

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

Etude et simulation des convertisseurs DC/AC

Réalisé par :

- BEKAKRA Laroussi
- BEN AMARA Mohammed seghir
- GHERBI Brahim
- LAMAMRA Abdel malek

Encadré par :

- Dr. GUERFI Youcef

Soutenu le 13-06- 2022 Devant le jury:

M. Mosbah louamer

MCA

Président

M. benamor afaf

MAA

Rapporteur

M.Djokhrab ala eddine

MAA

Rapporteur

Année Universitaire 2021/2022



﴿ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ
عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا رَبَّنَا وَلَا تُحَمِّلْنَا مَا لِ طَاقَةِ لَنَا بِهِ وَاعْفُ عَنَّا وَاعْفِرْ لَنَا
وَارْحَمْنَا أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ الْكَافِرِينَ ﴾ سورة البقرة : الآية 286 .

" صدق الله العظيم "



Remerciements


Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur
Dr : GUERFI Youcef, Docteur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued,
pour avoir dirigé ce travail.*

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.



**الملخص résumé Abs
tract**

Résumé:

L'objectif de ce travail est de contrôler la machine asynchrone avec un onduleur de tension triphasé et un onduleur de tension monophasé. On a présenté la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone. Nous avons validé la simulation numérique de système dans l'environnement *MATLAB / SIMULINK*, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenus. On a établi différentes techniques de commande des onduleurs telle que la commande 180° (plein onde), la commande 120° (décalée) et la commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Grâce à cette technique la commande, on peut faire varier la vitesse de rotation de la machine asynchrone.

Mots clés: La machine asynchrone, Onduleur, les Convertisseurs, la commande MLI, courant alternatif.

Abstract:

The objective of this work is to control the asynchronous machine with a three-phase voltage inverter and a single-phase voltage inverter. Where we presented the modeling of the power supply of the asynchronous machine. We have validated the numerical system simulation in the *MATLAB / SIMULINK* environment, as well as the description and discussion of the results obtained. Different inverter control techniques have been established such as 180° control (full wave), 120° control (offset) and pulse width modulation (*PWM*) control. Thanks to this control technique, the rotational speed of the asynchronous machine can be varied.

Keywords: Asynchronous machine, Inverter, Converters, PWM control, alternating current.

المخلص:

الهدف من هذا العمل هو التحكم في الآلة غير المتزامنة بموج توتر ثلاثي الطور و آخر أحادي الطور حيث قدمنا نمذجة للآلة غير المتزامنة. قمنا بالتحقق من صحة المحاكاة العددية للنظام في بيئة *MATLAB / SIMULINK* ، بالإضافة إلى الوصف ومناقشة النتائج التي تم الحصول عليها. تم إنشاء تقنيات مختلفة للتحكم في المموج مثل التحكم 180° درجة (موجة كاملة) ، تحكم 120° درجة (إزاحة) والتحكم في تعديل عرض النبض (*PWM*). بفضل هذه التقنية ، يمكن أن يغير عنصر التحكم سرعة دوران الآلة غير المتزامنة

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة، عاكس، محولات، تحكم MLI، تيار متردد.



Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

a

CHAPITRE I :Etat de l'art du système	
I.1.Introduction	4
I.2.Généralités sur les Onduleurs	4
I.2.1.Définition de l'onduleur	4
I.2.2.Types d'onduleurs	5
I.2.2.1.Onduleur autonome	5
I.2.2.2.Onduleur non autonomes(ou assistés)	6
I.2.2.3.Onduleur à résonance	7
I.3.Onduleur de tension	8
I.4.Onduleurs de courant	8
I.4.1.Le principe de fonctionnement	9
I.5.Onduleur monophasé	9
I.5.1.Montages pratiques	10
I.5.1.1.Montage en demi-pont	10
I.5.1.2.Montage en pont	11
I.6.Les onduleurs triphasés	12
I.7.Techniques de commandes appliquées à la commande d'onduleurs	12
I.7.1.Onduleur à commande pleine d'onde (commande symétrique)	12
I.7.2.Onduleur à commande décalée	13
I.7.3.Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI	13
I.7.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS)	14
I.7.3.2. Modulation vectorielle (SVM)	14
I.8. Applications des onduleurs	15
I.8.1.Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif	15
I.8.2.Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	15
I.8.3.Alimentation de secours	16

I.8.4. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	16
I.9. Généralités sur la machine asynchrone	17
I.9.1. Définition	17
I.9.2. Constitution de la machine asynchrone	17
I.9.2.1. Le Stator	18
I.9.2.2. Le Rotor	19
I.9.3. L'entrefer	19
I.9.4. Les organes mécaniques	19
I.9.5. Principe de fonctionnement	20
I.9.6. Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones	21
I.9.6.1. Avantages	21
I.9.6.2. Inconvénients	21
I.10. Conclusion	21
CHAPITRE II : Modélisation du système	
II.1. Introduction	23
II.2. Modélisation d'un onduleur monophasé	23
II.2.1. Le modèle mathématique	24
II.3. Modélisation du fonctionnement des onduleurs de tension triphasés	26
II.3.1. Structure de l'onduleur de tension triphasé	26
II.3.2. Modèle de commande de l'onduleur de tension triphasé	27
II.4. Modélisation de la machine asynchrone	29
II.4.1. Mise en équations du modèle de la machine	30
II.4.1.1. Equations électriques	30
II.4.1.2. Equations magnétiques	31
II.4.1.3. Equations mécaniques	32
II.4.2. Modèle de Park	32
II.4.3. Choix de repère d,q	34
II.4.4. Référentiel lié au champ tournant	34
II.4.4.1. Equation électriques	35
II.4.4.2. Equation mécaniques	36
II.5. Commande scalaire (Contrôle en V/f de la machine asynchrone)	36
II.6. Conclusion	37
CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats	
III.1. Introduction	39

III.2. Avantage de la simulation numérique	39
III.3. Simulation Numérique	39
III.3.1. Simulation de l'onduleur monophasé	40
III.3.1.1. Onduleur monophasé	40
III.3.1.2. Onduleur triphasé en pont	41
III.3.1.2.1. Onduleur triphasé en pont à commande 180° (en plaine onde)	41
III.3.1.2.2. Onduleur triphasé en pont à commande 120° (décalée)	42
III.3.1.2.3. Onduleur triphasé en pont à commande MLI (modulation de largeur d'impulsion)	42
III.4. Interprétation des résultats	46
III.5. Conclusion	49
Conclusion générale	51
Bibliographique	



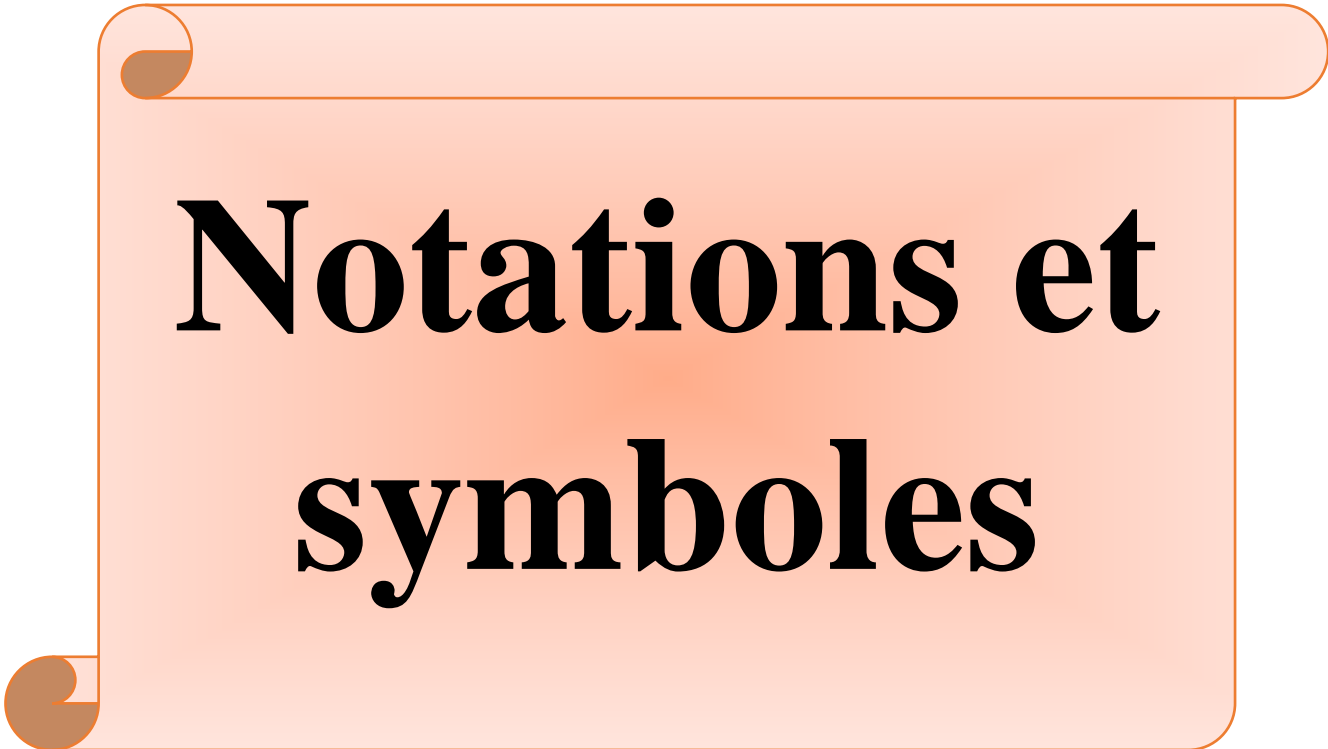
LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : Etat de l'art du système		
Figure 1	<i>Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC).</i>	5
Figure 2	<i>Alimentation sans coupure</i>	5
Figure 3	<i>convertisseur de fréquence</i>	6
Figure 4	<i>Onduleur à résonance série (Monophasée)</i>	7
Figure 5	<i>Signaux de commande et forme d'onde des tensions</i>	7
Figure 6	<i>Onduleur à résonance parallèle (Monophasée)</i>	8
Figure 7	<i>Signaux de commande et forme d'onde des courants</i>	8
Figure 8	<i>Onduleur de courant en pont monophasé, signaux de commande et forme d'onde de courants.</i>	9
Figure 9	<i>Schéma bloc représentatif d'un onduleur</i>	9
Figure 10	<i>Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé.</i>	9
Figure 11	<i>Conduction sur une demi-période</i>	10
Figure 12	<i>Fonctionnement d'un onduleur sur une période</i>	10
Figure 13	<i>Montage en demi-pont</i>	11
Figure 14	<i>Montage en pont</i>	11
Figure 15	<i>Onduleur triphasé</i>	12
Figure 16	<i>Commande en pleine d'onde (symétrique)</i>	13
Figure 17	<i>commande décalée</i>	13
Figure 18	<i>Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone</i>	15
Figure 19	<i>Alimentation de secours</i>	16
Figure 20	<i>Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes</i>	16
Figure 21	<i>Constitution de la machine asynchrone</i>	18
Figure 22	<i>Schéma présente l'enroulement du stator</i>	18
Figure 23	<i>Vue d'un rotor à cage</i>	19
Figure 24	<i>Vue d'un rotor bobiné</i>	19
Figure 25	<i>Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone</i>	20
Chapitre II :Modélisation du système		
Figure 1	<i>Circuit d'un onduleur monophasé en demi pont</i>	23
Figure 2	<i>Circuit d'un onduleur monophasé en pont complet</i>	23
Figure 3	<i>Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (déséquilibré).</i>	26

