

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

GHORZI Zoulikha
MIMOUNI Amina

Thème

Stratégies de commande des onduleurs

Soutenu publiquement, le 09/07/2019 , devant le jury composé de :

Ms. A KERBOUA	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Ms. F BOUKLI HACENE	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Ms. ATAHOUR	Prof	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Ms. S BELAROUCI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinateur 1
Ms. A CHEMIDI	MAB	ESSA. Tlemcen	Examinateur 2

Année universitaire: 2018 /2019

Dédicace

AVANT TOUS, JE REMERCIE DIEU LE TOUT PUISSANT DE M'AVOIR DONNÉ LE COURAGE ET LA PATIENCE POUR RÉALISER CE TRAVAIL MALGRÉ TOUTES LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES.

**A LA MÉMOIRE DE MON FRÈRE ZOUHEIR,
A LA MÉMOIRE DE MES GRANDS PERES ET MES
GRANDES MERES,**

**A MON PÈRE, AUCUN HOMMAGE NE POURRA ÊTRE À LA
MESURE DE CE QU'IL MÉRITE, JE PRIE DIEU QU'IL TE FASSE
DON DE SA MISÉRICORDE ET SA GRÂCE.**

**A MA CHÈRE MÈRE QUI M'A TOUJOURS SOUTENU DURANT
TOUTES LES PÉRIODES DE VIE, QUE DIEU LA PROTÉGÉ
INCHALAH.**

**A MES CHÈRES SŒURS AMOURA ET SAADIA ET
SON MARI ABDELHAK**

A MES TRÈS CHÈRES PETITS NIÈCES: ASMAA ET MOHAMED

**A MES TANTES, MES ONCLES, MES COUSINS ET MES
COUSINES.....**

**POUR LEUR SOUTIEN MORAL ET LEURS SACRIFICES LE LONG
DE MA FORMATION.**

**A MON BINÔME AMINA POUR SON AIDE
A TOUS MES AMIES SURTOUT IBTIHEL, SAMEH, SOUHILA ET
IKRAM**

A MES CAMARADES DE PROMOTION 2018/2019

ZOULIKHA Ghorzi



Dédicace

CE MODESTE TRAVAIL EST DÉDIÉ:

*A MES TRÈS CHERS PARENTS, CE FUT POUR MOI
UN HONNEUR D'AVOIR SUIVI CE PARCOURS
INIMAGINABLE, DONT VOUS AVEZ BIEN CONNU
LES CONTRAINTES. MERCI POUR L'INESTIMABLE
SOUTIEN MORAL ET LES NOMBREUX ENCOURAGEMENT
QUE J'AI TOUJOURS REÇU DE VOTRE PART,
QUE DIEU TOUT PUISSANT VOUS GARDE ET VOUS
PROCURE LA SANTÉ ET LA LONGUE VIE.*

*A MON CHER FRÈRE ET
MA CHÈRE SŒUR*

A MES GRANDS PARENTS

A TOUTE LA FAMILLE MIMOUNI ET BELDJILLALI

*A MA CHÈRE BINÔME ZOULIKHA POUR SON SOUTIEN MORAL ET
SA PATIENCE.*

*A TOUS MES CHÈRES AMIES SURTOUT
SOUHILA, IKRAM ET SARAH*

Remerciement

« Nous remercions Dieu qui nous a offert la vie et seul capable de nous offrir la joie, le bonheur, la prospérité et la santé. »

Tout d'abord il faut souligner que ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide de nos encadreurs Mr BOUKLI HACENE Fouad et Mr TAHOUR Ahmed envers qu'ils nous sont agréable de présenter nos profondes gratitudes et reconnaissances. Ils ont été toujours disponibles pour nous assister dans les différentes situations auxquelles nous nous sommes confrontés. Leurs conseils et remarques depuis les orientations initiales ont été pour nous un encouragement décisif, qu'ils trouvent ici notre remerciements les plus humbles et sincères.

Nos vifs remerciements vont à monsieur KERBOUA Abdelfatteh pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Nous remercions monsieur BELAROUCI Salim et monsieur CHEMIDI Abdelkarim pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation d ce travail, qu'ils trouvent tous ici d'expression de notre gratitude et notre parfaite considération.

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Les figures	Les titres	Les pages
CHAPITRE I		
Figure I.1	les différents types de convertisseurs statiques	03
Figure I.2	schéma symbolique d'un onduleur	03
Figure I.3	Onduleur de courant	04
Figure I.4	Onduleur de tension	04
Figure I.5	Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau	04
Figure I.6	Système photovoltaïque connecté au réseau	05
Figure I.7	Onduleur monophasé en demi-pont	05
Figure I.8	L'allure de la tension au borne de la charge	06
Figure I.9	Onduleur monophasé de tension en pont	06
Figure I.10	L'allure de la tension au borne de la charge	07
Figure I.11	La tension au borne de la charge	08
Figure I.12	Courant d'une charge résistive	08
Figure I.13	Les cas possibles de commutation de l'onduleur	10
Figure I.14	L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge	10
Figure I.15	Circuit de puissance d'un onduleur triphasé	11
Figure I.16	Chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	12
Figure I.17	Chronogrammes des tensions simples	13
Figure I.18	La commande MLI	14
Figure I.19	variation de la vitesse d'une machine synchrone	15
Figure I.20	Alimentation sans interruption	16
CHAPITRE II		
Figure II.1	Réalisation du signal MLI	17
Figure II.2	Technique analogique	19
Figure II.3	Technique digitale	19
Figure II.4	Technique hybride	19
Figure II.5	MLI d'une simple impulsion	20

Figure II.6	MLI multiple	21
Figure II.7	MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire	22
Figure II.8	MLI sinusoïdale modifié	23
Figure II.9	Circuit de puissance d'un onduleur triphasé	23
Figure II.10	Les huit configurations possibles	25
Figure II.11	les combinaisons possibles des interrupteurs	25
Figure II.12	La formation de la tension de référence	26
Figure II.13	Les périodes de commutation des interrupteurs	28
CHAPITRE III		
Figure III-1	Les enroulements du stator et rotor	31
Figure III-2	Position des systèmes d'axes	33
Figure III-3	Les allures de la tension simple V_{an} et composée V_{ab}	35
Figure III-4	Le courant statorique dans la phase (a)	35
Figure III-5	La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$	36
Figure III-6	Les allures de la tension simple V_{an} et composée V_{ab}	37
Figure III-7	Le courant statorique $I_{as}(t)$ dans la phase (a)	37
Figure III-8	La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$	38
Figure III-9	La tension simple V_{an} et la tension composée V_{ab}	39
Figure III-10	Le courant statorique I_{as}	39
Figure III-11	La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$	40
Figure III-12	THD de la commande 180°	41
Figure III-13	THD de la commande Sinus triangulaire	41
Figure III-14	THD de la commande MLI vectorielle	42

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Les figures	Les titres	Les pages
CHAPITRE I		
Tableau I.1	les configurations possibles	07
Tableau I.2	Commande de 180°	13
Tableau I.3	Commande de 120°	14
CHAPITRE II		
Tableau II.1	les combinaisons de vecteurs de tension d'un onduleur triphasé	26
CHAPITRE III		
Tableau III-1	Comparaison des différentes commandes	42

GLOSSAIRE

Glossaire :

DC	Direct Current
AC	Alternatif Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
PWM	Pulse Width Modulation
MLI	Modulation de Largeur Impulsions
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation
MAS	Machine Asynchrone
THD	Total Harmonic Distortion

TABLE DES MATIERES

Table des Matières

Introduction générale	
Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur les onduleurs	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition d'un convertisseur DC-AC	3
I.3 Classification des onduleurs	3
I.3.1 Onduleur de courant	3
I.3.2 Onduleur de tension	4
I.3.2.1 Onduleur non raccordé au réseau électrique	4
I.3.2.2 Onduleurs raccordés aux réseaux	4
I.4 Généralité sur les onduleurs monophasés	5
I.4.1 Onduleur en demi-pont	5
I.4.2 Onduleur en pont	6
I.5 Les onduleurs triphasés	11
I.6 Le fonctionnement des onduleurs triphasés	11
I.7 Commande d'un onduleur triphasé	13
I.7.1 Commande 180°	13
I.7.2 Commande 120°	13
I.7.3 Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM)	14
I.8 Les applications des onduleurs	15
I.8.1 Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif	15
I.8.2 Assurer la continuité des alimentations des secours	15
I.8.3 Les applications dans le transport	15
I.8.4 Alimentation sans interruption	15
I.8.5 La protection des équipements	16
I.8.6 Les installations photovoltaïques	16
I.9 Conclusion	16
Chapitre II Les différentes stratégies de commande des onduleurs à MLI	
II.1 Introduction	17
II.2 Principe de base de MLI	17
II.3 Les caractéristiques de MLI	17
II.4 Les différents types de modulation	18
II.4.1 Modulation naturelle	18
II.4.2 Modulation régulière	18
II.5 Technique de production d'onde MLI	18
II.5.1 Technique analogique	19
II.5.2 Technique digitale	19
II.5.3 Technique hybride	19
II.6 Différentes techniques de modulation à largeur d'impulsions	20
II.6.1 MLI simple	20
II.6.2 MLI multiple	21
II.6.3 MLI sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM))	21
II.6.4 MLI Sinusoïdale modifié	22
II.7 MLI de Vectorielle	23

II.7.1 Principe de base de SVPWM	23
II.7.2 Transformation de Clarke	24
II.7.3 Les configurations possibles	24
II.7.4 Les calculs de temps de commutation des interrupteurs	26
II.8 Principaux avantages de la MLI	28
II.9 Les inconvénients de la MLI	29
II.10 Conclusion	29
Chapitre III Simulation et interprétation des résultats	
III.1 Introduction	30
III.2 Hypothèses simplificatrices	30
III.3 Modélisation de la machine asynchrone	30
III.3.1 Equations électriques de la MAS	30
III.3.2 Choix du référentiel (d, q)	33
III.3.3 Equations mécaniques	33
III.4 Simulation de différentes commandes appliquées à l'onduleur	34
III.4.1 Commande 180°	34
III.4.2 Commande sinus triangulaire	36
III.4.3 Commande SVPWM	38
III.5 Comparaison entre les différentes commandes	40
III.6 Conclusion	42
Conclusion générale	
Conclusion générale	43
Les Références Bibliographiques	
Les Références Bibliographiques	44
Les Annexes	
Les Annexes	I

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électronique de puissance est une technologie qui traite la conversion et le contrôle de l'énergie électrique avec des appareils électroniques à mode de commutation à haut rendement pour une large gamme d'applications. Cette technologie couvre les domaines des dispositifs à semi-conducteurs de puissance, des circuits de conversion, des machines électriques, des entraînements, des techniques de contrôle avancées.

Les moteurs électriques sont aujourd'hui présents dans toutes les branches de l'industrie. L'un des principaux éléments constitutifs des procédés industriels modernes est l'entraînement électrique à vitesse variable. L'évolution technologique des convertisseurs statiques qui représentent le véritable cœur de tout système permettent l'alimentation des différents circuits avec un flux maîtrisé et adapté aux conditions de fonctionnement.

Les onduleurs triphasés montrent récemment une popularité croissante pour les applications industrielles de plusieurs mégawatts. A cause de leur prix, ils sont plus économiques et amélioration de la qualité des harmoniques. Ils sont aussi plus faciles du côté de la commande électrique soit analogique concernant les amplificateurs opérationnels (comparateurs) soit numérique concernant les microprocesseurs.

Dans plusieurs applications industrielles, on est souvent préoccupé d'avoir une alimentation stable et réglable. Cette tension peut être obtenue au moyens des onduleurs qui éliminent les fluctuations de la tension continue d'entrée, en maintenant la relation tension / fréquence constante tout en réglant l'amplitude de la tension requise par la charge. Plusieurs méthodes sont utilisées pour obtenir cette tension et la Modulation de Largeur d'Impulsion MLI est l'une des plus efficaces. En plus de régler l'amplitude, cette méthode contrôle le contenu harmonique de la tension de sortie de l'onduleur en repoussant les harmoniques d'ordre inférieur vers les fréquences les plus élevées, ce qui rend le filtrage plus facile et moins coûteux, car la taille des composantes du filtre, est assez réduite. Cependant, on note que la technique de MLI a des limites par rapport à la fréquence d'opération des onduleurs.

En effet, plus cette fréquence est élevée, plus les pertes dues à la commutation des interrupteurs à semi-conducteurs sont diminuées. En plus, la fréquence d'opération des onduleurs MLI est également limitée par la vitesse de commutation propre des interrupteurs à semi conducteurs. Plusieurs techniques de contrôle à MLI ont été développées.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres et une conclusion générale. Qu'on décrit comme suit :

Introduction générale

Dans le premier chapitre nous décrivons les généralités sur les onduleurs avec des rappels théoriques sur le principe du fonctionnement des onduleurs triphasés ainsi que leurs applications.

Le deuxième chapitre est consacré pour les multiples techniques de commande d'un onduleur triphasé.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone et à la simulation d'un onduleur triphasé appliqué sur une MAS sous Matlab sous l'action de différentes commandes.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale résumant les différents résultats obtenus.

CHAPITRE I
GENERALITE SUR
LES
ONDULEURS

I.1. Introduction :

Le progrès technologiques réalisés ces dernières années a permis le développement important des convertisseurs qui s'appliquent dans le domaine de l'électronique de puissance. La figure (I.1) illustre les différents types de convertisseurs statiques.

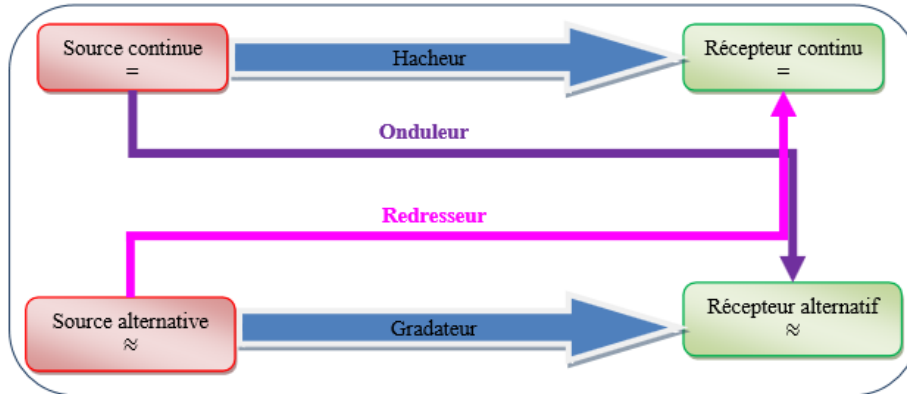


Figure I.1 : Les différents types de convertisseurs statiques [1]

En premier lieu nous définissons tout d'abord le convertisseur statique continue-alternative, ainsi que les différents types d'onduleurs selon leurs natures d'alimentation. En second lieu, nous présentons les onduleurs monophasés, triphasés, les différentes applications et quelques avantages et inconvénients de ces systèmes.

I.2. Définition d'un convertisseur DC-AC :

Les convertisseurs DC-AC appelé aussi des onduleurs permettent de transformer une source de tension continue en une source de tension alternative. Cette transformation est basée sur des dispositifs de commandes (semi-conducteurs) rapides et robustes.

