

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**la Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**LICENCE ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et de la Technologie**  
**Filière : Génie Électrique**  
**Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

## **Thème**

**Etude de la conversion DC/AC**

**(Les onduleurs)**

**Dirigé par:**  
Mme. Slimane Wissem

**Réalisé par:**  
BEN HAOUA Mohammed Sadok  
BOUGUETTAYA Tarek  
GUERFI Adel

**Soutenu 03-04 Juin 2014**

## شكر وتقدير

الحمد لله رب العالمين "خلق الإنسان علمه البيان" لك الحمد يا أرحم الراحمين ويا  
أحكم الحاكمين ويا قائما بالحق فوق الخلق أجمعين أحمداً بالمنطق واليقين وأصلي وأسلم  
على صفوتك من العالمين محمد طيب القلوب ودواؤها ونور البصائر وشفائها صلى الله  
عليه وسلم وعلى أصحابه الأبرار الطيبين ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين .

نحمد الله على ما أولى من نعم وما وفقنا فيه من عمل ،نحمده ولا نحصي عليه ثناء  
كما أحصى على نفسه عليه توكلنا وإليه أنبنا وعلى الرغم من كل الصعوبات التي واجهتنا إلا  
أن ثمرة جهدنا قد خرجت إلى النور بتوفيق من الله ورعايته فله عظيم الحمد وجزيل الشكر .  
تتقدم بالشكر لكل من ساعدنا من قريب أو بعيد على إنجاز هذه المذكرة وخاصة

الأستاذة المشرفة: " وسام سليمان "

كما توجه بجزيل الشكر لكل طلبة قسم السنة الثالثة علوم وتقنيات مسار مراقبة و

تشخيص الأنظمة الكهربائية .

كما تتقدم بالشكر إلى كل أساتذة ومديري جامعة الوادي وخاصةً معهد العلوم

والتكنولوجيا .

## الإهداء

إلى أعذب وأرق ما في الوجود أمل حياتي، علمتني أن الحياة حب و صبر و صدق  
و كانت شمسا ساطعة ..... أمي الحبيبة

إلى من كان وراء هذا النور جعلني أتخطى عتبات الحياة و غرس في روح  
الطموح و ذاق الحلو و المر من أجل نجاحي و سعادتي ..... أبي العزيز

إلى من أقاسمهم الحياة حلوها و مرها و أخوتي و أخواتي

إلى من أكن لهم أسماء معاني الحب و الاحترام و التقدير إلى كل أفراد

عائلة : بوقطاية ، قرني ، بن حوه ، كبيرهم و صغيرهم

إلى كل من تجمعني بهم صلة المحبة و الإخلاص أعز أصدقائي

إلى حاملي مشعل العلم و الأمل و ساروا بنا على هذا النهج من معلمي الأول

إلى كل طلبة السنة الثالثة هندسة كهربائية تخصص تشخيص و مراقبة الأنظمة

الكهربائية

نهدي ثمرة جهدنا



# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Présentation d'un onduleur</b> .....	<b>04</b>
I-1 Introduction .....	05
I-1-1 Définition .....	05
I-1-2 Le schéma symbolique de l'onduleur .....	05
I-2 Classification des onduleurs.....	05
I-2-1 Onduleur non autonome .....	06
I-2-2 Onduleur autonome .....	06
I-2-2-1 Les onduleurs (autonomes) de tension .....	06
I-2-2-2 Les onduleurs (autonomes) de courants.....	06
I-2-3 Les onduleurs à résonance.....	07
I-3 Types d'onduleurs autonomes de tension.....	07
I-3-1 Les onduleurs monophasés .....	07
I-3-2 Les onduleurs triphasés .....	09
I-4 Les onduleurs multi niveaux .....	09
I-5 Modélisation de l'onduleur de tension.....	09
I-5-1 Description de l'onduleur triphasé .....	09
I-5-2 Modèle de l'onduleur de tension .....	10
I-6 Principe de fonctionnement de l'onduleur de tension .....	12
<b>Chapitre II : Les différentes stratégies de modulation</b> .....	<b>19</b>
II-1 Introduction .....	20
II-2 La commande en pleine onde (180°) .....	20
II-2-1 Mode I: $wt = [0-60^\circ]$ .....	22
II-2-2 Mode II: $wt = [60^\circ-120^\circ]$ .....	22
II-2-3 Mode III: $wt = [120^\circ-180^\circ]$ .....	23
II-3 Commande par hystérésis .....	25
II-4 MLI "Sinus Triangle.....	27
III-4-1-Schéma bloc de la commande MLI .....	29
III-4-2-Schéma bloc de l'onduleur de tension triphasé .....	30
II-5 Conclusion .....	30

---

---

<b>Chapitre III : Simulation et interprétations des résultats</b> .....	<b>31</b>
III-1 Introduction .....	<b>32</b>
. III -2-Schéma bloc alimentation triphasé alternative MAS.....	<b>33</b>
III-2-1- Simulation .....	<b>34</b>
III-2-1-a- Interprétations .....	<b>34</b>
III-3- Schéma bloc MLI+onduleur+MAS (Matrice Modélisation) .....	<b>36</b>
III-3-1- Résultats de simulation .....	<b>36</b>
III-3-2-Interpretation des résultats.....	<b>38</b>
III-4-Conclusion.....	<b>38</b>
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>39</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>40</b>

## Paramètre utilisé :

Résistance du stator	:	$R_s = 11.98\Omega.$
Résistance du rotor	:	$R_r = 0.904\Omega.$
Inductance du stator	:	$L_s = 0.414H.$
Inductance du rotor	:	$L_r = 0.0556H.$
Mutuelle inductance	:	$M = 0.1260H.$
Moment d'inertie	:	$J = 0.01 \text{ kgm}^2.$
Coefficient de frottement	:	$f = 0.00 \text{ SI}.$
Nombre de paire de pole	:	$P = 2.$
Axes fixés au stator	:	$(\alpha, \beta)$
Pulsation statorique	:	$\omega_s$
La fréquence	:	$F = 50 \text{ HZ}$
La vitesse	:	$\omega_s = 2 * \pi * F;$

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

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

$$R11 = [R_s \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ R_s \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ R_r \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ R_r]$$

$$R22 = [0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; \ 0 \ M \ 0 \ L_r; \ -M \ 0 \ -L_r \ 0]$$

$$R33 = [0 \ L_s \ 0 \ M; \ -L_s \ 0 \ -M \ 0; \ 0 \ M \ 0 \ L_r; \ -M \ 0 \ -L_r \ 0]$$

# Introduction Générale

Une des branches de l'électronique en pleine expansion est l'électronique de puissance qui traite et contrôle l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications. On distingue fondamentalement les conversions suivantes : alternatif/ continu, continu/ alternatif, alternatif/alternatif, continu/continu et la conversion alternatif/continu/alternatif ; c'est le cas particulier des applications pour des alimentations ininterrompues.

L'électronique de puissance a pour avantages :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par une réduction des masses et des volumes ainsi que par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Une machine à courant alternatif d'une part (de type synchrone ou asynchrone) couplée au réseau permettait de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe. Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie. Le développement des composants de puissance au milieu du 20ème siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes. La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer : faible coût ; puissances commutées élevées ; facilité de contrôle.

La source d'entrée du convertisseur statique peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants ainsi que leur fréquence.

Dans ce travail, on s'intéresse à la conversion continu/alternatif, cependant, nous utiliserons une des commandes que nous avons implantées pour s'assurer de sa fonctionnalité.

Le but de ce travail serait de faire une synthèse de la technique utilisée pour la commande des convertisseurs monophasé et triphasé, la commande de largeur d'impulsion (MLI) pour les raisons suivantes ; elle permet à l'onduleur de :

- Générer une onde de sortie très proche de la forme idéale.
- D'obtenir le contrôle linéaire de l'amplitude de la tension et du courant de sortie avec la commande des interrupteurs.

### Familles de convertisseurs statiques :

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous):

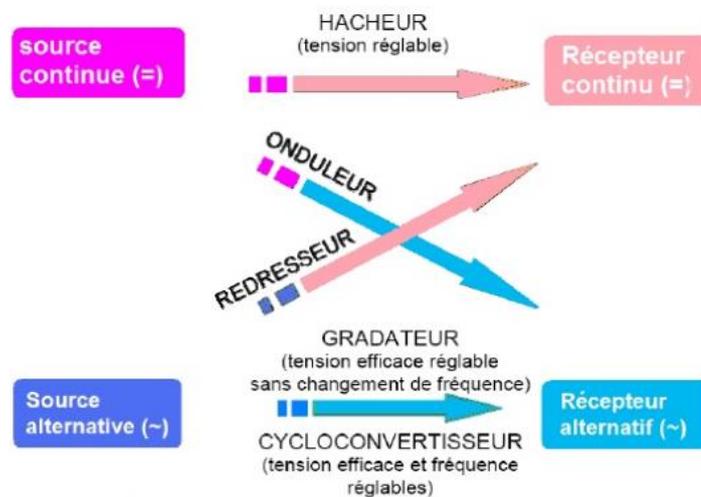


Figure (1) : Familles des convertisseurs statiques

Une notion importante en électronique de puissance comme en électrotechnique est la notion de réversibilité. Un convertisseur statique d'énergie est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter dans les deux sens (source → récepteur ou récepteur → source) de manière naturelle ou commandée

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La commande de l'onduleur se fait de différentes façons l'onde résultante est proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique.

Notre travail se compose d'une introduction générale, conclusion générale et de trois chapitres. Dans le premier chapitre nous avons exposé les différents types des onduleurs, leurs principes de fonctionnement ainsi que la modélisation d'un onduleur de tension.