Figure 4	<i>Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (équilibré).</i>	27
Figure 5	<i>Enroulements de la machine</i>	29
Figure 6	<i>Position des axes d, q par rapport aux axes de la machine</i>	33
Figure 7	<i>Caractéristique couple vitesse pour V/f constant</i>	37
Chapitre III :Simulation et interprétation des résultats		
Figure 1	<i>Schéma bloc d'un onduleur monophasé</i>	40
Figure 2	<i>L'Allures de la tension de la charge d'un onduleur monophasé</i>	40
Figure 3	<i>Schéma bloc d'un onduleur triphasé en pont alimente une charge résistive monté en étoile</i>	41
Figure 4	<i>L'Allures de la tension simple de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande en plaine onde 180°.</i>	41
Figure 5	<i>L'Allures de la tension composé de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande en plaine onde 180°.</i>	41
Figure 6	<i>L'Allures de la tension simple de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande décalée 120°.</i>	42
Figure 7	<i>L'Allures de la tension composé de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande décalée 120°.</i>	42
Figure 8	<i>Schéma bloc de l'association onduleur triphasé en pont à MLI – machine asynchrone</i>	42
Figure 9	<i>Schéma de l'association onduleur à MLI – machine asynchrone (sous forme modèle)</i>	43
Figure 10	<i>Schéma bloc de l'association onduleur triphasé en pont à MLI – machine asynchrone</i>	43
Figure 11	<i>Schéma bloc de technique du Modulation de Largeur d'Impulsion sinusoïdal triangulaire</i>	44
Figure 12	<i>Schéma bloc de technique du Modulation de Largeur d'Impulsion par hystérésis</i>	44
Figure 13	<i>L'Allures de la vitesse de rotation de la machine asynchrone (Rd/S).</i>	44
Figure 14	<i>L'Allures du couple électromagnétique de la machine asynchrone (N.m).</i>	45
Figure 15	<i>L'Allures du courant statorique de la phase « A » a la sortie de l'onduleur (A).</i>	45
Figure 16	<i>L'Allures de la tension composé entre les deux phase « A » et « B » a la sortie de l'onduleur (V).</i>	45
Figure 17	<i>L'Allures de la tension simple de la phase « A » a la sortie de l'onduleur (V)</i>	45
Figure 18	<i>Porteuse triangulaire de la technique MLI</i>	45



Notations et symboles

Liste des Abréviations

DC: Courant Continu (Direct Current)

AC: Courant Alternatif (Alternative Current)

E:tension

R : Résistance

L :L' inductance

C : Capacité

SSM: Sans Second Membre

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

MLIS:Modulation de Largeur d'Impulsion Sinusoïdale

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

SVM: Space Vector Modulation

MS: Machine synchrone.

MAS : Machine Asynchrone.

Ω_s : *Vitesse de synchronisme*

ω_s : est la pulsation statorique.

ω_r : est la pulsation rotorique

ω_{sl} : est la pulsation du glissement.

δ : vitesse mécanique, elle est reliée à la pulsation rotorique

$L_s=L_{as}-L_{ms}$:Inductance cyclique statorique.

$L_r=L_{ar}-L_{mr}$:Inductance cyclique rotorique.

$L_m=\frac{3}{2} L_m$:Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

e_s :Force magnétomotrice

Ω :Vitesse de rotation mécanique

i: Courant

U: tension

$[P(\theta)]$:Matrice de transformation de Park.

a, b, c :Indices correspondants aux trois phases

d, q : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant:

R_s : Résistance propre d'une phase statorique.

R_r : Résistance propre d'une phase rotorique.

P : Le nombre de pair de pole.

$[V_r]$: Vecteur tension rotorique

$[V_s]$: Vecteur tension statorique

V_{sd} : tension d'axe direct statorique

V_{sq} : tension d'axe quadratique statorique

V_{rd} : tension d'axe direct rotorique

V_{rq} : tension d'axe quadratique rotorique

i_{sd} : courant d'axe direct statorique

i_{sq} : courant d'axe quadratique statorique

i_{rd} : courant d'axe direct rotorique

i_{rq} : courant d'axe quadratique rotorique

$[\phi_s]$: Vecteur flux statorique

$[\phi_r]$: Vecteur flux rotorique

$[I_r]$: Vecteur courant rotorique

$[I_s]$: Vecteur courant statorique

$[M_{sr}]$: Matrice inductance mutuelle stator-rotor

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

m_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

m_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre rotor et stator.

θ : Ecart angulaire entre les axes des phases du stator et du rotor

θ_s : L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d

θ_r : L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d

f.e.m: *Force électromotrice*

J : est l'inertie de toute les masses tournantes ramenées à l'arbre de la machine.

T_L : Le couple de charge.

f_v : Coefficient du frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

C_e : Couple électromagnétique



Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Entre l'électrotechnique et l'électronique s'est développée une nouvelle technique, l'électronique de puissance. La mise au point de semi-conducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, permettant le contrôle de courants importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, appelée aussi électronique des courants forts.

En électronique des courants forts, la notion principale dans toute transformation devient celle de rendement. Il faut alors travailler en commutation ; le composant de base est le semi-conducteur de puissance fonctionnant en interrupteur.

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue et si grâce à des semi - conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur tantôt à l'une, tantôt à l'autre des bornes d'entrée, on peut obtenir entre les bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à créneau par alternance ou par modulation de largeur d'impulsions (MLI). Si l'établissement, le maintien puis l'ouverture des connexions entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi-conducteurs, l'onduleur est dit autonome.

C'est à l'onduleur de tension qui est l'objet de ce présent mémoire. Il est nommé ainsi, parce qu'il est alimenté par une source de tension continue d'impédance interne négligeable et sa tension n'est pas affectée par la variation du courant qui le traverse. La source continue de tension impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Comme tous les systèmes physiques, l'onduleur de tension, présente des imperfections qui se manifestent sous forme de dissipations d'énergie. Ces dernières sont dues aux commutations des semi-conducteurs et à l'énergie dissipée qu'ils dépensent lorsqu'ils sont conducteurs [14].

Ainsi que le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer [8].

L'objectif de notre travail est d'étudier la MAS alimentée par différentes types des onduleurs pour illustre les performances de chaque montages et de chaque type de commande de ces onduleurs . Pour atteindre les objectifs fixés nous avons réalisé ce mémoire structuré comme suit :

Dans le *premier chapitre*, nous allons présenter des généralités sur machines asynchrones, l'alimentation tel que, le redresseur, le filtre LC et des différentes types des onduleurs, ainsi que les techniques de commandes les plus fréquemment utilisé pour les onduleurs telle que 180° , 120° , *MLI*.

Au *second chapitre* nous proposons une modélisation classique de la machine asynchrone grâce à la transformé de *Park*, ainsi que la modélisation de l'onduleur triphasé de tension.

Le *troisième chapitre* est consacré à la simulation numérique, nous avons utilisé le *MATLAB/SIMULINK* comme moyen de simulation de notre système. Touts les montages proposé sont simulé et interprété.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent travail.

Chapitre I

Etat de l'art du système

I.1.Introduction:

La machine asynchrone est machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans le domaine de forte puissance jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance, ou en utilisant les convertisseurs statiques.

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative. Comme un redresseur tout thyristors un onduleur est réversible. Il permet le transfert de puissance de l'alternatif vers le continu. Mais le sens normal de transfert est du continu vers l'alternatif. Comme c'est de l'alternatif vers le continu pour un redresseur.

La principale différence entre un vrai onduleur (sous-entendu, autonome) et un redresseur fonctionnant en onduleur non autonome tient à son autonomie. La fréquence et la forme d'onde des grandeurs alternatives n'est pas imposée par la source placée du côté alternatif.

C'est la fréquence de commande des semi-conducteurs de l'onduleur qui impose la fréquence des grandeurs alternatives.

C'est la tension ou le courant côté continu qui, à travers l'onduleur, impose la forme d'onde de la tension ou du courant côté alternatif.

I.2.Généralités sur les Onduleurs:

I.2.1.Définition de l'onduleur:

L'onduleur est un convertisseur statique permettant la conversion de l'énergie électrique sous sa forme continue (DC) vers la forme alternative (AC). Grâce à des composants semi-conducteurs commandés, il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace [6].

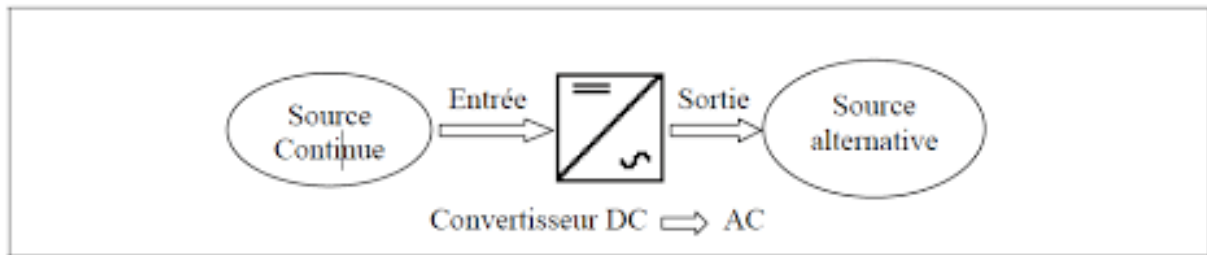


Figure I.1: Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC).

I.2.2.Types d'onduleurs:

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leur interrupteur[7].

I.2.2.1.Onduleur autonome:

L'onduleur autonome est un système de commutation à transistors ou à thyristors, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes, il n'a pas besoin du réseau électrique pour fonctionner. Ils sont de différentes tailles de 100W pour alimenter un ordinateur portable à 10KW, les onduleurs autonomes utilisent des batteries pour le stockage et des contrôleurs de charge pour assurer la durabilité de ces batteries.

La fréquence et la forme d'onde (amplitude et phase) de la tension de sortie sont imposées à la charge, c-à-d elle sont propres à ce type d'onduleur. Dans cette catégorie, on distingue aussi [4] :

- A fréquence fixe : utilisé comme source de secours ou alimentation sans coupure, Il est alimenté le plus souvent à partir d'une batterie d'accumulateurs (cas de PC, salles d'informatique...) comme il est montré sur la figure (I.2) .

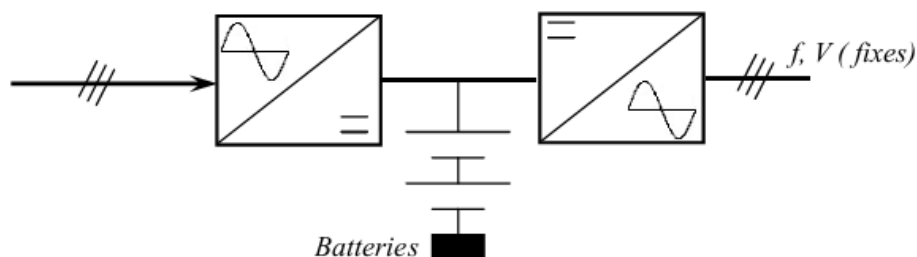


Figure I.2 : Alimentation sans coupure

Il est utilisé aussi pour l'alimentation des charges inductives (fours à induction,...) mais dans ce cas tous les onduleurs sont monophasés.