La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure (I.2)

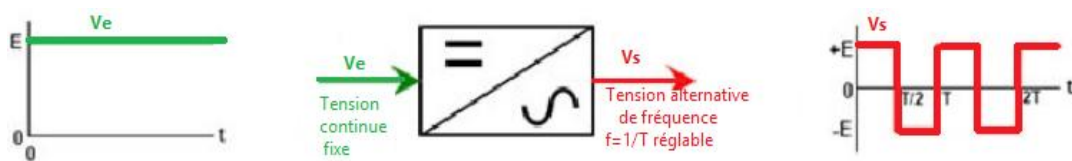


Figure I.2 : Schéma symbolique d'un onduleur [2]

I.3. Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés selon la nature de l'alimentation :

I.3.1. Onduleur de courant :

Les convertisseurs continu-alternatif associés sont définis comme des onduleurs de courant à condition que l'étage continu est considéré comme étant une source de courant. A cet effet, ce type de système est connecté à une source de tension alternative, figure(I.3).

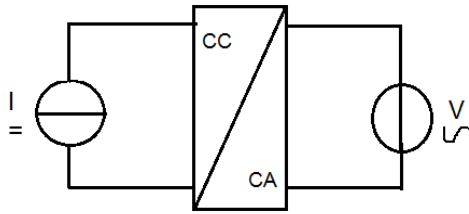


Figure I.3 : Onduleur de courant [3]

I.3.2. Onduleur de tension :

Les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension à condition que l'étage continu est vu comme étant une source de tension. En effet, les onduleurs de tension sont connectés à une source de courant alternative, comme le présente la figure(I.4)

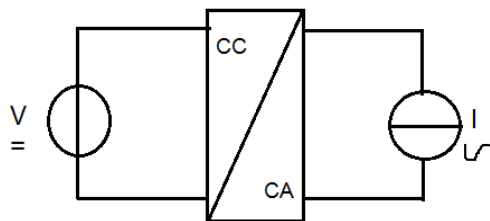


Figure I.4 : Onduleur de tension [3]

I.3.2.1. Onduleur non raccordé au réseau électrique (autonome) :

Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'est pas connecté au réseau électrique. [4]

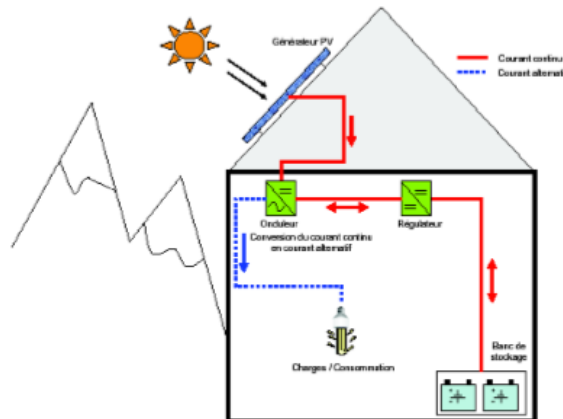


Figure I.5: Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau [5]

I.3.2.2. Onduleurs raccordés aux réseaux (non autonome) :

On définit l'onduleur naturel raccordé par le réseau, par un montage redresseur avec thyristors. Le montage des entraînements statiques à vitesse variable des moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs du courant pour les machines synchrones

et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ont supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [6].

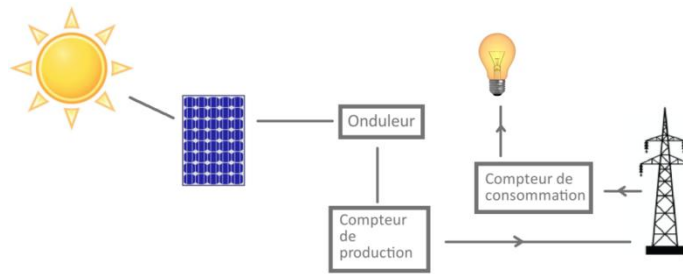


Figure I.6: Système photovoltaïque connecté au réseau [7]

I.4. Généralité sur les onduleurs monophasés :

Ce type d'onduleur est utilisé généralement pour les alimentations de secours. Il délivre dans la sortie une tension alternative monophasée. A cet effet, on distingue deux classes d'onduleurs monophasés suivant leurs topologies :

I.4.1. Onduleur en demi- pont (deux interrupteurs) :

➤ Présentation:

La topologie de l'onduleur monophasé en demi- pont est présentée dans la figure (I.7)

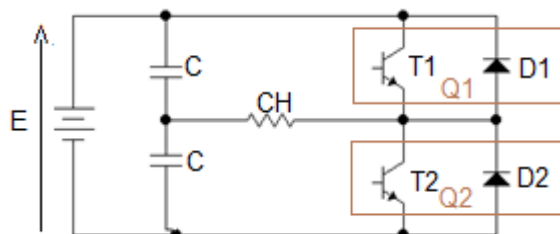


Figure I.7 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont [8]

➤ Principe de fonctionnement :

Le montage d'un onduleur en demi-pont utilise deux "interrupteurs" notés Q1 et Q2 à commande complémentaire bidirectionnels en courant unidirectionnel en tension. Le plus souvent on utilise une seule source de tension continue et un diviseur capacitif [8].

- Pour $0 < t < T/2$: L'interrupteur Q1 est fermé et Q2 est ouvert.

$$U_{ch} = R \times i(t) = +\frac{E}{2} \tag{I.1}$$

- Pour $0 < t < T/2$: L'interrupteur Q2 est fermé et Q1 est ouvert.

$$U_{ch} = R \times i(t) = -\frac{E}{2} \tag{I.2}$$

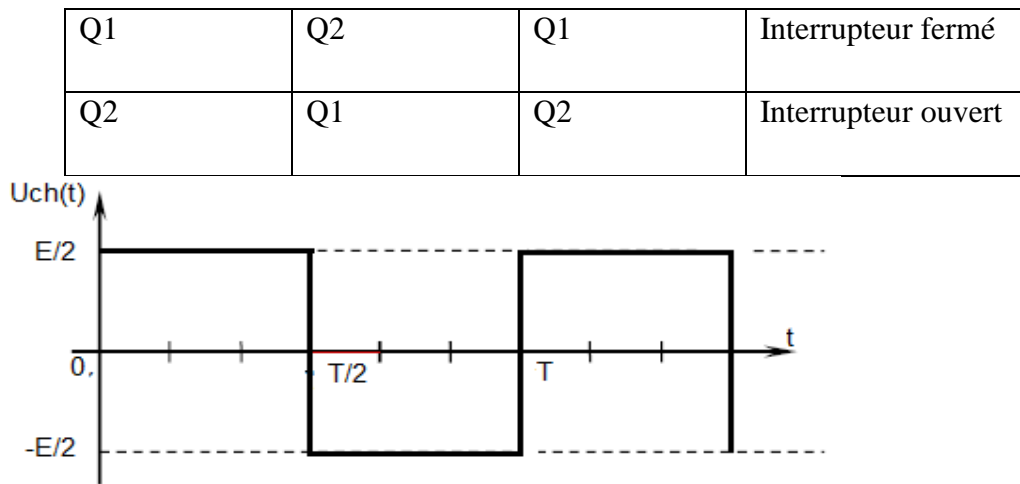


Figure I.8 : L'allure de la tension au borne de la charge [1]

Les interrupteurs Q1 et Q2 sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur T_i commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode D_i . Cette dernière assure la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge [1].

I.4.2. Onduleur en pont (quatre interrupteurs) :

➤ Principe :

La structure de base de l'onduleur de tension en pont se présente à la figure (I.9)

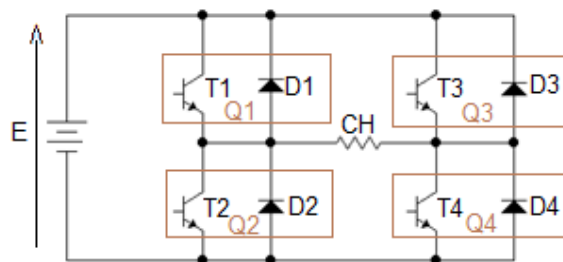


Figure I.9 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé de tension en pont [8]

➤ Principe de fonctionnement :

Le montage d'un onduleur en pont complet se compose de quatre interrupteurs semi-conducteurs avec des diodes en antiparallèle. La charge est branchée entre les deux bras de l'onduleur. Le principe de fonctionnement de cet onduleur est montré dans le tableau (I.1)

Tableau I.1 : les configurations possibles [9]

	Bras 1		Bras 2		Tension U_c
	Q1	Q2	Q3	Q4	
Cas 1	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	$U_c=0$
Cas 2	Passent	Bloqué	Bloqué	Passent	$U_c=E$
Cas 3	Bloqué	Passent	Passent	Bloqué	$U_c=-E$
Cas 4	Bloqué	Passent	Bloqué	Passent	$U_c=0$

- Pour $0 < t < T/2$: Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = +E \tag{I.3}$$

- Pour $T/2 < t < T$: Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$U_{ch} = R \times i(t) = -E \tag{I.4}$$

La figure (I.10) montre les intervalles de conductions des interrupteurs dans un onduleur à pont.

Q1 et Q4	Q2 et Q3	Q1 et Q4	Interrupteur fermé
Q2 et Q3	Q1 et Q4	Q2 et Q3	Interrupteur ouvert

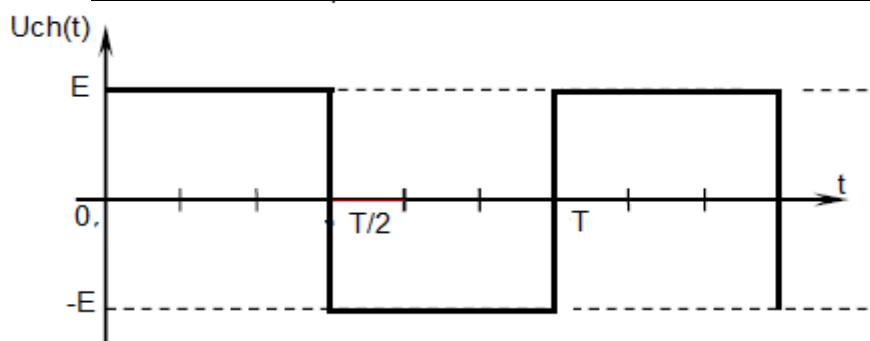


Figure I.10 : L'allure de la tension au borne de la charge [1]

- *Charge résistive :*

Ci-dessous les deux figures représentent la tension et le courant au borne d'une charge résistive.

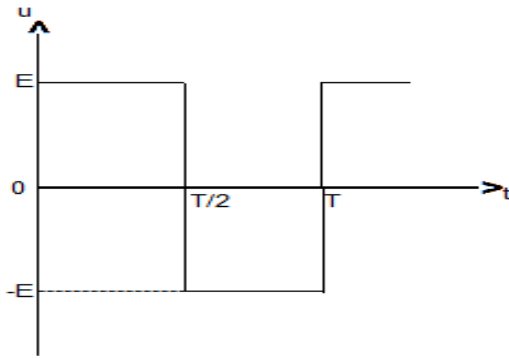


Figure I.11: La tension au borne de la charge[1]

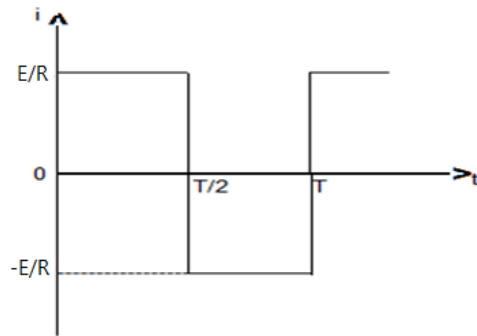


Figure I.12: Courant d'une charge résistive[1]

- Pour $0 < t < T/2$: Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{+E}{R} \quad (\text{I.5})$$

- Pour $T/2 < t < T$: Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{-E}{R} \quad (\text{I.6})$$

On constate que l'allure du courant suit l'allure de la tension car ils sont liés par la loi d'Ohm. Il faut noter que le courant dans les interrupteurs est toujours positif.

- Charge inductive :

La charge inductive simule un moteur alternatif et contrairement à la charge résistive l'allure de courant change.

- Pour $0 < t < t_1$: T1 et T4 sont commandés à la fermeture tandis que T2 et T3 sont ouverts donc :

$$U_c = L \frac{di}{dt} + Ri = +E \quad (\text{I.7})$$

D'après (I.7) on trouve que le courant dans cet intervalle est négatif. Ce sont les diodes D1 et D4 qui conduisent.

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - I_M e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{I.8})$$

Dans cet intervalle la charge fournit l'énergie vers la source «phase de restitution alternance».

- pour $t_1 < t < \frac{T}{2}$: A l'instant t_1 le courant devient positif, ce qui impose la conduction des transistors T1 et T4 or les diodes D1 et D4 sont bloquées. Les équations de $U_c(t)$ et $i(t)$ restent les mêmes que (I.7) et (I.8) car on est toujours dans la même maille. A cet effet, on est dans la «phase d'accumulation alternance» ou la charge reçoit l'énergie.
- Pour $\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} + t_1$: T2 et T3 sont commandés à la fermeture donc :

$$U_c = L \frac{di}{dt} + Ri = -E \quad (\text{I.9})$$

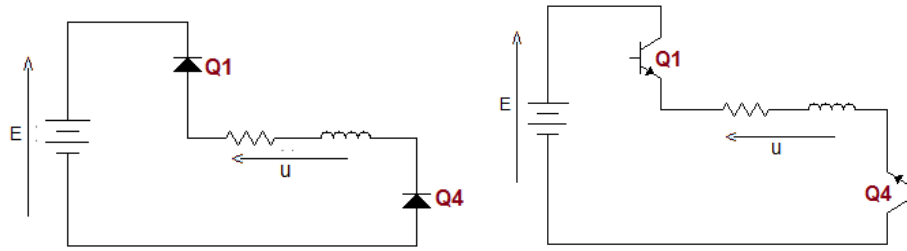
D'après (I.9) on trouve cette expression de courant :

$$i(t) = \frac{E}{R} \left(-1 + e^{\left(-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}\right)} \right) + I_M e^{\left(-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}\right)} \quad (\text{I.10})$$

Le courant est positif donc les diodes D2 et D3 conduisent le courant. Dans cet intervalle de temps la charge fournit l'énergie vers la source.

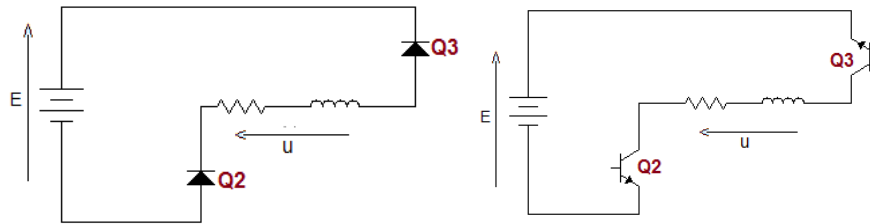
- Pour $\frac{T}{2} + t_1 < t < T$: A l'instant $\frac{T}{2} + t_1$ le courant devient négatif ce qui impose la conduction des transistors T2 et T3 or les diodes D2 et D3 sont bloquées. Dans ce cas la charge reçoit l'énergie. Les équations de $U_c(t)$ et $i(t)$ restent les mêmes que (I.9) et (I.10) c'est la même maille. C'est la même maille.