Le deuxième chapitre présente quelques types de commande des onduleurs précisément la commande MLI la plus simple (sinus triangle) et son schémas bloc ainsi que le schéma blocs d'un onduleur commandé par MLI.

Le dernier chapitre présente l'alimentation d'une machine asynchrone par une source triphasée équilibrée d'une part et d'autre part l'alimentation de la même machine avec un onduleur MLI pour mettre en valeur le contrôle de l'alimentation (tension d'alimentation) de la machine asynchrone qui se fait par l'intermédiaire d'un onduleur mis à part son type de commande.

# CHAPITRE I

## Présentation d'un Onduleur

---



---

## I-1- INTRODUCTION :

Le moteur asynchrone est utilisé le plus souvent pour des entraînements à vitesse variable. Les variateurs de ces moteurs sont construits à base de convertisseurs de fréquence. Parmi ces convertisseurs de fréquence l'onduleur autonome qui est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative.

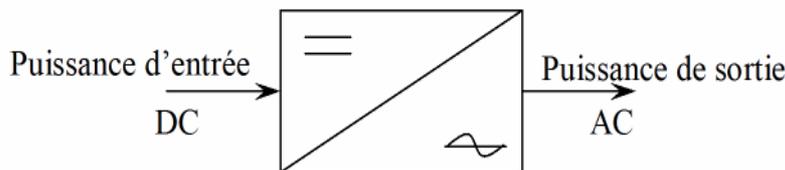
Dans ce chapitre nous allons exposer quelques types d'onduleur, leur principe de fonctionnement, la modélisation de l'onduleur de tension triphasé.

### I-1-1- Définition :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie.

Dans un onduleur non autonome (ou assisté) relié à un réseau alternatif, c'est celui-ci qui impose la fréquence de ces onduleurs, ils feront l'objet du prochain chapitre. C'est la commande des semi-conducteurs qui impose la fréquence des grandeurs alternatives.[1]

### I1-2- Schéma symbolique de l'onduleur :



Convertisseur continu (DC)-alternatif (AC)

**Figure I.1.** Schéma de principe de l'onduleur

## I-2- CLASSIFICATION DES ONDULEURS

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue -alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Une première classification peut être faite en distinguant onduleurs non autonome et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleur, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge «ou encore onduleur à résonance» [2].

---

---

### **I-2-1- Onduleurs 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 en onduleur des redresseur. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif [3].

### **I-2-2- Onduleur autonome**

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

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer:

- les onduleurs de tension.
- les onduleurs de courant.

#### **I-2-2-1- Onduleurs (autonomes) de tension**

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable),la tension «  $u$  » n'est pas affecté par les variations du courant «  $i$  » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie «  $i'$  » et donc le courant à l'entrée «  $i$  » dépendent de la charge placée du coté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branché entre les bornes de sortie.

#### **I-2-2-2- Onduleurs (autonome) de courants**

Un onduleur de courant ( souvent appelé commutateur de courant ) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant «  $i$  » qui la traverse ne peut être affecté par le variations de la tension «  $u$  » à ses bornes [4].

**I-2-3- Onduleurs à résonance**

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [5].

**I-3- TYPES D'ONDULEURS AUTONOMES DE TENSION****I-3-1- Onduleurs monophasés**

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continu, ce la correspond à:

-l'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull (figure (I.2)).

-l'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont (figure (I.3)).

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont (figure (I.4)) [4].

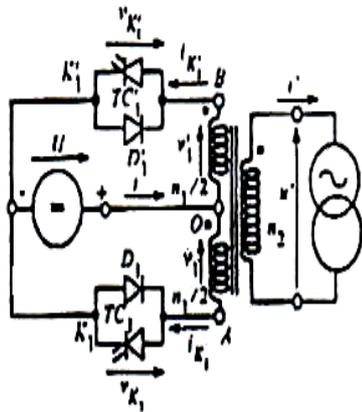


Figure I.2.1 Onduleur monophasé avec un transformateur de sortie à point milieu

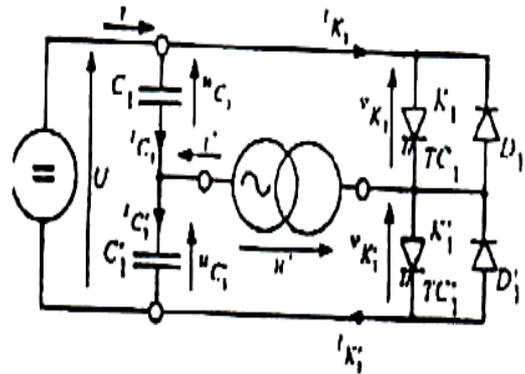


Figure I.2.2 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif

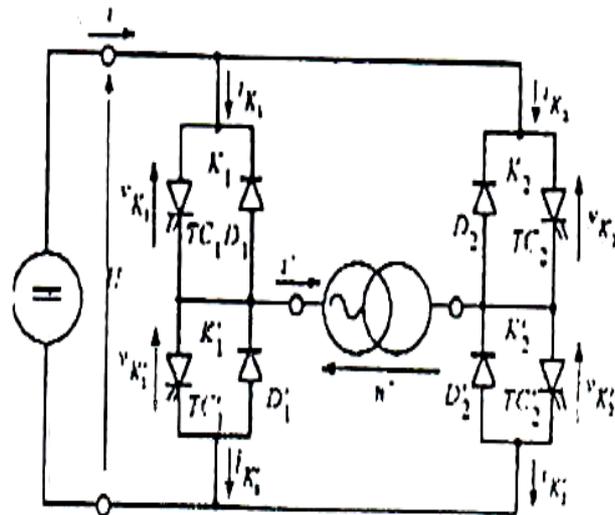


Figure I.3 Onduleur monophasé en pont

---

---

### I-3-2- Onduleurs triphasés

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs (figure (II.4)).

### I-4- ONDULEURS MULTI NIVEAUX

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statique au-delà des limites des semi – conducteurs. Pour les réaliser ou doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif) [4], on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et des associer en le superposant ou en les mettant en cascade .cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsion (MLI), [6].

Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (>5000 tr/mn).

Pour le cas de notre mémoire, on a mis en évidence un onduleur de tension autonome triphasé.

### I-5- MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION

#### I-5-1- Description de l'onduleur triphasé

La figure I.4 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 [5].

Chaque interrupteur est formé d'un semi-conducteur contrôlable (IGBT, GTO,.....etc.) et une diode connectés en antiparallèles, les six diodes de roue libre assurent la protection des transistors et la récupération de l'énergie vers la source.

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 est équilibrée liée en étoile avec neutre isolé.

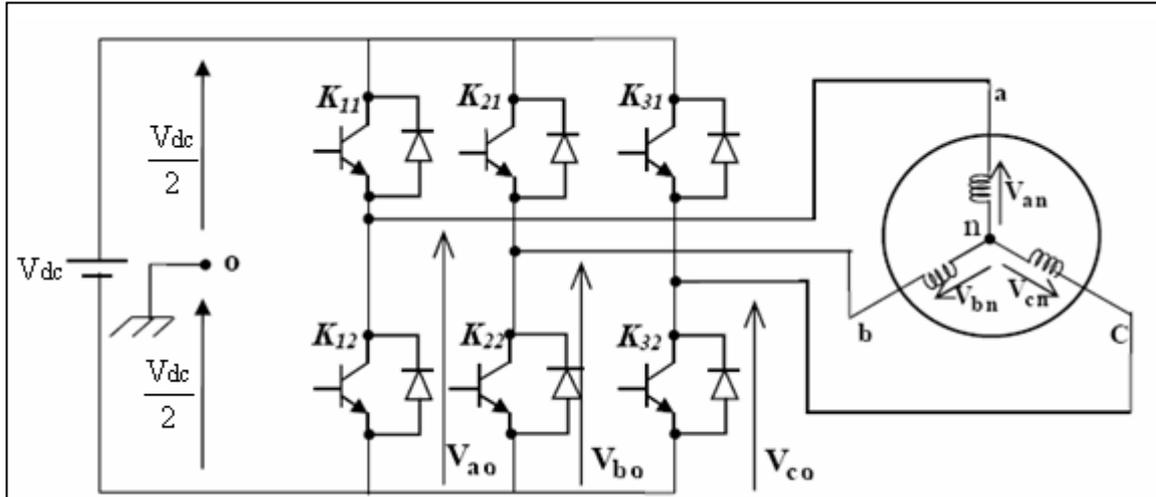


Figure (I-4) Onduleur de tension triphasé.

### I-5-2- Modèle de l'onduleur de tension

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

Interrupteurs parfaits : La commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.[7]

Sources parfaites : La tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Ainsi, comme les grandeurs de commande agissent sur les interrupteurs commandables.

Les ordres de commande de l'onduleur sont transmis aux trois bras par l'intermédiaire des signaux de commande  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . La convention adoptée pour le fonctionnement du bras  $i$  est la suivante:

Si  $C_i = 1$  : l'interrupteur du haut  $K_i$  est fermé et l'interrupteur de bas  $K_{i+3}$  est ouvert. Si  $C_i = 0$  : l'interrupteur du haut  $K_i$  est ouvert et l'interrupteur de bas  $K_{i+3}$  est fermé.