- A fréquence variable : dans ce cas il utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés, figure (I.3) .

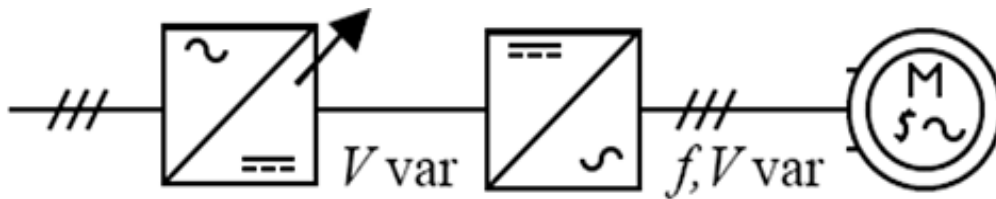


Figure I.3 : convertisseur de fréquence

I.2.2.2. Onduleur non autonomes (ou assistés):

Un onduleur non autonome est un système de commutation à thyristors, dont les instant de commutation sont imposés par la charge. Dans ce cas, la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie sont imposées au réseau alternatif sur lequel débite ce type d'onduleur.

Ces onduleurs sont employés pour [4] :

- ✓ Le transport d'énergie en courant continu, on peut transporter de grandes puissances à très haute tension (de l'ordre du million de volts) par lignes aériennes sur des distances élevées (500-1000 Km) pour lesquelles, les lignes à courant alternatif posent des problèmes délicats (stabilité, pertes...). De plus, le transport sur des plus faibles distances par câbles souterrains dont la capacité très élevée, limite leur emploi en courant alternatif.
- ✓ Le freinage par récupération pendant les phases de freinage les moteurs à courant continu. Peuvent fonctionner en génératrices et l'énergie mise en jeu, dans ce cas, peut être récupérée et transférée au réseau alternatif par un onduleur assisté (domaine de la traction électrique à courant continu).
- ✓ La cascade hyposynchrone pour le réglage de la vitesse de rotation des moteurs asynchrones à rotor bobiné.
- ✓ Dans ce travail on s'intéresse aux onduleurs autonomes.

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

- ✓ Onduleur Monophasé
- ✓ Onduleur Triphasé

I.2.2.3. Onduleur à résonance:

Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [1].

a. Onduleur à résonance série:

Celui-ci débite sur un circuit RLC résonant série peu amorti la Figure I.4 Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant I , donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de tension. La Figure I.5 représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions [1].

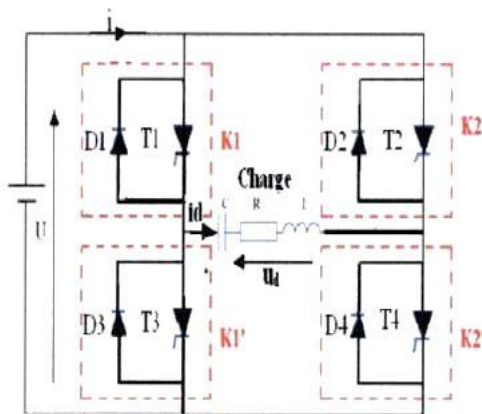


Figure I. 4 : Onduleur à résonance série (Monophasée)

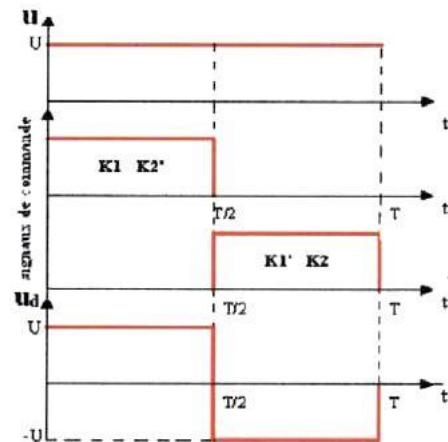


Figure I.5 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions

b. Onduleur à résonance parallèle:

Ce dernier débite sur un circuit RLC résonnant parallèle peu amorti comme l'illustre la Figure I.6 suivant [1]:

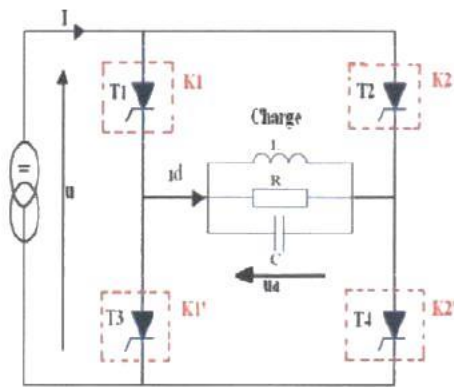


Figure I.6: Onduleur à résonance parallèle (Monophasée)

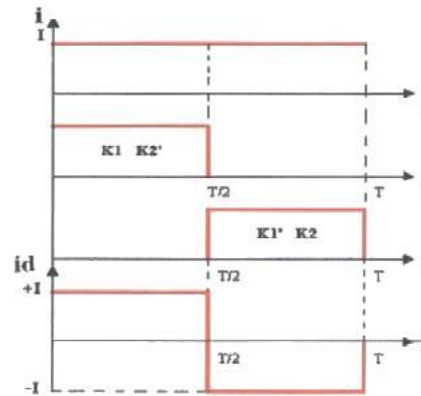


Figure I.7 : Signaux de commande et forme d'onde des courants

Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour

s'opposer à la brusque variation de la tension; donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de courant, dont la Figure I.7 donne les signaux de commande et les formes d'ondes des courants [1].

I.3.Onduleur 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 affectée 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 « i » dépend de la charge placée du côté 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 branchée entre les bornes de sortie [6].

I.4.Onduleurs de courant:

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes [6].

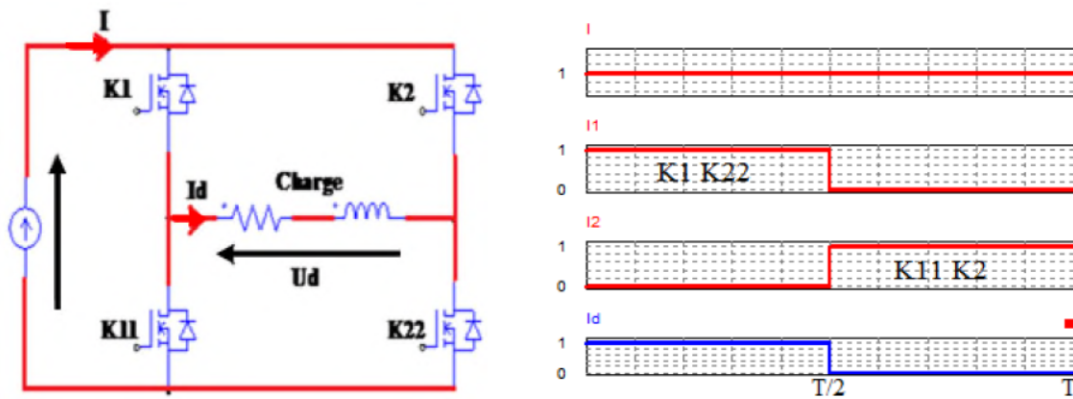


Figure 1.8: Onduleur de courant en pont monophasé, signaux de commande et forme d'onde de courants.

I.4.1. Le principe de fonctionnement:

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (I.9) [7].



Figure 1.9: Schéma bloc représentatif d'un onduleur

I.5. Onduleur monophasé [5]:

Pour réaliser un onduleur monophasé il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur k et d'une source de tension continue E comme le montre la figure (I.10).

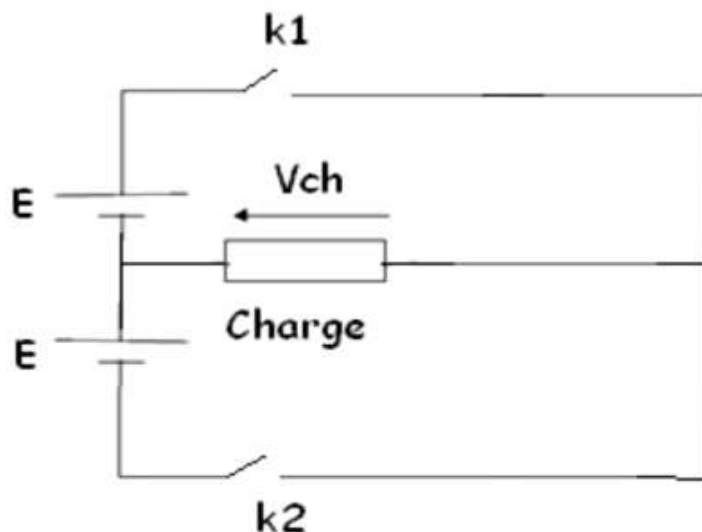


Figure I.10: Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé.

Lorsque k_1 est fermé et k_2 ouvert, on obtient $V_{ch} = +E$

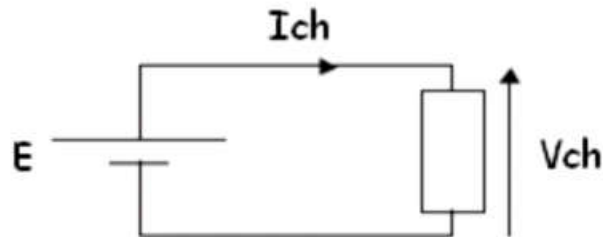


Figure I.11 : Conduction sur une demi-période

Lorsque k_2 est fermé et k_1 ouvert, on obtient $V_{ch} = -E$

La figure suivante donne la forme de $V_{ch}(t)$ sur une période complète de fonctionnement.

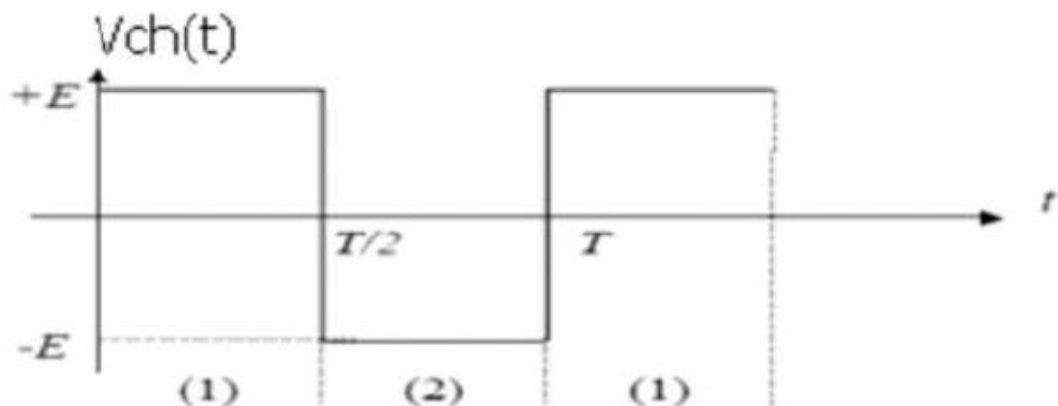


Figure I.12: Fonctionnement d'un onduleur sur une période.

Dans la pratique, l'interrupteur k est remplacé par des interrupteurs électroniques, on les considère idéaux.

I.5.1. Montages pratiques:

Deux types de montages sont utilisés [5] :

I.5.1.1. Montage en demi-pont:

Dans ce type de montage (figure I.13), on fait l'hypothèse que la capacité C des deux condensateurs est suffisamment grande pour que l'on puisse considérer qu'en régime permanent la tension à leur borne reste toujours égale à $E/2$ [5].