A cet effet, il y'a enchaînement de quatre mailles de conduction :



Cas n°1: Restitution alternance positive

Cas n°2: Accumulation alternance positive



Cas n°3: Restitution alternance négative

Cas n°4 : Accumulation alternance positive

Figure I.13: Les cas possibles de commutation de l'onduleur [10]

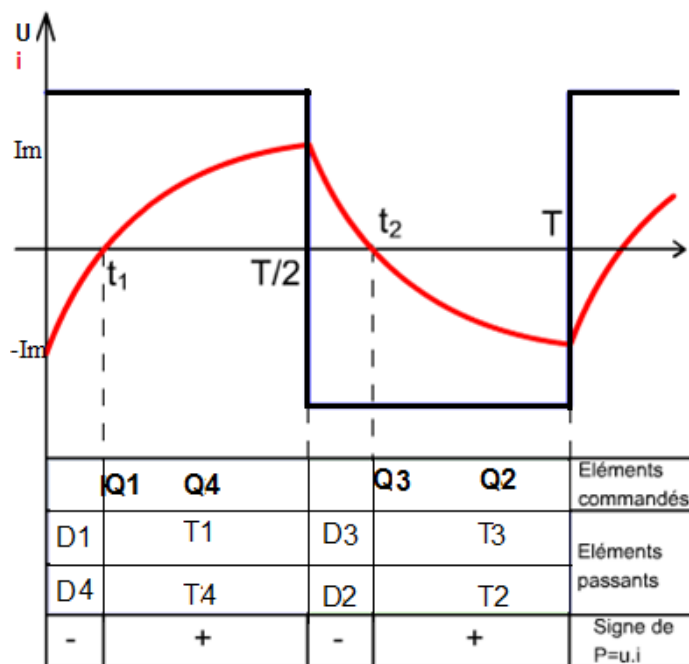


Figure I.14 : L'allure de la tension et le courant aux bornes de la charge [10]

I.5. les onduleurs triphasés :

La figure (I.15) présente la structure générale d'un onduleur triphasé qui se compose de trois onduleurs demi-pont monophasé en parallèle. Le contrôle e commutation de chaque demi-pont permet d'obtenir trois phases déphasées de 120° . Les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension de la source continue ne soit jamais en court-circuit et que les courants des circuits I_a , I_b et I_c ne soient jamais ouverts. Il faut noter que les interrupteurs donnent trois tensions de sorties [6].

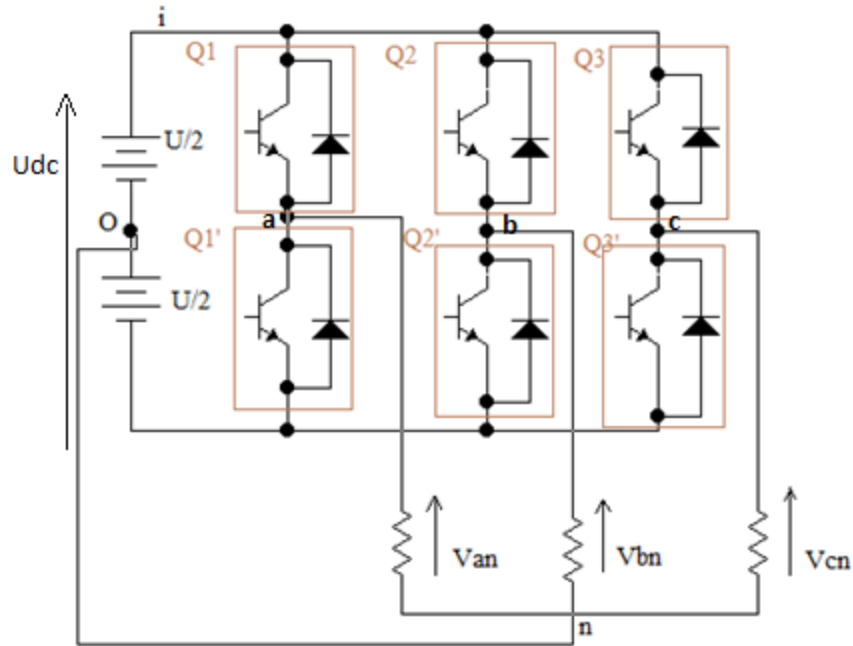


Figure I.15 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé [11]

I.6. Fonctionnement des onduleurs triphasés :

Les tensions V_{ao} , V_{bo} et V_{co} mesurées entre les points a, b, c et le point o sont exprimées comme suit :

$$V_{ao} = V_a - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } Q1 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } Q1' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

$$V_{bo} = V_b - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } Q2 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } Q2' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

$$V_{co} = V_c - V_o = \begin{cases} \frac{+U}{2} & \text{si } Q3 \text{ fermé} \\ \frac{-U}{2} & \text{si } Q3' \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

La charge est équilibrée. A cet effet on peut écrire la relation :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{I.14}$$

Au niveau de la charge on peut déduire les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \tag{I.15}$$

Ainsi :

$$\begin{cases} V_{ab} - V_{ca} = V_{an} - V_{bn} - (V_{cn} - V_{an}) = 3V_{an} \\ V_{bc} - V_{ab} = V_{bn} - V_{cn} - (V_{an} - V_{bn}) = 3V_{bn} \\ V_{ca} - V_{bc} = V_{cn} - V_{an} - (V_{bn} - V_{cn}) = 3V_{cn} \end{cases} \tag{I.16}$$

En effectuant la différence entre les membres, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ab} - V_{ca} = V_{ao} - V_{bo} - (V_{co} - V_{ao}) = 2V_{ao} - V_{bo} - V_{co} \\ V_{bc} - V_{ab} = V_{bo} - V_{co} - (V_{ao} - V_{bo}) = 2V_{bo} - V_{ao} - V_{co} \\ V_{ca} - V_{bc} = V_{co} - V_{ao} - (V_{bo} - V_{co}) = 2V_{co} - V_{ao} - V_{bo} \end{cases} \tag{I.17}$$

D'après ces équations on tire les tensions :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \tag{I.18}$$

La figure (I.16) montre les chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co} .

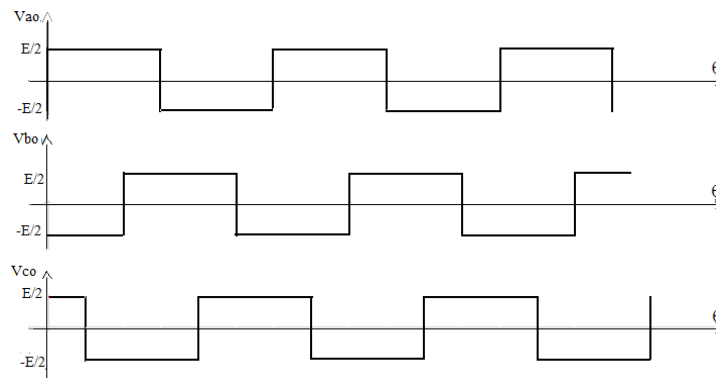


Figure I.16 : Chronogrammes des tensions V_{ao}, V_{bo}, V_{co} [12]

La figure (I-17) montre les chronogrammes des tensions simples V_{an}, V_{bn}, V_{cn} .

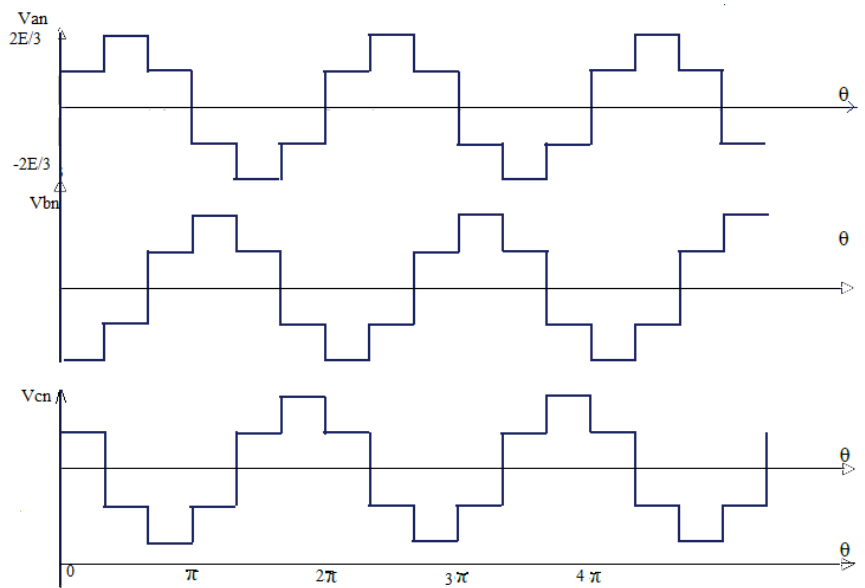


Figure I.17 : Chronogrammes des tensions simples [12]

I.7. Commande d'un onduleur triphasé :

I.7.1. Commande 180°:

Dans la commande 180° chaque interrupteur est commandé pour une durée de demi-période. D'après le tableau (I.2) la fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [13]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120°.

Tableau I.2 : Commande de 180° [14]

Q1		Q1'		Q1	
Q2'		Q2		Q2'	
Q3		Q3'		Q3	

I.7.2. Commande 120°:

Dans la commande 120° chaque interrupteur est commandé pour une durée un tiers d'une période. D'après le tableau (I.3) la fermeture d'un interrupteur ne coïncide pas avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [13]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120°.

Tableau I.3 : Commande de 120° [14]

Q1		Q1'		Q1	
Q2'		Q2		Q2'	Q2
	Q3'		Q3		Q3'

I.7.3. Modulation de largeur d'impulsions ou (PWM):

Cette technique est applicable pour l'onduleur monophasé et triphasé. Elle est déduite de la comparaison entre le signal variable S_{var} (sinusoïdal d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie) et de porteuse S_p (triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée). L'utilisation de cette commande permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant. Le résultat est un chronogramme de commande dans la figure (I.18)

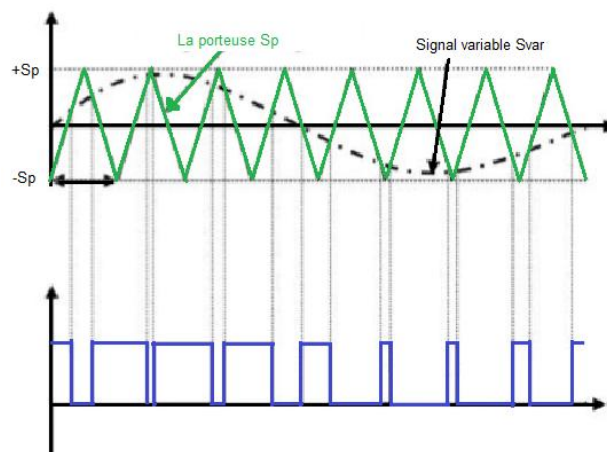


Figure I.18: La commande MLI [9]

Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation qui est donné par le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence [9].

I.8. Les applications des onduleurs :**I.8.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif :**

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. A cet effet il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée. [15]

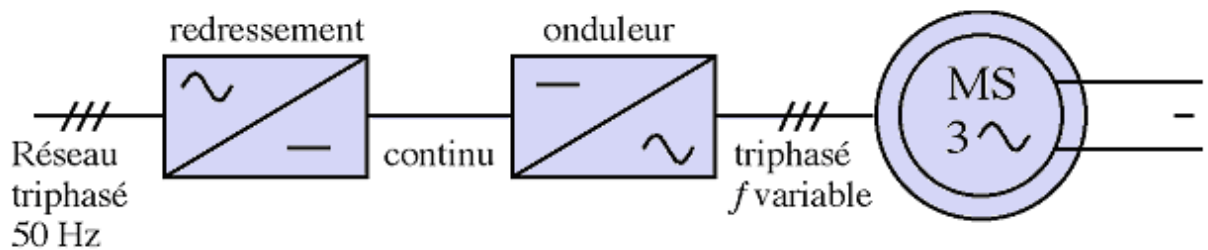


Figure I.19 : variation de la vitesse d'une machine synchrone [15]

I.8.2. Assurer la continuité des alimentations des secours:

En cas de coupure du réseau, la tension continue stockée dans les batteries sera convertit en tension alternative à travers l'onduleur pour continuer l'alimentation des machines, surtout en informatique pour éviter les pertes d'informations.

I.8.3. Les applications dans le transport :

- *Transport ferroviaire :*

Les motrices actuellement développées sont mues par des machines alternatives asynchrones. Pour contrôler la vitesse de rotation de ces dernières, on doit pouvoir faire varier la fréquence de leur l'alimentation. Cela est réalisé par un onduleur. [11] exemple TGV, trains, Tramway.

- *Transport Aériens et maritimes :*

Tout avion produit lui-même l'énergie électrique dont il a besoin pour le fonctionnement de ces équipements de bord [11].

I.8.4. Alimentation sans interruption :

Les onduleurs peuvent assurer une alimentation électrique 24h sur 24 h en cas de rupture dans le réseau.

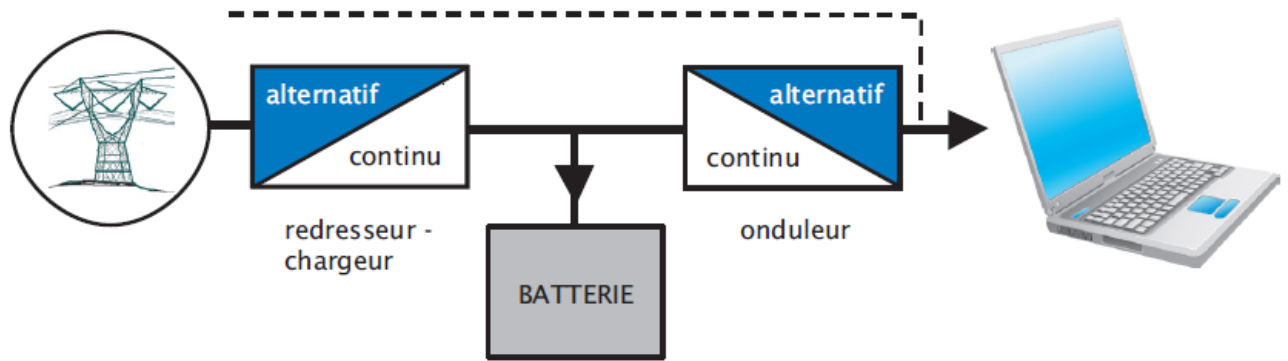


Figure I.15 : Alimentation sans interruption [16]

I.8.5. La protection des équipements :

Les onduleurs protègent des différents équipements dans différents domaines contre les perturbations.

I.8.6. Les installations photovoltaïques :

Le raccordement entre les panneaux photovoltaïques et le réseau se fait à travers les onduleurs aussi ils permettent d'adapter l'énergie délivrée du panneau et l'énergie injectée au réseau.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés les onduleurs et ces différents types ainsi une analyse de fonctionnement des onduleurs triphasés.

Le chapitre suivant est réservé à l'étude des différentes stratégies de commandes des onduleurs à MLI.

CHAPITRE II

LES DIFFERENTES STRATEGIES DE COMMANDE DES ONDULEURS A MLI

II.1. Introduction :

Dans plusieurs applications industrielles, il est important d'avoir une tension d'alimentation stable et réglable. Cette tension est obtenue par les onduleurs qui permettent d'éliminer la variation de la tension continue. Il existe plusieurs techniques afin d'obtenir la tension finale désirée. Dans ce chapitre on va aborder les différentes techniques de modulations plus utilisées.

II.2. Principe de base de MLI :

La technique en MLI consiste à générer un signal de sortie formé par plusieurs créneaux de largeur variables et amplitude égale à la tension d'alimentation. Les ordres d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs sont donnés par l'intersection d'un signal triangulaire (porteuse) à un signal de référence selon la stratégie choisie.

