

République Algérienne Démocratique Et Populaire



Ministère de L'enseignement Supérieure
Et De La Recherche Scientifique



Centre Universitaire
D' EL-OUED
Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
En Électrotechnique

Option: Réseaux électriques

Présenté par :

Deheb Abdelghani Rechdane Abdelkader Rehouma Messaoud

Thème

*Amélioration de l'alimentation du
moteur asynchrone par l'utilisation de
l'onduleur MLI*

Soutenue publiquement le 30/06/2008 devant le jury composé de:

Mr :	Mohamdi Messaoud	Centre universitaire d'El- Oued	Président
Mr :	Zellouma Laid	Centre universitaire d'El- Oued	Encadreur
Mr :	Bessousse N.Edine	Centre universitaire d'El- Oued	Examineur
Mr :	Mosbahi Nadir	Centre universitaire d'El- Oued	Examineur

Année universitaire: 2007/2008

Remerciements

Ce travail a été réalisé au centre universitaire d'El -Oued du département de Génie Electrique, sous la direction Scientifique de Monsieur L.ZELOUMA

Nous remercions, notre encadreur Mr L.ZELOUMA Maître Assistant, Mr D BEN ATTOUS Maître de Conférences au centre universitaire d'El Oued, Mr A .CHEMSA Chargé de Cours au centre universitaire d'El- Oued. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre très sincères reconnaissances pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Nous remercions également Mr S. GABOUSSA, Enseignant au centre universitaire d'El- Oued,

Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

الإهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات
نهدي هذا العمل المتواضع
الى المغفور له بأذن الله تعالى

بن علي عبد النور

راجين من الله عزوجل ان يتغمده برحمته
و يسكنه فسيح جناته

◀ رشدان. عبد القادر

◀ رحومه مسعود

◀ ذهب. عبد الغني







Sommaire

Introduction Générale

Chapitre I : Modélisation de la machine asynchrone à cage.....	03
I-1 Introduction.....	04
I-2 Avantages du moteur asynchrone.....	04
I-3 Description de la machine asynchrone a cage.....	04
I-3-1 Le stator.....	04
I-3-2 Le rotor.....	05
a) Rotor bobiné.....	05
b) Rotor à cage.....	05
I-4 Théorie du fonctionnement.....	05
I-5 Réglage de la vitesse de rotation.....	06
I-5-1 Réglage par action sur le nombre de paires de pôles.....	06
I-5-2 Réglage par variation de la tension.....	07
I-5-3 Réglage par variation de la fréquence.....	07
I-6 Modélisation du moteur asynchrone.....	07
I-7 Hypothèses simplificatrices.....	08
I-8 Equations généralisées de MAS à cage.....	08
I-8-1 Les équations électriques.....	09
I-8-2 Equations magnétiques.....	09
I-8-3 Equation mécanique	10
I-9 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone.....	11
I-9-1 Equation de tension	12
I-9-2 Equation de flux.....	13
I-9-3 Expressions des puissances et de couple électromagnétique.....	13
I-10 Choix du référentiel.....	14
I-10-1 Les différents référentiels possibles.....	14
I-10-2 Le référentiel choisi.....	15
I-11 Conclusion.....	15
Chapitre II : L'onduleur et son fonctionnement	16
II-1 Introduction.....	17
II-2 Principe de fonctionnement de l'onduleur	17
II-3 Les différents types d'onduleurs	22
II-3-1 Onduleur non autonome.....	22
II-3-2 Onduleur autonome	22
a) Onduleur autonome de courant	22
b) Onduleur de tension.....	22
II-4 Modélisation de l'onduleur de tension.....	27
II-5 Conclusion.....	30

Chapitre III : Les différentes stratégies de modulations.....	31
III-1 Introduction.....	32
III-2 Les objectifs de l'MLI.....	32
III-3 Les différentes stratégies de modulation.....	33
III-3-1 MLI "Sinus Triangle"	34
III-3-2 Commande par hystérésis.....	36
III-3-3 Modulation Vectorielle dite "Space Vector modulation".....	37
III-4 Conclusion.....	38
 Chapitre IV : Simulation interprétations et des résultats.....	 39
IV-1 Introduction.....	40
IV-2- Résultats de la simulation.....	41
a) Schéma bloc de l'onduleur de tension triphasé.....	42
b) Schéma bloc de commande MLI	43
c) Schéma bloc de commande hystérésis	44
IV-2-1 Simulation de la commande MLI sinusoïdale.....	45
a) Pour : $m=15$, $r=0.8$ et $C_r=11.87$ N.m.....	45
b) Pour : $m=39$, $r=0.8$ et $C_r=11.87$ N.m.....	49
IV-2-2 Simulation de la commande MLI à hystérésis.....	53
a) Pour une bande $(-8,+8)$	53
b) Pour une bande $(-5,+5)$	56
IV-3 Interprétations des résultats.....	60
IV-3-1 Concernant la partie MLI sinusoïdale.....	60
IV-3-2 Concernant la partie MLI à hystérésis.....	60
IV-3-3 Concerne les grandeurs de moteur.....	61
IV-4 Conclusion.....	62

Conclusion Général

Liste des figures

Figure (I.1)	: Fonctionnement de MAS.....	06
Figure (I-2)	: Représentation des enroulements du moteur asynchrone.....	08
Figure (I-3)	: Représentation des enroulements de la machine asynchrone.....	11
Figure (I-4)	: <i>Les enroulements équivalents dans le repère (d, q)</i>	11
Figure (II-1)	: Schéma représentatif d'un bras (j) de l'ondule.....	17
Figure (II-2)	: Un onduleur monophasé.....	18
Figure (II-3)	: Un onduleur triphasé.....	18
Figure (II- 4a)	: L'interrupteur K'_j est ouvert, l'interrupteur K_j est fermé.....	19
Figure (II- 4b)	: L'interrupteur K_j est ouvert, l'interrupteur K'_j est fermé.....	19
Figure (II-5a)	: La caractéristique statique.....	19
Figure (II-5b)	: Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode.....	19
Figure (II- 6)	: Lorsque K_j est ON , c'est le transistor T_j est conducteur.....	20
Figure (II-7)	: K'_j est ON et la diode D'_j est conductrice.....	20
Figure (II-8)	: K_j est ON et la diode D_j est conductrice.....	21
Figure (II-9)	: K'_j est ON et le transistor T'_j est conducteur.....	21
Figure (II-10)	: Un onduleur de tension branché sur un moteur asynchrone.....	23
Figure (II-11)	: Les signaux de commande à pleine onde (180°).....	24
Figure (II-12)	: Les tensions de sortie de l'onduleur à commande 180°.....	27
Figure (II-13)	: Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le MAS.....	28
Figure (III-1)	: Schéma de principe de l'onduleur triphasé de tension.....	33
Figure (III-2)	: Principe de l'MLI Sinus-Triangle.....	34
Figure (III-3)	: Les trois tensions de références avec la portese.....	34
Figure (III-4)	: La création des signaux des impulsions et des tensions.....	35
Figure (III-6)	: Bande de l'Hystérésis.....	36
Figure (III-7)	: Représentation dans le plan (α , β) des vecteurs de tension de l'onduleur.....	37
Figure (IV-1)	: Schéma synoptique de l'association moteur asynchrone onduleur à MLI.....	41
Figure (IV-2)	: Schéma de bloc de l'onduleur.....	42
Figure (IV-3)	: Schéma de bloc de commande hystérisis.....	43
Figure (IV-4)	: Schéma de bloc de commande MLI.....	44
Figure (IV-5)	: Les tensions de référence et la porteuse (pour $m = 15$ $r = 0.8$).....	45
Figure (IV-6)	: Les signaux de commande des interrupteurs(pour $m=15$ $r = 0.8$)....	45
Figure (IV-7)	: Les tensions simples dans les trois phases(pour $m = 15$ $r = 0.8$)..	46
Figure (IV-8)	: Les tensions composées des trois phases(pour $m = 15$ $r = 0.8$).....	46
Figure (IV-9)	: Les courants statoriques dans les trois phases(pour $m = 15$ $r = 0.8$)..	47
Figure (IV-10)	: Le spectre d'harmonique du courant(pour $m = 15$ $r = 0.8$).....	47
Figure (IV-11)	: La vitesse (pour $m = 15$ $r = 0.8$).....	48
Figure (IV-12)	: Le couple électromagnétique (pour $m = 15$ $r = 0.8$).....	48
Figure (IV-13)	: Les tensions de référence et la porteuse (pour $m = 39$ $r = 0.8$).....	49
Figure (IV-14)	: Les signaux de commande des interrupteurs(pour $m=39$ $r = 0.8$)....	49
Figure (IV-15)	: Les tensions simples dans les trois phases (pour $m = 39$ $r = 0.8$)....	50

Figure (IV-16)	: Les tensions composées des trois phases (pour $m = 39$ $r = 0.8$).....	50
Figure (IV-17)	: Les courants statoriques dans les trois phases(pour $m=3$ $r = 0.8$)....	51
Figure.(IV-18)	: Le spectre d'harmonique du courant (pour $m = 39$ $r = 0.8$).....	51
Figure (IV-19)	: La vitesse (pour $m = 39r = 0.8$).....	52
Figure (IV-20)	: Le couple électromagnétique (pour $m = 39r = 0.8$).....	52
Figure (IV-21)	: Le courant de référence et le courant réelle (pour bande +8,-8).....	53
Figure (IV-22)	: Les signaux de commande des interrupteurs(pour bande +8,-8)....	53
Figure (IV-23)	: Les tensions composées des trois phases(pour bande +8,-8).....	54
Figure (IV-24)	: Les courants statoriques dans les trois phases(pour bande +8,-8)....	54
Figure (IV-25)	: Le spectre d'harmonique du courant(pour bande +8,-8).....	55
Figure (IV-26)	: Les courants statoriques dans les trois phases	55
Figure (IV-27)	: Les tensions composées des trois phases.....	56
Figure (IV-28)	: Le courant de référence et le courant réelle (pour bande +8,-8).....	56
Figure (IV-29)	: Les signaux de commande des interrupteurs (pour bande +5,-5).....	57
Figure (IV-30)	: Les tensions composées des trois phases (pour bande +5,-5).....	57
Figure (IV-31)	: Les courants statoriques dans les trois phases (pour bande+8,-8)....	58
Figure (IV-32)	: Le spectre d'harmonique du courant (pour bande +5,-5).....	58
Figure (IV-33)	: La vitesse (pour bande +5,-5).....	59
Figure (IV-34)	: Le couple électromagnétique (pour bande +5,-5).....	59

Liste des Symboles

$\mathbf{p}$	: nombre de paires de pôles
$\mathbf{N}$	: vitesse rotorique
$\mathbf{N_s}$	: vitesse de synchronisme
f_1	: fréquence de la tension statorique
$\mathbf{R_s}$	: résistance statorique
$\mathbf{R_r}$	: résistance rotorique
$\mathbf{L_{ss}}$	: inductance propre cyclique d'une phase statorique
$\mathbf{L_{rr}}$	: inductance propre cyclique d'une phase rotorique
$[\mathbf{M_{sr}}]$	: correspondre à la matrice des inductances mutuelle stator-rotor
$[\mathbf{\Psi}]$	: matrice de flux
$[\mathbf{L}]$	: matrice d'inductance
$\mathbf{V_{abc}}$	: tension de trois phases statorique
$\mathbf{V_{ABC}}$	: tension de trois phases rotorique
$\mathbf{L_m}$	: la valeur maximale de l'inductance mutuelle.
$\mathbf{J}$	: le moment d'inertie
$\mathbf{\Omega_r}$	: la vitesse angulaire du rotor, ou la vitesse mécanique du rotor.
$\mathbf{C_e}$	: le couple électromagnétique de la machine.
$\mathbf{C_r}$	: le couple résistant
$\mathbf{F}$	: coefficient de frottement
$(\mathbf{d,q})$	: axes du repère tournant
$\mathbf{V_{ds}}$	: tension statorique instantanéé dans l'axe (d).
$\mathbf{V_{qs}}$	: tension statorique instantanéé dans l'axe (q).
$\mathbf{V_{dr}}$	: tension rotorique instantanéé dans l'axe (d)..
$\mathbf{V_{qr}}$	: tension rotorique instantanéé dans l'axe (q).
$\mathbf{I_{ds}}$	: courant statorique instantanéé dans l'axe (d).

I_{qs}	:	courant statorique instantané dans l'axe (q).
I_{dr}	:	courant rotorique instantané dans l'axe (d).
I_{qr}	:	courant rotorique instantané dans l'axe (q).
MLI	:	modulation de largeur d'impulsions
K_j	:	l'interrupteur
D_j	:	la diode
T_j	:	le transistor
U	:	la tension continue à l'entrée de l'onduleur
U_{ABC}	:	les tensions simples à la sortie de l'onduleur
i	:	le courant continu à l'entrée de l'onduleur
I_{ABC}	:	les courants à la sortie de l'onduleur
F_m	:	la fréquence de modulation
V_{ref}	:	le vecteur de tension de référence
$.m$	:	indice de modulation

Introduction Générale

La vitesse de la machine est un besoin qui se généralise tous les secteurs de l'industrie et des transports. En effet la solution qui permet de contrôler un processus ou un système avec un coût minimal.

Pendant de longues décennies le moteur à courant continu était la meilleure source de variation de vitesse, malgré ces inconvénients qui se résument essentiellement dans le problème balai collecteur.

L'entraînement à vitesse variable des machines électriques étaient l'objectif de plusieurs études dans ces dernières années, ces études donnent la naissance à une nouvelle science entre l'électronique et l'électrotechnique : c'est l'électronique de puissance.

La mise au point des semi-conducteurs de puissance : **DIODE, MOSFET, IGBT, GTO** permet de contrôler les courants.

L'association des machines asynchrones aux convertisseurs statiques continu-alternatif à vitesse variable permet de réaliser des ensembles électromécaniques à vitesse variable tout en conservant les avantages bien connus de ce type de moteur.

À la sortie de l'onduleur, on contrôle la vitesse de rotation qui est proportionnelle à la fréquence d'alimentation ; il est souhaitable que la tension de sortie soit sinusoïdale. En réalité elle n'est pas sinusoïdale « très riches en harmoniques ».

Cet inconvénient donne un point de départ aux plusieurs recherches dont le but est de minimiser les harmoniques ; la solution trouvée est la technique d'ouverture et de fermeture des semi-conducteurs (modulation de la largeur d'impulsion).

Dans notre travail on s'intéresse à l'étude comparative des différentes techniques de modulation de la largeur d'impulsion (MLI) principalement la MLI sinusoïdale et MLI par hystérésis.

Le premier chapitre rappelle les connaissances nécessaires pour aborder l'étude de notre travail et consacré la modélisation de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est une étude des généralités et les principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes techniques les plus utilisés actuellement. À savoir la modulation sinusoïdale triangulaire et la modulation par hystérésis. Cette étude est consacré à la conception d'une stratégie de commande qui permet de donner une meilleure forme des signales de sortie de l'onduleur, donc une meilleure qualité spectrale.

Le quatrième chapitre est réservé à la simulation et l'interprétation des résultats des techniques de commandes citées auparavant.

CHAPITRE I

Modélisation de la machine asynchrone à cage

I-1 Introduction

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire. Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone, c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable. Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques.

I-2 Avantages du moteur asynchrone

Le moteur à cage est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

I-3 Description de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones, encore appelés moteurs d'induction sont pratiquement tous des moteurs triphasés, ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant.

Les moteurs asynchrones comportent deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (stator), l'autre est mobile (rotor).

I-3-1 Le stator

Le stator est identique à celui d'un alternateur triphasé, mais on l'appelle également inducteur ou primaire car c'est au champ tournant qu'il développe, que sont dus les courants induits du rotor, celui-ci se comportant un peu comme le secondaire d'un transformateur. Le stator comporte un circuit magnétique et un enroulement polyphasé, le plus souvent triphasé, à P paires de pôles, parcouru par des courants polyphasés, cet enroulement est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de plaque à bornes.

I-3-2 Le rotor

Le rotor se compose également d'un circuit magnétique, et d'un enroulement polyphasé à P paires de pôles, il existe deux types de rotor

- * Le rotor bobiné (à bagues).
- * Le rotor à cage.

a) Rotor bobiné

Le bobinage du rotor est un enroulement polyphasé semblable à celui du stator connecté en étoile afin d'empêcher toute circulation de courant entre les phases rotorique il est relié à des bagues sur l'arbre de la machine, des balais frottant sur ces bagues relient électriquement l'enroulement rotoriques à des balais frottant sur ces bagues relient électriquement l'enroulement rotorique à des résistances situées à l'extérieur de la machine .

b) Rotor à cage

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre où d'aluminium, logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre où d'aluminium.

Ces cages comportent généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques d'encoche.

I-4 Théorie du fonctionnement

Lorsqu'on alimente l'enroulement statorique par un courant alternatif triphasé, ce courant engendre un champ magnétique tournant avec une vitesse (N_s), dont le sens de rotation dépend de l'alternance des phase. Ce champ induit dans les enroulements statoèrque et rotorique donne naissance à des forces électromotrice.

$$E = 4,44. \Phi. f. .n \quad (I -1)$$

Si l'enroulement rotorique est fermé, dans cet enroulement passe le courant rotorique I_2 d'après l'interaction de ce courant avec le champ magnétique tournant, apparaît le couple électromagnétique qui entraîne le rotor dans un mouvement de rotation avec la vitesse w .

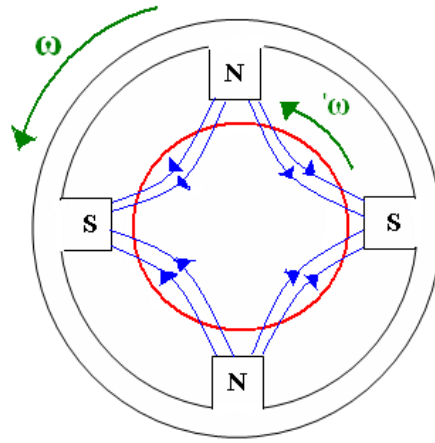


Fig. (I-1): Fonctionnement de MAS

I-5 Réglage de la vitesse de rotation

La vitesse du rotor d'un moteur asynchrone est :

$$N = (1-g).N_s$$

avec

$$N_s = 60f_1 / p$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

p : nombre de paires de pôles

N : vitesse rotorique

N_s : vitesse de synchronisme

f_1 : fréquence de la tension statorique

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par

I-5-1 Réglage par action sur le nombre de paires de pôles

Ce réglage consiste à changer le nombre de pôle de la machine asynchrone en changeant la connexion des enroulements statorique, ce type de réglage peut être utilisé que pour les montures ayant la possibilité de changer la connexion de leurs enroulement statorique, la

gamme de vitesse est étroite, une mauvaise souplesse de réglage car les vitesses sont échelonnées.

I-5-2 Réglage par variation de la tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique.

I-5-3 Réglage par variation de la fréquence

La fréquence de rotation du moteur asynchrone est directement proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation d'où la vitesse de synchronisme. La vitesse d'un moteur asynchrone peut être contrôlée au-dessus et au-dessous de la vitesse nominale en changeant la fréquence de la tension d'alimentation. On essaiera donc de créer pour les enroulements statoriques un réseau à fréquence variable ce sont les **onduleurs de tension**.

I-6 Modélisation du moteur asynchrone

La modélisation d'un système quelconque est indispensable lorsque nous voulons étudier une commande particulière sur ce système. La machine asynchrone n'est pas un système simple car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement comme la structure des courants de Foucaults....etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes. Car d'une part, leur formulation mathématique est difficile et d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable. Dans certaines conditions ce ci nous permet d'obtenir des équations simples qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

Le moteur asynchrone possède 6 enroulements (3 au stator et 3 au rotor) couplés magnétiquement, son modèle est un système de 6 équations différentielles à coefficients fonctionnels périodiques du temps. La résolution est difficile même avec l'utilisation de l'outil numérique. Pour remédier à ce problème on utilise la transformation de **PARK** qui est un changement convenable. Ce qui permet de détourner cette difficulté.

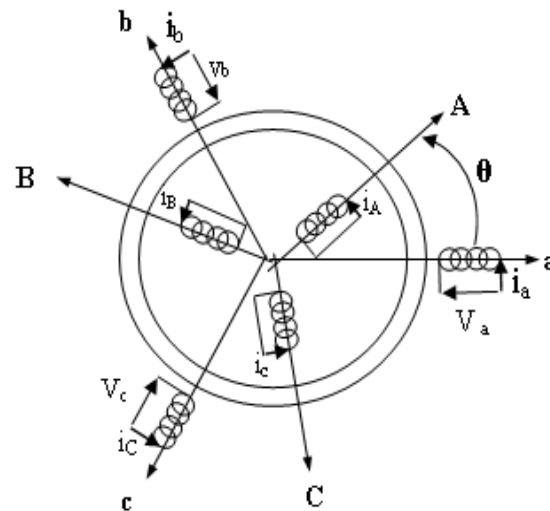


Fig. (I-2): Représentation des enroulements du moteur asynchrone

I-7 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone nécessite qu'on prend en considération un nombre d'hypothèses qui facilitent la résolution des équations différentielles, qui sont :

- Entrefer d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligé.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constant.
- Pertes ferromagnétiques négligées.
- Résistance des enroulements invariables avec la température.

I-8 Equations généralisées de MAS à cage

Considérons une machine asynchrone triphasée au stator et rotor (Figure (I-2)). Trois types d'équations traduisent le comportement de la machine qui sont:

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Les équations mécaniques.

I-8-1 Les équations électriques

En applique la loi d'ohm généralisée pour chaque phase, les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques sont

$$[V_{abc}] = [R_s] \cdot [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad (I-3)$$

$$[V_{ABC}] = [R_r] \cdot [I_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}] \quad (I-4)$$

avec:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[V_{abc}] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$$

$$[V_{ABC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^t$$

$$[I_{abc}] = [I_a \ I_b \ I_c]^t$$

$$[I_{ABC}] = [I_A \ I_B \ I_C]^t$$

$$[\Psi_{abc}] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^t$$

$$[\Psi_{ABC}] = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C]^t$$

I-8-2 Equations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants des enroulements statoriques et rotoriques peuvent être décrites par les équations matricielles suivantes :

$$[\Psi_{abc}] = [L_{ss}] [I_{abc}] + [M_{sr}] [I_{ABC}] \quad (I-5)$$

$$[\Psi_{ABC}] = [L_{rr}] [I_{ABC}] + [M_{rs}] [I_{abc}] \quad (I-6)$$

avec:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$: Correspondre à la matrice des inductances mutuelle stator-rotor, et s'écrit:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

L_m : La valeur maximale de l'inductance mutuelle.

En introduisant (I-5) et (I-6) dans (I-3) et (I-4), on obtient :

$$[V_{abc}] = [R_s] [I_{abc}] + [L_{ss}] d [I_{abc}]/dt + d ([M_{sr}] [I_{ABC}])/dt \quad (I-7)$$

$$[V_{ABC}] = [R_r] [I_{ABC}] + [L_{rr}] d [I_{ABC}]/dt + d ([M_{rs}] [I_{abc}])/dt \quad (I-8)$$

I-8-3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine asynchrone qui décrit le mouvement s'écrit par la relation suivante:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - F \cdot \Omega_r \quad (I-9)$$

J : Le moment d'inertie .

Ω_r : La vitesse angulaire du rotor, ou la vitesse mécanique du rotor.

C_e : le couple électromagnétique de la machine.

C_r : le couple résistant.

F : coefficient de frottement.

I-9 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents. La représentation de la machine triphasée équilibrée par une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes **(d, q)** comme le montre la Fig. (I-4).

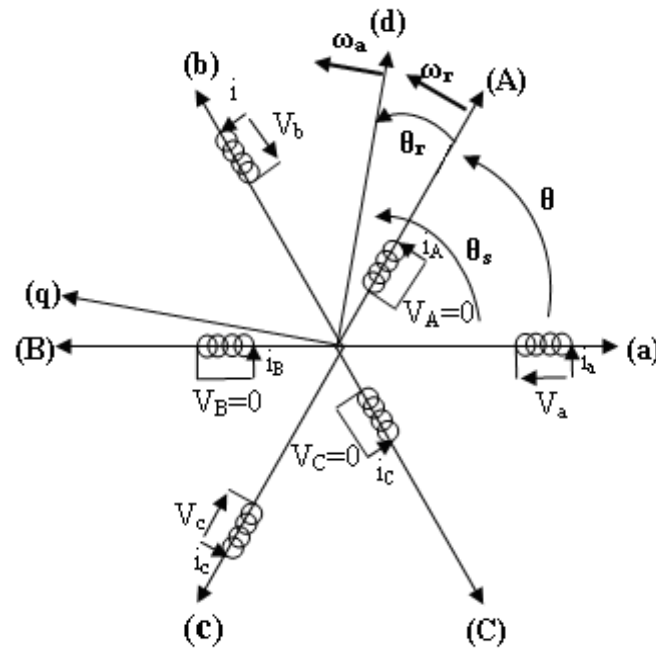


Fig. (I-3): Représentation des enroulements de la machine asynchrone.

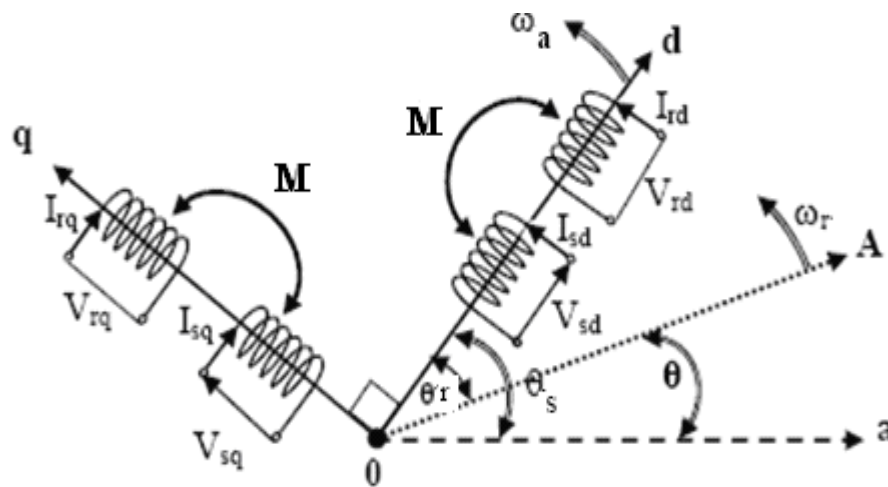


Fig. (I-4): Les enroulements équivalents dans le repère (d, q).

Les angles portés sur la Figure (I-3) désignent respectivement :

θ : l'angle entre a et A .

θ_r : l'angle entre A et d.

θ_s : l'angle entre a et d .

ω_a : désigne la vitesse angulaire électrique du système d, q et ω_r celle du rotor.

La transformation triphasé biphasé est assuré par une matrice de Park.

La forme de cette matrice est donnée par :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (I-10)$$

La matrice inverse de Park

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (I-11)$$

I-9-1 Equation de tension

En grandeur de phase, on a :

$$[V_{abc}] = [R_s] [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad (I-12)$$

En multiplions les deux cotée par [p], il vient

$$[p] [V_{abc}] = [R_s] [p] [I_{abc}] + [p] \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad (I-13)$$

Après tous calculs fait on trouve que

$$\begin{aligned} V_{ds} &= [R_s] I_{ds} + d\Psi_{ds}/dt - \omega_a \Psi_{qs} \\ V_{qs} &= [R_s] I_{qs} + d\Psi_{qs}/dt + \omega_a \Psi_{ds} \\ V_{os} &= [R_s] I_{os} + d\Psi_{os}/dt \end{aligned} \quad (I-14)$$

De la même façon on trouve pour les grandeurs du rotor :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= [R_r] I_{dr} + d\Psi_{dr}/dt - (\omega_a - \omega_m) \Psi_{qr} \\ V_{qr} &= [R_r] I_{qr} + d\Psi_{qr}/dt + (\omega_a - \omega_m) \Psi_{dr} \\ V_{or} &= [R_r] I_{or} + d\Psi_{or}/dt \end{aligned} \quad (I-15)$$

I-9-2 Equation de flux

$$[\Psi_{abc}] = [L_{ss}] [I_{abc}] + [M_{sr}] [I_{ABC}] \quad (I-16)$$

$$[\Psi_{ABC}] = [M_{rs}] [I_{abc}] + [L_{rr}] [I_{ABC}] \quad (I-17)$$

Les équations précédentes peuvent être exprimées dans le référentiel de Park par :

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Psi_{os} &= L_s I_{os} \end{aligned} \quad (I-18)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Psi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs} \\ \Psi_{or} &= L_r I_{or} \end{aligned} \quad (I-19)$$

I-9-3 Expressions des puissances et de couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statorique et rotorique en fonction des grandeurs d'axes (d-q) est donnée par l'expression suivante:

$$P_e = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} + V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \quad (I-20)$$

Elle se décompose en trois séries de termes qui correspondent respectivement aux trois colonnes des équations des puissances :

1) Puissance dissipée en pertes joule

$$[R_s](I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + [R_r](I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (I-21)$$

2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec les sources

$$I_{ds} \frac{d\psi_{ds}}{dt} + I_{qs} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + I_{dr} \frac{d\psi_{dr}}{dt} + I_{qr} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (I-22)$$

3) Puissance mécanique regroupant l'ensemble des termes liés aux dérivées des positions angulaires

$$(\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}) \omega_s + (\psi_{dr} I_{qr} - \psi_{qr} I_{dr}) \omega_r \quad (I-23)$$

Finalement d'après les équations précédentes et l'équation mécanique on tire les expressions du couple électromagnétique :

$$C_e = P [\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}] \quad (I-24)$$

I-10 Choix du référentiel

Le repère de PARK (d-q-o) fait un angle électrique θ_s avec le stator et fait également un angle électrique θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

I-10-1 Les différents référentiels possibles

Il existe trois choix importants du référentiel, on peut fixer le repère (d-q-o) au stator, au rotor ou au champ tournant.

- Pour le référentiel lié au stator on a ($\omega_a = 0$), ce référentiel sera choisi de préférence en vue d'étudier des variations importantes de la vitesse de rotation associée avec des variations de la fréquence d'alimentation.

- Pour le référentiel lié au rotor on a ($\omega_a = \omega_m$), il peut être intéressant dans des problèmes de régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- Pour le référentiel lié au champ tournant on a ($\omega_a = \omega_s$), il est souvent utilisé pour l'étude de la commande.

I-10-2 Le référentiel choisi

Pour notre cas on choisit le référentiel lié au champ tournant.

Le flux rotorique, quant à lui est représenté par un vecteur flux rotorique qui tourne également à la même vitesse, en effet, c'est le rotor qui glisse.

Le modèle de la machine asynchrone à cage devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} \end{array} \right. \quad (I-25)$$

Pour concevoir le modèle complet. On associe aux équations précédentes l'équation mécanique (I-9).

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations.

I-11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la modélisation de la machine asynchrone. Le modèle de la machine a été établi dans le cadre de la théorie de Park, en passant du système réel triphasé au système biphasé équivalent. Cela simplifie considérablement la résolution des équations de la machine asynchrone.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude d'un variateur de vitesse (Onduleur).

CHAPITRE II

L'onduleur et son fonctionnement

II-1 Introduction

L'onduleur est l'élément essentiel de notre système d'entraînement. Il est nécessaire de comprendre son principe de fonctionnement et ses différentes topologies. Les stratégies de commande ainsi, leurs avantages et inconvénients doivent être identifiés pour mieux choisir l'onduleur qui convient aux système à étudier.

II-2 Principe de fonctionnement de l'onduleur

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques permettant la conversion de l'énergie de la forme continue à la forme alternative.

- Ils sont autonomes, lorsqu'ils ne nécessitent pas la présence du réseau alternatif.

Ils sont « statiques » car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs).

On considère les onduleurs en pont alimentant

- Soit une charge monophasée
- Soit une charge triphasée équilibrée en triangle ou en étoile à neutre isolé.

Dans ces onduleurs, chaque borne d'accès de la charge est reliée à deux interrupteurs à semiconducteurs, l'un permettant de la connecter à la borne positive de la source continue, l'autre à la borne négative de cette source Fig. (II-1).

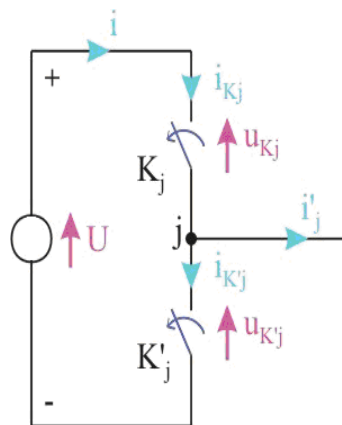


Fig. (II-1): Schéma représentatif d'un bras (*j*) de l'onduleur

Les interrupteurs K_j et K'_j forment un bras de l'onduleur.

- Un onduleur monophasé en pont comporte deux bras Fig. (II-2).

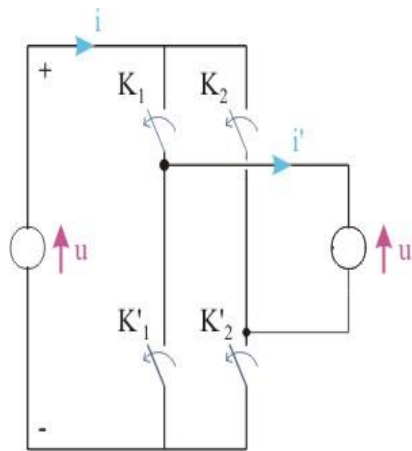


Fig. (II-2): Un onduleur monophasé

- Un onduleur triphasé en pont comporte trois bras Fig. (II-3).

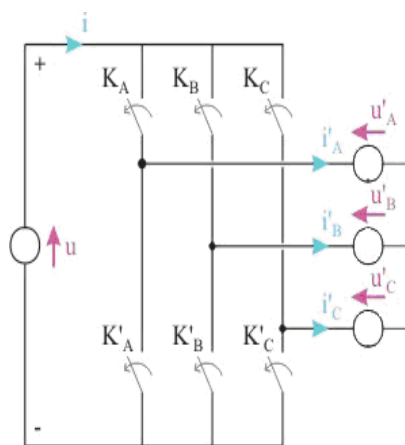


Fig. (II-3): Un onduleur triphasé

- Au niveau des interrupteurs du bras j , pour permettre au courant i_j de circuler, il faut qu'au moins un des deux interrupteurs K_j et K'_j soit à l'état **ON**.
- Pour éviter de court-circuiter la source U , ils ne peuvent être **ON** simultanément.