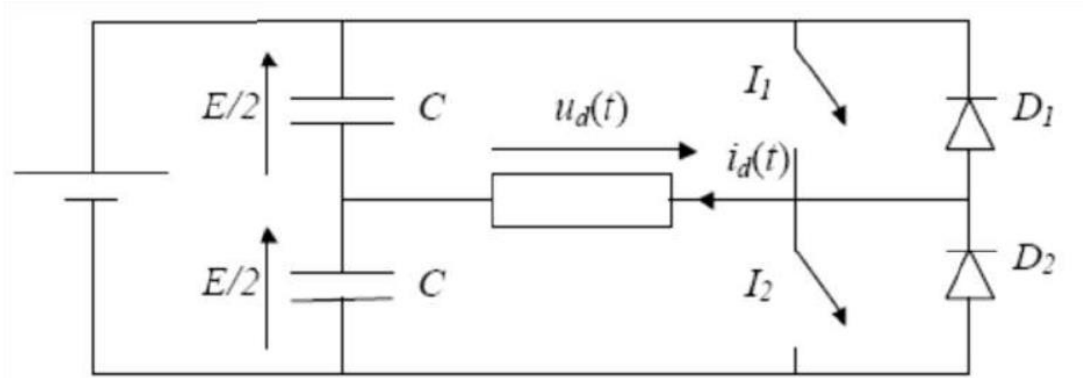


Figure I.13 : Montage en demi-pont.

I.5.1.2. Montage en pont [5]:

Il est constitué de deux cellules de commutation, la charge est connectée entre les sorties S_1 et S_2 de chacune des deux cellules (figure I.14). La tension de sortie est donc la différence entre les tensions élémentaires v_{s1} et v_{s2} de chaque cellule.

Le nombre des possibilités d'utilisation est élevé puisque chaque cellule est indépendante de l'autre et peut, en particulier, recevoir des signaux de commande différents de ceux de la cellule voisine. Chaque cellule peut fonctionner en modulation ou sans modulation, en commande adjacente ou disjointe, avec des mécanismes de commutation différents dans la mesure où le déphasage relatif du courant commun par rapport aux tensions issues des deux cellules peut être différent dès lors que les commandes de ces deux cellules peuvent être déphasées entre elles.

Éliminons, pour simplifier, le cas des commandes disjointes (excepté le temps mort nécessaire à la sécurité).

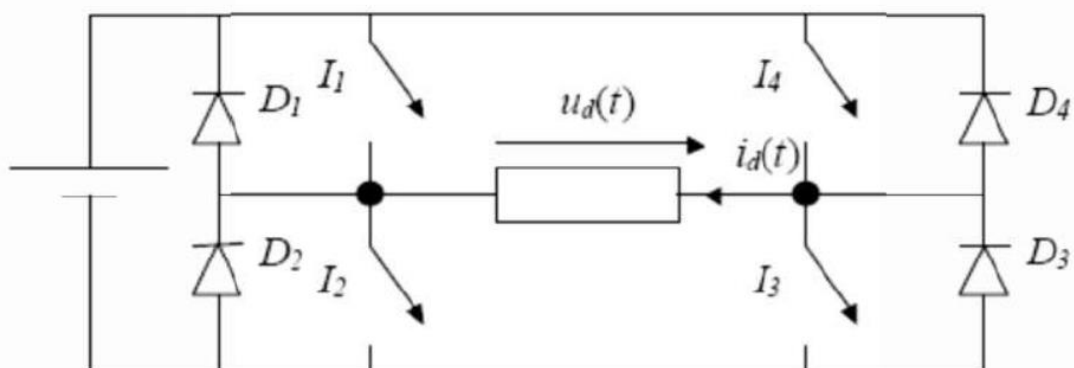


Figure I.14 : Montage en pont.

L'intérêt des montages en pont ou en demi-pont réside dans l'utilisation d'une seule source de tension E .

I.6. Les onduleurs triphasés:

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation comme le montre la figure (I.15). On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasés sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime nominal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré [7].

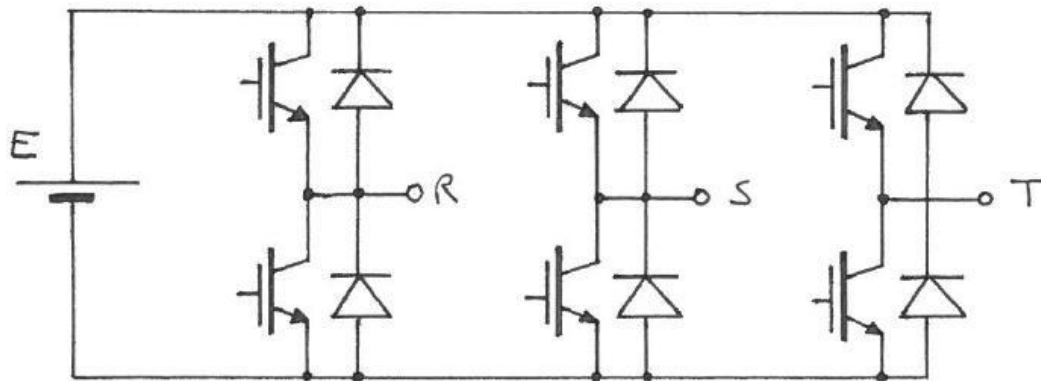


Figure I.15: Onduleur triphasé.

I.7. Techniques de commandes appliquées à la commande d'onduleurs:

Il existe trois types

I.7.1. Onduleur à commande pleine d'onde (commande symétrique):

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, Figure I.16.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur K1 est fermé pendant une demi-période (180°), et K'1 est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ par rapport au premier bras.

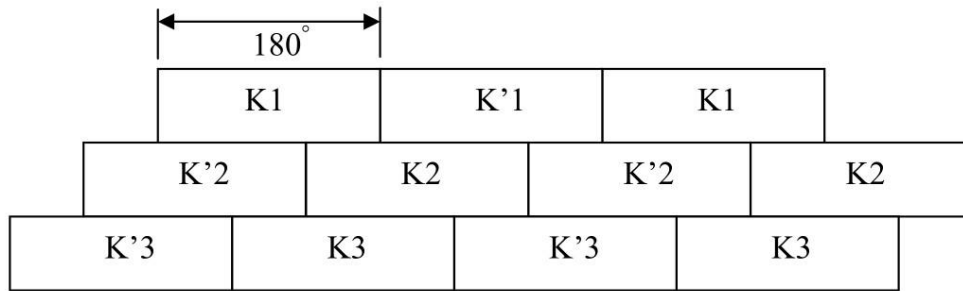


Figure I.16 : Commande en pleine d'onde (symétrique)

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois [3].

I.7.2. Onduleur à commande décalée:

Dans ce cas, la Figure I.17, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.

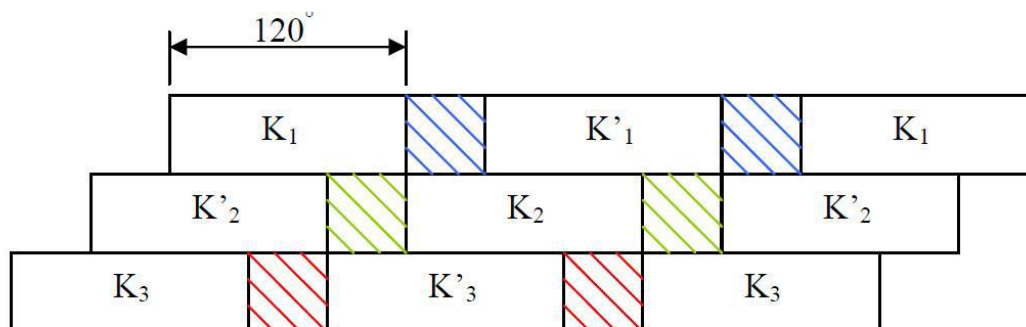


Figure I.17 : Commande décalée

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

I.7.3. Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI :

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la

conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple.

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir [1] :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle[1]:

I.7.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS):

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. 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 (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [1].

I.7.3.2. Modulation vectorielle (SVM):

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (SpaceVector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones. En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [1].

I.8. Applications des onduleurs:

De nombreux domaines ont entraîné une utilisation accrue des onduleurs.

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple[2]:

I.8.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif:

Le contrôle de la vitesse du moteur se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension de sortie de l'onduleur [2].

I.8.2. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone:

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. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée [1].

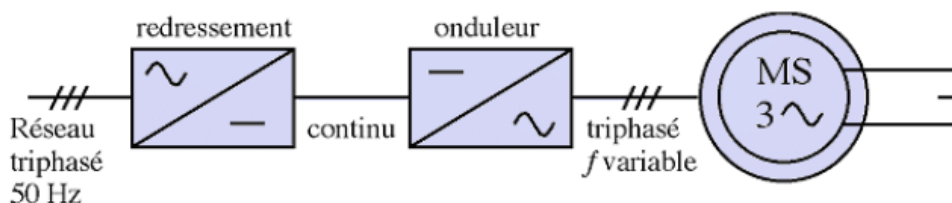


Figure I.18 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

Remarque: pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport (f/V) constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement) [1].

I.8.3. Alimentation de secours:

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [1].

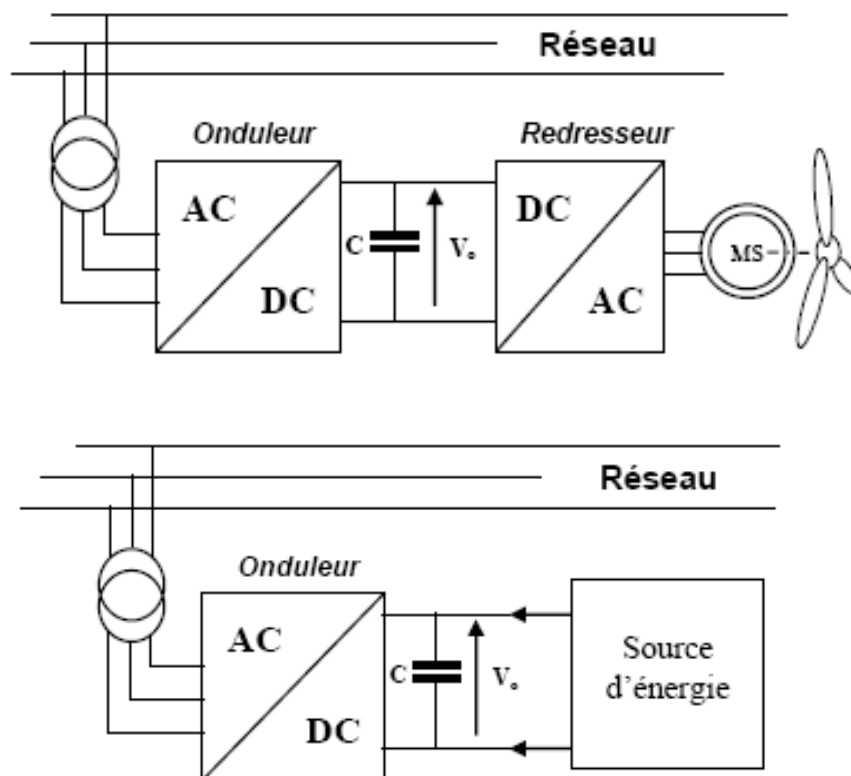


Figure I.19 : Alimentation de secours

I.8.4. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes:

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence [1].

