

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الآلية والإلكتروني  
Département d'Automatique et d'Électrotechnique



## Mémoire de Master

Filière Electrotechnique

Spécialité Machine électrique

Présenté par

**Laichour Naima**

**&**

**Chikhi Imadeddine**

---

# Modélisation et commande de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé piloté par un onduleur à MLI

---

Propose par : **Mr. Akhrib Djamel**

Année Universitaire : 2021-2022

### Remerciements :

Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers **Allah**, qui nous a donné la patience et la volonté pour que nous puissions achever ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promoteur **Mr. Akhrib Djamel** pour avoir accepté de diriger ce travail, pour son suivi, ses précieux conseils et surtout pour son énorme soutien, tout au long de la période du projet.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Et tous ceux qui de près ou de loin ont apporté leur contribution à la réalisation de ce travail, on vous prie de trouver l'expression de notre profonde reconnaissance.

### **Dédicace :**

A mes chers parents **ma mère** et **mon père** pour leurs patiences, leurs amours, leurs soutient morale et financier ainsi leurs encouragements et aussi tous les sacrifices qu'ils ont endurés que dieu les gardent et veillent sur eux.

Ce travail est dédié aussi :

**A mon unique frère Redouane.**

**A ma grand-mère.**

**A Toute ma famille.**

**A Toute mes amies.**

Vous vous êtes dépenses pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie. Avec toute ma tendresse, Sincère gratitude.

**Laichour Naima**

**Je dédie ce mémoire :**

**A mes très chers parents** pour leur soutien durant tout mon Coursus scolaire et qui m'ont permis de réussir dans mes études.

**A mes chers frères et mes chères sœurs.**

**A tous la famille chikhi.**

**A tous mes amis et mes collagues.**

**A toutes les enseignants.**

**A toutes la promotion** deuxième année master électrotechnique.

**A toute personne** ayant contribué à ce travail de près ou de loin.

**Chikhi Imadeddine**

### Résumé :

Cette mémoire présente le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé et ses performances sans et avec le variateur de fréquence (onduleur de tension). Le problème du changement et du contrôle de la vitesse et du couple de ce moteur nous confronte beaucoup dans le domaine industriel, et il a été constaté après l'étude théorique représentée dans la modélisation mathématique de ce moteur avec l'onduleur, que ce dernier et à travers les techniques de contrôle L'interrupteur électroniques (technologie MLI) permettent de contrôler la vitesse du moteur en modifiant la valeur de la tension et de la fréquence.

Où nous avons montré les résultats des tests sur le moteur asynchrone dans l'environnement du programme MATLAB simulink.

### ملخص :

تطرح هذه المذكرة عمل المحرك اللااتزامني ثلاثي الطور وكيفية أدائه بدون ومع عاكس التردد (موج الجهد الكهربائي). ان اشكالية تغيير والتحكم في سرعة وعزم هذا المحرك تواجهنا في المجال الصناعي كثيرا, وقد تبين بعد الدراسة النظرية و المتمثلة في نمذجة رياضية لهذا المحرك مع العاكس, ان هذا الاخير ومن خلال تقنيات التحكم في القواطع الاليكترونية (تقنية MLI) تعطي امكانية التحكم في سرعة المحرك من خلال تغيير قيمة الجهد و التردد.

حيث اظهرنا نتائج الاختبار على المحرك اللااتزامني في بيئة برنامج MATLAB simulink

### Summary :

This manuscript presents the operation of the three-phase asynchronous motor and its performances either with or without the frequency converter (voltage inverter). The issue of varying and controlling the speed and torque of a motor is very common in the industrial field, and it was theoretically stated through various studies based on mathematical modeling that motors with inverters are much better controlled through electronic circuit breakers (MLI technology). For this case, the regulation of the rotation speed is done thanks to the modulation of voltage and frequency. The current study has been achieved on an asynchronous motor in the environment of the MATLAB simulink simulator.

## Liste des acronymes et abréviations

### Liste des acronymes et abréviations :

MAS : Machine asynchrone.

f : fréquence d'alimentation.

P : nombre de pair de pôles.

$n_s$  : vitesse de rotation.

g : glissement.

a, b, c : Indices correspondant aux trois phases (a), (b), (c).

s, r : Indices correspondant aux grandeurs statoriques et rotoriques.

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

$[V_{abcs}][V_{abcr}]$  : Vecteur tensions appliquées aux phases statoriques et rotoriques.

$[I_{abcs}][I_{abcr}]$  : Vecteur courants appliquées aux phases statoriques et rotoriques.

$[Q_{abcs}][Q_{abcr}]$  : Vecteur flux statoriques et rotoriques.

$R_s, R_r$  : Résistance d'une phase statorique et rotorique.

$[M_{s\sigma}][M_{r\sigma}]$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques ou rotoriques.

$l_s, l_r$  : Inductances propres statoriques et rotoriques.

$l_{ss}, l_{rr}$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques ou rotoriques.

$l_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et rotorique.

$\theta_r$  : L'angle entre l'axe ar et d.

$\theta_s$  : L'angle entre l'axe as et d.

$\Psi = \theta_s$  , pour les grandeurs statoriques.

$\Psi = \theta_r$  , pour les grandeurs rotoriques.

[P] : La matrice de transformation de Park.

$[V_{dq}]$  : Vecteur tensions après la transformation de Park.

$[I_{dq}]$  : Vecteur courants après la transformation de Park.

## Liste des acronymes et abréviations

$[Q_{dq}]$  : Vecteur flux après la transformation de Park.

$w_s$  : La pulsation statorique.

$w_r$  : La pulsation rotorique.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple de charge.

$\Omega$  : vitesse mécanique.

$J$  : moment d'inertie.

$f_v$  : Coefficient de frottement.

$\sigma$  : Coefficient de fuite.

$T_r$  : Constante de temps rotorique.

$T_s$  : Constante de temps statorique.

$x(t)$  : vecteur d'état.

$u(t)$  : vecteur de commande.

$A$  : matrice d'état.

$B$  : matrice d'application de la commande.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

PWM : Pulse Width modulation.

$K_a, K_b, K_c$  : Les temps commutation des interrupteurs.

$E$  : Tension de l'onduleur.

$V_p$  : La variation de l'amplitude de l'onde de la porteuse.

$M_R$  : Coefficient de réglage.

$V_m$  : La tension de modulante.

$M_1$  : L'indice de modulation.

## Liste des acronymes et abréviations

$f_p$  : La fréquence de tension de poteuse.

$f_m$  : La fréquence des tensions modulante.

## Table des matières :

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre I** : Principe de fonctionnement des moteurs asynchrones triphasée.

I.1 Introduction .....	4
I.2 La machine asynchrone .....	4
I.2.1 Définition .....	4
I.2.2 Constitution de la machine asynchrone .....	4
a) Moteur Asynchrone (MAS) .....	4
b) Le stator .....	6
c) Le rotor à cage .....	7
d) Les organes mécaniques .....	9
I.2.3 Principe de fonctionnement .....	9
I.3 Conclusion .....	11

### **Chapitre II** : Introduction aux onduleurs.

II.1 Introduction .....	13
II.2 Choix des interrupteurs .....	13
II.3 Types d'onduleurs .....	14
II.3.1 Onduleur autonome .....	14
II.3.2 Onduleur non autonome .....	15
II.4 Principe de fonctionnement d'un onduleur .....	15
II.4.1 Onduleur de tension triphasé .....	15
II.5 Stratégies de commande .....	16
II.5.1 Commande à 180° .....	16
II.5.2 Commande 120° .....	17
II.6 Commande par Modulation de largeur d'impulsion .....	19

## Table des matières

II.6.1 Principe de base de MLI .....	19
II.6.2 Les Caractéristiques de la modulation .....	21
a) Le coefficient de réglage .....	21
b) L'indice de modulation .....	21
II.7 Conclusion .....	21
<b>Chapitre III : Modélisation du moteur asynchrone triphasé.</b>	
III.1 Introduction .....	23
III.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée .....	23
III.2.1 Hypothèses simplificatrices .....	23
III.2.2 Modèle de la machine asynchrone .....	24
a) Equations électriques .....	25
b) Equations magnétiques .....	26
III.3 Transformation de PARK .....	27
a) Equations électriques dans le repère biphasé .....	29
b) Equations magnétiques dans le repère biphasé .....	31
III.4 Choix du vecteur d'état .....	32
III.4.1 Représentation d'état .....	33
III.4.2 Choix référentiel .....	35
III.5 Equation mécanique .....	38
III.6 Conclusion .....	39

## Table des matières

### **Chapitre IV** : Modélisation de l'association onduleur à MLI – moteur asynchrone triphasé.

IV.1 Introduction .....	41
IV.2 Modélisation de l'onduleur .....	41
IV.2.1 Introduction .....	41
IV.2.2 Mise en équation .....	42
IV.3 Modèle de l'ensemble moteur asynchrone – onduleur .....	44
IV.4 Conclusion .....	46

### **Chapitre V** : Résultats de simulation et interprétations.

V.1 Introduction .....	48
V.2 Simulation de la machine asynchrone triphasée alimentée par le réseau triphasé.....	48
V.3 Simulation de l'onduleur MLI.....	51
V.4 Simulation de l'association onduleur MLI- moteur asynchrone triphasé.....	54
Conclusion générale .....	61

### Liste des figures :

Figure I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	5
Figure I.2. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles).....	6
Figure I.3. Photo du stator d'une machine asynchrone .....	7
Figure I.4. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit. ....	8
Figure I.5. Photo du rotor d'une machine asynchrone .....	8
Figure I.6. Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone .....	10
Figure II.1. Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC).....	13
Figure II.2. Choix des composants selon la puissance et la Fréquence .....	14
Figure II.3. Onduleur de tension triphasée.....	15
Figure II.4. Commande 180°.....	17
Figure II.5. Commande 120° .....	19
Figure II.6. Schéma synoptique et signaux de la MLI .....	20
Figure.III.1. Schéma électrique d'un moteur asynchrone.....	24
Figure.III.2. Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	24
Figure.III.3. Représentation de la MAS dans le repère de Park.....	28
Figure.IV.1. Onduleur avec charge .....	42
Figure.IV.2. Transformation triphasé – diphasé (Transformation de Park) .....	44
Figure V.1. Programme Simulink de la machine asynchrone triphasée alimentée par le réseau .....	49
Figure V.2. Résultats de simulation de la machine alimentée par le réseau triphasé.....	50

## Liste des figures

Figure V.3. Programme Simulink de l'onduleur MLI .....	51
Figure V.4. Résultats de simulation de l'onduleur ML .....	52
Figure V.5. Résultats de simulation les tensions MLI d'un les phases A et B fréquence 50Hz .....	53
Figure V.6. Résultats de simulation les tensions MLI d'un les phases A et B fréquence 5Hz .....	53
Figure V.7. Programme Simulink de la machine asynchrone association onduleur – MLI.....	55
Figure V.8. Résultats de simulation les tensions Van, Vbn, Vcn, pour f=50Hz ....	56
Figure V.9. Résultats de simulation les tensions Van, Vbn, Vcn, pour f=5Hz .....	56
Figure V.10. Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour f=50hz .....	57
Figure V.11. Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour f=30hz .....	58
Figure V.12 : Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour f=20hz .....	59

## Introduction générale :

L'utilisation des machines à courant alternatif et plus particulièrement des machines asynchrones est de plus en plus répandue dans les milieux industriels. Son faible coût, ses performances et sa facilité d'entretien, justifie son intérêt particulier dans l'industrie moderne. Elle est la plus utilisée comme moteur et tend à remplacer le moteur à courant continu dans plusieurs applications [1] [2].

Pour faire l'étude de la machine asynchrone (MAS), il est indispensable de passer par l'étape de la modélisation, qui est le point de départ de tout processus d'automatisation. Des hypothèses simplificatrices sont prises en compte dans la modélisation de la MAS. Le modèle obtenu ne peut donc pas caractériser complètement la MAS. [3]

Les onduleurs triphasés sont les plus utilisés dans les industries à cause de leur prix qui est moins chers, ils sont plus économiques, et d'où une forte demande du côté commercial. Ils sont aussi plus faciles du côté de la commande. [4]

Les onduleurs triphasés étant la partie principale dans la fabrication de variateurs de vitesse et des alimentations sans interruption. Pour cela nous consacrerons ce travail à la réalisation d'un onduleur triphasé dont la technique de commande est la modulation de largeur d'impulsion MLI. [5]

L'objectif de ce travail est l'étude de l'association moteur asynchrone – onduleur, il s'agit d'étudier le type de MLI triphasée (MLI sinus-triangulaire).

Ce mémoire est constitué en cinq chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le principe de fonctionnement de la MAS triphasé avec la description de ses différentes composantes.

Puis, nous présentons les différents types d'onduleurs dans le deuxième chapitre.

L'étude de la modélisation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park a été présentée par la suite.

## Introduction générale

2022

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation de l'onduleur puis à celle de l'association onduleur-machine asynchrone triphasée.

Les résultats de simulation et leur interprétation sont présentés au chapitre cinq avant de donner une conclusion générale à notre projet.

# **Chapitre I**

## **Principe de fonctionnement des moteurs asynchrones triphases**

## I.1 Introduction :

Le moteur asynchrone triphasé ou (moteur à induction) est le moteur le plus utilisé pour effectuer la commande de la vitesse variable ou le positionnement du fait qu'il est considéré comme le moteur le plus robuste et le moins cher sur le marché d'une part et d'autre part, le développement des semi – conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (selon le niveau de tension) permet son utilisation dans une large gamme de vitesse et de puissance et en particulier au-delà des limites imposées autrefois, par la commutation forcée. [6]

Dans ce chapitre, nous présenterons le modèle mathématique triphasé de la machine asynchrone.