Les états des deux interrupteurs de chaque bras doivent donc être **complémentaires**, l'un étant **ON** l'autre **OFF** Fig. (II-4).

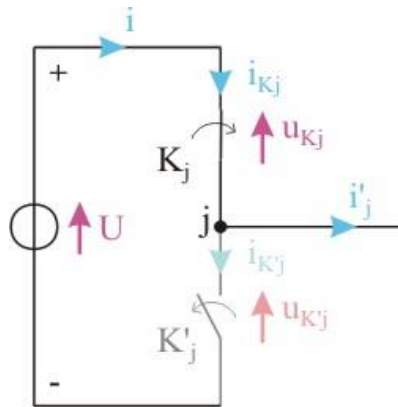


Fig. (II- 4a): L'interrupteur K'_j est ouvert, l'interrupteur K_j est fermé

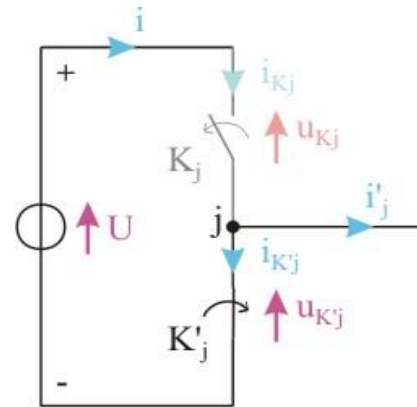


Fig. (II- 4b): L'interrupteur K_j est ouvert, l'interrupteur K'_j est fermé

Lorsque l'interrupteur K_j est **ON**, l'interrupteur K'_j est **OFF**, l'interrupteur K_j est traversé par le courant i_j . Comme ce courant est un courant alternatif, il est parfois positif, parfois négatif : l'interrupteur K_j doit donc être réversible en courant.

Lorsque l'interrupteur K_j est **OFF**, l'interrupteur K'_j est **ON** : la tension aux bornes de K_j est donc égale à U . Cette tension est une tension continue, donc toujours positive. L'interrupteur K_j est un interrupteur à 2 segments formés de la mise en parallèle inverse d'un transistor (ou un GTO) et d'une diode (Fig. (II-5)).

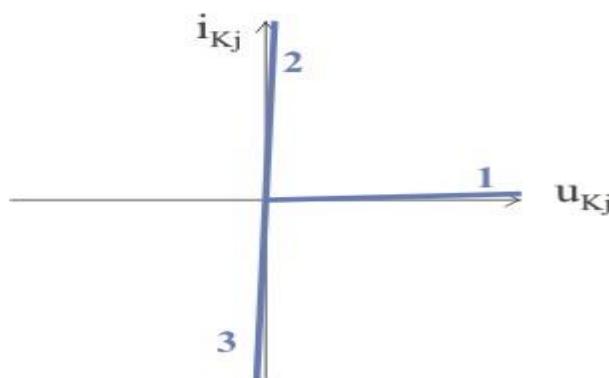


Fig. (II-5a): La caractéristique statique

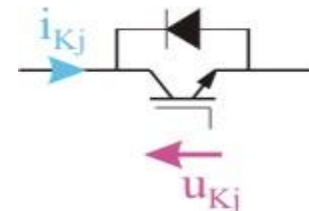


Fig. (II-5b): Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode

- La branche 1 correspond à l'état bloquant du transistor et de la diode.
- La branche 2 correspond à la conduction du transistor.
- La branche 3 correspond à la conduction de la diode.

❖ **Passage de K_j ON, K'_j OFF à K_j OFF, K'_j ON pour $i_j > 0$**

Si i_j est positif

- Lorsque K_j est ON, c'est le transistor T_j qui est conducteur Fig. (II- 6).

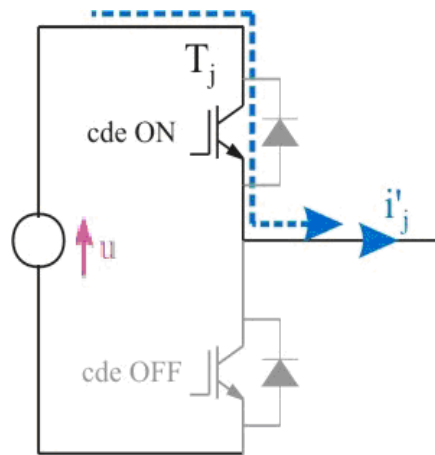


Fig. (II- 6): Lorsque K_j est ON, c'est le transistor T_j est conducteur

- Lorsque K'_j est ON, c'est la diode D'_j qui est conductrice Fig. (II-7).

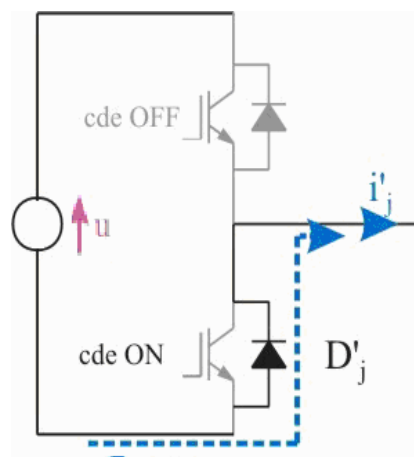


Fig. (II-7): K'_j est ON et la diode D'_j est conductrice

La commutation de K_j **ON** (T_j conducteur) à K'_j **ON** (D'_j conductrice) s'opère en commandant le blocage de T_j .

Lorsque T_j est **OFF**, on peut commander l'état **ON** de T'_j pour que K'_j reste fermé même si le courant i_j cesse d'être positif et devient négatif.

❖ **Passage de K_j ON, K'_j OFF à K_j OFF, K'_j ON pour $i_j < 0$**

Si i_j est négatif

- lorsque K_j est **ON**, c'est la diode D_j qui est conductrice Fig. (II- 8).

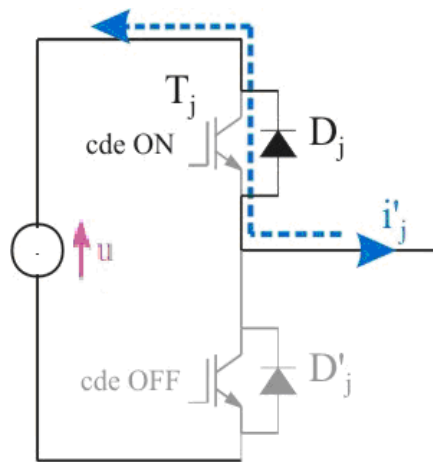


Fig. (II-8): K_j est **ON et la diode D_j est conductrice**

- lorsque K'_j est **ON**, c'est le transistor T'_j qui est conducteur Fig. (II-9).

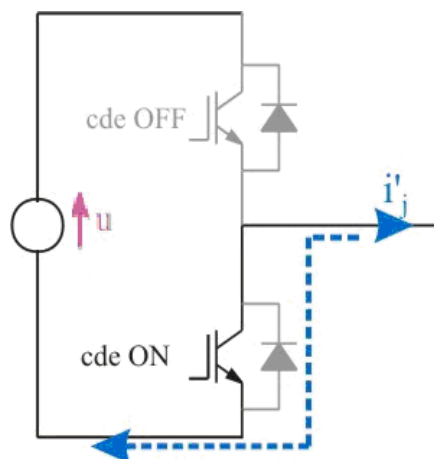


Fig. (II-9): K'_j est **ON et le transistor T'_j est conducteur**

La commutation de K_j **ON** (D_j conductrice) à K'_j **ON** (T'_j conducteur) s'opère en commandant l'amorçage de T'_j après avoir préalablement bloqué T_j pour éviter d'avoir une conduction simultanée de T_j et T'_j et donc un court-circuit de la source U .

II-3 Les différents types d'onduleurs

On distingue deux classes d'onduleurs

II-3-1 Onduleur non autonome

Un onduleur est dit non autonome si la forme d'onde et la fréquence sont imposées par le réseau.

II-3-2 Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome si le temps d'ouverture et de fermeture des interrupteurs entre l'entrée et la sortie dépend seulement de la commande des semi-conducteurs.

On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

a- Onduleur autonome de courant

Ce type est utilisé pour les moteurs à faible puissance où la source de l'entrée possède une impédance assez grande pour que le courant ne sera pas affecté par la variation de la tension «U».

b- Onduleur de tension

On appelle onduleur de tension un onduleur alimenté par une source de tension continue c'est-à-dire par une source d'impédance interne négligeable. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur est donc à sa sortie.

On peut réaliser un onduleur de tension triphasé en groupant trois demi ponts monophasé, la Fig. (II-10) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture, réalisé à partir d'un **GTO** ou **IGBT** et une diode en anti-parallèle.

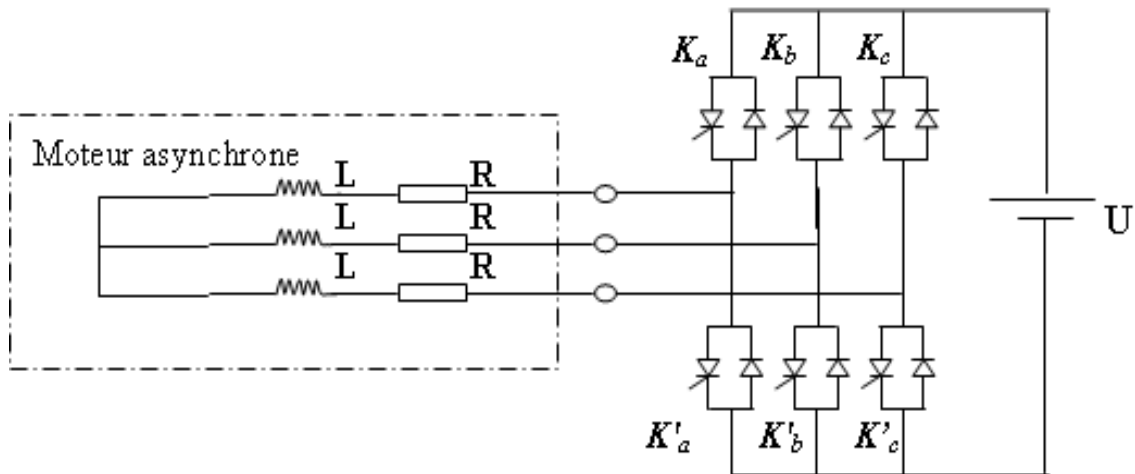


Fig. (II-10): Un onduleur de tension branché sur un moteur asynchrone

L'onduleur alimentant un moteur doit délivrer des tensions et des courants de fréquence variable, afin de faire varier la vitesse de la machine. La fréquence maximale du fondamentale de ces tensions et courants est plus souvent du même ordre de grandeur que la fréquence du réseau industriel.

On peut ne faire effectuer aux semiconducteurs qu'un cycle de fermeture et ouverture par période des grandeurs de sortie, on dit alors que l'onduleur fonctionne à un créneau par alternance ou en pleine onde. Mais on utilise de plus en plus des semiconducteurs qui travaillent à une fréquence plus élevée pour les faire fonctionner plusieurs fois par période.

On forme chaque alternance des tensions ou des courants de sortie de plusieurs créneaux de largeurs convenables, on a alors une Modulation de largeur d'impulsions (**M.L.I.**).

Pour illustrer le fonctionnement de l'onduleur, il est intéressant d'étudier le comportement en pleine onde (180°). Ce fonctionnement nous permet de mieux comprendre les autres stratégies de commandes. Cette commande est appelée aussi la commande à six étapes.

Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°).

Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode dure 60° les transistors sont numérotés de la manière dans laquelle ils reçoivent les séquences de déplace l'un de l'autre de 60° .

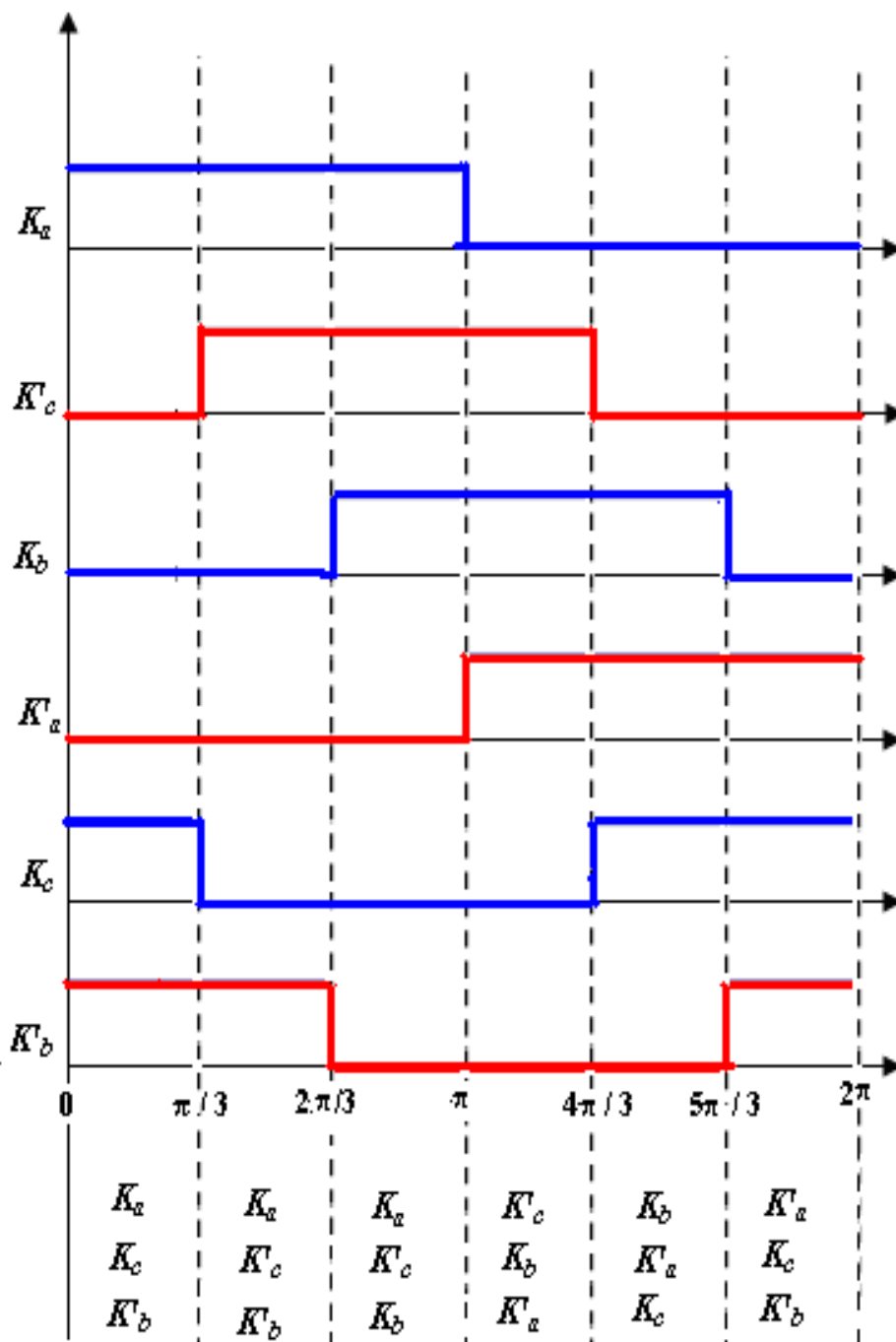
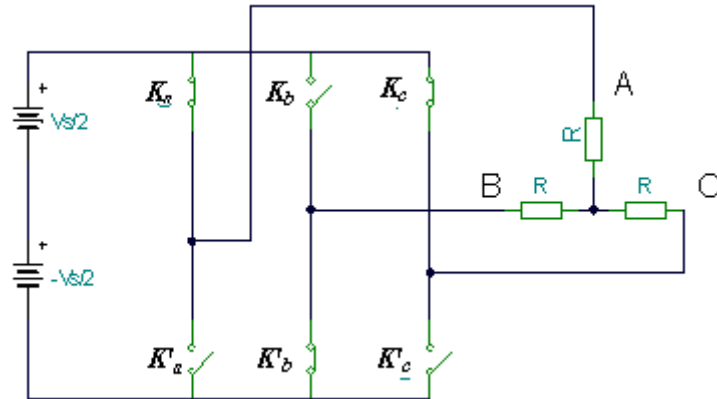


Fig. (II-11): Les signaux de commande à pleine onde (180°)

En prend l'intervalle $wt = [0-60^\circ]$ les transistors en conduction sont : K_a , K_c , K'_b .



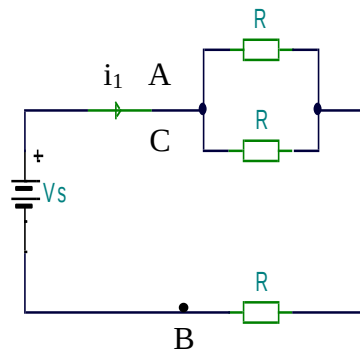
$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} = \frac{2}{R} \Rightarrow R' = \frac{R}{2}$$

$$R_{eq} = R' + R = \frac{3}{2}R$$

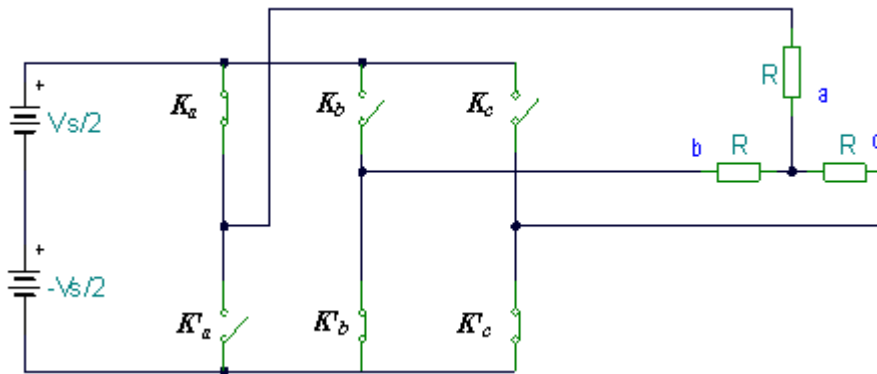
$$i_1 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$$

$$V_{an} = V_{cn} = i_1 \frac{R}{2} = \frac{V_s}{3}$$

$$V_{bn} = -i_1 \cdot R = -\frac{2V_s}{3}$$



➤ $wt = [60^\circ-120^\circ]$ les transistors en conduction sont : K_a , K'_c , K'_b .

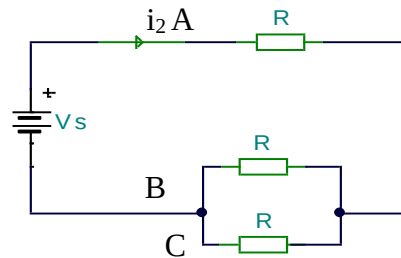


$$R_{eq} = \frac{R}{2} + R = \frac{3}{2}R$$

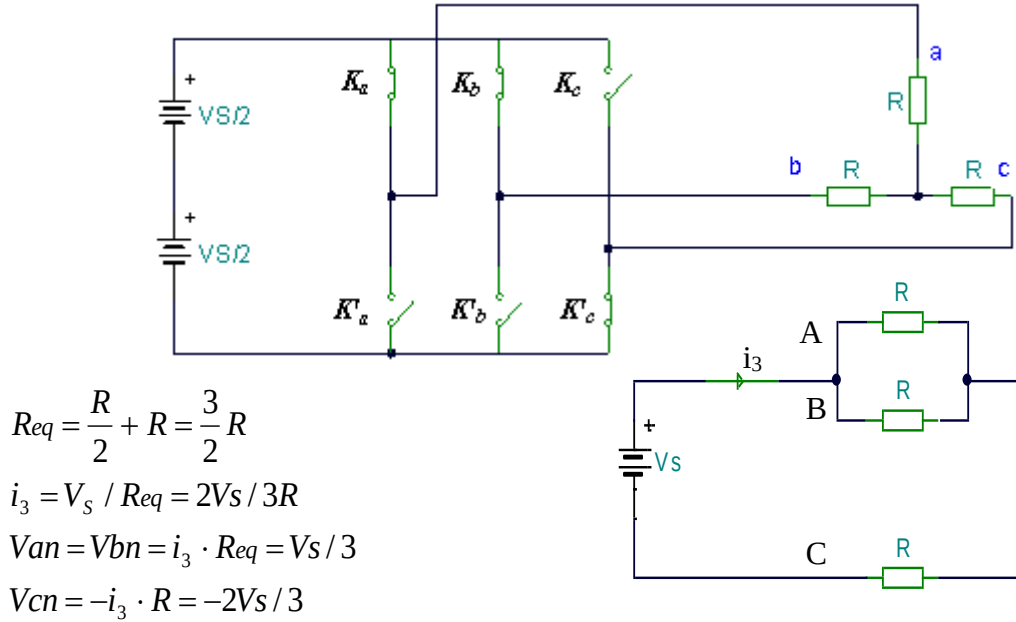
$$i_2 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

$$V_{an} = i_2 \cdot R = 2V_s / 3$$

$$V_{bn} = V_{cn} = -i_2 \cdot R / 2 = -V_s / 3$$



➤ $\omega t = [120^\circ - 180^\circ]$ les transistors en conduction sont : K_a , K'_c , K_b .



$$R_{eq} = \frac{R}{2} + R = \frac{3}{2}R$$

$$i_3 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

$$V_{an} = V_{bn} = i_3 \cdot R_{eq} = V_s / 3$$

$$V_{cn} = -i_3 \cdot R = -2V_s / 3$$

Après la détermination les tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} montrés dans la Fig. (II-12) la tension instantanée composée V_{ab} est exprimé en série de Fourier sachant que V_{ab} est déplacé de $\pi/6$, les termes $\cos n\omega t = 0 \rightarrow an = 0$ parce que l'équation est symétrique.

La courbe est symétrique donc $an = 0$ et on peut intégrer dans la moitié de la période ou le quart de la période :

$$V_{ab} = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

$$b_n = \frac{2 \times 4}{T} \int_0^{T/4} V_s \sin n\omega t dt = \frac{4V_s}{n\pi} \cos n\pi / 6$$

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos n\pi / 6 \sin n(\omega t + \pi / 6)$$

$$V_{bc} = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos n\pi / 6 \sin n(\omega t - \pi / 2)$$

$$V_{ca} = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos n\pi / 6 \sin n(\omega t - 7\pi / 6)$$

Il est noté que d'après l'équation de V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} que les harmoniques multiple de 3 sont égale à zéro. Pour les tensions composées la valeur efficace de la tension composée est :

$$V = \left[\frac{2}{2\pi} \int_0^{\infty} V_s^2 dwt \right]^{1/2} = 0.81 V_s$$

Les signaux de sortie de tension de la commande 180°

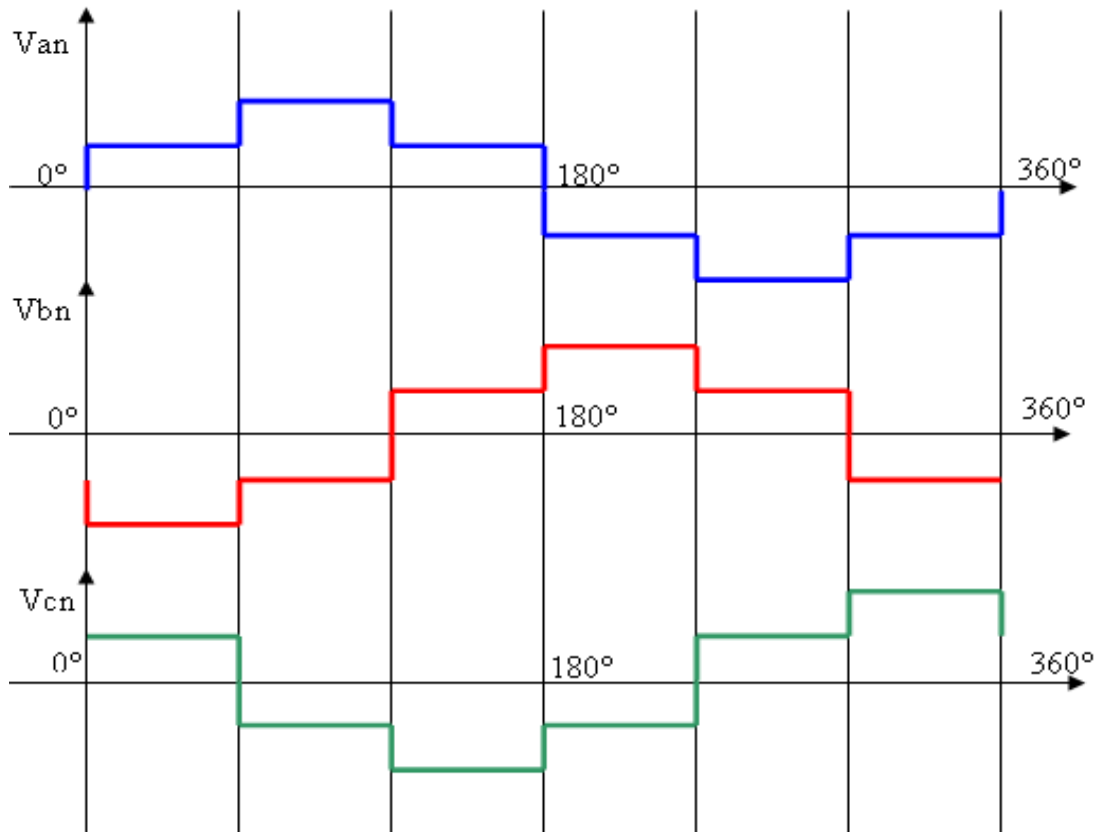


Fig. (II-12): Les tensions de sortie de l'onduleur à commande 180°

II-4 Modélisation de l'onduleur de tension

Le convertisseur statique permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables à partir d'un réseau standard 220/380V, 50 Hz. Après redressement, la tension filtrée U_0 (étage continu) est appliquée à l'onduleur.

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 davantage 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. Ces composants sus indiqués sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique.

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y'a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne:

$S_{a,b,c} = 1$: Interrupteur du demi-bras haut (a, b ou c) fermé.

$S_{a,b,c} = 0$: Interrupteur du demi –bras bas (a, b ou c) fermé.

La Fig. (II.13) montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant le MAS :

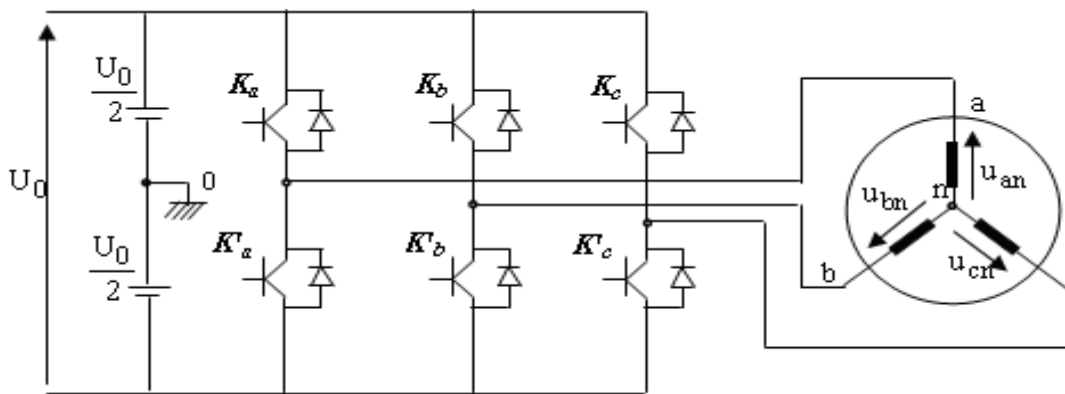


Fig. (II-13): Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le MAS

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée ;
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions composées u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

u_{ao} , u_{bo} et u_{co} peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit " n" l'indice du point neutre du coté alternatif. On a:

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

u_{an} , u_{bn} et u_{cn} sont les tensions simples de la machine et u_{no} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors:

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (\text{II-3})$$

La substitution de (I-3) dans (I-2) aboutit à :

$$u_{no} = \frac{1}{3} \cdot (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (\text{II-4})$$

En remplaçant (I-4) dans (I-2), on obtient :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

En utilisant les variables booliennes de l'état des interrupteurs on a:

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_o}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_o}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_o}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

II-5 Conclusion

Les ondes de tension obtenu (en pleine onde 180°) U_{an} , U_{bn} et U_{cn} correspondent aux tensions simples sont non sinusoïdales très riche en harmoniques. Il est nécessaire de penser à d'autres stratégies de commande pour réduire ces harmoniques. Parmi ces stratégies on peut cité la commande par hystérésis et la M.L.I sinusoïdale que nous allons expliqué dans le chapitre suivant intitulé les différentes stratégies de commandes.

CHAPITRE III

Les différentes stratégies de modulations

III-1 Introduction

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur donc, par la modulation des impulsions de contrôle de ces interrupteurs (**MLI**).

III-2 Les objectifs de l'MLI

Les principaux objectifs de la M.L.I sont les suivants:

- Alimenter les moteurs électriques avec des courants proches de l'onde sinusoïdale, par le contrôle des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur une plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.

Les paramètres essentiels de la **M.L.I** sont :

- L'indice de modulation :

$$m = \frac{f_m}{f}$$

Où :

f_m est la fréquence de modulation

f est la fréquence du fondamentale des grandeurs de sortie de l'onduleur

- Le coefficient de réglage:

$$r = \frac{\text{la valeur crête du fondamental de la tension de la charge souhaité}}{\text{amplitude des créneaux de la tension de sortie}}$$

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de **r** la plus élevée.

III-3 Les différentes stratégies de modulation

Il existe plusieurs stratégies de commande permettant de déterminer les trois fonctions logiques K_j ($j = a, b, c$).

Nous parlerons généralement de la M.L.I sinusoïdale, MLI à hystérésis et plus récemment la M.L.I vectorielle.

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de créniaux élémentaires de période très faible et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal.

Les ordres de commande de chaque bras sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant (sinusoïdal). Selon la stratégie adoptée, ce dernier peut être échantillonné en synchronisme avec la porteuse triangulaire, ou comparé directement à celle-ci. Chaque interrupteur commute à une fréquence imposée par celle de la porteuse.

Dans notre travail, nous présentons seulement les techniques de la M.L.I dites en "boucle ouverte", qui ne nécessitent en entrée que la référence des tensions désirées, par opposition aux techniques dites en "boucle fermée" qui au contraire utilisent des informations provenant des capteurs de courant (contrôle par hystérésis) ou de vitesse.

Le schéma de principe d'un onduleur alimentant une machine triphasée est donné par la Fig.(III-1).

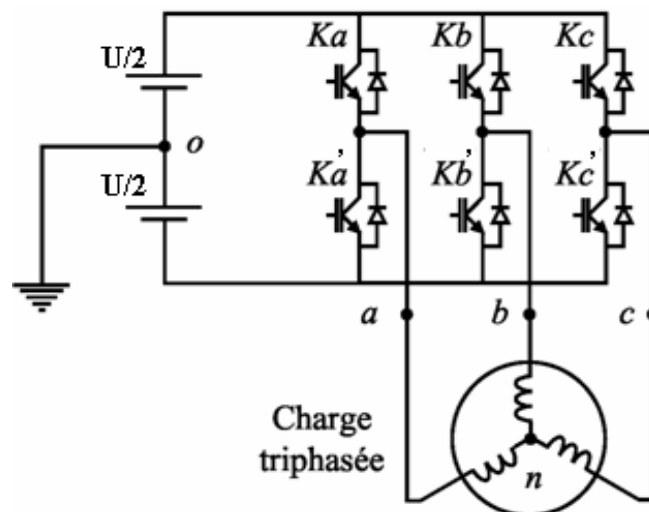


Fig. (III-1): Schéma de principe de l'onduleur triphasé de tension

III-3-1 MLI "Sinus Triangle"

La M.L.I Sinus Triangle utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence f_r , appelée modulante et un signal triangulaire de haute fréquence f_m , appelée la porteuse, pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la Fig. (III-2).

