Vitesse angulaire du champ tournant en [rad/s].

ω : pulsation de l'alimentation des enroulements statorique en [rad/s].

N_r : Vitesse du rotor en [tr/min].

Ω_r : Vitesse angulaire du rotor en [rad/s].

R_s : Résistance d'un enroulement statorique en [Ω].

L_m : Inductance magnétisante en [H].

I_s : Courant du stator en [A].

I_m : Courant magnétisant en [A].

L_f : inductance de fuite ramenée au stator en [H].

R_r : Résistance d'un enroulement rotorique en [Ω].

C_{em} : Couple électromagnétique de la machine asynchrone en [N.m].

V_1 : La valeur efficace des tensions statoriques en [V].

α : Angle du retard à l'amorçage en [degré].

n : L'amplitude du fondamental.

F_m : Fréquence de la modulatrice en [Hz].

F_p : Fréquence de la porteuse en [Hz].

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Tensions d'alimentation respectivement des phases a_s, b_s, c_s en [V].

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : Courants statoriques respectivement des phases a_s, b_s, c_s en [A].

I_{ar}, I_{br}, I_{cr} : Courants statoriques respectivement des phases a_r, b_r, c_r en [A].

$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$: Les flux statoriques en [W_b].

$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$: Les flux rotoriques en [W_b].

θ : Angle électrique entre a_s et a_r .

J : Moment d'inertie en [$K_g.m^2$].

Nomenclature

\mathbf{K}_f : Coefficient de frottement visqueux en $[\text{N.m.s}^2]$.

\mathbf{V}_1 : Tension d'alimentation en $[\text{V}]$.

\mathbf{r}_1 : La résistance pour une phase statorique en $[\Omega]$.

\mathbf{r}_2 : La résistance pour une phase rotorique en $[\Omega]$.

\mathbf{X}_2 : La réactance totale rotorique ramenée au stator en $[\Omega]$.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Fig. 1.1 : Stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	3
Fig. 1.2 : Rotor d'une machine à cage d'écureuil.....	3
Fig. 1.3 : Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	4
Fig. 1.4 : Variation de la vitesse du moteur asynchrone par réglage de la tension d'alimentation.....	6
Fig. 1.5 : Caractéristique couple-vitesse d'un moteur asynchrone à cage pour différentes valeurs de la tension statorique ($V1 > V2 > V3 > V4 > V5$).....	6
Fig. 1.6 : Caractéristiques couple/vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation.....	7
Fig. 1.7 : Allure du courant dans le cas d'alimentation avec des références sinusoïdales.....	8
Fig. 1.8 : Contrôle des courants sinusoïdaux par hystérésis.....	8
Fig. 1.9 : M.L.I à échantillonnage naturel (triangulo-sinusoïdal).....	9
Fig. 1.10 : M.L.I symétrique.....	10

Chapitre 2 :

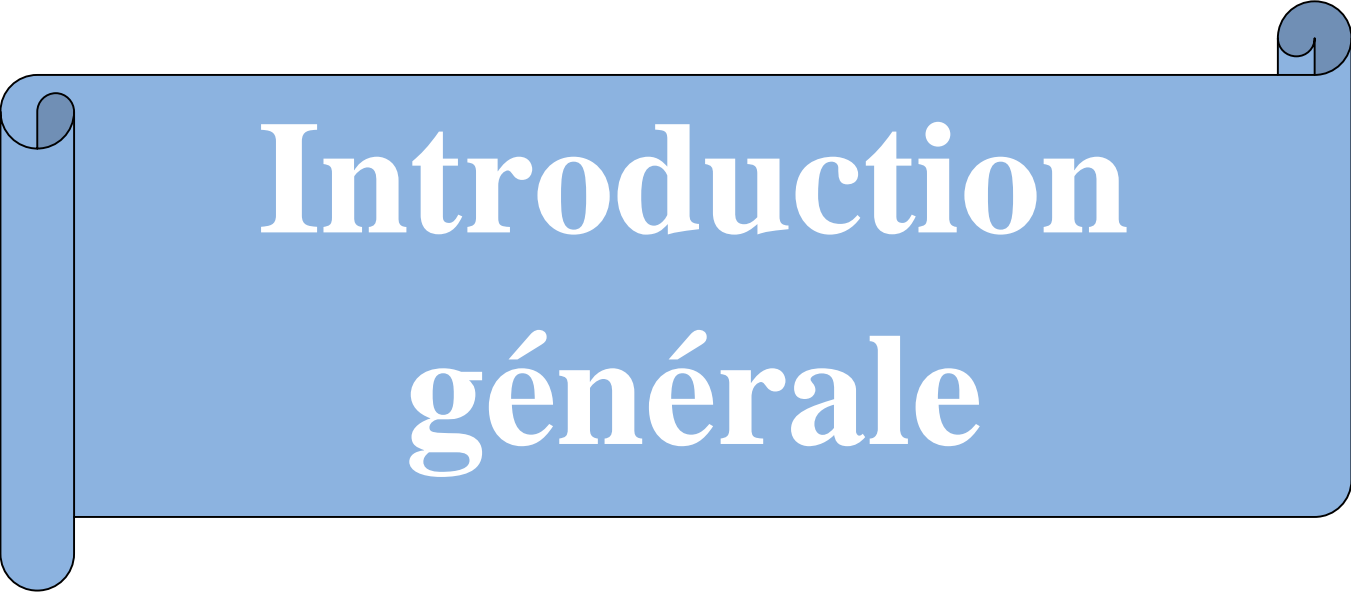
Fig. 2.1 : Représentation des axes de la machine.....	11
Fig. 2.2 : Schéma équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	13
Fig. 2.3 : Structure en pont d'un onduleur de tension triphasé.....	15
Fig. 2.4 : Onduleur de courant triphasé.....	16
Fig. 2.5 : Onduleur de tension triphasé alimentant un moteur asynchrone.....	16
Fig. 2.6 : Durée de conduction des interrupteurs dans la commande 180°	18
Fig. 2.7 : Bloc de simulation de MAS alimentée par onduleur de tension- commande 180°	19
Fig. 2.8 : Allure de la vitesse de la machine.....	20
Fig. 2.9 : Allure du courant de la machine.....	20
Fig. 2.10 : Allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur.....	21

Fig. 2.11 : Allure de la tension composée à la sortie de l'onduleur.....	21
Fig. 2.12 : Allure du couple électromagnétique de la machine.....	22
Fig. 2.13 : Allure du courant total.....	22
Fig. 2.14 : Bloc de simulation de la MAS alimentée par onduleur de tension- commande M.L.I.....	23
Fig. 2.15 : Allure de la vitesse de la machine.....	24
Fig. 2.16 : Allure du courant de la machine.....	24
Fig. 2.17 : Allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur.....	25
Fig. 2.18 : Allure de la tension composée à la sortie de l'onduleur.....	25
Fig. 2.19 : Allure du couple électromagnétique de la machine.....	26
Fig. 2.20 : Allure du courant total.....	26
Chapitre 3 :	
Fig. 3.1 : Schéma de principe de régulation du courant avec comparateur à hystérésis.....	28
Fig. 3.2 : Différentes configurations de l'onduleur pour la commande 180°.....	29
Fig. 3.3 : Allure du courant total à l'entrée de l'onduleur.....	30
Fig. 3.4 : Schéma de principe de la mesure du courant en tenant compte des phases de commutation.....	30
Fig. 3.5 : Configuration de l'onduleur durant la commutation.....	31
Fig. 3.6 : Allure du courant total de la machine.....	32
Fig. 3.7 : Allure du signal de sortie du régulateur.....	33
Fig. 3.8 : Schéma Bloc de simulation de la commande 180° avec régulation d'hystérésis sous Simulink.....	34
Fig. 3.9 : Allure du courant de phase de la machine.....	35
Fig. 3.10 : Allure de la tension simple de l'onduleur de tension pendant la phase de démarrage.....	35
Fig. 3.11 : Allure de la tension simple de l'onduleur de tension au régime permanent.....	35
Fig. 3.12 : Allure de la tension composée de l'onduleur de tension pendant la phase de démarrage...36	
Fig. 3.13 : Allure de la tension composée de l'onduleur de tension au régime permanent.....	36

Fig. 3.14 : Allure du couple électromagnétique de la machine.....	36
Fig. 3.15 : Allure du courant total.....	37
Fig. 3.16 : Schéma de simulation de la commande M.L.I avec régulation d’hystérésis sous Simulink.....	38
Fig. 3.17 : Allure du courant de la machine.....	39
Fig. 3.18 : Allure de la tension simple à la sortie de l’onduleur.....	39
Fig. 3.19 : Allure de la tension composée à la sortie de l’onduleur.....	39
Fig. 3.20 : Allure du couple électromagnétique de la machine.....	40
Fig. 3.21 : Allure du courant total.....	40
Chapitre 4 :	
Fig. 4.1 : Circuit logique de la commande des transistors.....	42
Fig. 4.2 : Schéma du circuit NE555 en mode Astable.....	44
Fig. 4.3 : Schéma du circuit intégré CI4018.....	45
Fig. 4.4 : Signaux de sortie du CI4018.....	45
Fig. 4.5 : Schéma électronique du régulateur de courant.....	46
Fig. 4.6 : La bande d’hystérésis créée par le comparateur.....	47
Fig. 4.7 : Le signal de sortie de circuit hystérésis.....	48
Fig. 4.8 : Les signaux à la sortie de la carte de commande.....	48
Fig. 4.9 : La carte électronique du circuit de commande.....	49

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Logique de la commande pleine onde.....	18
Tableau 3.1 : Table de vérité de la sortie logique du régulateur.....	32
Tableau 4.1 : séquence de conduction de l'onduleur sur une période électrique.....	43



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, qui donne à l'énergie électrique la forme la mieux adaptée pour chaque application. L'association des machines électriques et des convertisseurs statiques permet de développer de nouvelles structures électromécaniques de conversion d'énergie [1]. L'onduleur de tension est l'un des convertisseurs qui permet d'alimenter le moteur asynchrone à cage d'écureuil, ce dernier qui est considéré comme une source de courant à cause des enroulements du moteur donc la règle d'association des sources est respecter [2]. La problématique de notre sujet est d'essayer de réguler le courant total à la rentrée de l'onduleur. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail.

Le premier chapitre est consacré aux méthodes de variations de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil ainsi qu'aux méthodes de régulation du courant dans le cas des onduleurs de tension.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que la modélisation de l'onduleur triphasé de tension en vue de la simulation sous l'environnement Matlab-Simulink de l'ensemble machine-convertisseur statique en adoptant deux commandes différentes qui est la commande pleine onde (180°) et la commande par Modulation de la Largeur d'Impulsion (M.L.I).

Dans le troisième chapitre, après une brève description du système étudié, le principe de commande du courant total par la technique d'hystérésis qui nécessite d'étudier les séquences de commutation de l'onduleur ainsi que le courant total résultant. Nous étudions, le principe de fonctionnement du régulateur à hystérésis, et enfin on donne les résultats de simulation avec régulation d'hystérésis avec la commande 180° , ensuite la commande de Modulation de Largeur d'Impulsion.

Finalement, le dernier chapitre, concerne la partie pratique de notre sujet qui est la réalisation de la carte électronique de commande (la commande logique 180° et le régulateur d'hystérésis).

Enfin des conclusions et des perspectives ont été présentées.

Chapitre 1

Variation de vitesse du
moteur asynchrone à cage
d'écureuil

1.1 Introduction :

Le moteur asynchrone triphasé, le plus utilisé dans le secteur industriel pour ces avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé, et entretien facile moins coûteux comparant au moteur à courant continu. Mais sa commande et son procédé de variation de vitesse est plus compliqué que le moteur à courant continu [3]. Dans ce chapitre nous allons exposer quelques méthodes de variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que les méthodes de régulation du courant dans le cas des onduleurs de tension.

1.2 Définition :

On appelle machine à induction (machine asynchrone) toute machine, moteur ou génératrice ayant $2P$ pôles et étant branché à un réseau de fréquence f , ne tourne pas exactement à la vitesse de synchronisme N_s définie par [4] :

$$N_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

1.3 Constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil :

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est constitué de 2 parties essentielles [5] :

- Le stator : se compose d'une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide. Ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches, dans ces derniers on loge un bobinage (Fig. 1.1).
- Le rotor : se compose d'un cylindre de tôles percé à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Le rotor est séparé du stator par un entrefer. L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches, ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble de cette structure ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil (Fig. 1.2).



Fig. 1.1 : Stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.



Fig. 1.2 : Rotor d'une machine à cage d'écureuil.

1.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

Toutes les machines à courant alternatif reposent sur le principe du champ tournant. Les courants triphasés parcourus l'ensemble des trois bobinages statoriques induisent un champ tournant statorique de vitesse de rotation en tours par minutes $N_s = 60 \frac{f}{p}$, lorsque ce champ tournant balaye le rotor (les conducteurs de la cage d'écureuil) il induit des courants qui entrent en interaction avec ce champ et permettent de créer un couple, en conséquence le rotor se met à tourner et se stabilise à une vitesse toujours légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme [6].

1.5 Le glissement :

Lorsque l'enroulement statorique est alimenté par la fréquence f (ou de pulsation ω) il crée un flux tournant à la vitesse de synchronisme $N_s = 60 \frac{f}{p}$, $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ ce dernier balaye le bobinage rotorique et induit des courants. L'action du flux tournant sur les courants induits crée le couple. Le rotor tourne dans le même sens que le flux.

Le rotor ne peut tourner aussi vite que le flux sinon le flux à travers ses enroulements serait constant, et en conséquence il n'aurait plus ni de courant induit ni de couple.

Le rotor tourne à une vitesse N_r ou Ω_r qui s'éloigne d'autant plus de la vitesse synchrone que la charge qu'il entraîne demande un couple plus fort.

La perte relative de vitesse est appelée glissement g , ce dernier est donné par la relation [7].

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (1.2)$$

1.6 Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage d'écureuil :

L'évolution du couple électromagnétique en fonction du glissement est donnée par la relation suivante [7] :

$$C_{em} = \frac{3V_1^2}{\Omega} r_2 \frac{g}{(r_1 g + r_2)^2 + g^2 X_2^2} \quad (1.3)$$

La figure ci-dessous montre la caractéristique mécanique de la machine asynchrone :

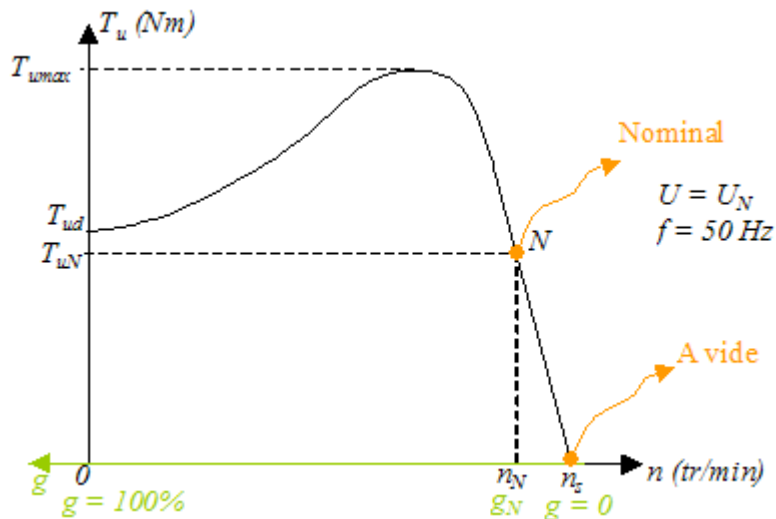


Fig. 1.3 : Caractéristique mécanique du moteur asynchrone à cage d'écureuil.

La vitesse de rotation des machines asynchrone est donnée par la relation :

$$N_r = N_s(1 - g) = \frac{60f}{P}(1 - g) \quad (1.4)$$

Donc d'après cette relation, la variation de vitesse de la machine asynchrone peut se faire par [7] :

- Action sur le glissement g .
- Action sur le nombre de paire de pôles de la machine P .
- Action sur la tension d'alimentation (fréquence).

1.7 Techniques de variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil :

1.7.1 Entraînement à tension variable et fréquence fixe :

Cette méthode est simple pour la mise en œuvre pour commander les machine asynchrone, cette dernière consiste à faire varié la tension d'alimentation de la machine avec une fréquence fixe, pour faire varier l'amplitude de la tension statorique, on introduit entre le réseau et le stator de la machine un dispositif d'électronique de puissance qui est le gradateur à thyristors, ce dernier est constitué de trois ensembles de deux thyristors montés en tête-bêche (antiparallèle), comme indiqué sur la Fig. 1.4, le réglage de la tension d'alimentation du moteur se fait par action sur l'angle de retard à l'amorçage α des thyristors [8].

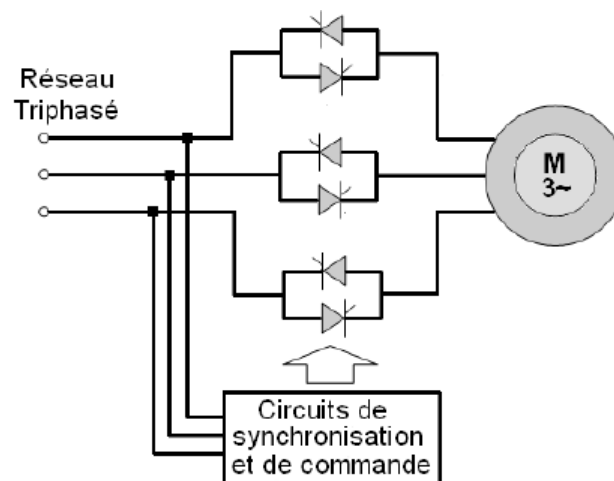


Fig. 1.4 : Variation de la vitesse du moteur asynchrone par réglage de la tension d'alimentation.

Mais ce procédé de variation de vitesse présente des inconvénients dont nous citons :

Par exemple si le moteur entraîne une charge présentant un couple résistant sensiblement constant, et si en diminuant la tension d'alimentation on peut augmenter un peu le glissement g , mais avant que ce dernier n'atteint la valeur qui donne le couple maximum, le moteur décroche [7].

La réduction de vitesse de vitesse se fait au préjudice du rendement puisqu'elle est obtenue par augmentation du glissement, par exemple si le moteur glisse de 50 %, les pertes Joules

rotoriques vaut elle seul 50 % la puissance traversant l'entrefer, et si on ajoute les autres pertes, on obtient un rendement inférieur à 50 % [7].

L'augmentation des pertes Joules rotoriques lors de la réduction de la tension d'alimentation pose le problème de l'échauffement [7].

Le gradateur est un convertisseur très polluant, les courants pris au réseau et fournis au moteur ont un taux d'harmoniques très important [7].

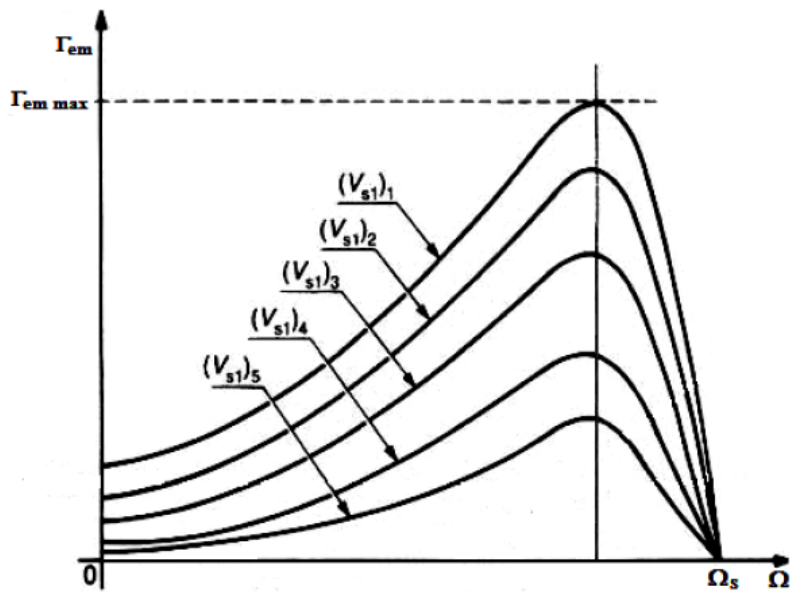


Fig. 1.5 : Caractéristique couple-vitesse d'un moteur asynchrone à cage pour différentes valeurs de la tension statorique ($V_1 > V_2 > V_3 > V_4 > V_5$).

1.7.2 Entraînements à tension et fréquence variable :

L'équation (1.1) indique que la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone peut être commandée en faisant varier la fréquence d'alimentation. Avant que les semi-conducteurs voient le jour, il était alors difficile d'avoir des alimentations à fréquence variable. Cependant, actuellement les techniques M.L.I associées aux onduleurs permettent facilement de fournir une alimentation à fréquence variable avec une bonne qualité du signal de sortie. La commande scalaire (rapport V/f constant) en boucle ouverte est la technique de commande des moteurs asynchrones la plus utilisée dans le cas où la précision dynamique n'est pas recherchée [8].