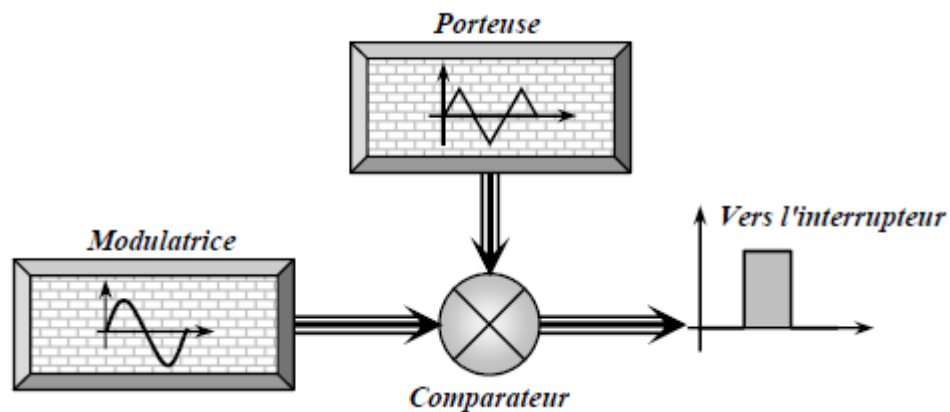


Figure II.1: Réalisation du signal MLI [17]

II.3. Les caractéristiques de MLI :

Les paramètres importants dans la commande MLI sont :

- La fréquence de modulation f_p .
- L'indice de modulation m : qui est défini comme le rapport de la fréquence de la porteuse par la fréquence de la modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

Il faut noter quand le coefficient de modulation est grand cela signifie que la neutralisation des harmoniques est efficace.

- Le coefficient de réglage A : est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la modulante par l'amplitude de la porteuse non modulée.

$$A = \frac{A_r}{A_p}$$

Le coefficient de réglage ne doit jamais être égal à « 1 », il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras [18].

II.4. Les différents types de modulation :

Le principe consiste à comparer deux ondes pour cela on distingue deux types de modulation :

- Modulation naturelle.
- Modulation régulière.

II.4.1. Modulation naturelle :

Cette modulation nous permet de comparer directement le signal porteuse avec le signal modulant afin d'obtenir à la fin une onde modulée. A cet effet la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant où le basculement aura lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Cet effet génère deux conséquences importantes :

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.
- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques [19].

II.4.2. Modulation régulière :

Les techniques MLI à échantillonnage régulier proviennent de la technique triangulo-sinusoidale. Elles consistent à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence [19]. A cet effet on distingue :

- Technique à échantillonnage régulier symétrique.
- Technique à échantillonnage régulier asymétrique.
- Technique à échantillonnage régulier modifié.

II.5. Technique de production d'onde MLI:

Afin de générer le signal de contrôle nécessaire à la commande ainsi au blocage des éléments semi-conducteurs il utilise plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI. A cet effet pour obtenir des signaux MLI il existe trois techniques sont :

- Technique analogique.
- Technique digitale.
- Technique hybride.

II.5.1. Technique analogique :

La technique analogique est basée sur la comparaison entre un signal triangulaire "onde porteuse" et un signal sinusoïdal "onde modulatrice", la comparaison est réalisée grâce d'un amplificateur opérationnel.

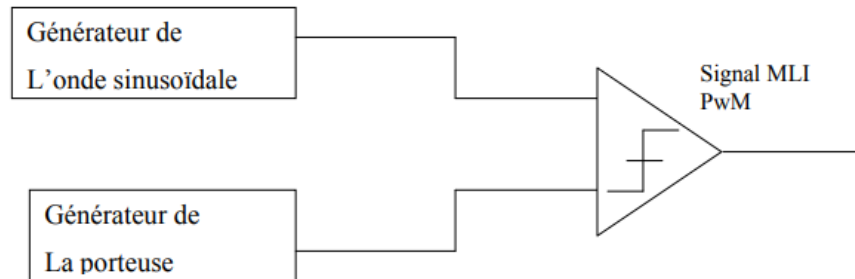


Figure II.2 : Technique analogique [18]

II.5.2. Technique digitale (numérique) :

Elle consiste à utiliser des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette méthode nous permis d'avoir une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande [20]

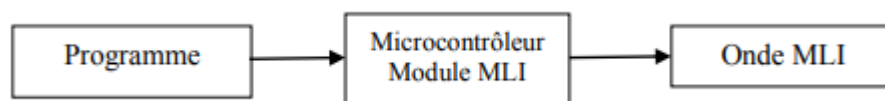


Figure II.3 : Technique digitale [18]

II.5.3. Technique hybride :

La technique hybride est une combinaison entre les circuits analogiques et digitaux, durant la période de transition de la technique analogique à la technique digitale.

Cette méthode est basée sur la comparaison de deux signaux par un comparateur analogique dont l'un est triangulaire par exemple généré par un ordinateur, et l'autre sinusoïdale (cas d'un onduleur) par un circuit analogique.

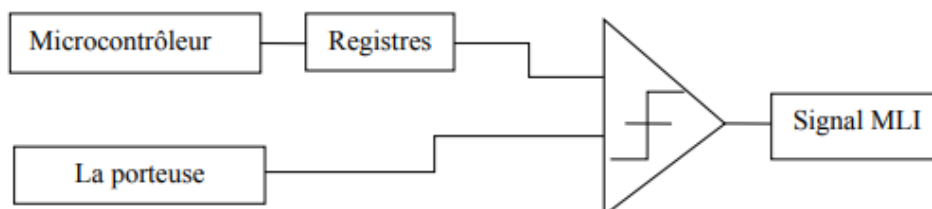


Figure II.4 : Technique hybride [20]

II.6. Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions :

II.6.1. MLI simple

Dans la technique MLI simple on utilise seulement une seule impulsion par demi-cycle ou la largeur de cette impulsion fait varier l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur. Dans cette méthode on compare un signal de référence d'amplitude A_r , avec un signal d'onde porteuse triangulaire d'amplitude A_p . La figure ci-dessous montre la génération des signaux de commande et de sortie d'un onduleur monophasé à pont complet utilisant la modulation MLI simple. La fréquence du signal de référence est celle de la fondamentale de la tension de sortie. En variant A_r , de 0 à A_p , la largeur d'impulsion δ peut varier de 0 à 180° [21].

La relation A_r / A_p est la variable de contrôle et s'appelle "index de modulation d'amplitude" de la tension de sortie [22].

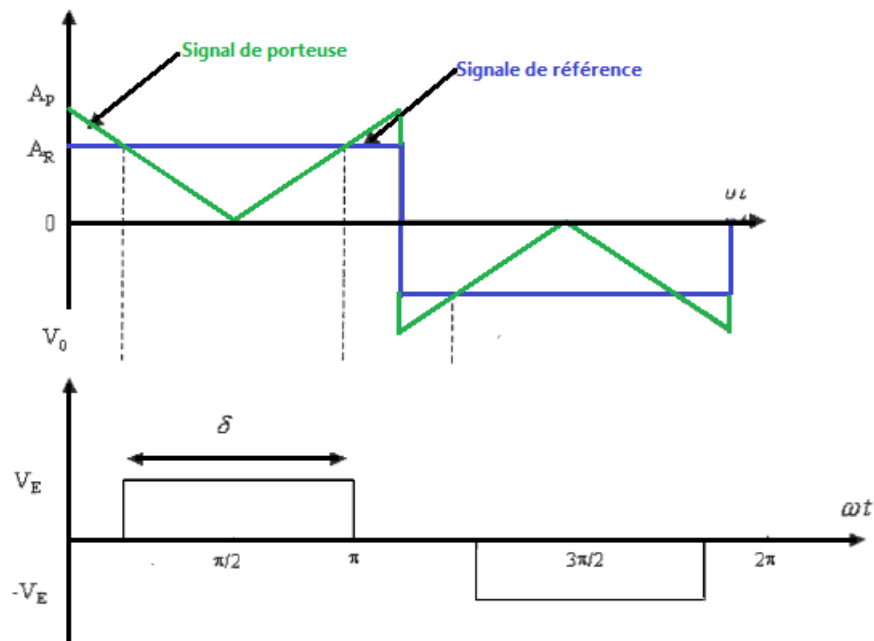


Figure II.5 : MLI d'une simple impulsion [23]

La tension de sortie efficace est déterminée comme suit:

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, la tension de sortie V_0 dépend de la largeur d'impulsion δ . La série de Fourier de la tension de sortie produite est :

$$V_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_E}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (\text{II.2})$$

II.6.2. MLI multiple

Cette technique permet de diminuer les harmoniques en ajoutant plusieurs impulsions dans chacune des alternances de la tension de sortie. Les impulsions de commande des interrupteurs s'obtiennent par les intersections d'un signal de référence et d'un signal porteur triangulaire [22].

La fréquence du signal de référence règle la fréquence de sortie f_r et la fréquence porteuse f_p , du signal détermine le nombre d'impulsions durant la demi alternance [23], avec le nombre d'impulsion par demi cycle est donné par :

$$m = \frac{f_p}{2f_r}$$

Le signal de sortie obtenu est un signal de créneaux de largeurs égales.

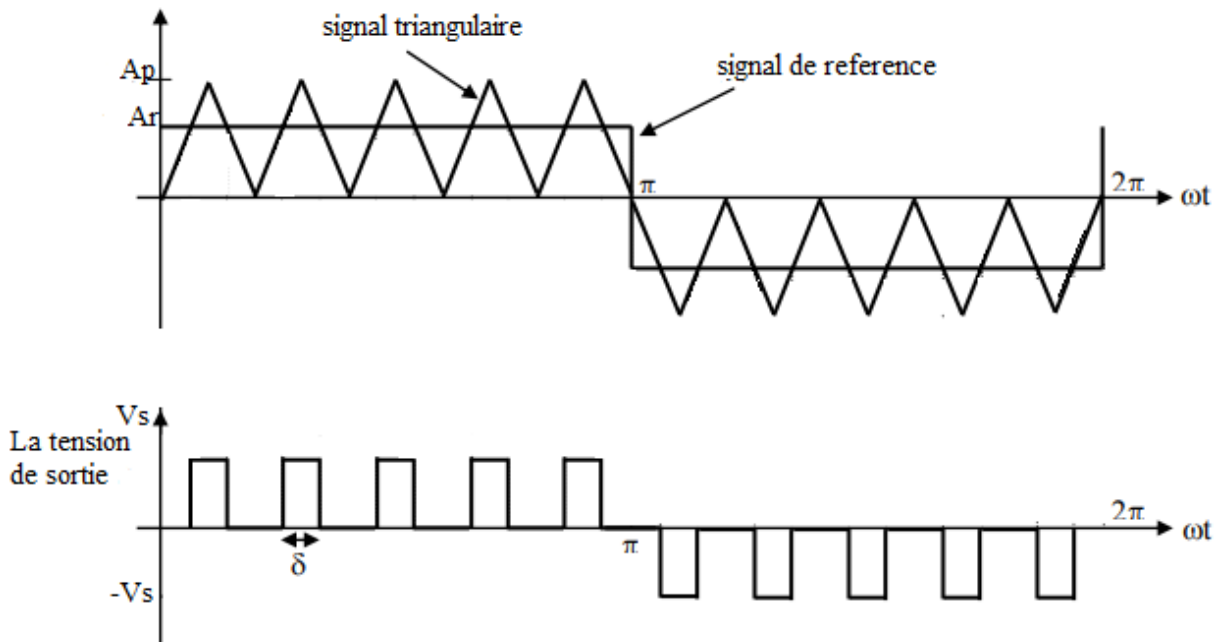


Figure II.6 : MLI multiple [23]

La tension efficace est donnée par la relation suivante :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \quad (\text{II.3})$$

II.6.3. MLI Sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM))

Dans cette technique est le signal de référence est un signal sinusoïdal. On obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable. Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante [18]. La figure ci-dessous montre la tension de sortie. La fréquence du signal de

sortie de l'onduleur est déterminée par la fréquence du signal de référence. La fréquence du signal porteur détermine le nombre p des impulsions par demi-cycle.

Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle est la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques [18].

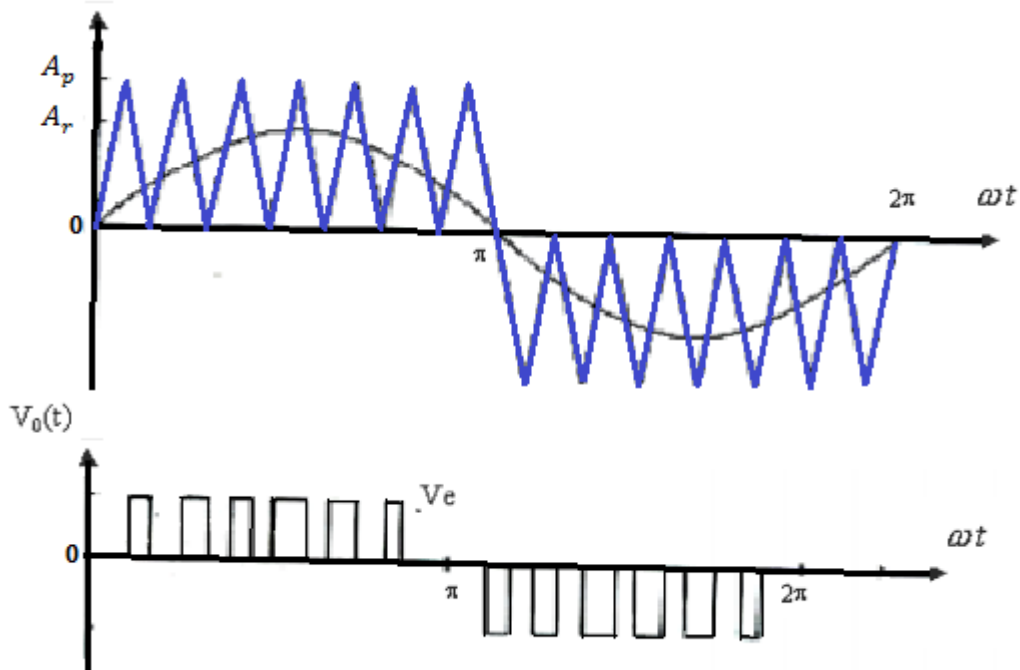


Figure II.7: MLI sinusoidal triangulaire unipolaire [19]

La tension efficace V_0 de sortie est donnée par:

$$V_0 = V_E \left(\sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.4})$$

Où

δ_m = Largeur du $m^{\text{ème}}$ impulsion et p = le nombre des impulsions par alternance.

Contrairement à la modulation MLI de multiples impulsions la technique MLI sinusoidale permet de réduire de façon significative le facteur de distorsion de la tension de sortie. Toutes les harmoniques d'ordre égal ou inférieur à $2p-1$ sont éliminées par cette technique. [22]

II.6.4. MLI Sinusoidale modifié :

Dans cette technique le signal de référence est toujours une onde sinusoidale mais diffère par rapport à la technique précédentes que la porteuse est appliquée durant le début et la fin d'un intervalle de 60° par demi cycle, c'est à dire 0 à 60° et de 120° à 180° .

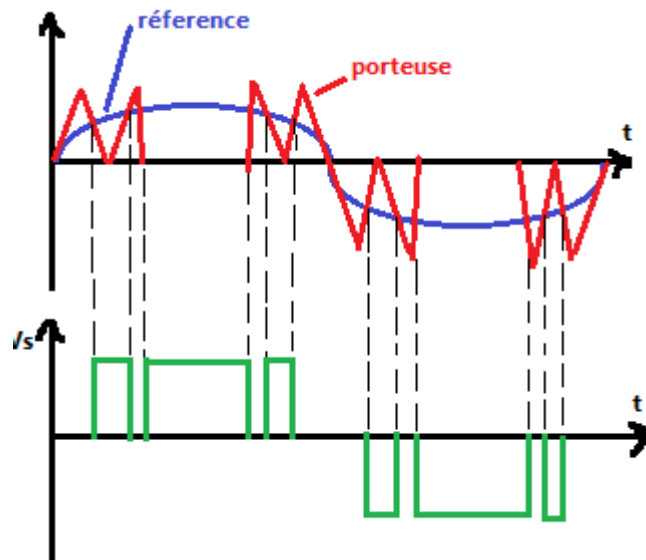


Figure II.8 : MLI sinusoïdale modifié [22]

II.7. MLI de Vectorielle

La modulation vectorielle est un algorithme de contrôle de la modulation de largeur d'impulsion pour un onduleur triphasé. Cette technique est utilisée principalement dans les machines électriques et surtout pour l'entraînement des machines asynchrones.