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 :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (\text{I-2})$$

$u_{ao}$ ,  $u_{bo}$  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:

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad (\text{I-3})$$

$u_{an}$ ,  $u_{bn}$  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:

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (\text{I-4})$$

La substitution de (I-4) dans (I-3) aboutit à :

$$u_{no} = \frac{1}{3} \cdot (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (\text{I-5})$$

En remplaçant (I-5) dans (I-3), on obtient :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad (\text{I-6})$$

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

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_o}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_o}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_o}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{I-7})$$

### I-6- Principe de fonctionnement de l'onduleur de tension :

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

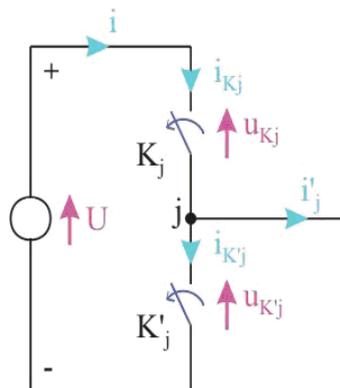
- Ils sont autonomes, lorsqu'ils ne nécessitent pas la présence du réseau alternatif.

Ils sont « statiques » car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs).[8]

On considère les onduleurs en pont alimentant

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

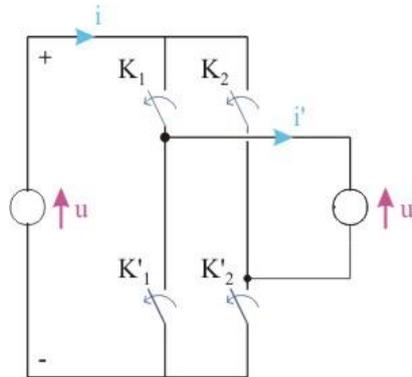
Dans ces onduleurs, chaque borne d'accès de la charge est reliée à deux interrupteurs à semi-conducteurs, l'un permettant de la connecter à la borne positive de la source continue, l'autre à la borne négative de cette source Figure (I-5).[8]



**Fig. (I-5):** Schéma représentatif d'un bras (*j*) de l'onduleur

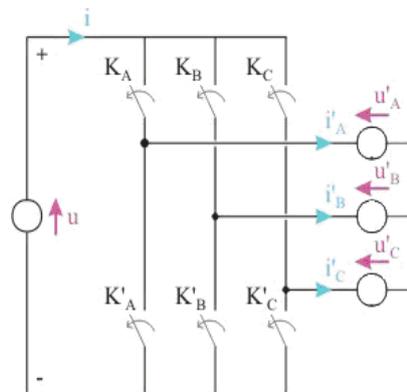
Les interrupteurs  $K_j$  et  $K'_j$  forment un bras de l'onduleur.

- Un onduleur monophasé en pont comporte deux bras Fig. (I-6).



**Fig. (I-6):** Un onduleur monophasé

- Un onduleur triphasé en pont comporte trois bras Figure (I-7).



**Fig. (I-7):** 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** Figure. (I-8).

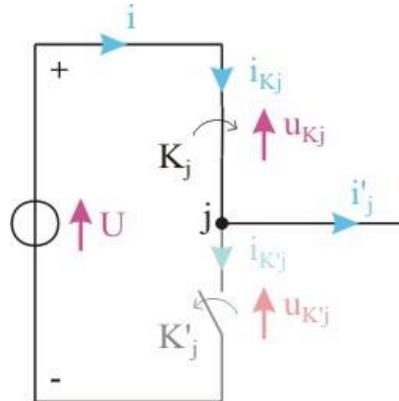


Figure (I- 8a): L'interrupteur  $K'_j$  est ouvert, l'interrupteur  $K_j$  est fermé

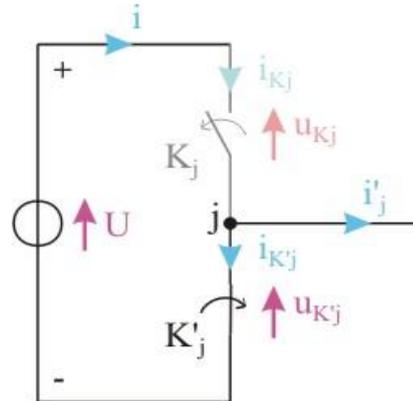


Figure (I- 8b): L'interrupteur  $K_j$  est ouvert, l'interrupteur  $K'_j$  est fermé

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.[8]

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 Figure. (I-9).[8]

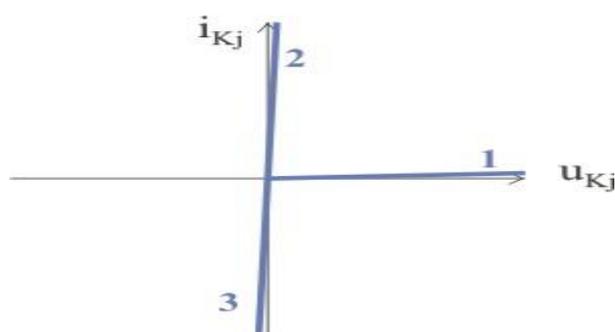


Figure (I-9a): La caractéristique statique d'un transistor

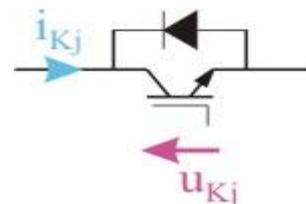
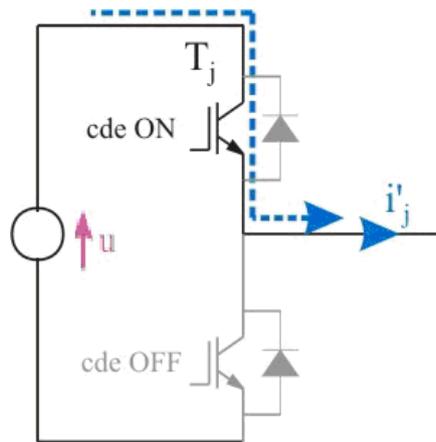


Figure (I-9b): Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode

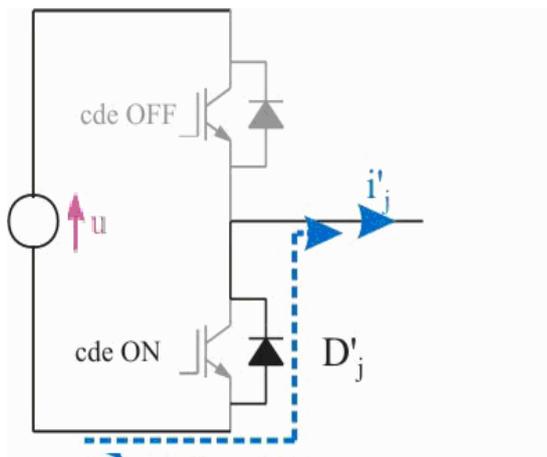
- La branche 1 correspond à l'état bloquant du transistor et de la diode.
- La branche 2 correspond à la conduction du transistor.

- 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 Figure. (I- 10).



**Figure (I-10):** 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 Figure (I-11).



**Figure (I-11):**  $K_j$  est ON et la diode  $D'_j$  est conductrice

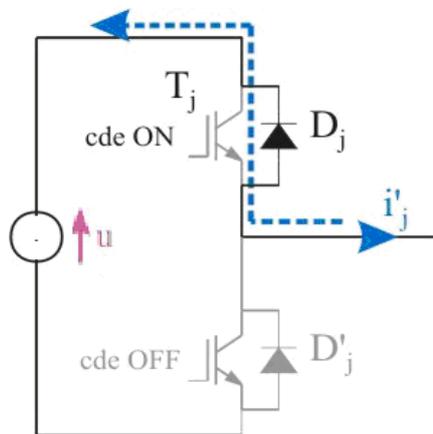
La commutation de  $K_j$  *ON* ( $T_j$  conducteur) à  $K_j$  *ON* ( $D'_j$  conductrice) s'opère en commandant le blocage de  $T_j$ .

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  $i_j < 0$**

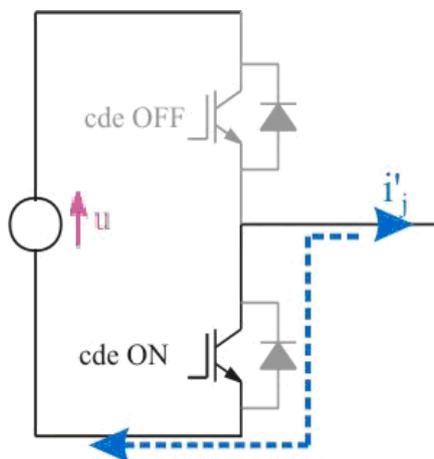
Si  $i_j$  est négatif

- lorsque  $K_j$  est *ON*, c'est la diode  $D_j$  qui est conductrice Figure (I- 12).



**Figure (I-12):**  $K_j$  est *ON* et la diode  $D_j$  est conductrice

lorsque  $K_j$  est *ON*, c'est le transistor  $T'_j$  qui est conducteur Figure (I-13).



**Figure (I-13):**  $K_j$  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  $U$ .

Pour passer de  $K_j ON, K_j OFF$  à  $K_j OFF, K_j ON$ , on commande le blocage de  $T_j$ , puis après un délai  $t_d$  l'amorçage de  $T_j$ . [8]

### **I-7- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les onduleurs, certains types de ceux-ci et le principe de fonctionnement et la modélisation d'un onduleur de tension triphasé. Dans le chapitre suivant nous allons présenter quelques stratégies de commande des onduleurs de tension triphasés : la commande à  $180^\circ$ , par hystérésis et par modulation de la largeur d'impulsion (MLI). Nous avons choisis l'application de cette dernière (par MLI) à cause de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre.

Le schéma blocs de l'onduleur et sa commande choisis seront donnés sur deux figures séparées.

# CHAPITRE II

## **Différentes Stratégies de Commande, Commande MLI**

## II-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 choix d'une stratégie de commande dépend du type de charge à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme.[8]

## II-2 Commande en pleine onde (180°)

Il nécessaire de décrire la commande en pleine onde (180°), cela peut nous facilité la compréhension des autres méthodes de commande tel la MLI hystérésis et MLI sinusoïdale qui seront le but de notre étude.

Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°), trois transistors restent en conduction à n'importe quel instant.

Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode de durée 60°, les transistors sont numérotés de la manière dans laquelle ils reçoivent les séquences de déplace l'un de l'autre de 60°.[9]

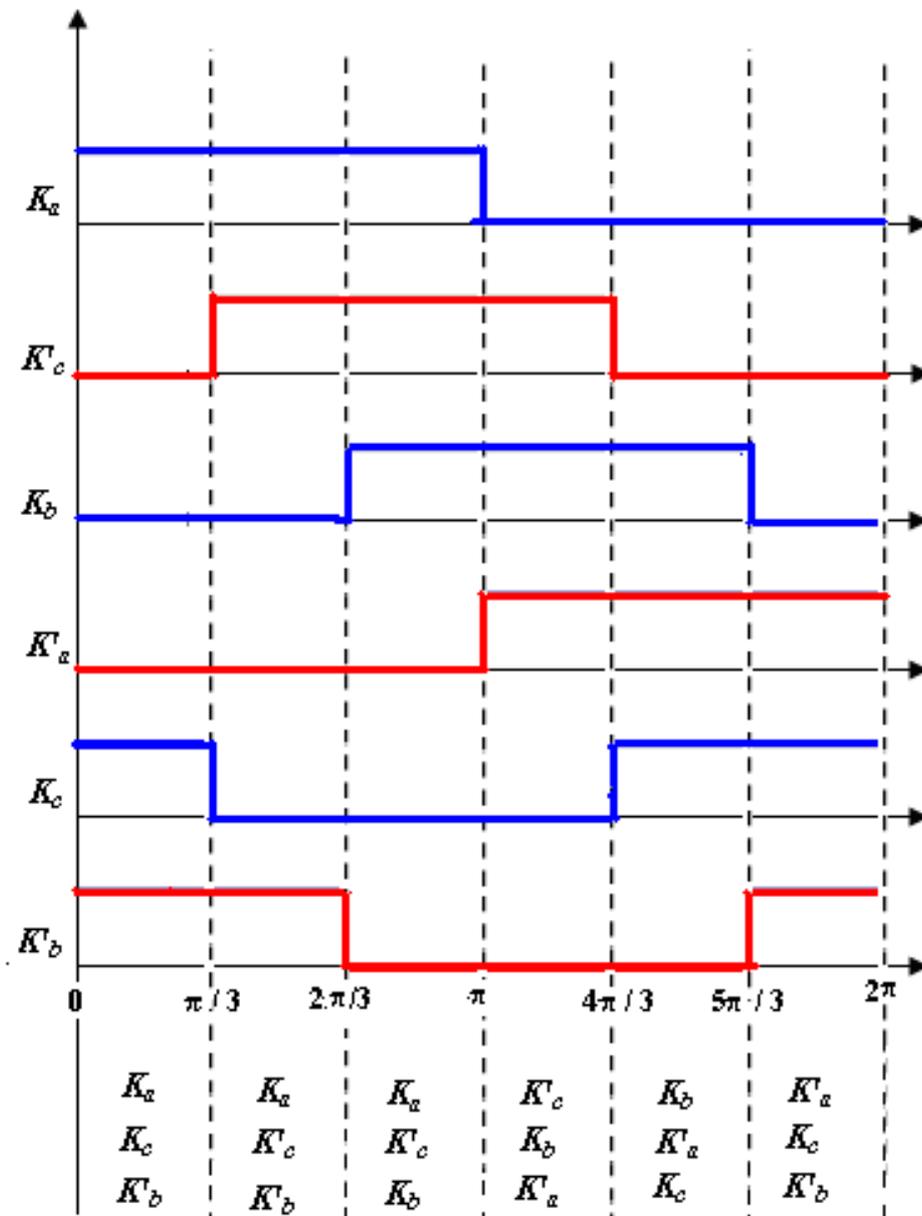
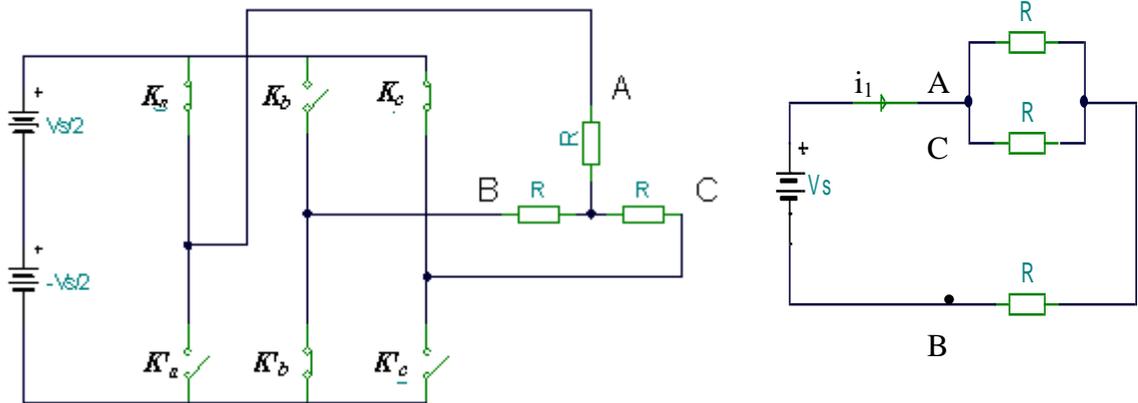


Fig. (II-1): Les signaux de commande en pleine onde (180°)

**II-2-1 Mode I:  $wt = [0-60^\circ]$**

Les transistors en conduction sont :  $K_a, K_c, K'_b$ .



**Fig.(II-2) :**  $K_a, K_c, K'_b$  en conduction

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

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

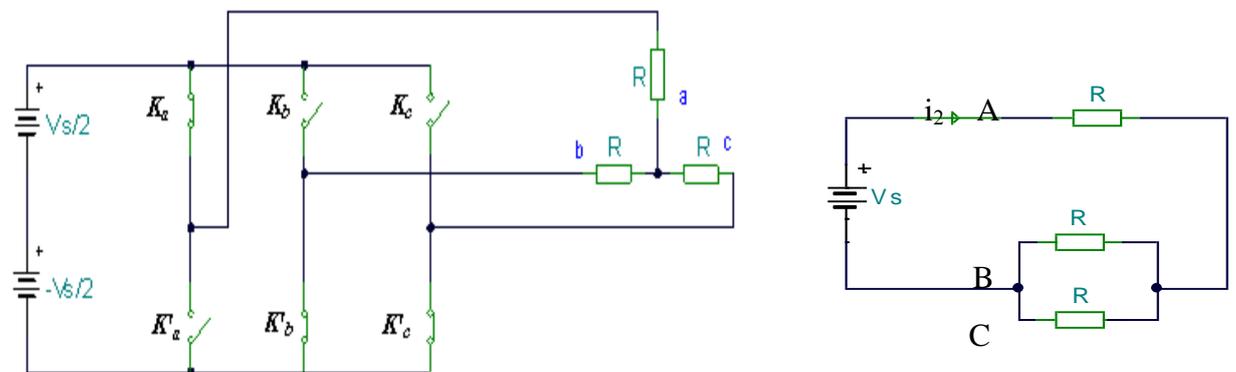
$$i_1 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$$

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

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

**II-2-2 Mode II:  $wt = [60^\circ-120^\circ]$**

Les transistors en conduction sont :  $K_a, K'_c, K'_b$ .



**Fig (II.3) :**  $K_a, K'_c, K'_b$  en conduction

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

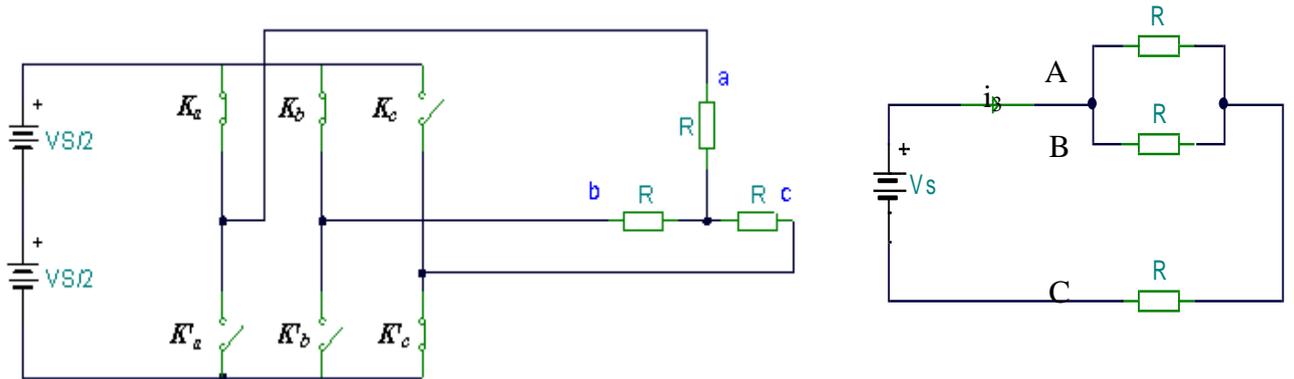
$$i_2 = V_s / R_{eq} = 2V_s / 3R$$

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

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

**II-2-3 Mode III:  $wt = [120^\circ - 180^\circ]$**

Les transistors en conduction sont :  $K_a, K'_c, K_b$ .