D'autres montages d'électronique de puissance peuvent être utilisés pour varier la fréquence comme par exemple le cycloconvertisseur et le convertisseur matriciel.

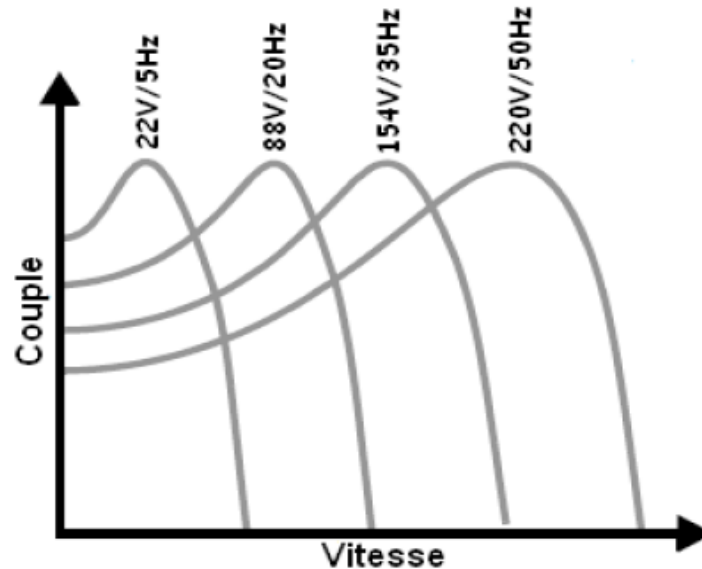


Fig. 1.6 : Caractéristiques couple/vitesse en fonction de la fréquence d'alimentation.

1.8 Techniques de régulation du courant dans le cas d'un onduleur de tension :

Deux stratégies de contrôle du courant peuvent être mises en œuvre [9] :

- Le contrôle des courants par hystérésis.
- Le contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I.).

Dans ce qui suit nous donnons le principe de chaque stratégie.

1.8.1 Contrôle du courant par hystérésis :

Le principe de cette méthode 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 soit limitées dans une bande encadrant les références des courants (I_{\max} et I_{\min}). 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 [9].

1.8.1.1 Cas d'une alimentation sinusoïdale :

Son principe consiste à la comparaison de chaque courant de phase à sa référence sinusoïdale à l'aide d'un comparateur à hystérésis dont la sortie est connectée au circuit de commande des interrupteurs (figure 1.8), les ondulation du courant sont fixées par la valeur de la bande d'hystérésis (fig. 1.7) [9].

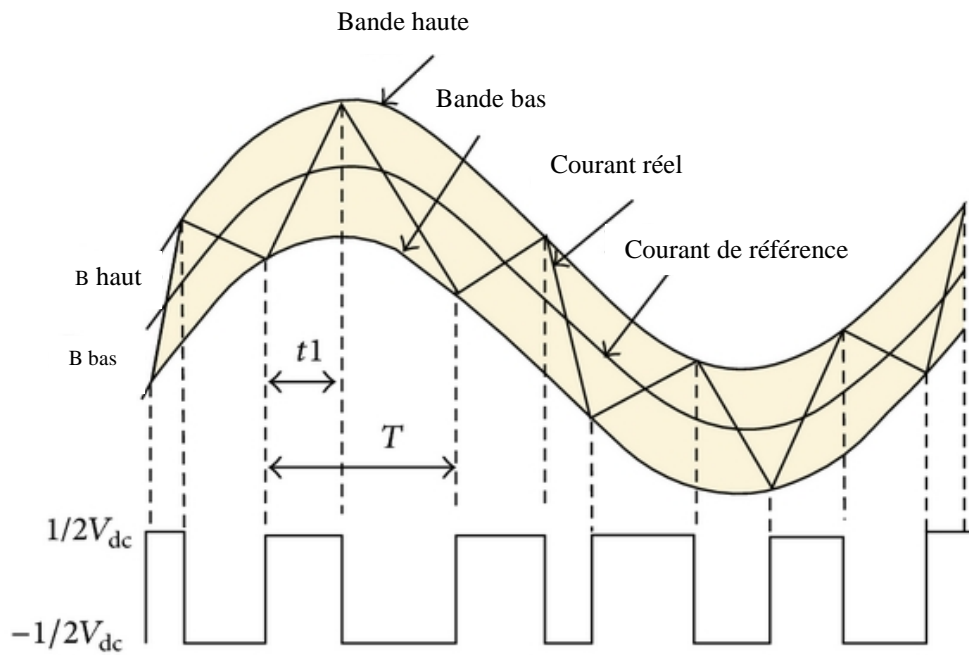


Fig. 1.7 : Allure du courant dans le cas d'alimentation avec des références sinusoïdales.

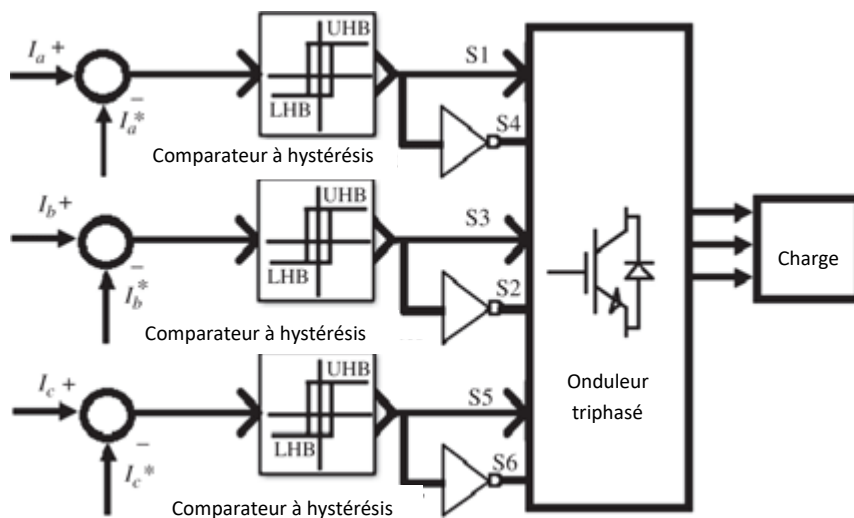


Fig. 1.8 : Contrôle des courants sinusoïdaux par hystérésis.

1.8.2 Contrôle des courants par M.L.I :

La Méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue constante consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la tension sinusoïdale. La figure 1.9 illustre le principe de la commande M.L.I. Les instants des impulsions de commande des interrupteurs sont déterminés par l'intersection du signal de la tension de référence appelée modulatrice avec un signal triangulaire de haute fréquence appelé porteuse [9].

Plusieurs méthodes de modulation existent, on peut citées :

1.8.2.1 M.L.I à échantillonnage naturel :

Cette technique appelée aussi "triangulo-sinusoïdale" consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (modulatrice). L'intersection des deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs. Et que l'indice de réglage $r = \frac{A_m}{A_p}$ et que $0 < r < 1$, l'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_m}$ et que m doit être un nombre impaire et multiple de trois. La figure ci-dessous montre le principe de la M.L.I à échantillonnage naturel [9].

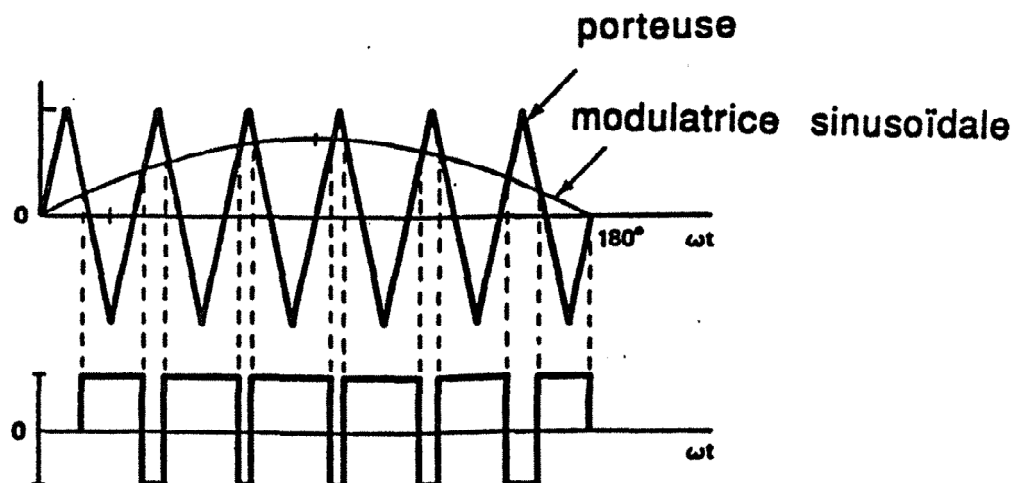


Fig. 1.9 : M.L.I à échantillonnage naturel (triangulo-sinusoïdal).

1.8.2.2 M.L.I symétrique :

Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de la porteuse et de la modulatrice échantillonnée et constante sur la période de la porteuse. La largeur d'une impulsion est directement proportionnelle à l'amplitude de la modulatrice échantillonnée sur la période de la porteuse correspondante. La figure ci-dessous montre le principe de la M.L.I symétrique [9].

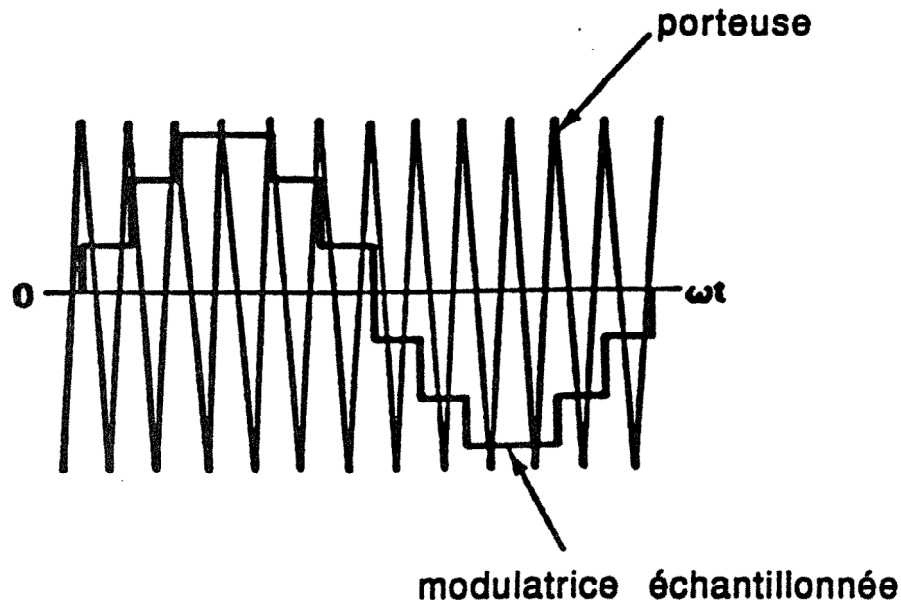


Fig. 1.10 : M.L.I symétrique.

1.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les méthodes de variation de vitesse du moteur asynchrone, ainsi que les méthodes du contrôle du courant dans les onduleurs de tension et nous avons conclu que l'utilisation des convertisseurs statiques permet un meilleur rendement et une grande plage de vitesse. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil alimentée par un onduleur de tension.

Chapitre 2

**Modélisation et Simulation
du moteur Asynchrone
Alimenté par Onduleur de
Tension**

2.1 Introduction :

Les machines asynchrones ont pu tirer profit de l'essor plus que considérable qu'a connu le domaine de l'entraînement électrique à vitesse variable ces dernières années ; ceci grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique.

Les machines asynchrones occupent de plus en plus la place des machines à courant continu en raison de leurs nombreuses vertus dont nous citons la robustesse, la simplicité de structure mais surtout la maintenance quasi inexistante [8] [10].

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation et la simulation d'une machine asynchrone alimentée par onduleur de tension.

2.2 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil :

2.2.1 Hypothèses de travail [11] :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé (les flux sont proportionnels aux courants qui les produisent).
- On néglige les pertes par hystérésis et courant de Foucault.
- On suppose que les résistances sont constantes (elles ne dépendent pas de la température et de la fréquence).
- Le phénomène d'effet de peau est négligé.
- Le fondamental de la force magnétomotrice est considéré sinusoïdal.

Le moteur est représenté par trois phases statoriques a_s , b_s , c_s , et trois phases rotoriques a_r , b_r , c_r .

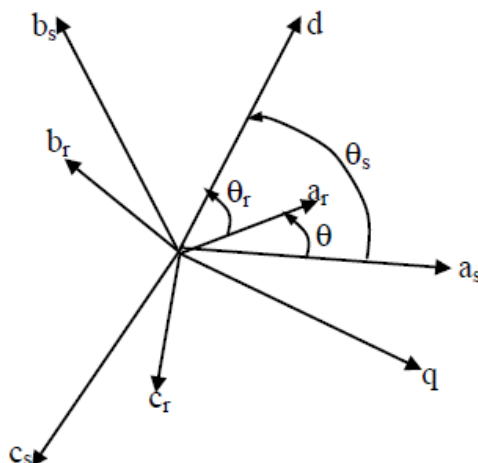


Fig. 2.1 : Représentation des axes de la machine.

Avec :

θ_s : angle électrique stator/ référentiel (d,q).

$$\theta_r = \theta_s - \theta$$

$$\omega = P\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

2.2.2 Équations aux tensions :

Pour l'ensemble des enroulements statoriques, les équations en notation matricielle s'écrivent [9] :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, les équations en notation matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

L'écriture matricielle ci-dessous résume les 3 équations du flux statoriques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Et pour le rotor on aura les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.3 Équation mécanique :

Le couple électromagnétique développé par la machine est donnée [9] :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \Omega \quad (2.5)$$

2.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park :

La transformation de Park permet de passer d'un système à 3 axes (a, b, c) à un système à 2 axes (d, q), et permet d'obtenir des équations différentiel à coefficient constant [12]. La figure 2.1 montre l'équivalence de la machine asynchrone dans le repère de Park.

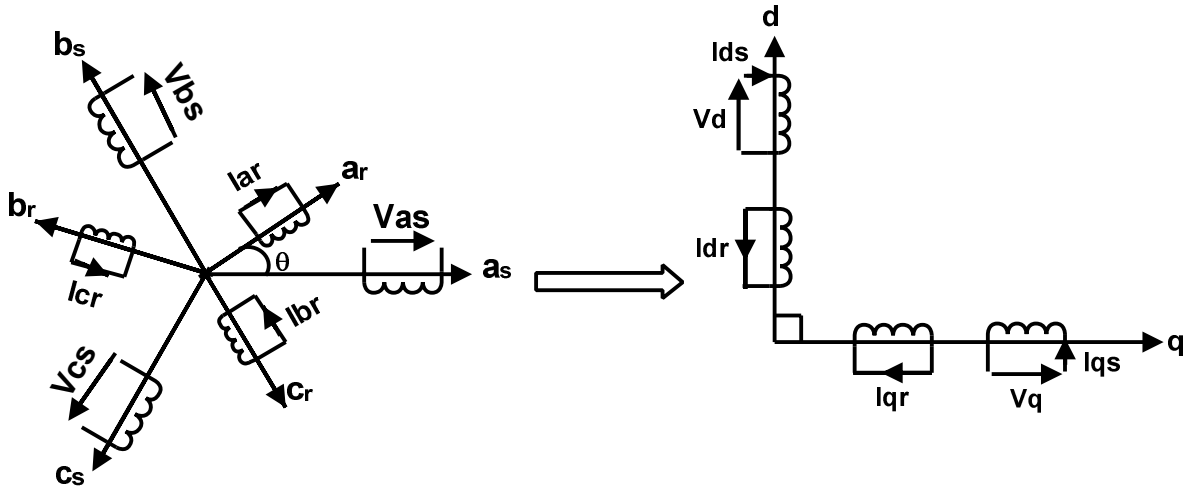


Fig. 2.2 : Schéma équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park.

La transformé de Park correspond au changement de base triphasé-biphasé (d,q) qui permet de diagonaliser une matrice inductance :

La matrice de changement de base [P (\$\theta\$)] est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La matrice de changement de base [P(\$\theta\$)] étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est la suivante :

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.5 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone :

2.5.1 Équations des tensions :

Dans le repère de Park (d,q) tournant à la vitesse angulaire $\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$, les équations (2.1) et (2.2) s'écrivent [9] :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec : $\omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s$ et $\omega = \frac{d}{dt} \theta$

2.5.2 Équations du flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_r I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.5.3 Choix du référentiel :

Il existe plusieurs référentiels dans lequel on peut travailler [9] :

- Référentiel lié au stator
- Référentiel lié au rotor
- Référentiel lié au champ tournant :

Les équations de la machine dans le repère du champ tournant sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \\ \phi_{dm} = M \cdot (I_{ds} + I_{dr}) \\ \phi_{qm} = M \cdot (I_{qs} + I_{qr}) \end{cases} \quad (2.11)$$

2.6 Onduleur de tension et de courant :

2.6.1 Onduleurs de tension :

Un onduleur autonome est un convertisseur statique qui permet l'échange de puissance entre une source à courant continu et une source à courant alternatif. Dans le cas d'un onduleur de tension il est représenté par une source d'impédance interne négligeable (la tension U de l'onduleur n'est pas affectée par les variations du courant i qui traverse la source) [12]. La figure ci-dessous montre la structure d'un onduleur de tension alimentant un moteur asynchrone.

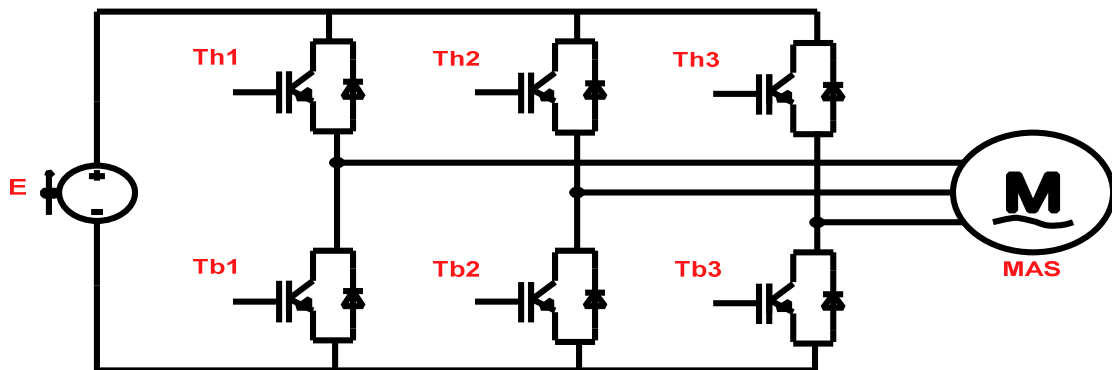


Fig. 2.3 : Structure en pont d'un onduleur de tension triphasé.

2.6.2 Onduleur de courant :

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continu c'est-à-dire une source qui contient une inductance interne si grande que le courant qui traverse cette dernière n'est pas affecté par la variation de la tension u à ses bornes [12]. La figure 2.3 montre le schéma d'un onduleur de courant triphasé en pont alimentant une charge triphasé.

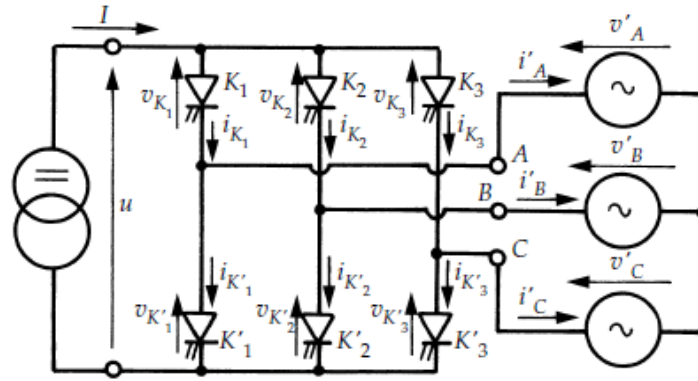


Fig. 2.4 : Onduleur de courant triphasé.

2.7 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé de tension :

En reliant chacune des bornes du récepteur tantôt à l'une, tantôt à l'autre des bornes d'entrée on obtient un signal alternatif, la fréquence des changements des connexions donne la fréquence de ce signal [12].

2.8 Modélisation de l'onduleur de tension :

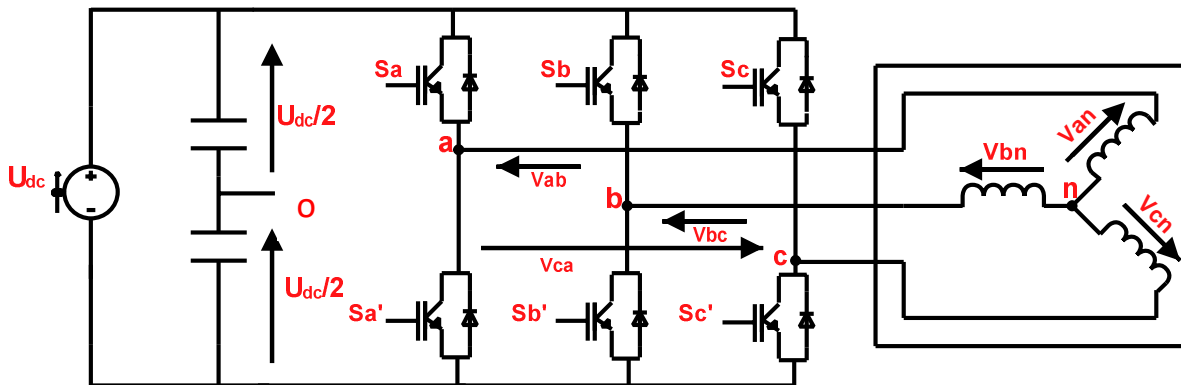


Fig. 2.5 : Onduleur de tension triphasé alimentant un moteur asynchrone.