II.7.1. Principe de base de SVPWM :

La MLI vectorielle, ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. L'objectif de cette technique consiste est d'approcher le vecteur de tension de référence V_{ref} en utilisant les huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur [24]. La figure ci-dessous représente un onduleur triphasé avec trois bras de commutation $K_1, K_2, K_3, \dots, K'_3$. La SVPWM fonctionne sur le principe que lorsque l'interrupteur supérieur est ouvert l'interrupteur inférieur doit être obligatoirement fermé dans le même bras.

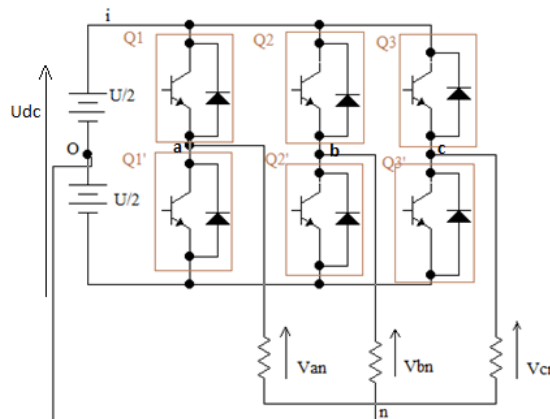


Figure II.9 : Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

Les vecteurs de tensions composés sont donnés en fonction des points a, b, c dans la matrice ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Dans ce modèle, si la tension triphasée idéale Nous avons:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_m \sin(2\pi f_m t) \\ V_{bn} &= V_m \sin(2\pi f_m t - 2\pi/3) \\ V_{cn} &= V_m \sin(2\pi f_m t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

II.7.2. Transformation de Clarcke :

Afin de simplifier les calculs on remplace le système triphasé de trois tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} par un système diphasé.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

II.7.3. Les configurations possibles:

Les composantes V_d et V_q sont considérés comme la projection du vecteur V_{ref} .

Avec :

$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad \text{Et} \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_q}{V_d}\right) \quad (\text{II.9})$$

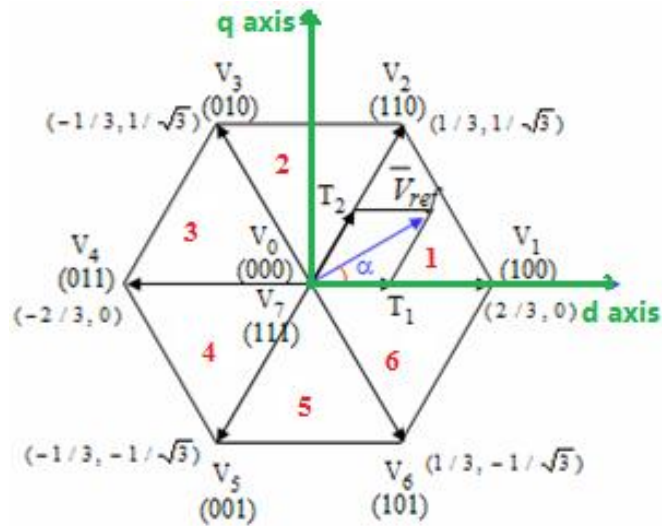


Figure II.10 : Les huit configurations possibles [25]

Il existe 8 combinaisons possibles 2^3 pour les bras de l'onduleur avec six non nuls indiqué par $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$ et deux vecteurs nuls \vec{V}_0, \vec{V}_7 . On indique par (1) l'état fermé de l'interrupteur et (0) l'état Ouvert de l'interrupteur.

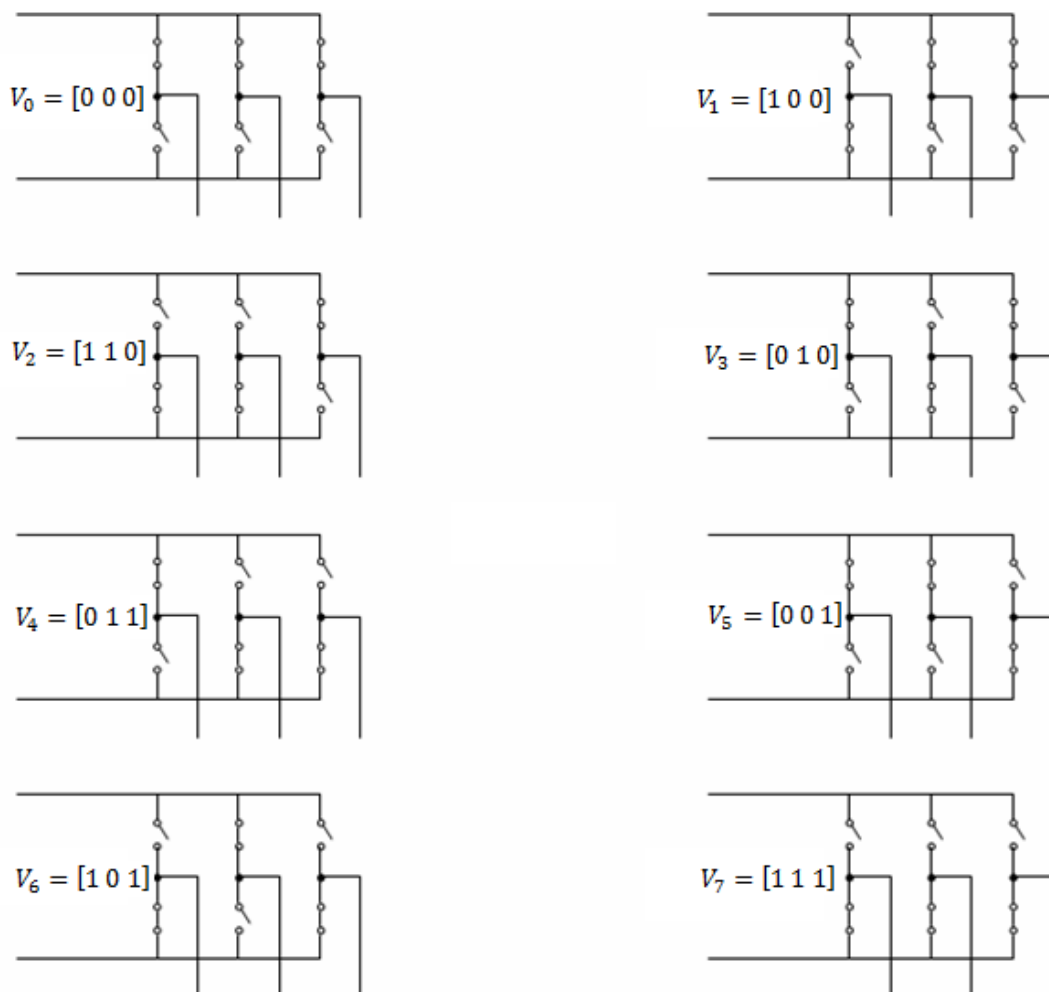


Figure II.11 : les combinaisons possibles des interrupteurs [25]

Le tableau ci-dessous représente les configurations possibles de vecteurs de tensions

Tableau (II.1) : Les combinaisons de vecteurs de tension d'un onduleur triphasé [24]

K1	K2	K3	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	Vecteur
0	0	0	0	0	0	0	0	0	\vec{V}_0
1	0	0	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	U_c	0	$-U_c$	\vec{V}_1
1	1	0	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	0	U_c	$-U_c$	\vec{V}_2
0	1	0	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$-U_c$	U_c	0	\vec{V}_3
0	1	1	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	$-U_c$	0	U_c	\vec{V}_4
0	0	1	$-\frac{U_c}{3}$	$-\frac{U_c}{3}$	$\frac{2U_c}{3}$	0	$-U_c$	U_c	\vec{V}_5
1	0	1	$\frac{U_c}{3}$	$-\frac{2U_c}{3}$	$\frac{U_c}{3}$	U_c	$-U_c$	U_c	\vec{V}_6
1	1	1	0	0	0	0	0	0	\vec{V}_7

II.7.4. Les calculs de temps de commutation des interrupteurs:

L'objectif de SVPWM est de faire l'approximation de la tension de référence V_{ref} par la combinaison des huit modèles de commutation, la tension de référence est construite entre deux états adjacents V_i et V_{i+60} de temps d'application T_i et T_{i+60} respectivement.

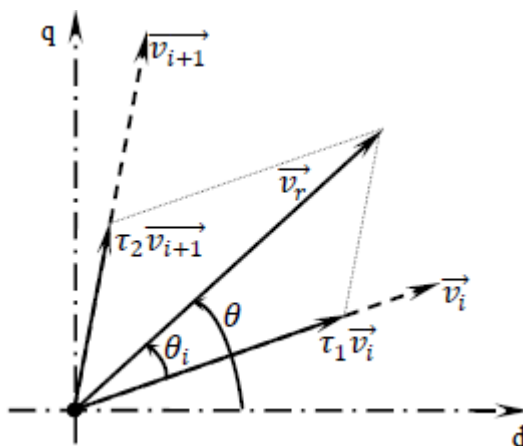


Figure II.12: La formation de la tension de référence [24]

En cas où la somme des instants d'applications des vecteurs V_i et V_{i+60} est inférieure à la période de commutation, on peut compléter en utilisant les vecteurs nuls.

$$\vec{V}_r = \tau_1 \vec{V}_i + \tau_2 \vec{V}_{i+1} + \tau_0 \vec{V}_0 + \tau_7 \vec{V}_7 \quad (\text{II.10})$$

Avec $\tau_i = \frac{T_i}{T_{com}}$

Par la projection sur les deux axes d et q

$$\begin{aligned} V_r \cos(\theta) &= \tau_1 V_i \cos\left(\frac{i\pi}{3}\right) + \tau_2 V_{i+1} \cos\left(\frac{(i+1)\pi}{3}\right) \\ V_r \sin(\theta) &= \tau_1 V_i \sin\left(\frac{i\pi}{3}\right) + \tau_2 V_{i+1} \sin\left(\frac{(i+1)\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

On pose que :

$$\theta = \theta_i - i\pi/3$$

$$\begin{aligned} V_r \cos(\theta_i) &= \tau_1 V_i \cos(0) + \tau_2 V_{i+1} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ V_r \sin(\theta_i) &= \tau_1 V_i \sin(0) + \tau_2 V_{i+1} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Après calcul et simplification on peut obtenir :

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{V_r \cos(\theta_i) - \tau_2 V_{i+1} \frac{1}{2}}{V_i} \\ \tau_2 &= \frac{V_r \sin(\theta_i)}{V_{i+1} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

Ces équations nous permettent d'avoir les instants de commutation des interrupteurs :

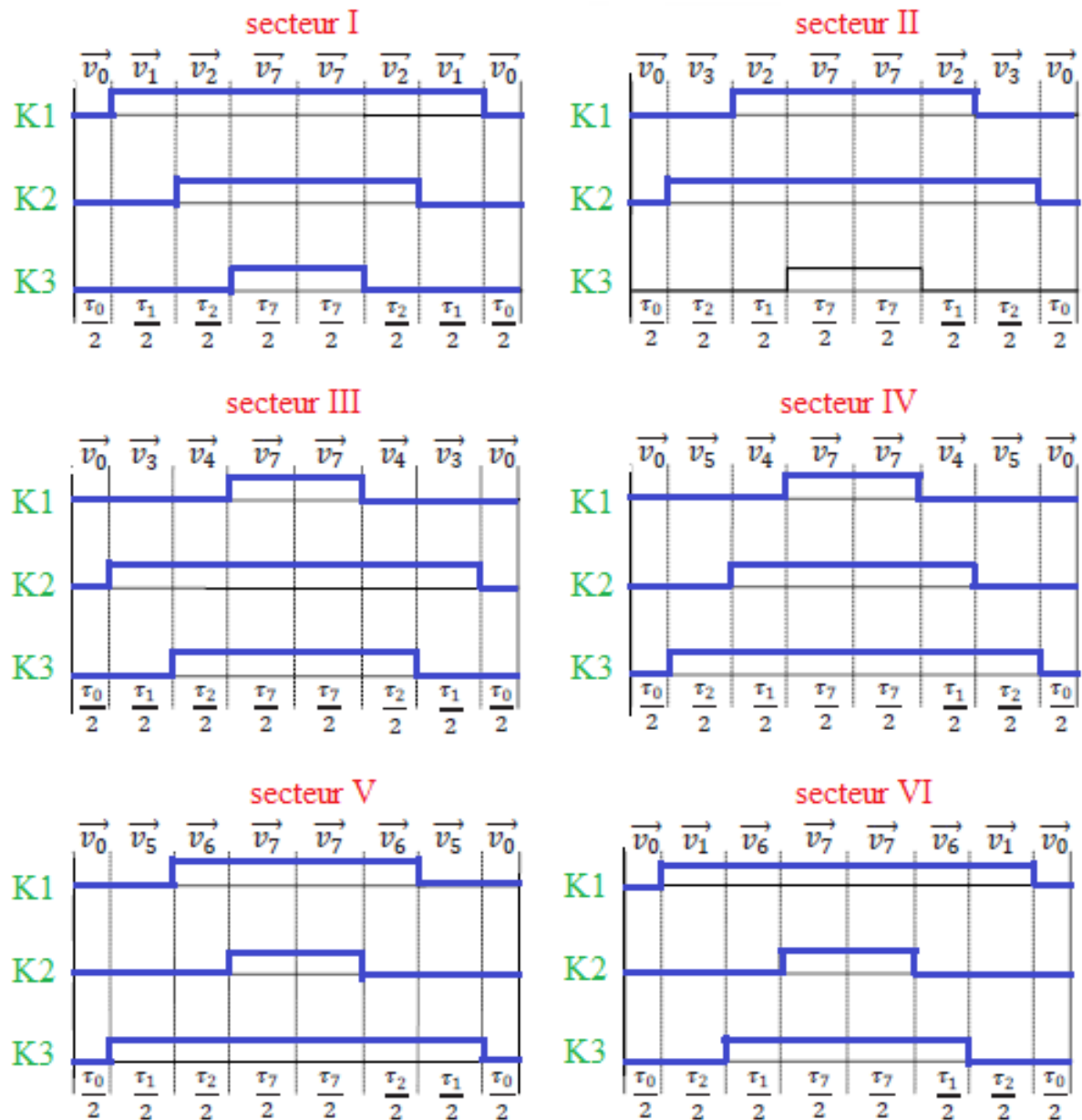


Figure II.13 : Les périodes de commutation des interrupteurs [25]

II.8. Principaux avantages de la MLI

- Une bonne élimination d'harmonique par rapport aux autres commandes. [19]
- Avec une même source continue la MLI permet l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones.
- La variation de la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet d'écarter vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie (le filtrage). [19]

II.9. Les inconvénients de la MLI :

- Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule et pertes par courants de Foucault).
- Elle génère des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques dans les machines tournantes des oscillations de couple.
- Elle déstabilise le système à cause de l'injection du bruit sur la commande. [19]

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de base de MLI et leurs caractéristiques ainsi que les types de modulation. Les techniques de production d'onde MLI, les différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions et MLI vectorielle. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation et commande des onduleurs triphasés.