**Fig.(II.4) :**  $K_a, K'_c, K_b$  en conduction

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

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

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

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

Après déterminer les tensions simples  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$  montrés dans la Fig. (II-5) la tension instantanée composée  $V_{ab}$  est exprimé en série de Fourier sachant que  $V_{ab}$  est déplacé de  $\pi/6$ , les termes  $\cos nwt = 0 \rightarrow an = 0$  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 :

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

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

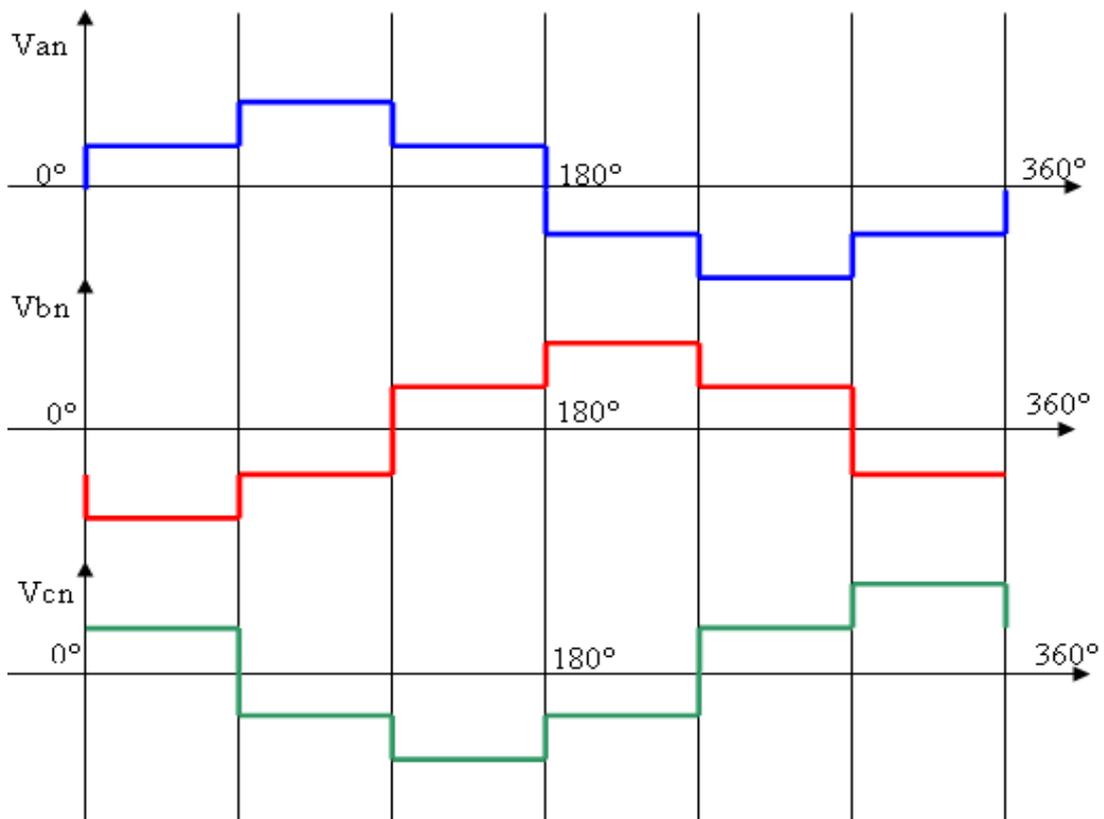
$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \cos n\pi / 6 \sin n(\omega t + \pi / 6)$$

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

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

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

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

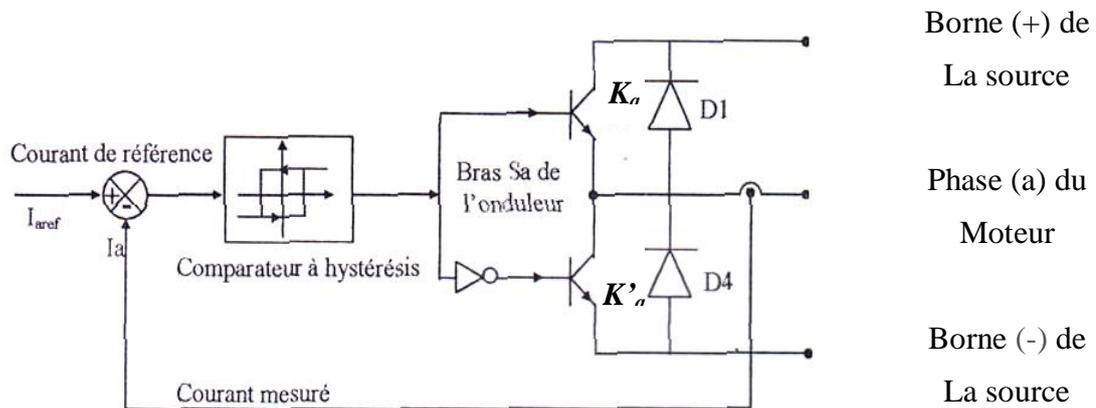


**Fig. (II-5):** Tensions de sortie de l'onduleur à commande 180°

### II-3 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.[10].

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. II-9), 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. (II-6)).[11]



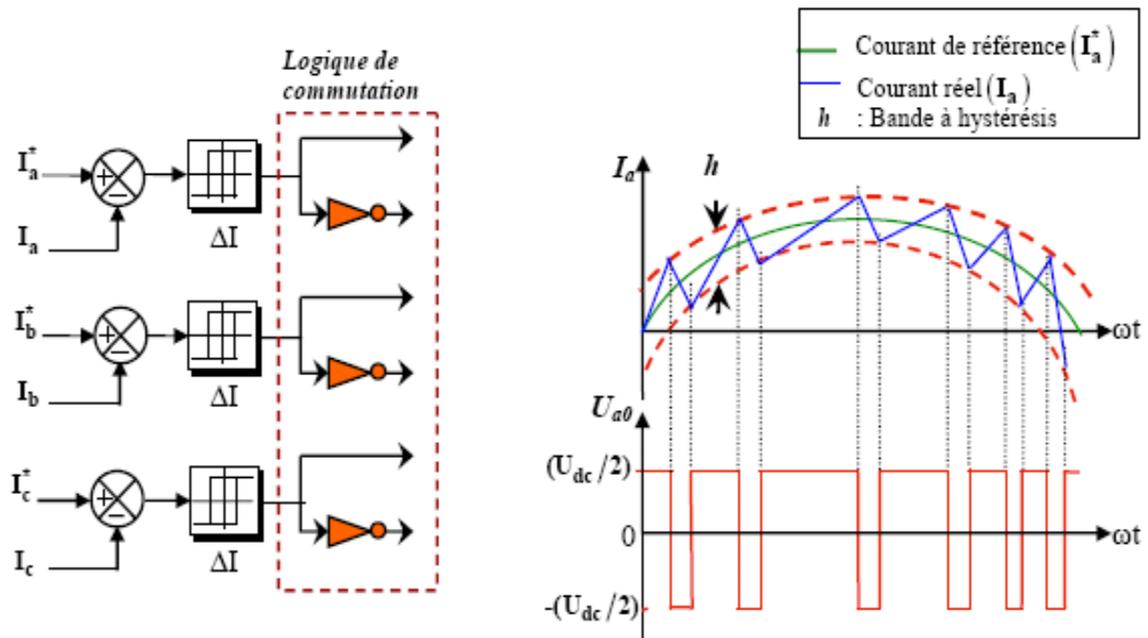
**Fig. (II-6).** Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur

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 :

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

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

$$K_i = -K_{i-1} \quad \text{si} \quad I_i^* = I_i.$$



**Fig. (II-7):** Commande par Hystérésis

Tels que :

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

$I_i^*$  ( $i = a, b, c$ ) sont les courants de références issus des circuits de commande des trois bras.

$h$  : est la bande d'hystérésis, elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.[11]