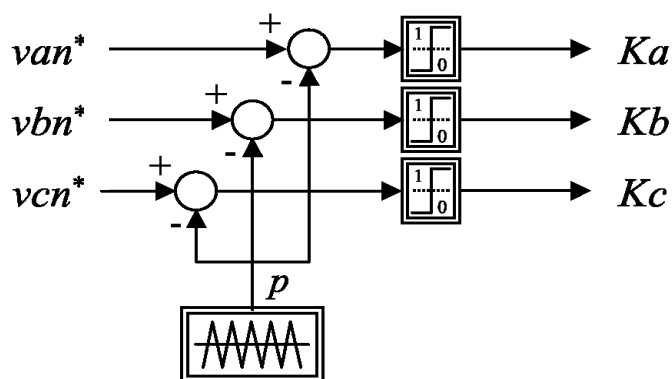


Fig. (III-2): Principe de l'MLI Sinus-Triangle

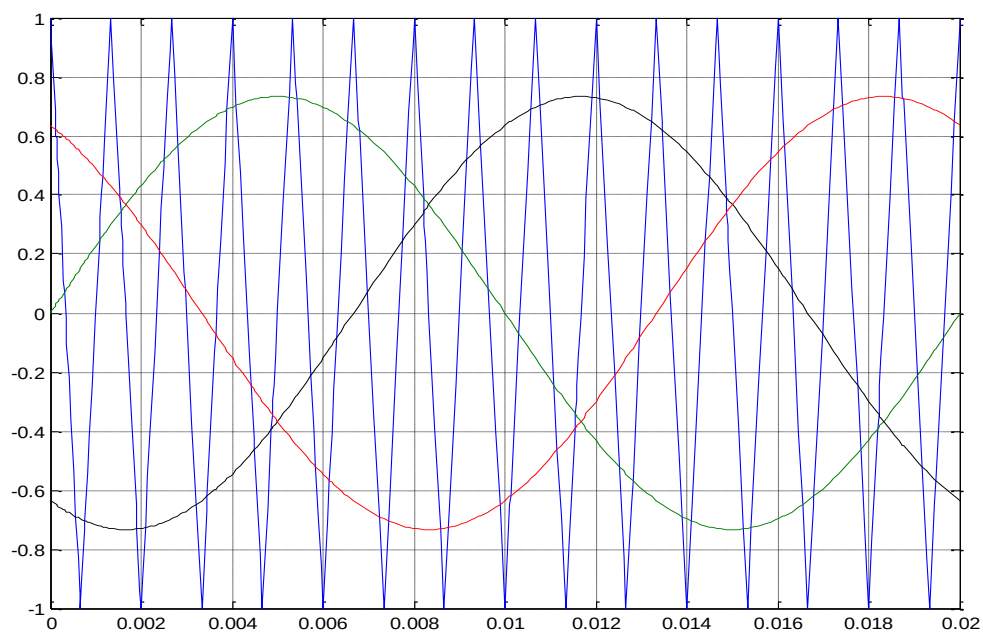


Fig. (III-3): Les trois tensions de références avec la porteuse

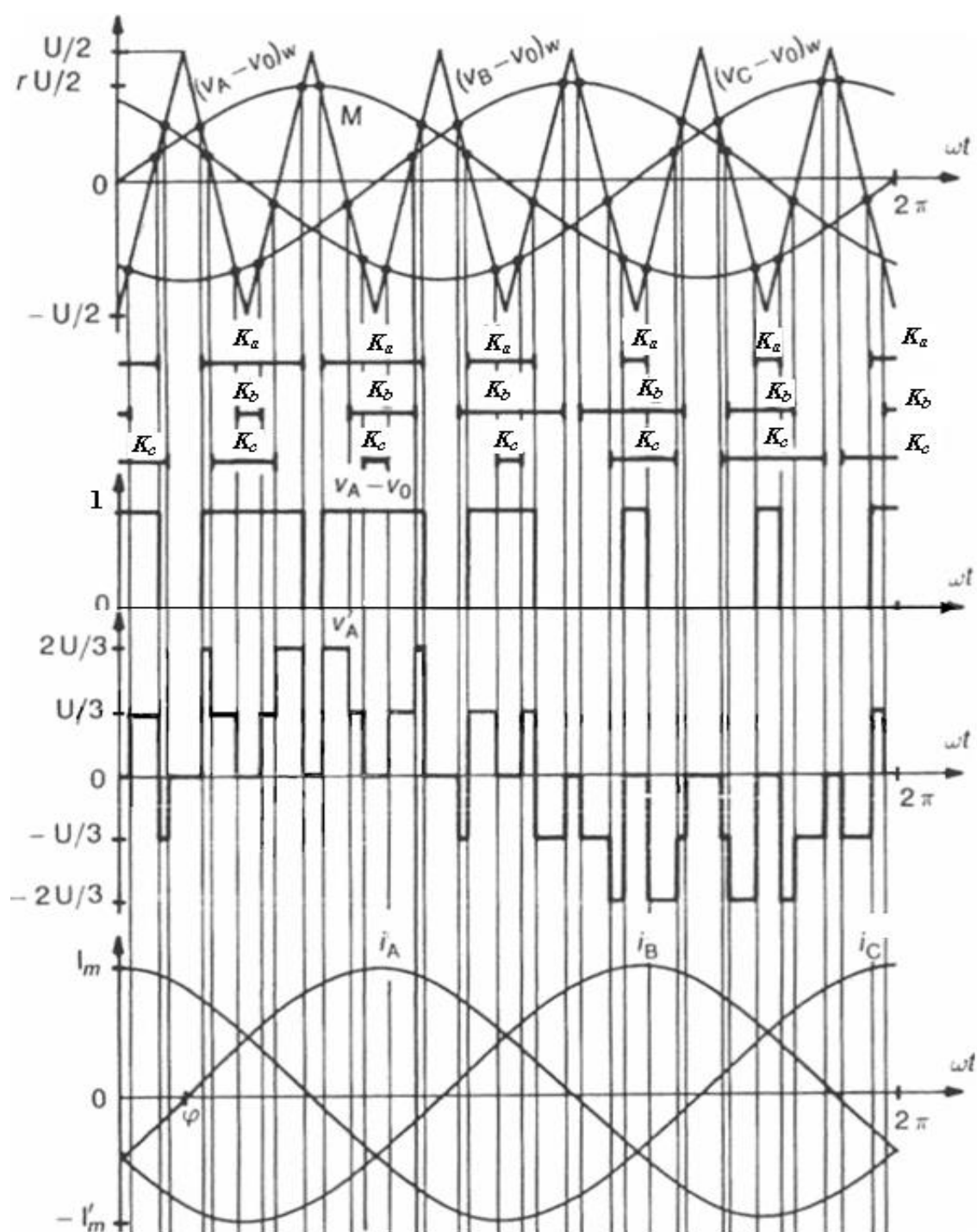


Fig. (III-4): La création des signaux des impulsions et des tensions

III-3-2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence (Fig. III-4), à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Fig. (III-5)).

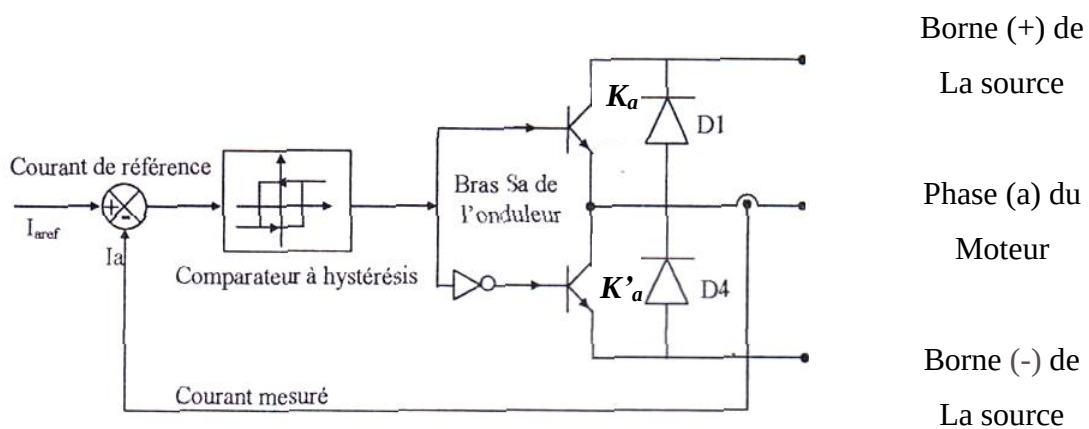


Fig. (III-5). Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur

De ce fait, les conditions de commutation des trois Interrupteurs statiques K_i ($i=a, b, c$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques correspondants à la façon suivante :

$$K_i = +1 \quad \text{si} \quad I_{\text{ref}} - I_i > \Delta i.$$

$$K_i = -1 \quad \text{si} \quad I_{\text{ref}} - I_i < \Delta i.$$

$$K_i = -K_{i-1} \quad \text{si} \quad I_{\text{ref}} = I_i.$$

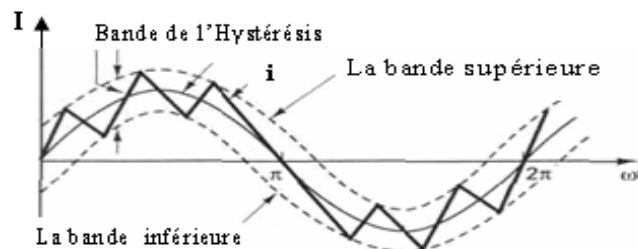


Fig. (III-6): Bande de l'Hystérésis.

Tels que :

I_i ($i = a, b, c$) sont les courants des phases statoriques (I_a, I_b, I_c).

I_{ref} ($i = a, b, c$) sont les courants de références issus des circuits de commande des trois bras.

Δi : est la bande d'hystérésis, elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semiconducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.

III-3-3 Modulation Vectorielle dite "Space Vector modulation"

Contrairement à la M.L.I Sinus-Triangle, la Modulation Vectorielle, dite "**Space Vector PWM**", ne dissocie pas le traitement des trois phases (un comparateur par phase, voir la Fig. (III-2).

La M.L.I Vectorielle traite les signaux directement sur le plan diphasé de la transformation de concordia. Elle traite donc, les signaux triphasés comme un tout. L'onduleur ayant trois bras, il possède $2^3 = 8$ modes de commutations possibles. Il peut donc générer 8 vecteurs différents de tension de sortie (V_{an}, V_{bn} et V_{cn}).

La représentation sur le plan (α, β) de ces 8 vecteurs est donnée par la Fig. (III-7), où les numéros de vecteurs correspondent au nombre binaire (K_a, K_b, K_c) qui donne l'état des interrupteurs (**1** : fermé ; **0** : ouvert).

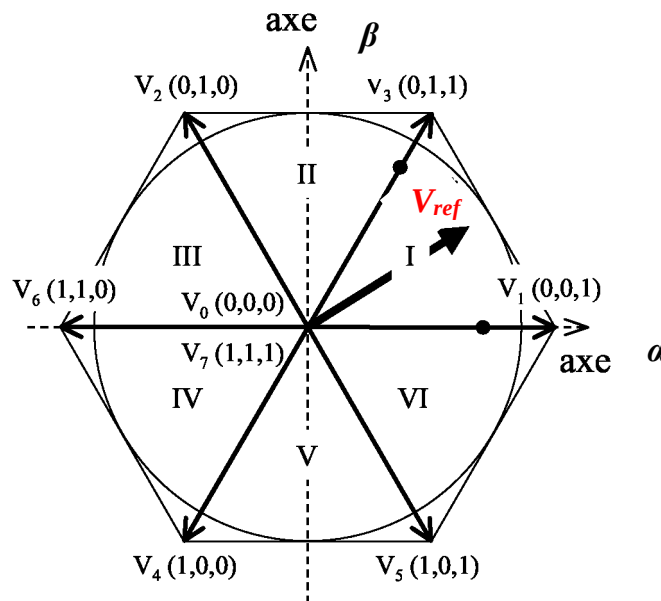


Fig. (III-7) : Représentation dans le plan (α, β) des vecteurs de tension de l'onduleur

Les six vecteurs non nuls définissent six secteurs, un secteur étant caractérisé par la valeur de la variable K ($K \in [a, b, c, a', b', c']$).

Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle est présenté dans la Fig. (III-8).

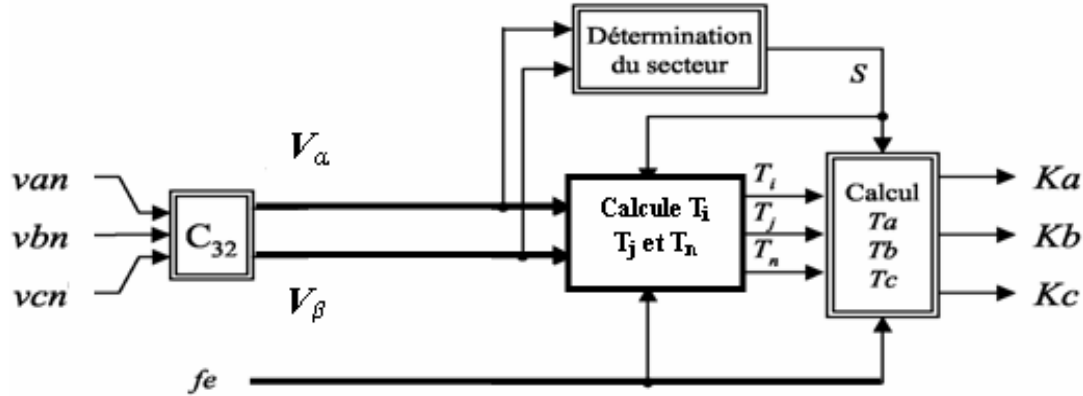


Fig. (III-8): Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle

Le vecteur de tension de référence $V_{ref} = V_\alpha + j \cdot V_\beta$ est échantillonné à la fréquence f_m .

Les vecteurs V_α et V_β permettent tout d'abord de déterminer le secteur dans lequel se trouve le vecteur de référence V_{ref} .

Les deux vecteurs de V_i et V_{i+1} délimitant ce secteur sont ensuite utilisés pour réaliser V_{ref} en valeur moyenne dans une période d'échantillonnage $T_m = 1/f_m$.

III-4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les différentes stratégies de commande de l'onduleur, MLI sinusoïdale, hystérésis et la plus récente MLI vectorielle.

La commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

La MLI sinusoïdale demande de déterminer les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément, par contre L'MLI vectorielle génère les signaux d'impulsions simultanément avec la rotation du vecteur de référence.

CHAPITRE IV

Simulation et interprétations des résultats

IV-1 Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

Il est caractérisé par la non linéarité des semi-conducteurs constituant le convertisseur et par la présence de sous-ensembles à la fois hétérogènes et fortement interdépendants.

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse des techniques de commande de l'onduleur, et la machine asynchrone par la simulation numérique à l'aide de **MATLAB-SIMULINK**.

IV-2- Résultats de la simulation

La fig. (IV-1) donne le schéma synoptique de l'association moteur asynchrone -onduleur à MLI