L'état des interrupteurs supposées parfaites c'est-à-dire (chute de tension directe nulle, courant de fuite nul et les durée des commutations nulle) [2].

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif "o" (figure 2.5) :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2.13)$$

Soit "n" le point neutre du coté alternatif (machine asynchrone) alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.14)$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.15)$$

La substitution de (2.13) dans (2.14) nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.16)$$

En remplaçant (2.16) dans (2.14) on obtient:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{co} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.17)$$

Les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande sont :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.9 La commande pleine onde (commande 180°) :

2.9.1 Principe :

Dans ce mode de commande, les interrupteurs sont mis en conduction pendant une demi-période c'est-à-dire 180°, dans cette technique de commande trois phases sont toujours

alimenté et si le transistor du haut ne conduit pas c'est au transistor du bas (complémentaire) qui va conduire aussi pendant une demi-période, à partir des signaux du capteur.

La figure ci-dessous montre un onduleur de tension ainsi que la durée de conduction des interrupteurs dans le cas de la commande 180°.

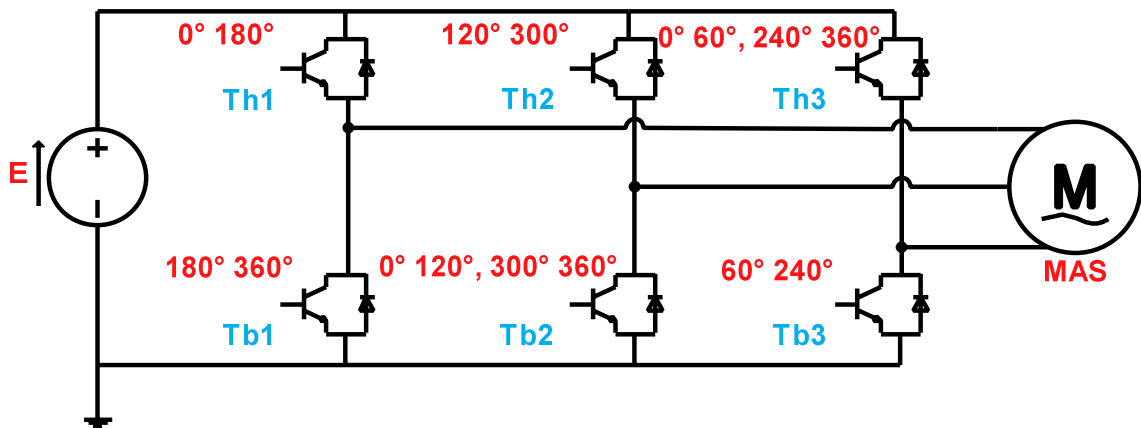


Fig. 2.6 : Durée de conduction des interrupteurs dans la commande 180°.

2.9.2 Tableau logique de la commande pleine onde (180°) :

Le tableau ci-dessous montre les interrupteurs en conduction, ainsi que les valeurs des tensions simples et des tensions composées respectivement (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}) et (V_{ab} , V_{bc} , V_{ac}).

Tableau .2.1 Logique de la commande pleine onde [13].

t	interrupteurs	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ac}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
$0 < t < T/6$	Th ₁ , Th ₂ , Tb ₃	E	E	0	0	E	E	1/3 E	1/3 E	-2/3 E
$T/6 < t < 2T/6$	Th ₁ , Tb ₂ , Tb ₃	E	0	0	E	0	E	2/3 E	-1/3 E	-1/3 E
$2T/6 < t < 3T/6$	Th ₁ , Tb ₂ , Th ₃	E	0	E	E	-E	0	1/3 E	-2/3 E	1/3 E
$3T/6 < t < 4T/6$	Tb ₂ , Th ₃ , Tb ₁	0	0	E	0	-E	-E	-1/3 E	-1/3 E	2/3 E
$4T/6 < t < 5T/6$	Th ₃ , Tb ₁ , Th ₂	0	E	E	-E	0	-E	-2/3 E	1/3 E	1/3 E
$5T/6 < t < T$	Tb ₁ , Th ₂ , Tb ₃	0	E	0	-E	E	0	-1/3 E	2/3 E	-1/3 E

2.10 Résultat de la simulation :

La fig. 2.7 représente le schéma d'implémentation du programme de simulation avec Simulink en boucle ouverte. Dans le premier cas on alimente la machine avec la commande 180° et en seconde cas on alimente la machine avec la commande M.L.I.

2.10.1 Schéma bloc de simulation :

La figure ci-dessous montre le schéma bloc sous l'environnement Simulink d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension en utilisant la commande pleine onde.

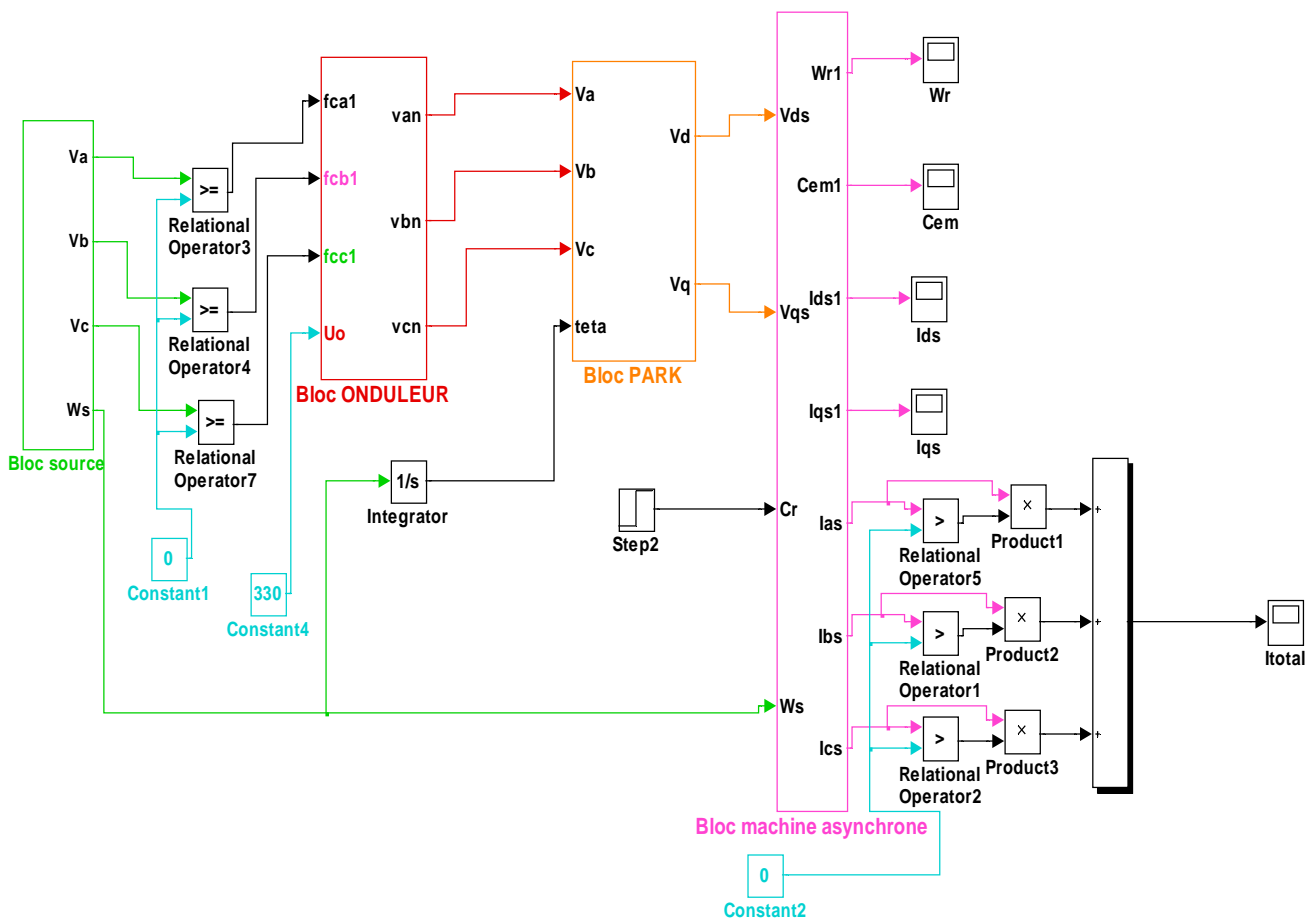


Fig. 2.7 : Bloc de simulation de MAS alimentée par onduleur de tension- commande 180° .

2.10.2 Résultats de simulation de la commande 180° :

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de simulation sans régulation d'hystérésis de la machine asynchrone alimentée par onduleur de tension avec la commande 180° . Les fig. (2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 et 2.13) représentent respectivement les allures de la vitesse de la

machine, du courant de phase de la machine, de la tension simple à la sortie de l'onduleur, la tension composée à la sortie de l'onduleur, le couple électromagnétique et le courant total.

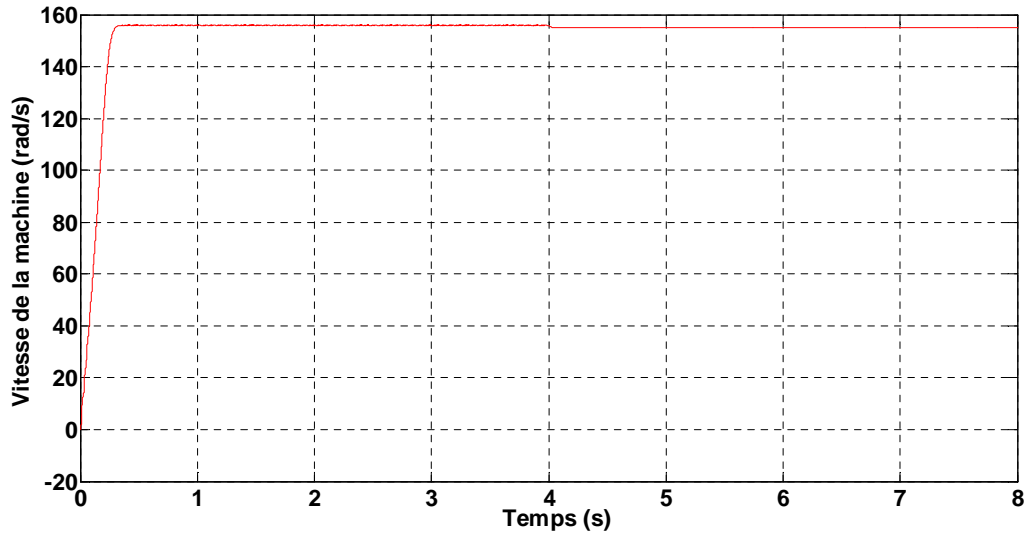


Fig. 2.8 : Allure de la vitesse de la machine.

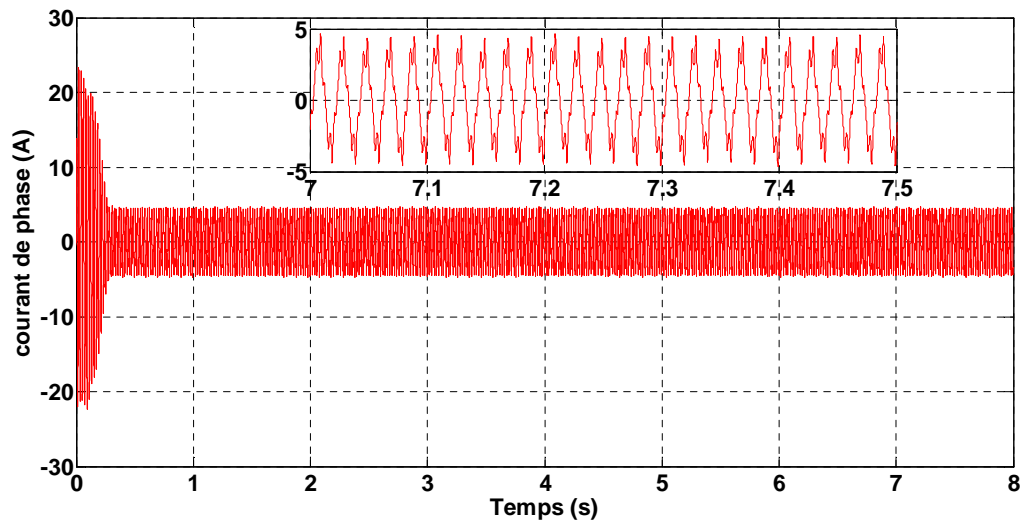


Fig. 2.9 : Allure du courant de la machine.

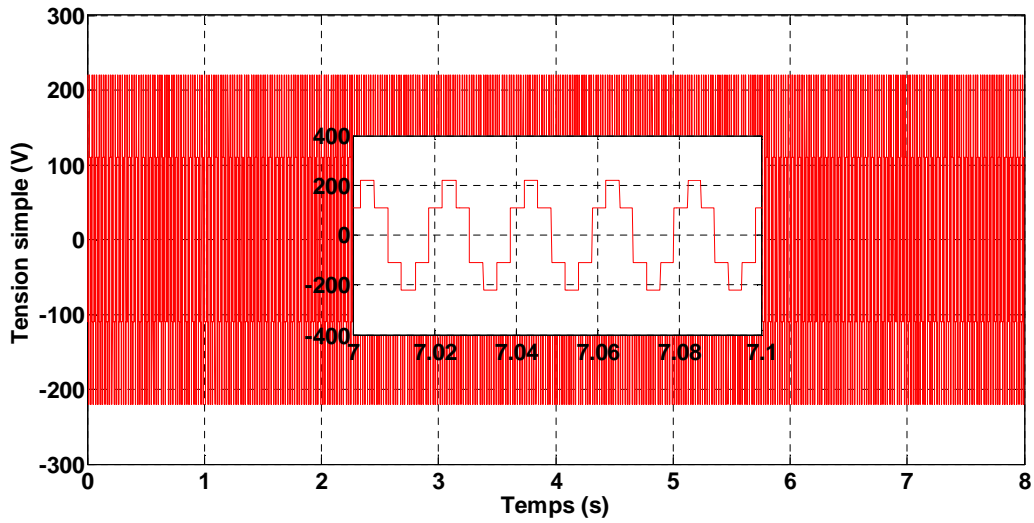


Fig. 2.10 : Allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur.

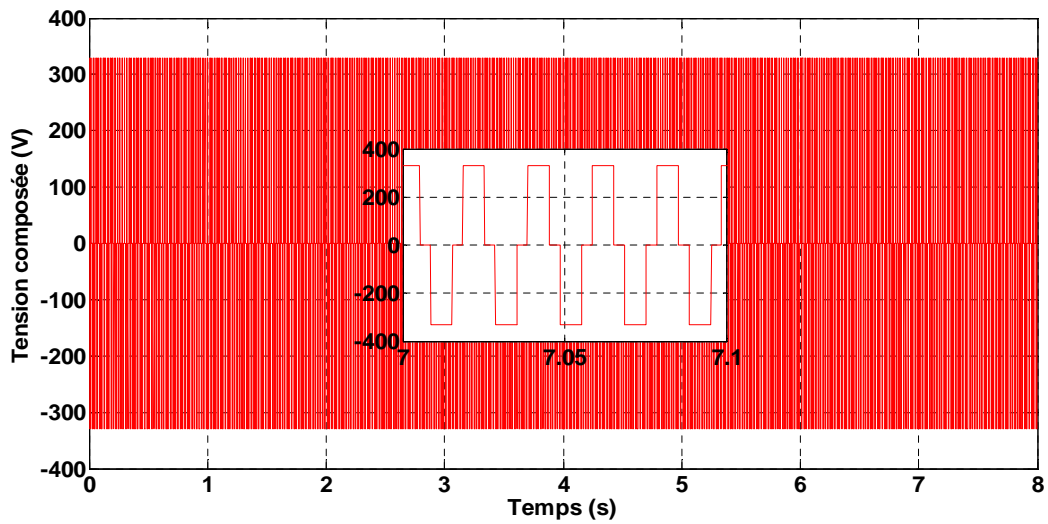


Fig. 2.11 : Allure de la tension composée à la sortie de l'onduleur.

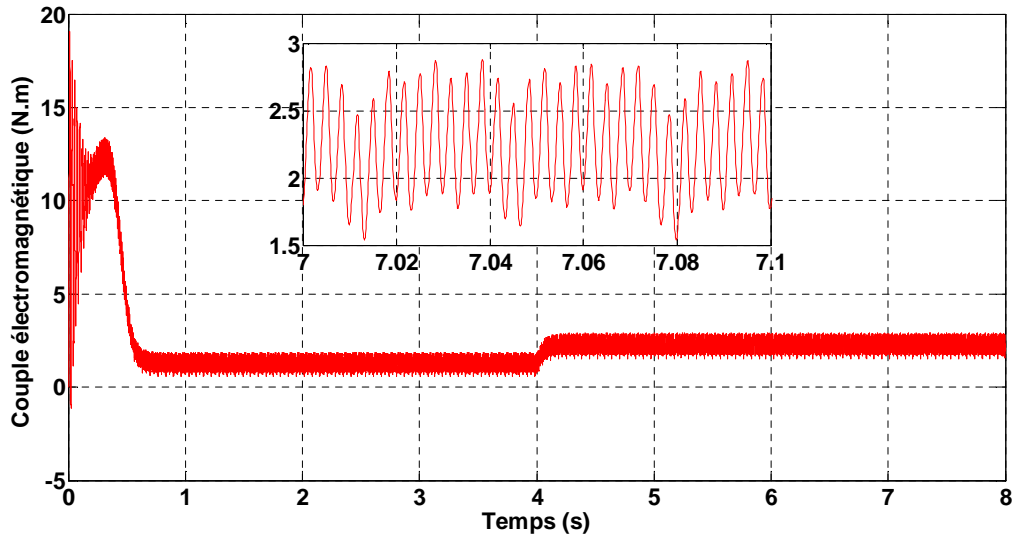


Fig. 2.12 : Allure du couple électromagnétique de la machine.

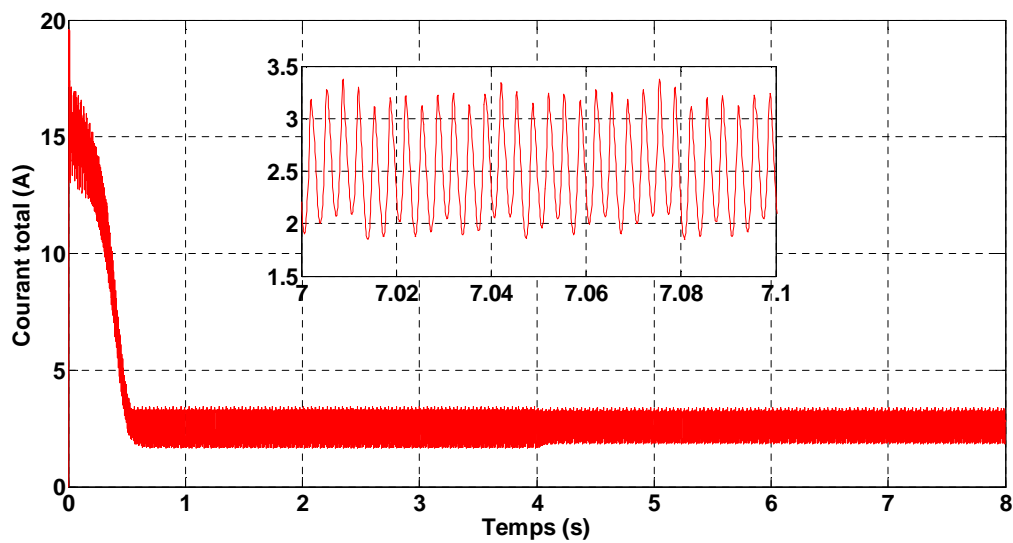


Fig. 2.13 : Allure du courant total.

2.10.3 Interprétation des résultats obtenue avec la commande 180° :

D'après les résultats obtenus, on remarque que le courant pendant le démarrage il atteint la valeur de 19 A ce qui est connu dans la théorie des machines électriques que le courant de démarrage atteint une valeur importante, ainsi que le couple de démarrage lui aussi atteint une valeur importante de l'ordre de 19 N.m. et lorsqu'on applique un couple résistant de 2 N.m à 4 secondes on remarque une légère augmentation dans le courant de la machine ainsi que le couple de la machine et que la vitesse de machine diminue.

2.11 Résultats de simulation de la commande M.L.I :

2.11.1 Schéma bloc de la simulation :

La figure ci-dessous montre le schéma bloc sous l'environnement Simulink d'une machine asynchrone alimentée par onduleur de tension commandé par modulation de largeur d'impulsion.