## I.2 La machine asynchrone :

### I.2.1 Définition :

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique. La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique. [8]

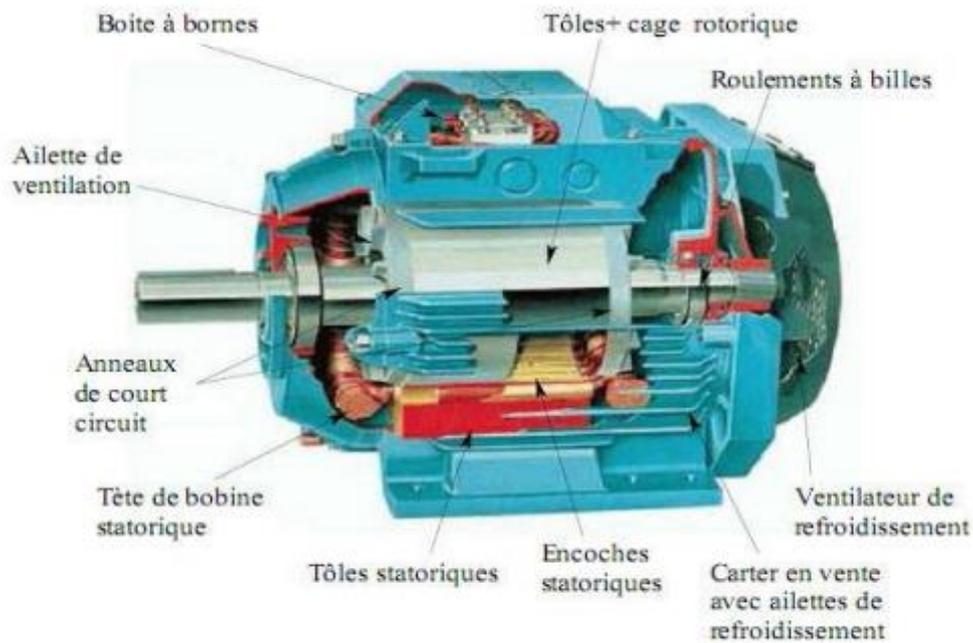
### I.2.2 Constitution de la machine asynchrone :

#### a) Moteur Asynchrone (MAS) :

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle

d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous intéressent à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la **(Figure. I.1)**. [9]



**Figure. I.1** : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [10]

La machine asynchrone à cage est composée de :

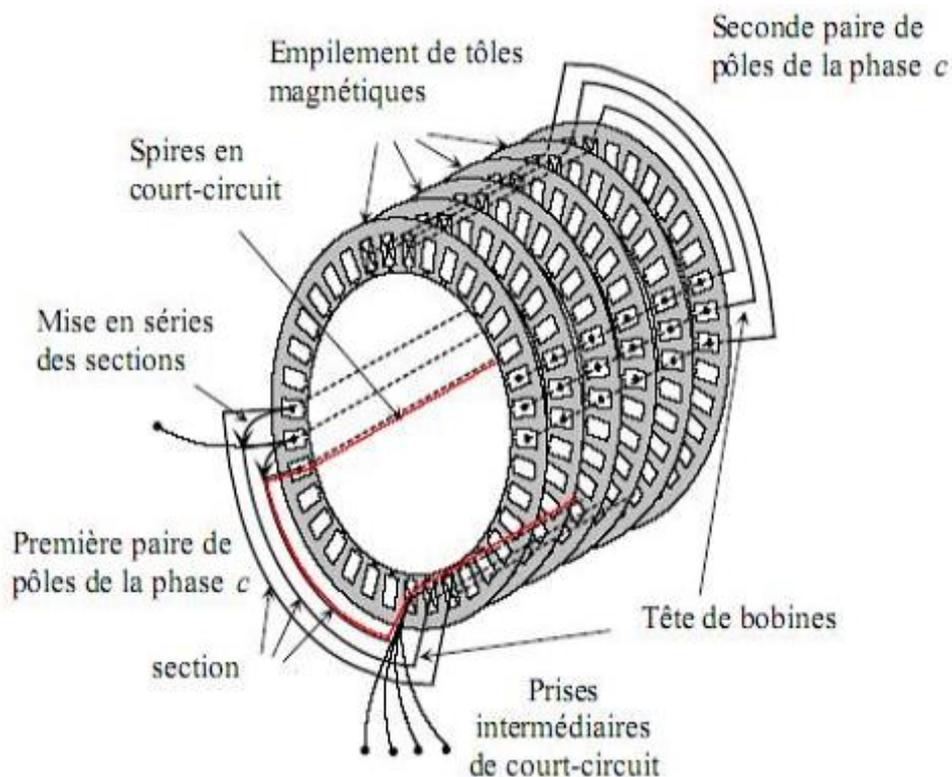
- Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles. [11]

**b) Le stator :**

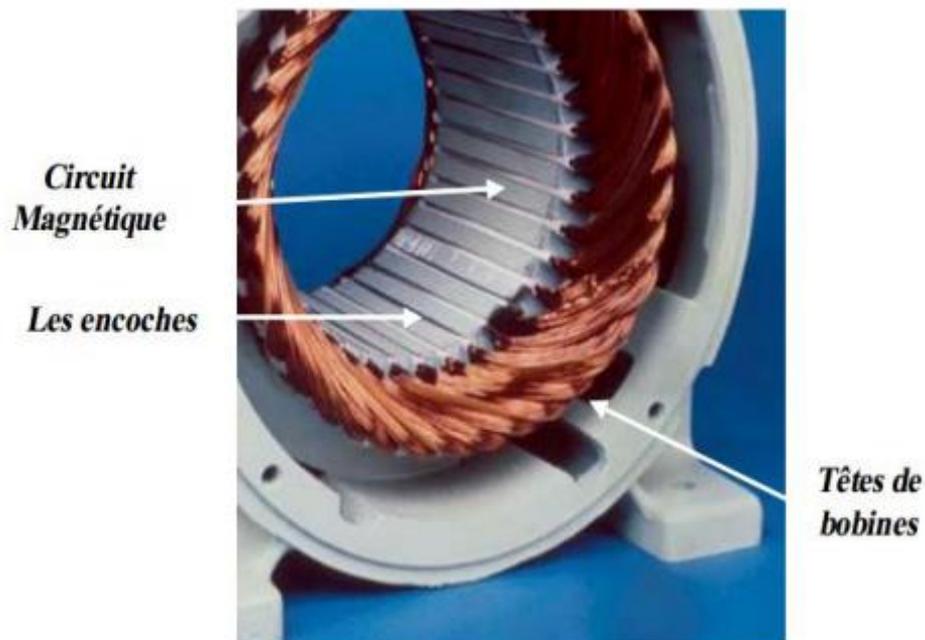
Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont comportées des encoches parallèles à l'axe de la machine (**figure. I.2**).

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique. [12]

Le stator d'un moteur asynchrone est constitué de trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de  $2\pi/3$ . [7]



**Figure. I.2 :** Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles). [12]



**Figure. I.3** : Photo du stator d'une machine asynchrone. [9]

### c) Le rotor à cage :

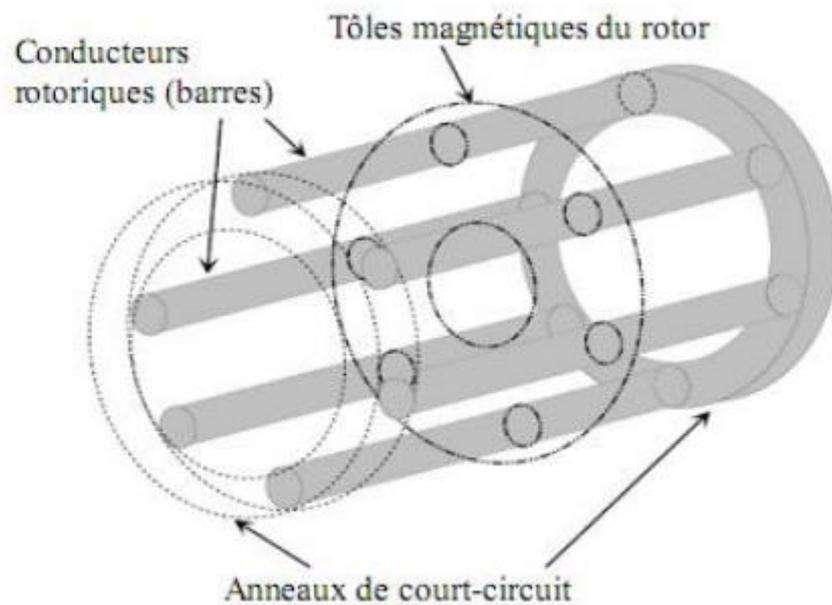
Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**figure. I.4**) et (**Figure. I.5**) Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

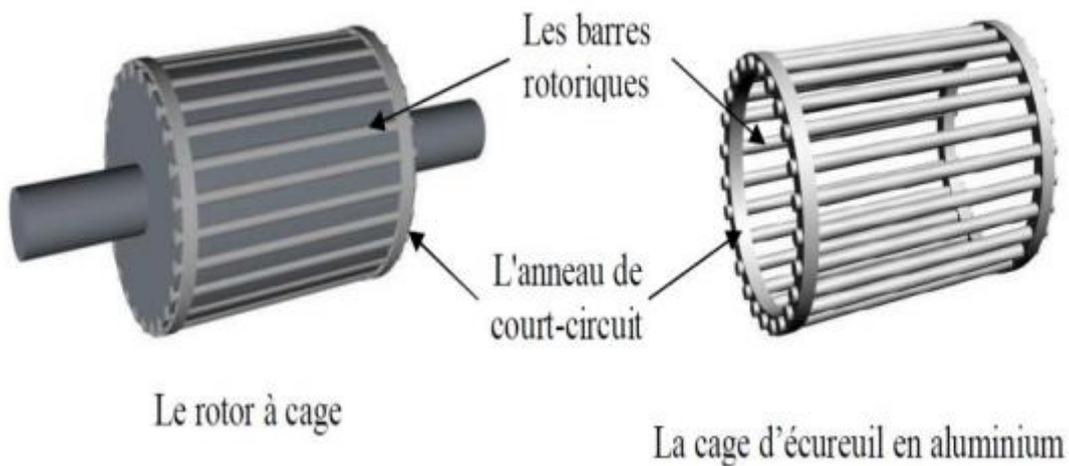
Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs

asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). [9]

Le rotor du moteur supporte trois bobinages triphasés décalés de  $2\pi/3$ . Ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. [7]



**Figure. 1.4 :** Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit. [9]



**Figure. 1.5 :** Photo du rotor d'une machine asynchrone. [9]

### d) Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage, ...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse. [12]

### I.2.3 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor a l'enroulement secondaire en court-circuit. [3]

Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par les courants triphasés fournis à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. [3]

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N_s$  différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotorique montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier .l'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine lorsque le champ est sinusoïdales vitesse de rotation est :

$$ns = \frac{f}{p} \quad (I.1)$$

Ou' : f : la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de pair de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_s$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire lorsque ( $n \neq n_s$ ), car dans le cas contraire, ( $n = n_s$ ), le champ serait immobile par rapporte au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. [3]

$$\text{Le rapport } g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (I.2)$$

Est appelé glissement de la machine asynchrone. [13]

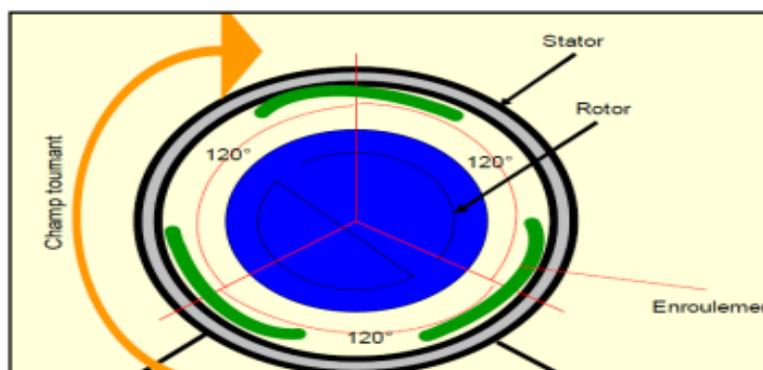


Figure.I.6 : Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone. [13]

### I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu la définition et constitution de la machine asynchrone. Nous avons expliqué son principe de fonctionnement avec détails.

Dans le prochain chapitre nous allons donner des généralités sur les différents types d'onduleurs et par la suite nous allons nous intéresser à l'onduleur de tension triphasé.

# Chapitre II

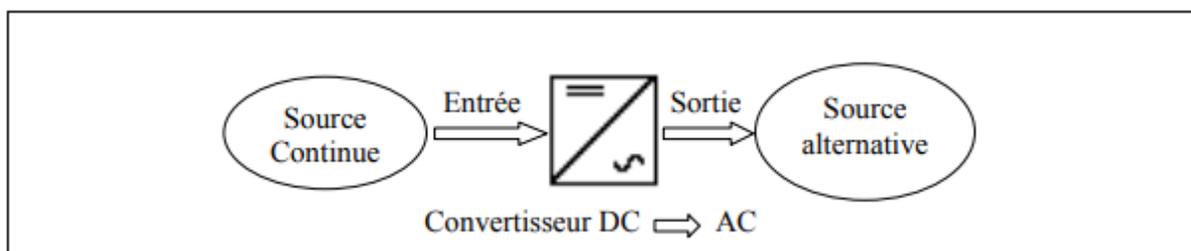
## Introduction aux onduleurs

## II.1 Introduction :

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, où fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse dans les machines électriques. L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau standard 230/400V, 50Hz. [7]

L'onduleur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), appelée en anglais (Pulse Width modulation PWM). Il existe plusieurs techniques PWM, dont une connue sous le nom de, la PWM sinus-triangle (STPWM) [20] ou la PWM Naturelle.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'onduleur triphasé ainsi que la commande de l'onduleur triphasé par la technique MLI sinus-triangle. [7]

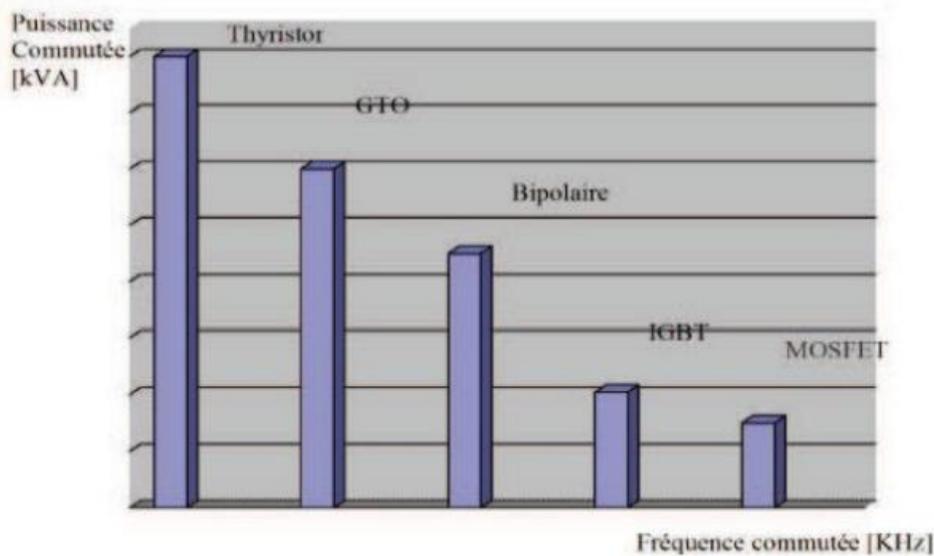


**Figure. II.1** Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC). [20]

## II.2 Choix des interrupteurs :

Les composants de l'électronique de puissance (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. À 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 sont du type commandable à l'ouverture et à la fermeture **figure. II.2.** [21]



**Figure. II.2** choix des composants selon la puissance et la Fréquence.

### II.3 Types d'onduleurs :

Selon la fréquence et de la forme d'onde de sortie, il existe deux types d'onduleurs, à savoir : **autonome** et **non autonome**.

#### II.3.1 Onduleur autonome :

Ces types d'onduleurs nous délivrent à leur sortie une tension alternatif 220 V avec une fréquence fixe de 50Hz.

Ces onduleurs sont utilisés là où la présence du secteur est indispensable. On les appelle les **onduleurs de secours**. On les trouve dans les hôpitaux, dans les aéroports dans les industries etc....

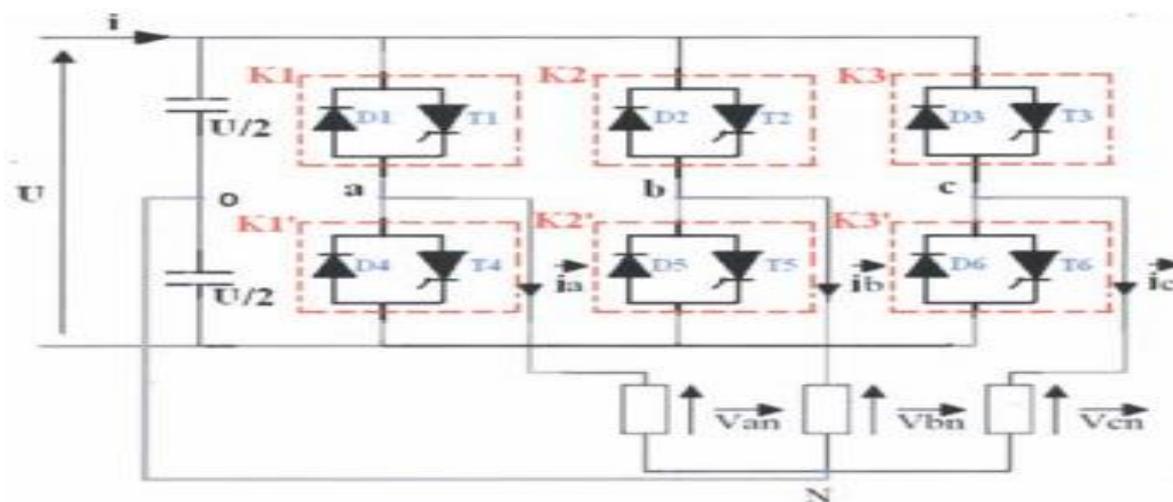
### II.3.2 Onduleur non autonome :

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement des onduleurs qui utilisent des redresseurs pour les alimenter en tension continue. [7] La fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie de tels onduleurs peuvent être variables et sont commandés par leur utilisateur.