CHAPITRE III
SIMULATION ET
INTERPRETATION
DES RESULTATS

III.1.Introduction :

L'une des applications des onduleurs triphasés est la commande des machines électriques et principalement les machines asynchrones. Les progrès en coût et en performances par les interrupteurs de puissance, ont permis à ce convertisseur de s'imposer. La modulation de largeur d'impulsion consiste à commander les interrupteurs de manière à délivrer au moteur une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives et modulées en largeur.

Dans ce chapitre tous d'abord on s'intéresse à la modélisation de la machine asynchrone, puis nous exposons les différents résultats obtenus par la simulation des différents techniques de commande des onduleurs et à la fin nous terminons par une comparaison des différents techniques de commande des onduleurs.

III.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de développer un modèle permettant une bonne description de la dynamique de la machine asynchrone, qui est employé dans les étapes de conception et de mise en oeuvre des stratégies de commande, il faut admettre comme approximation les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les circuits magnétiques ne sont pas saturés et sont parfaitement feuilletés.
- Seuls les enroulements sont parcourus par des courants, dont la densité est supposée uniforme dans la section des conducteurs. (L'effet pelliculaire est négligeable)
- La répartition des forces magnétomotrices dans l'espace est sinusoïdale. On ne tiendra compte, par conséquent, que de l'harmonique fondamentale.

III.3. Modélisation de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone est une machine électrique qui transforme une puissance électrique en une puissance mécanique. Elle comporte deux grandes parties, l'une immobile appelée stator qui porte l'enroulement triphasé ainsi une partie mobile tournant appelé rotor qui peut être bobiné à cage d'écureuil [25].

III.3.1. Equations électriques de la MAS :

La figure ci-dessous représente le modèle de la machine asynchrone avec les enroulements statoriques et rotoriques.

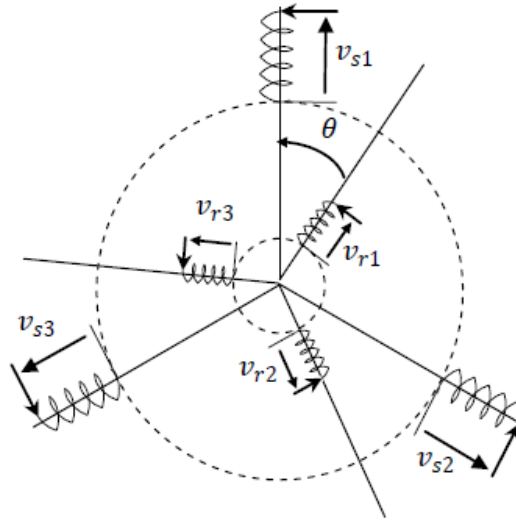


Figure III.1: Les enroulements du STATOR et ROTOR [26]

Les équations électriques aux bornes du stator :

$$\begin{cases} V_{s1} = R_s i_{s1} + \frac{d}{dt} (\Phi_{s1}) \\ V_{s2} = R_s i_{s2} + \frac{d}{dt} (\Phi_{s2}) \\ V_{s3} = R_s i_{s3} + \frac{d}{dt} (\Phi_{s3}) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Ces équations peuvent être écrites sous forme matricielle:

$$[V_s] = R_s [i_s] + \frac{d}{dt} ([\Phi_s]) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$[\Phi_s] = L_s [i_s] + M_{rs} [i_r] \quad (\text{III.3})$$

Les équations électriques aux bornes du rotor :

$$\begin{cases} V_{r1} = R_r i_{r1} + \frac{d}{dt} (\Phi_{r1}) \\ V_{r2} = R_r i_{r2} + \frac{d}{dt} (\Phi_{r2}) \\ V_{r3} = R_r i_{r3} + \frac{d}{dt} (\Phi_{r3}) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Ces équations peuvent être réécrites sous forme matricielle comme suit:

$$[V_r] = R_r [i_r] + \frac{d}{dt} ([\Phi_r]) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$[\Phi_r] = L_r [i_r] + M_{sr} [i_s] \quad (\text{III.6})$$

➤ Transformation triphasé/diphassé :

La matrice $P(\theta_s)$ permet le passage des composantes du système triphasé du stator vers les composantes diphassé. Afin de simplifier les calculs.

$$\begin{bmatrix} x_{sd} \\ x_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta_s) \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

On applique aussi la transformation de PARK pour remplacer les enroulements rotoriques par seulement deux enroulements sur les axes (d) et (q), afin de simplifier les calculs.

$$\begin{bmatrix} x_{rd} \\ x_{rq} \end{bmatrix} = P(\theta_r) \begin{bmatrix} x_{r1} \\ x_{r2} \\ x_{r3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{r1} \\ x_{r2} \\ x_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Les équations (III.9) et (III.10) représentent les transformés de PARK inverses du système diphassé au système triphasé.

Au stator :

$$\begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \end{bmatrix} = P^T(\theta_s) \begin{bmatrix} x_{sd} \\ x_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Et au rotor :

$$\begin{bmatrix} x_{r1} \\ x_{r2} \\ x_{r3} \end{bmatrix} = P^T(\theta_r) \begin{bmatrix} x_{rd} \\ x_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

En appliquant la transformation de Park aux équations (III-1) à (III-4), on obtient les équations suivantes:

- Equations électriques au stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

- Equations électriques au rotor:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

III.3.2. Choix du référentiel (d. q) :

Une grandeur triphasée peut s'exprimer dans différents référentiels :

- Référentiel lié au stator (S).
- Référentiel lié au rotor (R).
- Référentiel lié au champ tournant (T).

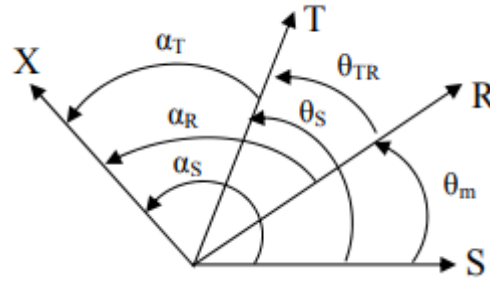


Figure III.2: Position des systèmes d'axes [27]

On a :

$$X_{(T)} = X e^{j\alpha_T} \text{ dans le référentiel lié au champs tournant (T),}$$

$$X_{(S)} = X e^{j\alpha_S} \text{ dans le référentiel lié au stator (S),}$$

$$X_{(R)} = X e^{j\alpha_R} \text{ dans le référentiel lié au rotor (R).}$$

les expressions de changement du référentiel sont :

- changement de (S) vers (T) :

$$X_{(T)} = X_{(S)} e^{j\theta_S} \quad \text{avec} \quad \theta_S = \alpha_S - \alpha_T$$

- changement de (R) vers (T) :

$$X_{(T)} = X_{(R)} e^{j\theta_{TR}} \quad \text{avec} \quad \theta_{TR} = \alpha_R - \alpha_T$$

- changement de (S) vers (R) :

$$X_{(R)} = X_{(S)} e^{j\theta_m} \quad \text{avec} \quad \theta_m = \alpha_S - \alpha_R$$

III.3.3. Equations mécanique

En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine asynchrone, l'équation mécanique est donnée par :

$$\frac{J}{p} \frac{d(\omega_m)}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{III.13})$$

Où :

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

C_r : Couple résistant.

C_f : Couple de frottement.

Le couple de frottement est donné par:

$$C_f = \frac{K_f}{p} \omega_m \quad (\text{III.14})$$

Avec :

K_f : coefficient de frottement.

Ainsi, l'équation mécanique peut être formulé par :

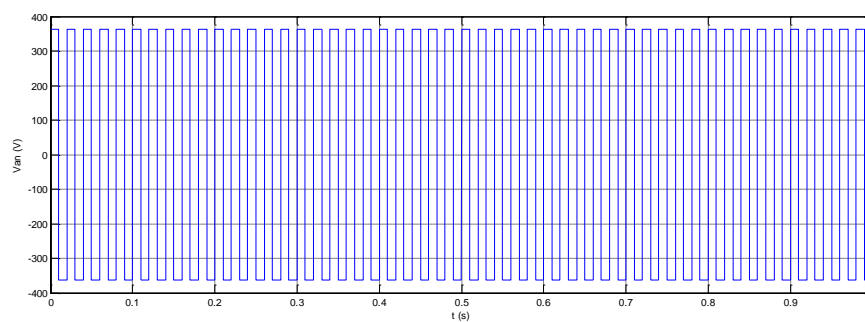
$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = p \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) - C_r - \left(\frac{K_f}{p}\right) \omega_m \quad (\text{III.15})$$

III.4.Simulation de différentes commandes appliquées à l'onduleur :

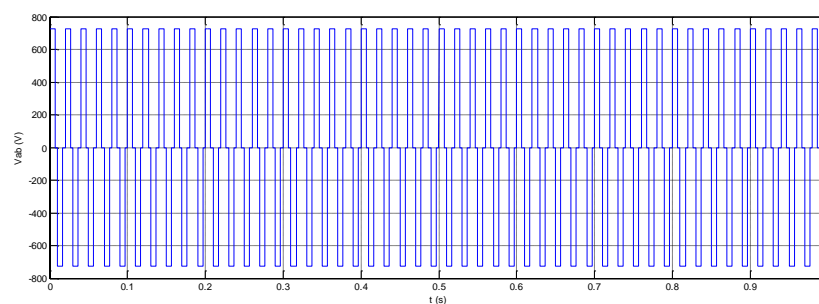
La simulation numérique est devenue à l'heure actuelle le moyen privilégié pour l'étude, des systèmes complexes. Il s'agit d'un outil puissant pour vérifier la validité de la conception durant ces premières étapes. Plusieurs logiciels sont utilisés pour la simulation, à cet effet nous utilisons le logiciel (Simulink/Matlab) pour la simulation de différentes techniques de commandes des onduleurs appliqués à une machine asynchrone.

III.4.1.Commande 180°:

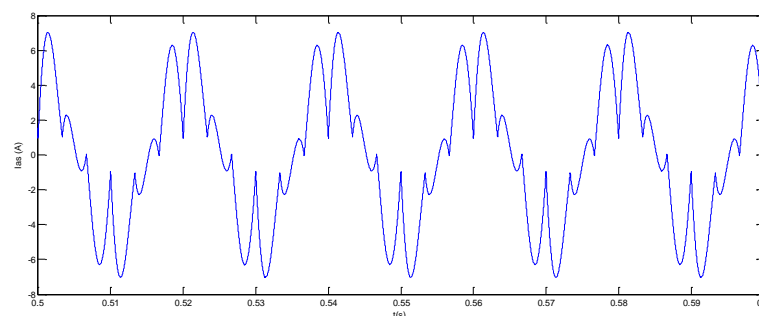
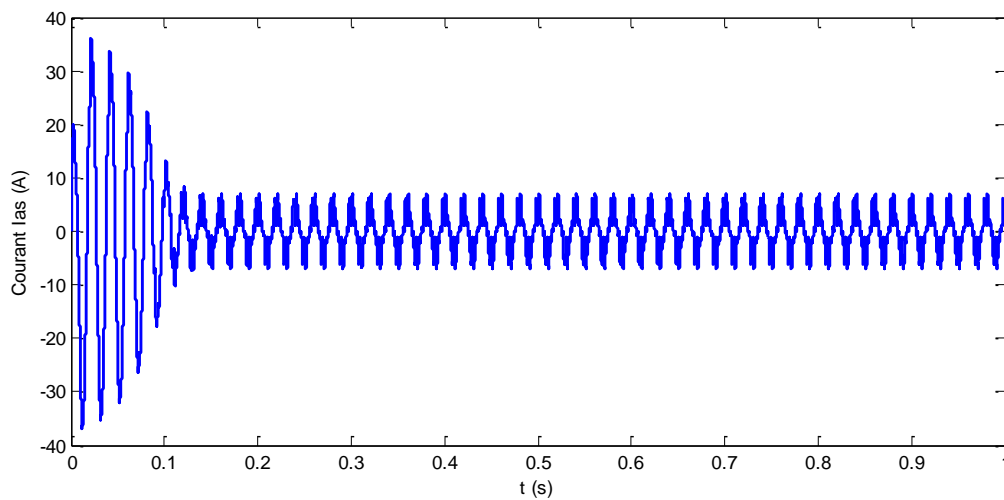
La simulation de la commande 180° nous permet d'avoir les résultats des sorties de l'onduleur. On représente la tension simple dans les figures ci-dessous ainsi la tension composée.



(a)



(b)

Figure III.3: Les allures de la tension simple V_{an} et composée V_{ab} Figure III.4: Le courant statoriques I_{as} dans la phase (a)

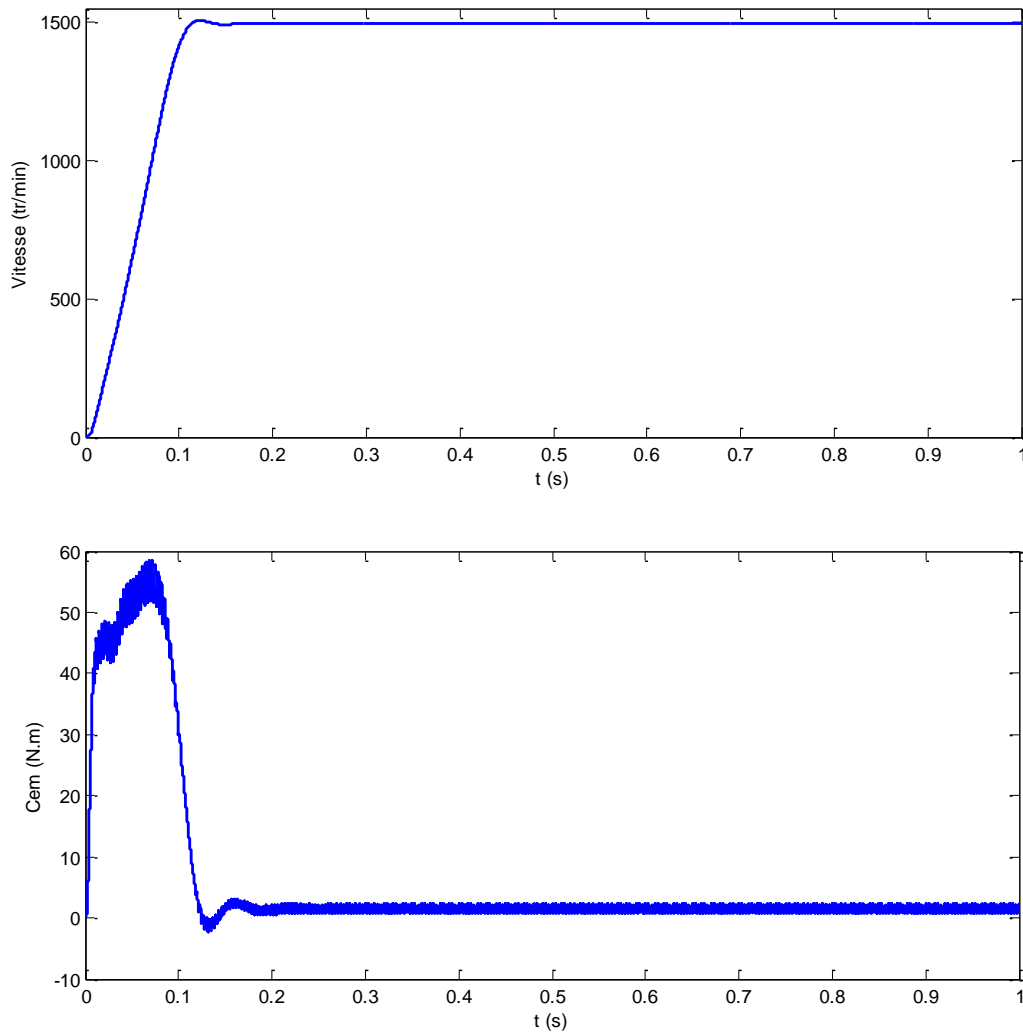
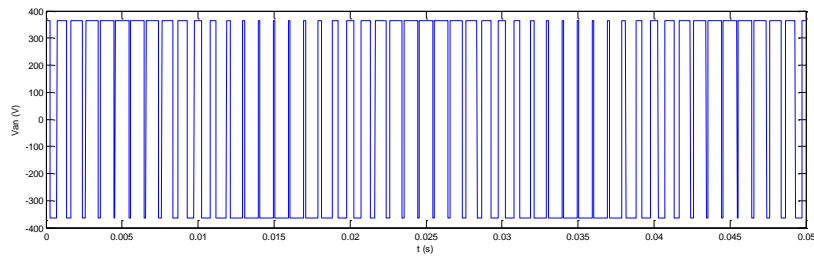


Figure III.5: La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$

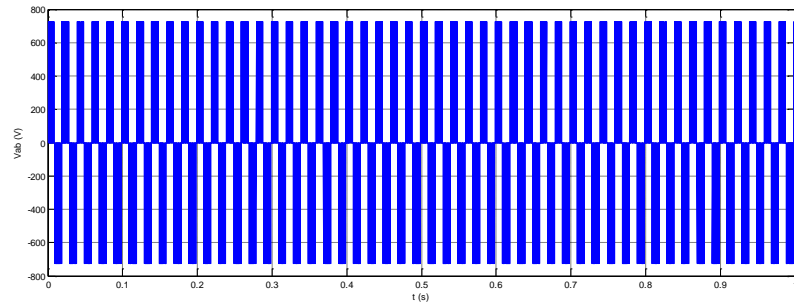
Les figures (III.4) et (III.5) montrent l'évolution de la tension, la vitesse, du couple électromagnétique et du courant de ligne I_{as} lors d'un démarrage à vide de la machine asynchrone alimentée en tension. On constate que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine.