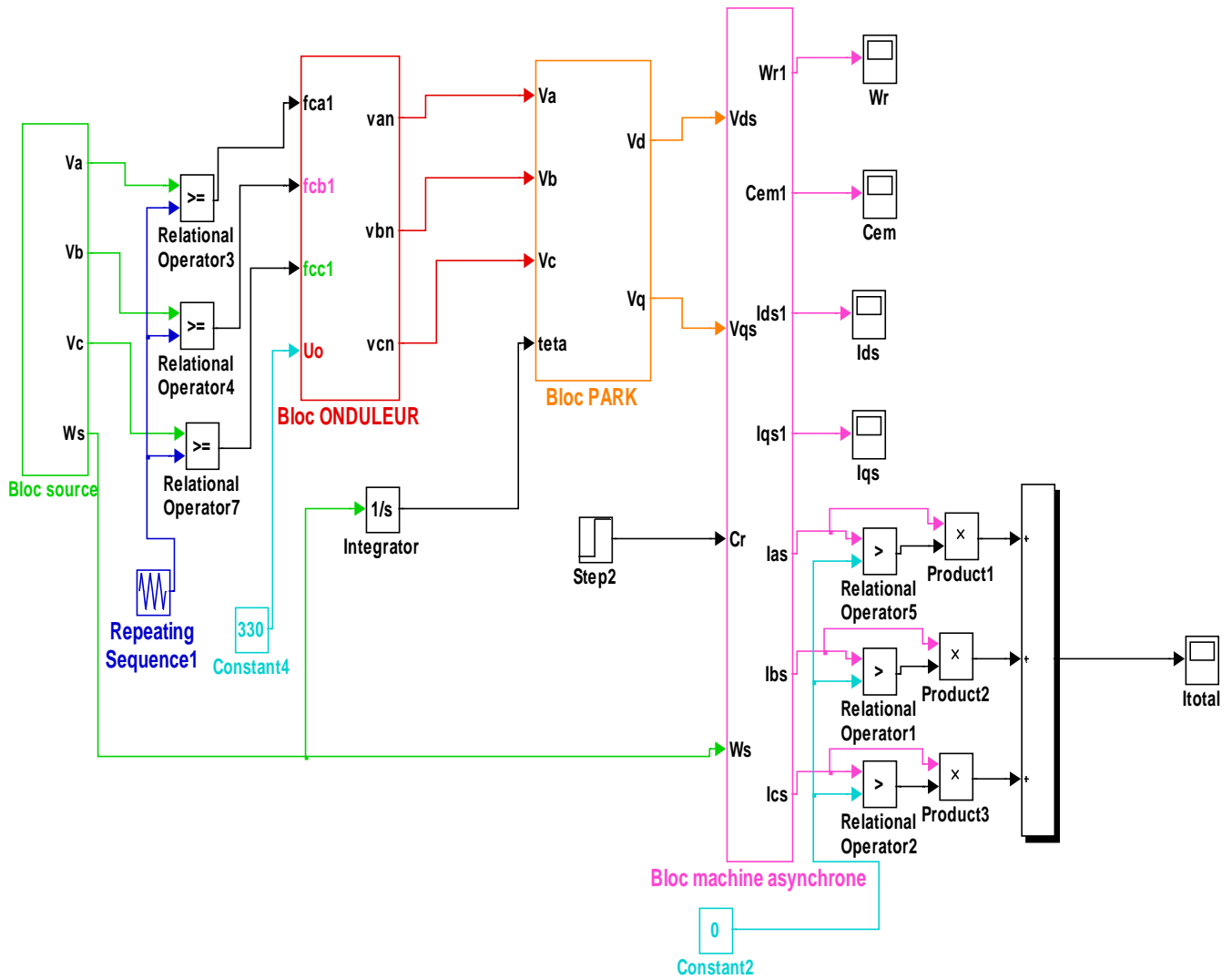


Fig. 2.14 : Bloc de simulation de la MAS alimentée par onduleur de tension- commande M.L.I.

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de simulation sans régulation d'hystérésis de la machine asynchrone alimentée par onduleur de tension avec la commande M.L.I. avec une fréquence de 1250 Hz. Les fig. (2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 et 2.20) représentent

respectivement les allures de la vitesse de la machine, le courant de phase de la machine, la tension simple à la sortie de l'onduleur, la tension composée à la sortie de l'onduleur, le couple électromagnétique et le courant total.

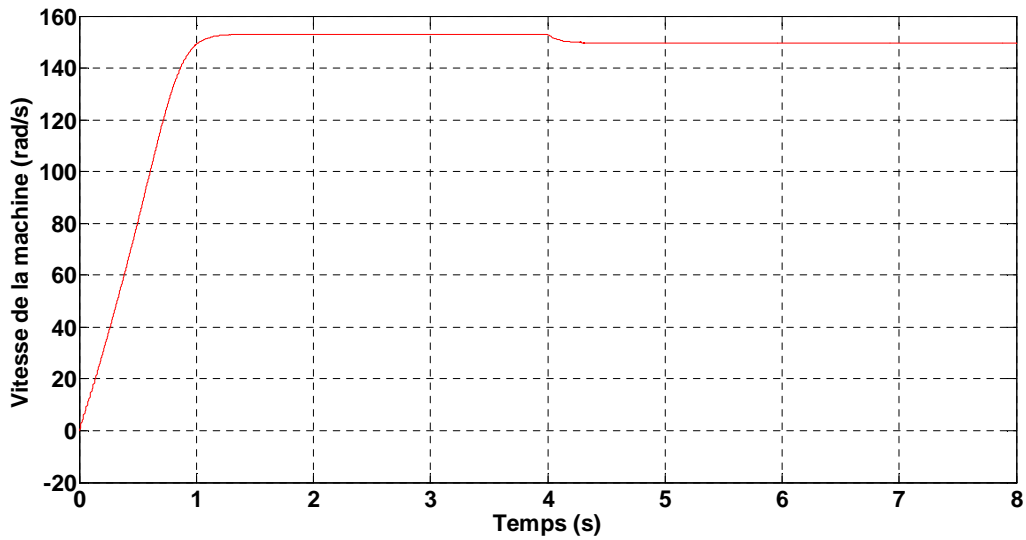


Fig. 2.15 : Allure de la vitesse de la machine.

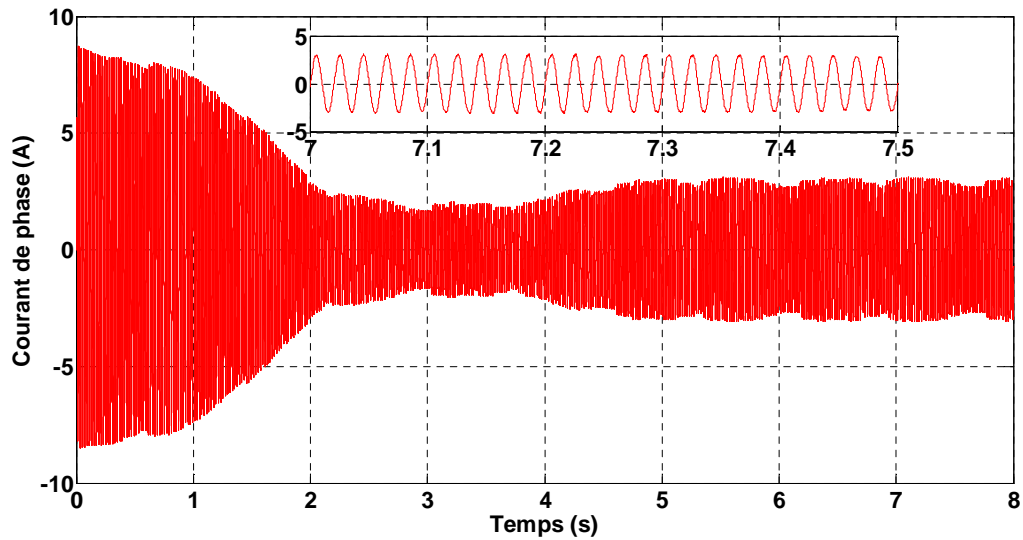


Fig. 2.16 : Allure du courant de la machine.

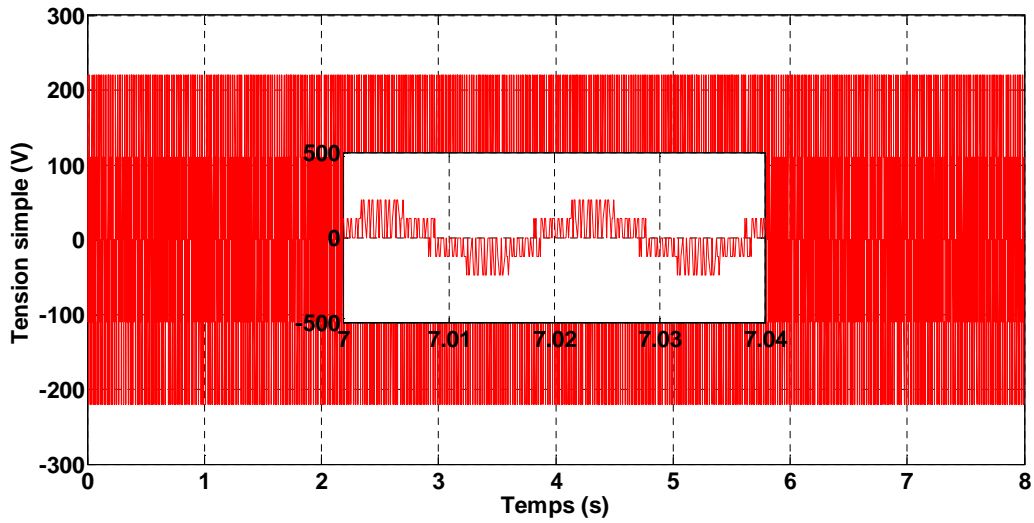


Fig. 2.17 : Allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur.

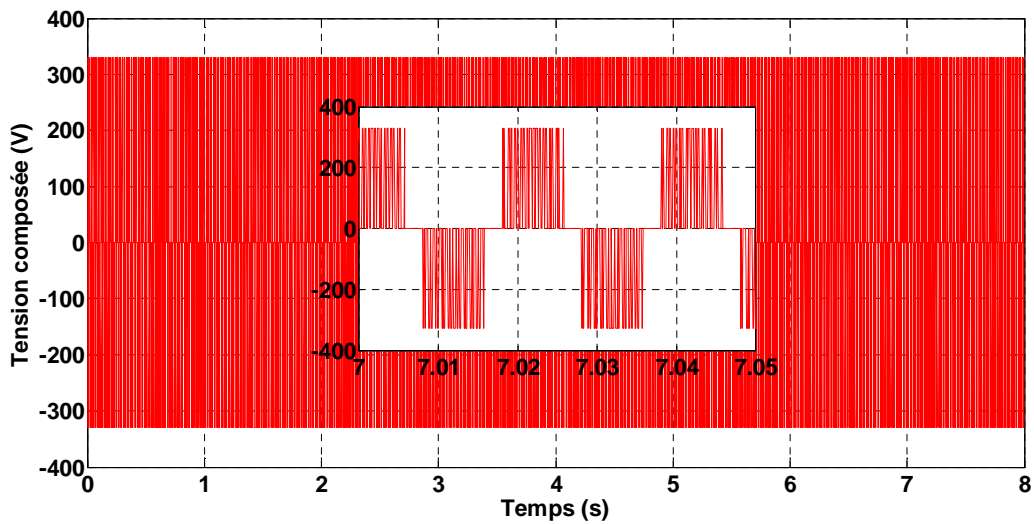


Fig. 2.18 : Allure de la tension composée à la sortie de l'onduleur.

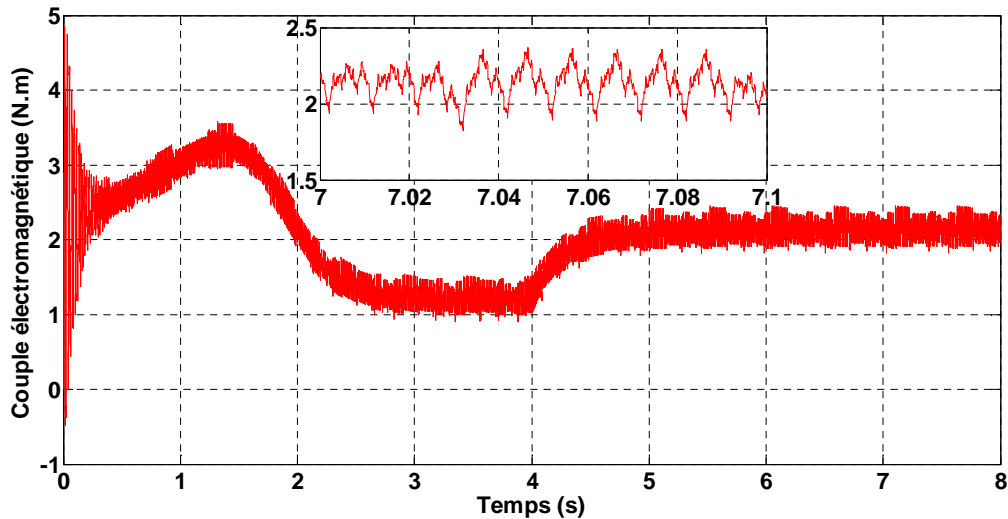


Fig. 2.19 : Allure du couple électromagnétique de la machine.

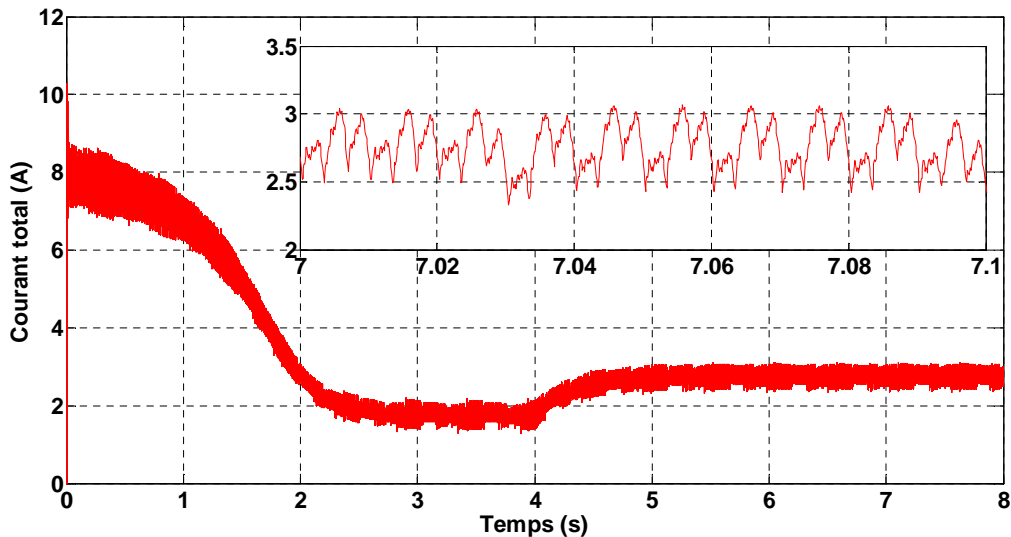


Fig. 2.20 : Allure du courant total.

2.11.2 Interprétation des résultats obtenus avec la commande M.L.I :

D'après les résultats obtenus, on remarque que le courant pendant le démarrage il atteint la valeur de 8 A ce qui est connus dans la théorie des machines électriques que le courant de démarrage atteint une valeur importante, ainsi que le couple de démarrage lui aussi atteint une valeur importante de l'ordre de 5 N.m. et lorsqu'on applique un couple résistant de 2 N.m à 4 secondes on remarque une légère augmentation dans le courant de la machine ainsi que le couple de la machine et que la vitesse de machine diminue.

2.12 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à commande 180° et la modulation de largeur d'impulsion M.L.I en boucle ouverte. Dans le cas de l'alimentation par un onduleur, nous constatons une similitude avec la machine à courant continu néanmoins le courant de démarrage est très important, pour cela nous présentons au chapitre suivant une méthode de régulation du courant total absorbé par la machine.

Chapitre 3

**Commande par hystérésis
d'un moteur asynchrone à
cage alimenté par un
onduleur de tension**

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons une méthode de mesure du courant total absorbé par la machine même durant les phases de roue libre durant la commutation des transistors et diodes, l'utilisation d'un régulateur de courant de type à hystérésis permet le contrôle du courant absorbée par la machine.

3.2 Description du système global :

On représente le système à étudier sur la figure 3.1. Il est constitué essentiellement d'une source de tension, d'un onduleur de tension triphasé, d'un moteur asynchrone, d'un système de commande, d'une boucle interne de courant.

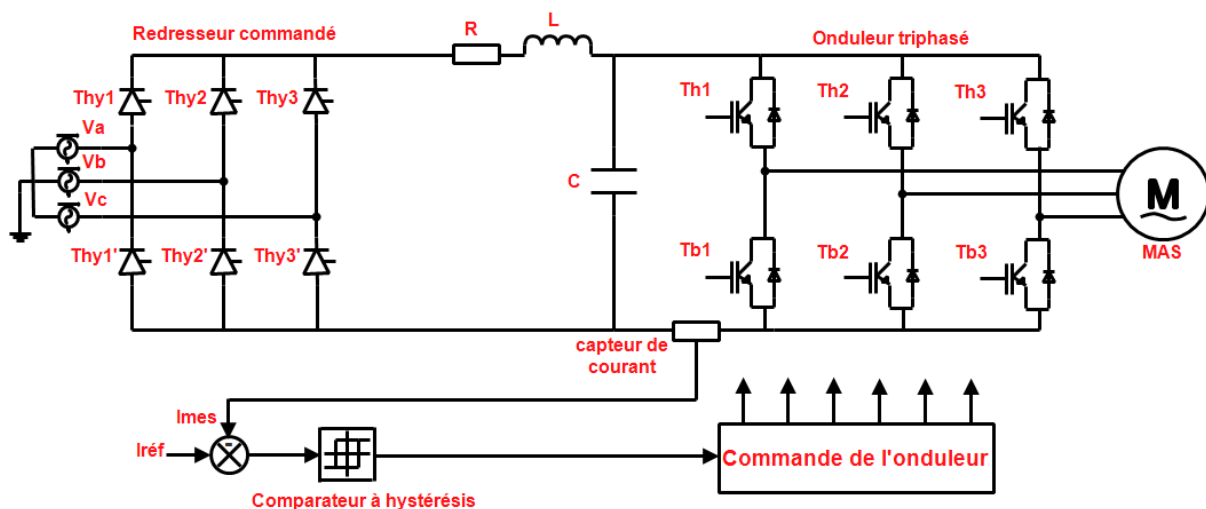


Fig. 3.1 : Schéma de principe de régulation du courant avec comparateur à hystérésis.

3.3 Commande du courant total :

Afin de tester l'efficacité de la commande du courant total par la technique de l'hystérésis, on ne considère que le régulateur de courant [1]. Le courant total constitue le seul paramètre de réglage du couple.

Afin de montrer la relation entre le courant total à l'entrée de l'onduleur et les courants de phases, nous étudions les différentes configurations possibles de l'onduleur. Pour la commande de type 180°, on distingue sur une période électrique six configurations (figure 3.2).

Chapitre 3 : Commande par hystérésis d'un moteur asynchrone à cage alimentée par un onduleur de tension

La figure ci-dessous montre les séquences de commutations de l'onduleur ainsi que le courant total résultant.