#### II-4 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. (II-8).[12]

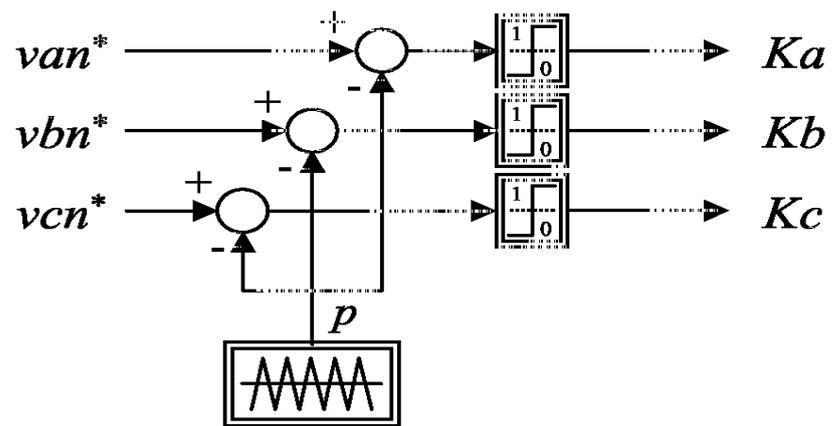


Fig. (II-8): Principe de l'MLI Sinus-Triangle

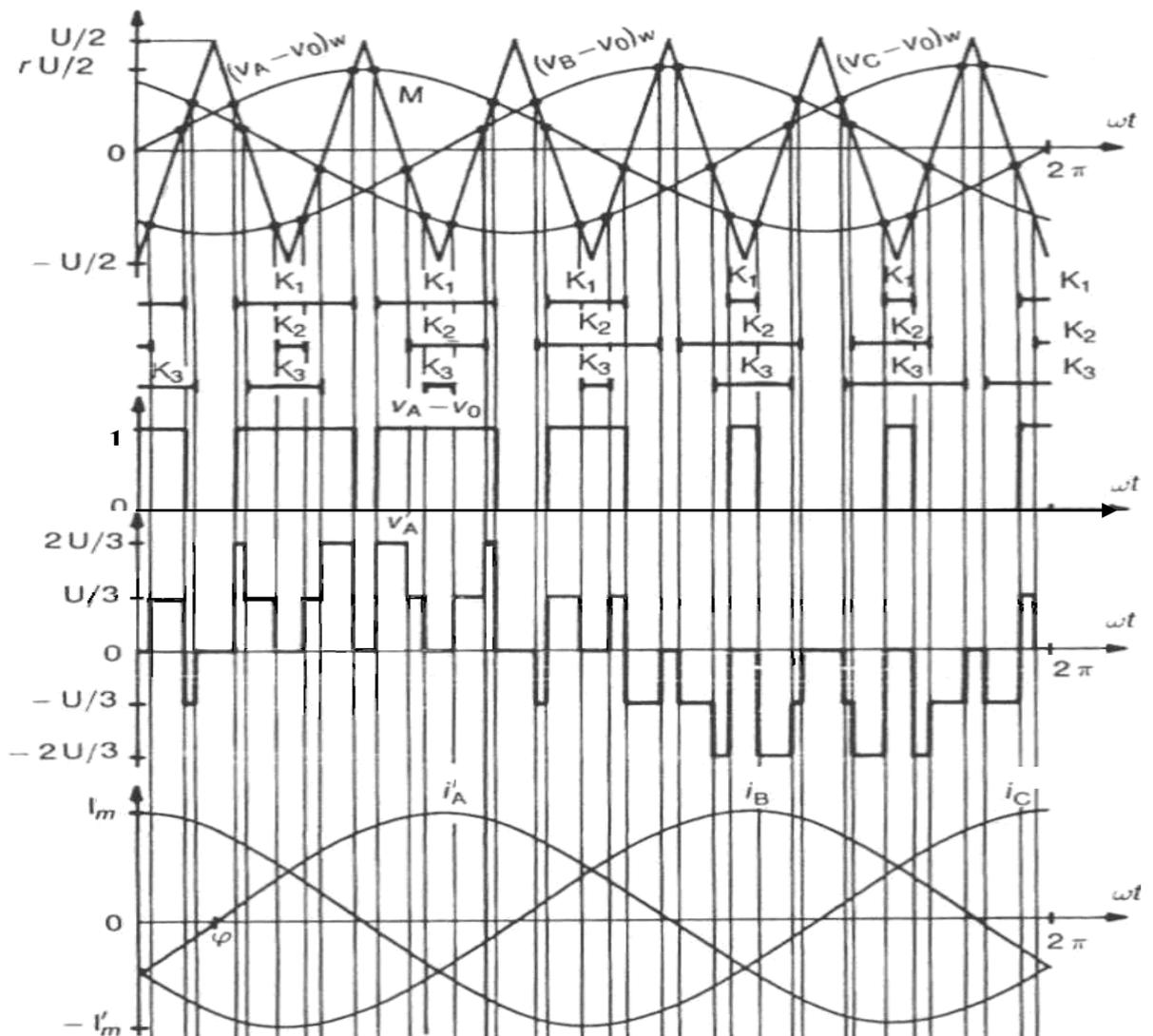


Fig. (II-9): Création des signaux des impulsions et des tensions

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.[8]

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:

$$r = \frac{A_r}{A_m}$$

Où:

$A_r$  : la valeur crête de la tension de référence

$A_m$  : la valeur crête de la tension de commande

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

III-4-1-Schéma bloc de la commande MLI

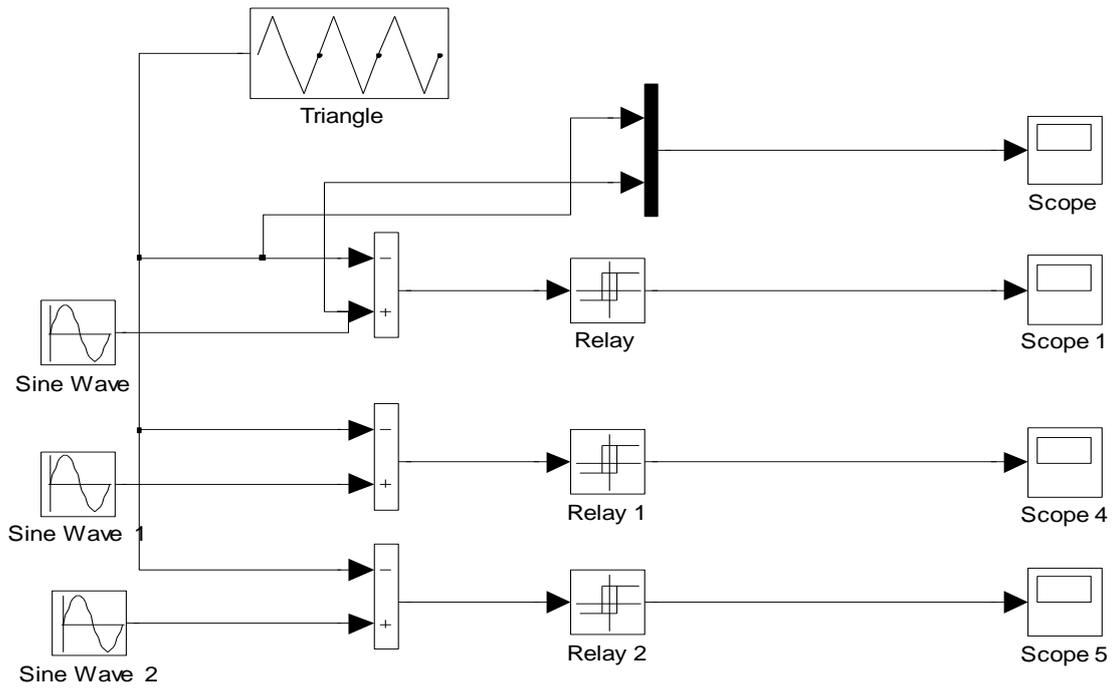


Fig. (II-10): Schéma bloc de la commande MLI

III-4-2-Schéma bloc de l'onduleur de tension triphasé :

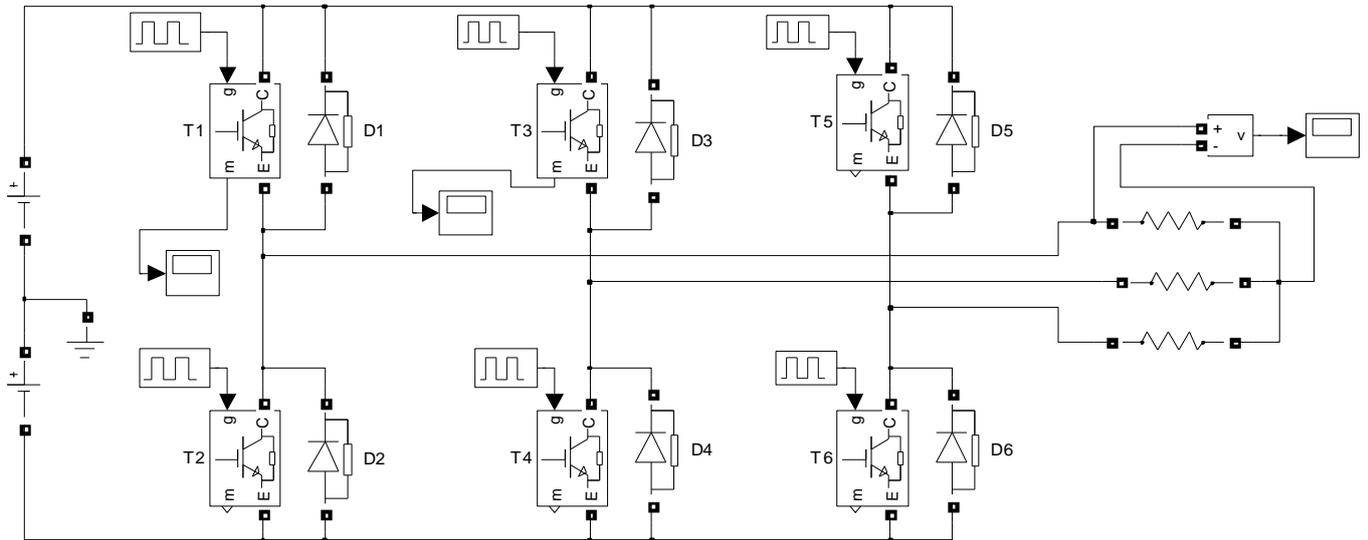


Fig.(II-11) : Schéma bloc de l'onduleur triphasé

---

---

**II-5 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre, quelques stratégies de commande de l'onduleur, en pleine onde ( $180^\circ$ ), hystérésis et MLI sinusoïdale.

Basant sur la théorie la commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable, en pleine onde ( $180^\circ$ ) les tensions obtenues sont très riches en harmonique ce qui provoque l'échauffement de la charge (moteur).

Le schéma blocs de la MLI et de l'onduleur à MLI sinus triangle ont été donnés dans ce chapitre en déterminant les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément.

# CHAPITRE III

## **Simulation et Interprétations des Résultats**

---

---

### III-1 Introduction

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques représentent les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'imputions (MLI) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs.

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La M.L.I permet de se rapprocher du signal désiré. Cependant, cette technique est imparfaite. Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Foucault). Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple ; des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques. Elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Il faut donc minimiser ces harmoniques.

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. Cette technique exige une commande séparée pour chacune des phases de l'onduleur.

Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse de la technique de commande de l'onduleur par la simulation numérique à l'aide de **MATLAB-SIMULINK**.