### II.4 Principe de fonctionnement d'un onduleur :

#### II.4.1 Onduleur de tension triphasé :

La **figure. II.3** représente un onduleur de tension triphasé, il est constitué de trois bras, chaque bras est formé de deux interrupteurs commandés de manière complémentaire, afin d'éviter un court-circuit de la source et d'assurer une continuité du courant de la charge [22]. Chaque interrupteur est formé d'un semi-conducteur contrôlable et une diode connectée en antiparallèle (DRL). Les six diodes de roue libre assurent la protection des transistors et la récupération de l'énergie vers la source. [7]



**Figure. II.3** Onduleur de tension triphasée. [20]

L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande  $K_i$  ( $i = A, B, C$ ) telles que [7] :

- $K_i = 1$  si l'interrupteur du haut est fermé et celui du bas ouvert.
- $K_i = 0$  si l'interrupteur du haut est ouvert et celui du bas fermé

## II.5 Stratégies de commande :

### II.5.1 Commande à 180° :

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur à commande de 180°, **Figure II.4**.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur **K1** est fermé pendant une demi-période (180°), et **K'1** est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  concernant la phase B et de  $4\pi/3$  concernant la phase C. [23], [24].

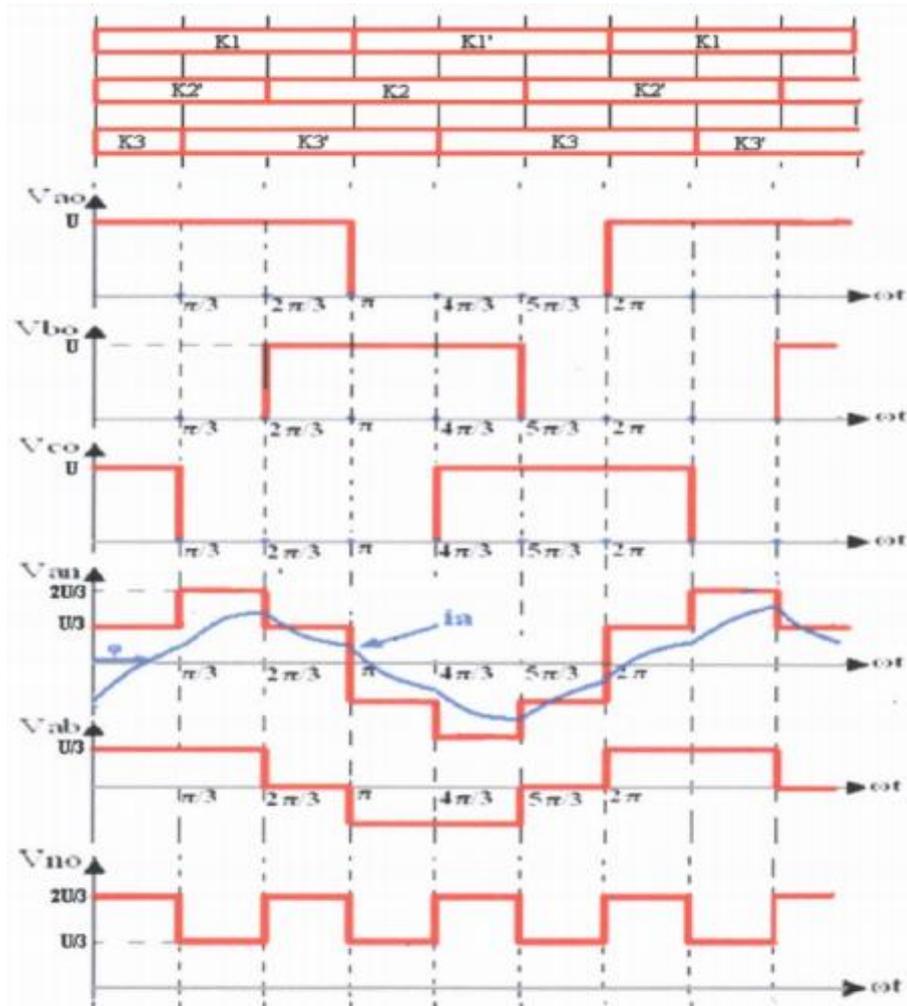
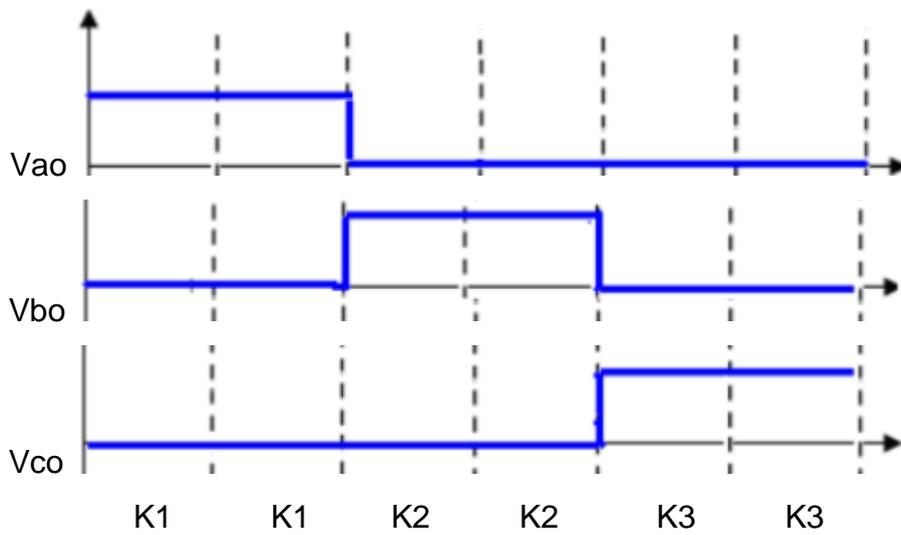
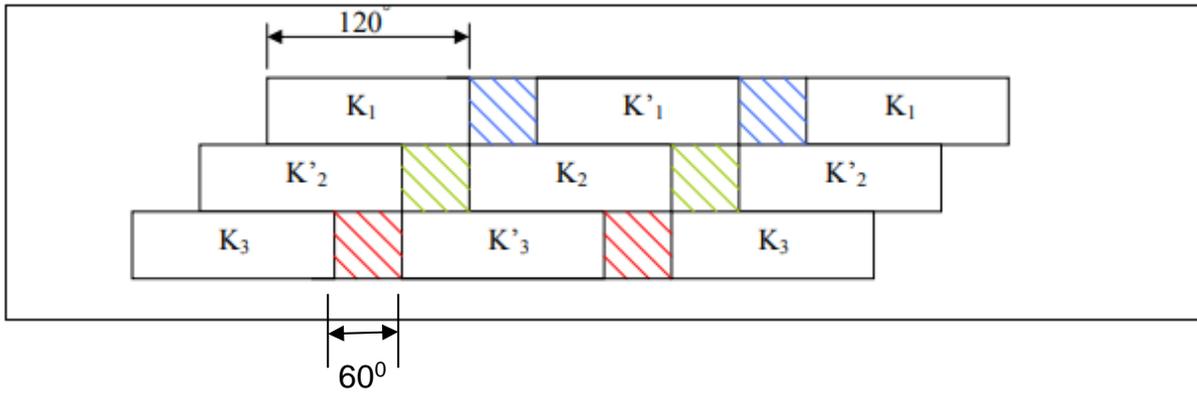


Figure. II.4 La commande à 180°. [20]

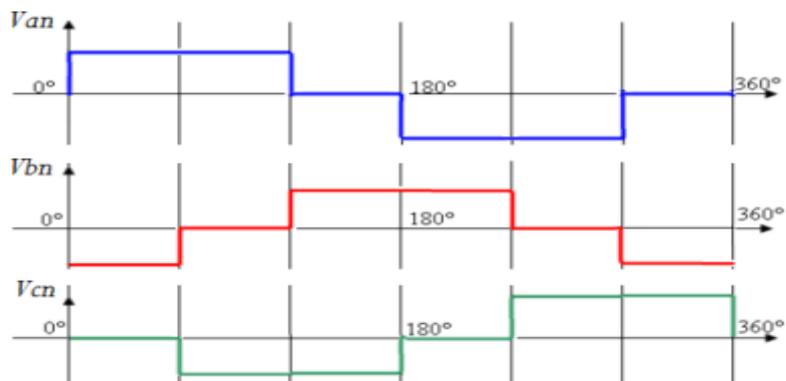
En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

### II.5.2 Commande 120° :

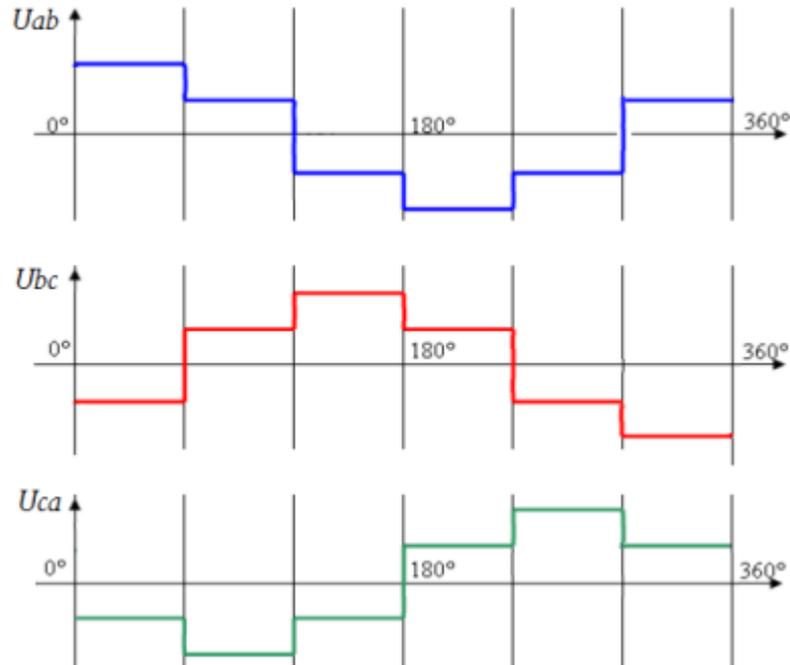
Dans le cas de la **Figure II.5**, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°. [20]



a) Les signaux des tension K1, K2, K3.



b) Forme d'onde des tensions simples.



c) Forme d'onde des tensions composées.

**Figure. II.5** La commande à 120° .

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant 120°, telle que la séquence est **K1**, **K2** puis **K3** successivement. De même pour les interrupteurs **K'1**, **K'2** et **K'3** avec un décalage de 60° par rapport à **K1**, **K2**, **K3**. [20]

## II.6 Commande par Modulation de largeur d'impulsion :

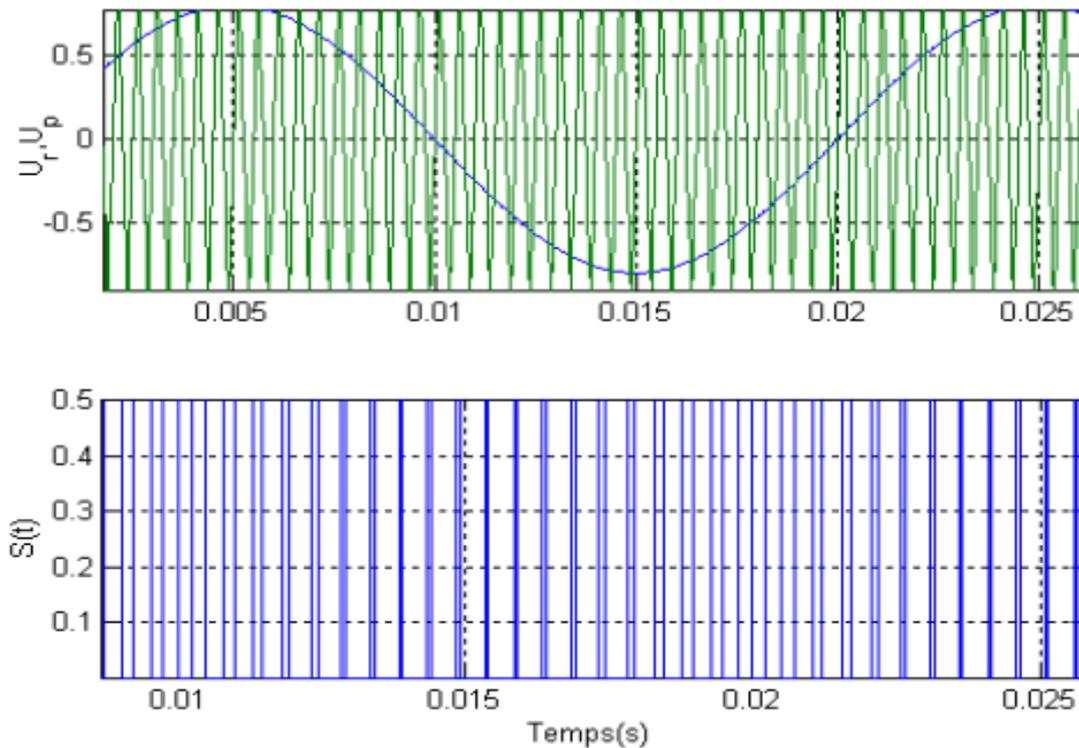
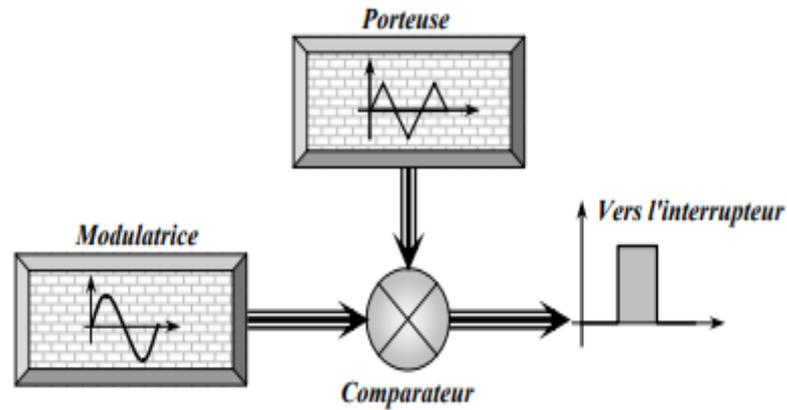
Il existe plusieurs techniques pour l'obtention de signaux à modulation PWM.

Nous nous sommes intéressés à la technique sinus-triangulaire (stratégie de la PWM naturelle) qui est expliquée ci-dessous.

### II.6.1 Principe de base de MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé

porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice. Le signal recueilli à la sortie de l'onduleur, **figure. II.6** est une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeurs variables. [25]



**Figure. II.6** Schéma synoptique et signaux de la MLI. [25]

### II.6.2 Les caractéristiques de la modulation :

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs [25] :

#### a) Le coefficient de réglage :

Qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_P} \quad (II.1)$$

#### b) L'indice de modulation :

Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_1 = \frac{f_P}{f_m} \quad (II.2)$$

### II.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types d'onduleurs triphasés, et expliqué leur principe de fonctionnement.

Nous avons présenté les stratégies de commande à 120°, et à 180° ainsi que la stratégie Sinus-triangle.