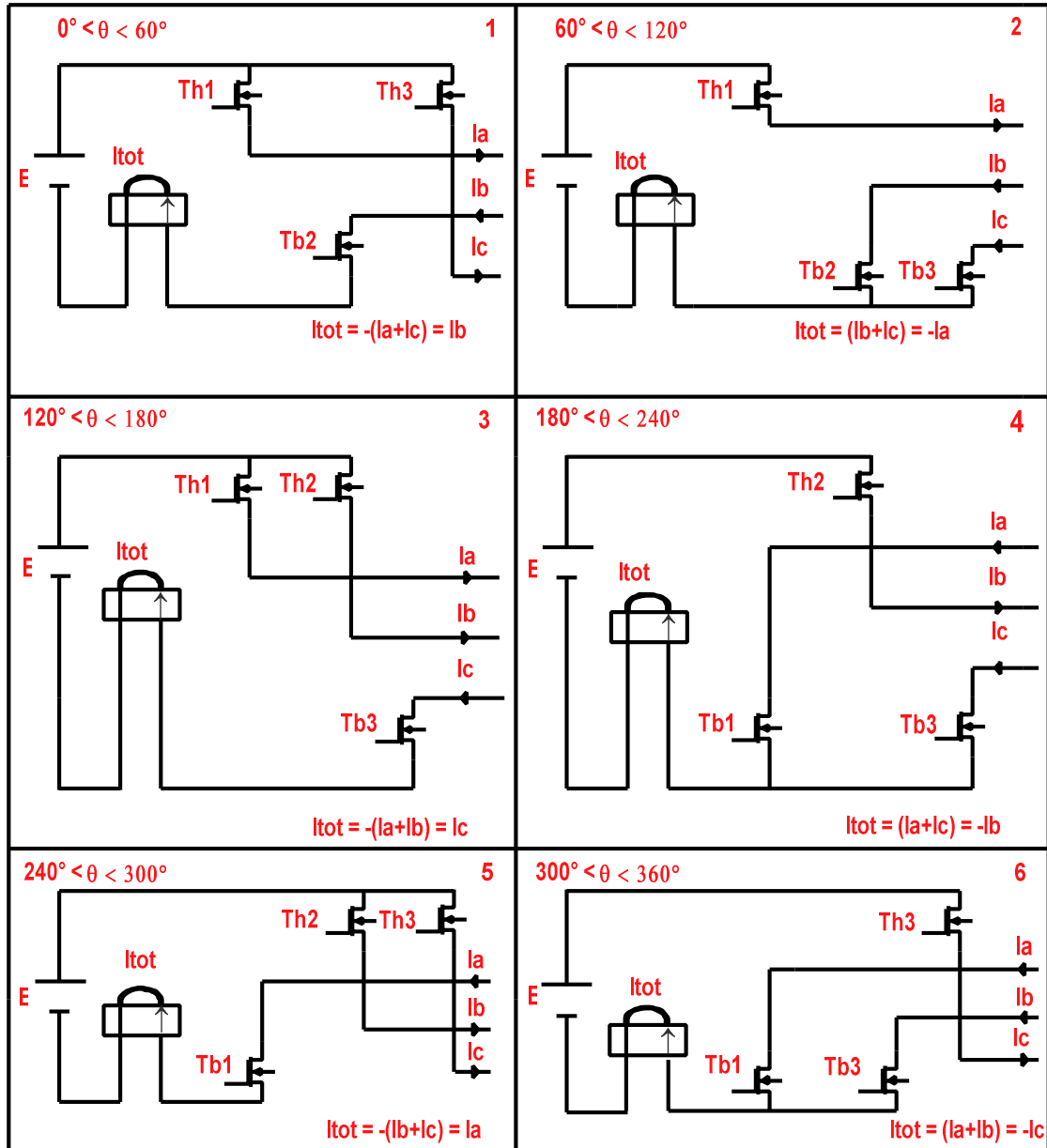


Fig. 3.2 : Différentes configurations de l'onduleur pour la commande 180°.

Après analyse de ces différentes configurations, on déduit que le courant mesuré par la sonde à effet Hall correspond à chaque sixième de période à un courant de phase, comme le montre la figure suivante. La figure 3.3 montre l'allure du courant total à l'entrée de l'onduleur.

Chapitre 3 : Commande par hystérésis d'un moteur asynchrone à cage alimentée par un onduleur de tension

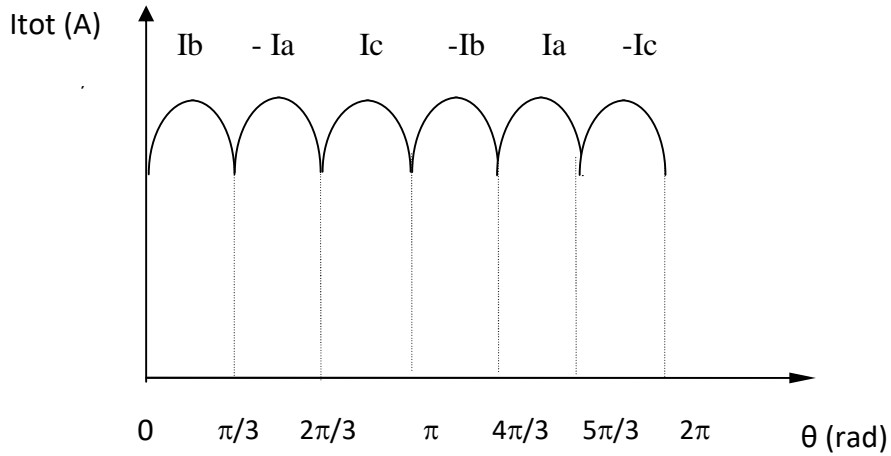


Fig. 3.3 : Allure du courant total à l'entrée de l'onduleur.

Pour tenir compte des phases de commutation, on mesure aussi le courant total qui traverse toutes les diodes hautes (Dh1, Dh2, Dh3). Le schéma de principe est présenté sur la figure ci-dessous :

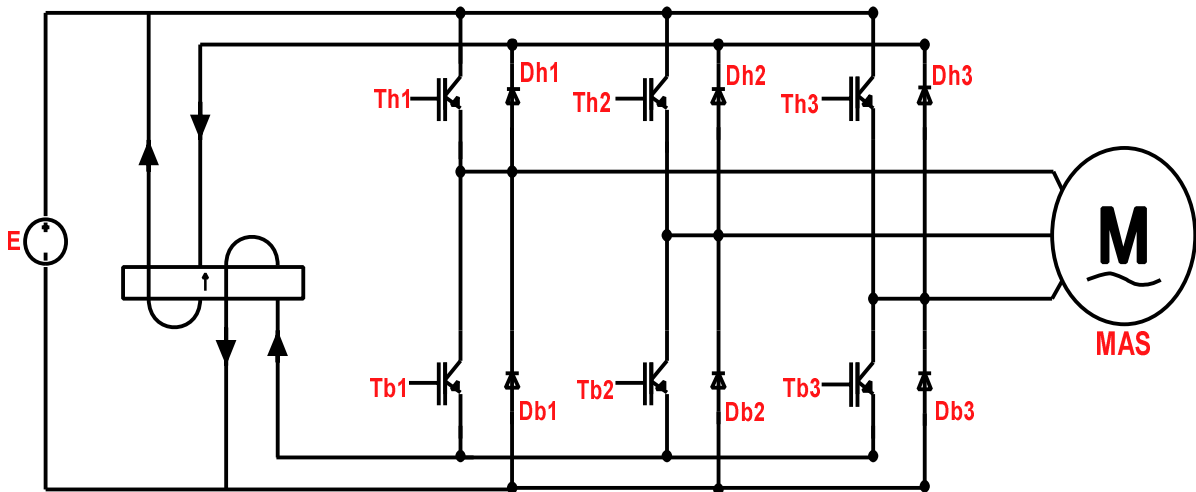


Fig. 3.4 : Schéma de principe de la mesure du courant en tenant compte des phases de commutation.

Pour montrer le fonctionnement de ce schéma, on présente le passage de courant d'un transistor bas (Tb3) au transistor haut du même bras (Th3). Le courant passe d'abord par la diode (Dh3), puis, il est repris par le transistor Th3.

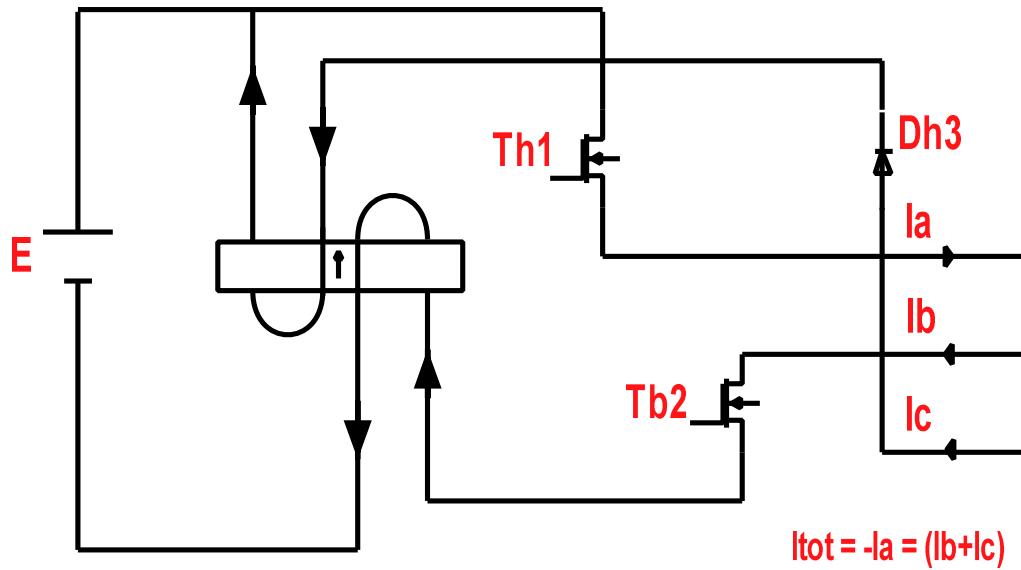


Fig. 3.5 : Configuration de l'onduleur durant la commutation.

On conclue que cette technique de mesure de courant est valable durant les commutations. Une fois, on à accès au courant de phase par la sonde à effet hall, on peut contrôler l'amplitude du courant total.

3.4 Principe de fonctionnement du régulateur de courant :

La méthode de contrôle du courant par hystérésis consiste à maintenir le courant statorique dans une bande fixe autour de sa référence. Le régulateur à hystérésis à partir de la référence du courant ($I_{réf}$), génère les deux limites inférieure (I_{min}) et supérieure (I_{max}) telle que [9] :

$$I_{min} = I_{réf} - \Delta I_b \quad (3.1)$$

$$I_{max} = I_{réf} + \Delta I_h \quad (3.2)$$

Avec :

$$\Delta I_h = \Delta I_b = \Delta I \quad (3.3)$$

Ainsi on obtient les deux limites symétriques et proportionnelles à la référence de courant.

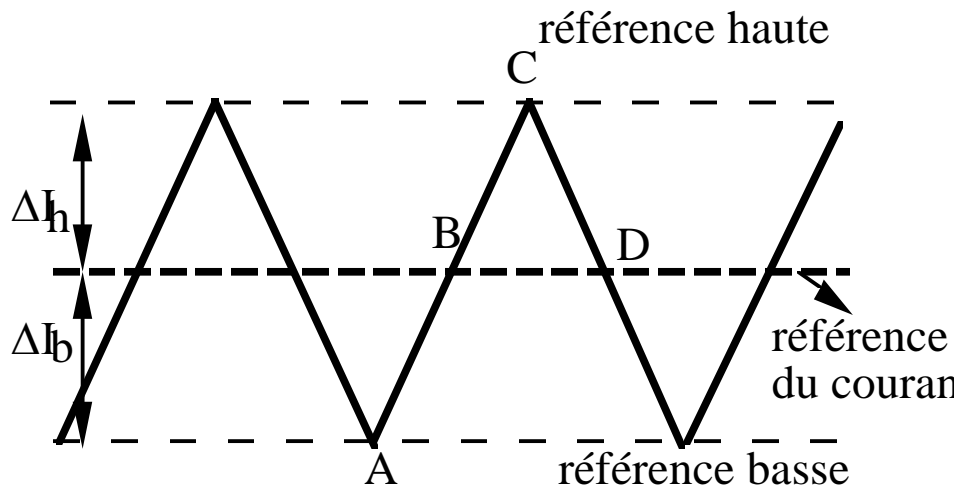


Fig. 3.6 : Allure du courant total de la machine.

Une fois les deux limites I_{\min} et I_{\max} sont générées, on compare le courant réel total par rapport à ses deux limites.

Pour prendre en considération tous les cas possibles, on utilise le tableau de vérité pour récapituler la sortie du comparateur :

Tableau 3.1: Table de vérité de la sortie logique du régulateur.

		S
A	$I < I_{\min}$ $I < I_{\max}$	1
B	$I > I_{\min}$ $I < I_{\max}$	1
C	$I > I_{\min}$ $I > I_{\max}$	0
D	$I > I_{\min}$ $I < I_{\max}$	0

Nous traçons le signal logique de la sortie du régulateur d'après les résultats logiques de la table de vérité (figure 3.7)

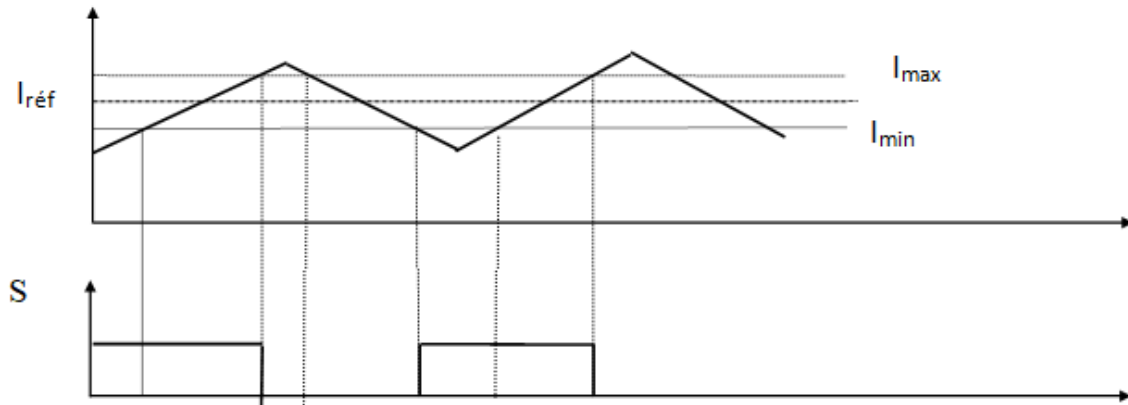


Fig. 3.7 : Allure du signal de sortie du régulateur.

3.5 Résultats de simulation numériques :

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats de simulation avec régulation du courant par hystérésis avec la commande 180° puis par la commande M.L.I. La mesure du courant total sous Simulink est donnée par la somme des courants positif telle que :

Si $i_{as} > 0$ alors $i_1 = I_a$ Sinon $i_1 = 0$.

Si $i_{bs} > 0$ alors $i_2 = I_b$ Sinon $i_2 = 0$.

Si $i_{cs} > 0$ alors $i_3 = I_c$ Sinon $i_3 = 0$.

Donc le courant total à pour expression :

$$I_{tot} = I_a + I_b + I_c \quad (3.4)$$

Avec I_{tot} c'est le courant absorbé par la machine.

Alors la puissance totale absorbée par la machine c'est :

$$P_{abs} = E * I_{tot} \quad (3.5)$$

Le couple électromagnétique peut-être donné par :

$$C_{em} = \frac{P_{abs}}{\omega_r} - \frac{\Sigma pertes}{\omega_r} \quad (3.6)$$

Avec Σ pertes désignent les pertes joules, pertes fer, pertes mécaniques et les pertes par commutation.

Chapitre 3 : Commande par hystérésis d'un moteur asynchrone à cage alimentée par un onduleur de tension

Le schéma bloc de simulation avec la commande 180° avec régulation d'hystérésis est donné par la figure 3.8 :

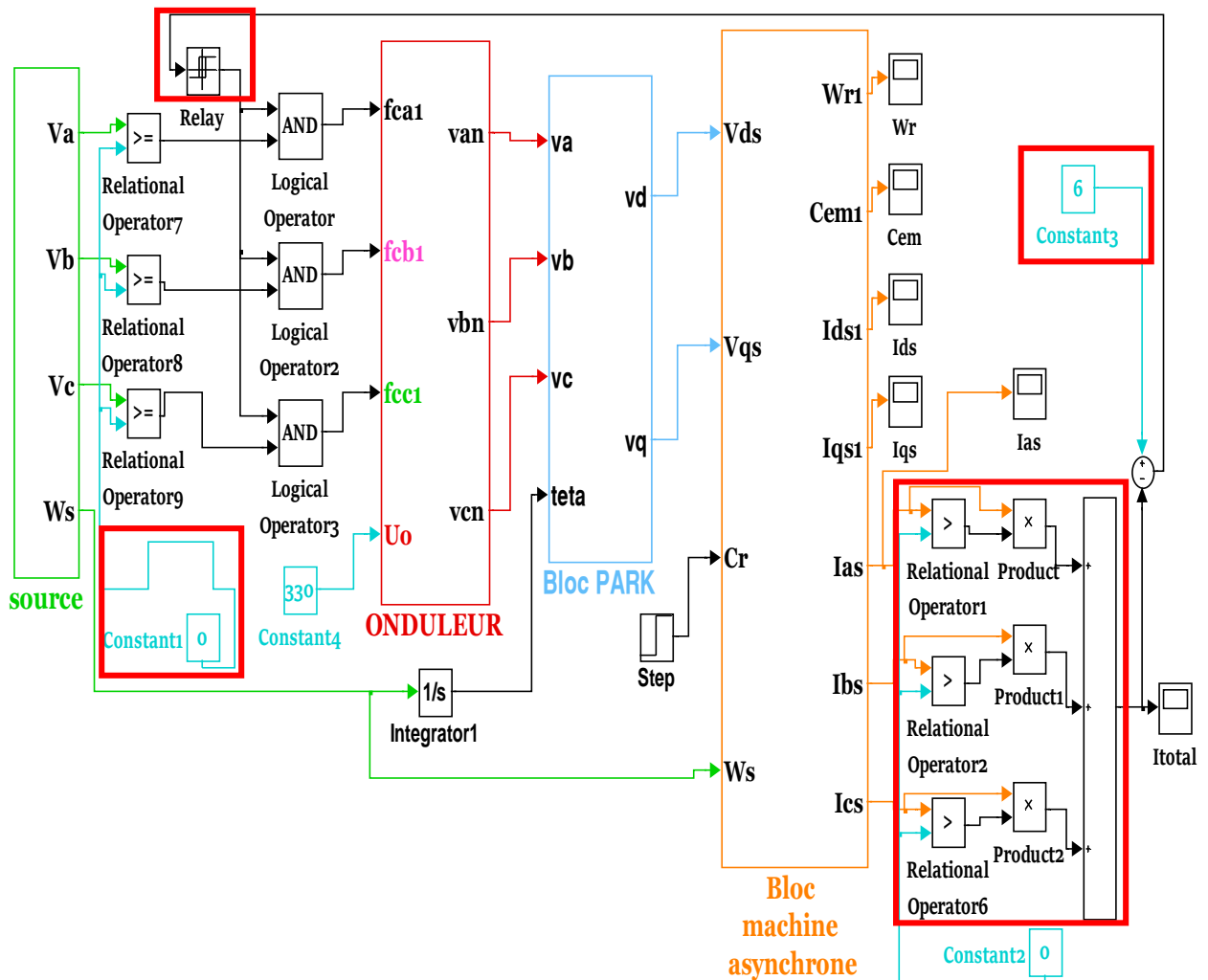


Fig. 3.8 : Schéma Bloc de simulation de la commande 180° avec régulation d'hystérésis sous Simulink.

3.5.1 Résultats de simulation avec régulation d'hystérésis :

Les figures ci-dessous représentent les résultats obtenus lors de la simulation de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension en utilisant la commande 180° avec régulation par hystérésis. Les fig. (3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 et 3.15) représentent respectivement les allures du courant de phase de la machine, de la tension simple à la sortie de l'onduleur en régime transitoire, puis en régime permanent, la tension composée à la sortie de l'onduleur pendant le régime transitoire, puis le régime permanent, le couple électromagnétique de la machine et en dernier l'allure du courant total.

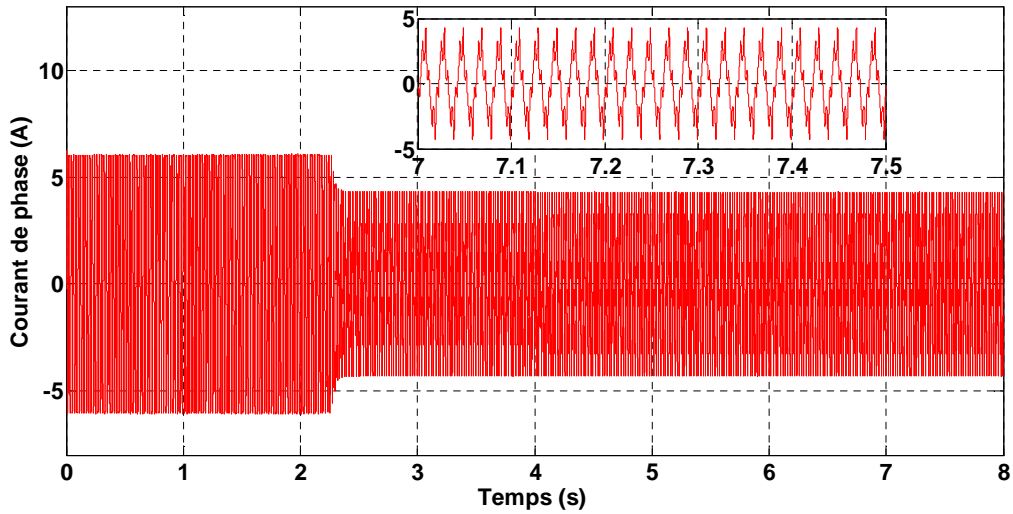


Fig. 3.9 : Allure du courant de phase de la machine.