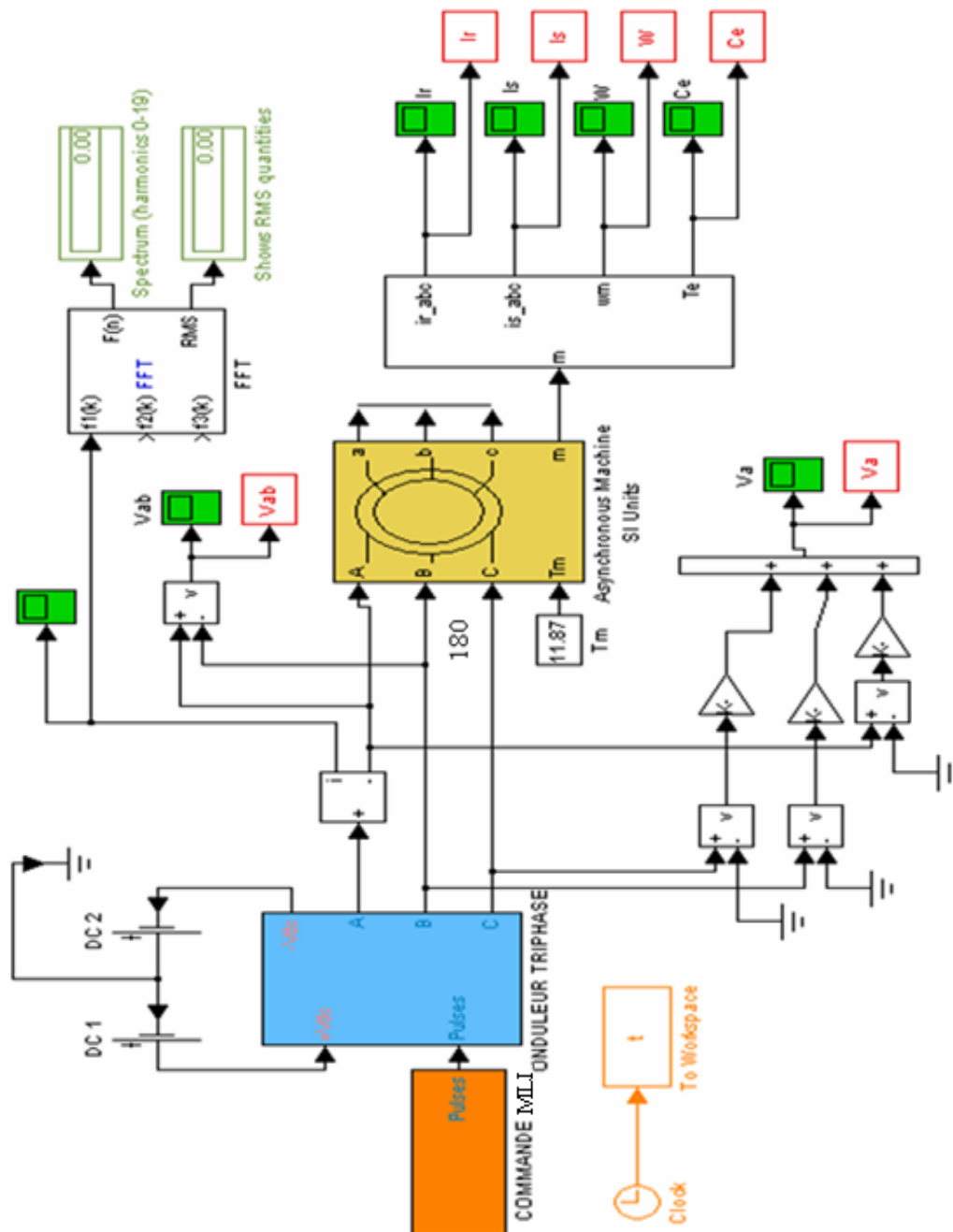


Fig. (IV-1) schéma synoptique de l'association moteur asynchrone -onduleur à MLI

a) Schéma bloc de l'onduleur de tension triphasé

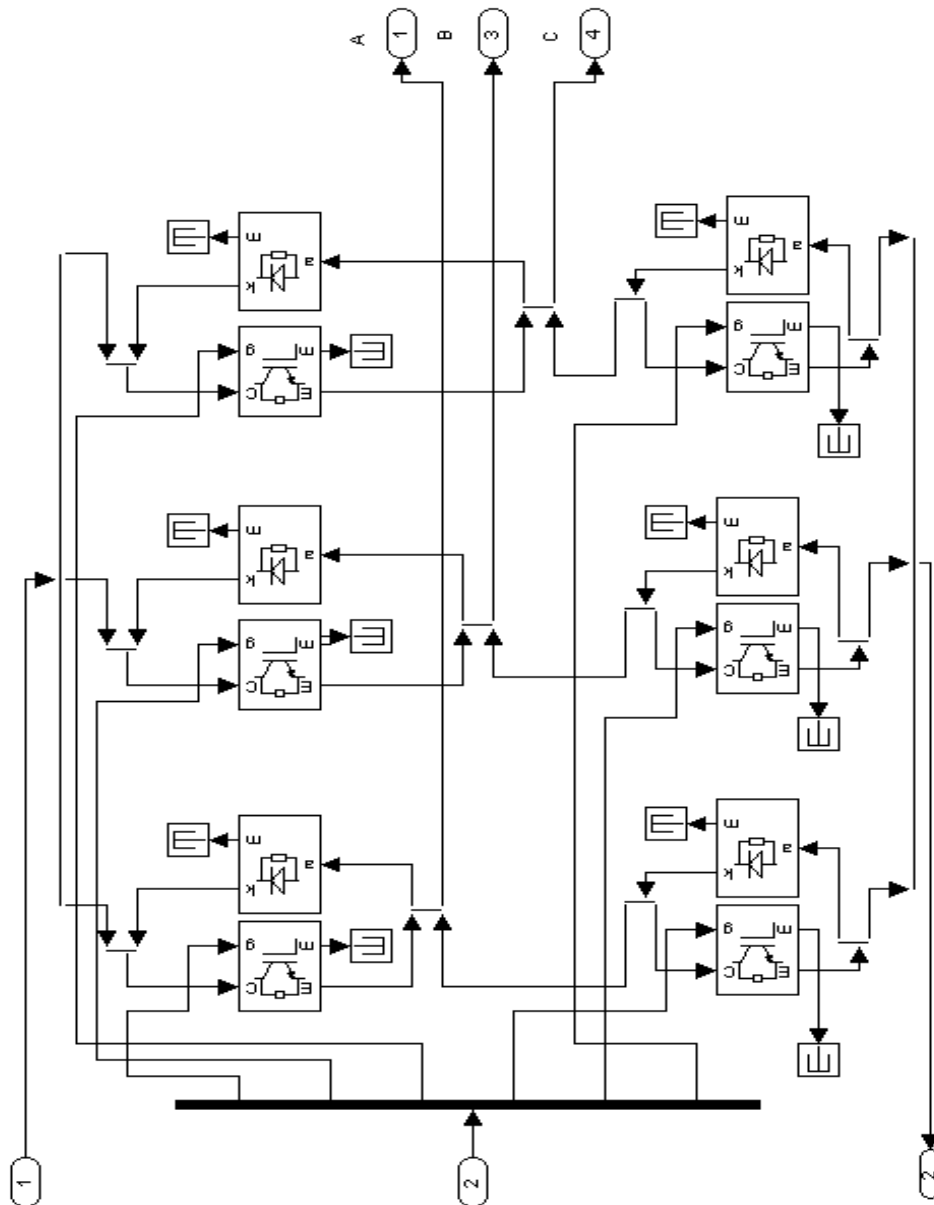


Fig. (IV-2) : Schéma bloc de l'onduleur

b) Schéma bloc de la commande par MLI

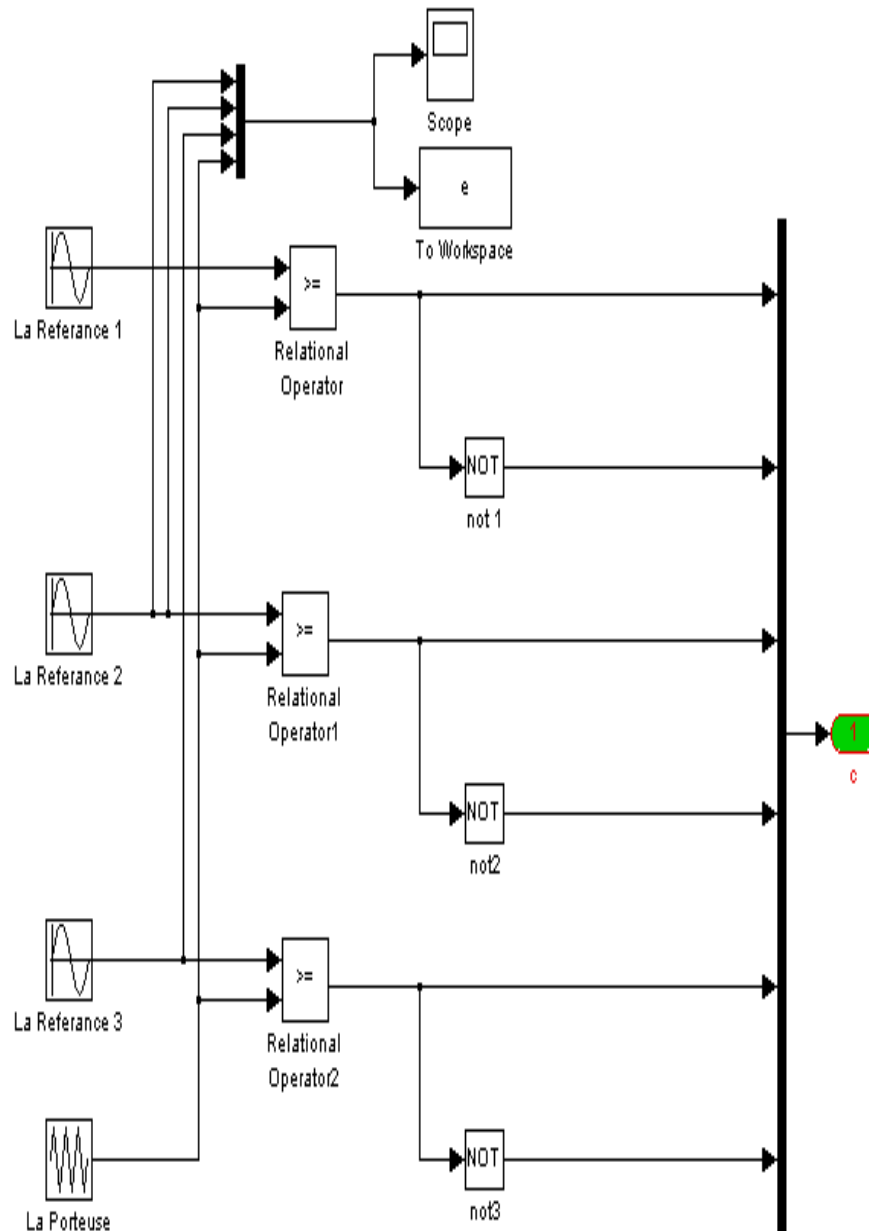


Fig. (IV-3) : Schéma bloc de la commande par MLI

c) Schéma bloc de la commande par hystérésis

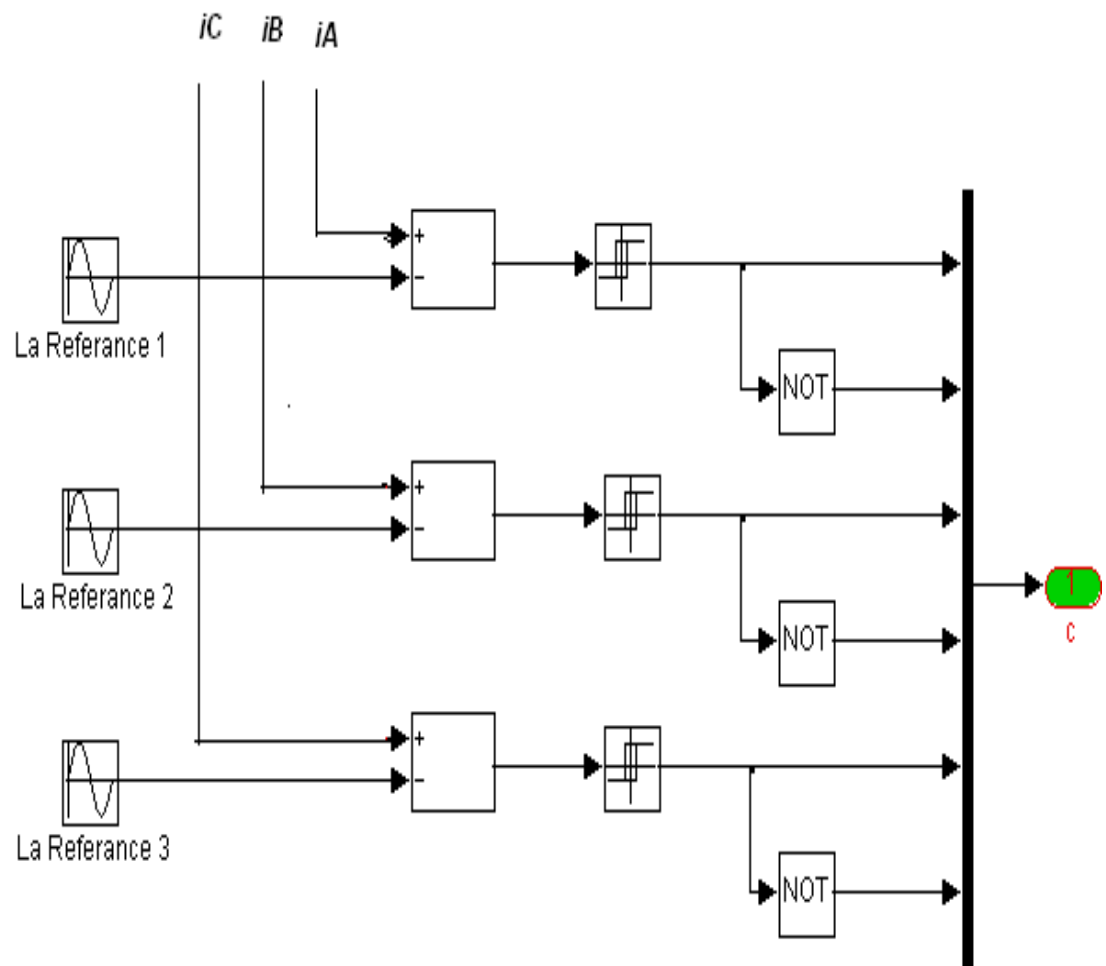


Figure (IV-4) : Schéma bloc de la commande par hystérésis

IV-2-1 Simulation de la commande MLI sinusoïdale

a) Pour : $m=15$, $r=0.8$ et $Cr=11.87N.m$

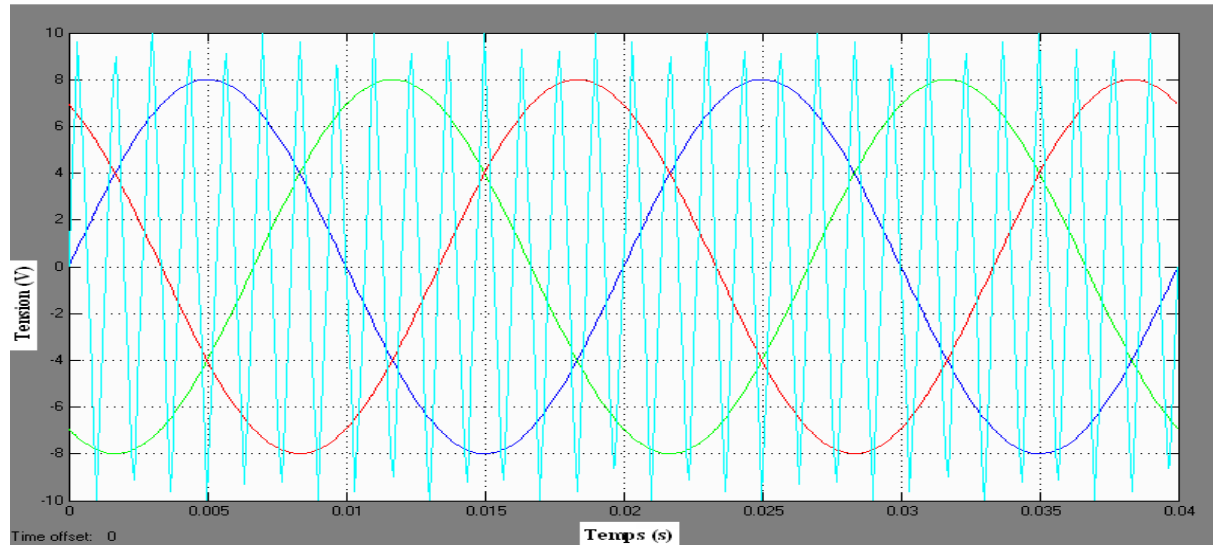


Fig. (IV-1): Les tensions de référence et la porteuse

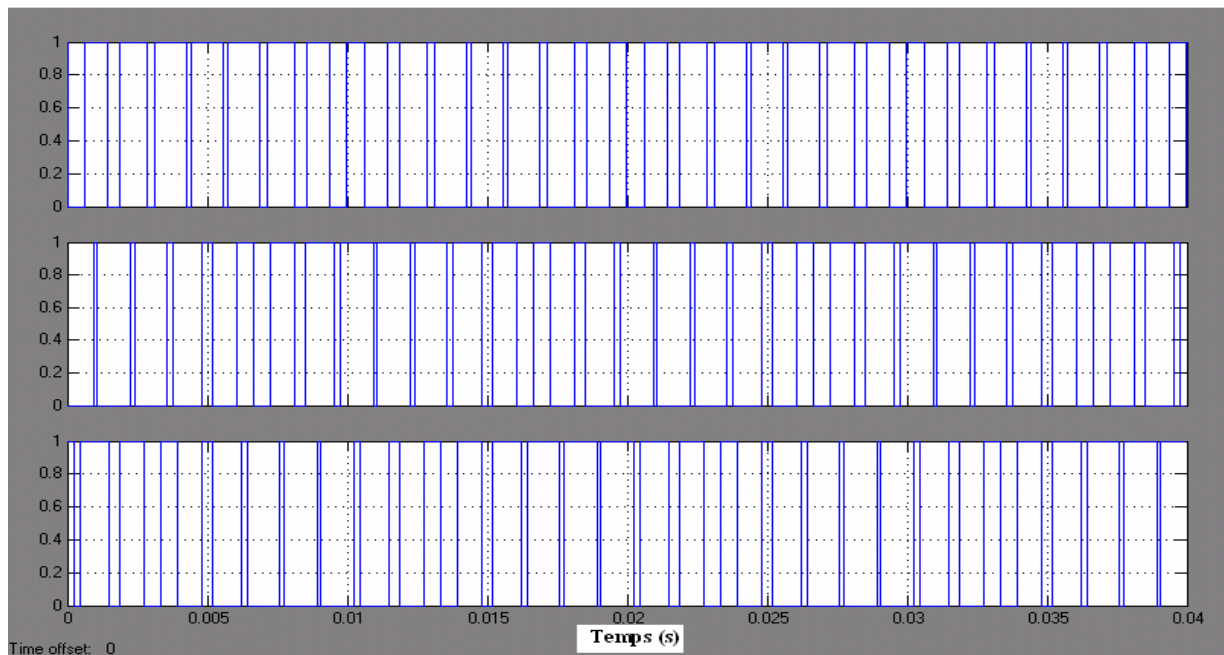


Fig. (IV-2): Les signaux de commande des interrupteurs

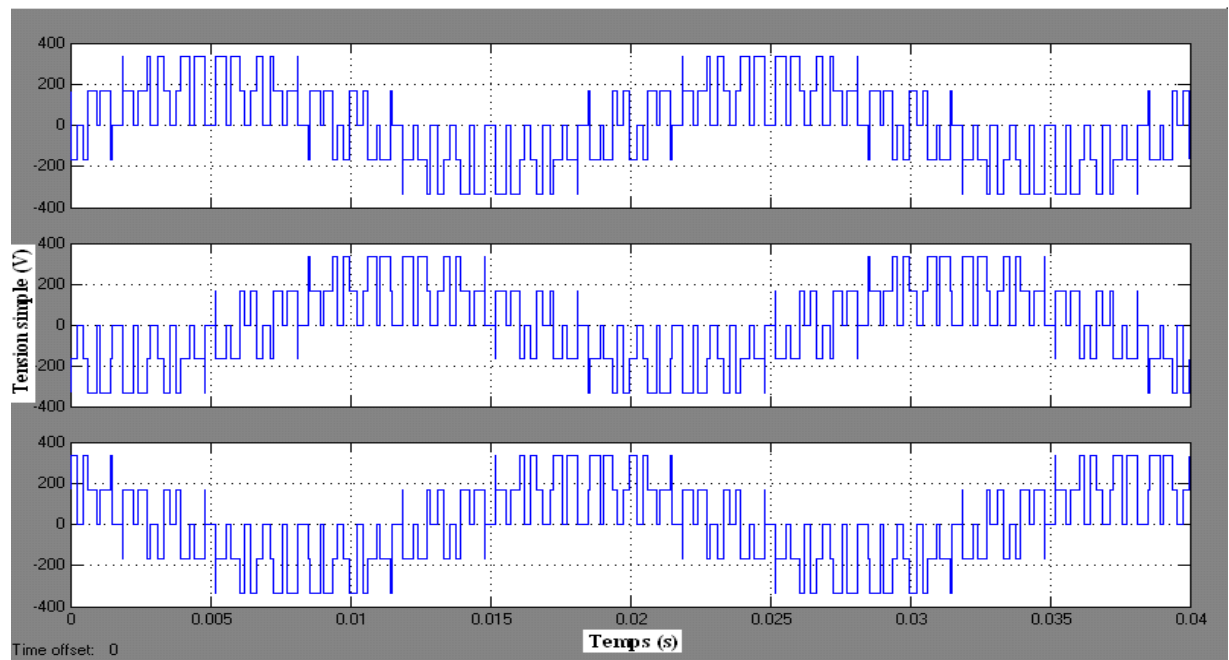


Fig. (IV-3): Les tensions simples dans les trois phases

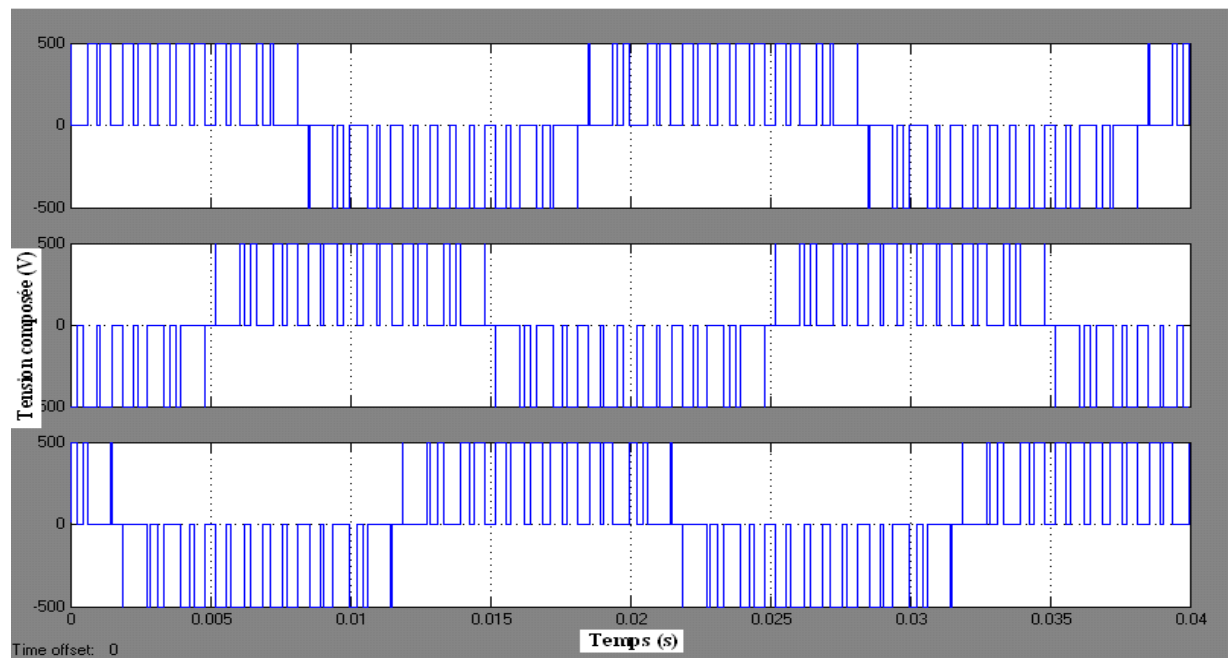


Fig. (IV-4): Les tensions composées des trois phases

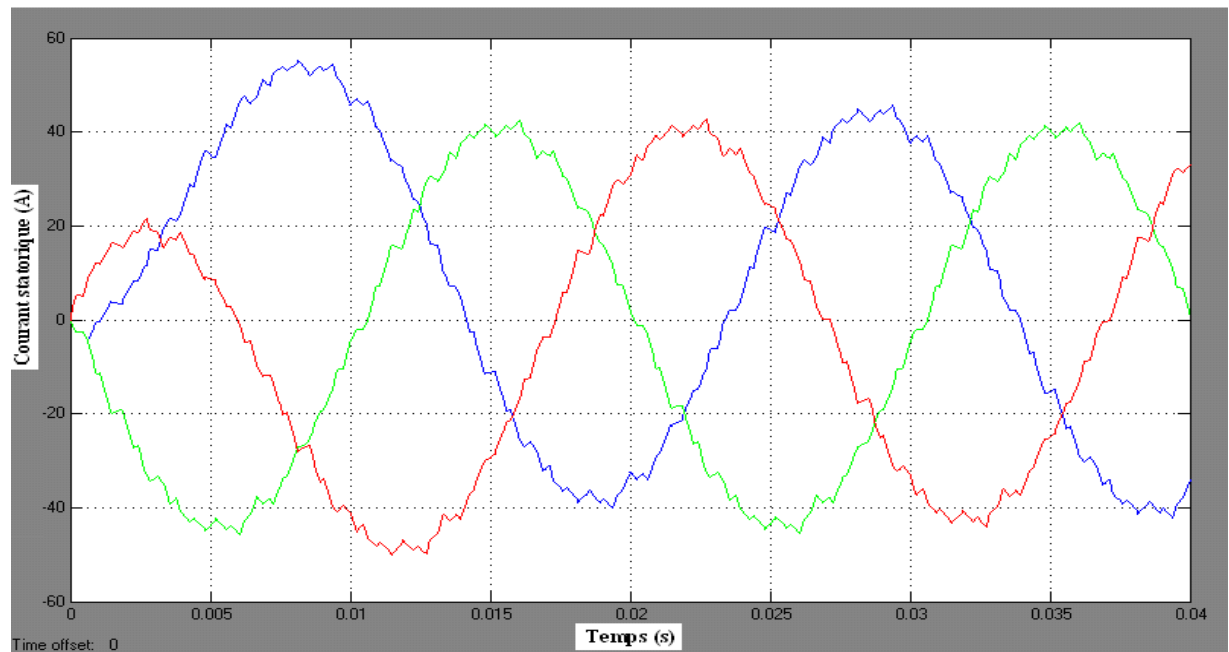


Fig. (IV-5): Les courants statoriques dans les trois phases

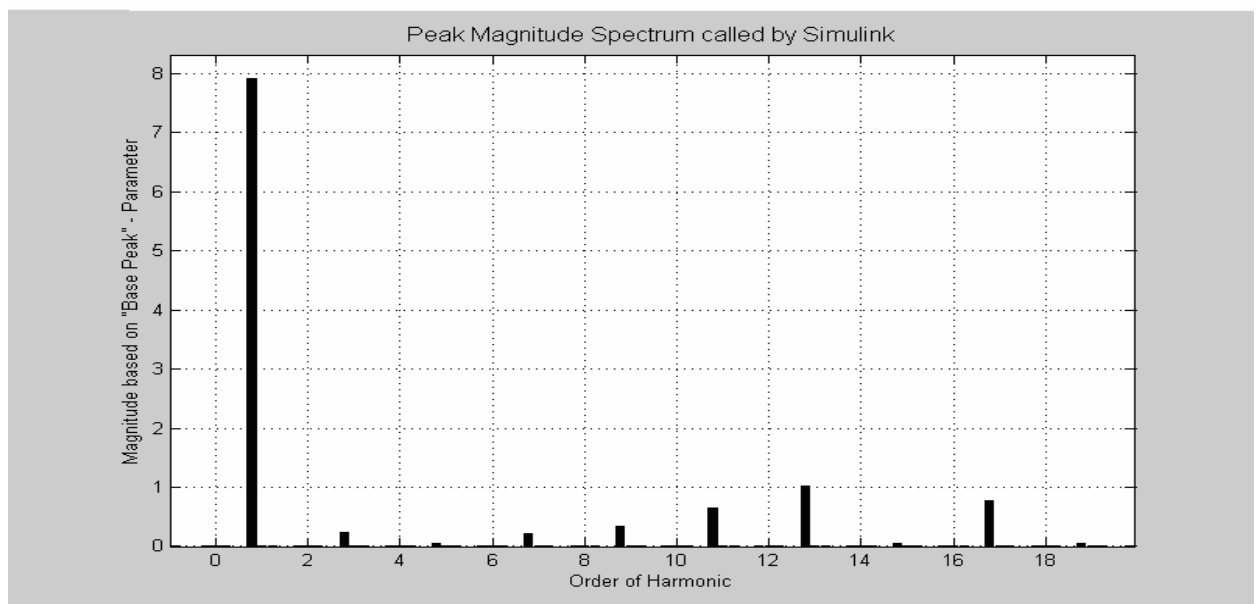


Fig. (IV-6): Le spectre d'harmonique du courant

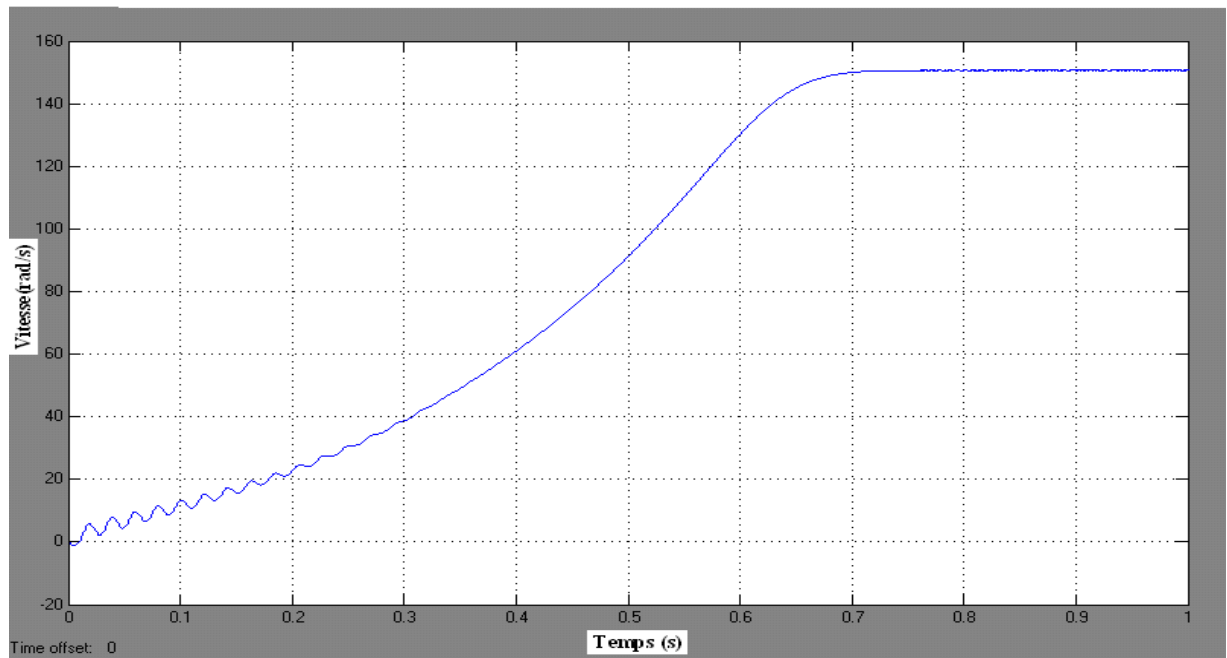


Fig. (IV-7): La vitesse

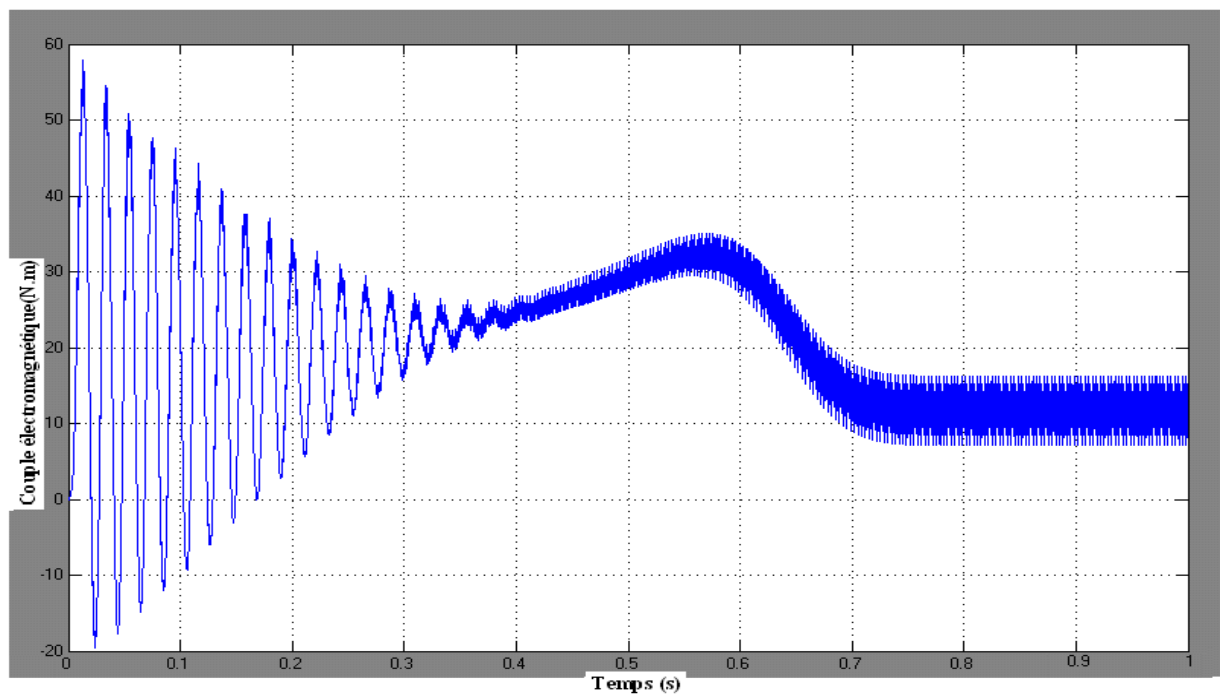


Fig. (IV-8): Le couple électromagnétique

b) Pour : $m=39, r=0.8$ et $Cr=11.87 \text{ N.m}$

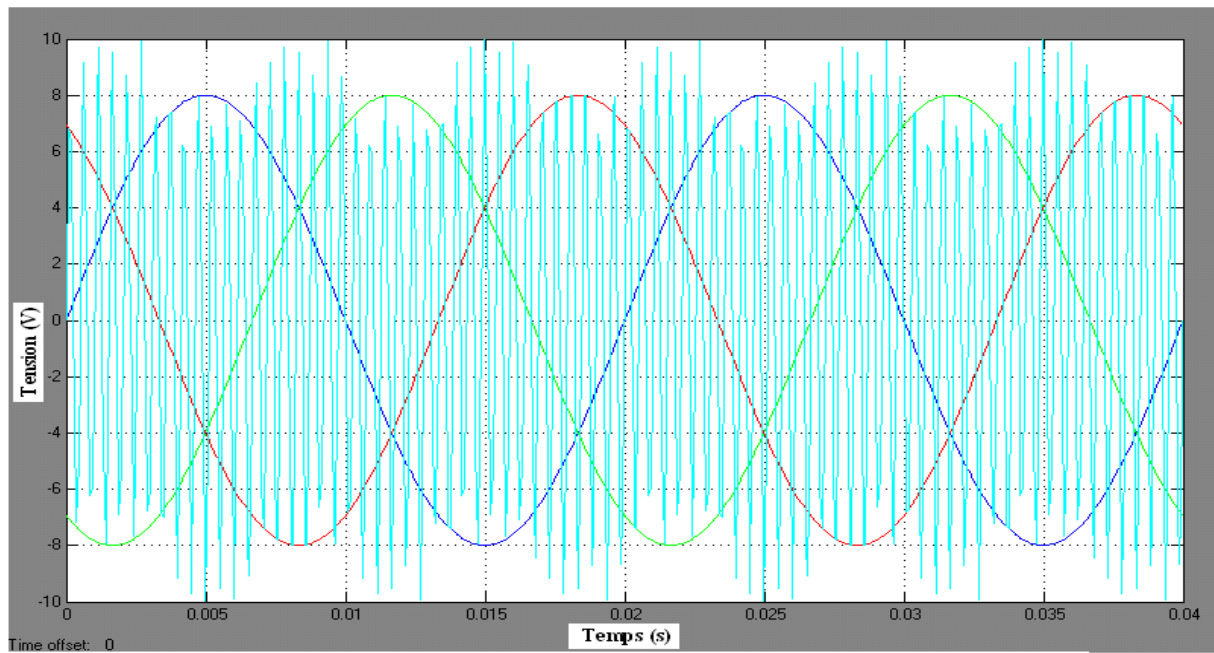


Fig. (IV-9): Les tensions de référence et la porteuse

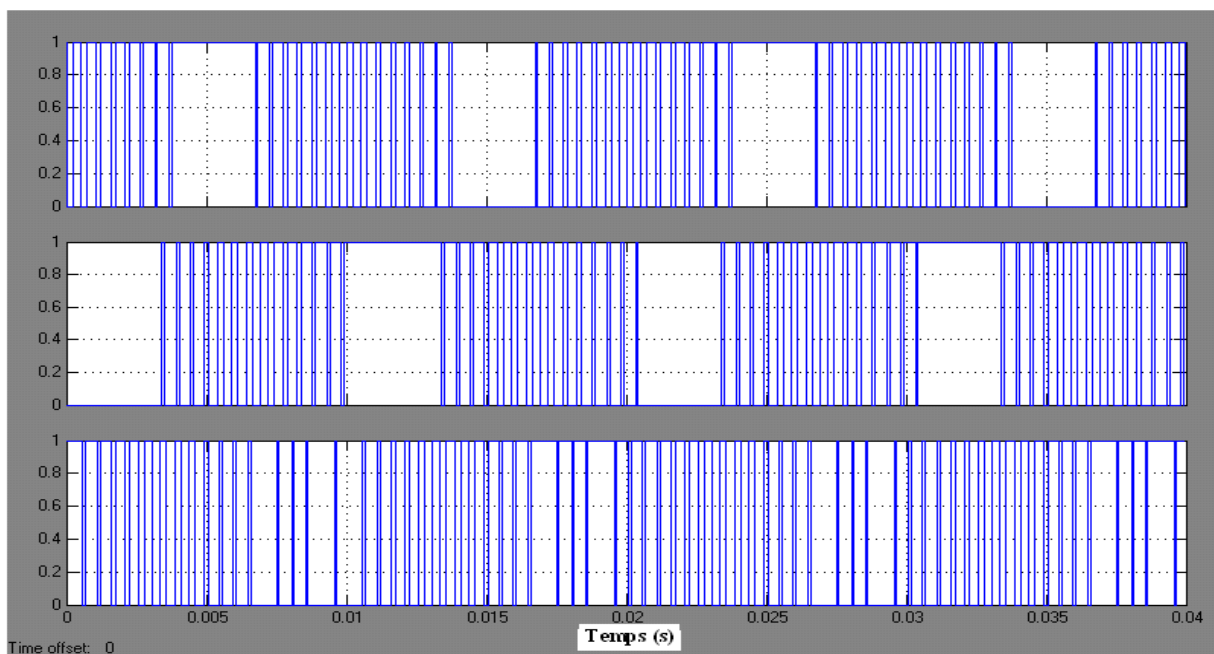


Fig. (IV-10): Les signaux de commande des interrupteurs

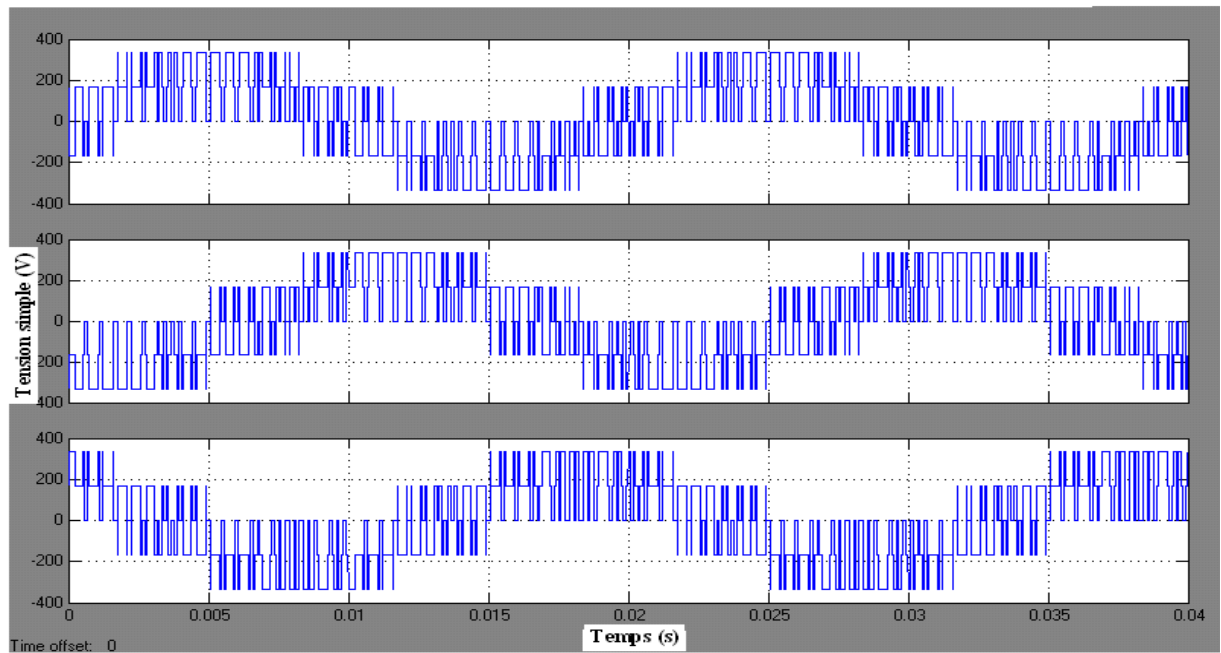


Fig. (IV-11): Les tensions simples dans les trois phases

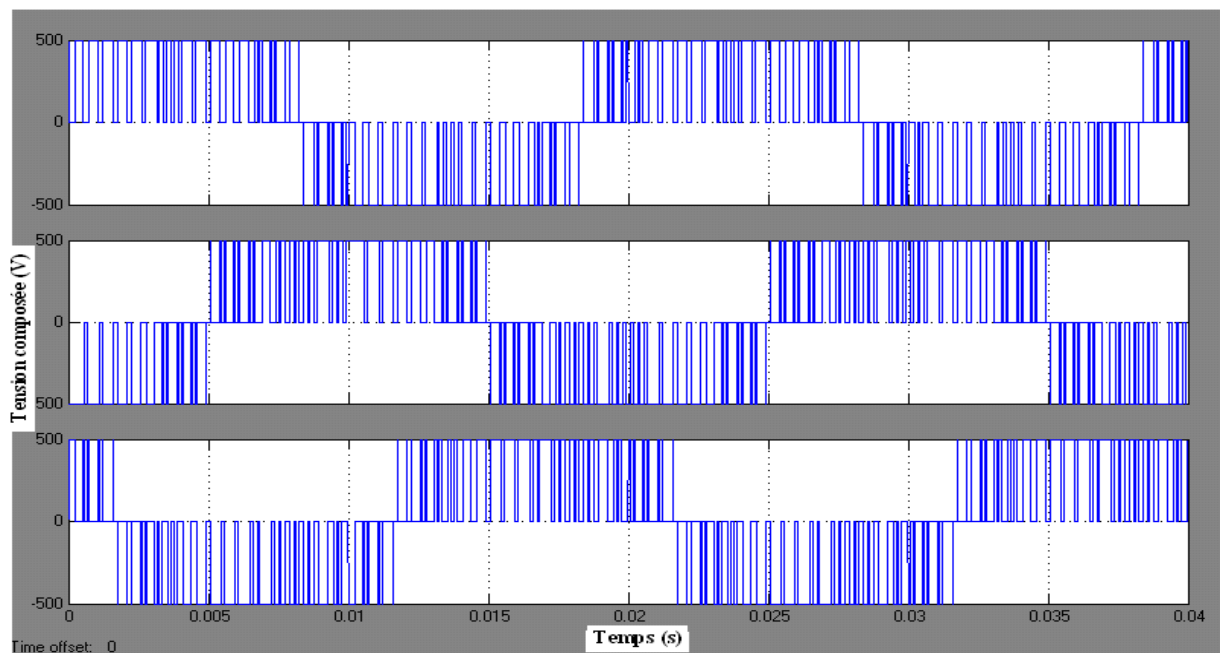


Fig. (IV-12): Les tensions composées des trois phases

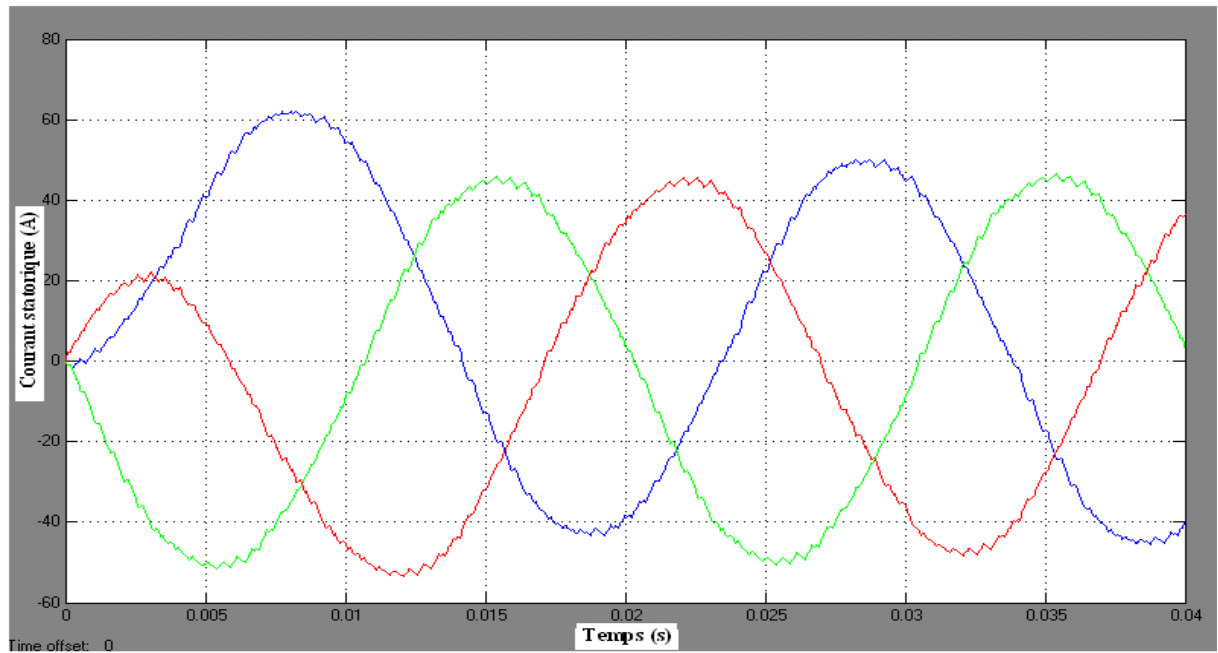


Fig. (IV-13): Les courants statoriques dans les trois phases

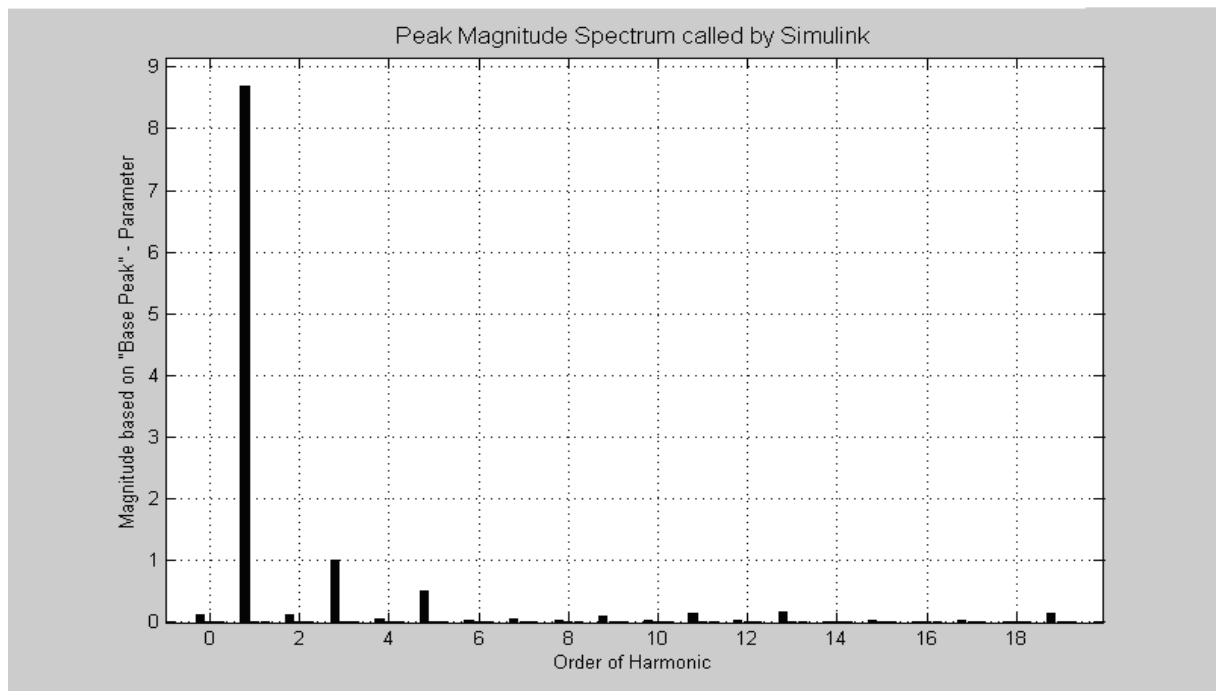


Fig. (IV-14): Le spectre d'harmonique du courant

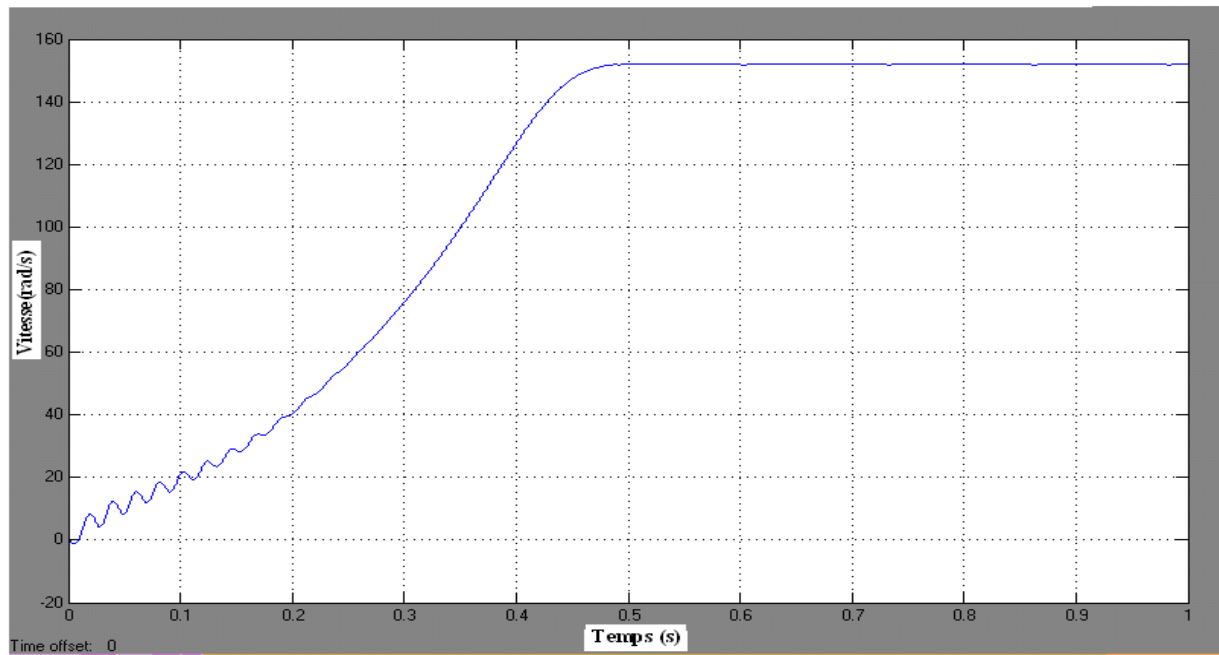


Fig. (IV-15): La vitesse

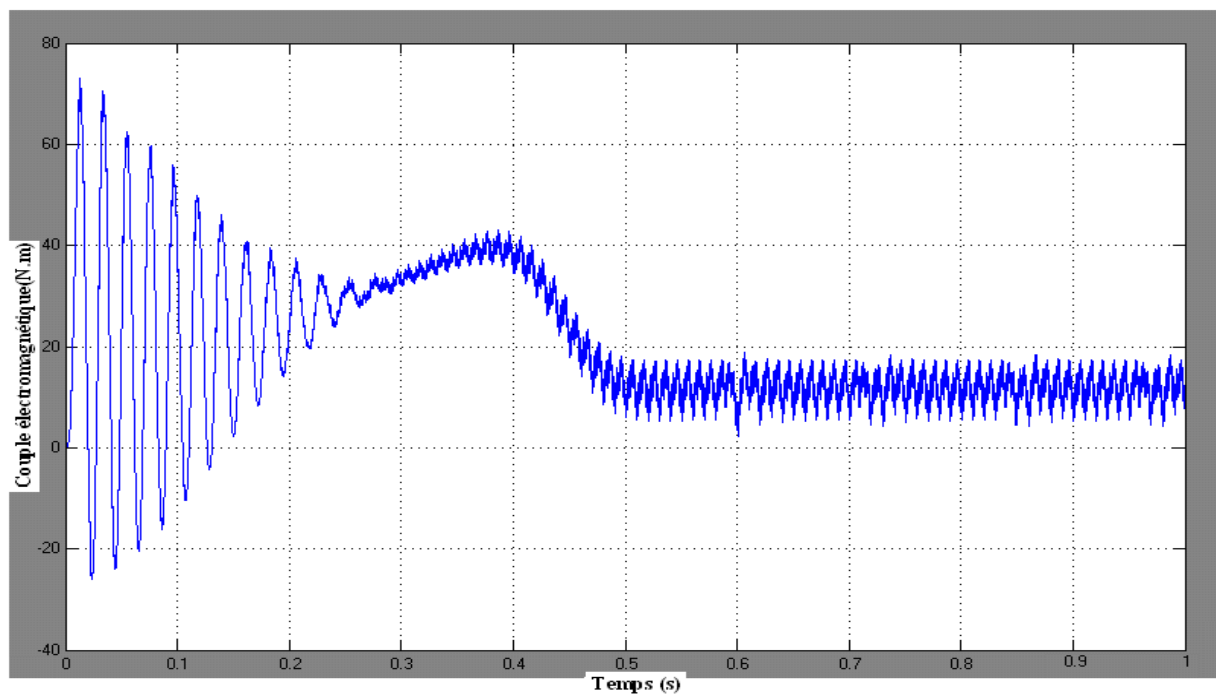