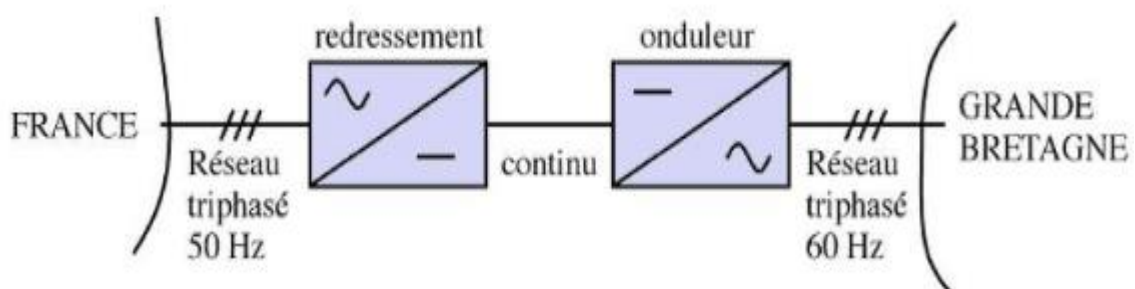


Figure I.20 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

I.9.Généralités sur la machine asynchrone:

I.9.1.Définition:

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique.

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant (2 p) pôles et étant reliée à un réseau de fréquence f_s , ne tourne pas exactement à la vitesse asynchrone (f_s). On parle généralement de moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique.

Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types :

- Les machines d'induction.
- Les machines à collecteur.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) f_s [8].

I.9.2.Constitution de la machine asynchrone:

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure I.21). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de

l'induction. La figure (I.22) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes [9] :

- **Le stator** : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- **Le rotor** : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- **Les paliers**: organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique Permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur.
- **L'entrefer**: Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)

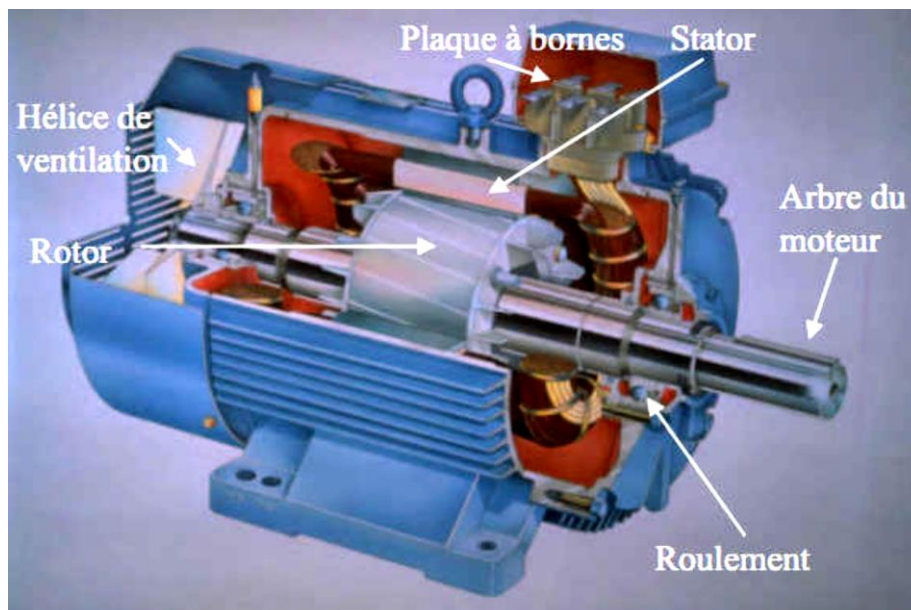


Figure I.21 : Constitution de la machine asynchrone.

I.9.2.1. Le Stator:

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation [9].

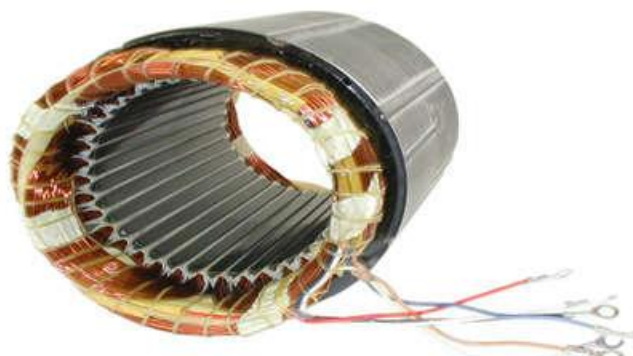


Figure I.22 : Schéma présente l'enroulement du stator.

I.9.2.2.Le Rotor:

C'est l'élément mobile du moteur. il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrone : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues » [9].



Figure I.23 : Vue d'un rotor à cage. Figure I.24: Vue d'un rotor bobiné .

I.9.3. L'entrefer:

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage [9].

I.9.4. Les organes mécaniques:

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements.

Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement [9].

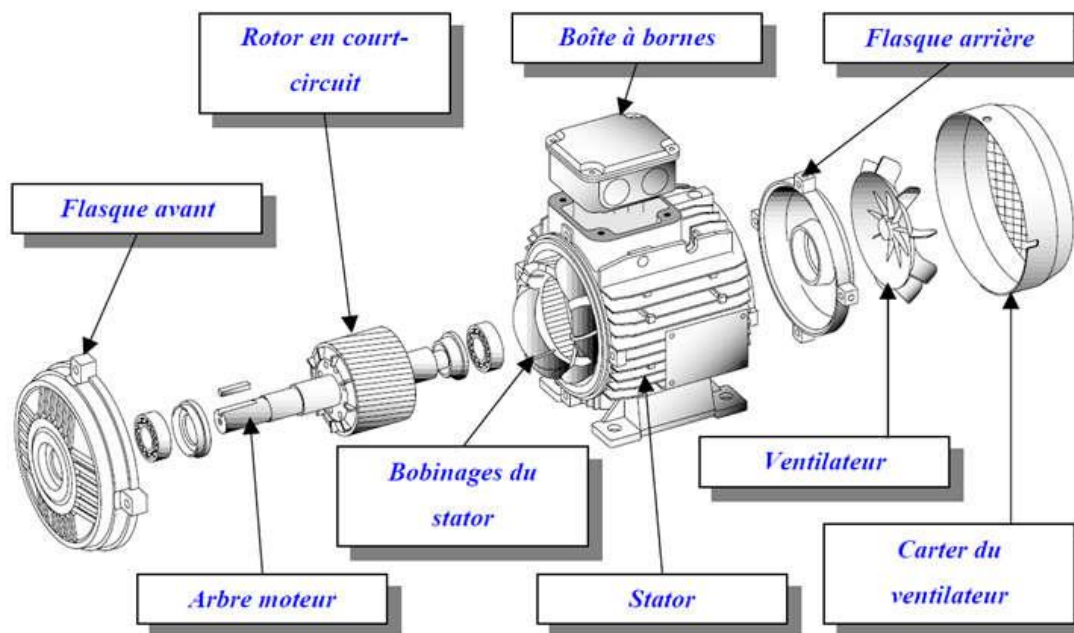


Figure I.25 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.

I.9.5.Principe de fonctionnement:

Les trois courants statoriques i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} de pulsations ω_s engendrent une force magnétomotrice unique ϵ_s tournante à la vitesse $\Omega_s = \omega_s/P$, cette dernière induit dans les phases rotoriques des forces magnétomotrices et donc des courants de pulsation ω_s . Le rotor étant à l'arrêt. La force magnétomotrice ϵ_s induit dans les phases rotoriques des forces électromotrices. Donc les courants de pulsation temporelle ω_s puisqu'un observateur lié au rotor voit défiler P paires de pôles pendant une période de rotation du champ tournant statorique. D'après la loi de lenz, les courants induits rotoriques s'opposent à la cause qui leurs a donné naissance, le déplacement ϵ_s de par rapport au rotor, par conséquent. L'effet de réaction de cette loi se traduit par le lancement du rotor à la poursuite de ϵ_s , c'est à dire par la création d'un couple électromagnétique.

Le rotor ne peut pas rattraper le champ tournant statorique, car si s'était le cas, il serait soumis à un champ fixe dans son espace, avec pour conséquence la nullité des courants

induits et du couple électromagnétique, ainsi la vitesse du rotor Ω est nécessairement inférieure à la vitesse de synchronisme (Ω_s). Alors, c'est le fonctionnement en asynchrone.[10].

I.9.6. Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones:

I.9.6.1. Avantages:

Il Ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone [8]:

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

I.9.6.2. Inconvénients:

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone[8] :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominaux.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

I.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons introduit des généralités sur la machine asynchrone, définition, sa construction, principe de fonctionnement, ainsi que ses avantages et inconvénients.

Comme nous avons présenté l'onduleurs, son principe de fonctionnement, différents types de structure, topologies, ses domaines d'application et ses avantages.

Aussi dans ce chapitre, nous avons parlé les différentes techniques de commande des onduleurs telle que la commande 180°, la commande 120° et la modulation de largeur d'impulsion MLI.

Chapitre II

Modélisation du système

II.1.Introduction:

Le système d'entraînement de la machine asynchrone intègre l'alimentation.

Le convertisseur statique, la machine asynchrone et la commande indispensable au fonctionnement de l'ensemble. De ce fait, une modélisation de la machine destinée aussi bien à l'étude de son comportement qu'à la mise en place des fonctionnements de la commande est nécessaire pour le bon déroulement du processus d'entraînement.

L'objectif de ce chapitre est de présenter mathématiquement, une modélisation de la machine asynchrone d'une part et l'alimentation de la machine c'est-à-dire l'onduleur d'autre part.

II.2.Modélisation d'un onduleur monophasé:

Se composant d'une source de tension continue et des interrupteurs commandés avec un circuit composé de diodes l'onduleur monophasé dont La figure (II.1) montre le circuit équivalente [11].