III.4.2. Commande sinus triangulaire :

La simulation de la commande MLI sinus triangulaire nous permet d'avoir les résultats de sortie de l'onduleur. On représente la tension simple dans les figures ci-dessous ainsi la tension composée.



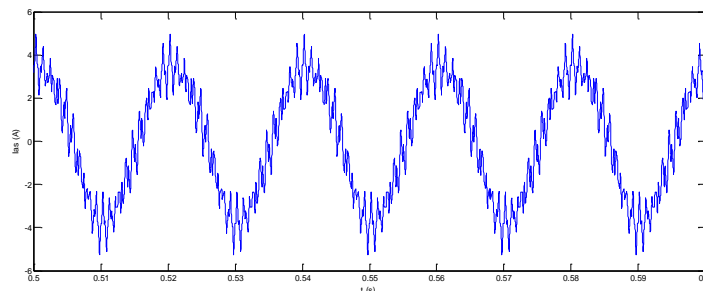
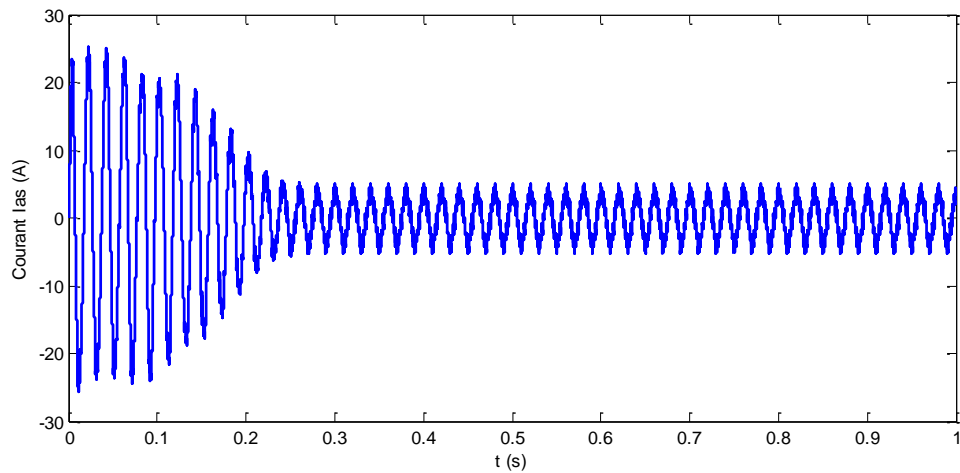
(a)



(b)

Figure III.6 : Les allures de la tension simple V_{an} et composée V_{ab}

La simulation numérique de l'association convertisseur statique – MAS est donnée aux figures (III-7) et (III-8).

Figure III.7 : Le courant statorique $I_{as}(t)$ dans la phase (a)

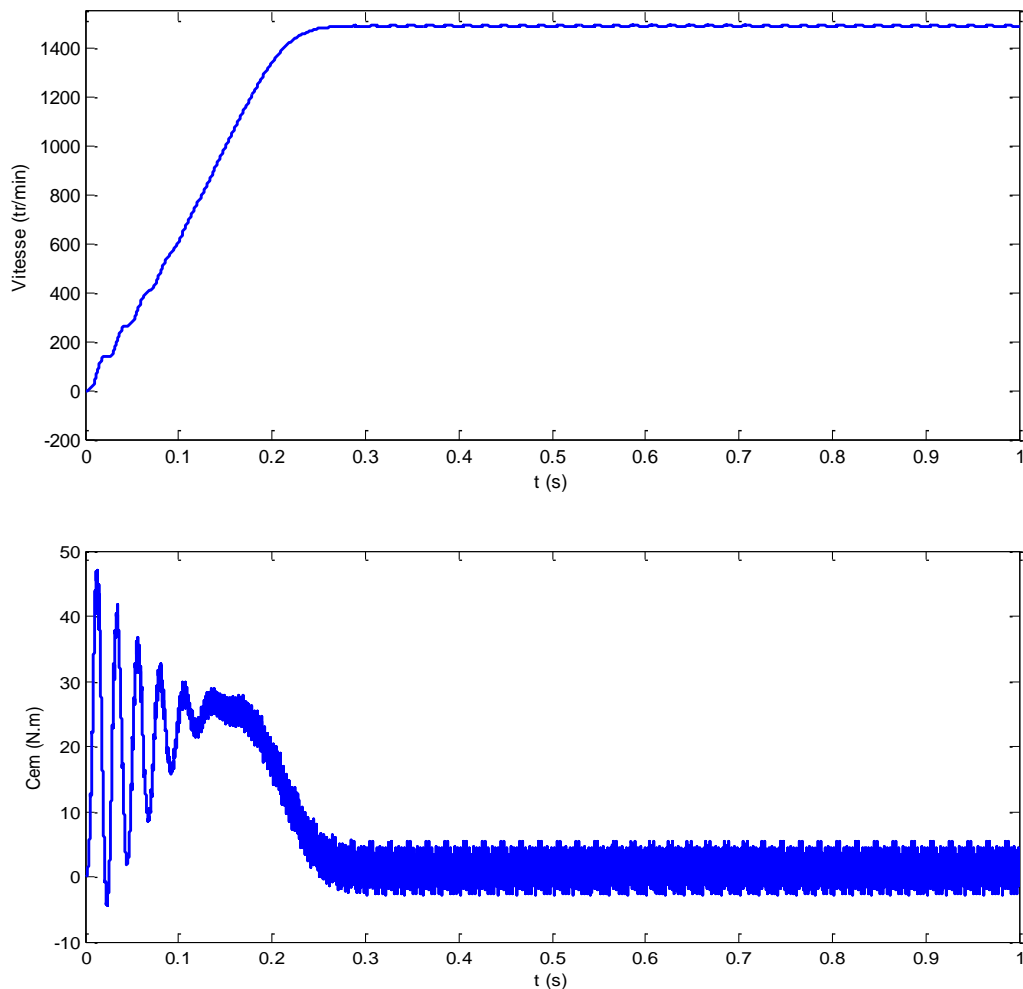
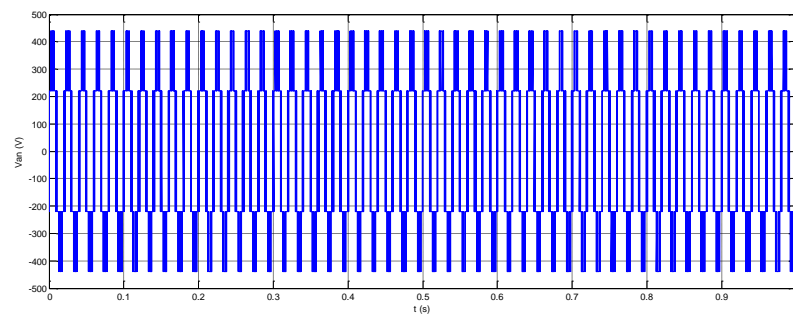


Figure III.8 : La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$

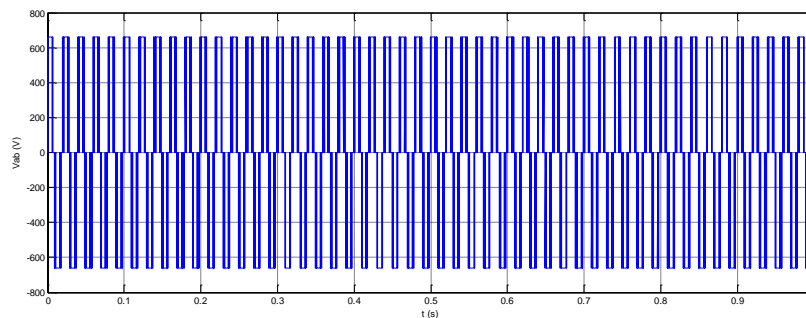
- Le démarrage de la MAS demande un fort courant qui est égal à 3 fois le courant nominal. En effet, il se stabilise après $t=0.25s$ avec un courant sinusoïdal à vide d'amplitude constante (régime permanent).
- La croissance de la vitesse $w(t)$ est effectuée dans un temps $t=0.25s$, pour établir une valeur de 1492 tr/min proche de la vitesse de synchronisme dans le régime permanent.
- En régime permanent le couple électromagnétique $C_{em}(t)$ est nul car la MAS n'est pas chargée.
- l'évolution vers le point de fonctionnement du moteur asynchrone est montrée par les caractéristiques mécaniques.

III.4.3. La commande SVPWM :

On passe finalement à la simulation de la commande MLI vectorielle, tout d'abord on visualise la tension simple et composée obtenus par cette commande.



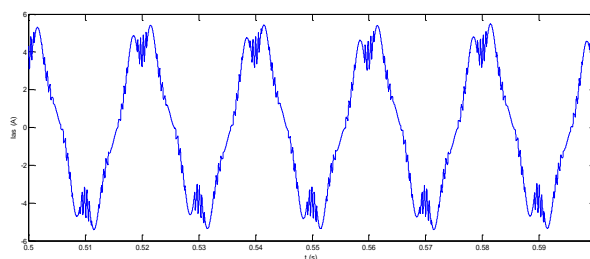
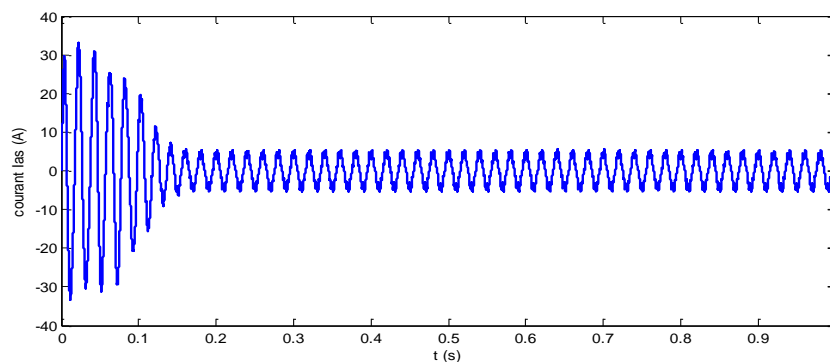
(a)



(b)

Figure III.9 : La tension simple V_{an} et composée V_{ab}

Lors de la réussite de la simulation de la commande, on peut donc alimenter la MAS directement à partir de l'onduleur et vérifier l'influence sur la machine par rapport aux autres techniques de commandes.

Figure III.10 : Le courant statoriques I_{as}

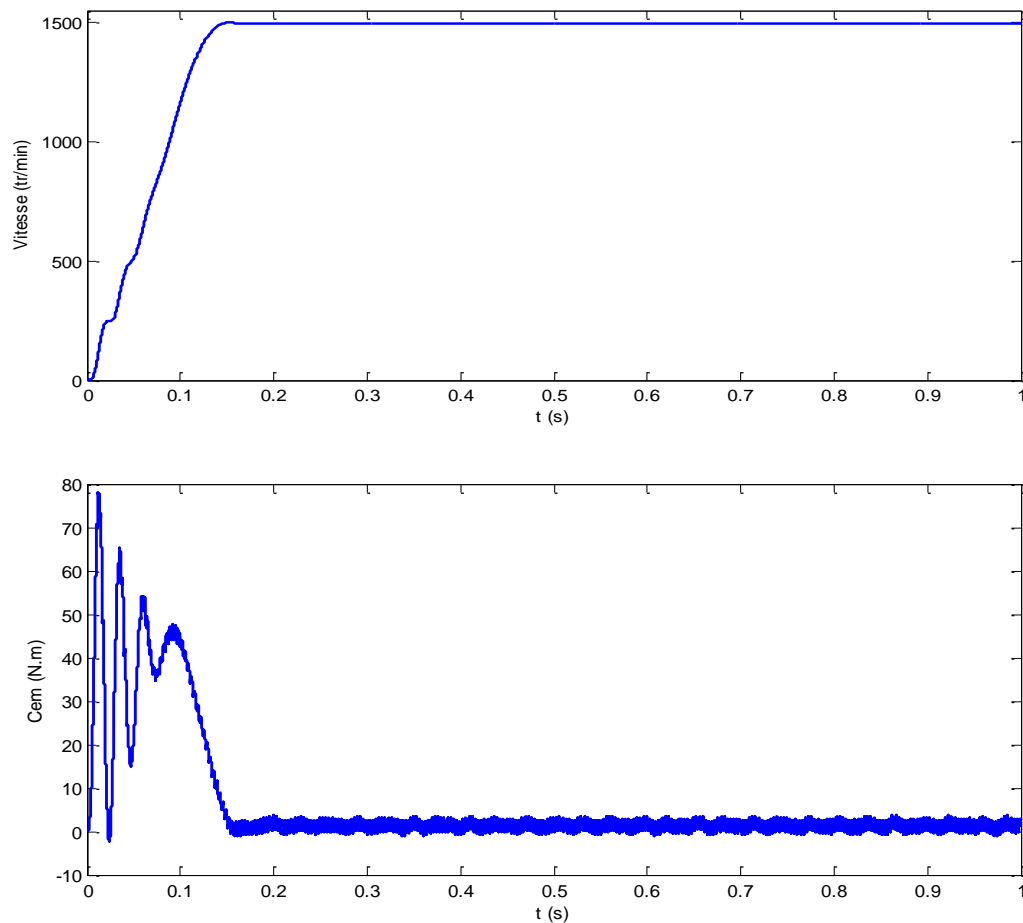


Figure III.11: La vitesse de la MAS $w(t)$ et le couple électromagnétique $C_{em}(t)$

Pour cette commande on a obtenu :

- Un courant de démarrage très supérieur toujours au courant nominale, mais pour cette commande la valeur de courant de démarrage est supérieur par rapport aux autres commandes précédentes.
- La vitesse du système oscille dans le régime transitoire puis se stabilise dans le régime permanent vers une valeur environ de 1492 tr/min.
- Il faut noter que les oscillations du couple instantané lors de la mise sous tension, à la fin de la phase de démarrage, le couple s'annule puisque la machine n'est pas chargée.
- On note que le régime permanent pour cette commande commence à partir du 0.2s.