Fig. (IV-16): Le couple électromagnétique

IV-2-2 Simulation de la commande MLI à hystérésis

a) Pour une bande $(-8,+8)$

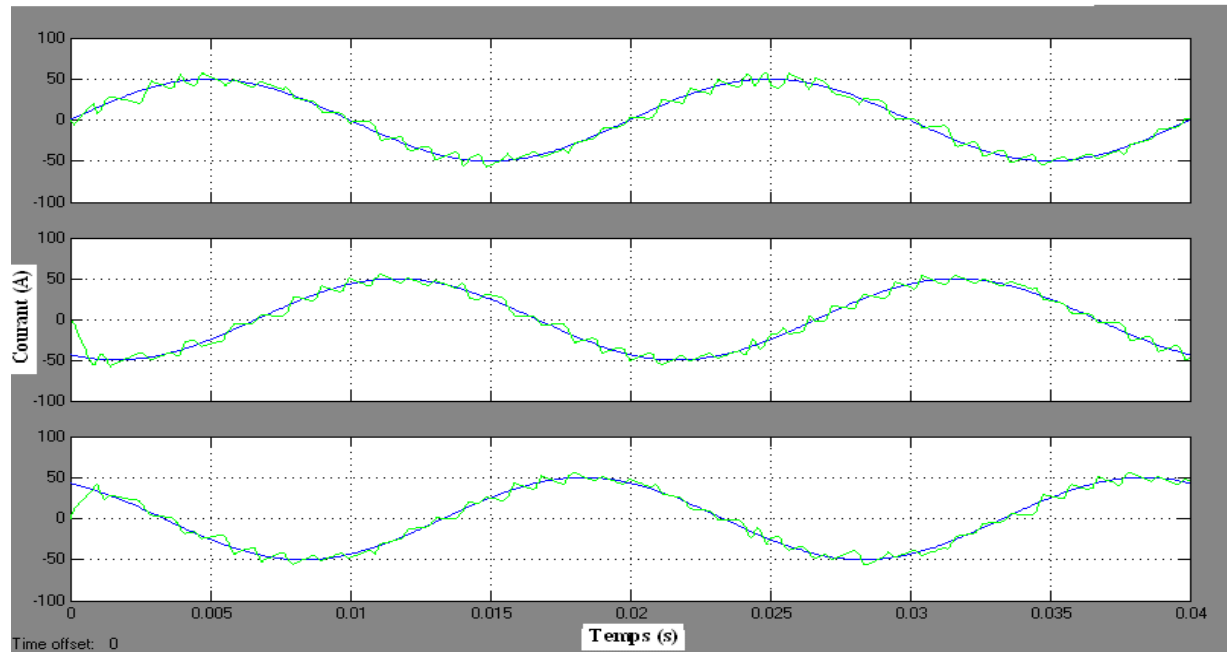


Fig. (IV-17): Le courant de référence et le courant réelle

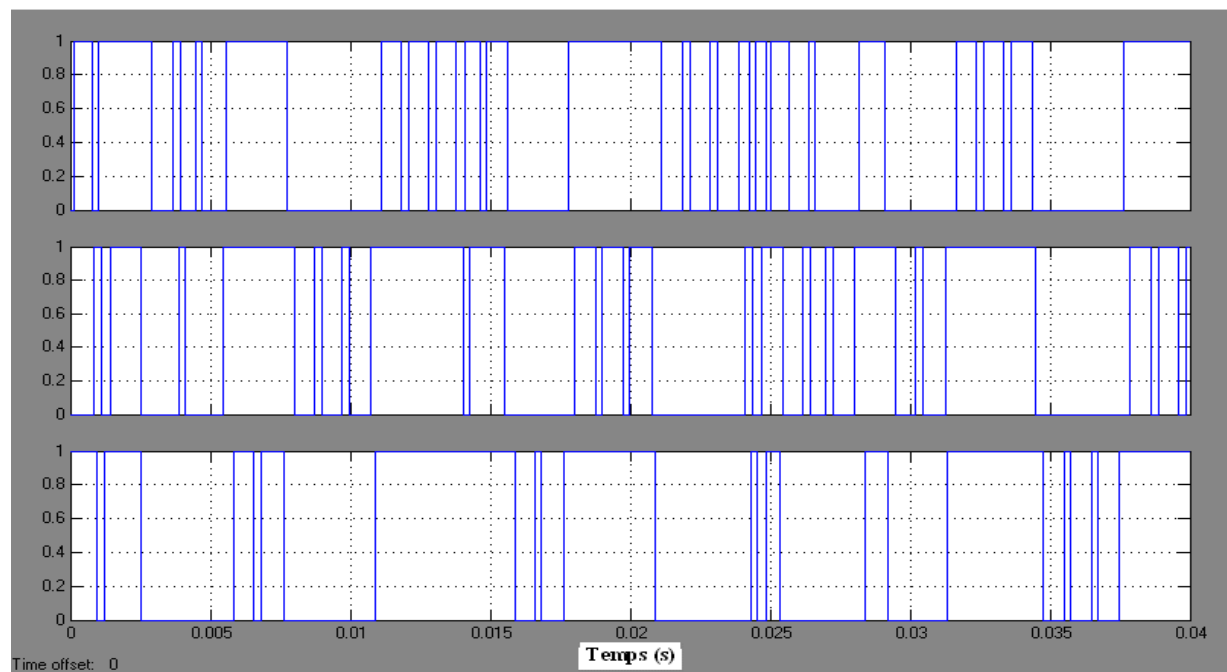


Fig. (IV-18): Les signaux de commande des interrupteurs

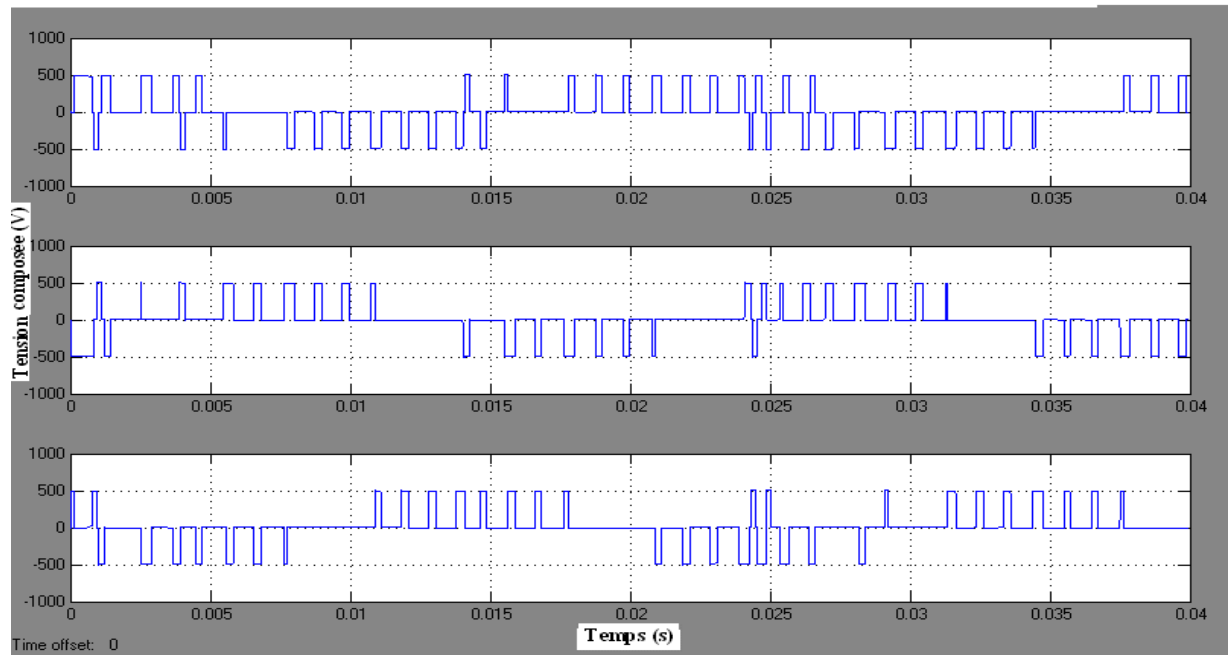


Fig. (IV-19): Les tensions composées des trois phases

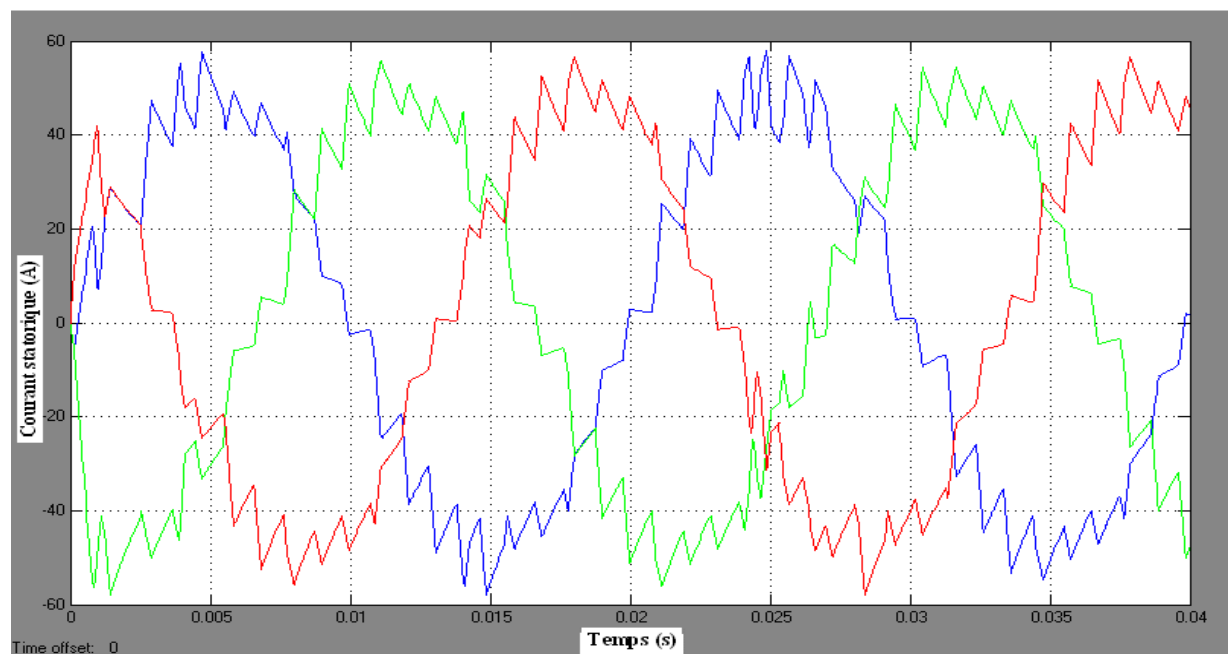


Fig. (IV-20): Les courants statoriques dans les trois phases

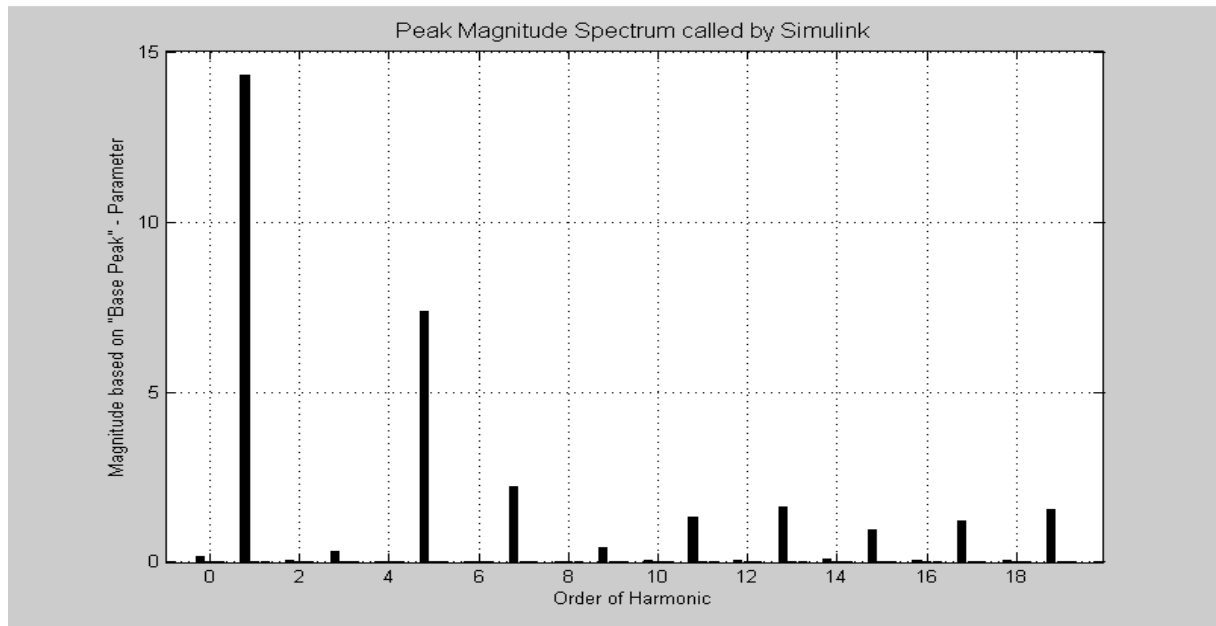


Fig. (IV-21): Le spectre d'harmonique du courant

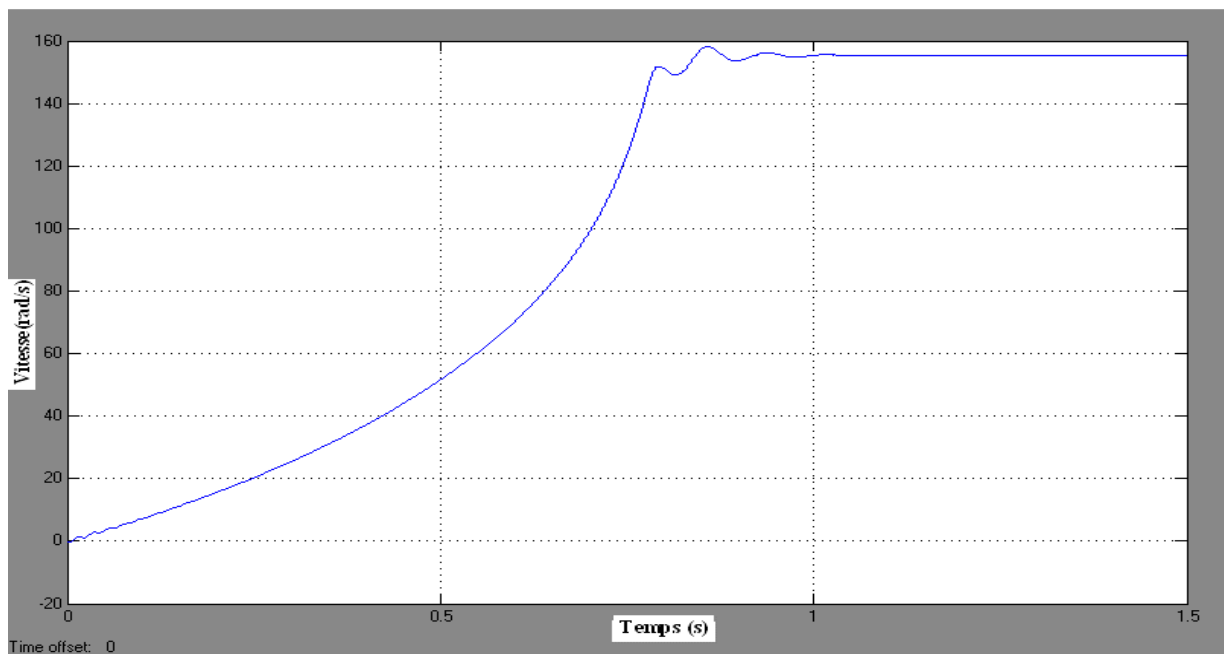


Fig. (IV-22): La vitesse

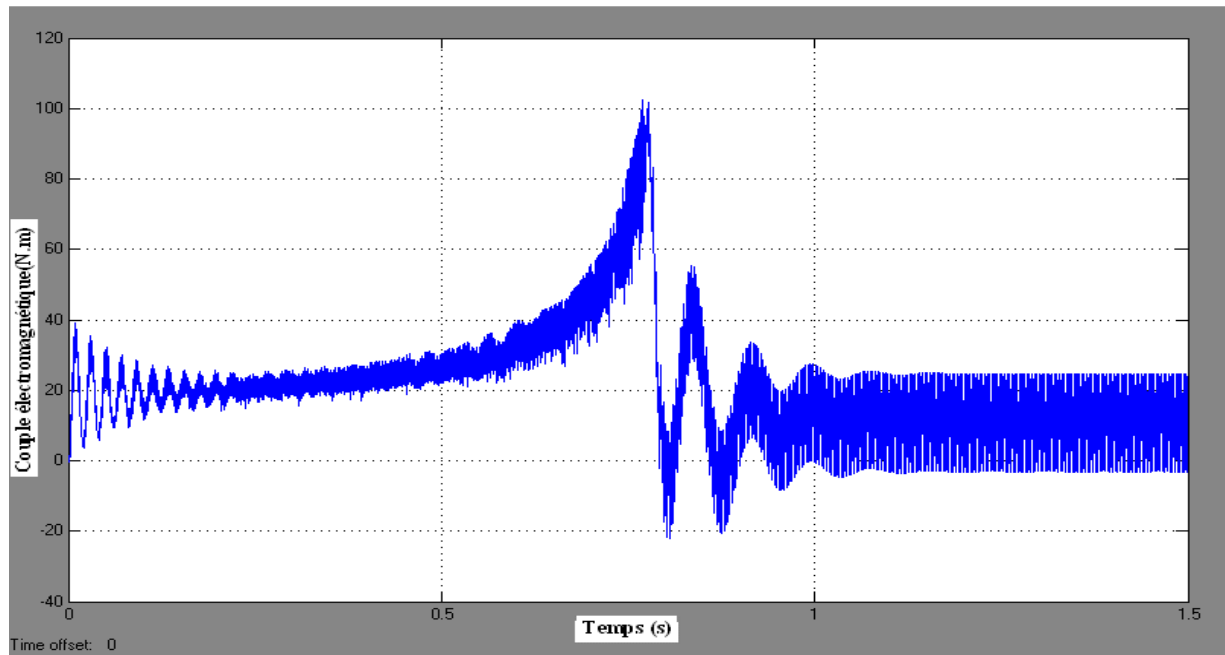


Fig. (IV-23): Le couple électromagnétique

b) Pour une bande (-5,+5)

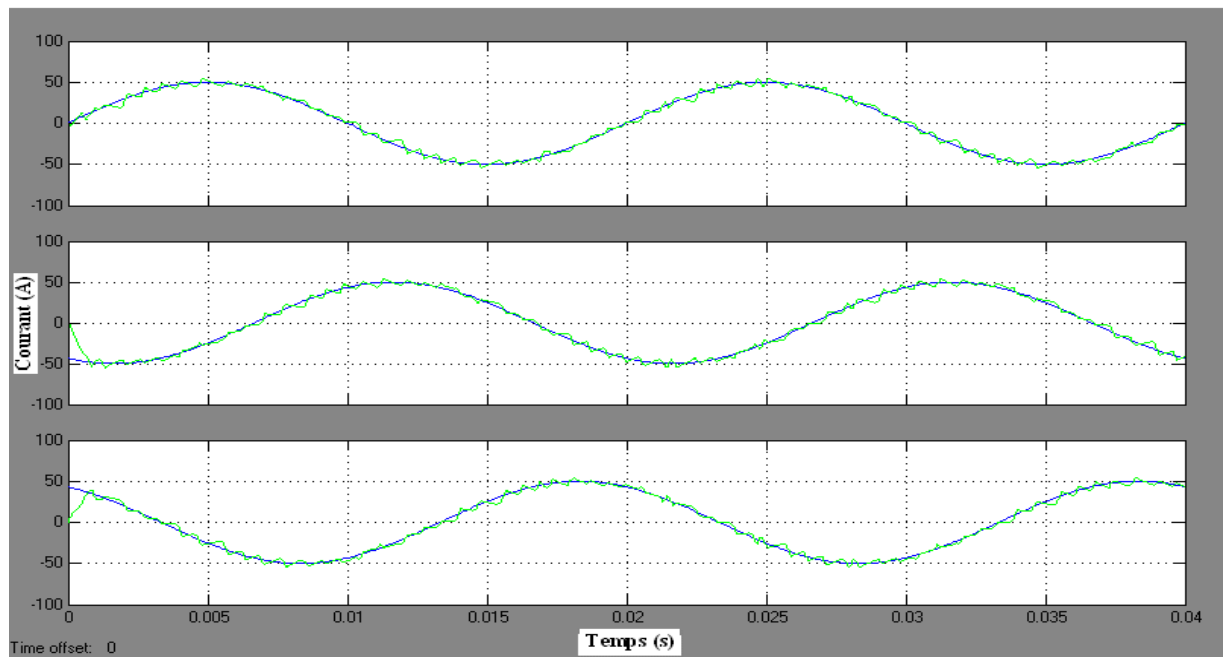


Fig. (IV-24): Le courant de référence et le courant réelle

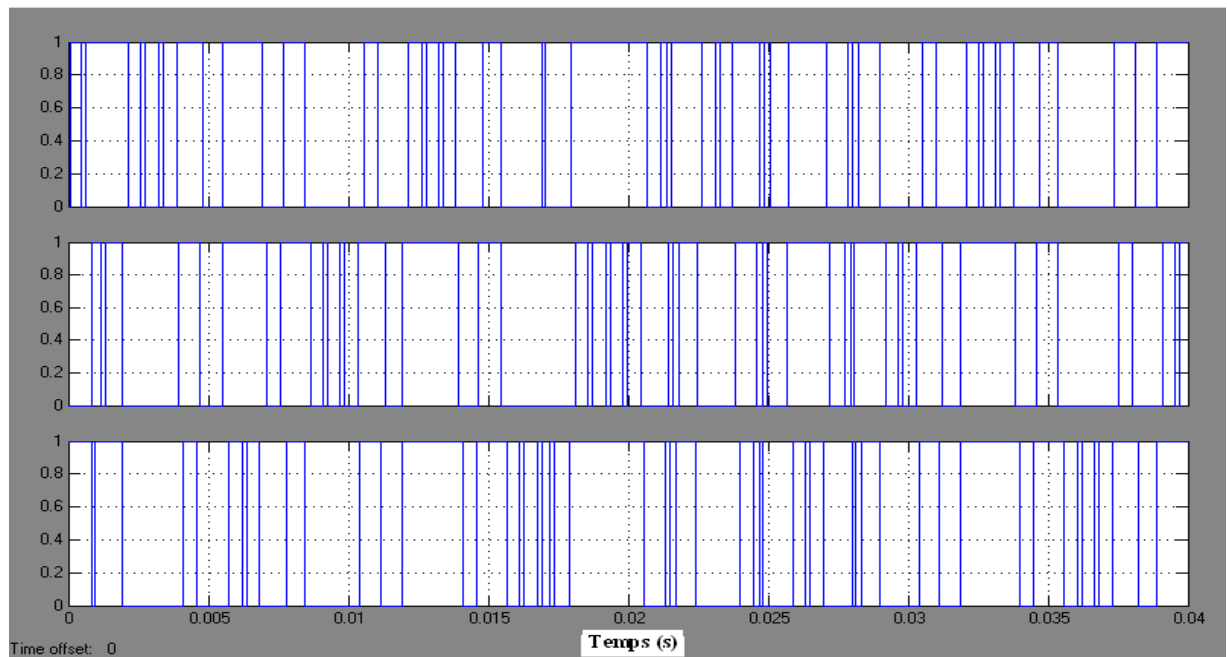


Fig. (IV-25): Les signaux de commande des interrupteurs

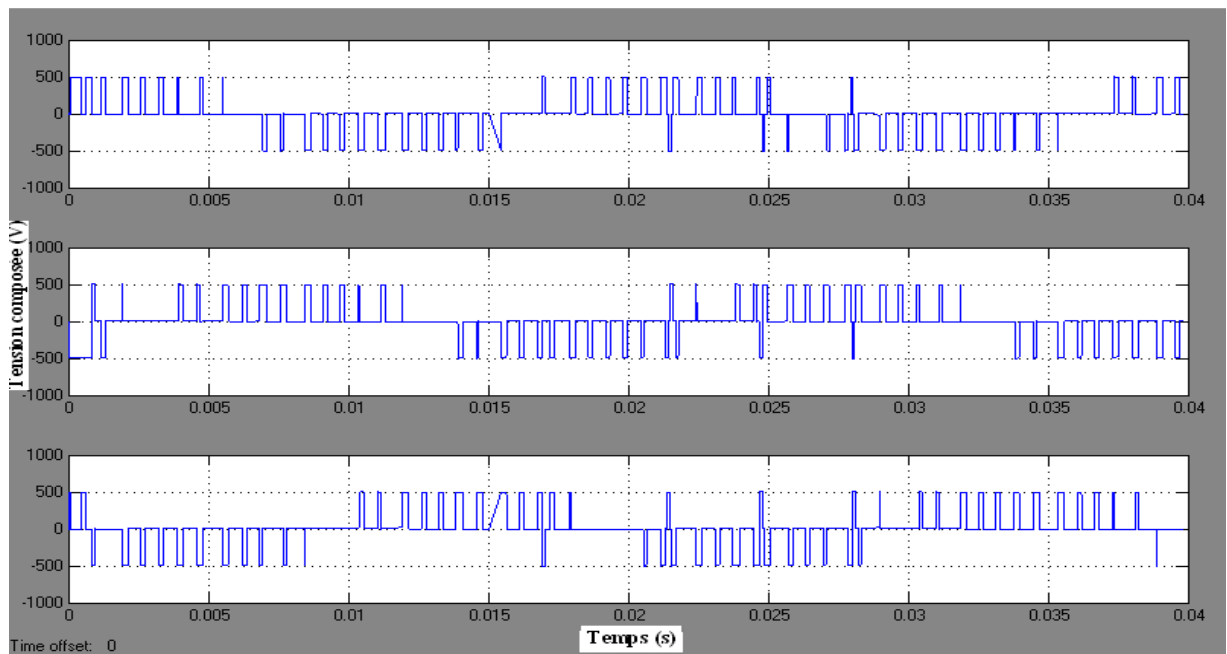


Fig. (IV-26): Les tensions composées des trois phases

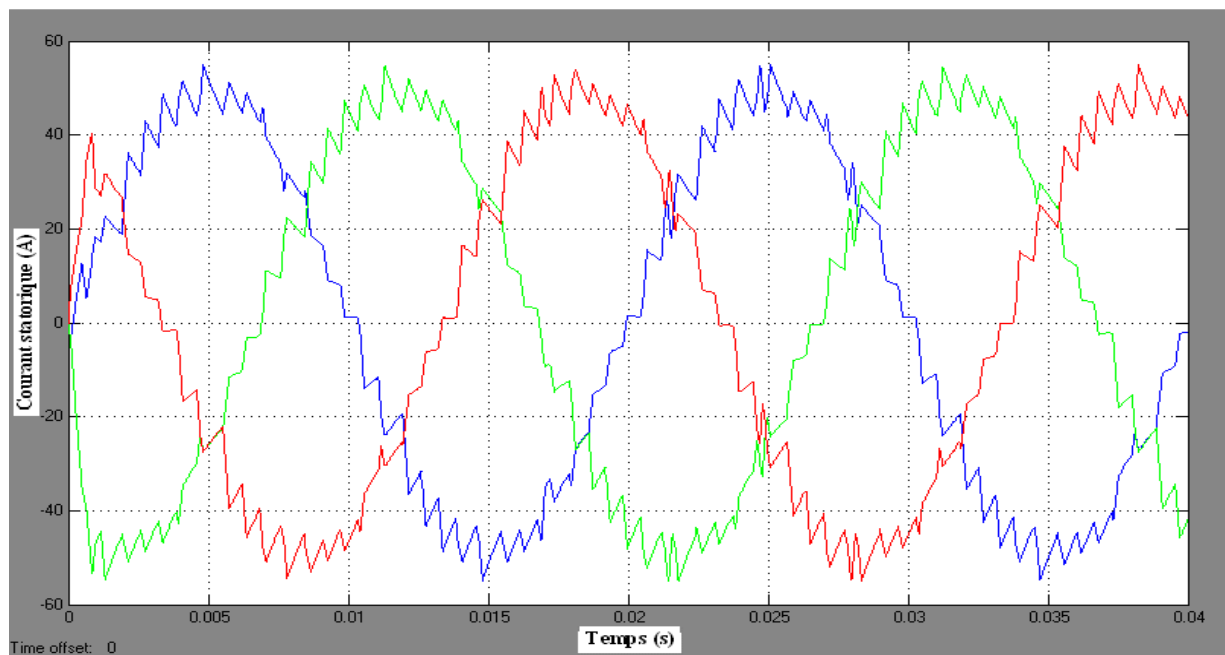


Fig. (IV-27): Les courants statoriques dans les trois phases

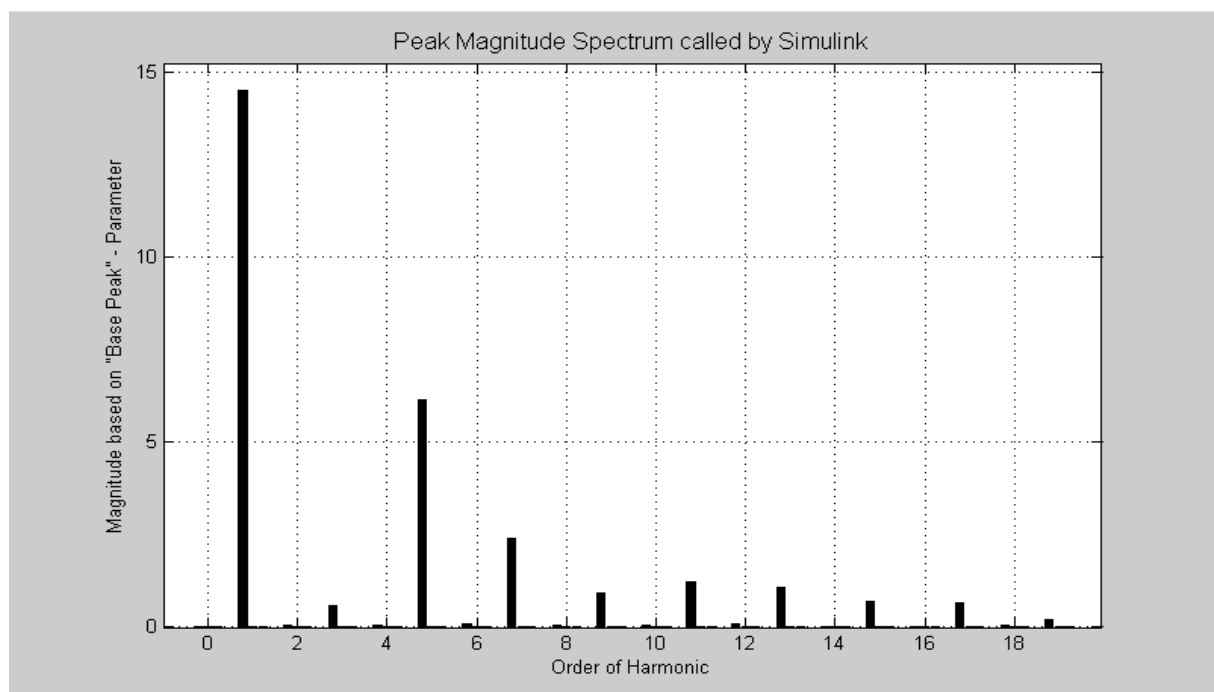


Fig. (IV-28): Le spectre d'harmonique du courant

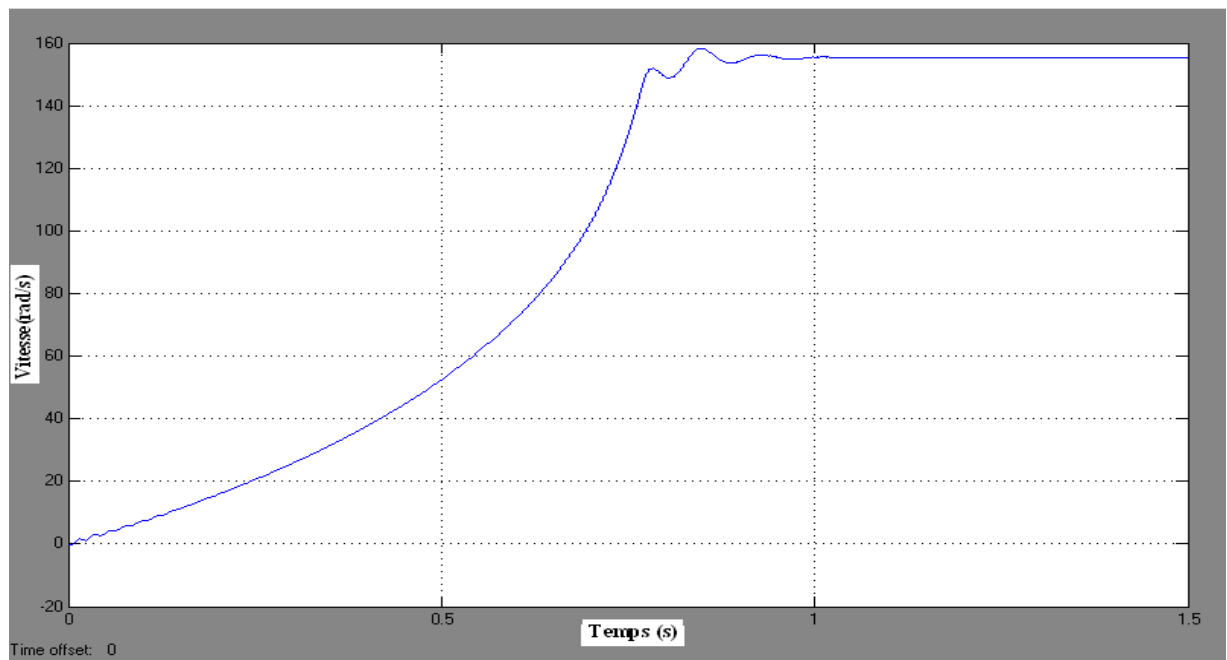


Fig. (IV-29): La vitesse

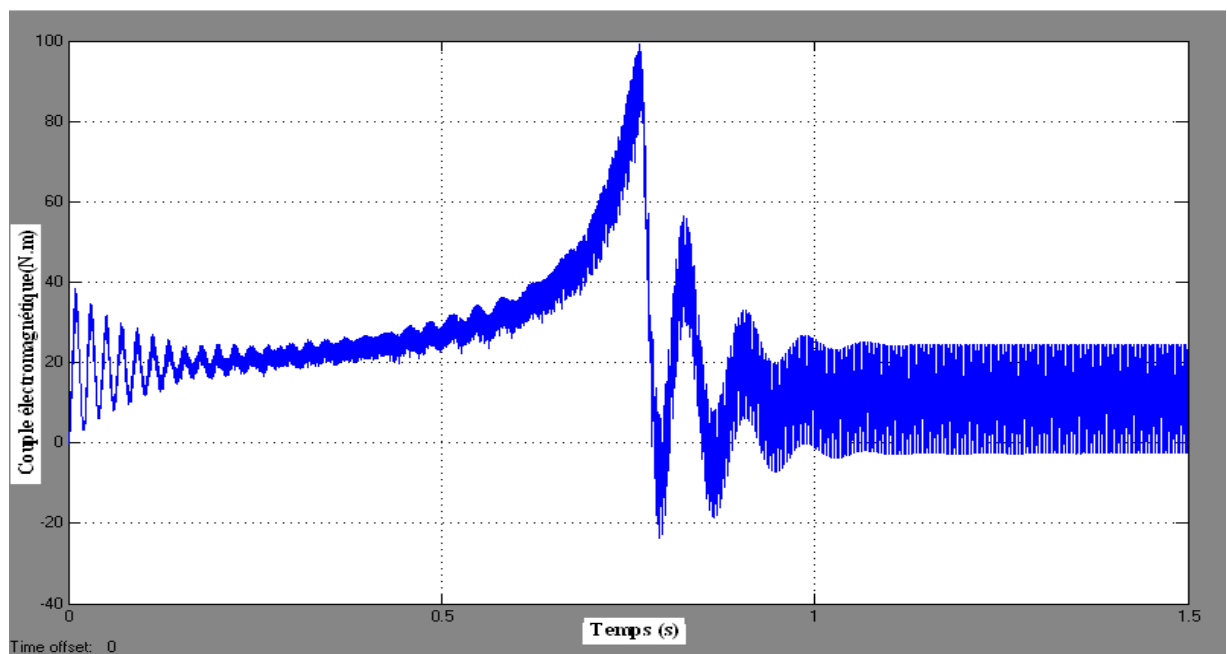


Fig. (IV-30): Le couple électromagnétique

IV-3 Interprétation des résultats

- Le but de la simulation est de faire une étude théorique d'une machine asynchrone piloter par un onduleur à MLI.
- Les deux techniques de l'MLI réaliser dans ce travail de simulation sont : MLI sinusoïdale et MLI à hystérésis.
- Les plus importantes grandeurs obtenues par simulation sont :
 - Les ondes : référence (sinusoïdale) et porteuse (triangulaire ou courant réelle).
 - Les intervalles de conceptions des interrupteurs.
 - Les tensions simples à la sortie de l'onduleur.
 - Les courants statorique et leurs spectres d'harmoniques.
 - La vitesse de rotation.
 - Le couple électromagnétique.