# Chapitre III

## Modélisation du moteur asynchrone triphasé

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes étapes suivies dans la modélisation du moteur asynchrone triphasé qui sera par la suite alimenté par un onduleur à MLI.

### III.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée :

La machine asynchrone se présente comme un système de deux enroulements triphasés, l'un correspond à l'enroulement du stator et l'autre à celui du rotor. Différentes approches existent pour représenter ces enroulements et elles seront présentées dans la suite de ce travail. La machine asynchrone présente un système d'équations très complexe à étudier [14]. Il est donc nécessaire de développer un modèle plus simple.

Le modèle mathématique de la MAS est un système de six équations différentielles. La résolution d'un tel système est difficile, pour contourner cette difficulté on utilise la transformation de PARK sous certaines hypothèses simplificatrices, cette dernière permet une représentation biphasée à deux axes orthogonaux, équivalente de la machine triphasée ce qui réduit considérablement la complexité du modèle. [3]

#### III.2.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour établir des relations liant les tensions d'alimentation de la machine aux courants traversant les bobinages, il faut s'appuyer sur un certain nombre d'hypothèses :

- proportionnalité des flux aux courants.
- parfaite symétrie de la machine.
- Entrefer constant (par effet d'encoches).
- Forces magnétomotrices à répartition spatiale sinusoïdale (Absence de saturation dans le circuit magnétique).
- Courants autres que dans les bobinages négligés. [3]

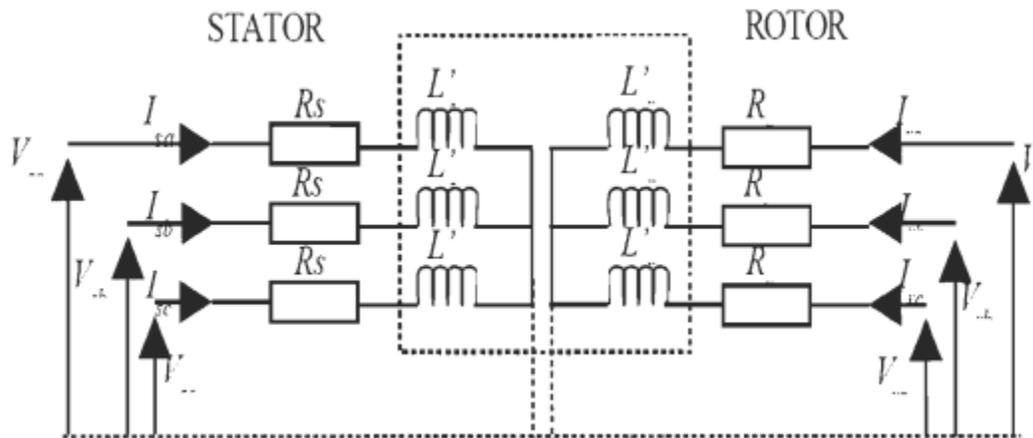
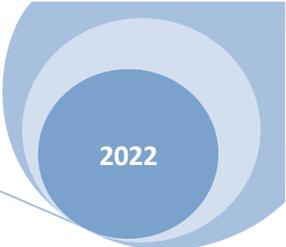


Figure. III.1: Schéma électrique d'un moteur asynchrone. [15]

III.2.2 Modèle de la machine asynchrone :

Le moteur asynchrone comporte au stator un enroulement triphasé représentés par les trois axes statoriques (A, B, C) déphasés l'un par rapport à l'autre de  $120^\circ$  (figure III.2) et au rotor aussi un enroulement triphasé ayant les trois phases rotoriques (abc). [3]

La figure.III.2 montre la représentation électrique des phases statoriques et rotoriques.

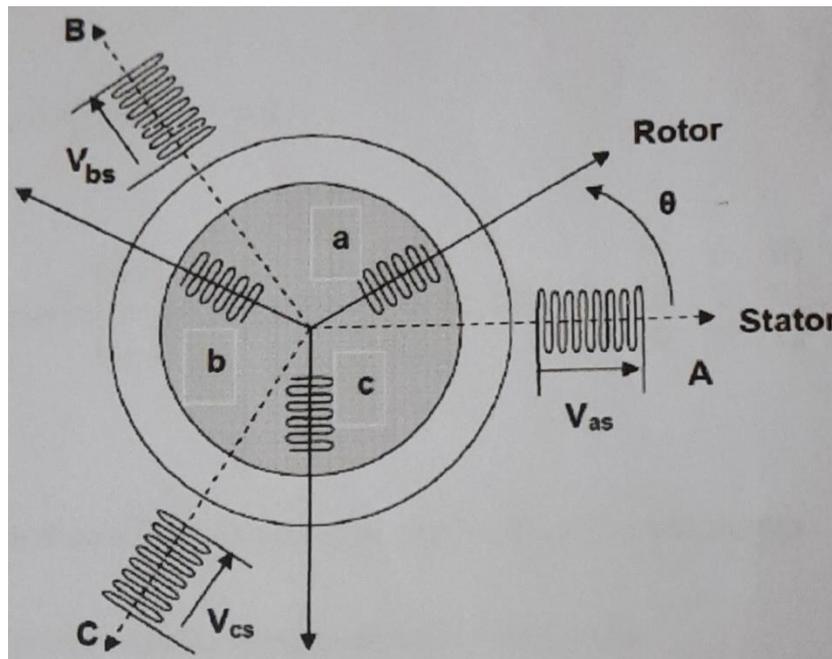


Figure.III.2 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

**a) Equations électriques :**

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux et aux courants dans bobinages.

Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements.

Au niveau du Stator :

$$[V_{abcs}] = R_s [I_{abcs}] + \frac{d}{dt} [Q_{abcs}] \quad (III.1)$$

avec :

$$[V_{abcs}] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [I_{abcs}] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [Q_{abcs}] = \begin{bmatrix} Q_{as} \\ Q_{bs} \\ Q_{cs} \end{bmatrix}; [R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Au niveau du Rotor :

$$[V_{abcr}] = R_r [I_{abcr}] + \frac{d}{dt} [Q_{abcr}] = 0 \quad (III.2)$$

avec :

$$[V_{abcr}] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [I_{abcr}] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [Q_{abcr}] = \begin{bmatrix} Q_{ar} \\ Q_{br} \\ Q_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Où :

$R_s$  et  $R_r$  : Résistance d'une phase statorique et rotorique respectivement.

$[V_{abcs}]$  : Vecteur tensions appliquées aux phases statoriques.

$[I_{abcs}]$  : Vecteur courants appliqués aux phases statoriques.

$[Q_{abcs}]$  : Vecteur flux statoriques.

$[V_{abcr}]$  : Vecteur tension appliquées aux phases rotoriques.

$[I_{abcr}]$  : Vecteur courants appliqués aux phases rotoriques.

$[Q_{abcr}]$  : Vecteur flux rotoriques.

### b) Equations magnétiques :

On peut obtenir les équations des flux en fonction des courants à partir des différentes inductances, dont certaines dépendent du temps via l'angle électrique  $\theta$ , qui détermine la position de la phase (a) du rotor par rapport à la phase (a) du stator. **[16]**

avec :

$$[Q_{abc}] = \begin{bmatrix} M_{s\sigma} & L_{sr} \\ L_{rs} & M_{r\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{bmatrix} Q_{as} \\ Q_{bs} \\ Q_{cs} \end{bmatrix} = [M_{s\sigma}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [L_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{bmatrix} Q_{ar} \\ Q_{br} \\ Q_{cr} \end{bmatrix} = [L_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{r\sigma}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$$[M_{s\sigma}] = \begin{bmatrix} l_s & l_{ss} & l_{ss} \\ l_{ss} & l_s & l_{ss} \\ l_{ss} & l_{ss} & l_s \end{bmatrix} ; \quad [M_{r\sigma}] = \begin{bmatrix} l_r & l_{rr} & l_{rr} \\ l_{rr} & l_r & l_{rr} \\ l_{rr} & l_{rr} & l_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = [L_{rs}]^T = l_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Où :

$l_s$  et  $l_r$  : Inductances propres statoriques et rotoriques.

$l_{ss}$  et  $l_{rr}$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques ou rotoriques.

$l_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et rotorique.

### III.3 Transformation de PARK :

C'est la transformation des enroulements de phase a, b, c de la MAS en des enroulements disposés selon deux axes appelés d et q et équivalents du point de vue électrique et magnétique [17]. De plus, les axes de ce dernier repère sont en quadrature ce qui réduit considérablement le modèle mathématique de la machine. La structure symétrique et équilibrée de la machine asynchrone permet de faciliter le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasée équivalente. [18]

La **figure.III.3** montre le principe de la transformation de Park. [3]

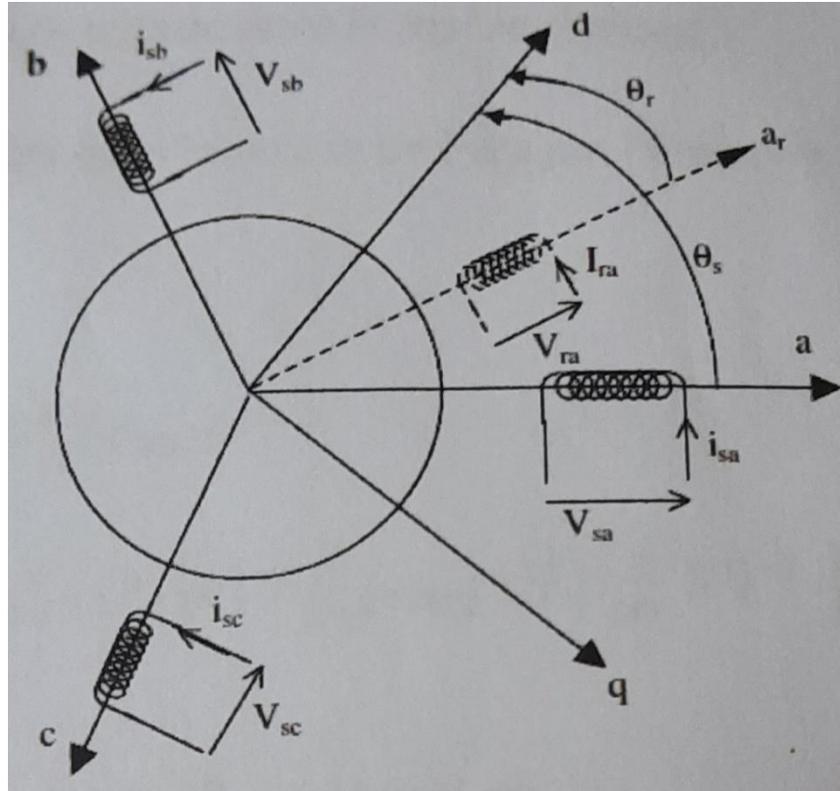
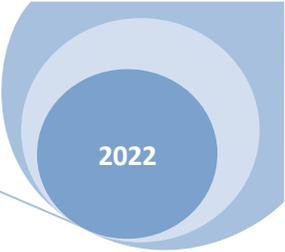


Figure.III.3 Représentation de la MAS dans le repère de Park.

avec :

$\theta_r$  : L'angle entre l'axe ar et d.

$\theta_s$  : L'angle entre l'axe as et d.

Une matrice unique de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Puisque cette matrice est orthogonale, on en déduit que sa matrice inverse est la même que sa matrice transposée :

$$[P]^{-1} = [P]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\Psi - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

#### a) Equations électriques dans le repère biphasé :

On représente les tensions dans le repère de Park par l'équation suivante :

$$[V_{dq}] = [P][V_{abc}] \quad (\text{III.8})$$

$$[V_{dq}] = [P][R][I_{abc}] + [P] \frac{d}{dt} [Q_{abc}] \quad (\text{III.9})$$

$$[V_{dq}] = [P][R][P]^{-1} [I_{dq}] + [P][P]^{-1} \frac{d}{dt} [Q_{dq}] + [P] \left[ \frac{d}{dt} [P]^{-1} \right] [Q_{dq}] \quad (\text{III.10})$$

donc :

$$[V_{dq}] = [R][I_{dq}] + \frac{d}{dt} [Q_{dq}] + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [Q_{dq}] \quad (\text{III.11})$$

avec :

$\Psi = \theta_s$  , pour les grandeurs statoriques

$\Psi = \theta_r$  , pour les grandeurs rotoriques

Alors, on peut réécrire les équations des tensions comme suit :

Au niveau du stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} Q_{ds} - \omega_s Q_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} Q_{qs} + \omega_s Q_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Au niveau du rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} Q_{dr} - \omega_r Q_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} Q_{qr} + \omega_r Q_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} Q_{ds} - \omega_s Q_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} Q_{qs} + \omega_s Q_{ds} \end{array} \right. \quad \text{(III.14)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} Q_{dr} - \omega_r Q_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} Q_{qr} + \omega_r Q_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(III.15)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} Q_{dr} - \omega_r Q_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} Q_{qr} + \omega_r Q_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(III.16)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} Q_{dr} - \omega_r Q_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} Q_{qr} + \omega_r Q_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(III.17)}$$

**b) Equations magnétiques dans le repère biphasé :**

On représente les flux dans le repère de Park par l'équation suivante :

$$[Q_{dq}] = [P][Q_{abc}] \quad \text{(III.18)}$$

Au niveau du stator :

$$[Q_{dqs}] = [p][M_{S\sigma}][I_{abcS}] + [P][L_{sr}][I_{abcr}] \quad \text{(III.19)}$$

$$[Q_{dqs}] = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} [I_{dqs}] + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} [I_{dqr}] \quad \text{(III.20)}$$

$$\begin{cases} Q_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ Q_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.21)}$$

Au niveau du rotor :

$$[Q_{dqr}] = [P][L_{rs}][I_{abcs}] + [P][M_{r\sigma}][I_{abcr}] \quad (III.22)$$

$$[Q_{dqs}] = [P][L_{rs}][P]^{-1}[I_{dqs}] + [P][M_{r\sigma}][P]^{-1}[I_{dqr}] \quad (III.23)$$

$$[Q_{dqs}] = \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} [I_{dqs}] + \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} [I_{dqr}] \quad (III.24)$$

$$\begin{cases} Q_{dr} = L_m I_{ds} + L_r I_{dr} \\ Q_{qr} = L_m I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases}$$

avec :

$$L_s = l_s - l_{ss} ; L_r = l_r - l_{rr} ; L_m = \frac{3}{2} l_{sr}$$

donc :

$$\begin{cases} Q_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} & (III.25) \\ Q_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} & (III.26) \\ Q_{dr} = L_m I_{ds} + L_r I_{dr} & (III.27) \\ Q_{qr} = L_m I_{qs} + L_r I_{qr} & (III.28) \end{cases}$$

### III.4 Choix du vecteur d'état :

La mise en forme des équations précédentes sous forme d'équations d'état demande dans un premier temps la définition du vecteur d'état. On déclare un vecteur qui contient les deux courants statoriques et les deux flux rotoriques. On considère que la vitesse mécanique est mesurée par un capteur de vitesse. **[3]**

On définit le vecteur d'état comme suit :

$$X = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ Q_{dr} \\ Q_{qr} \end{bmatrix}$$

### III.4.1. Représentation d'état :

On reformule les équations (III.14) à (III.17) de la manière suivante [3] :

$$\begin{cases} -I_{ds} - \frac{1}{R_s} \frac{d}{dt} Q_{ds} + \frac{1}{R_s} \omega_s Q_{qs} + \frac{1}{R_s} V_{ds} = 0 & \text{(III. 29)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} -I_{qs} - \frac{1}{R_s} \frac{d}{dt} Q_{qs} - \frac{1}{R_s} \omega_s Q_{ds} + \frac{1}{R_s} V_{qs} = 0 & \text{(III. 30)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} Q_{dr} = -R_r I_{dr} + \omega_r Q_{qr} & \text{(III. 31)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} Q_{qr} = -R_r I_{qr} - \omega_r Q_{dr} & \text{(III. 32)} \end{cases}$$