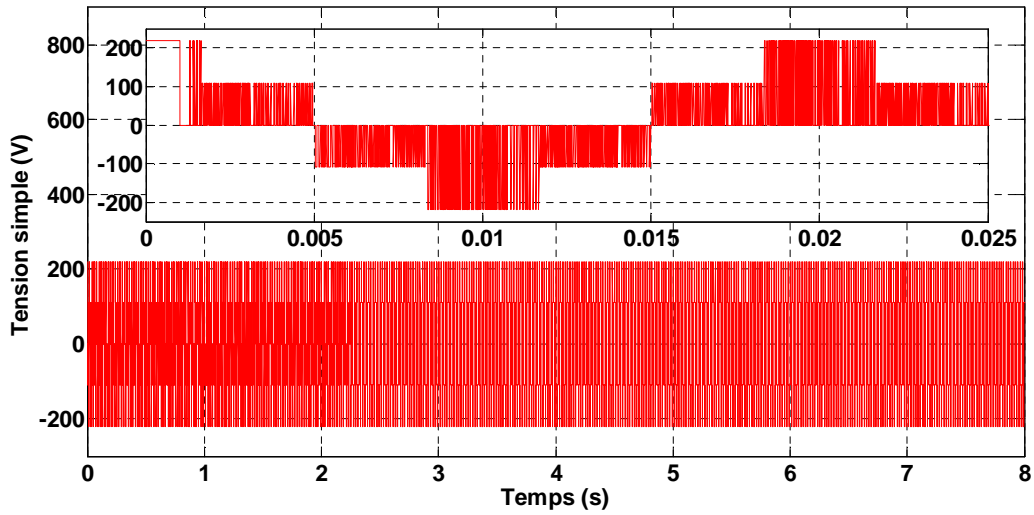


Fig. 3.10 : Allure de la tension simple de l'onduleur de tension pendant la phase de démarrage.

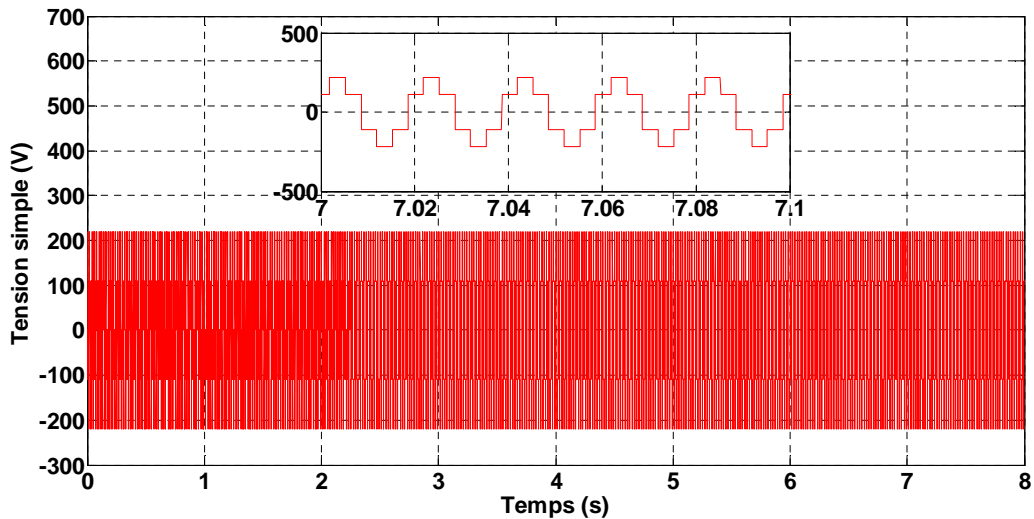


Fig. 3.11 : Allure de la tension simple de l'onduleur de tension au régime permanent.

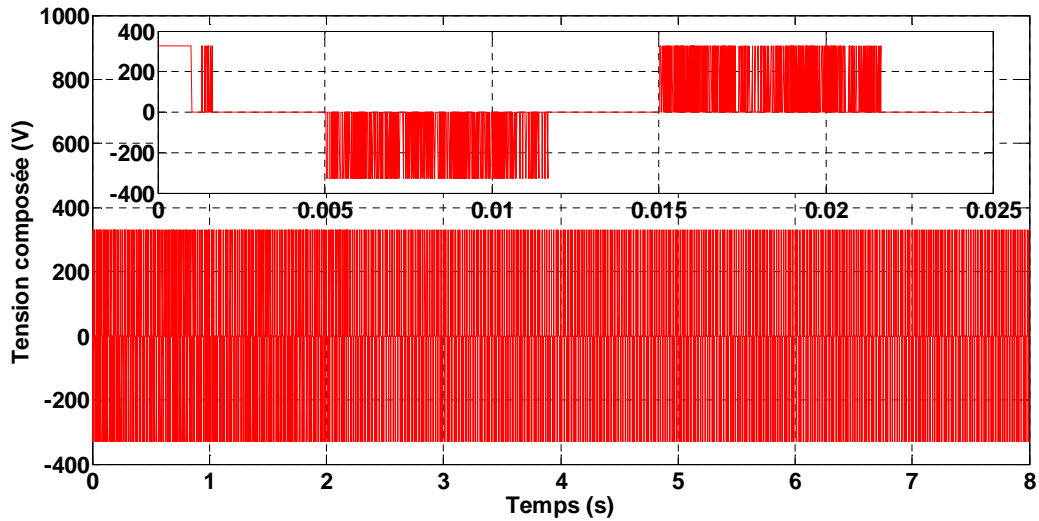


Fig. 3.12 : Allure de la tension composée de l'onduleur pendant la phase de démarrage.

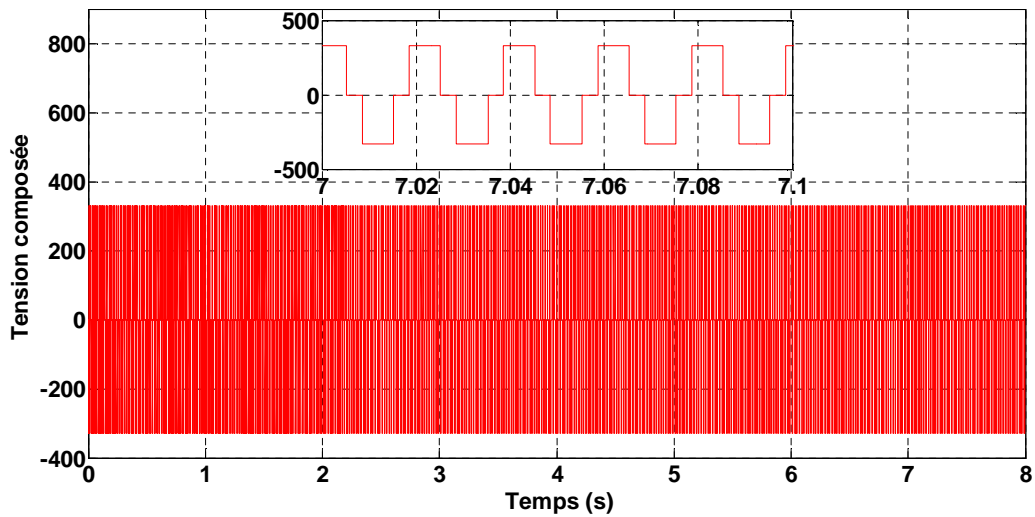


Fig. 3.13 : Allure de la tension composée de l'onduleur au régime permanent.

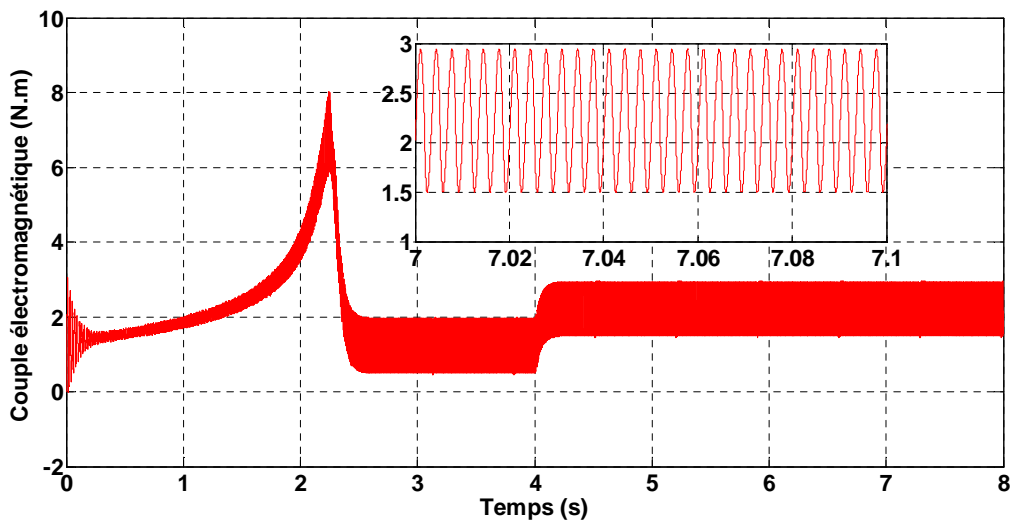


Fig. 3.14 : Allure du couple électromagnétique de la machine.

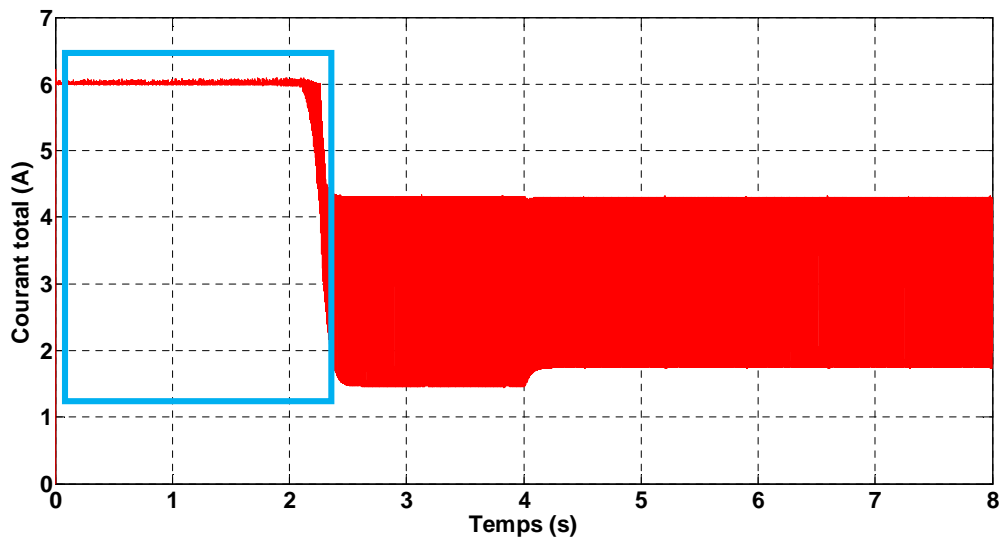


Fig. 3.15 : Allure du courant total.

3.5.2 Interprétation des résultats :

On constate que courant total absorbé par la machine est limité à 7A fig. 3.15, de même que le couple électromagnétique fig. 3.14. On remarque aussi que le courant de charge n'atteint pas 6A et que le courant n'est contrôlé s'il est au-dessous de 5A.

3.6 Résultats de simulation avec la commande M.L.I :

3.6.1 Schéma bloc de simulation sous l'environnement Simulink :

La fig. 3.16 montre le schéma bloc de simulation sous l'environnement Simulink d'une machine asynchrone, alimentée par onduleur de tension commandée par M.L.I avec régulation d'hystérésis.

Chapitre 3 : Commande par hystérésis d'un moteur asynchrone à cage alimentée par un onduleur de tension

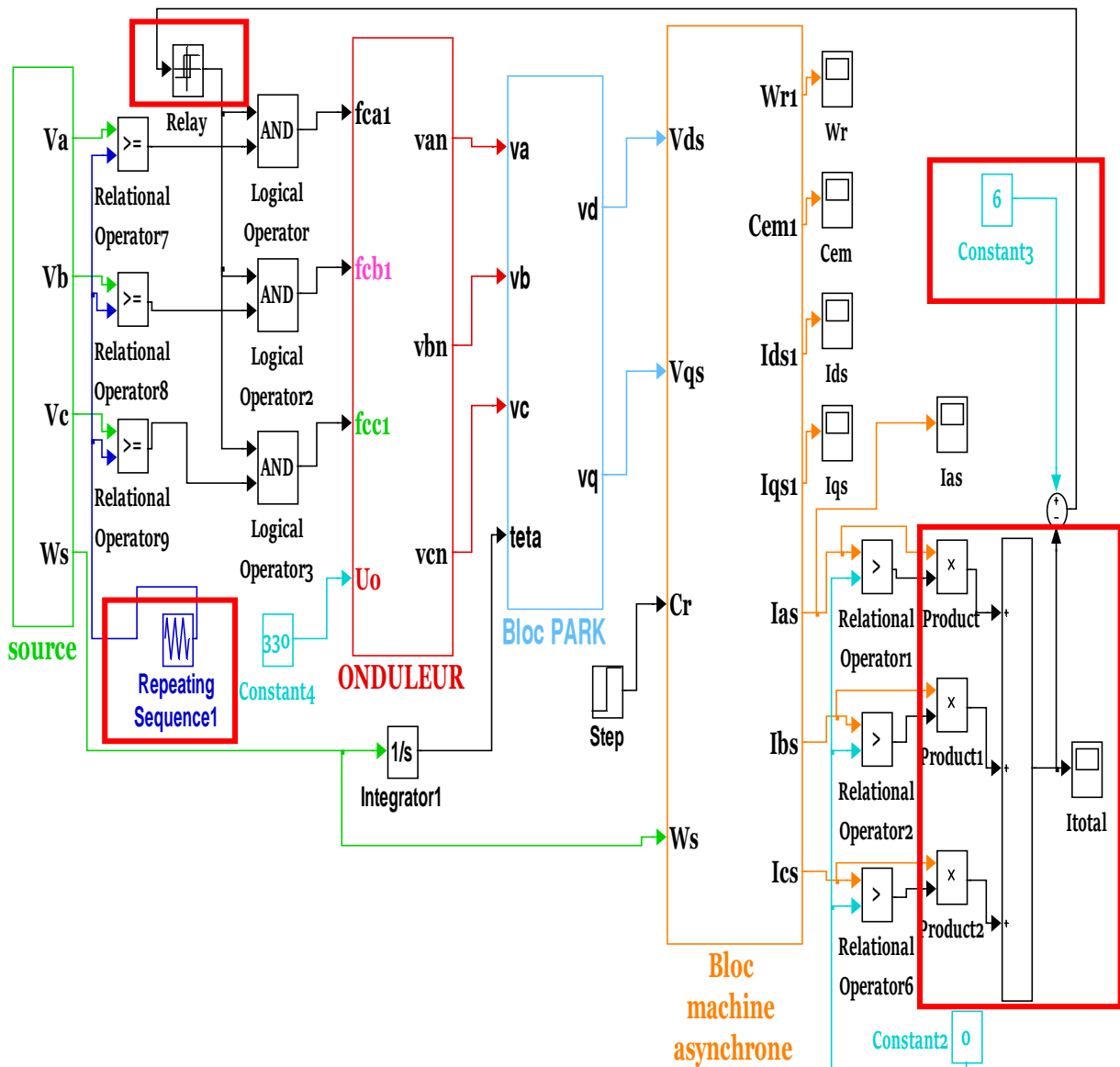


Fig. 3.16 : Schéma de simulation de la commande M.L.I avec régulation d'hystérésis sous Simulink.

Les figures ci-dessous représentent les résultats obtenus lors de la simulation de la machine asynchrone, alimentée par un onduleur de tension en utilisant la commande M.L.I avec régulation par hystérésis. Les figures (3.17, 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21) représentent respectivement les allures du courant de phase de la machine, de la tension simple à la sortie de l'onduleur, la tension composée à la sortie de l'onduleur, le couple électromagnétique de la machine, et en dernier l'allure du courant total.

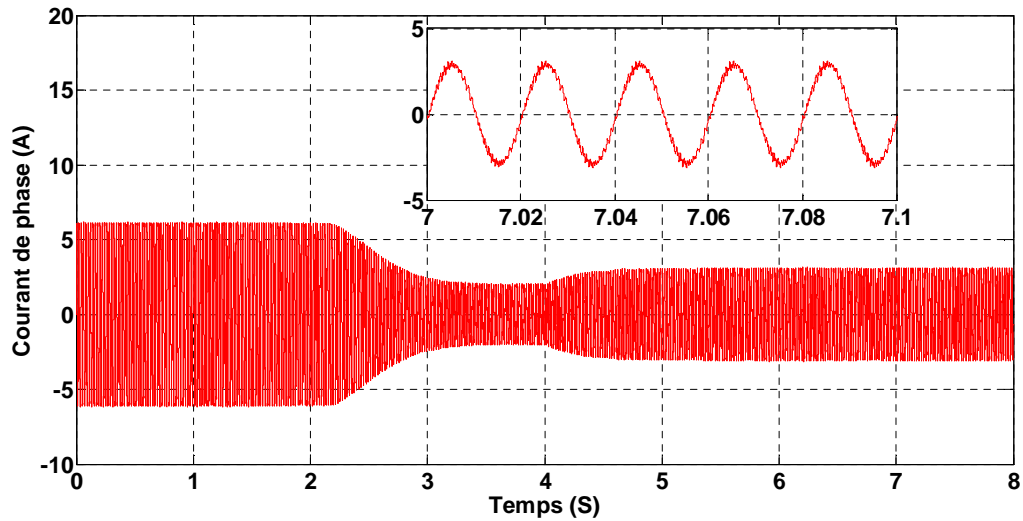


Fig. 3.17 : Allure du courant de la machine.

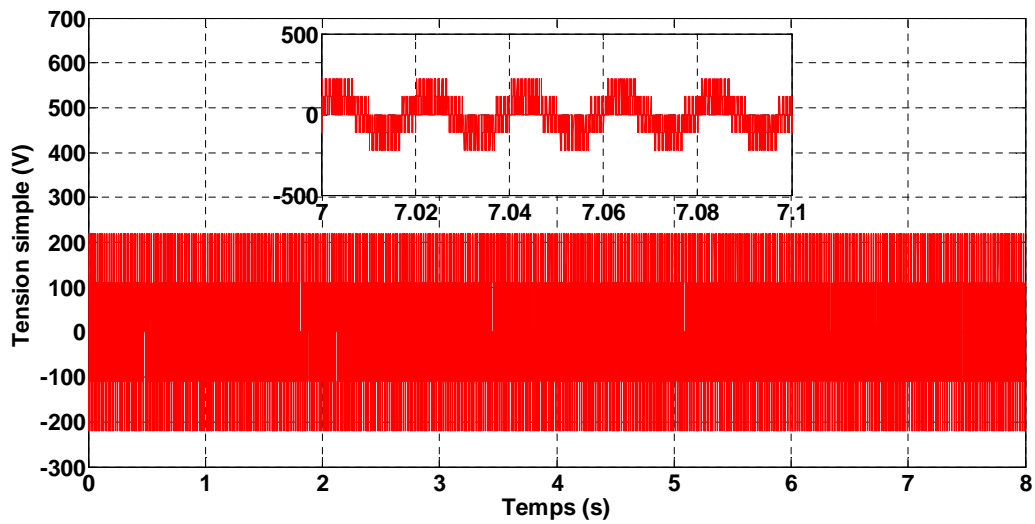


Fig. 3.18 : Allure de la tension simple à la sortie de l'onduleur.

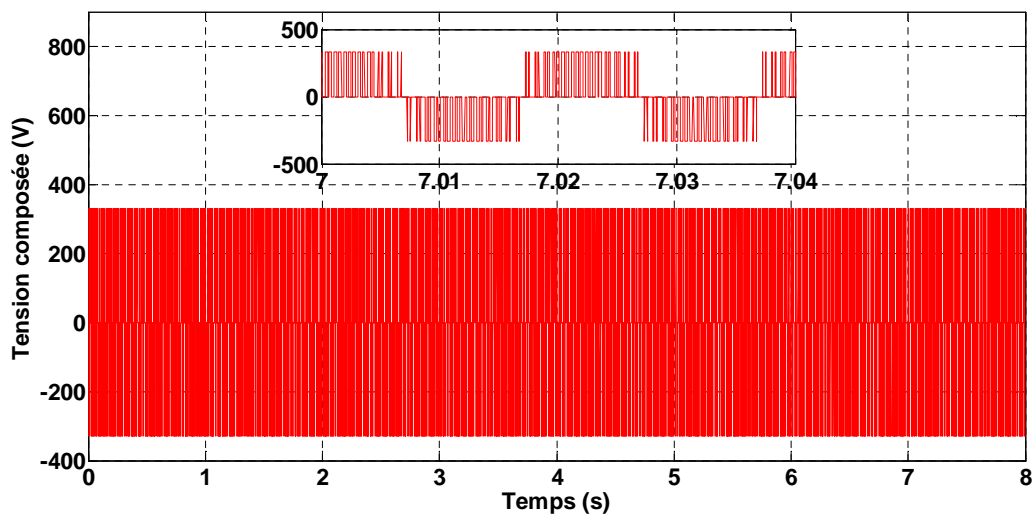


Fig. 3.19 : Allure de la tension composée à la sortie de l'onduleur.