IV-3-1 Concernant la partie MLI sinusoïdale

Cette technique est basée sur la variation soit de l'indice de modulation « m », soit le coefficient de réglage de tension « r », les valeurs utilisées pendant la simulation sont :

$r = 0.8$ et $m = 15, 39$

Les intervalles de conduction sont obtenus par les points d'intersections entre la référence et la porteuse.

IV-3-2 Concernant la partie MLI à hystérésis

Cette technique est basée sur la variation de largeur de la bande, les valeurs qu'on utilisés sont : $\pm 5, \pm 8$

De la même manière les intervalles de conduction sont obtenus par les points d'intersections de la référence et du courant réelle.

- Les résultats de l'MLI sinusoïdale présentées par le tableau suivant :

m	r	THD%
15	0.8	19.59
39	0.8	7.434

L'augmentation de l'indice de modulation permet de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées (droit).

La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamentale ne dépend pas de la variation de « **m** », par contre la variation de « **r** » agit directement sur l'amplitude des harmoniques.

- Les résultats de l'MLI par hystérésis sont présentés par le tableau suivant :

Largeur de la bande	THD%
±5	8.454
±8	17.283

La diminution de largeur de la bande d'hystérésis permet de repousser les harmoniques, mais avec une fréquence de commutation incontrôlable.

IV-3-3 Concerne les grandeurs de moteur

- **Les courants** : Pour les indices de modulation élevés, les courants statorique et rotorique deviennent plus proche de la forme sinusoïdale (pour l'MLI sinusoïdale) et de même pour l'MLI à hystérésis si le largeur de la bande diminue.
- **Le couple** : les fortes valeurs du couple électromagnétique dans ces caractéristiques sont limitées entre l'instant de démarrage et **t = 0.6 s** pour l'MLI sinusoïdale (**m = 39, r = 0.8**), au-delà il prend sa valeur nominale. De même pour l'MLI à hystérésis mais jusqu'à **t = 0.9 s** pour une bande (**±5**).

- **La vitesse :** L'accroissement de la vitesse sera presque linéaire, l'obtention de la valeur nominale est plus rapide pour les valeurs de « m » plus grandes et la bande plus petite.

IV-4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis essentiellement de retrouver les résultats désirés représentés par la détermination de la meilleure stratégie de commande de l'onduleur parmi les stratégies proposées et l'alimentation des harmoniques au niveau de courant et de tension.

Conclusion Générale

L'électronique de puissance est la branche de la physique appliqué qui regroupe l'ensemble des recherches et des techniques ayant trait l'amélioration de la présentation de l'énergie électrique (qualité de signal ...). Elle est de plus en plus développée grâce au développement des semi-conducteurs.

Ce travail propose une alimentation de la machine asynchrone. C'est-à-dire obtenir une meilleure exploitation des équipements d'une entreprise industrielle. Pour cela, nous avons présenté les simulation à MLI sinusoïdale triangulaire et MLI à hystérésis qui ont un courant à la sortie de l'onduleur moins riche en harmoniques et plus proche de la forme sinusoïdale par rapport à la commande en pleine onde.

Si on tient compte de la réponse du moteur et la souplesse de réalisation de la commande, on peut dire que l'MLI à hystérésis est la meilleure commande, mais son point faible est que la fréquence de commutation est difficile à contrôler.

Alors l'MLI sinusoïdale est la meilleure commande grâce à sa fréquence de commutation qui est contrôlable, c'est la raison pour laquelle on l'utilise pour la variation des vitesses.

Comme perspective, nous pouvons proposer la continuité des études suivantes :

- ✚ Rechercher d'autres techniques de commande qui permettent d'avoir des signaux à la sortie les plus sinusoïdale possible.
- ✚ Réaliser l'onduleur à MLI vectorielle commandé en algorithmique.
- ✚ Étude de la commande par logique floue.
- ✚ Étude des onduleurs à structure multi-niveaux.

Annexe

Paramètres de la machine asynchrone

La machine utilisée est une machine asynchrone a cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

Puissance nominale	2236 VA
Tension nominale	220 V
Couple résistant nominale	11.87 N.m
Fréquence nominale	60 Hz
Nombre des pôles	2
Résistance statorique	0.435 ohm
Rrésistance rotorique	0.816 ohm
Inductance statorique	2×10^{-3} H
Inductance rotorique	2×10^{-3} H
Inductance mutuelle	69.31×10^{-3} H
Moment de d'inertie du rotor	89.31×10^{-3} kg.m²
Coefficient de frottement visqueux	0 N.m.s

Choix des transistors de puissance :

	Thyristor	Thyristor rapide	Transistor bipolaire	IGBT	GTO
Tension	6000V	1500V	1400V	1200V	4500V
Courant	5000A	1500A	500A	400A	3000A
Fréquence	1kHz	3kHz	5kHz	20kHz	1kHz

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. Zellouma, A. Omeiri and S. Saad, « Shunt Active Power Filter for Current Harmonics Suppression Using Hysteresis Control », Asian Journal of Information Technology, 6 (4), 2007, pp 436-440.
- [2] L. Zellouma and S. Saad, « Three-Phase Three-Level Shunt Active Power Filter », The Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE'08, April 21-23, 2008, Amar Telidji University Laghouat, Algeria.
- [3] L. ZELLOUMA, S. SAAD, N. E. DEBBACHE et A. OMEIRI, « L'adaptation du filtre actif parallèle aux variations de la charge », Revue Synthèse N° 17, pp. 88-94, Juin 2007 ANNABA.
- [4] L. ZELLOUMA et S. SAAD, Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant généré par un pont redresseur triphasé non commandé « Séminaire National sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle (SNMSI 2007) » 11–12 Mars 2007, SKIKDA.
- [5] L. ZELLOUMA , S. SAAD, Fuzzy Logic Controller for Three-phase Shunt Active Filter Compensating Harmonics and Reactive Power Simultaneously « International Conference on Computer Integrated Manufacturing (CIP'2007) » 03-04 November 2007, SETIF.
- [6] A. Omeiri, A. Haddouche, L. Zellouma and S. Saad, « A Three-Phase Shunt Active Power Filter for Currents Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation », Asian Journal of Information Technology, 5(12), 2006, 1454-1457.
- [7] L.Baghli, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », Cours de commande IUFM de Lorraine UHP, 2003/2004.
- [8] M.Pinard, « Commande électronique des moteurs électriques », Edition Dunod, Paris 2004.
- [9] F.Labrique, G.Seguir, R.Bausiere, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu - alternatif », Technique et Documentation -Lavoisier ,1995.
- [10] G.Seguir, « Électronique de puissance les fonctions de base et leurs principales applications », Edition Dunod, Paris1999.
- [11] M.Lavabre, « Électronique de puissance, conversion de l'énergie, cours et exercices résolus», Editions Casteilla, Paris1998.

- [12] M.H. Rashid, « Power electronics handbook», Academic Press, USA 2001.
- [13] L. Zellouma, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006.
- [14] L. Zellouma et B.S. Salem, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base des MOSFET», Mémoire d'ingénieur, Université de Biskra 2004.
- [15] A/M. Bendaikha, « Réduction des harmoniques a la sortie de l'onduleur de tension triphasé commandé par mli vectorielle », Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006
- [16] S. Ben Abdi « Simulation d'un command en mode glissant et par régulateur PI appliqué à une machine asynchrone à cage alimentée par onduleur à hystérésis », Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2004.
- [17] R. Boucetta, « Commande par mode de glissement à hystérésis et MLI de la machine asynchrone à cage » Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2004-2005.
- [18] I. Derdouri et A. Abidli, « Etude et simulation d'une machine asynchrone alimente par l'association redresseur MLI – onduleur MLI », Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2007
- [19] S. Ben daikha et A. Djermane, « Etude sur la commande des onduleurs en pont triphasés », Mémoire d'ingénieur, OUM ELBOUAGHI 2005.
- [20] A. Chachi, « Etude des perturbations harmoniques pour différentes commandes en modulation de la largeur d'impulsion MLI», Mémoire d'ingénieur, BATNA 1999.
- [21] C. Toumi et L. Djebablia, « Association machine asynchrone – onduleur à trois niveaux de tension à MLI », Mémoire, BATNA 1999.

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Scientifique Ministère de L'enseignement Supérieure

Et De Le Recherche

Centre Universitaire D'EL-OUED

Département d'Electrotechnique



Thème

***Amélioration de l'alimentation du moteur
asynchrone par l'utilisation de l'onduleur à MLI***

Proposé et dirigé par :

Mr.: Zellouma Laid

Présenté par :

***Deheb Abdelghani
Rechdane Abdelkader
Rehouma Messaoud***

Année universitaire: 2007/2008



PLAN DE TRAVAIL

- **Introduction.**
- **Modélisation de la machine asynchrone à cage**
- **L'onduleur et son fonctionnement.**
- **Les différentes stratégies de modulations.**
- **Simulation et interprétations des résultats**
- **Conclusion générale.**



Introduction générale

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes, ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimal.

L'utilisation des convertisseurs statiques, est du au développement des semi-conducteurs de puissance commandé à l'allumage et au blocage tel que les MOSFETs, IGBTs et les GTOs .

Les onduleurs sont largement utilisés dans les systèmes d'entraînement a vitesse variable surtout dans la commande des moteurs à courant alternatif spécialement les moteurs à cage.

Une tension de sortie variable est obtenue en variant la tension d'entrée et maintenir le gain de l'onduleur constant. Par ailleurs, le développement de la technique de modulation de largeur d'impulsion comme stratégie de commande des onduleurs de tension a contribué au fonctionnement optimal des machines à courant alternatif.



La tension souhaitée (idéale) à la sortie de l'onduleur devait être sinusoïdale, mais la forme de cette onde en pratique n'est pas sinusoïdale, et très riche en harmoniques.

Ces harmoniques peuvent être minimisés ou réduits à l'aide des techniques d'ouverture et de fermeture des semi-conducteurs (modulation de largeur d'impulsion MLI (PWM) ou MLI à hystérésis).

Dans ce travail notre système est composé d'un moteur à cage alimenté par un onduleur de tension commandé en MLI

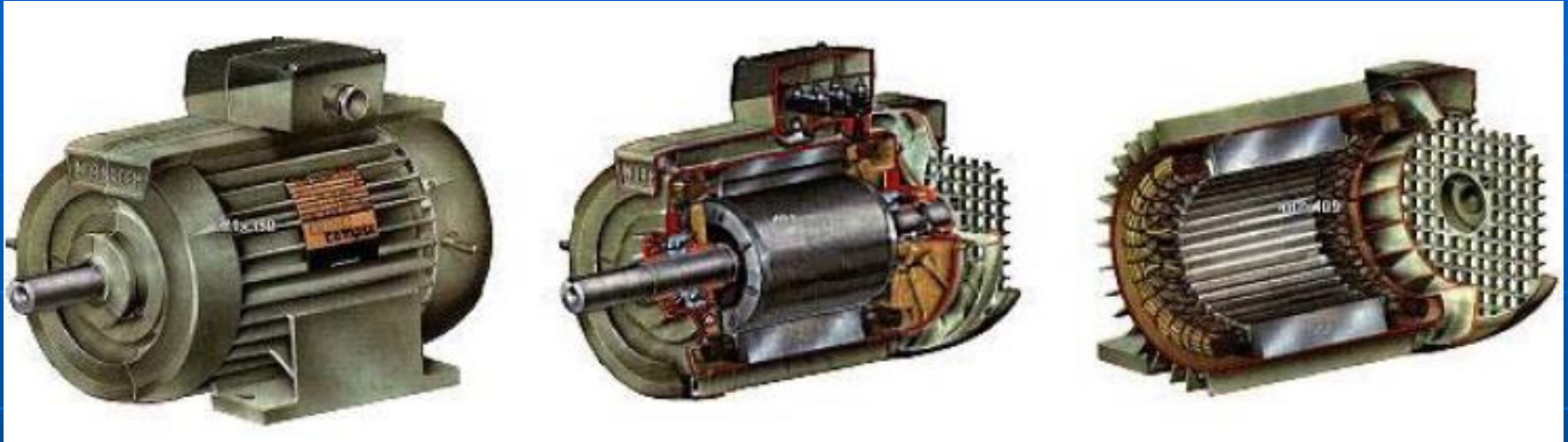


Modélisation De La Machine Asynchrone



Description de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones comportent deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (stator), l'autre est mobile (rotor).



Le stator

Le stator d'une machine asynchrone est composé de trois enroulements couplés soit en étoile ou en triangle et sont alimentés par un système de tension équilibre de façon à créer un champ tournant à la vitesse du synchronisme



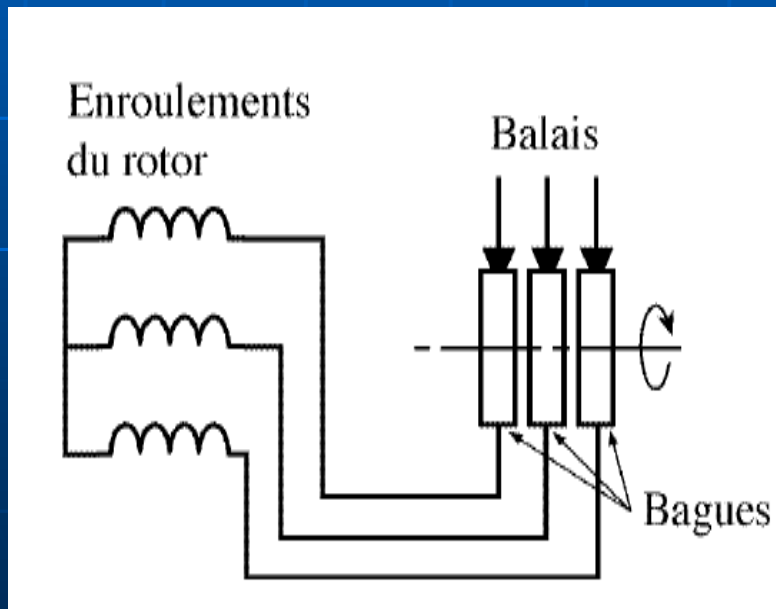
Stator d'une machine asynchrone



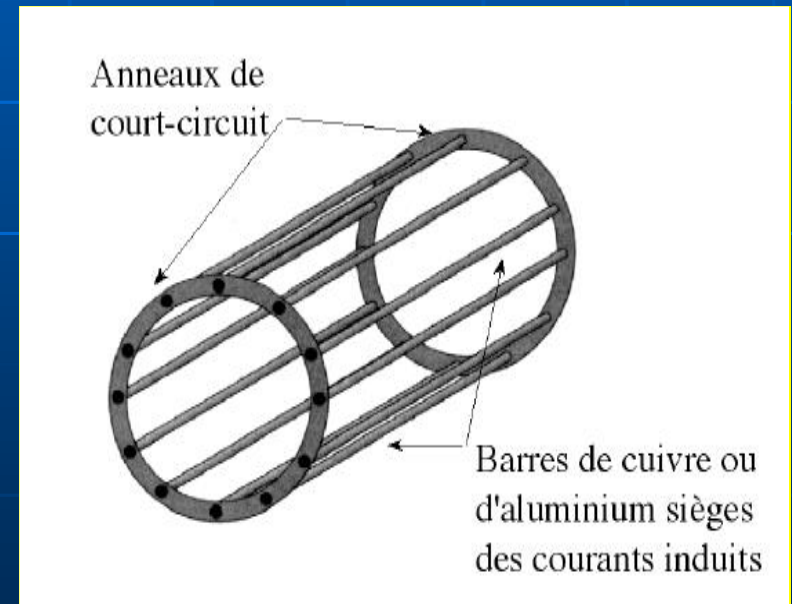
Le rotor

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie. (ni continue, ni alternative) ce qui simplifie beaucoup sa construction on distingue deux type de rotor:

Le rotor bobiné (à bagues)



Le rotor à cage





Réglage de la vitesse de rotation :

La vitesse du rotor d'un moteur asynchrone est :

$$N = (1-g).N_s$$

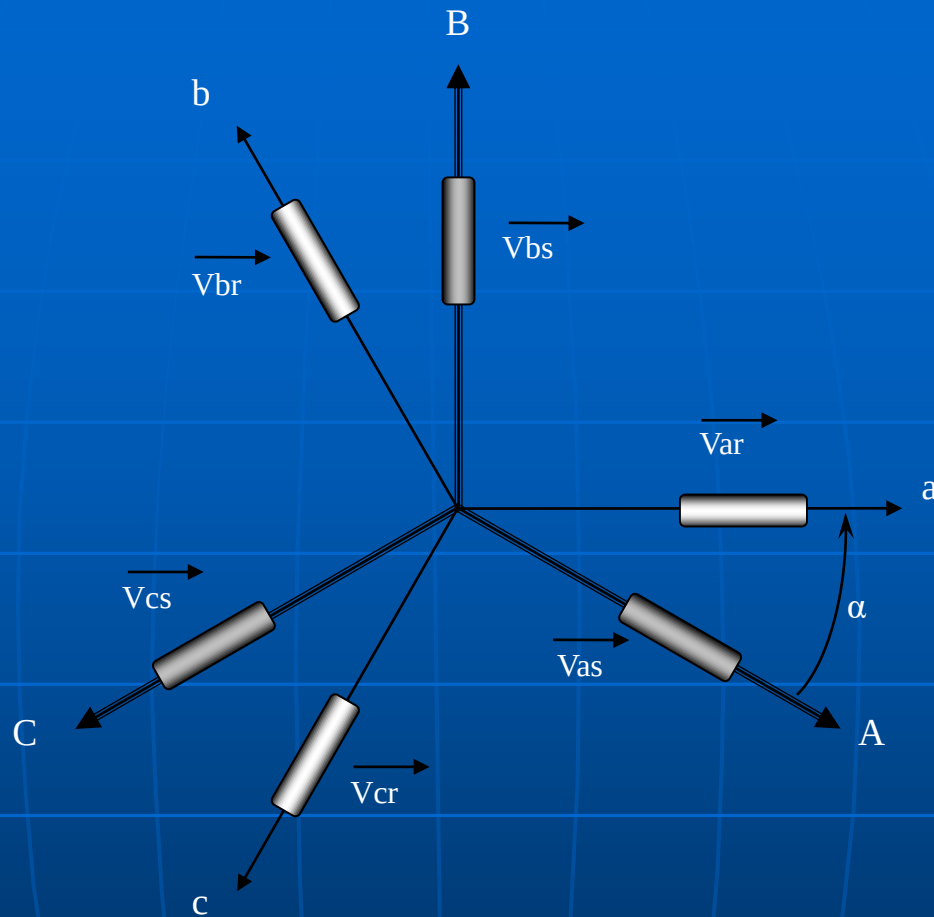
avec

$$N_s = 60f_1 / p$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par

- Réglage par action sur le nombre de paires de pôles
- Réglage par variation de la tension
- Réglage par variation de la fréquence



Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée



Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant.
- Les courants homopolaires ne peuvent circuler (pas de neutre utilisé)
- La répartition spatiale de l'induction magnétique est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligées.



Equations électriques de la machine asynchrone

$$\begin{bmatrix} V_{sabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} + (d / dt) \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} + (d / dt) \begin{bmatrix} \Phi_{rabc} \end{bmatrix}$$

Les équations électromagnétiques de liaison entre le stator et le rotor sont :

$$(\Phi_s) = (L_{ss}) (I_s) + (M_{sr}) (I_r)$$

$$(\Phi_r) = (L_{rr}) (I_r) + (M_{rs}) (I_s)$$



$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = L_m \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)([L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}])$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)([L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}])$$



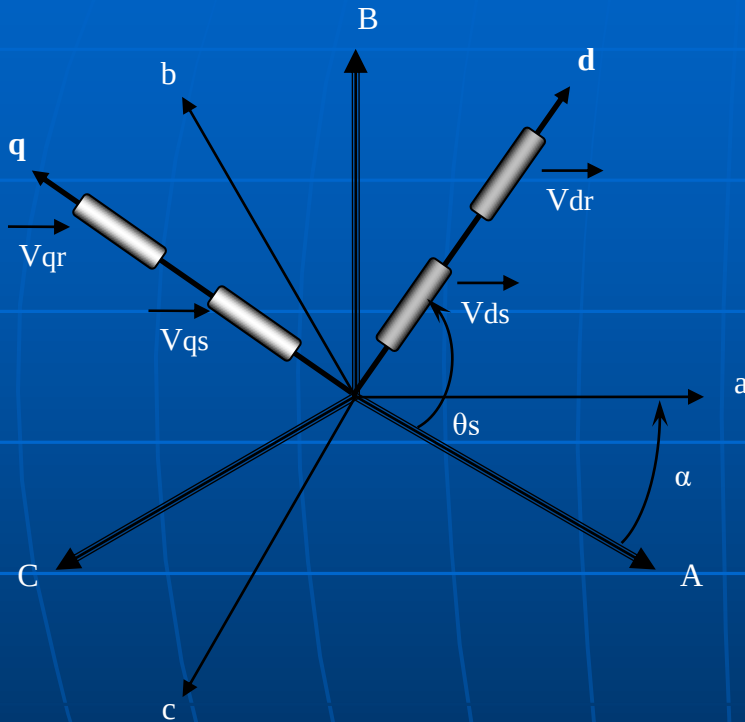
Transformation de Park

La transformation de Park consiste donc à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$



Le modèle de la machine après transformation de Park.



$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} \end{cases}$$



L'onduleur et son fonctionnement



Principe de fonctionnement de l'onduleur

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques permettant la conversion de l'énergie de la forme continue à la forme alternative.

Ils sont autonomes, lorsqu'ils ne nécessitent pas la présence du réseau alternatif.

Ils sont « statiques » car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs).

On considère les onduleurs en pont alimentant

- soit une charge monophasée
- soit une charge triphasée équilibrée en triangle ou en étoile à neutre isolé.

Dans ces onduleurs, chaque borne d'accès de la charge est reliée à deux interrupteurs à semiconducteurs, l'un permettant de la connecter à la borne positive de la source continue, l'autre à la borne négative de cette source.

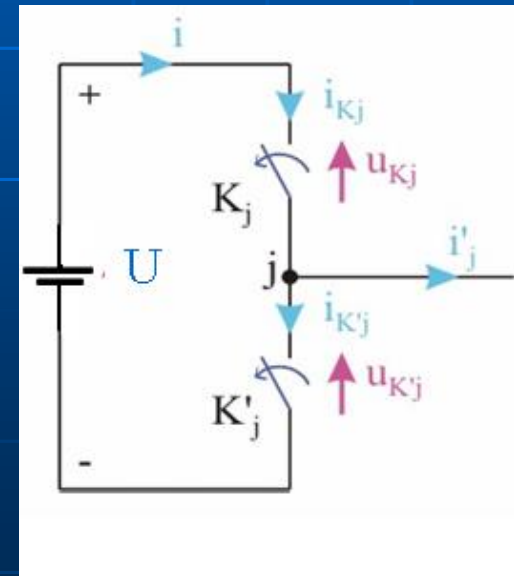
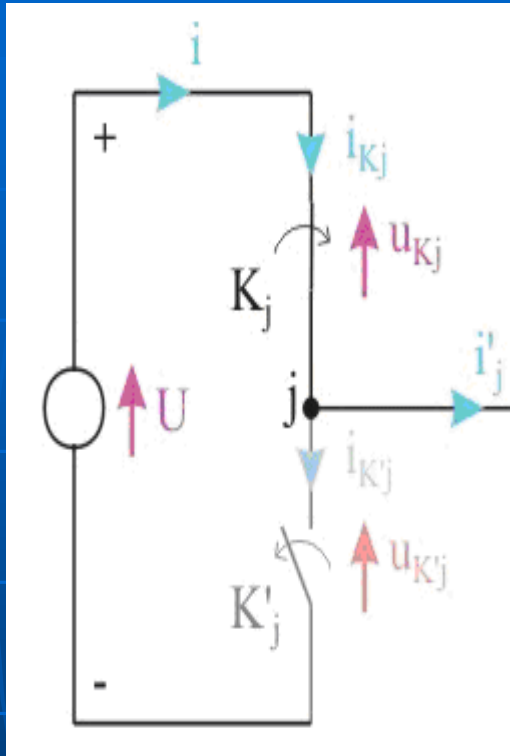
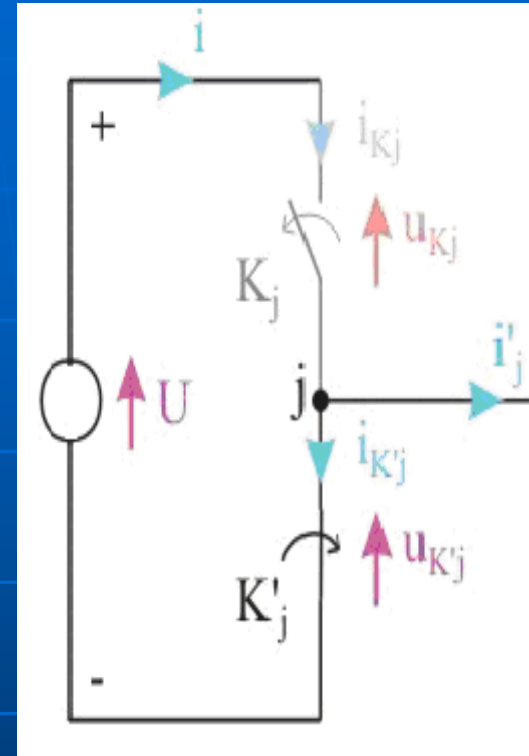


Schéma représentatif d'un bras (j) de l'onduleur

Les états des deux interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires, l'un étant ouvert et l'autre est fermé .



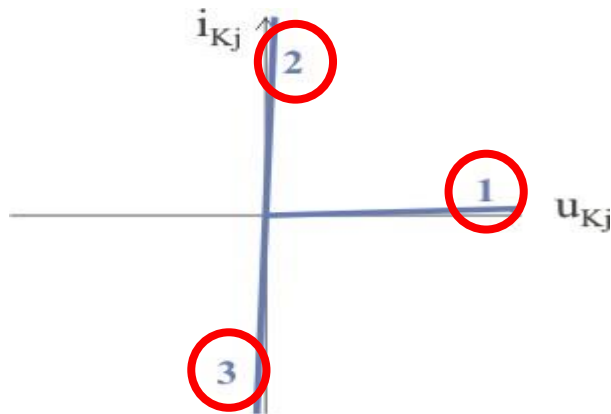
L'interrupteur K'_j est ouvert,
l'interrupteur K_j est fermé



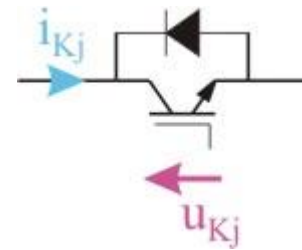
L'interrupteur K_j est ouvert,
l'interrupteur K'_j est fermé



L'interrupteur K_j est un interrupteur à 2 segments formés de la mise en parallèle inverse d'un transistor (ou un GTO) et d'une diode



La caractéristique statique



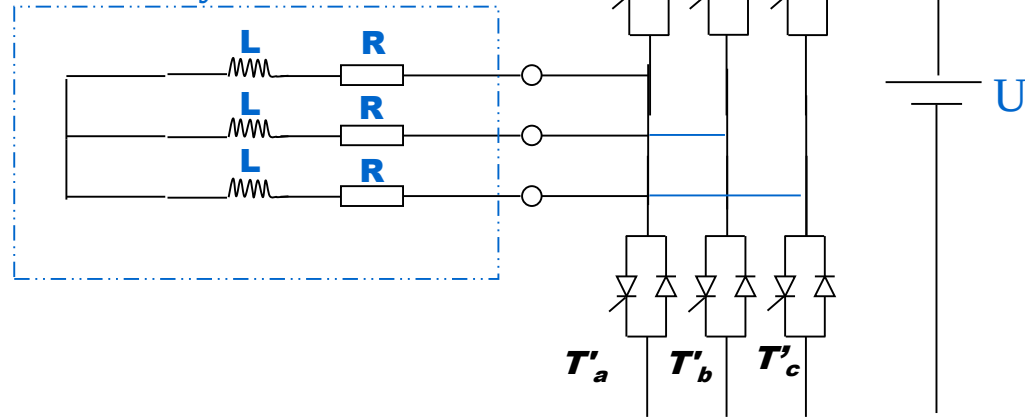
Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode.

La branche 1 correspond à l'état bloquant du transistor et de la diode.

La branche 2 correspond à la conduction du transistor.

La branche 3 correspond à la conduction de la diode.