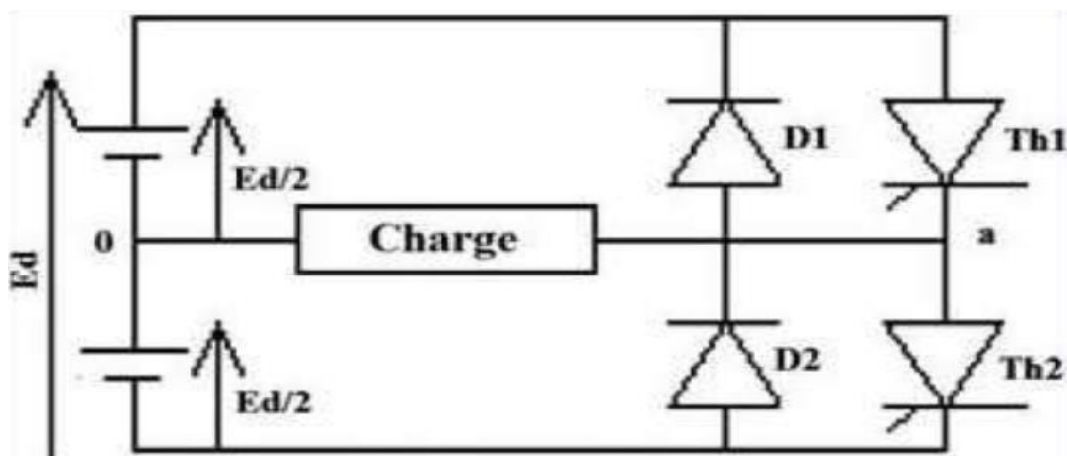


Figure II.1: Circuit d'un onduleur monophasé en demi pont

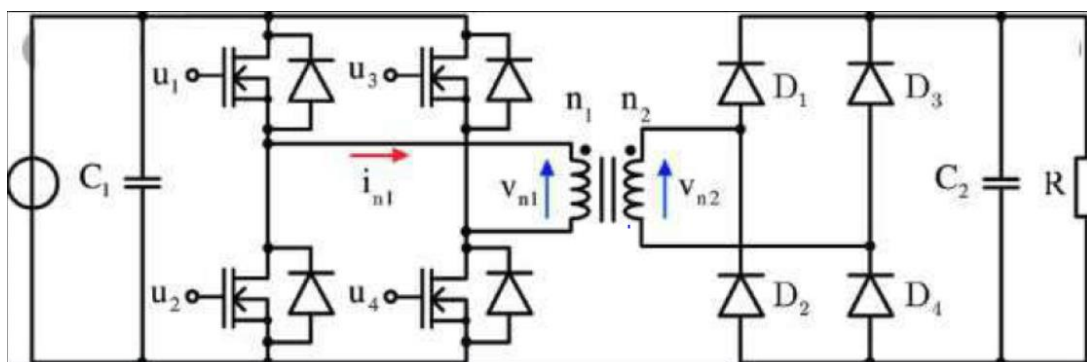


Figure II.2: Circuit d'un onduleur monophasé en pont complet

II.2.1. Le modèle mathématique [11]:

La tension est la tension au borne d'une résistance plus celle au bornes d'une bobine :

$$u(t) = R \times i(t) + L \times \frac{di}{dt} \quad (\text{II.1})$$

En intégrant l'équation on trouve :

$$i(t) = \exp\left(\left(-\frac{R}{L}\right)t + cste\right) \quad (\text{II.2})$$

Pour la solution particulière, elle s'exprime sous la forme :

$$i_p = At + B \qquad i_p(t) = E/R \quad (\text{II.3})$$

Comme solution générale on a :

$$i_t(t) = i_p(t) + i(t) \quad (\text{II.4})$$

$$i_t(t) = K \times e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} + \frac{E}{R} \quad (\text{II.5})$$

Aux conditions initiales, on a

$$\begin{aligned} & \bullet \quad i_t(0) = 0 \\ & \bullet \quad K = I_M - \frac{E}{R} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

La solution totale s'écrit donc sous la forme suivante :

$$i_t(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) - I_M \times e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (\text{II.7})$$

De la même manière, la solution totale de cette équation est la somme de la solution générale sans second membre (SSM) et d'une solution particulière.

La solution SSM : est la même que le premier cas, on obtient ainsi,

$$i(t) = K \times e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (\text{II.8})$$

La solution particulière, on obtient le terme :

$$i(t) = -E/R \quad (\text{II.9})$$

Ainsi la solution totale de l'équation s'écrit :

$$i_t(t) = i_p(t) + i(t) \quad (\text{II.10})$$

D'où :

$$i_t(t) = K \times e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} - \frac{E}{R} \quad (\text{II.11})$$

Dans les conditions suivantes :

$$At = \frac{T}{2} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{aligned} &\bullet \quad i_t\left(\frac{T}{2}\right) = +I_M \\ &\bullet \quad K = +I_M + \frac{E}{R} \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

Finalement la solution totale s'exprime dans ce cas comme suit :

$$i_t(t) = \frac{E}{R} \left(1 + e^{\left(-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}\right)} \right) + I_M \times e^{\left(-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}\right)} \quad (\text{II.14})$$

II.3. Modélisation du fonctionnement des onduleurs de tension triphasés:

II.3.1. Structure de l'onduleur de tension triphasé [12]:

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés de l'un ou de l'autre, il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. La figure (II.3) représente un onduleur de tension triphasé à deux niveaux formés de trois demi ponts monophasés et utilisant un diviseur capacitif commun .

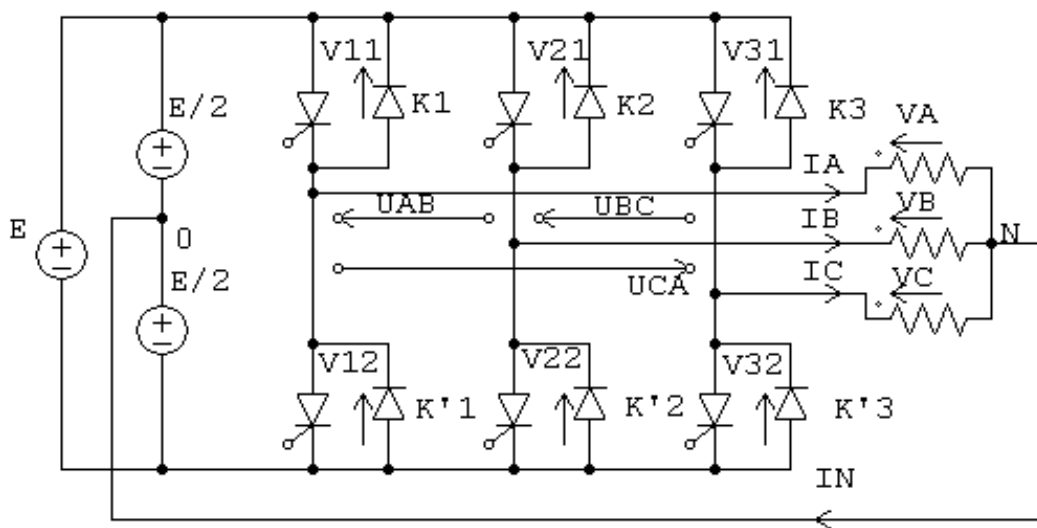


Figure II.3 : Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (déséquilibré).

Chacune des tensions de sortie est égale tantôt à $(+U/2)$, tantôt à $(-U/2)$. Les interrupteurs fonctionnent comme en monophasé la seule différence est que le courant arrivant au point milieu du diviseur est I_N telle que $I_N = I_A + I_B + I_C$.

La présence de neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre.

Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple), on peut supprimer la liaison entre le point neutre 'N' de la charge et le point milieu 'O' du diviseur capacitif, en supprimant celle-ci on obtient alors l'onduleur de tension en pont triphasé proprement dit représenté sur la figure (II.4) .

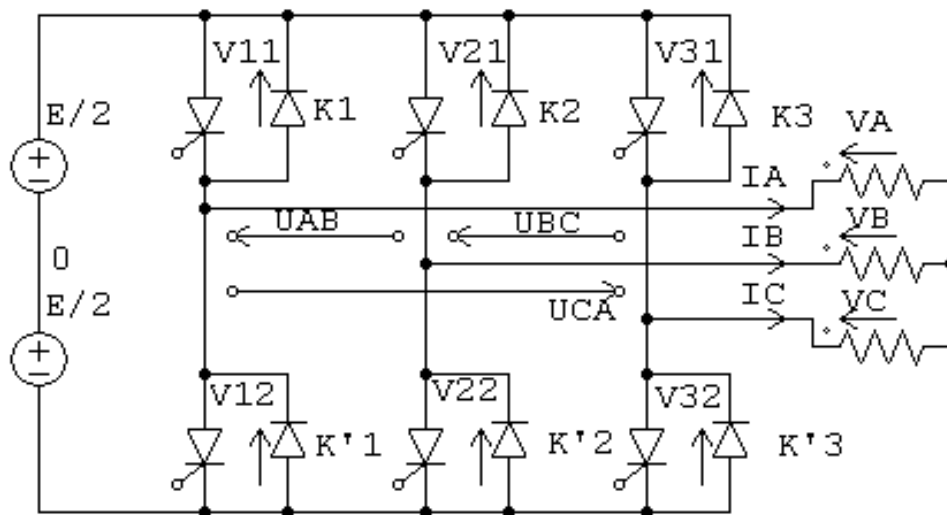


Figure II.4 : Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (équilibré).

II.3.2. Modèle de commande de l'onduleur de tension triphasé [12]:

Les interrupteurs K_1 et K'_1, K_2 et K'_2, K_3 et K'_3 , doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension .

$$V_A - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow K_1 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_1 \text{ ouvert} \quad (\text{II.15})$$

$$V_B - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow K_2 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_2 \text{ ouvert} \quad (\text{II.16})$$

$$V_C - V_O = \frac{E}{2} \Rightarrow K_3 \text{ fermé}, -\frac{E}{2} \Rightarrow K_3 \text{ ouvert} \quad (\text{II.17})$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions .

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = E \text{ Si } K_1 \text{ fermé et } K_2 \text{ ouvert} \quad (\text{II.18})$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés} \quad (\text{II.19})$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = -E \text{ Si } K_1 \text{ ouvert et } K_2 \text{ fermé} \quad (\text{II.20})$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts} \quad (\text{II.21})$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_A, V_B, V_C à la sortie de l'onduleur. Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_A, I_B, I_C aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, si trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produits impédances 'Z'- courants, c'est-à-dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, en ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions. A cause de l'équilibre du récepteur: $I_A + I_B + I_C = 0$, entraîne $V_A + V_B + V_C = 0$.

Donc on peut écrire :

$$\frac{1}{3}(V_A - V_B) - \frac{1}{3}(V_C - V_A) = \frac{2}{3}V_A - \frac{1}{3}V_B - \frac{1}{3}V_C = V_A - \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) = V_A \quad (\text{II.22})$$

Et

$$V_A = \frac{1}{3}(V_A - V_B) - \frac{1}{3}(V_C - V_A), \text{ de même} \begin{cases} V_B = \frac{1}{3}(V_B - V_C) - \frac{1}{3}(V_A - V_B) \\ V_C = \frac{1}{3}(V_C - V_A) - \frac{1}{3}(V_B - V_C) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (V_A - V_O) - (V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \\ V_B = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) + 2(V_B - V_O) - (V_C - V_O)] \\ V_C = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) - (V_B - V_O) + 2(V_C - V_O)] \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Si V_{AO}, V_{BO} et V_{CO} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors V_A, V_B et V_C sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeurs alternatives), par conséquent l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu - alternatif (DC-AC) .

On aura alors ;

$$[V_{AC}] = [T][V_{DC}] \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$[V_{AC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^T : \text{Tension alternatif équilibrée;} \quad (\text{II.26})$$

$$[V_{DC}] = [V_{AO} \ V_{BO} \ V_{CO}]^T : \text{Tension continue.} \quad (\text{II.27})$$

$$S_i = \begin{cases} 1 \\ \text{ou(excluf)} \\ 0 \end{cases} \quad i = 1,2,3 \text{ (commutation supposées idéales)} \quad (\text{II.28})$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Ainsi l'onduleur est modélisé par cette matrice de transfert [T] .

II.4.Modélisation de la machine asynchrone:

La structure principale de la machine asynchrone est composée de six enroulements, portés sur leurs axes, les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle de $(\frac{2\pi}{3})$, ainsi que les axes rotoriques (Figure II.5) [13].