On remplace (III.27) et (III.28) dans (III.25) et (III.26) on trouvera :

$$\begin{cases} Q_{ds} = L_s I_{ds} - \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds} + \frac{L_m}{L_r} Q_{dr} \\ Q_{qs} = L_s I_{qs} - \frac{L_m^2}{L_r} I_{qs} + \frac{L_m}{L_r} Q_{qr} \end{cases} \quad \text{(III.33)}$$

En remplaçant ces deux dernières équations dans (III.29) et (III.30) on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{-R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} I_{ds} + \omega_s I_{qs} - \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} \frac{d}{dt} Q_{dr} + \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} \omega_s Q_{qr} + \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{1}{R_s} V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = -\omega_s I_{ds} - \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} I_{qs} - \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} \omega_s Q_{dr} - \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} \frac{d}{dt} Q_{qr} + \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{1}{R_s} V_{qs} \end{cases} \quad \text{(III. 34)}$$

En remplaçants (III.27) et (III.28) respectivement dans (III.31) et (III.32) on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} Q_{dr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{ds} - R_r \frac{1}{L_r} Q_{dr} + w_r Q_{qr} \\ \frac{d}{dt} Q_{qr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{qs} - w_r Q_{dr} - R_r \frac{1}{L_r} Q_{qr} \end{cases} \quad (III.35)$$

Pour finir on remplace (III.35) dans (III.34) on obtiendra :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{ds} = \left( \frac{-R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} - \frac{L_m^2}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} \right) I_{ds} + w_s I_{qs} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} Q_{dr} + \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} (w_s - w_r) Q_{qr} \\ \quad + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = -w_s I_{ds} - \left( \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} + \frac{L_m^2}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} \right) I_{qs} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} (w_s - w_r) Q_{dr} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} Q_{qr} \\ \quad + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} V_{qs} \end{cases} \quad (III.36)$$

Donc d'après (III.35) et (III.36) on peut réécrire le modèle d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{ds} = \left( \frac{-R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} - \frac{L_m^2}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} \right) I_{ds} + w_s I_{qs} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} Q_{dr} + \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \frac{L_m}{R_s L_r} (w_s - w_r) Q_{qr} \\ \quad + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = -w_s I_{ds} - \left( \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} + \frac{L_m^2}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} \right) I_{qs} - \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} (w_s - w_r) Q_{dr} + \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \frac{R_r}{L_r} Q_{qr} \\ \quad + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} V_{qs} \\ \frac{d}{dt} Q_{dr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{ds} - R_r \frac{1}{L_r} Q_{dr} + w_r Q_{qr} \\ \frac{d}{dt} Q_{qr} = \frac{L_m R_r}{L_r} I_{qs} - w_r Q_{dr} - R_r \frac{1}{L_r} Q_{qr} \end{cases} \quad (III.37)$$

III.4.2. Choix référentiel :

Selon la position du repère, appelé aussi référentiel, sur la machine on peut définir un repère lié au stator, un repère lié au rotor ou un repère lié au champ tournant.

Le choix d'un repère adéquat peut aussi contribuer à la simplification du modèle de la machine. Dans ces conditions, toutes les grandeurs électromagnétiques de la machine, statoriques et rotoriques, sont ramenées à un seul référentiel. [18]

Ainsi le système (III.37), doit être ramené à un seul de ces référentiels :

- Repère fixe ou lié au stator avec :  $w_s = 0$  et  $w_r = P\Omega$  .
- Repère lié au rotor avec :  $w_s = P\Omega$  et  $w_r = 0$  .
- Repère lié au champ tournant qui dépend des deux vitesses  $w_s$  et  $w_r$  .

La conversion des équations dans un référentiel unique est nécessaire pour deux raisons : d'une part, pour réaliser une étude correcte du fonctionnement de la machine asynchrone et d'autre part pour simplifier le système d'équations [19], ce qui permettra sa résolution numérique. Pour notre étude on choisit le repère lié au stator, donc le modèle (III.37) devient [3] :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{ds} &= -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{ds} + \left(\frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_m T_r}\right) Q_{dr} - \left(\frac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right) P\Omega Q_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} &= -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) I_{qs} + \left(\frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_m T_r}\right) Q_{qr} + \left(\frac{1-\sigma}{\sigma L_m}\right) P\Omega Q_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} \\ \frac{d}{dt} Q_{dr} &= \frac{L_m}{T_r} I_{ds} - \frac{1}{T_r} Q_{dr} + P\Omega Q_{qr} \\ \frac{d}{dt} Q_{qr} &= \frac{L_m}{T_r} I_{qs} - \frac{1}{T_r} Q_{qr} - P\Omega Q_{dr} \end{aligned} \right. \quad (III.38)$$

avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad ; \quad T_s = \frac{L_s}{R_s}$$

Avec :

$\sigma$  : Coefficient de fuite.

$T_r$  : Constante de temps rotorique.

$T_s$  : Constante de temps statorique.

Posons les constantes suivantes pour simplifier notre modèle :

$$a_1 = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) ; \quad a_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_m T_r} \quad ; \quad a_3 = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \quad ; \quad a_4 = \frac{L_m}{T_r} \quad ; \quad a_5 = \frac{1}{T_r} \quad ; \quad b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{ds} = a_1 I_{ds} + a_2 Q_{dr} - a_3 P \Omega Q_{qr} + b V_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = a_1 I_{qs} + a_2 Q_{qr} + a_3 P \Omega Q_{dr} + b V_{qs} \\ \frac{d}{dt} Q_{dr} = a_4 I_{ds} + P \Omega Q_{qr} - a_5 Q_{dr} \\ \frac{d}{dt} Q_{qr} = a_4 I_{qs} - P \Omega Q_{dr} - a_5 Q_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

On peut récrire le modèle d'état de la machine sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} I_{ds} \\ \frac{d}{dt} I_{qs} \\ \frac{d}{dt} Q_{dr} \\ \frac{d}{dt} Q_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & -a_3 P\Omega \\ 0 & a_1 & a_3 P\Omega & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & P\Omega \\ 0 & a_4 & -P\Omega & -a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ Q_{dr} \\ Q_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

de la forme :

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t) \quad \text{et :}$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + w_r \mathbf{A}_2 \quad \text{avec :}$$

$x(t)$  : vecteur d'état.

$$u(t) = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} : \text{vecteur de commande}$$

$\mathbf{A}$  : matrice d'état.

$\mathbf{B}$  : matrice d'application de la commande.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & -a_3 P\Omega \\ 0 & a_1 & a_3 P\Omega & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & P\Omega \\ 0 & a_4 & -P\Omega & -a_5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & 0 \\ 0 & a_4 & 0 & -a_5 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_3 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### III.5. Equation mécanique :

Dans l'étude des caractéristiques dynamiques de la machine asynchrone, il est nécessaire d'introduire les paramètres mécaniques (couple, vitesse) avec les paramètres électriques (tension, courant, flux ...). **[3]**

L'équation mécanique s'exprime par :

$$\frac{d}{dt}\Omega = \frac{1}{J} C_{em} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_v}{J} \Omega \quad (\text{III.41})$$

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple de charge.

$\Omega$  : vitesse mécanique.

$J$  : moment d'inertie.

$f_v$  : Coefficient de frottement.

Pour le modèle de la machine décrit ci-dessus, l'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation suivante :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (Q_{dr} I_{qs} - Q_{qr} I_{ds}) \quad (\text{III.42})$$

Ou  $p$  est le nombre de paires de pôles.

En remplaçant l'équation (III.42) dans (III.41) on obtient la formule générale de l'équation mécanique dans le repère diphasé :

$$\frac{d}{dt}\Omega = \frac{1}{J} p \frac{L_m}{L_r} (Q_{dr} I_{qs} - Q_{qr} I_{ds}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_v}{J} \Omega \quad (\text{III.43})$$

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressé à la modélisation de la MAS dans le repère triphasé et puis dans le repère de Park lié au stator. Nous avons obtenu sa représentation d'état que nous allons utiliser par la suite afin d'établir la simulation et voir les différents résultats que nous allons obtenir. **[3]**

# Chapitre IV

## Modélisation de l'association onduleur à MLI – moteur asynchrone triphase

## IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de l'onduleur et par la suite celle de l'association onduleur-machine asynchrone triphasée en vue d'une éventuelle simulation par le programme Matlab-Simulink.

## IV.2 Modélisation de l'onduleur :

### IV.2.1 Introduction :

Le montage donné à **figure IV.1** représente un onduleur de tension triphasé. Il est composé de six interrupteurs aux bornes desquels sont montées, en antiparallèle, des diodes de récupération.

Les signaux logiques de commande  $C_i$  et  $C_i'$  ( $i = a,b,c$ ) fixent les états des interrupteurs, supposés parfaits (par le temps morts à la commutation) et à commandes complémentaires. **[26]**

( $C_a = \overline{C_a'}$ ,  $C_b = \overline{C_b'}$ ,  $C_c = \overline{C_c'}$ ). Ils sont définis comme suit :

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé.} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert.} \end{cases}$$

Les relations qui lient la tension continue  $E$ , à l'entrée de l'onduleur, aux tensions de lignes délivrées par ce dernier sont **[26]** :

$$V_{ab} = E (C_a - C_b)$$

$$V_{bc} = E(C_b - C_c) \tag{IV.1}$$

$$V_{ca} = E(C_c - C_a)$$

Tandis que le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$i_0 = C_a i_a + C_b i_b + C_c i_c \tag{IV.2}$$

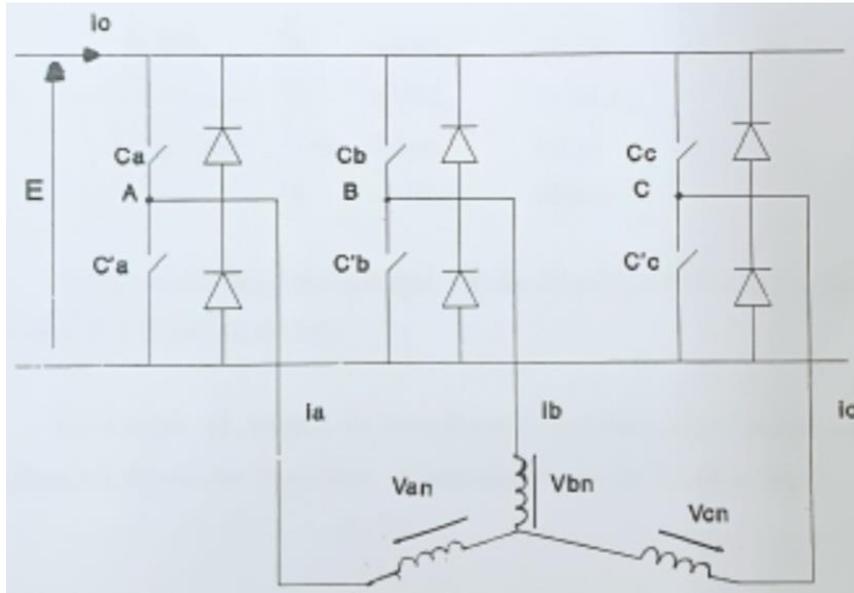


Figure. IV.1 Onduleur avec charge.

IV.2.2 Mise en équation :

Le cas de l'onduleur de tension alimentant un moteur triphasé couplé en étoile est envisagé (figure IV.1) Le système étant triphasé équilibré [26] :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{IV.3}$$

L'expression des tensions simples aux bornes du moteur (figure IV.1) en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur E et des commandes  $C_i$  ( $i = a,b,c$ ) est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = (E/3) \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (IV.4)$$

L'étude du moteur se fait dans un repère lié au stator. l'application de la transformation de Park P (  $\Psi=0$  ) aux tensions  $V_{an}$  ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  permet de déterminer  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  .

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = P(0) \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (IV.5)$$

Il est plus intéressant d'exprime la matrice [V] à l'aide des signaux de commande  $C_a$  ,  $C_b$  et  $C_c$  , d'où :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot E \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

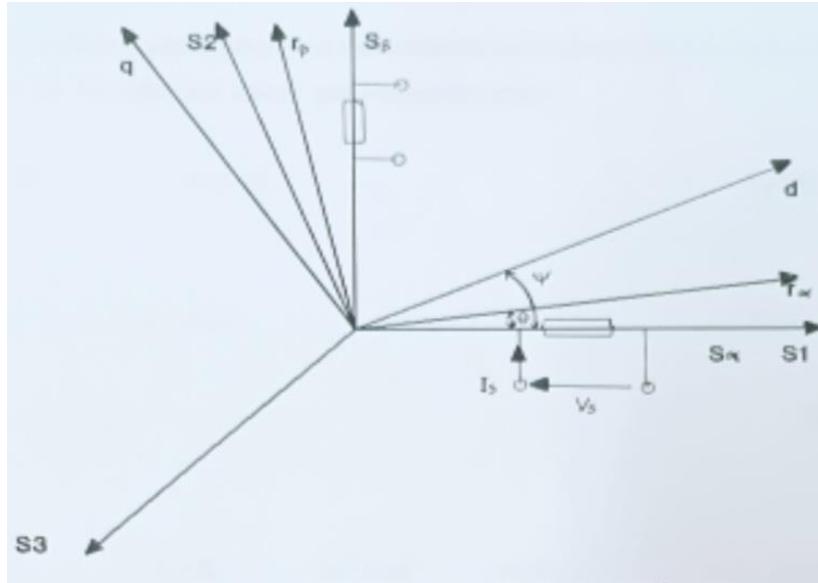


Figure. IV.2 Transformation triphasé – diphasé (Transformation de Park).

IV.3 Modèle de l'ensemble onduleur – moteur asynchrone :

Le modèle électrique représentant l'association moteur asynchrone – onduleur écrit dans un repère lié au stator est donné par l'équation d'état :

$$[B][U] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \sqrt{\frac{2}{3}} E \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

$$[B][U] = \sqrt{\frac{2}{3}} E \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{1}{2\sigma L_s} & -\frac{1}{2\sigma L_s} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

$$[B][U] = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{E}{\sigma} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & -\frac{1}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{L_s} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}$$

donc :

$$[B][U] = \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{L_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & -\frac{1}{2L_s} & -\frac{1}{2L_s} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{L_s} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

$$[B][U] = \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} \frac{L_s L_r}{L_s} & -\frac{L_s L_r}{2L_s} & -\frac{L_s L_r}{2L_s} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{L_s L_r}{L_s} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{L_s L_r}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

$$[B][U] = \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} L_r & -\frac{L_r}{2} & -\frac{L_r}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} L_r & -\frac{\sqrt{3}}{2} L_r \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$

Donc pour association moteur asynchrone – onduleur le modèle d'état est :

$$\frac{d[X]}{dt} = A [x] + B [U] \quad (IV.7)$$

Avec :

$$[x] = [I_{ds} I_{qs} Q_{dr} Q_{qr}] \quad (IV.8)$$

$$[U] = [C_a \ C_b \ C_c] \quad (IV.9)$$

et :

$$a_1 = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right); \quad a_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{L_m T_r}; \quad a_3 = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m}; \quad a_4 = \frac{L_m}{T_r}; \quad a_5 = \frac{1}{T_r}; \quad b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & -a_3 P \Omega \\ 0 & a_1 & a_3 P \Omega & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & P \Omega \\ 0 & a_4 & -P \Omega & -a_5 \end{bmatrix}$$

et :

$$B = \sqrt{\frac{2}{3}} E \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} L_r & -\frac{L_r}{2} & -\frac{L_r}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} L_r & -\frac{\sqrt{3}}{2} L_r \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### IV.4 Conclusion :

La modélisation de l'association onduleur MLI – moteur asynchrone triphasé a été réalisée avec succès. La simulation du fonctionnement du moteur asynchrone triphasé sous tension sinusoïdale triphasé 380v,50Hz, ainsi que celle de l'association onduleur MLI – moteur asynchrone vont être présentes dans le chapitre qui suit.