Moteur asynchrone

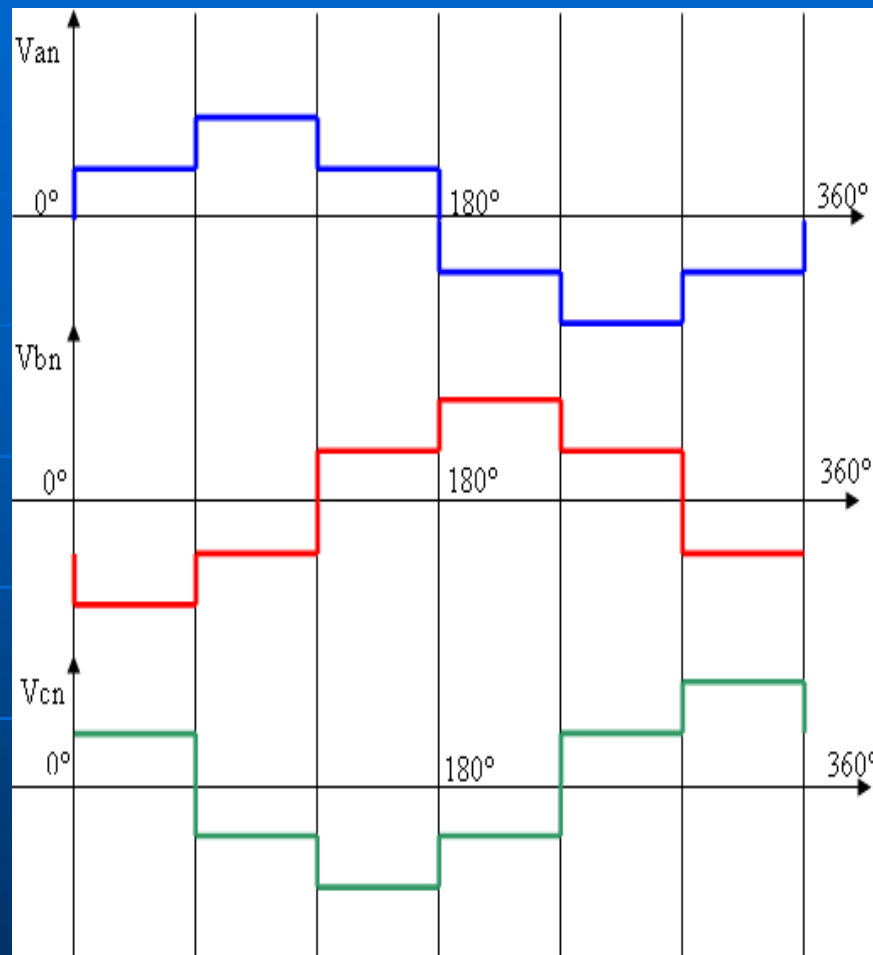
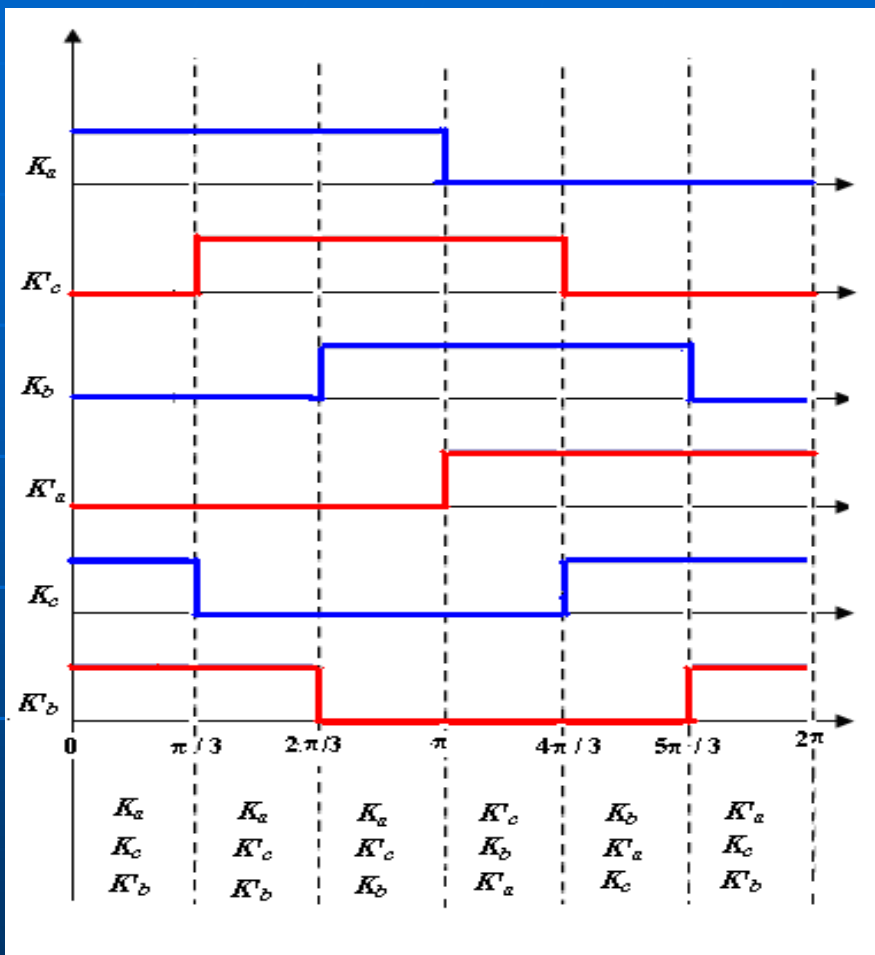


On utilise de plus en plus des semiconducteurs qui travaillent à une fréquence plus élevée pour les faire fonctionner plusieurs fois par période.

On forme chaque alternance des tensions ou des courants de sortie de plusieurs créneaux de largeurs convenables, on a alors une Modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.).



Pour illustrer le fonctionnement de l'onduleur, il est intéressant d'étudier le comportement en pleine onde (180°).



Il est nécessaire de penser à d'autres stratégies de commande pour ces harmoniques.

Parmi ces stratégies on peut cité la M.L.I sinusoïdale et la M.L.I vectorielle.



Les différentes stratégies de modulations



Les objectifs de l'MLI

Les principaux objectifs de la M.L.I sont les suivants:

- ❖ Alimenter les moteurs électriques avec des courants proches de l'onde sinusoïdale, par le contrôle des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- ❖ Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur une plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.

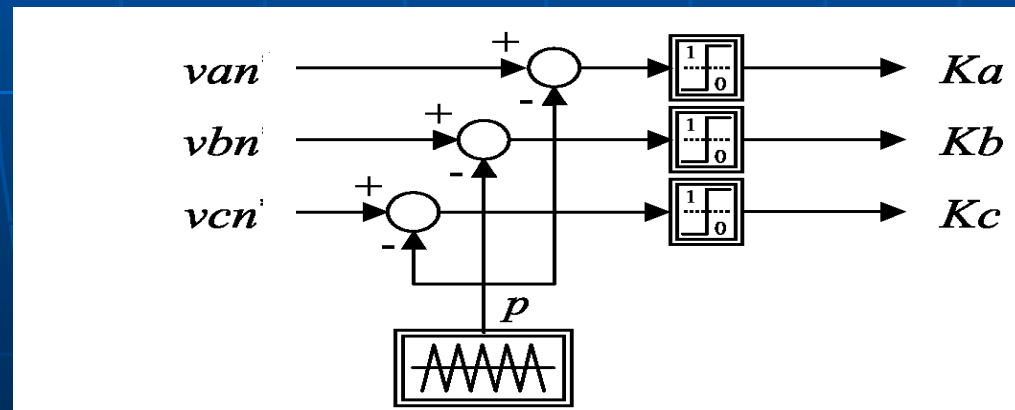


Il existe plusieurs stratégies de commande permettant de déterminer les trois fonctions logiques K_j (avec $j=a, b, c$).

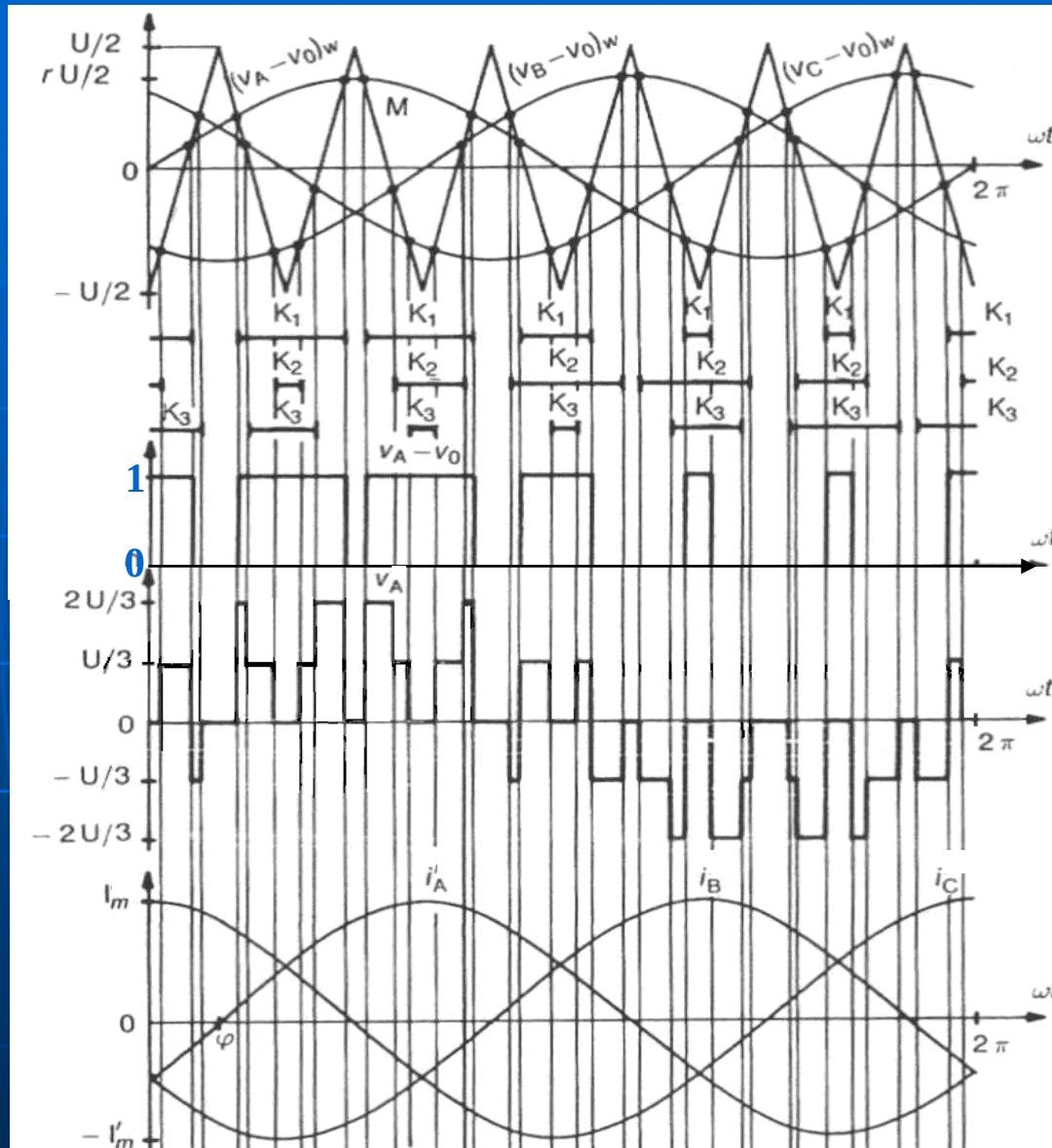
Nous parlerons généralement de la M.L.I sinusoidale, commande par hystérésis et plus récemment l'M.L.I vectorielle.

1- MLI Sinus Triangle

La M.L.I Sinus Triangle utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoidale de fréquence f , appelée modulante et un signal triangulaire de haute fréquence f_m , appelée la porteuse, pour déterminer les instants de commutation.



Le schéma de principe de l'MLI Sinus Triangle



La création des signaux des impulsions et des tensions



2- Commande par hystérésis

C'est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

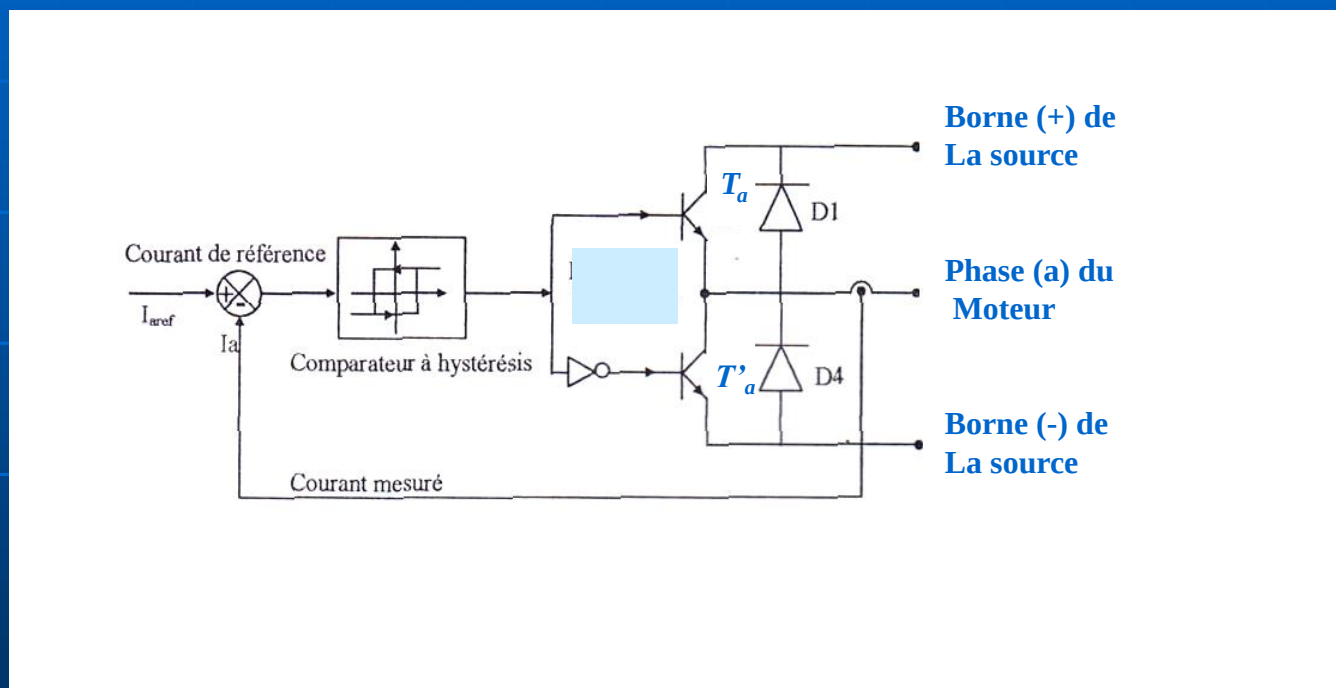


Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur



LA SIMULATION



schéma synoptique de l'association moteur asynchrone -onduleur à MLI

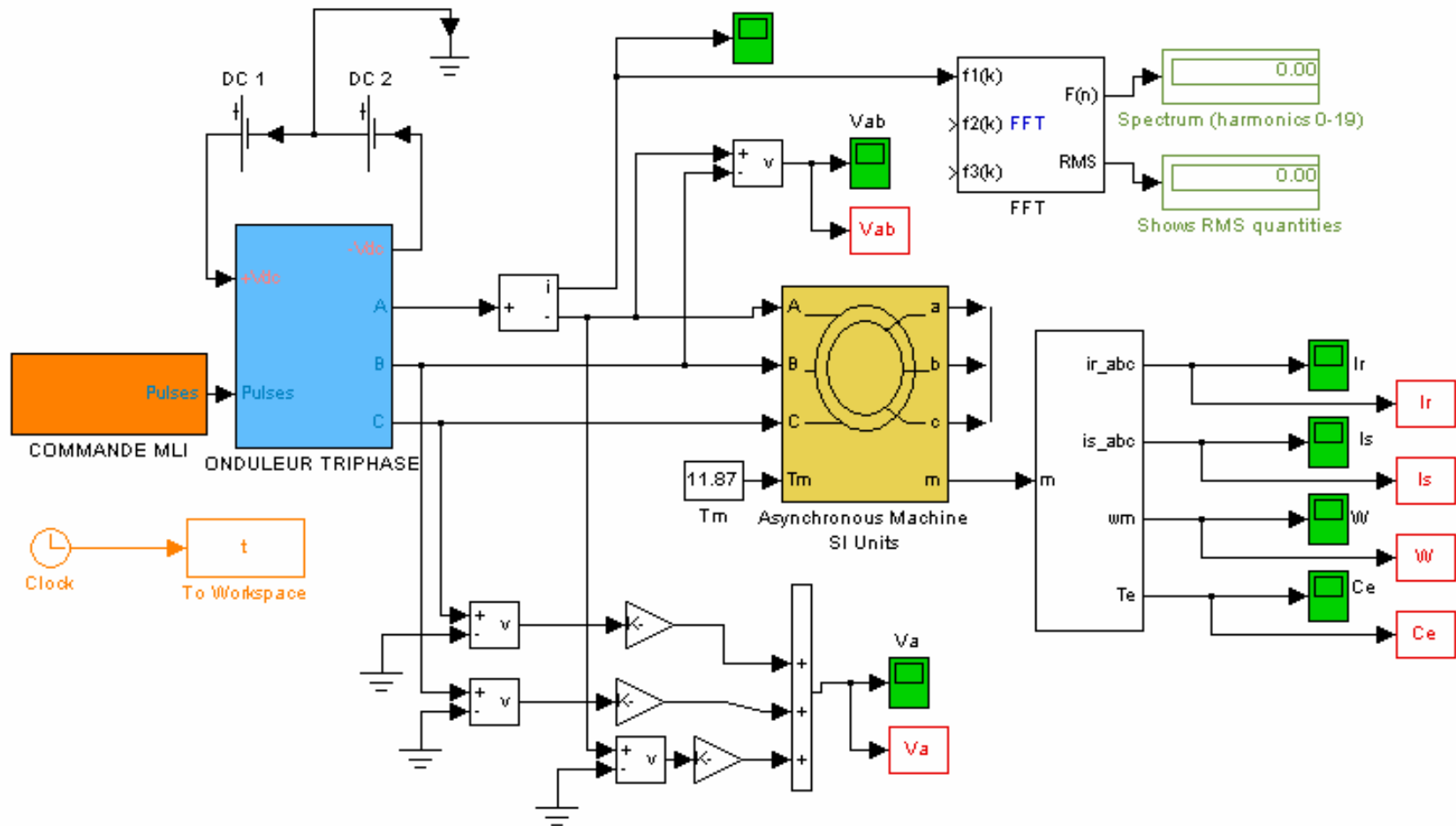


Schéma bloc de l'onduleur de tension triphasé

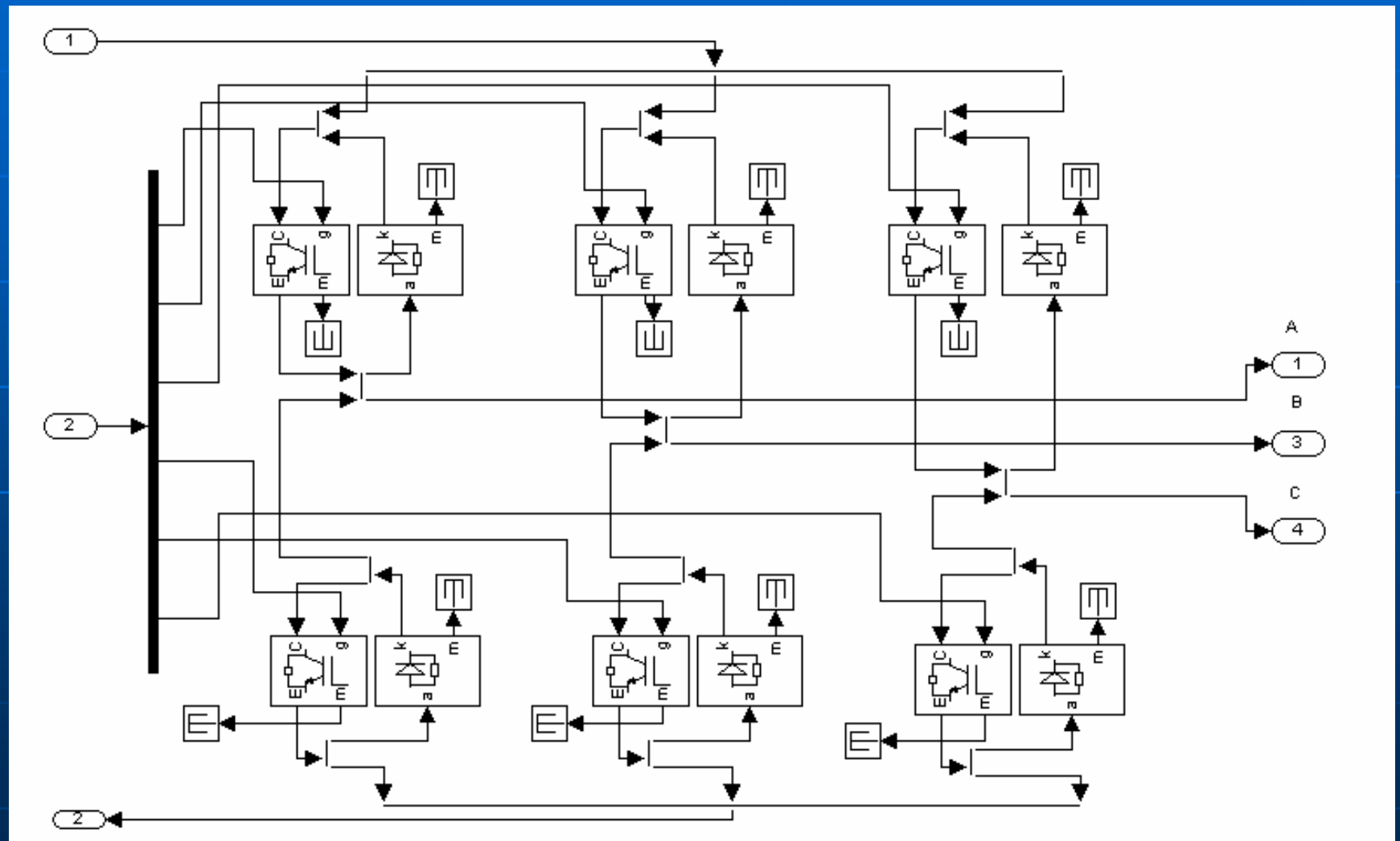




Schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle

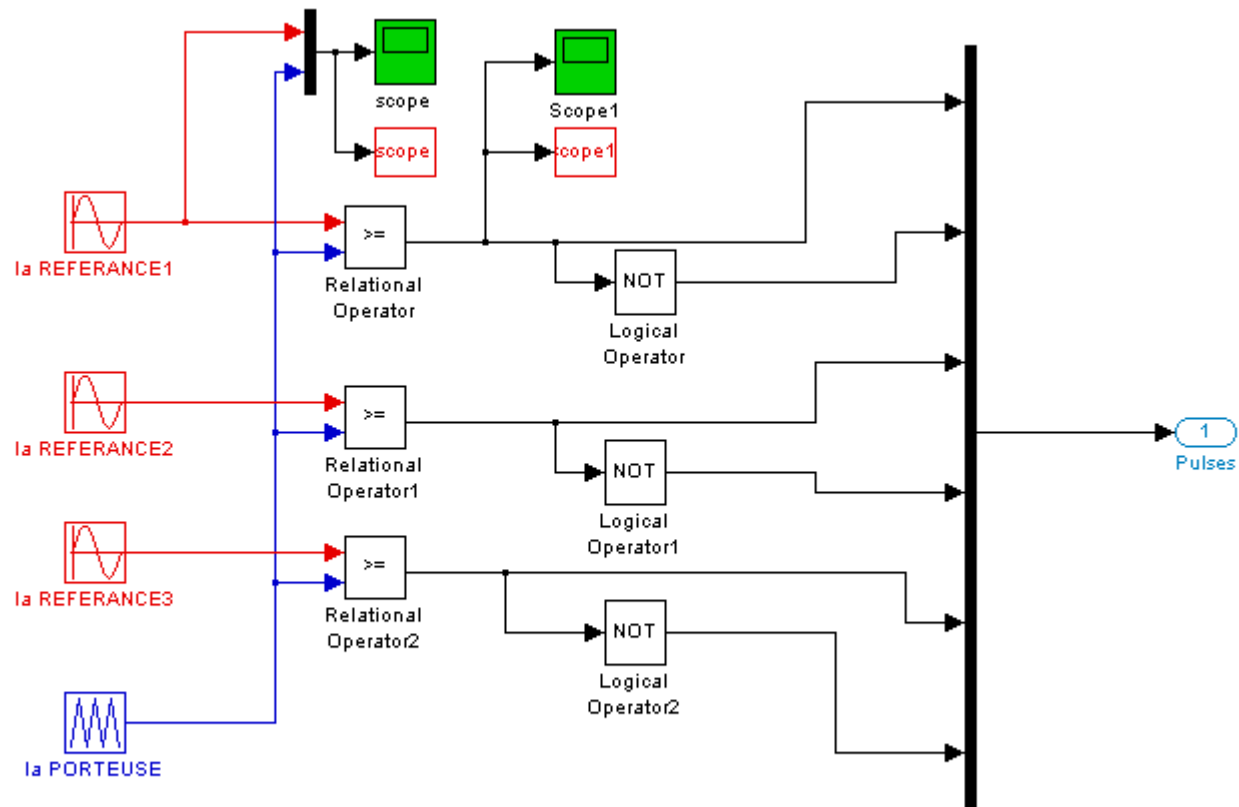
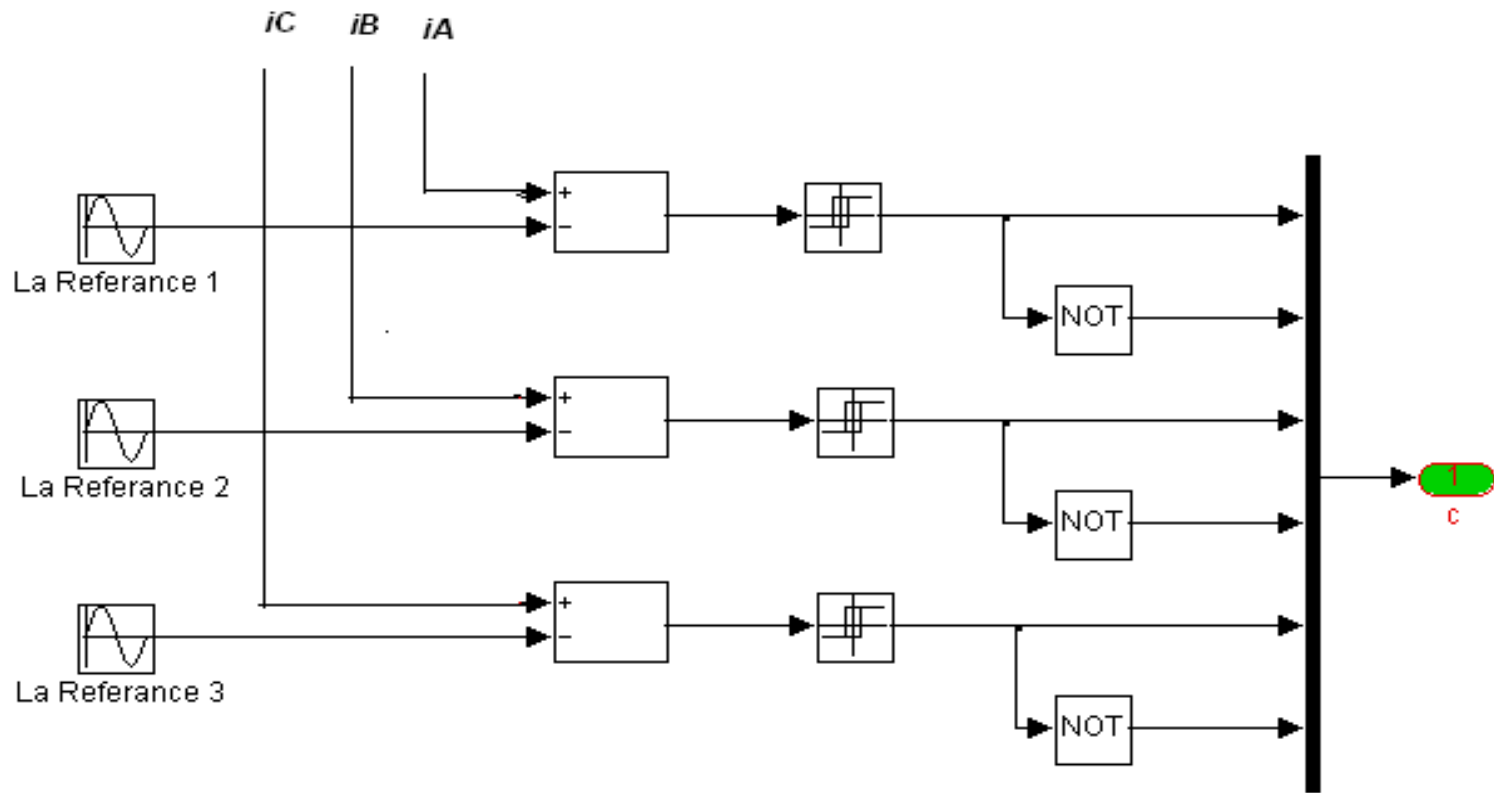




Schéma bloc de la commande par hystérésis



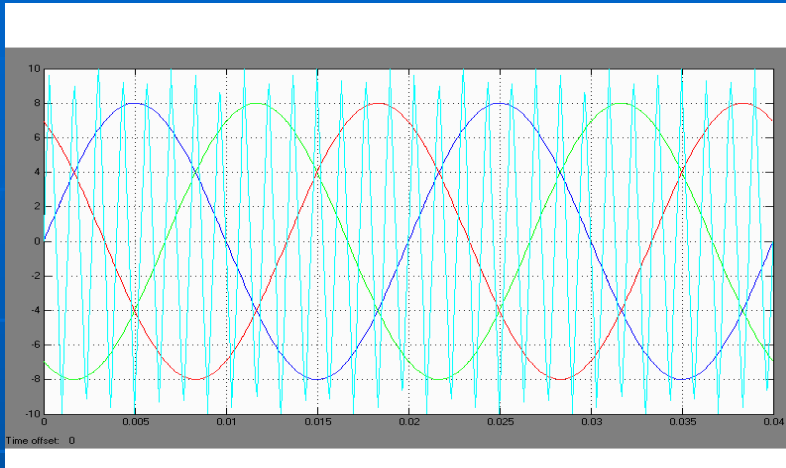


Simulation de la commande MLI sinusoïdale

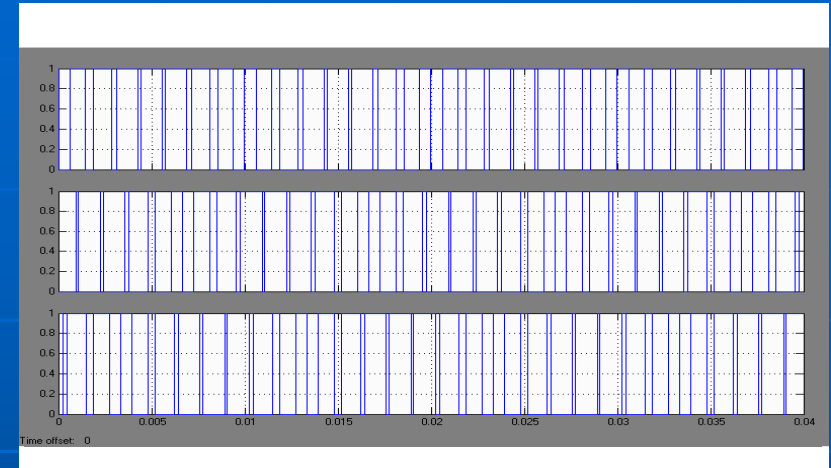
- Cette technique est basée sur la variation soit de l'indice de modulation « m », soit le coefficient de réglage de tension « r », les valeurs utilisées pendant la simulation sont :
 - $r = 0.8$ et $m = 15$ et 39 .