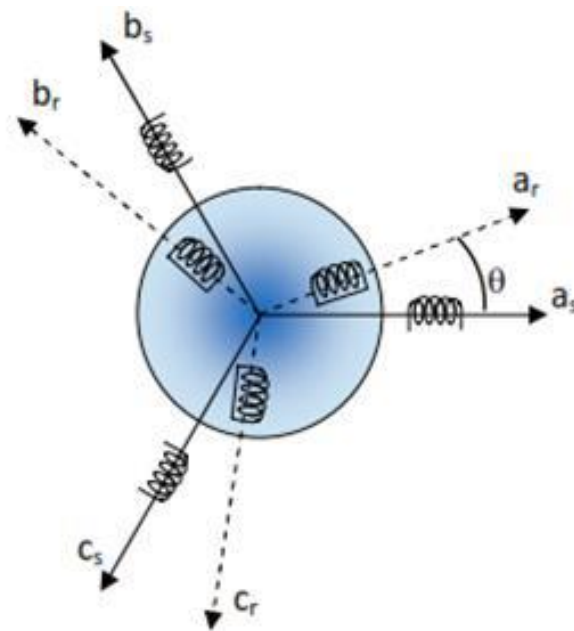


Figure II.5: Enroulements de la machine

II.4.1.Mise en équations du modèle de la machine:

Afin de bien mener la modélisation de la machine, il faut adopter les *hypothèses simplificatrices* suivantes [13]:

- Entrefer constant, qui permet d'exprimer les inductances propres comme constante.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- La densité de courant dans la section des conducteurs élémentaires est uniforme.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes des hypothèses, on peut citer [13]:

- L'additivité des flux.
- La constante des inductances propres.
- Une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir [13]:

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

Dans le cadre des hypothèses précédentes et pour une machine équilibrée et couplée en triangle, les équations de la machine s'écrivent sous la forme matricielle suivant [13]:

II.4.1.1.Equations électriques [13]:

$$v_s = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \cdot I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$v_r = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r \cdot I_r + \frac{d\varphi_r}{dt} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

R_s : Résistance propre d'une phase statorique.

R_r : Résistance propre d'une phase rotorique.

II.4.1.2. Equations magnétiques [13]:

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [l_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] &= [l_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Les matrices inductances $[l_s], [l_r]$ et $[M_{sr}]$ sont définies par :

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}; [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \theta = (\widehat{a_s}, \widehat{a_r}) \quad (\text{II.35})$$

Où :

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

m_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

m_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre rotor et stator.

θ : Ecart angulaire entre les axes des phases du stator et du rotor.

II.4.1.3. Equations mécaniques [13]:

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$J \cdot \frac{d}{dt}(\Omega) = C_e - C_r - F\Omega \quad (\text{II.36})$$

Après transformation, nous obtenons :

$$C_e = P[i_{abc}]^T [M_{sr}] [i_{abcr}] \quad (\text{II.37})$$

Avec :

J : moment d'inertie du rotor.

F : coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

C_e : Couple électromagnétique.

II.4.2. Modèle de Park [13]:

Le modèle diphasé de la MAS s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère diphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park (1929). La figure II.6 met en relief l'axe direct \mathbf{d} du référentiel de Park et l'axe en quadrature d'indice \mathbf{q} .

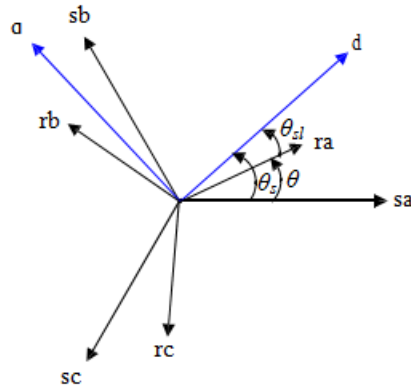


Figure II.6: Position des axes d, q par rapport aux axes de la machine

Pour simplifier les équations, les repères de PARK des grandeurs statoriques et rotoriques doivent coïncider, ceci est possible grâce à la relation suivante :

$$\theta_s = \theta_{sl} + \theta \quad (\text{II.38})$$

La matrice de transformation de PARK [T] est défini commesuit :

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_i) & \cos\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_i) & -\sin\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

On a choisi $(2/3)$ pour les valeurs inchangées des amplitudes des tensions, courants et flux. θ_i est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé.

La transformation directe est alors :

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_i) & \cos\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_i) & -\sin\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Où représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux. La variable x_0 représente la composante homopolaire ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le neutre n'est pas branché.

La transformation de PARK inverse est nécessaire afin de revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ 1 & \cos\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 & \cos\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_i - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

II.4.3. Choix de repère d, q :

Ce qui rend la transformation de PARK attrayante, est que l'orientation du repère d, q peut-être quelconque. Il existe trois choix importants. Le repère d, q peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, selon l'objectif de l'application[13]:

- Repère d'axes d, q fixe lié au stator ou repère stationnaire ($\theta_s = 0$). Les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique ω_s . Cette méthode sera retenue très souvent dans l'étude des observateurs.
- Repère d'axes d, q lié au rotor ($\theta_{sl} = 0$). Les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques ω_{sl} . Elles sont de faible fréquence (fréquence de glissement).
- Repère d'axes d, q lié à l'un des flux de la machine. Le modèle est simplifié par l'utilisation des équations plus simples. En régime permanent électrique, les grandeurs du modèle sont continuées. Cette méthode est souvent utilisée dans l'étude de la commande.

II.4.4. Référentiel lié au champ tournant:

Symbolisé par le vecteur flux statorique, le champ tournant est le champ créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Si on choisit de fixer le repère d, q au champ tournant, alors on a [13] :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \rightarrow \omega_{sl} = \omega_s - \omega = \omega_s - p\delta \quad (\text{II.42})$$

Où :

ω_s : est la pulsation statorique.

ω_r : est la pulsation rotorique.

ω_{sl} : est la pulsation du glissement.

δ : vitesse mécanique, elle est reliée à la pulsation rotorique par : $\omega = p\delta$

II.4.4.1. Equation électriques [13]:

Les équations électriques de la MAS dans un repère de PARK lié au champ tournant sont :

Au stator :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Au rotor:

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - p\delta)\varphi_{sq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - p\delta)\varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Ceux des flux totaux ont pour valeur :

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Au rotor:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Où :

$L_s = L_{as} - l_{ms}$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = L_{ar} - l_{mr}$: Inductance cyclique rotorique.

$L_m = \frac{3}{2} l_m$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

II.4.4.2. Equation mécanique [13]:

Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

Le couple électromagnétique T_e peut se mettre sous plusieurs formes :

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2}p(\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd}) \\ T_e = \frac{3}{2}p(\varphi_{rd}i_{rd} - \varphi_{rd}i_{rq}) \\ T_e = \frac{3}{2}pL_m(i_{sq}I_{rd} - i_{sd}I_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

$$T_e = k_t(\varphi_{rd}i_{sq} - \varphi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{II.48})$$

Où :

P : Le nombre de pair de pole.

$$k_t = P \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \quad (\text{II.49})$$

La vitesse de rotation mécanique se déduit de la loi fondamentale de la mécanique générale (la somme des couples à l'arbre est équivalent au couple inertiel), elle s'écrit donc :

$$J = \frac{d\delta}{dt} = T_e - T_L - f_v\delta \quad (\text{II.50})$$

Où :

J : est l'inertie de toute les masses tournantes ramenées à l'arbre de la machine.

T_L : Le couple de charge.

f_v : Coefficient du frottement visqueux.

II.5. Commande scalaire (Contrôle en V/f de la machine asynchrone) [2]:

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension.

Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en V/f constant qui est la plus utilisée. Son principe est de maintenir $V/f = \text{Constant}$ ce qui signifie garder le flux constant. Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement. Il permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage.

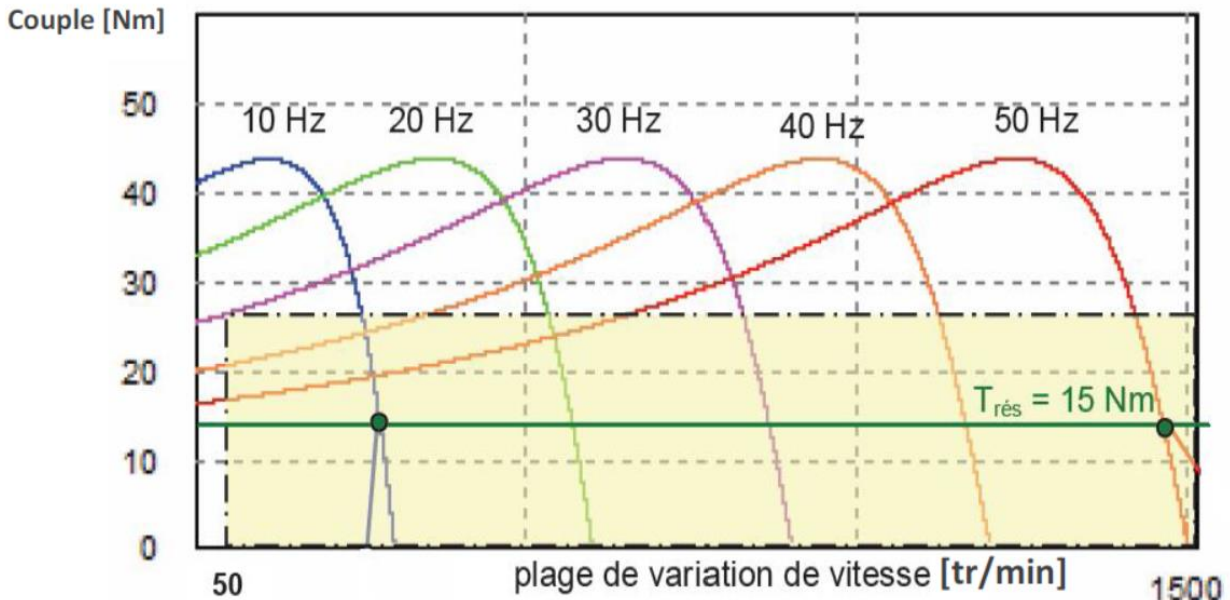


Figure II.7 : Caractéristique couple vitesse pour V/f constant

Les courbes de la figure II.7 ont un attrait évident car elles indiquent que le moteur est capable de produire pratiquement le même couple maximal à toutes les vitesses de zéro jusqu'à la vitesse de base (50 Hz ou 60 Hz).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation de la machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée sous des hypothèses simplificatrices et utilisé la transformation de *park* qui permet le passage de la représentation triphasée au celle biphasée.

Ensuite, on a présenté la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone c'est-à-dire l'onduleur de tension.

Enfin, on a établi la technique de la commande scalaire. Grâce à cette technique la commande, on peut faire varier la vitesse de rotation de la machine asynchrone (*Contrôle en V/f de la machine asynchrone*).

CHAPITRE III

**Simulation et interprétation des
résultats**

III.1.Introduction

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur.

Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

III.2. Avantage de la simulation numérique :

Grâce aux performances des logiciels par exemple Matlab, Matrix, Syssi,..., nous permet de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permet aussi de :

- Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- Simuler les entrées.
- Enregistrer les grandeurs significatives.
- Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une imprimante en mode graphique.

Dans notre étude, en utilise le *MATLAB/Simulink* comme moyen pour la simulation des différents types des onduleur.

III.3. Simulation Numérique :

Après l'étude théorique et la modélisation des différents types des onduleurs, nous présentons une simulation numérique sous l'environnement *Matlab - Simulink*. Ici on présente les résultats des tension de charge c'est-à-dire a la sortie de chaque onduleur.