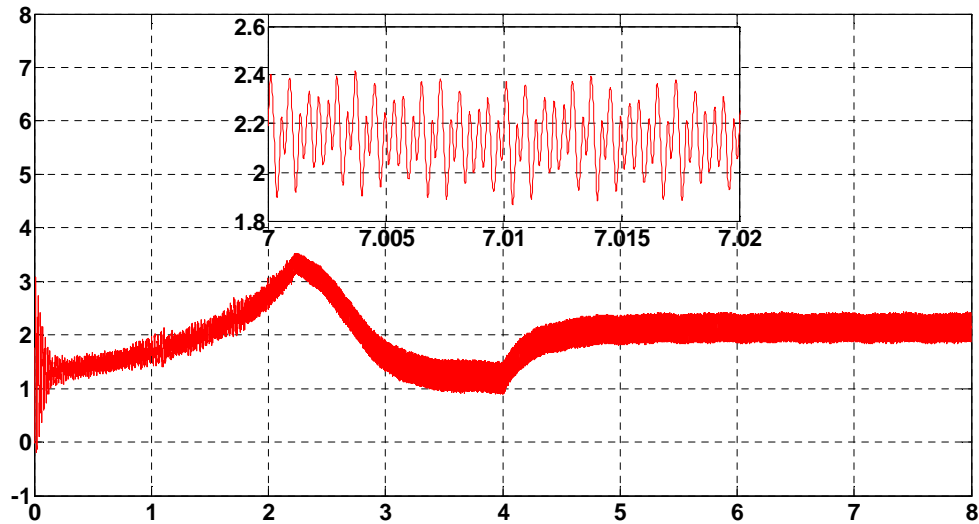


Fig. 3.20 : Allure du couple électromagnétique de la machine.

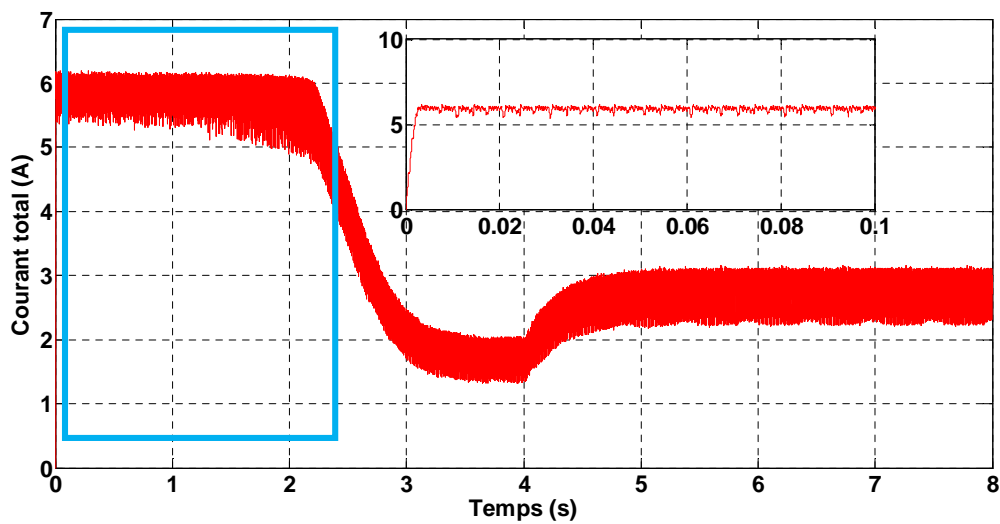


Fig. 3.21 : Allure du courant total.

3.6.2 Interprétation des résultats :

On constate que courant total absorbé par la machine est limité à 7A fig. 3.21, de même que le couple électromagnétique figure 3.20. On remarque aussi que le courant de charge n'atteint pas 6A et que courant n'est contrôlé s'il est au-dessous de 5A.

3.7 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la méthode de mesure du courant total ainsi qu'aux résultats de simulation avec régulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à commande 180° et à modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) en boucle ouverte. Nous constatons que le courant de démarrage a été limité à la valeur désirée.

Chapitre 4

**Réalisation pratique de la
carte de commande**

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons décrire les circuits utilisés pour la réalisation le circuit de commande de l'onduleur de tension commandé en courant.

Le circuit de commande composé de :

- La commande logique (commande 180°).
- Le circuit du régulateur à hystérésis.

4.2 Le circuit de commande :

Le circuit de commande dont le schéma est présenté sur la (figure 4.1) et pour générer les trois signaux déphasés de 120° ainsi que leurs complémentaires, et que les transistors haut dépend des trois signaux (C1, C2, et C3) et de signal hystérésis lors de la régulation dont nous allons décrire ces différent circuits [13].

On présente le circuit logique correspondant à cette commande.

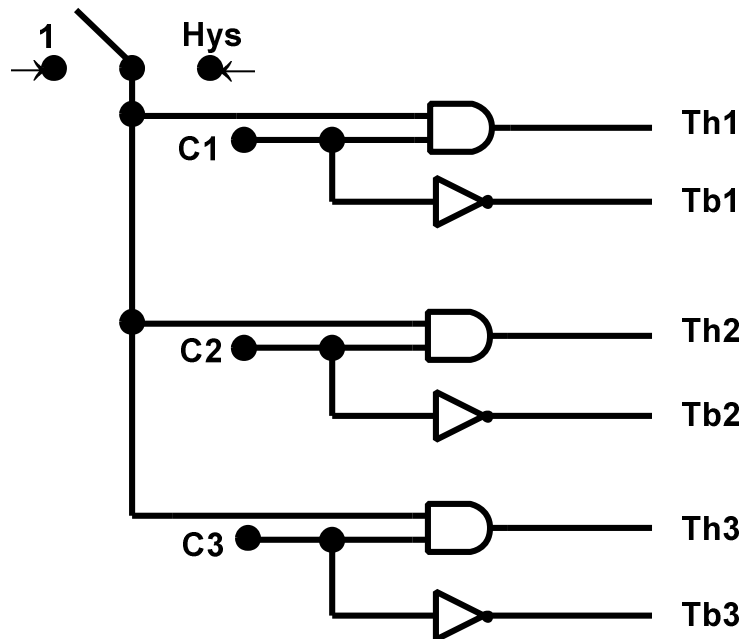


Fig. 4.1: Circuit logique de la commande des transistors.

4.3 Commande logique de l'onduleur :

Le type logique de la commande utilisée, est la commande 180°.

4.3.1 Commande 180° :

Nous étudions dans le circuit de commande de l'onduleur, les signaux de commande sans régulation de courant par hystérésis, c'est-à-dire les signaux délivrés par le compteur CI4018 (C1, C2, C3).

Pour la commande de 180°, les signaux de commande de l'onduleur sont déterminés comme suit :

$$\text{Th1} = \text{C1} \qquad \text{Tb1} = \bar{\text{C1}}$$

$$\text{Th2} = \text{C2} \qquad \text{Tb2} = \bar{\text{C2}}$$

$$\text{Th3} = \text{C3} \qquad \text{Tb3} = \bar{\text{C3}}$$

La séquence de conduction de l'onduleur sur une période comme a été représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Séquence de conduction de l'onduleur sur une période électrique [9].

Signaux			Etat logique des interrupteurs de l'onduleur					
C1	C2	C3	Th1	Th2	Th3	Tb1	Tb2	Tb3
1	0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	1	1	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	1	0

4.3.2 Le circuit de commande logique (commande 180°) :

Le circuit est composé de compteur diviseur (CI4018) et d'un timer (NE555) :

4.3.2.1 Le timer NE555 :

Le timer NE555 est utilisé comme un oscillateur en mode astable [14], permet d'obtenir un signal carré périodique, qui active le circuit intégré CI4018.

On représente le schéma de circuit NE555 en mode astable dans la figure 4.2:

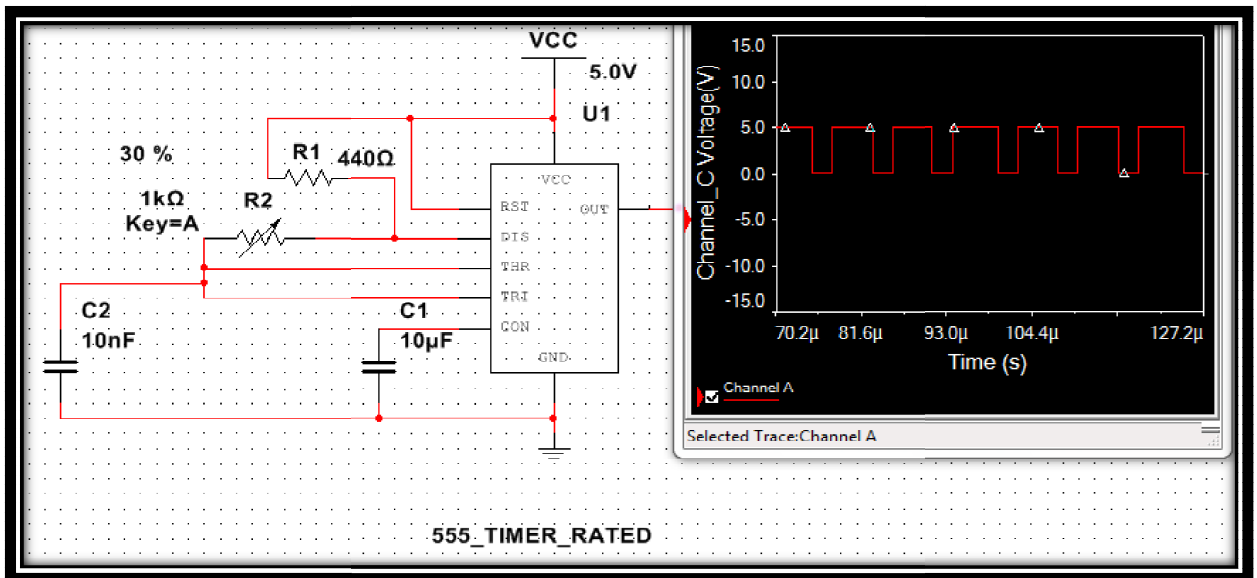


Fig. 4.2 : Schéma du circuit NE555 en mode Astable.

4.3.2.2 Le Compteur diviseur :

Le circuit intégré CI4018 [15] est un compteur qui génère trois signaux de commande (C1, C2, C3) déphasé de $2\pi/3$ l'un par rapport à l'autre en créneaux, à partir de signal carré de NE555. On représente le schéma de circuit intégré CI4018 sur la figure 4.3 :

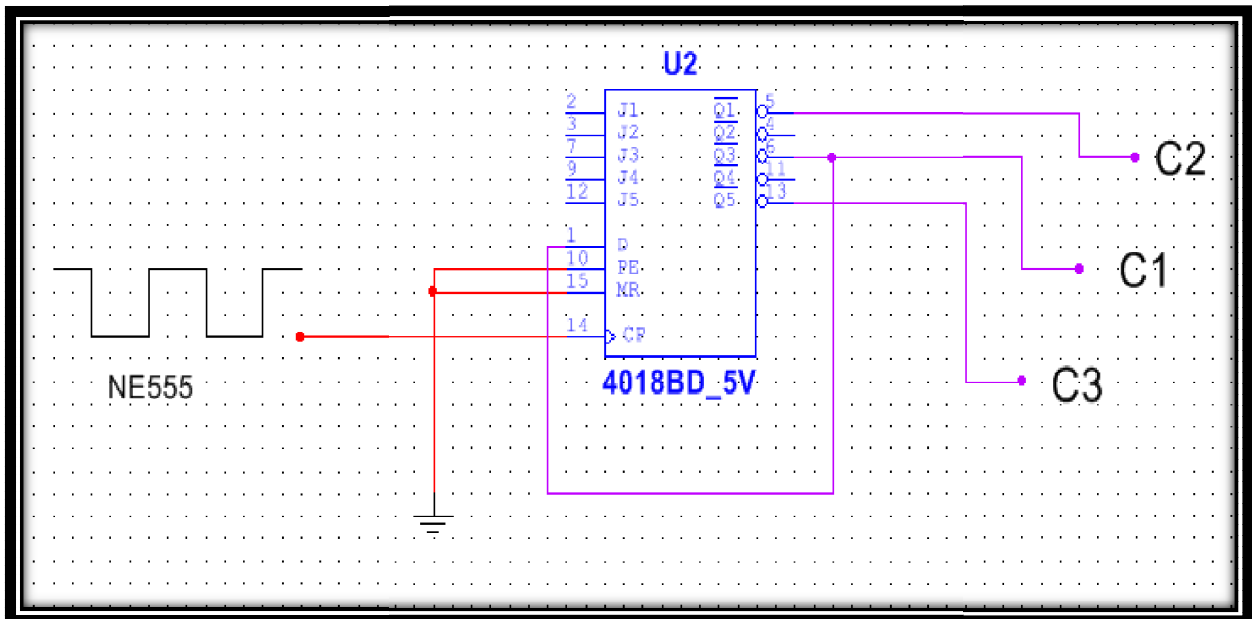


Fig. 4.3 : Schéma du circuit intégré CI4018.

La figure 4.4 : Ci-dessous représente les trois signaux (C1, C2, C3) de commande générée par le CI4018.

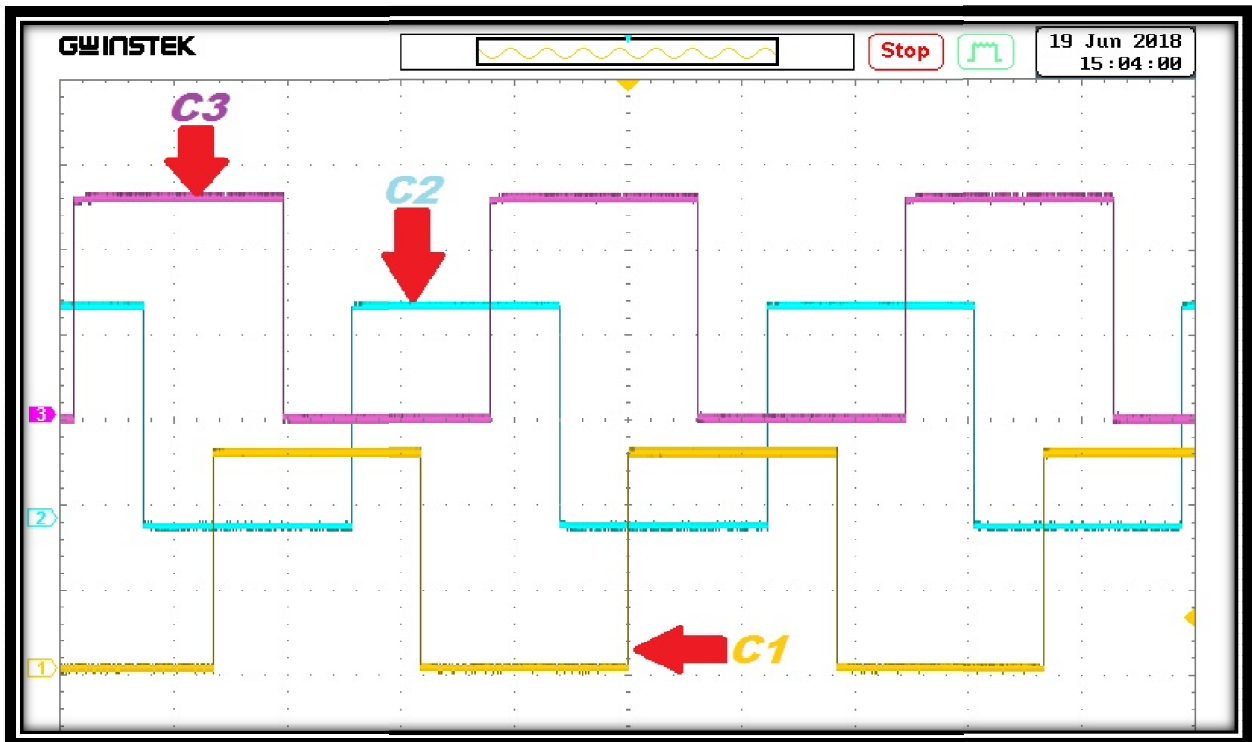


Fig. 4.4 : Signaux de sortie du CI4018.

4.4 Régulateur à hystérésis :

Pour le régulateur hystérésis on réalise un montage de trigger de schemit inverseur avec un comparateur (lm 358) [16], qui compare le courant mesuré dans la sortie de l'onduleur par un capteur de courant que nous avons présenté sous forme d'un signal triangulaire généré par un générateur de basse fréquence (G.B.F), comme dans la (figure 4.5) .

Le principe de fonctionnement :

Si $V_{in+} > V_{in-}$ alors $V_s = 5v$ donc $Hys = 1$

Si $V_{in+} < V_{in-}$ alors $V_s = 0v$ donc $Hys = 0$

Nous présentons le schéma électronique de régulateur de courant dans La figure ci-dessous :

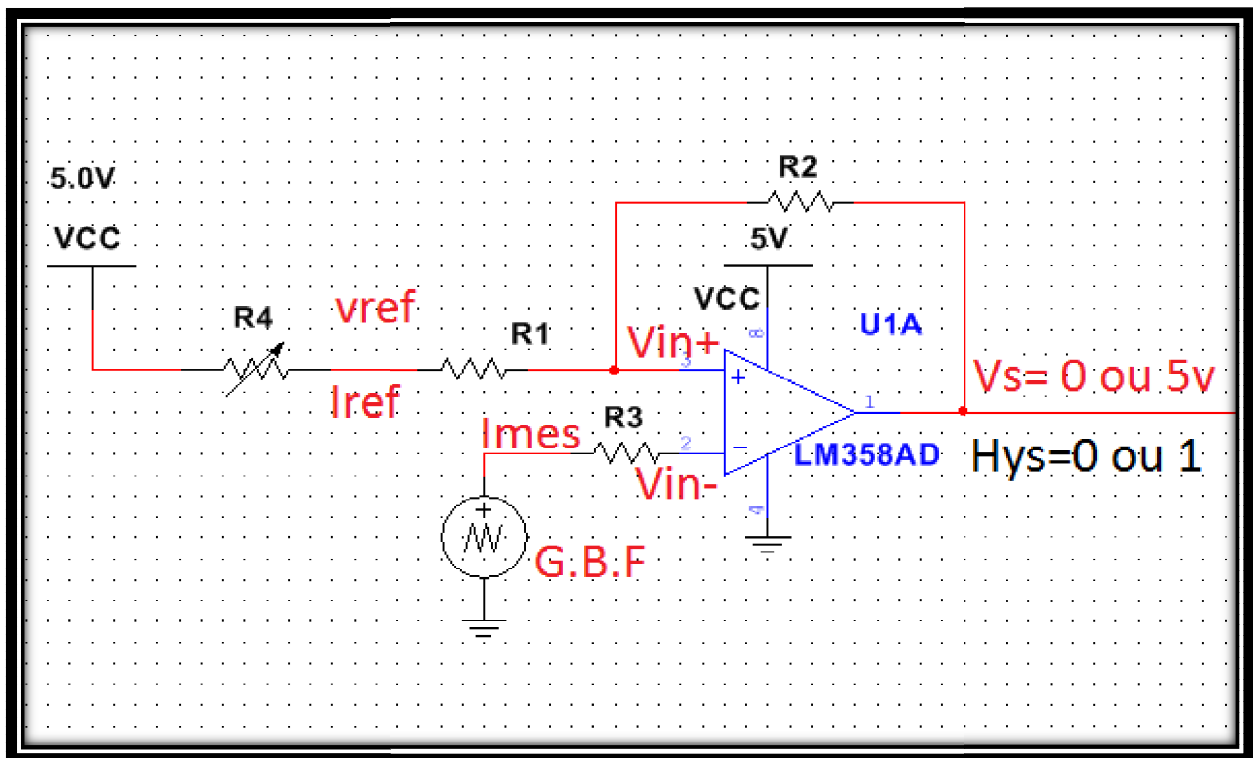


Fig. 4.5 : Schéma électronique du régulateur de courant.