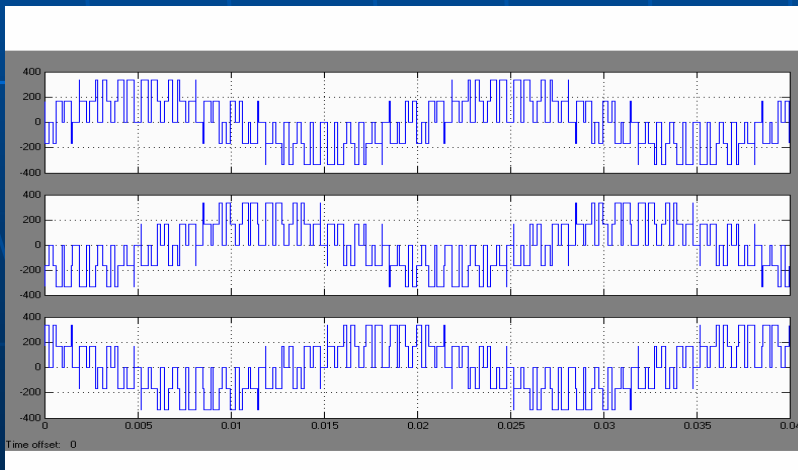
a) Pour : $m=15$, $r=0.8$ et $C_r=11.87\text{N.m}$



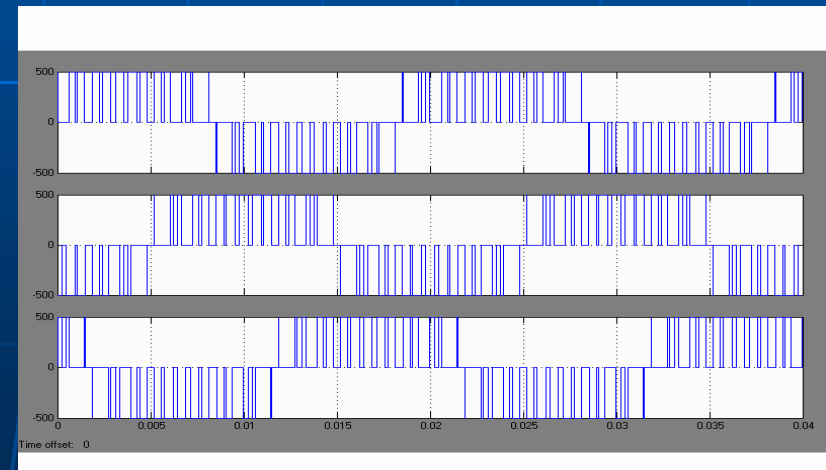
Les tensions de référence et la porteuse



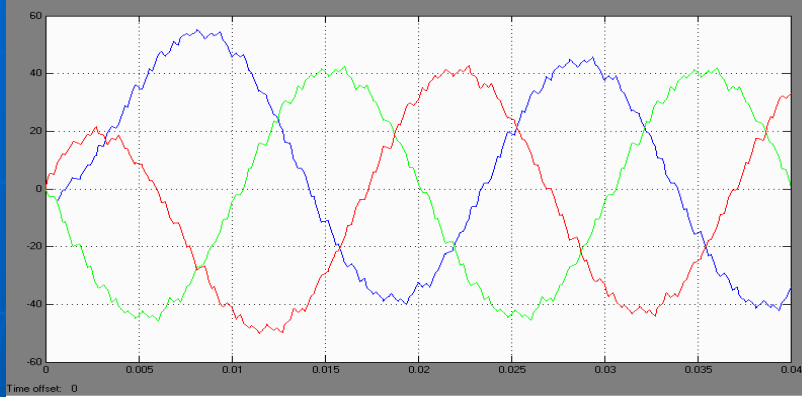
Les signaux de commande des interrupteurs



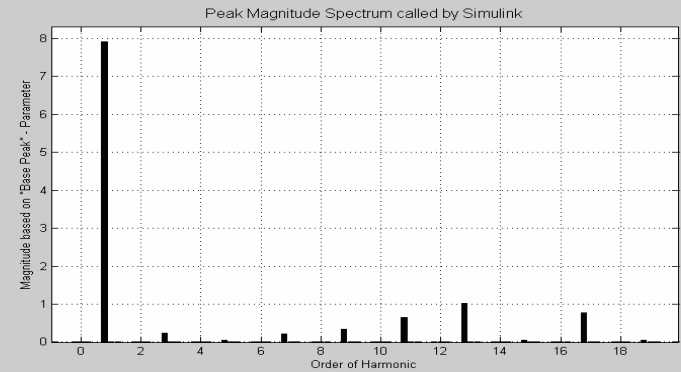
Les tensions simples dans les trois phases



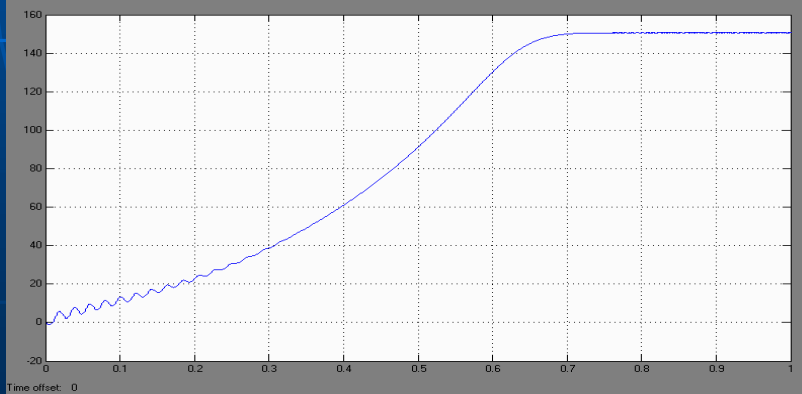
Les tensions composées des trois phases



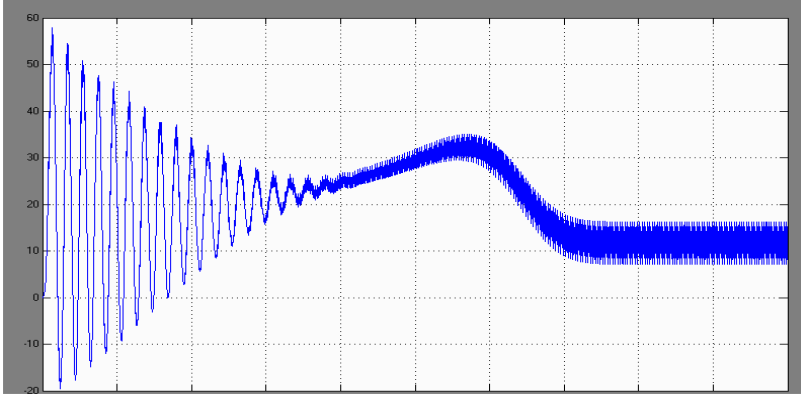
Les courants statoriques dans les trois phases



Le spectre d'harmonique du courant



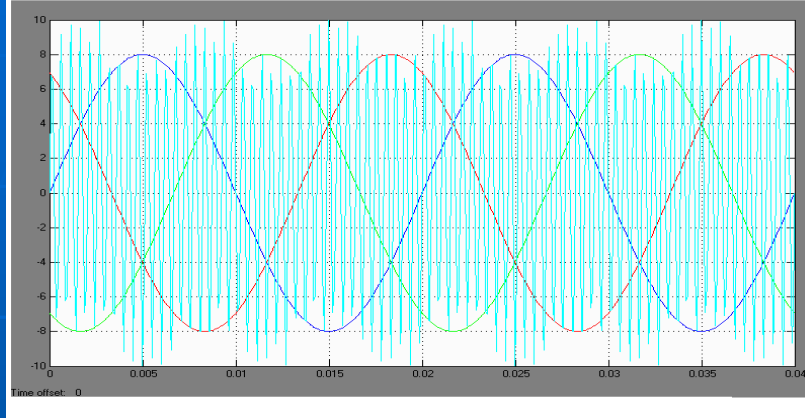
La vitesse



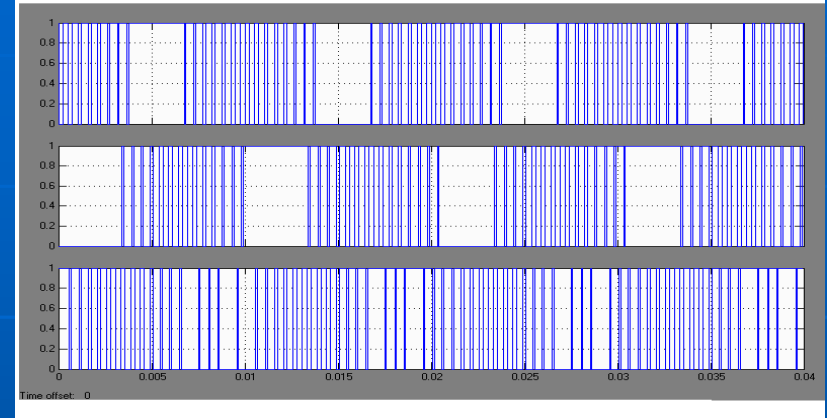
Le couple électromagnétique



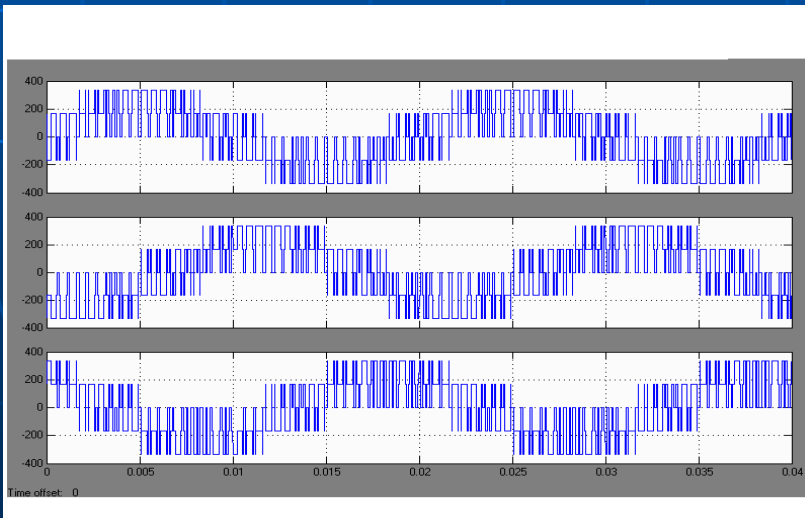
b) Pour : $m=39$, $r=0.8$ et $C_r=11.87\text{N.m}$



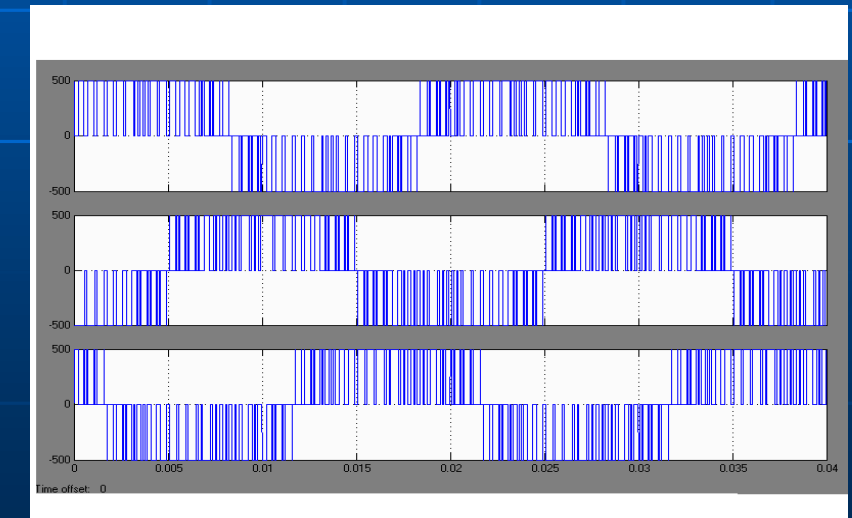
Les tensions de référence et la porteuse



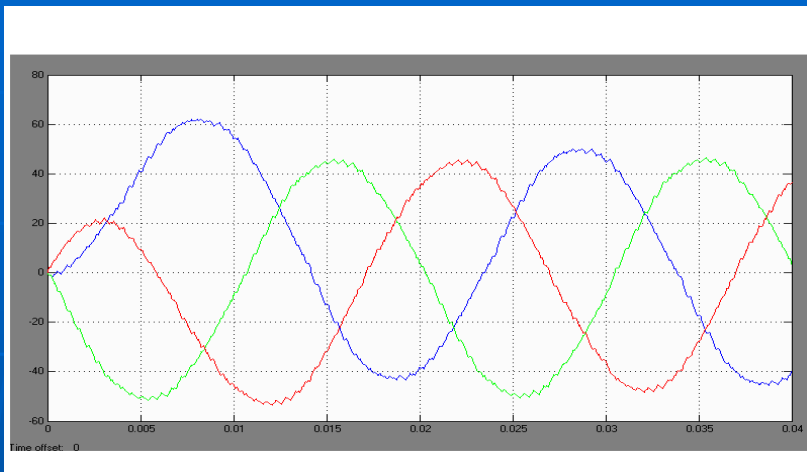
Les signaux de commande des interrupteurs



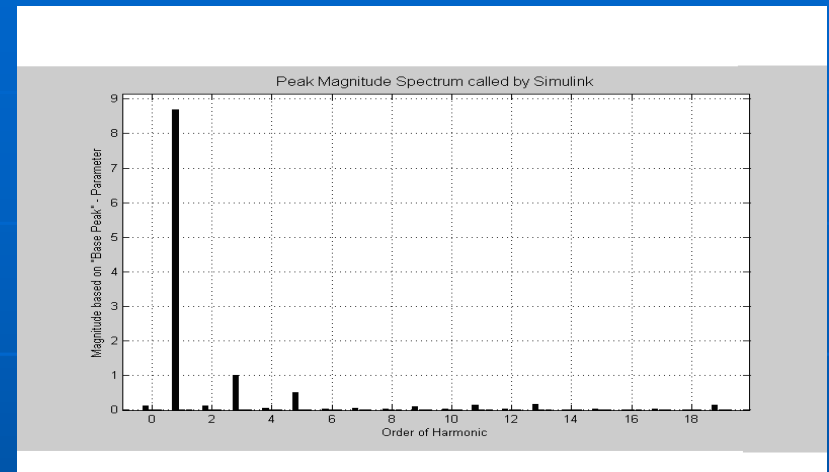
Les tensions simples dans les trois phases



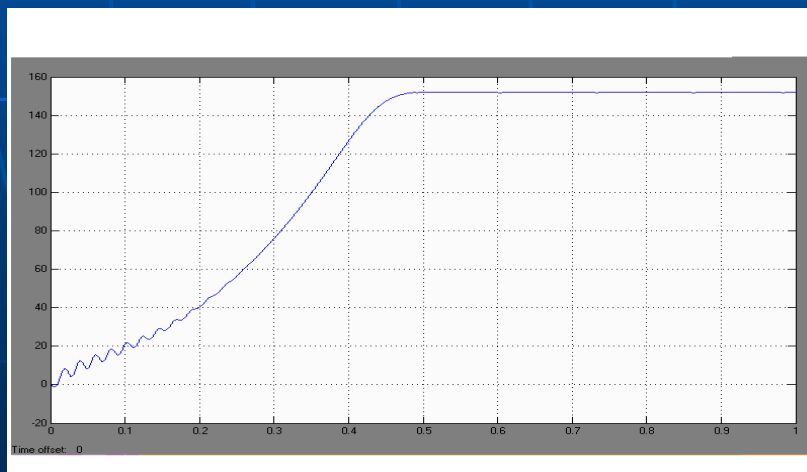
Les tensions composées des trois phases



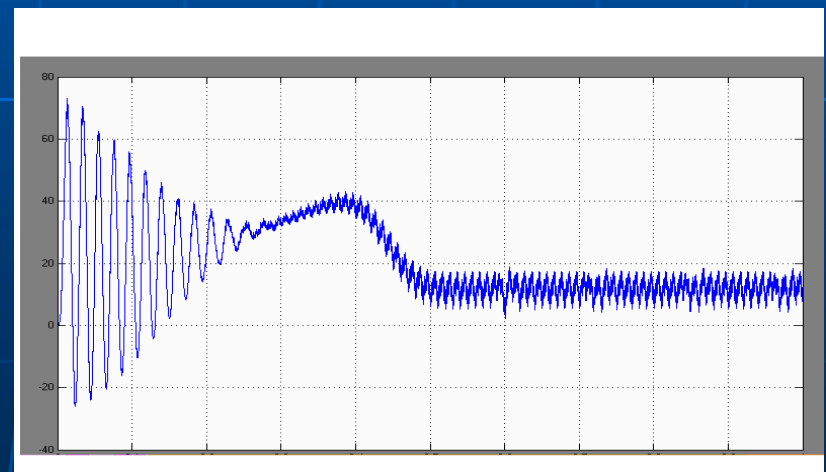
Les courants statoriques dans les trois phases



Le spectre d'harmonique du courant



La vitesse



Le couple électromagnétique



Les résultats de l'MLI sinusoïdale présentées par le tableau suivant :

m	r	THD%
15	0.8	19.59
39	0.8	7.434

L'augmentation de l'indice de modulation permet de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées (droit).

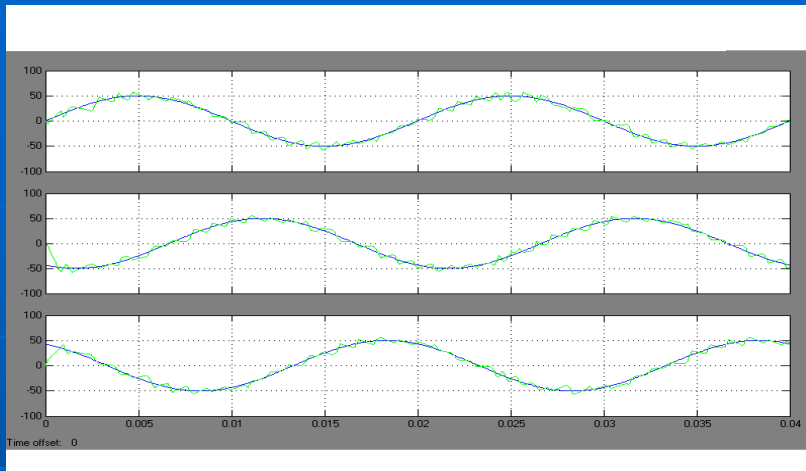
La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamentale ne dépend pas de la variation de « m », par contre la variation de « r » agit directement sur l'amplitude des harmoniques



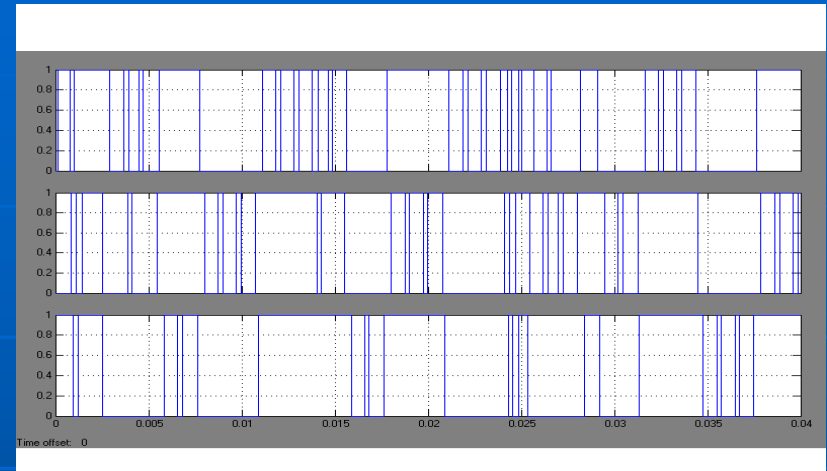
Simulation de la commande MLI à hystérésis

Cette technique est basée sur la variation de largeur de la bande, les valeurs qu'on utilisés sont : ± 5 , ± 8

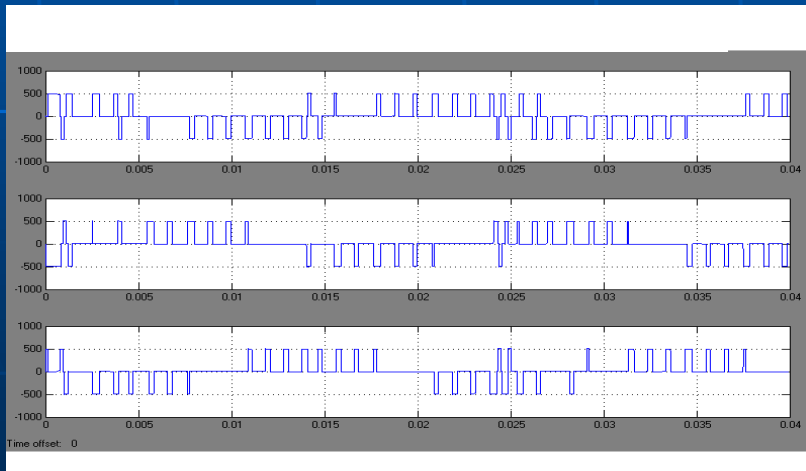
a) Pour une bande $(-8,+8)$



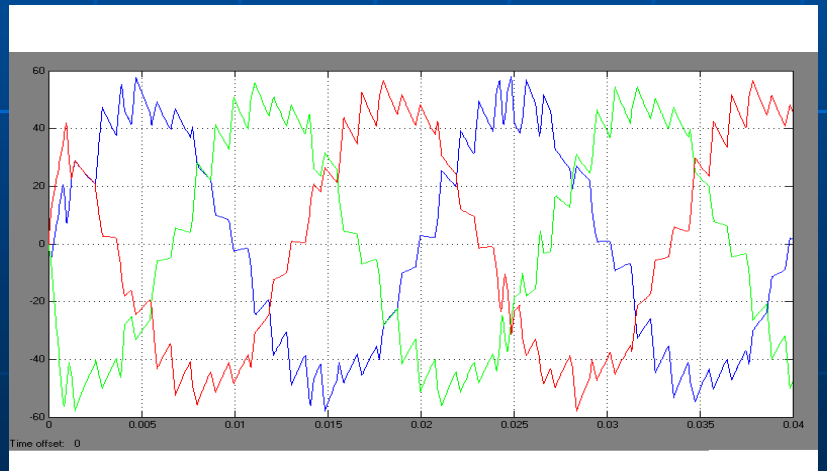
Le courant de référence et le courant réelle



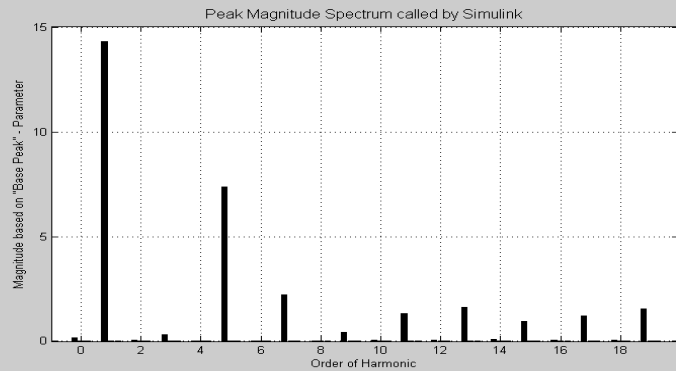
Les signaux de commande des interrupteurs



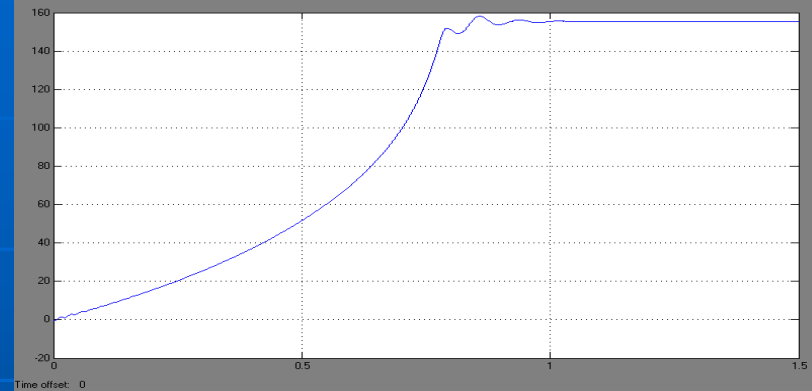
Les tensions composées des trois phases



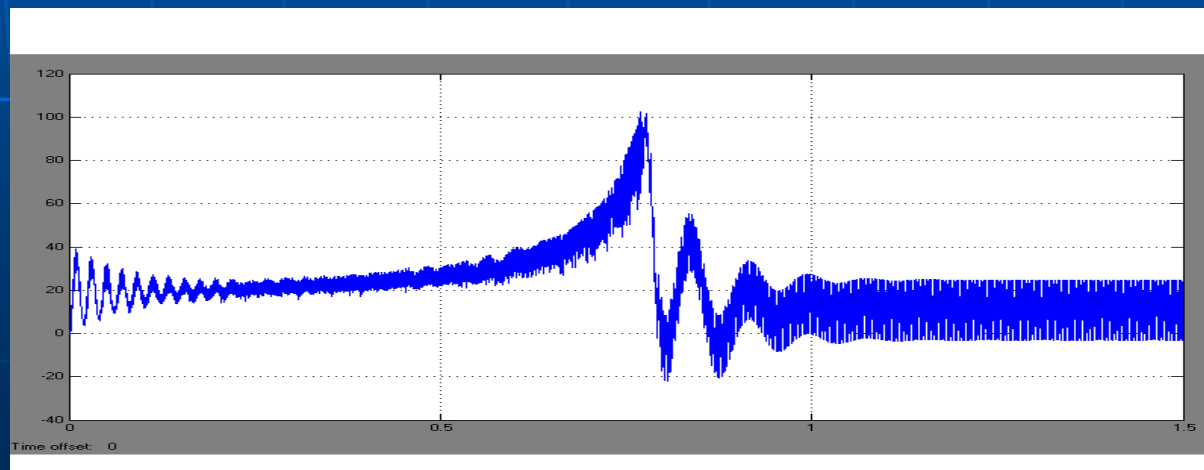
Les courants statoriques dans les trois phases



Le spectre d'harmonique du courant



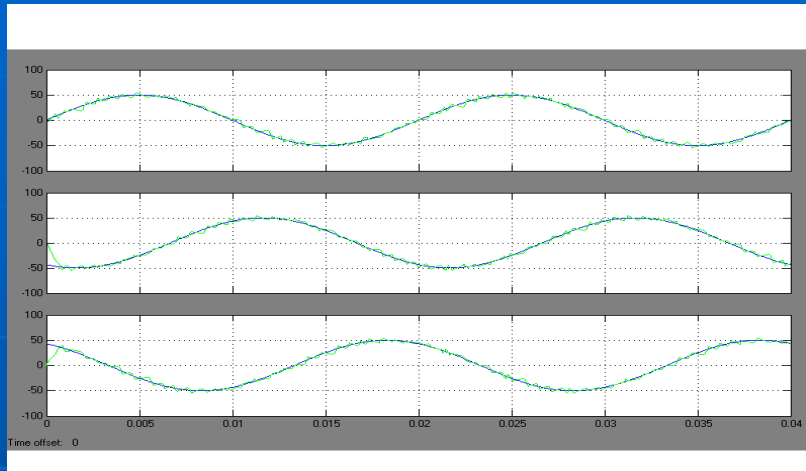
La vitesse



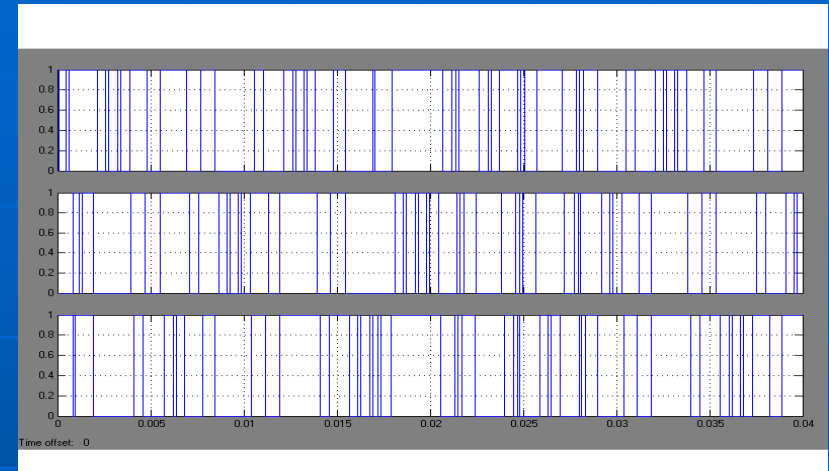
Le couple électromagnétique



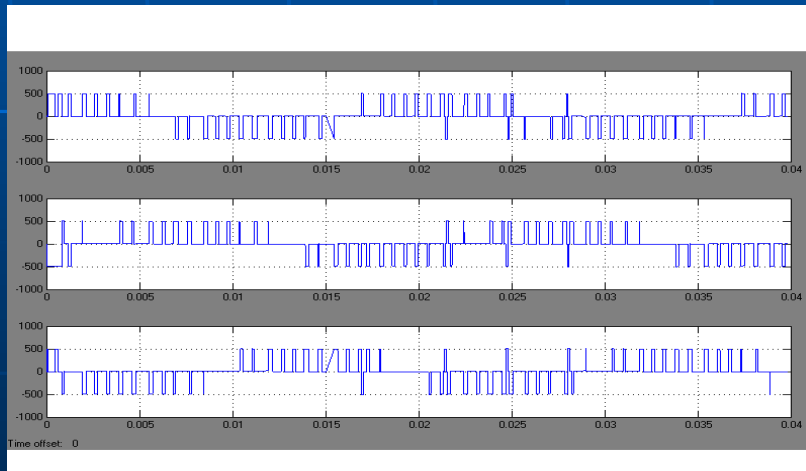
a) Pour une bande $(-5,+5)$



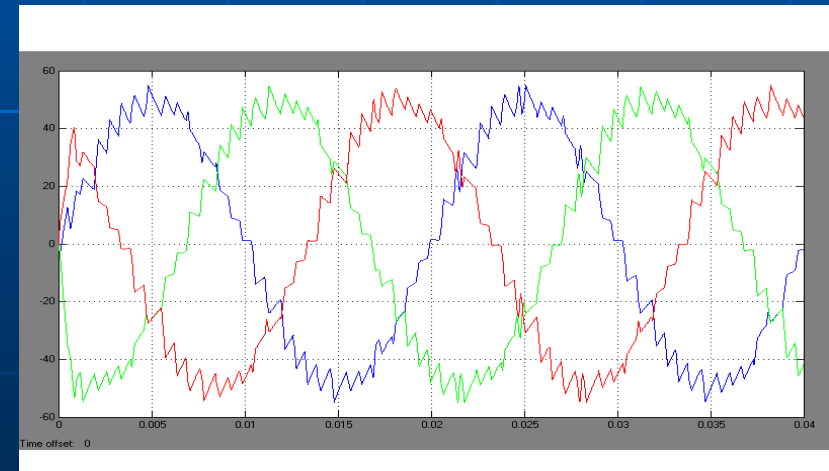
Le courant de référence et le courant réelle



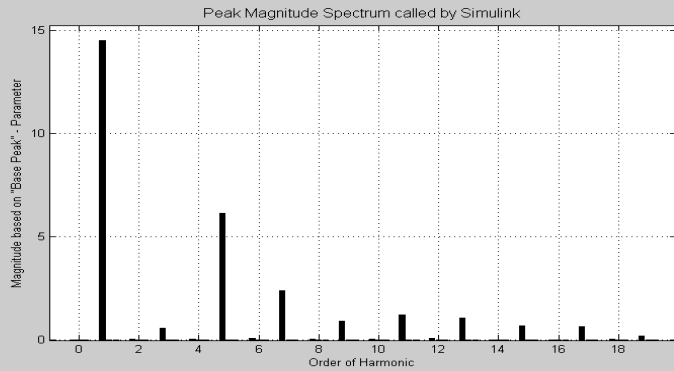
Les signaux de commande des interrupteurs



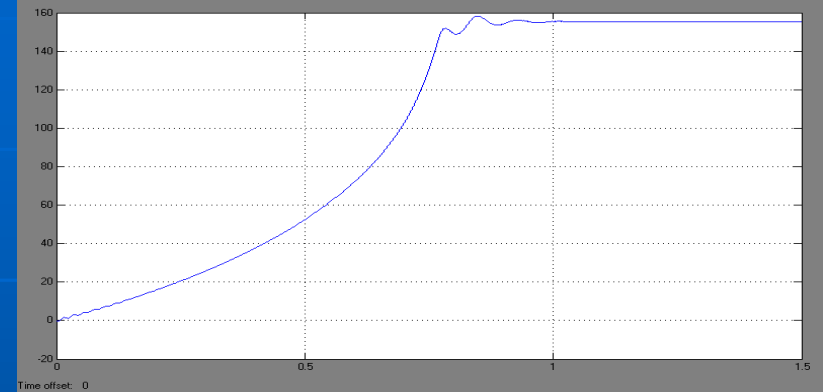
Les tensions composées des trois phases



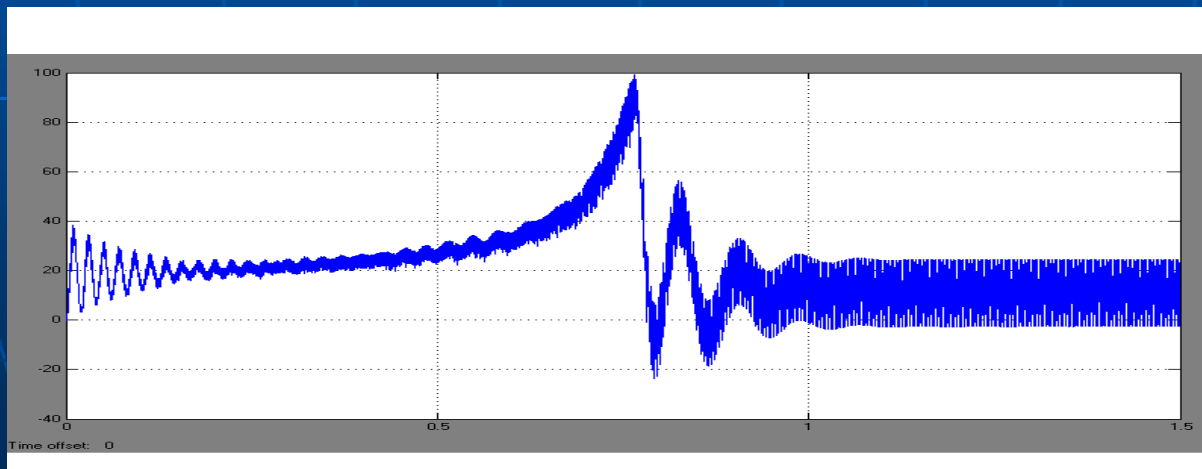
Les courants statoriques dans les trois phases



Le spectre d'harmonique du courant



La vitesse



Le couple électromagnétique



Les résultats de l'MLI par hystérésis sont présentés par le tableau suivant :

Largeur de la bande	THD%
± 5	8.454
± 8	17.283

La diminution de largeur de la bande d'hystérésis permet de repousser les harmoniques, mais avec une fréquence de commutation incontrôlable.



Concerne les grandeurs de moteur

- o **Les courants** : Pour les indices de modulation élevés, les courants statorique et rotorique deviennent plus proche de la forme sinusoïdale (pour l'MLI sinusoïdale) et de même pour l'MLI à hystérésis si la largeur de la bande diminue.
- o **Le couple** : les fortes valeurs du couple électromagnétique dans ces caractéristiques sont limitées entre l'instant de démarrage et $t = 0.6$ s pour l'MLI sinusoïdale ($m = 39$, $r = 0.8$), au-delà il prend sa valeur nominale. De même pour l'MLI à hystérésis mais jusqu'à $t = 0.9$ s pour une bande (± 5).



- o **La vitesse** : L'accroissement de la vitesse sera presque linéaire, l'obtention de la valeur nominale est plus rapide pour les valeurs de « m » plus grandes et la bande plus petite.

Conclusion générale

Ce travail propose une alimentation de la machine asynchrone. C'est-à-dire obtenir une meilleure exploitation des équipements d'une entreprise industrielle. Pour cela, nous avons présenté les simulation à MLI sinusoïdale triangulaire et MLI à hystérésis qui ont un courant à la sortie de l'onduleur moins riche en harmoniques et plus proche de la forme sinusoïdale par rapport à la commande en pleine onde.

Si on tient compte de la réponse du moteur et la souplesse de réalisation de la commande, on peut dire que l'MLI à hystérésis est la meilleure commande, mais son point faible est que la fréquence de commutation est difficile à contrôler.

Alors l'MLI sinusoïdale est la meilleure commande grâce à sa fréquence de commutation qui est contrôlable, c'est la raison pour laquelle on l'utilise pour la variation des vitesses.



**MERCI POUR
VOTRE AIMABLE ATTENTION**