III.5. Comparaison entre les différentes commandes :

Afin de comparer les performances de chaque commande. Il faut analyser tout d'abord le THD obtenus de la sortie de chaque commande.

• **La commande 180° :**

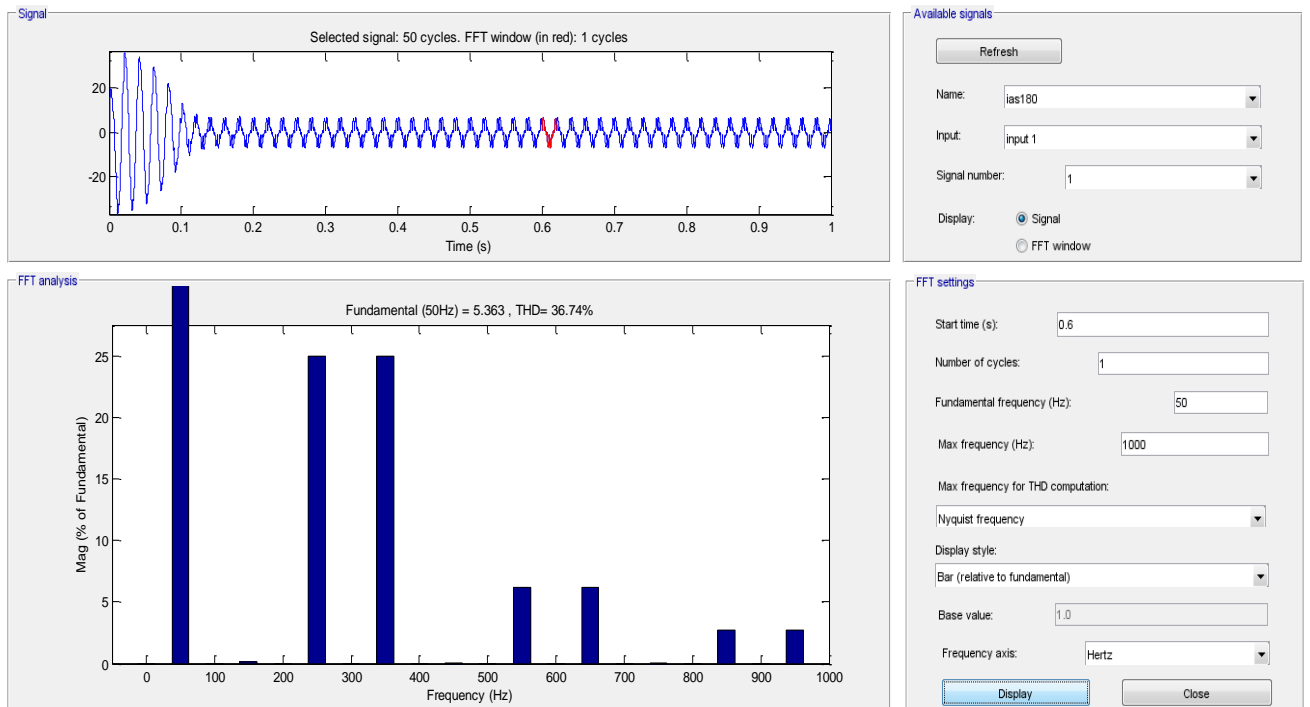


Figure III.12: THD de la commande 180°

• **La commande Sinus triangulaire :**

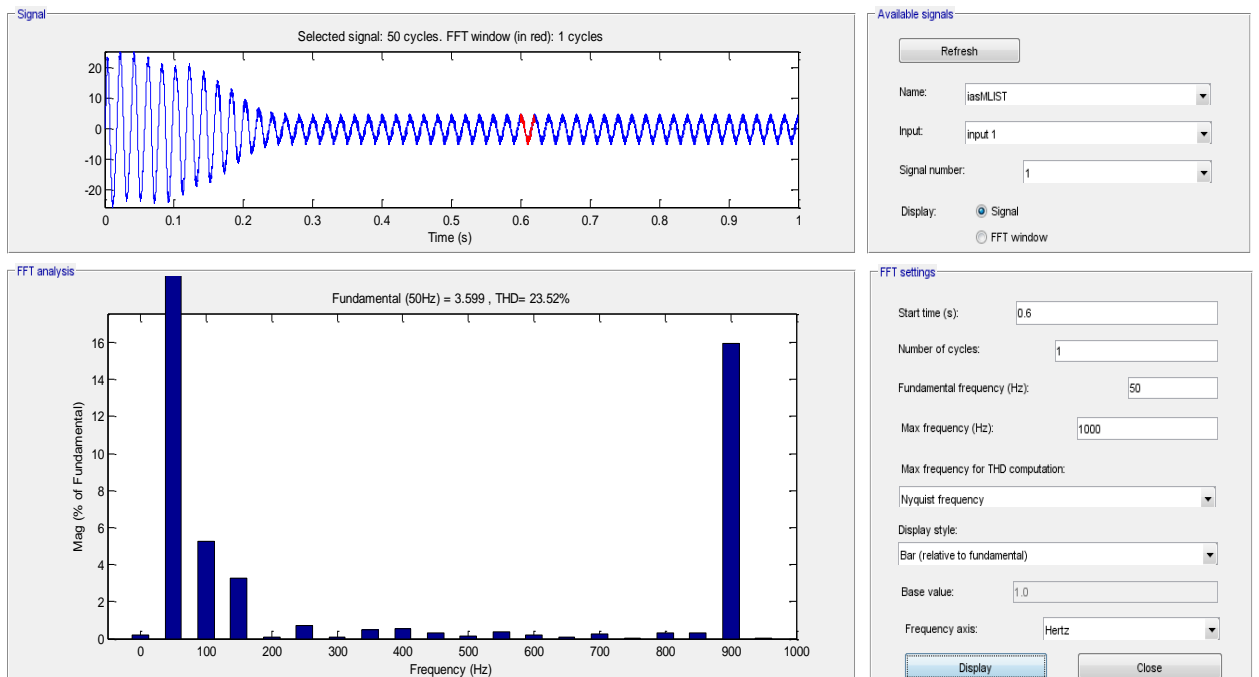


Figure III.13: THD de la commande Sinus triangulaire

- **La commande SVPWM :**

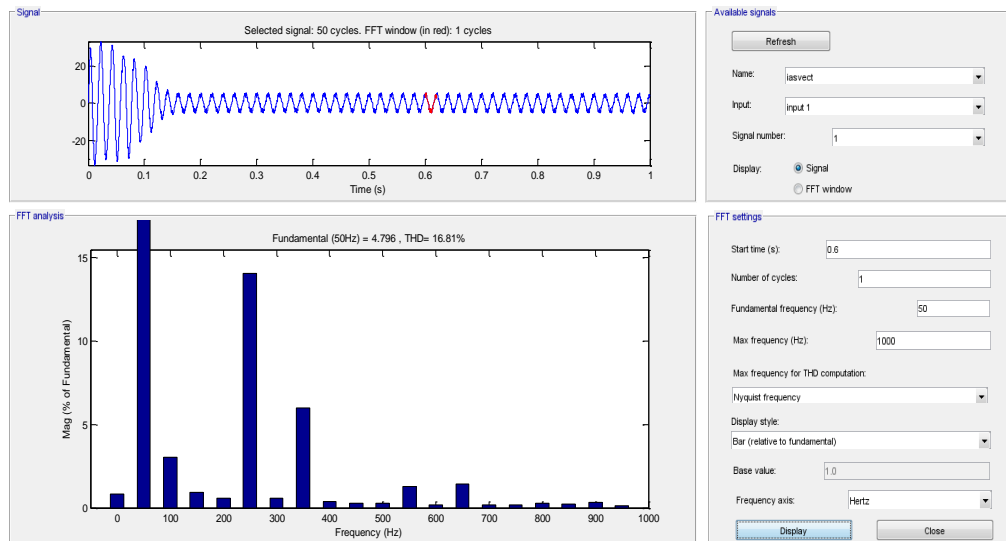


Figure III.14: THD de la commande MLI vectorielle

Le tableau ci-dessous montre une comparaison du spectre d'harmonique du courant obtenu à la sortie de la machines asynchrone.

Tableau (III.1) : Comparaison des différentes commandes

Type de commande	THD de courant (%)
180°	36.74
Sin-triangulaire	23.52
SVPWM	16.81

Nous remarquons d'après ce tableau que la commande SVPWM représente un faible THD et donc des meilleures performances pour la machine asynchrone. Par contre pour la commande 180° qui présente THD le plus élevé ce qui implique plus des pertes, plus échauffement de la machine.

III.6.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un MAS. Nous avons appliqué trois commandes 180°, MLI sinus-triangulaire et MLI vectorielle pour les onduleurs triphasés utilisés pour la conduite d'une machine asynchrone.

Les résultats de la simulation montrent que la technique MLI vectorielle est capable de produire de l'onde sinusoïdale de bonne qualité, avec un faible THD.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude des différentes stratégies de commande d'un onduleur triphasé, où l'objectif est de trouver la stratégie qui donne les meilleures performances.

Au premier lieu, une étude bibliographique a permis de rappeler les théories sur le principe de fonctionnement des onduleurs monophasés et triphasés et leurs commandes et ainsi que leurs domaines d'application.

En second lieu, nous avons étudié les différentes techniques de commande en modulation de largeur d'impulsion de l'onduleur triphasé, quelques avantages et inconvénients de la commande MLI.

Au dernier lieu, nous avons consacré notre travail à la modélisation de la MAS et à la simulation des multiples commandes 180° , MLI sin-triangle et MLI vectorielle, avec MATLAB.

Enfin, l'étude des caractéristiques de la MAS, pour les différentes stratégies de commande, a montré que la stratégie de la commande vectorielle présente un taux de distorsion harmonique THD faible par rapport aux autres stratégies.

Comme perspectives nous proposons la réalisation pratique de la commande SVPWM. Ainsi le développement d'une stratégie de commande plus performante, et d'étendre le nombre de niveaux de l'onduleur à un nombre plus élevé.

BIBLIOGRAPHIE

Les références bibliographiques

- [1] Mr. MOUSSOUNI Nasser Eddine et OUADFEL Sofiane. Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé. Mémoire de master. Université de Bejaia.2017.
- [2] Hamane Bekhada. Commande pleine onde des onduleurs association avec une machine asynchrone. Mémoire de mgister. Ecole normale superieure d'enseignement technique- Oran. 2009
- [3] ABBASSEN Lyes. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de magister. Université de TIZI OUZOU. Mai 2011
- [4] <http://www.autokonso.com/content/41-onduleur-autonome> (consultés le 03 avril 2019).
- [5] BOUCHERITTE Wafa. Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau. Mémoire de magister. Université de Biskra.
- [6] MECHERI Salah-eddine. Réalisation d'un onduleur de tension monophasé contrôlé par une carte arduino. Mémoire de master. Université de Constantine.2014.
- [7] <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html> (consultés le 05 avril 2019).
- [8] BENMIRA Hassan. implantation de la commande vectorielle spatiale dans un circuit dédiée. Université du Québec. Janvier 2003.
- [9] CHETTIH Kheireddine. Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant. Mémoire d'ingénieur. *Universite de Constantine*. Juin 2015
- [10] AARIDDA Nabil .Etude et simulation des étages DC-DC et DC-AC d'un onduleur photovoltaïque. Mémoire de master. Juin 2014.
- [11] BARRADE Philippe. Livre d'Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires. Edition 2006.

Les références bibliographiques

- [12] HIDRI Imed. Cour d'électronique de puissance les convertisseurs DC-DC et DC – AC .Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.
- [13] BOUKAROURA Abdelkader. Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph. Mémoire de magister. Université de Sétif. Décembre 2009.
- [14] http://physiquejv1.free.fr/Documents/STS2/Cours/Source/Cours_STS2_13_Onduleurs.doc (consultés le 12 avril 2019).
- [15] LAKEHAL B. Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi niveaux. Mémoire de master. Université de Bejaia . 2015
- [16] Guide pratique. L'onduleur, Pourquoi ? Comment ? Explications
- [17] ADJIMI Nadia et BELAIDI Wahiba. Modélisation et commande d'un onduleur MLI. Mémoire de master. Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi.2009
- [18] BERREZZEK Farid. Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone. Mémoire de magister. Université d'Annaba.2006
- [19] BENSALAH Wassila et BOUTALEB Nour el Houda. Etude de la commande des redresseurs MLI. Mémoire de master. Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.2016
- [20] BOUSEHABA Moussa. Réalisation d'une commande mli à choix multiple. Mémoire de master. Université de Tlemcen.2017
- [21] MERABET Kamel. Commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée. Université du québec. 2011
- [22] BENMIRA Hassan. Implantation de la commande vectorielle spatiale dans un circuit dédié. Université du québec. 2003
- [23] MERHOUM Amina. Optimisation Des Techniques De MLI Pour Les Equipements FACTS A Base D'onduleur. Memoire de magister. Université d'Oran.2013

Les références bibliographiques

- [24] KERBOUA Abdelfettah. Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique. These de doctorat. Université de Sidi bel abbes.
- [25] BOUDRIES Zoubir. Cour de commande des machines électriques. Université de Bejaia
- [26] KERBOUA Abdelfettah. Cour de modélisation des machines électriques. Ecole supérieure en sciences appliquées Tlemcen.2018

ANNEXE

Les annexes

Les paramètres de la machine asynchrone :

Les paramètres	Les valeurs	Les unités
R_s	4.85	Ω
R_r	3.805	Ω
L_s	274×10^{-3}	H
L_r	274×10^{-3}	H
M_{sr}	258×10^{-3}	H
P	2	
f	0.008	N.m/s
J	31×10^{-3}	Kg.m^2

RESUME :

Les onduleurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications industrielles qui nécessitent des performances supérieures. Ces variateurs de vitesse doivent être dotés de commande sophistiquée afin d'améliorer la qualité de la forme d'onde ainsi réduire le contenu harmonique dans la sortie. A cet effet on procède aux différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion qui sont utilisées pour les différentes applications. Ce mémoire présente une vue d'ensemble des commandes des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone, les résultats de la simulation sont obtenus en utilisant l'environnement du calcul MATLAB / Simulink pour l'efficacité de notre travail.

ABSTRACT:

Three-phase PWM inverters are increasingly used in many industrial applications that require superior performance. These drives must have sophisticated control to improve the quality of the waveform and reduce the harmonic content in the output. For this purpose we proceed to different pulse width modulation techniques that are used for different applications. This memory presents an overview of the inverter PWM controls associated with an asynchronous machine, the results of the simulation are obtained using the MATLAB / Simulink calculation environment for the efficiency of our work.

ملخص

يتم استخدام محولات PWM ثلاثية الطور بشكل متزايد في العديد من التطبيقات الصناعية التي تتطلب أداءً فائقاً. يجب أن يكون لمحركات الأقراص هذه تحكم متطور لتحسين جودة الشكل الموجي وتقليل المحتوى التوافقي في الإخراج. لهذا الغرض ، ننتقل إلى تقنيات تعديل عرض النبضة المختلفة المستخدمة في التطبيقات المختلفة. تقدم هذه الذاكرة نظرة عامة على أدوات التحكم في العاكس PWM المرتبطة بجهاز غير متزامن ، ويتم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام بيئة حساب MATLAB / Simulink من أجل كفاءة عملنا.