# Chapitre V

## Résultats de simulation et interprétations

### V.1 Introduction :

Les résultats de simulation des différents paramètres de la machine, de l'onduleur et de l'association onduleur-machine obtenus pour différentes fréquences d'alimentation sont représentés dans ce chapitre.

### V.2 Simulation de la machine asynchrone triphasée alimentée par le réseau triphasé.

L'utilisation du programme Matlab-Simulink a été utilisé pour simuler le comportement du moteur asynchrone à cage d'écureuil lorsqu'il est alimenté par une tension triphasée équilibrée de 380 v 50 Hz.

Les paramètres du moteur utilise sont présentés dans l'index.

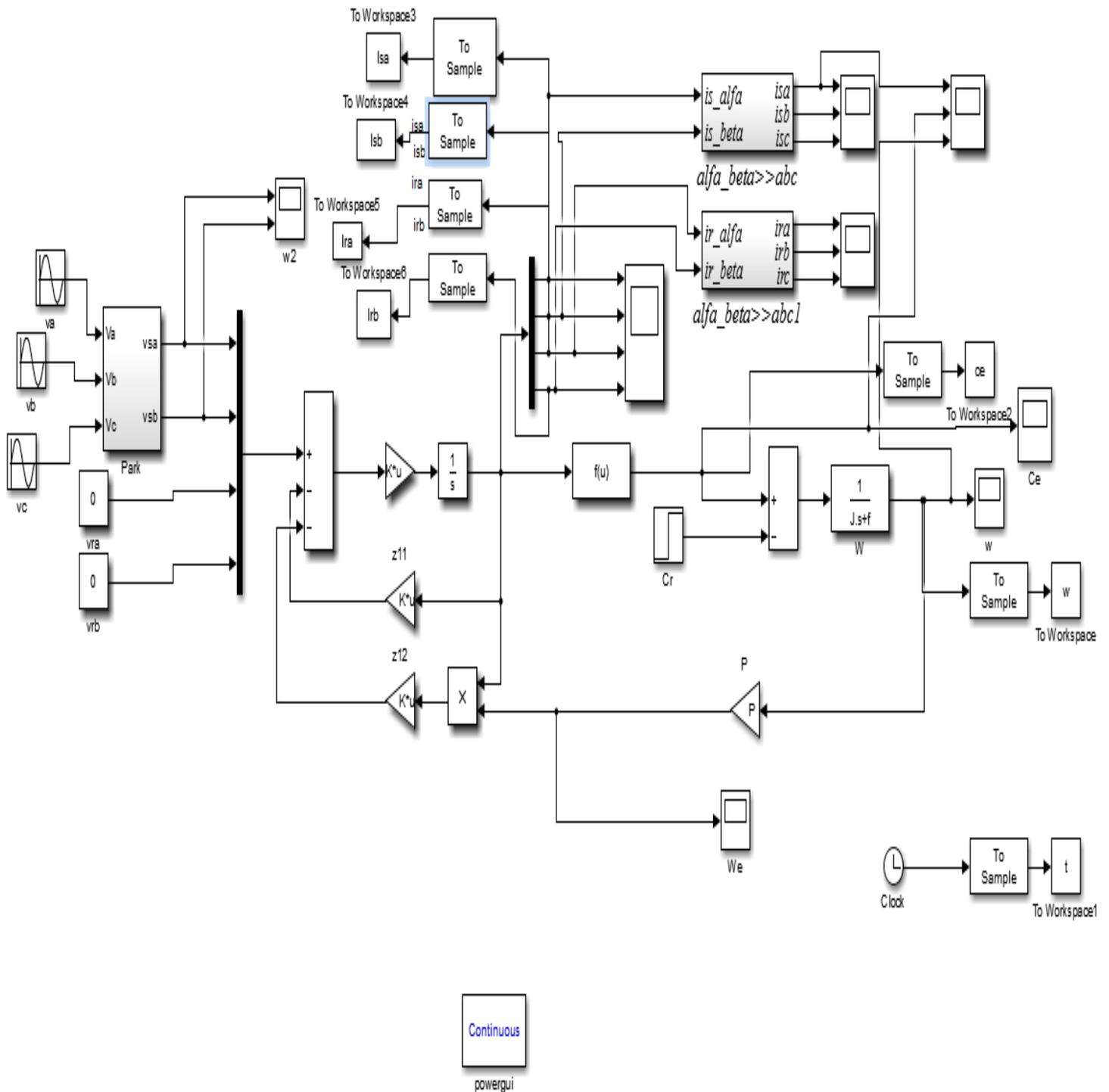
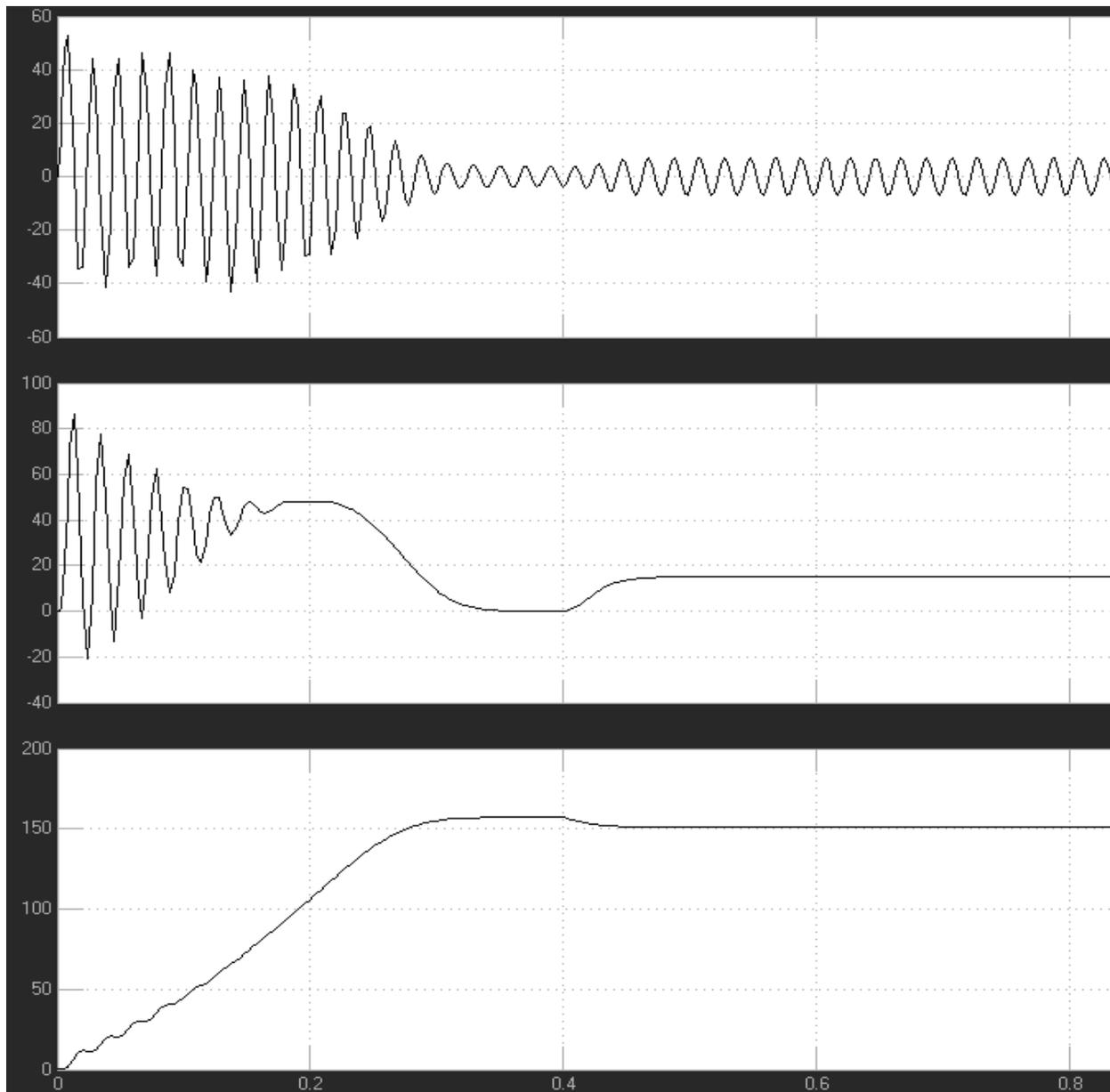


Figure V.1 Programme simulink de la machine asynchrone triphasée alimentée par le réseau.

Les résultats du courant statorique de la phase A, du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation du moteur sont présentés sans et avec couple résistif de 15N au temps de 0.4s respectivement.



**Figure V.2** : Résultats de simulation de la machine alimentée par le réseau triphasé.

Dans son régime transitoire sans charge, au démarrage de la machine on remarque une augmentation brusque du courant statorique de l'ordre de plus et moins 50A avec d'importantes oscillations, du couple électromagnétique avec oscillations de 85 à -20N pour s'annuler au temps  $t = 0.3s$ .

La vitesse de rotation augmente d'une façon linéaire jusqu'à atteindre la vitesse de 160 rd/s au temps 0.3s.

Un couple résistant de 15N est introduit au temps  $t = 0.4s$ . On observe une augmentation conséquente du courant statorique et du couple avec une réduction de la vitesse de rotation du moteur. Ceci est nécessaire afin que le moteur essaye de maintenir le niveau de la vitesse nominale du moteur.

### V.3 Simulation de l'onduleur MLI :

Le programme Matlab-Simulink utilisé pour la simulation de l'onduleur MLI est illustré ci-dessous :

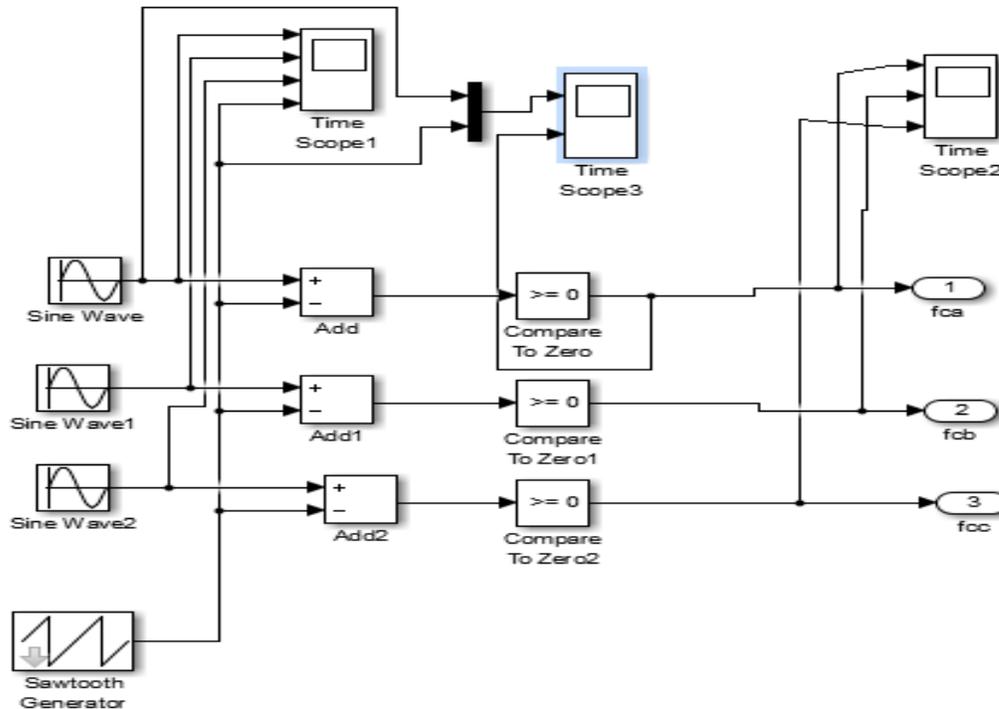
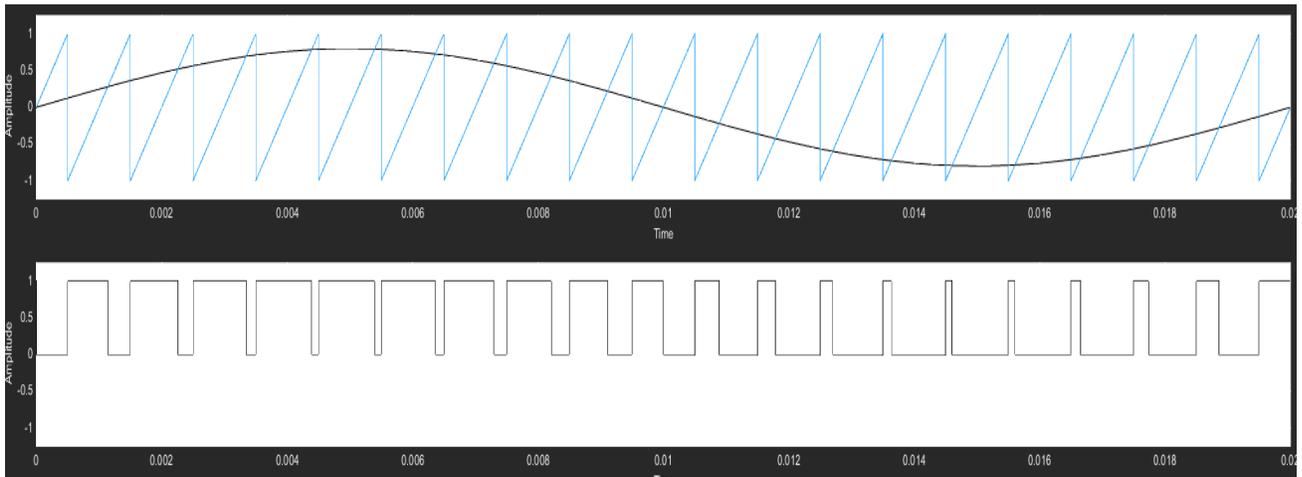


Figure V.3 : Programme simulink de l'onduleur MLI.

La comparaison de la tension de la porteuse avec celle de la tension sinusoïdale modulante donne les impulsions MLI dont les résultats sont illustrés ci-dessous pour une fréquence de 50Hz.