III-2-Schéma bloc alimentation triphasé alternative MAS

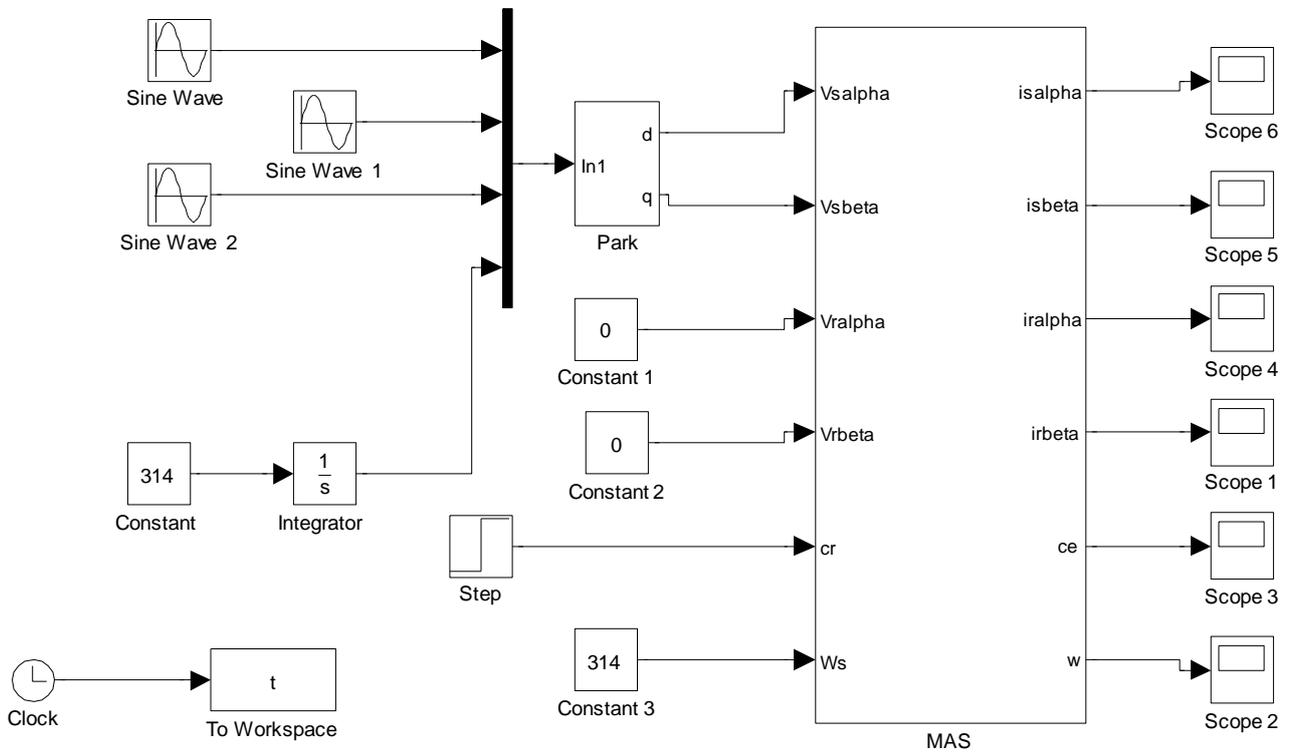
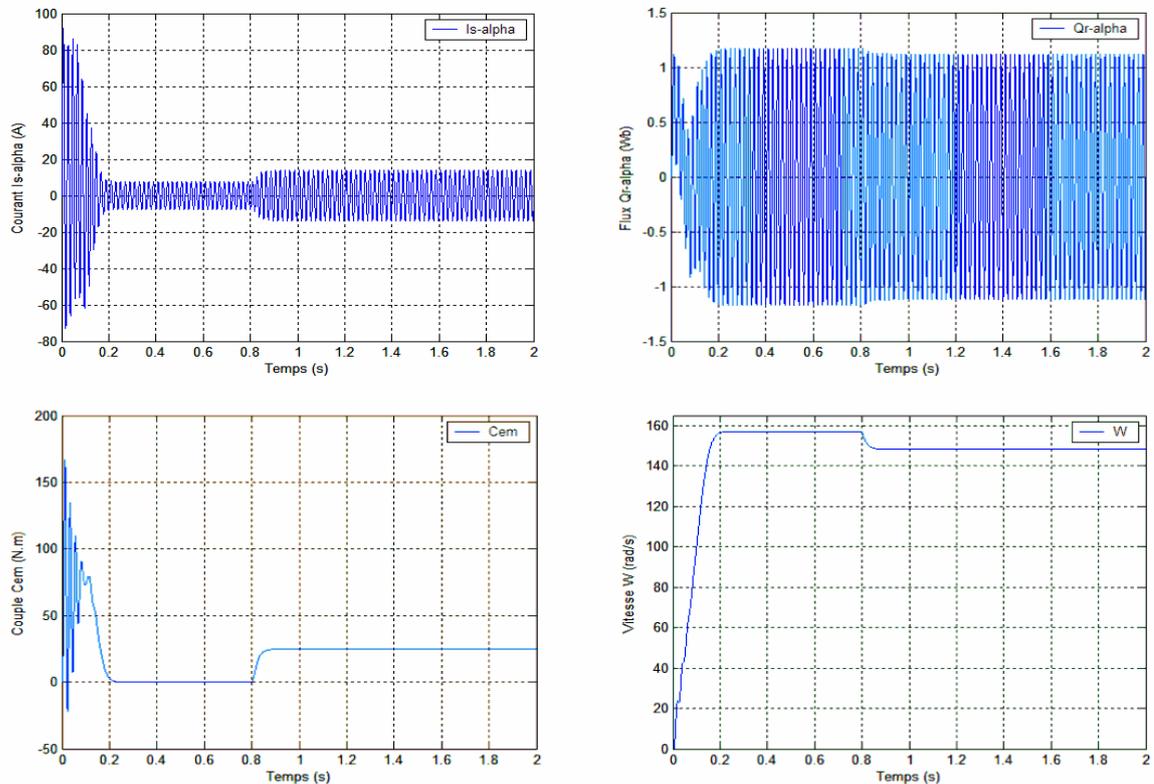


Fig.(II-1) : Schéma bloc d'une MAS alimentée par une source de tension alternative triphasée équilibrée

### III-2-1- Simulation

Le moteur est alimenté directement par le réseau 220/380, 50HZ, à vide jusqu'à  $t=0.8s$  où nous appliquons la charge nominale ( $C_r=25\text{ Nm}$ ).

**Pour le système d'axe ( $\alpha\beta$ ) :**



**Fig. (II-2) :** Evolution du modèle en tension de la MAS avec ( $C_r=25\text{N.m}$  à  $t=0.8\text{ s}$ )

#### III-2-1-a- Interprétations

##### -Les courants statoriques :

Le courant statorique présente des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de 90A jusqu'à 0.20s; après ce temps l'amplitude de ces oscillations est diminuée jusqu'à 8A.

A l'instant  $t= 0.8s$  nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ( $C_r=C_n=25\text{N.m}$ ), nous constatons que le courant statorique évolue suivant la charge appliquée à l'arbre du moteur.

---

---

- **Flux rotorique :**

Au premier instant le flux rotorique présente des dépassements excessifs de faible amplitude mais ils disparaissent au bout de quelques alternances et obtient une forme sinusoïdale d'amplitude constante.

A l'instant  $t = 0.8s$  nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ( $C_r = C_n = 25N.m$ ), nous constatons la l'augmentation du flux durant l'application de la charge ce qui prouve le fort couplage entre le flux et le couple électromagnétique.

- **Couple électromagnétique:**

La courbe du couple électromagnétique présente au premier instant de démarrage une pulsation très importante; après 0.20s le couple tend vers Zéro.

A l'instant  $t = 0.8s$  nous avons appliqué à l'arbre de la machine asynchrone un couple résistant ( $C_r = C_n = 25N.m$ ) nous constatons que le couple électromagnétique rejoint, après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant ( $C_r = 25 N.m$ ) appliqué.

- **Vitesse rotorique:**

La courbe de la vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.21s La vitesse rotorique s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

A l'instant  $t = 0.8$  : l'application de la charge nominale se poursuit d'une décroissance de la vitesse rotorique qui se traduit par un glissement.

III-3-Schéma bloc MLI+onduleur+MAS (Matrice Modélisation)