Lorsqu'on impose le courant de référence (I_{ref}), le comparateur crée deux seuils autour de sa référence dans la porte non inverseuse (V_{in+}), un seuil bas (I_{min}) et un seuil haut (I_{max}) entre les deux c'est la bande d'hystérésis (Δh), comme le montre la figure 4.6 :

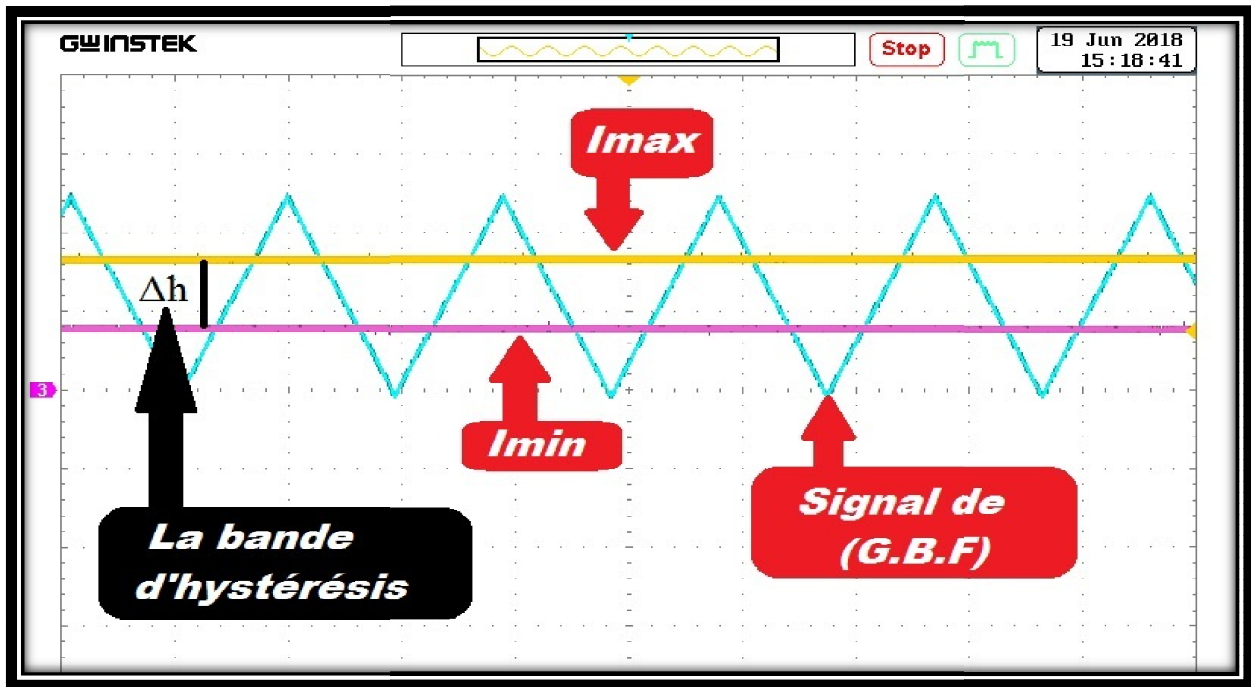


Fig. 4.6 : La bande d’hystérésis créée par le comparateur.

Au début, la sortie du comparateur $V_s=0v$, il compare le signal triangulaire dans la porte inverseuse par rapport au seuil bas I_{min} dans la porte non inverseuse, si $V_{in+} > V_{in-}$, il doit y’avoir à la sortie $V_s=5v$ et dans la porte non inverseuse sa passera au seuil haut I_{max} , la comparaison sa sera par rapport I_{max} , si $V_{in+} > V_{in-}$ il doit y’avoir la même valeur à la sortie $V_s=5V$ jusqu’à le signal triangulaire dépassera le seuil haut $V_{in+} < V_{in-}$ la sortie sa sera $V_s=0v$ et dans la porte non inverseuse revient au seuil bas I_{min} , $V_{in+} < V_{in-}$ donc la sortie est la même $V_s=0v$ jusqu’à le signale triangulaire sera inferieure au seuil bas I_{min} , la sortie $V_s=5v$ et la comparaison sera avec le seuil haut I_{max} à la porte non inverseuse, et à la fin la sortie varie entre $0v$ et $5v$ dépend de variation signal de G.B.F et la bande hystérésis comme le montre la figure 4.5 :

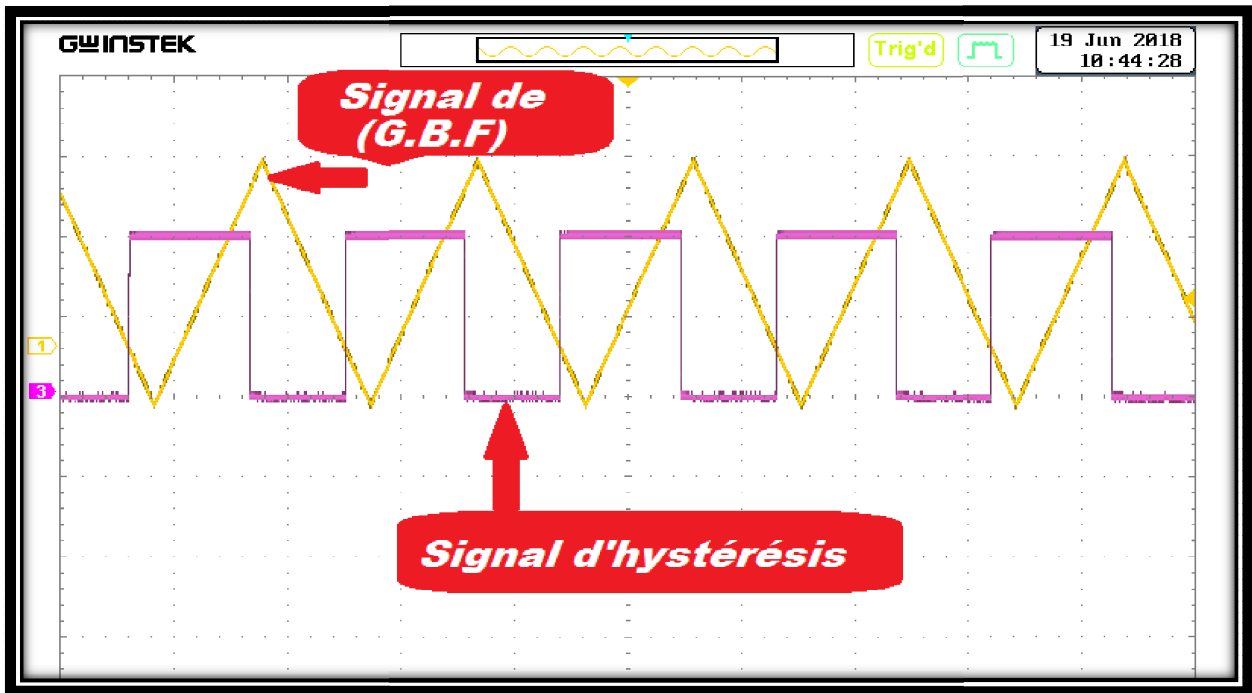


Fig. 4.7 : Le signal de sortie du circuit hystérésis.

On représente les signaux à la sortie de la carte de commande qui dépend des signaux logique 180° et de signal hystérésis comme le montre la figure ci-dessous :

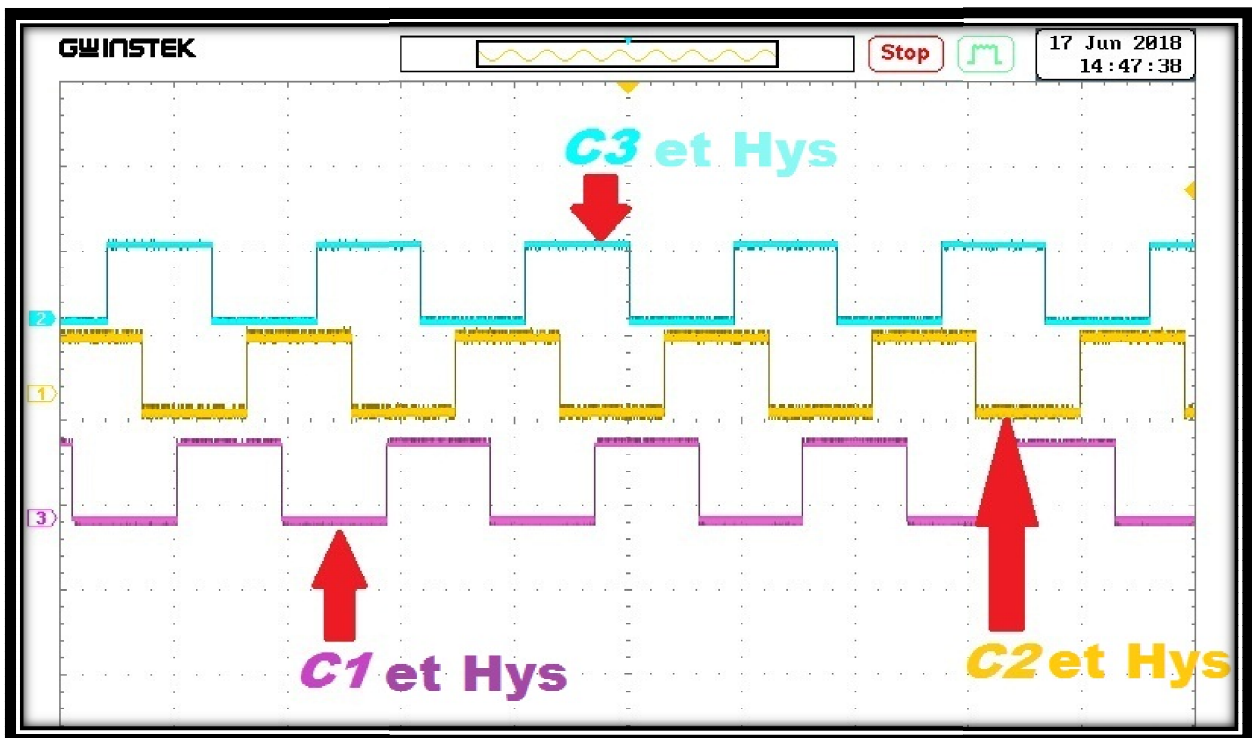


Fig. 4.8 : Les signaux à la sortie de la carte de commande.

Chapitre 4 : Réalisation pratique de la carte de commande

La figure ci-dessous représente la carte électronique de circuit de commande réalisée au sein de laboratoire LTII :

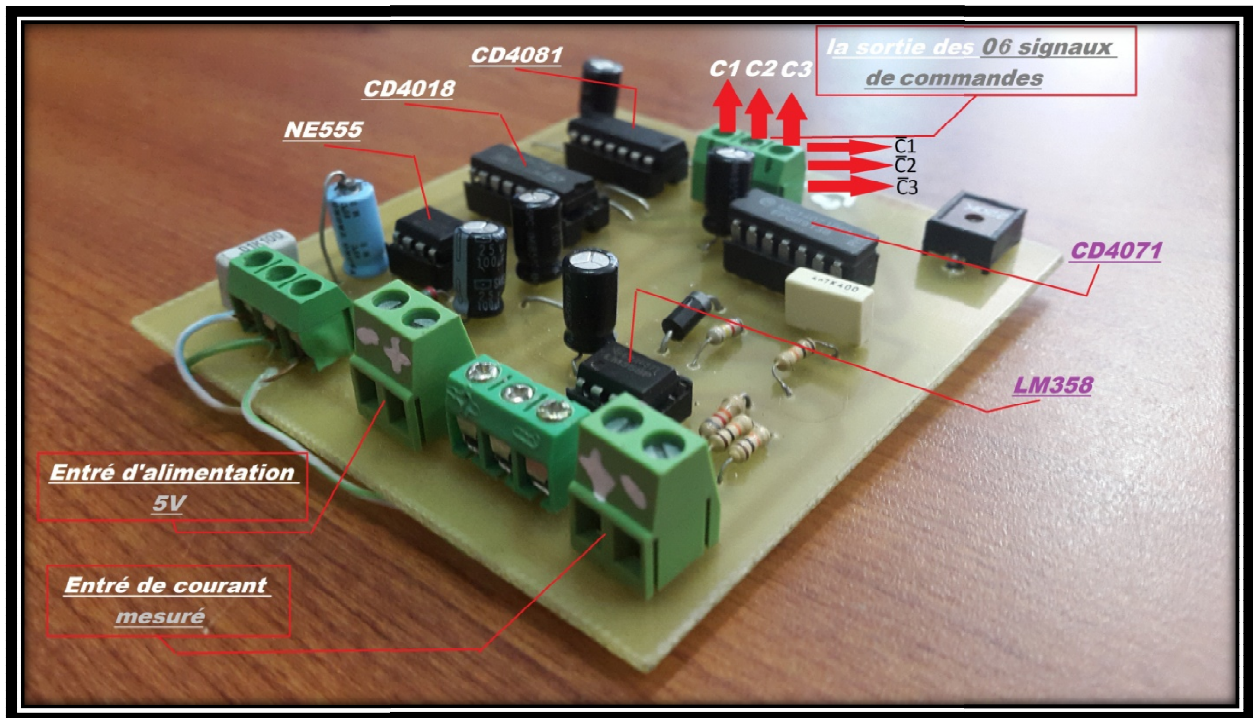
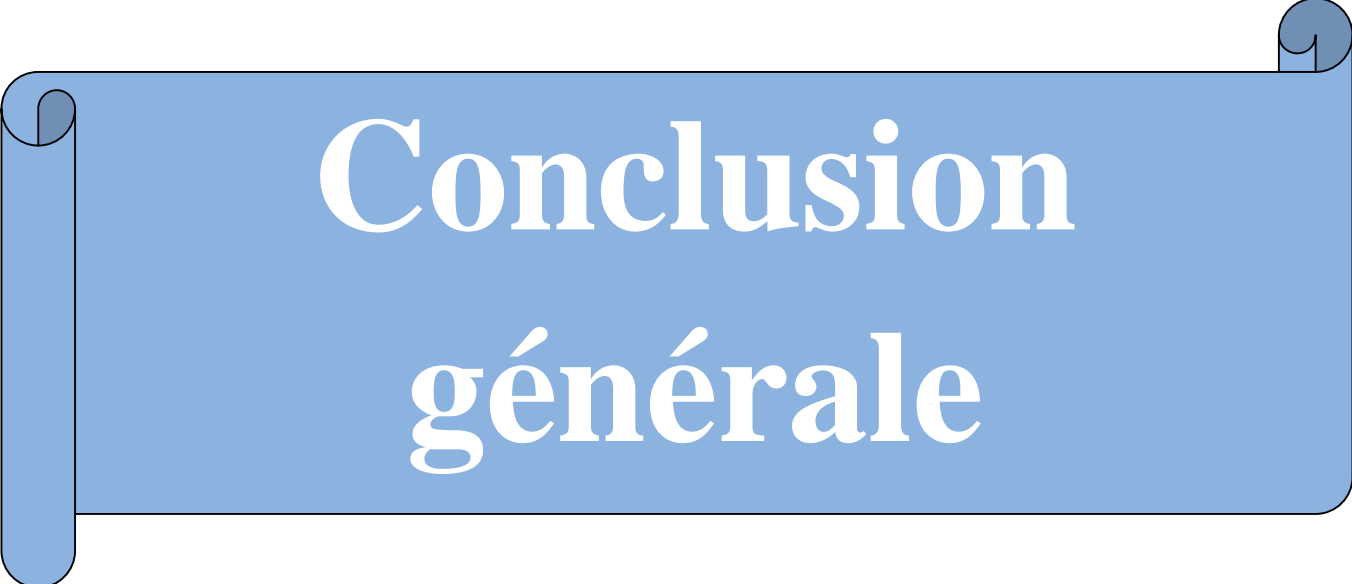


Fig. 4.9 : la carte électronique du circuit de commande.

4.5 Conclusion :

le principe de fonctionnement du régulateur de courant a été expliqué en détail dans chapitre 3, dans cette partie la réalisation du circuit de commande composé de la commande logique 180° et de régulateur par hystérésis a été faite, d'après les résultats des signaux de la carte de commande on peut juger acceptable les résultats obtenus et cela après comparaison avec la théorie.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, consistait à l'étude de la régulation du courant total à l'entrée de l'onduleur et la réalisation de la carte électronique de commande qui permet de générer les signaux de la commande logique 180° et la régulation par hystérésis.

Dans le premier chapitre, on a donné quelques méthodes de variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que les méthodes utilisées pour réguler le courant dans le cas des onduleurs de tension.

Dans le second chapitre, on a donné la modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil ainsi que celle de l'onduleur triphasé de tension, et après simulation nous avons présenté les résultats de simulation.

Dans le chapitre trois, nous avons présenté la méthode de mesure du courant total, après une étude théorique du fonctionnement du régulateur à hystérésis, et après on a présenté les résultats de simulation, et on remarque que le courant de démarrage a été régulé à la valeur désirée.

Dans le dernier chapitre, on a réalisé une carte électronique de commande qui comprend la commande logique 180° ainsi que le régulateur à hystérésis et les résultats obtenus des tests pratiques effectués sur cette carte s'approche des résultats connus en théorie.

En perspectives de ce travail, nous suggérons de :

Continuer la réalisation complète de l'onduleur de tension ainsi que d'utiliser d'autre type de commande comme la commande M.L.I. et tous cela en pratique.

Bibliographie :

- [1] K. Ouari, « Commande robuste de la vitesse des machines électriques alimentées par convertisseur statiques : moteur à courant continu, moteur synchrone-autopiloté », Thèse de Magister, Université A. Mira-Béjaia, 1998.
- [2] G. Séguier, F. Labrique, P. Delarue, « Électronique de puissance, Structure, commandes, applications », Livre Edition Dunod, 2015.
- [3] C. W. Lander, « Electronique de puissance, Cours et exercices – 205 problèmes résolus », Livre Edition EDISCIENCE international, 1994.
- [4] G. Séguier, F. Notelet, « Électrotechnique Industrielle » Livre Edition Technique et Documentation Lavoisier, 1977.
- [5] T. Wildi, G. Sybille, « Electrotechnique », Livre Edition de boeck, 2005.
- [6] L. Lasne, « Électrotechnique, cours et exercices corrigés », Livre Edition Dunod, 2008
- [7] J. Bonal, « Entraînement électriques à vitesse variable volume 1, Rappels d'électrotechnique et de mécanique les procédés de variation de vitesse », Livre Edition Technique et Documentation Lavoisier, 1997.
- [8] B. Metidji, « Commande robuste des moteurs à courant alternatif alimentés par un convertisseur matriciel », Thèse de Doctorat. Université A. Mira-Béjaia, 2013.
- [9] T. Rekioua, « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimant permanents », Thèse de doctorat à l'Institut national polytechnique de lorraine, France, 1991.
- [10] Z. Mokrani « Application des techniques de commande avancées aux machines électriques dédiées à la traction électrique », Thèse de Doctorat. Université A. Mira-Béjaia, 2016.
- [11] D. Chekima, « Commande d'un moteur asynchrone par logique floue », Mémoire de Master, Université d'El-Oued, 2014.
- [12] G. Segulier, F. Labrique « Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion continu – alternatif ». Volume 4, Lavoisier TEC & DOC, 1989

- [13] H, Kroune, H, Zadi « Régulateur de courant d'un onduleur de tension commandé par hystérésis », Mémoire d'ingénieur d'État. Université A. Mira-Béjaia, 2000.
- [14] Texas Instruments Inc, « xx555 Precision Timers ».
- [15] Texas Instruments Inc, « CMOS Presettable Divide-By-'N' Counter CD4018 types ».
- [16] Texas Instruments Inc, « LMx58-N low-Power, Dual-Operational Amplifiers ».

ANNEXE A

LES PARAMÈTRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE

Paramètres	Symboles	Valeurs
Nombre de paire de pole	P	2
Résistance Statorique	R_s	4.85Ω
Résistance Rotorique	R_r	3.805Ω
Inductance Mutuelle	M	0.258H
Inductance Statorique et Rotorique	$L_s=L_r$	0.274H
Moment Inertie	J	0.031 kg.m ²
Frottement	f	0.0081 N.m.s ²

Résumé :

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre de la régulation du courant total dans le cas d'un onduleur de tension. Après avoir donné quelques techniques de variation de vitesse du moteur asynchrone à cage d'écureuil et les méthodes de régulation du courant dans le cas des onduleurs de tension (contrôle du courant par hystérésis et M.L.I). Ensuite nous avons passé à la modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que la modélisation de l'onduleur de tension, après nous avons simulé le système composé du moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension sous le logiciel Matlab/Simulink en appliquant la commande plein onde (commande 180°) puis la commande par modulation de la largeur d'impulsion (M.L.I), les résultats obtenus ont été interprétés. Après nous avons présenté la méthode de mesure du courant total par un capteur à effet Hall, ainsi que le principe de fonctionnement du régulateur par hystérésis, nous avons après simulé le système précédent mais cette fois ci avec régulation par hystérésis en utilisant les même commande, les résultats obtenus ont été interprétés. En dernier nous avons essayé de réaliser une carte électronique de commande qui réalise la fonction de la commande logique 180° ainsi que la régulation par hystérésis, les résultats obtenus lorsque cette dernière à été testée s'approche des résultats connus en théorie.

Mots clés :

Régulation du courant par hystérésis, moteur asynchrone à cage d'écureuil, onduleur de tension, Matlab/Simulink, carte électronique de commande.

Abstract:

The work we presented in this paper is part of the control of the total current in the case of a voltage source inverter. After giving some speed variation techniques of squirrel cage induction motor and current control methods in the case of voltage source inverters (hysteresis current control and P.W.M). Then we proceeded to the modeling of the asynchronous squirrel cage motor, as well as the modeling of the voltage inverter, after we simulated the composed system of the asynchronous motor powered by a voltage inverter under the software Matlab/Simulink in applying the full wave command (180° command) and then the pulse width modulation control (P.W.M), the results obtained have been interpreted. After we presented the method of measurement of the total current by a Hall effect transducer, as well as the operating principle of the hysteresis regulator, we simulated the previous system but this time with hysteresis control using the same command, the results obtained have been interpreted. Lastly, we have tried to create an electronic control board that performs the function of the 180° logic control as well as the hysteresis control, the results obtained when the latter has been tested approaches the results known in theory.

Keywords:

Hysteresis current control, squirrel cage induction motor, voltage source inverter, Matlab/Simulink software, electronic control board.