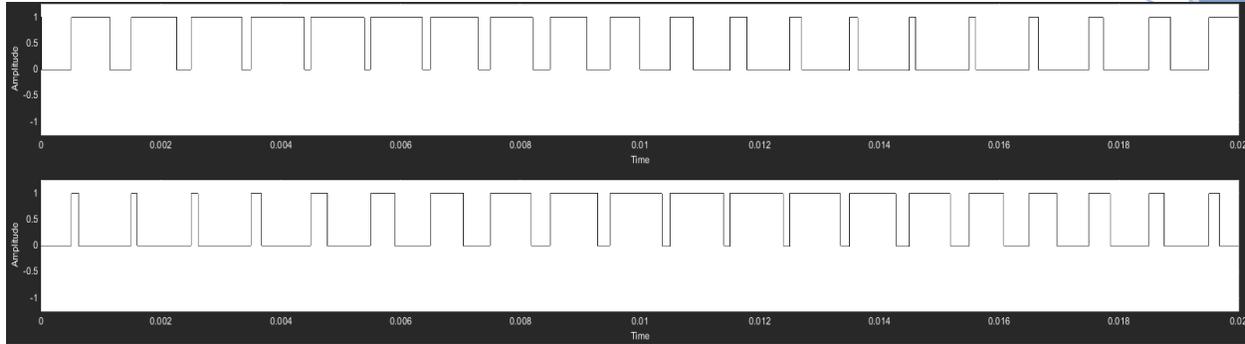


**Figure V.4 :** Résultats de simulation de l'onduleur MLI.

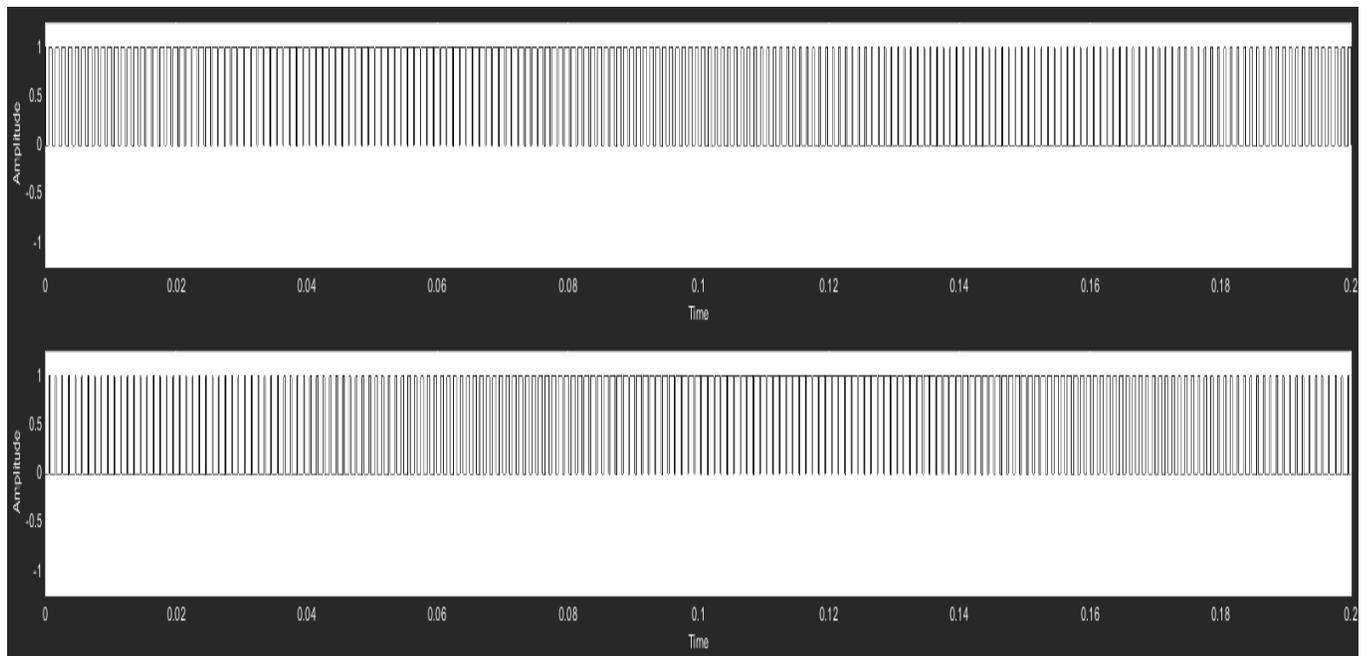
On remarque que la largeur des impulsions sont plus large aux environs de  $\frac{\pi}{2}$  et de  $2\pi/3$  et ceci est due à la modulation.

On remarque aussi que quand la tension de la porteuse est supérieure à celle de la modulante le niveau du signal de sortie est à logique 1 sinon il est au niveau 0 logique.

La **figure V.5** et **V.6** montrent les résultats de la tension de sortie MLI durant une phase pour les phases A et B pour une fréquence  $F=50\text{Hz}$  et  $F=5\text{Hz}$  respectivement.



**Figure V.5 :** Résultats de simulation les tensions MLI d'un les phases A et B fréquence 50Hz.



**Figure V.6 :** Résultats de simulation les tensions MLI d'un les phases A et B fréquence 5Hz.

On remarque que quand la fréquence de la modulante est à 5 Hz, les impulsions MLI ressemblent a signal carré et ceci parce que le signal de la modulante prends un temps conséquent pour arriver à l'angle  $\frac{\pi}{2}$  rad. Le nombre d'impulsions par cycle est de 200.pour f=5 Hz.

Quand la fréquence de la modulante est à 50 Hz, la modulation des largeurs d'impulsion est plus nette. On peut voir un déphasage de  $2\frac{\pi}{3}$  rad entre la phase A et la phase B. Le nombre d'impulsions par cycle est de 20 pour  $f=50$  Hz.

#### V.4 Simulation de l'association onduleur MLI- moteur asynchrone triphasé.

Le programme Matlab-Simulink utilisé pour la simulation de l'association onduleur MLI- moteur asynchrone triphasé est représenté dans la **figure V.7**.

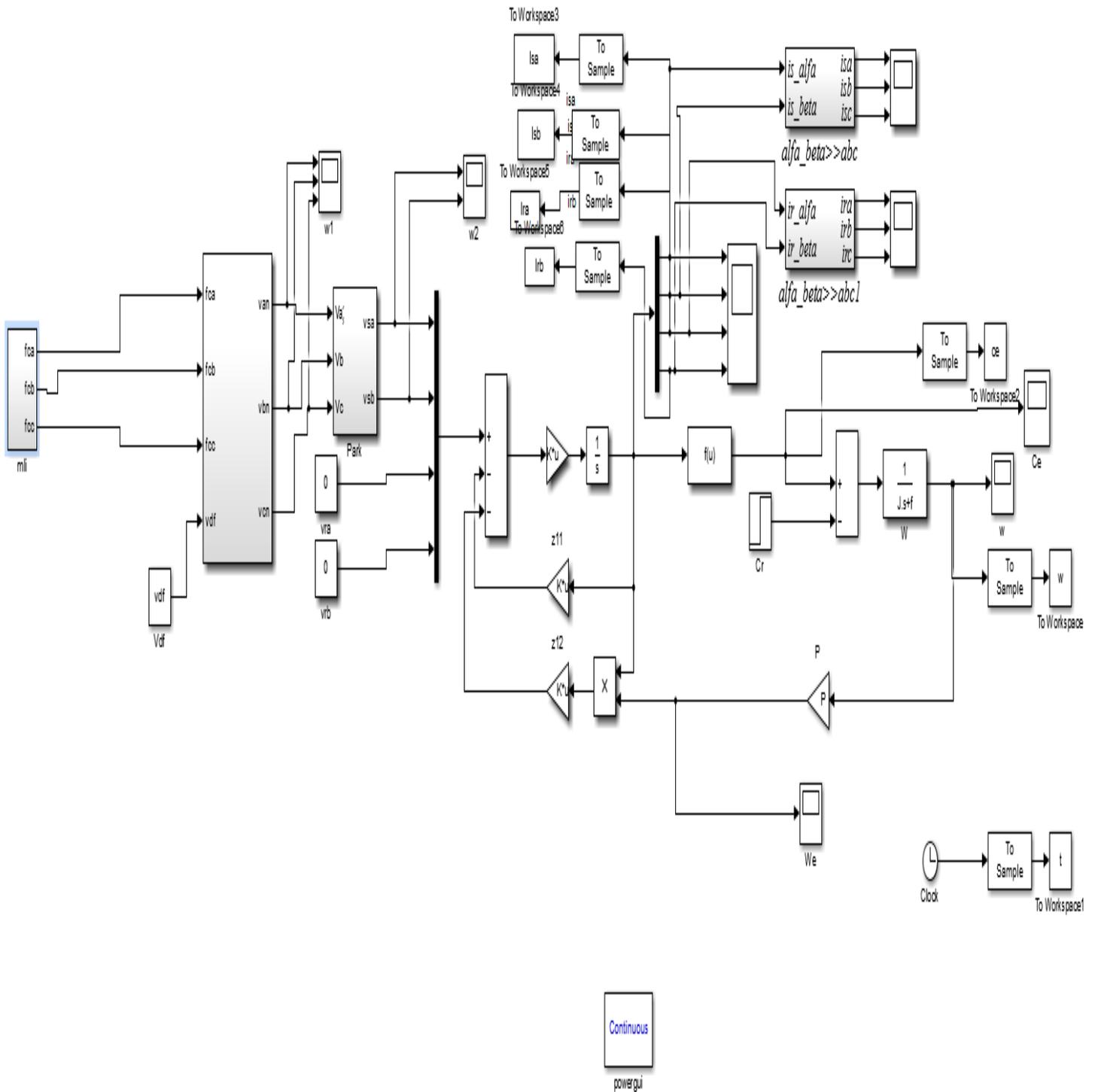
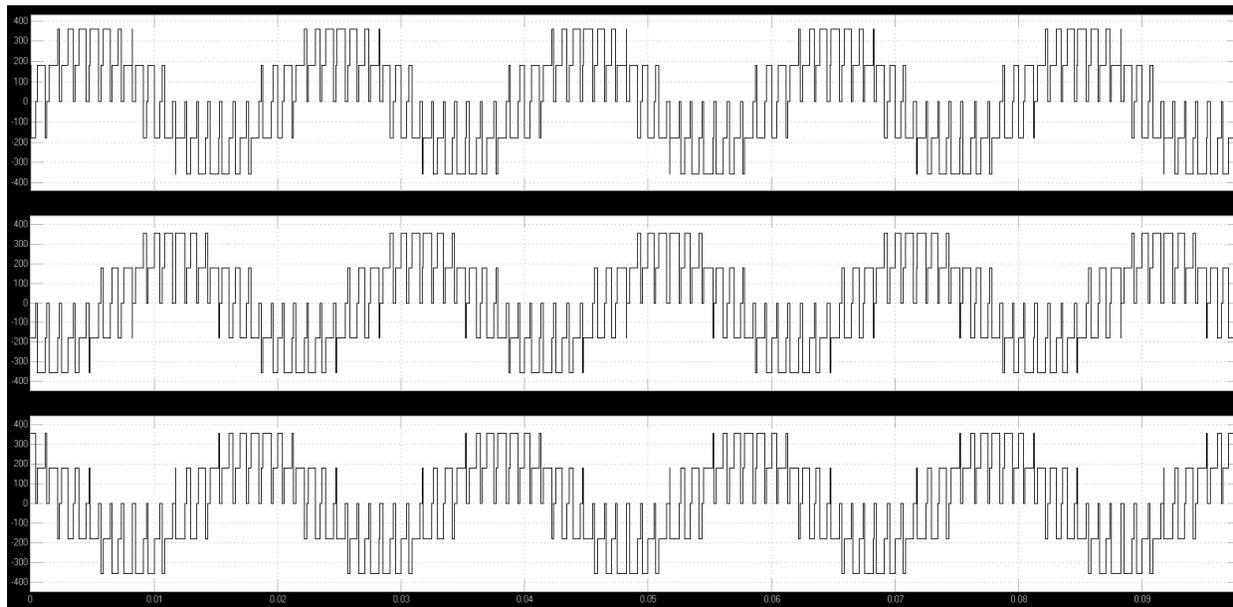
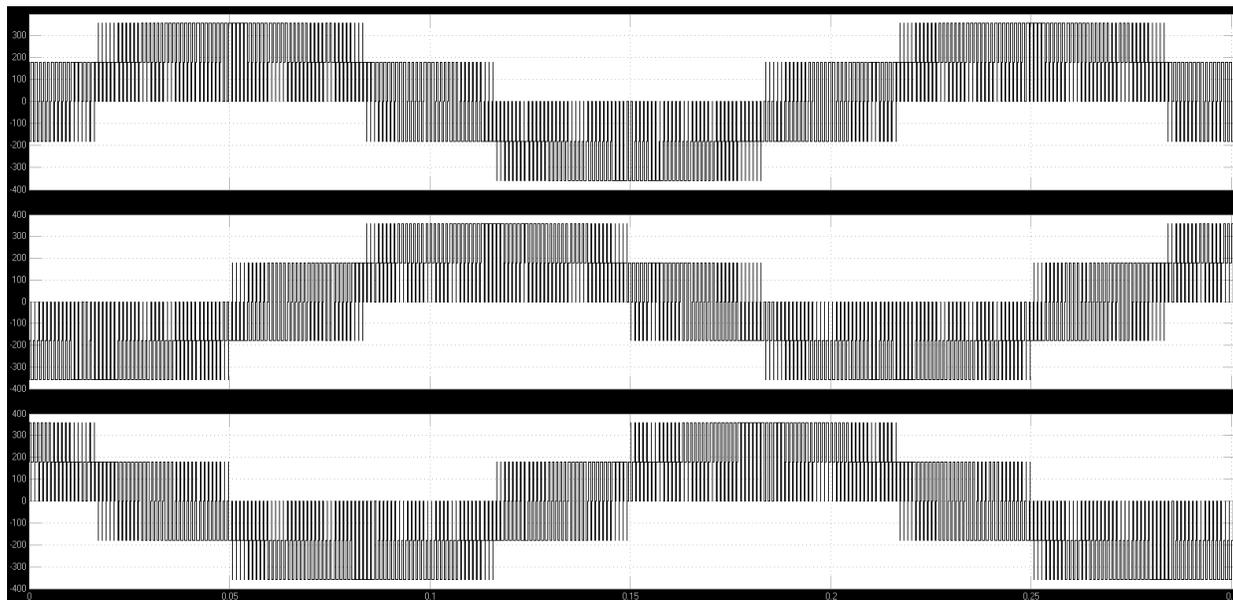


Figure V.7 : Programme Simulink de la machine asynchrone association onduleur – MLI.

Les **figure V.8** et **V.9** montrent les signaux  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$  du stator du moteur asynchrone pour des fréquences MLI de 50 et 5 Hz respectivement.



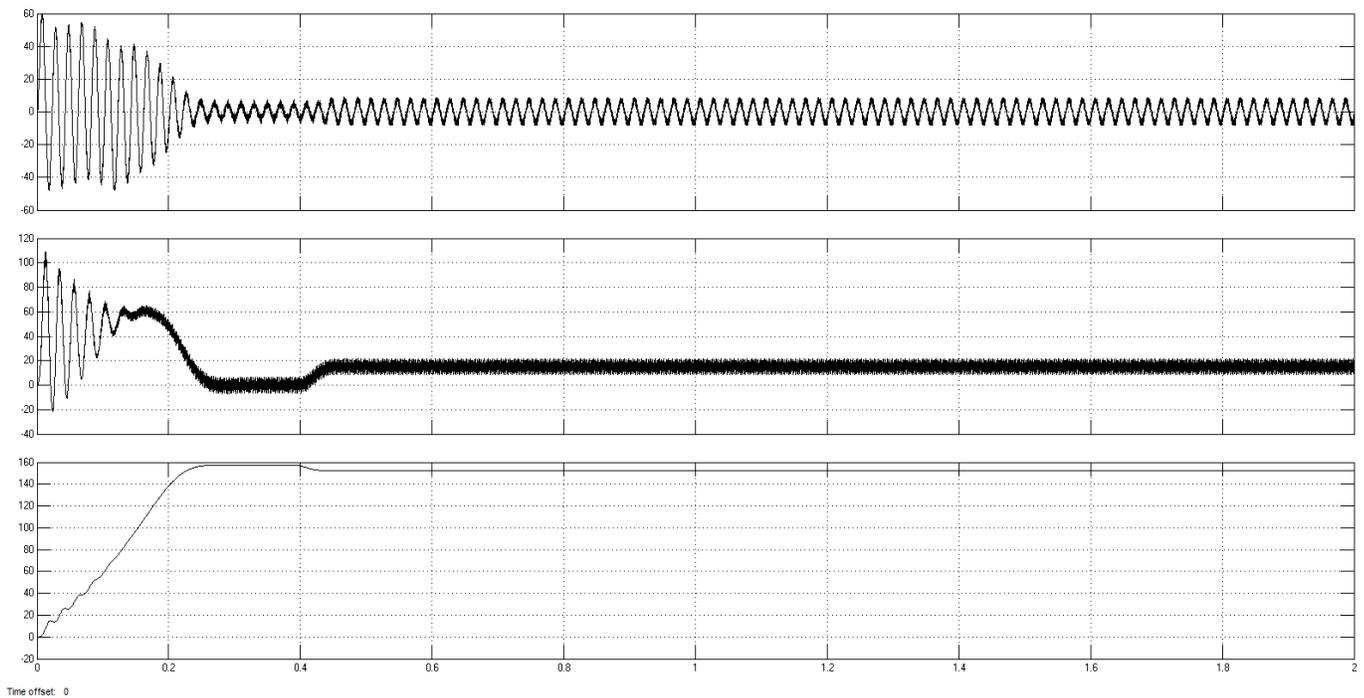
**Figure V.8** : Résultats de simulation les tensions  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ , pour  $f=50\text{Hz}$ .