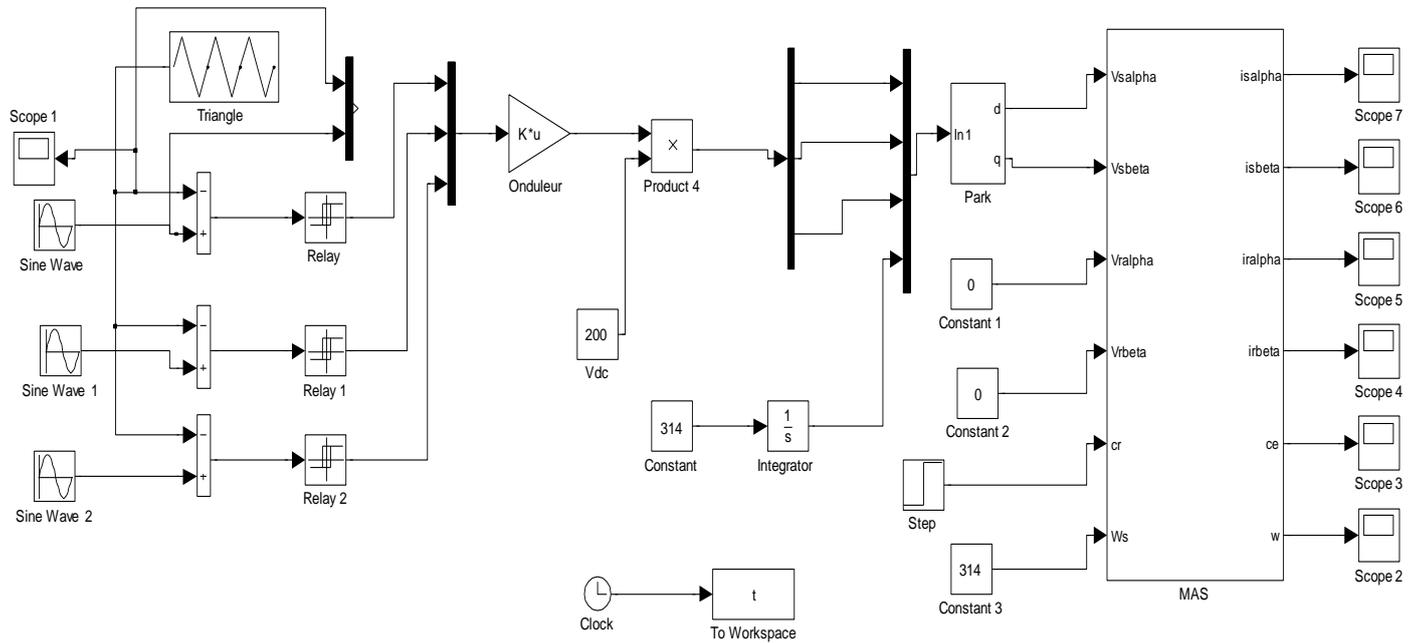
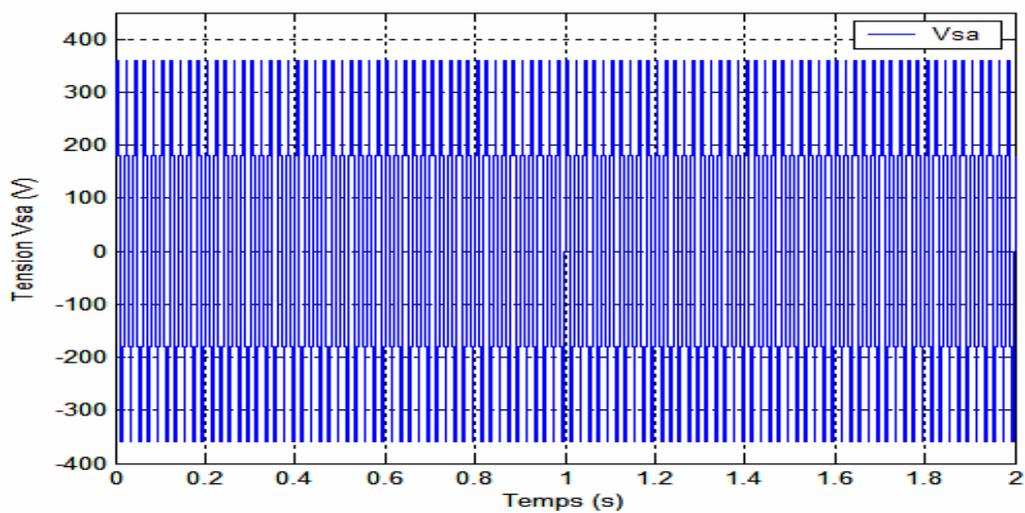
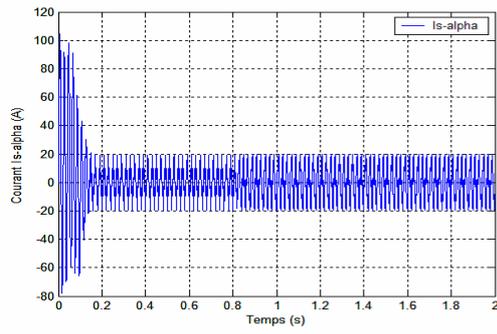


Fig.(II-3) : Schéma bloc MLI+onduleur+MAS (Matrice Modélisation)

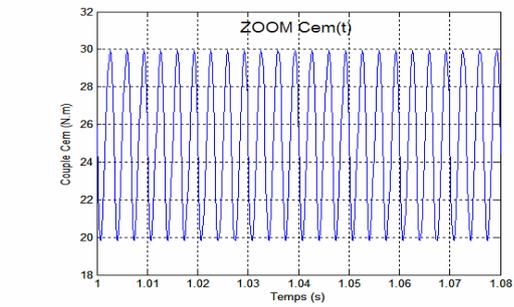
III-3-1- Résultats desimulation



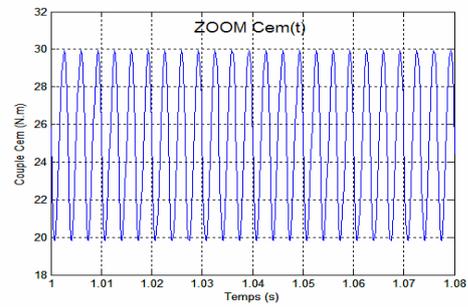
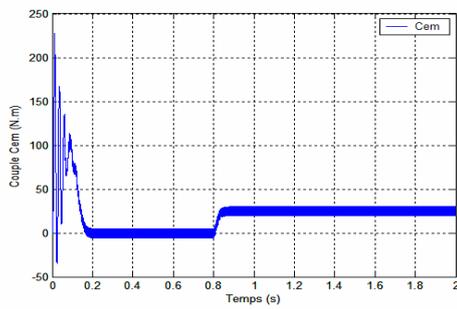
(a)



(b)



(c)



(d)

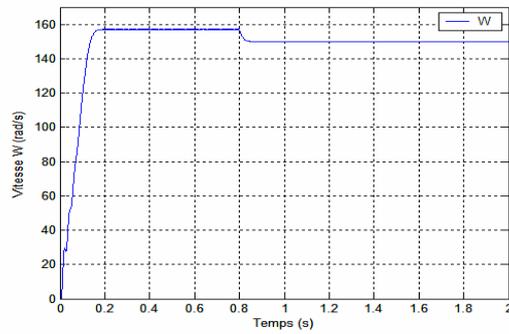


Fig. (III-4) : Evolution de l'association MAS-Onduleur MLI

---

---

### III-3-2-Interprétation des résultats

Les premières remarques sont : les temps de réponse de la vitesse ainsi que le couple pour une MAS alimenté par un réseau triphasé sont importants par rapport à celle alimenté par un onduleur de tension à cause d'une diminution de la valeur efficace de la tension qui alimente la machine.

La vitesse en régime permanent se stabilise à une valeur proche de la vitesse du synchronisme.

Le cas de l'alimentation avec un onduleur est exactement comme dans le cas de la MAS alimentée directement par le réseau triphasé seulement que la réponse est plus lente.

La forme du courant statorique est presque la même que celle dans le cas sans onduleur sauf qu'ici les valeurs maximales ont diminuées.

On note que la variation de la fréquence de commutation permet d'augmenter les pertes joules ce qui provoque l'échauffement des composants de puissance.

### III-4-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du moteur asynchrone alimenté par une source de tension sinusoïdal triphasée et équilibrée à fréquence constante établi sous des hypothèses simplificatrices. Après, nous avons utilisé la transformation du Park pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation.

D'autre part nous avons aussi présenté l'alimentation de la machine asynchrone avec un onduleur MLI triphasé avec les résultats de simulation.

Les résultats obtenus par simulation qui montrent que l'alimentation de la MAS par un onduleur à MLI permettent le contrôle, qui est impossible dans le premier cas (alimentation de la machine par une source de tension sinusoïdal triphasée), de la tension d'alimentation de la machine.

# Conclusion Générale

Notre 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 la simulation à MLI sinusoïdale triangulaire. Le courant à la sortie de l'onduleur moins riche en harmoniques et plus proche de la forme sinusoïdale comparé aux autres types de commande (basé sur la littérature).

Ce travail constitué de trois chapitres met en œuvre l'importance des convertisseurs statiques basés sur les interrupteurs semi-conducteurs ; dans notre cas l'importance des onduleurs pour la variation et le contrôle de l'alimentation alternative sinusoïdale pour l'alimentation des charges par exemple une machine asynchrone.

La commande choisie est la commande MLI par raison de sa simplicité de conception et la facilité de sa mise en œuvre. Les résultats de simulation ont été présentés et discutés dans le dernier chapitre.

Dans un travail future, la comparaison entre les différentes stratégies de commande des onduleurs de tension triphasés semble abordable, aussi que l'application de différents types de commande pour les autre types des onduleurs qu'ils soient monophasés ou triphasés.

# Bibliographie

- [1]: **Mr. MOKHTARI Raouf**: Etude et simulation d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension MULTI-NIVEAUX. 2004/2005 ingénieur d'état en génie électrotechnique
- [2] M.H. Rashid, « Power electronics handbook », Academic Press, USA 2001.
- [3] M.Lavabre, « Électronique de puissance, conversion de l'énergie, cours et exercices résolus », Editions Casteilla, Paris, 1998.
- [4] F.Labrique, G.Seguir, R.Bausiere, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu - alternatif », Technique et Documentation -Lavoisier, 1995.
- [5] G.Seguir, « Électronique de puissance les fonctions de base et leurs principales applications », Edition Dunod, Paris, 1999.
- [6]: **A.DJALAL** : Etude experimental de influence des strategies MLI sur la commande de la machine à induction. Thèse de Magistère de l'université de Batna [2009].
- [7]: **B.ALLAL ELMOUBAREK** : Commande par la stratégie d'élimination d'harmonique (SHE) d'un onduleur triphasés alimente un moteur asynchrone mémoire de magister, ORAN [ 2009].
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Derdouri et A. Abidli, « Etude et simulation d'une machine asynchrone alimente par l'association redresseur MLI – onduleur MLI », Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2007.
- [11] R. Boucetta, « Commande par mode de glissement à hystérésis et MLI de la machine asynchrone à cage » Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2004-2005.
- [12] S. Ben daikha et A. Djermane, « Etude sur la commande des onduleurs en pont triphasés », Mémoire d'ingénieur, OUM ELBOUAGHI 2005.