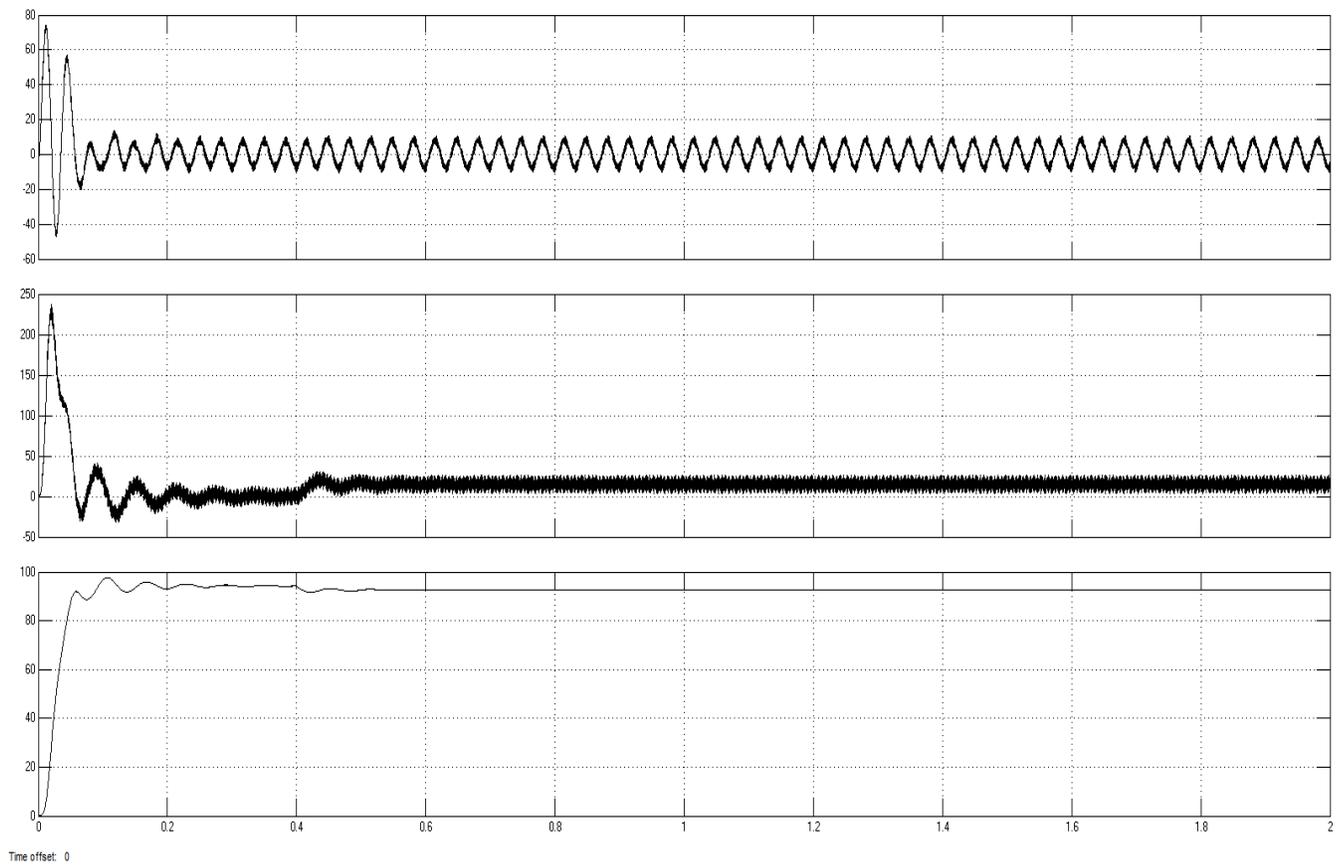
**Figure V.9** : Résultats de simulation les tensions  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$ , pour  $f=5\text{Hz}$ .

On remarque un déphasage net entre les trois phases de  $2\frac{\pi}{3}$  rad.

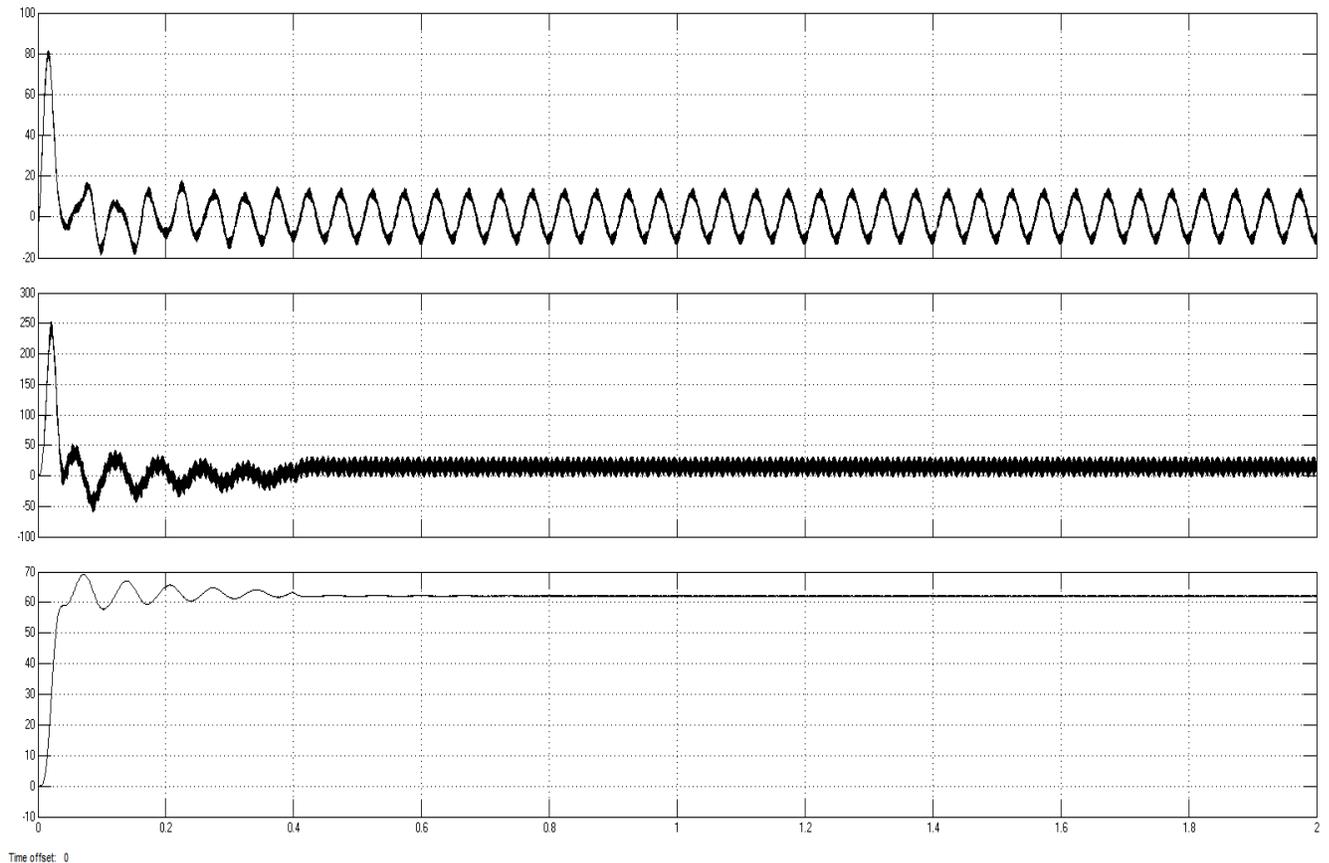
Les résultats du courant statorique de la phase A, du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation du moteur asynchrone triphasé sont présentés pour des fréquences de  $f=50, 30,20$  Hz respectivement sans et avec introduction d'un couple résistif de 15N au temps  $t= 0.4s$ .



**Figure V.10 :** Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour  $f=50\text{Hz}$ .



**Figure V.11** : Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour  $f=30\text{Hz}$ .



**Figure V.12** : Résultats de simulation de l'association onduleur MLI –machine pour  $f=20\text{Hz}$ .

Les **figures V.10**, **V.11** et **V.12** représentent les résultats du courant statorique, du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation à vide durant 0.4 s et avec un couple résistant de 15N après 0.4s.

On remarque que la **vitesse** augmente avec l'augmentation de la **fréquence** d'alimentation du moteur sans charge et avec couple résistant.

Le courant statorique et le couple électromagnétique observent des oscillations importantes durant le démarrage et finissent par se stabiliser en régime permanent. On constate une réduction de la vitesse de rotation du moteur et une augmentation des

courant statorique et du couple électromagnétique lorsqu'un couple résistif est appliqué au temps  $t=0.4s$ . Ceci est nécessaire afin que le moteur puisse résister au couple introduit.

### Conclusion générale :

Notre mémoire a été dédié à l'étude de l'association moteur–onduleur de tension. En effet une étude sur les performances de l'association moteur asynchrone – onduleur avec la modulation MLI ont été présentées.

Un modèle mathématique de la machine à induction dont la complexité est réduite par un certain nombre d'hypothèses simplificatrices a été établi. Nous avons utilisé le modèle de Park permettant le changement du système triphasé réel de la machine asynchrone triphasée, en un système biphasé linéaire équivalent et cela afin de faciliter la résolution de simulation et de modélisation.

La modélisation de l'ensemble onduleur-moteur a été réalisée et une étude des différents paramètres de la machine ont été présentés et analysés. Ces résultats sont très satisfaisants. Ils montrent que la vitesse de rotation du moteur asynchrone triphasé alimenté par un onduleur MLI sinus triangulaire est directement liée à la fréquence d'alimentation du moteur.

Le courant statorique et le couple électromagnétique augmentent avec l'introduction de toute charge résistive.

Il sera très intéressant d'étudier et réaliser un régulateur de vitesse ou de couple électromagnétique afin d'obtenir l'asservissement de la vitesse de rotation du moteur à induction triphasé.

### Bibliographie :

[1] : M. Laamayad Tahar, « Commande Optimale d'une Machine asynchrone Apport de La Logique Floue » mémoire Magister, Université de Batna ,2008.

[2] : Rabah BELHADEF Et Bilal BOUTAYA, « Commande Vectorielle et par Logique Floue de la Machine Asynchrone Sans Capteur » mémoire D'Ingénieur d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

[3] : Mémoire de master intitulé « Implémentation d'un observateur étendu pour l'estimation de la vitesse rotorique et du couple de charge de MAS » ; par Mme. Semiani Nesrine et Assal Hadj, université saad dahleb blida, 2019.

[4] BERREZZEK Farid « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » Mémoire de MAGISTER, Université Badji Mokhtar. Annaba 2006.

[5] : Mémoire de master intitulé « Réalisation d'un onduleur de tension triphasé à base d'IGBT » ; par Mr SADIOU Fateh et DEHMECHE Ibrahim, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2020.

[6] : BENDEMMAGH Walid. 30/10/2013\ MEMOIRE Présenté Pour l'obtention du Diplôme.

[7] : Mémoire de master intitulé « Etude de l'association des onduleurs multiniveaux associe à la machine asynchrone » ; par Mr Mansouri Moussa et Yamnaine Mourad, université saad dahleb blida, 1018.

[8] : ZOUGGAR EL WALID. 2007/2008\MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER\ BADJI MOKHTAR- ANNABA.

[9] : B. CHERMAT, « Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[10] : B. KERROUM, « Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction » Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

## Bibliographie

- [11] : mémoire de master intitulé « Etude comparative des différents facteurs de sévérité de défauts dans un moteur asynchrone triphasé » ; par Mr Houioua Moussa, université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [12] : O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006. Français. 17 Octobre 2006.
- [13] : Hakima Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister, Université Mohamed khider Biskra, 2014.
- [14] : BOUKELA Oussama Abdelkader et MEGUENNI Youcef, 'Estimation des défauts statoriques de la machine asynchrone triphasée par le filtre de Kalman « tendu », thèse de master en génie Electrique, université Saad Dahleb blida,2013.
- [15] : BOUBACAR HOUSSEINI « PROTOTYPAGE RAPIDE A BASE DE FPGA D'UN ALGORITHME DE CONTROLE AVANCÉ POUR LE MOTEUR A INDUCTION » L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, 2010.
- [16] : OUNISSI Oussama, 'Implémentation sur un circuit FPGA du filtre de Kalman (FK) pour la machine asynchrone triphasée', thèse de magister en électronique Spécialité Contrôle, université Saad Dahleb Blida, février 2012.
- [17] : R.CASIMIR, 'Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes', thèse de Doctorat, école centrale de LYON, 2003.
- [18] : BERREZZEK Farid, 'Modélisation non linéaire des machines électriques pour la commande et le diagnostic', thèse de Doctorat en sciences commande électrique, université Badji Mokhtar-Annaba ,2016.
- [19] : L.STOYANOV, 'Etude des différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable', thèse de Doctorat en énergétique, Université technique de Sofia et Université de corse pasquale PAOLI, 2011.
- [20] : BOUKAROURA Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur triphasé par l'approche Bond Graph » thèse de magister électrotechnique Université de Sétif [2009].

## Bibliographie

[21] : Mémoire master « Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant » ; par Mr Kheireddine CHETTIH, Université DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE,2015.

[22] : H. Fekhar, ' commande vectorielle d'un moteur asynchrone associé à un onduleur de tension utilisant une nouvelle technique M.L.I ',3 séminaire national de l'électronique, SNAPSEA. 98 (Annaba), pp .255-262, Nov.1998.

[23] : S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.

[24] : T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999).

[25] : mémoire master intitulé « Modélisation et commande d'un onduleur MLI » ; par Mme Adjimi Nadia et Belaidi Wahiba, université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi ,2009.

[26] : mémoire de magister intitulé « Commande en boucle ouverte de la vitesse d'un moteur asynchrone par microprocesseur » ; par Mr Ferdjouni Abdelaziz, Université Saad Dahleb Blida, 1994.

### Annexes :

$$R_s = 1.2\Omega$$

$$R_r = 1.8\Omega$$

$$L_s = 0.1568 \text{ H}$$

$$L_r = 1554 \text{ H}$$

$$F = 1e-3$$

$$J = 0.07 \text{ kg.m}^2$$

$$P = 2$$

$$L_m = 0.15 \text{ H}$$

$$K = 0.35$$

$$L = [L_s \ 0 \ M \ 0; \ 0 \ L_s \ 0 \ M; \ M \ 0 \ L_r \ 0; \ 0 \ M \ 0 \ L_r]$$

$$L1 = \text{inv}(L)$$

$$Z_{11} = [R_s \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ R_s \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ R_s \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ R_s]$$

$$Z_{12} = [0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ M \ 0 \ L_r; \ -M \ 0 \ -L_r \ 0]$$

$$T = [2/3 \ -1/3 \ -1/3; \ -1/3 \ 2/3 \ -1/3; \ -1/3 \ -1/3 \ 2/3]$$

$$F_{pf} = 1000 \text{ Hz}$$

$$V_{df} = 537 \text{ V}$$