III.3.1. Simulation de l'onduleur monophasé :

III.3.1.1. Onduleur monophasé :

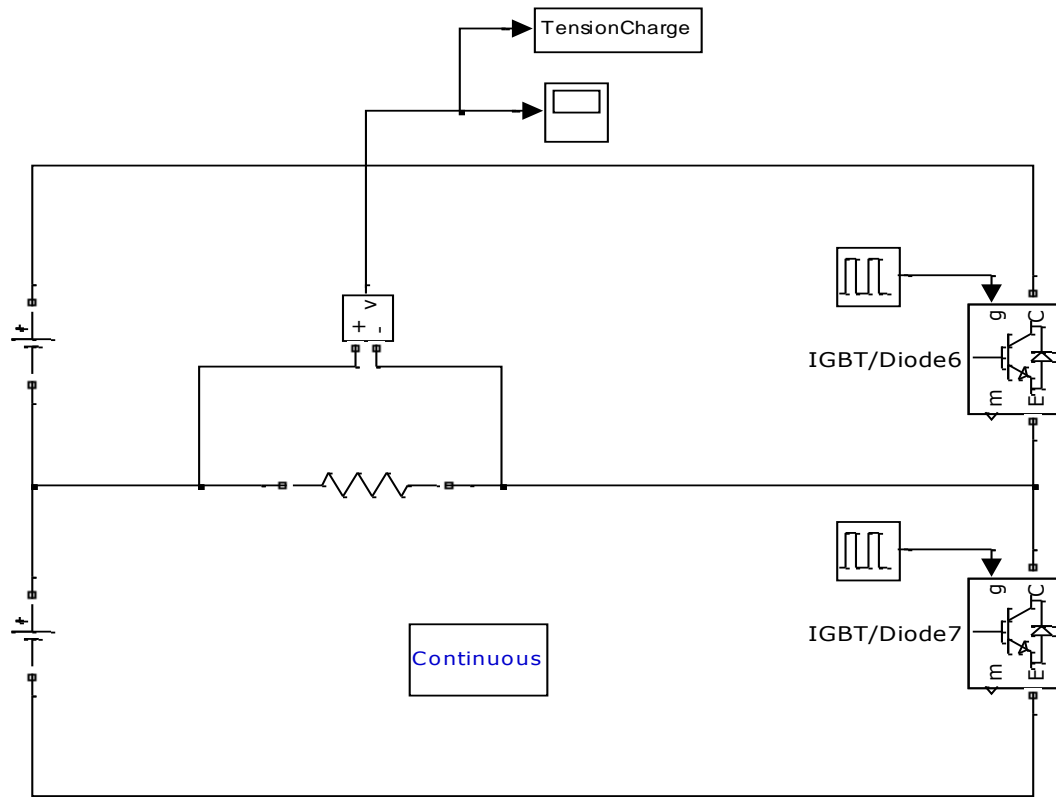


Figure III.1: Schéma bloc d'un onduleur monophasé.

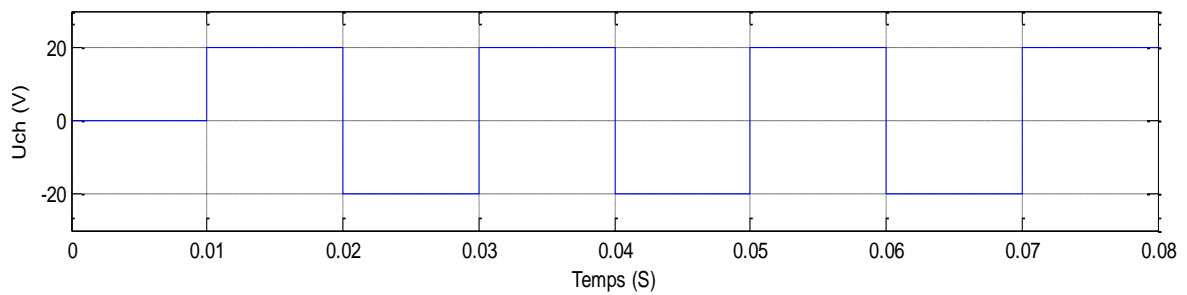


Figure III.2 : L'Allures de la tension de la charge d'un onduleur monophasé.

III.3.1.2. Onduleur triphasé en pont:

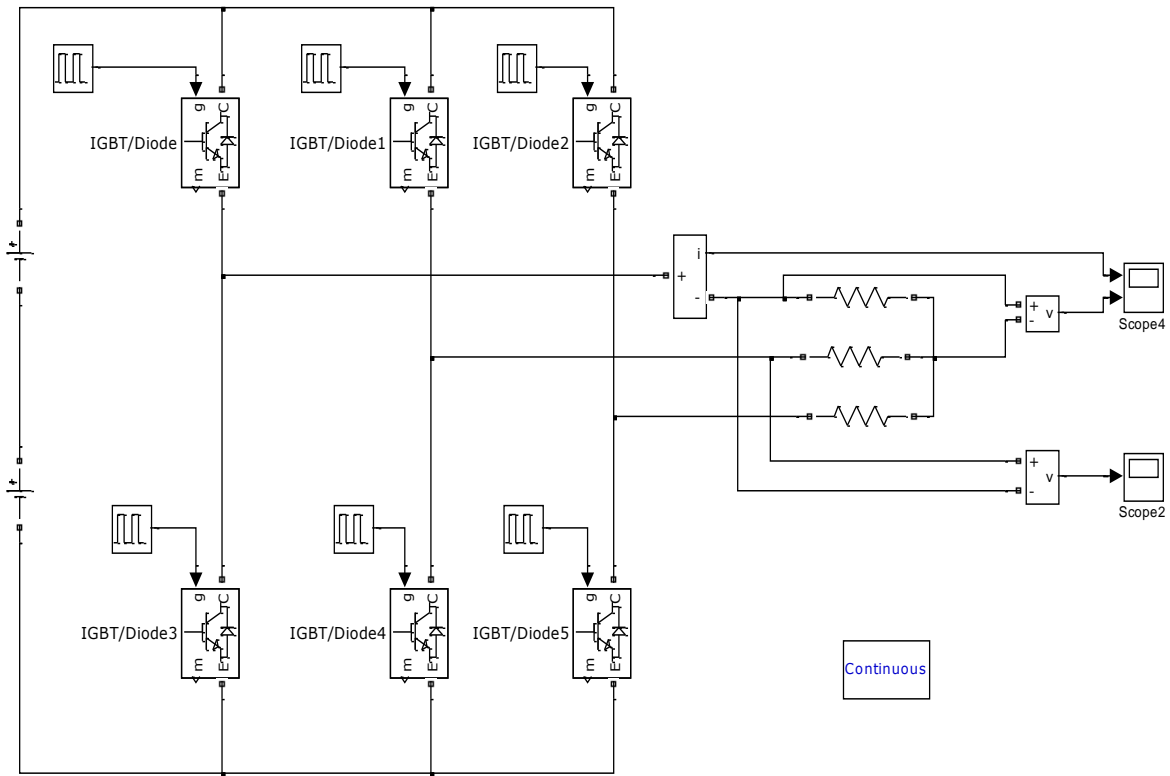


Figure III.3: Schéma bloc d'un onduleur triphasé en pont alimente une charge résistive monté en étoile

III.3.1.2.1. Onduleur triphasé en pont à commande 180° (en plaine onde) :

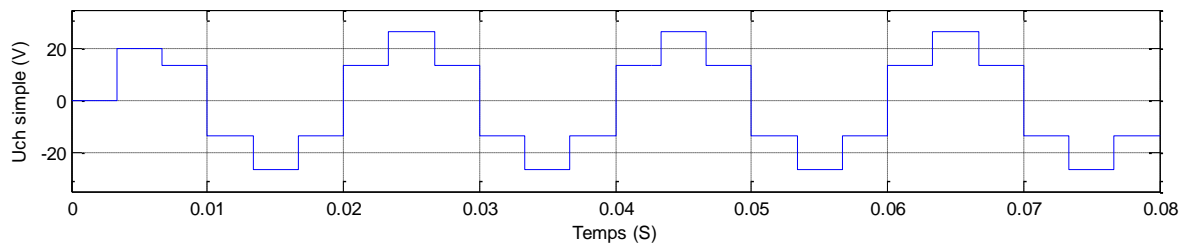


Figure III.4: L'Allures de la tension simple de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande en plaine onde 180°.

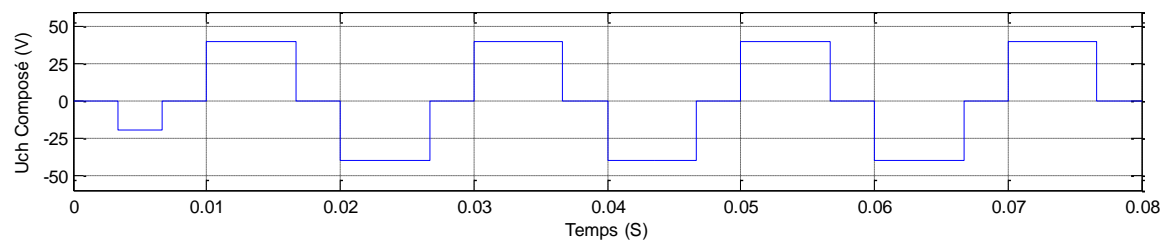


Figure III.5: L'Allures de la tension composé de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande en plaine onde 180°.

III.3.1.2.2. Onduleur triphasé en pont à commande 120° (décalée) :

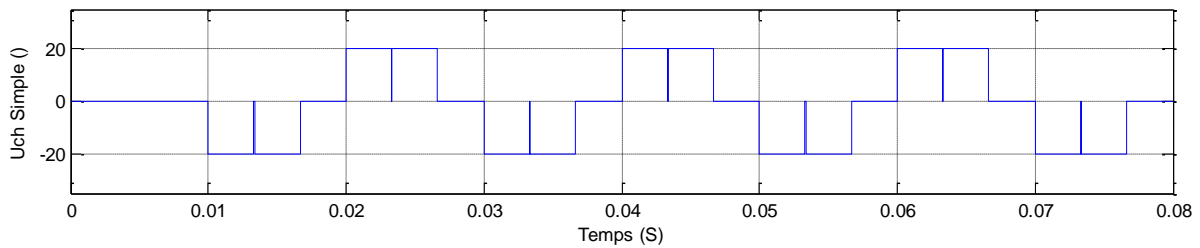


Figure III.6: L'Allures de la tension simple de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande décalée 120° .

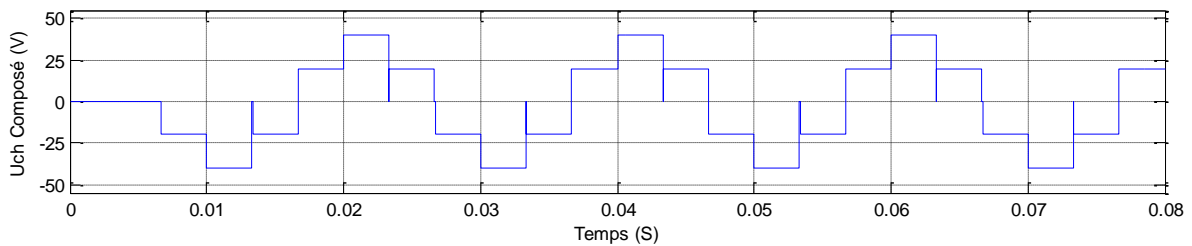


Figure III.7: L'Allures de la tension composé de la charge d'un onduleur triphasé en pont à commande décalée 120°

III.3.1.2.3. Onduleur triphasé en pont à commande MLI (modulation de largeur d'impulsion) :

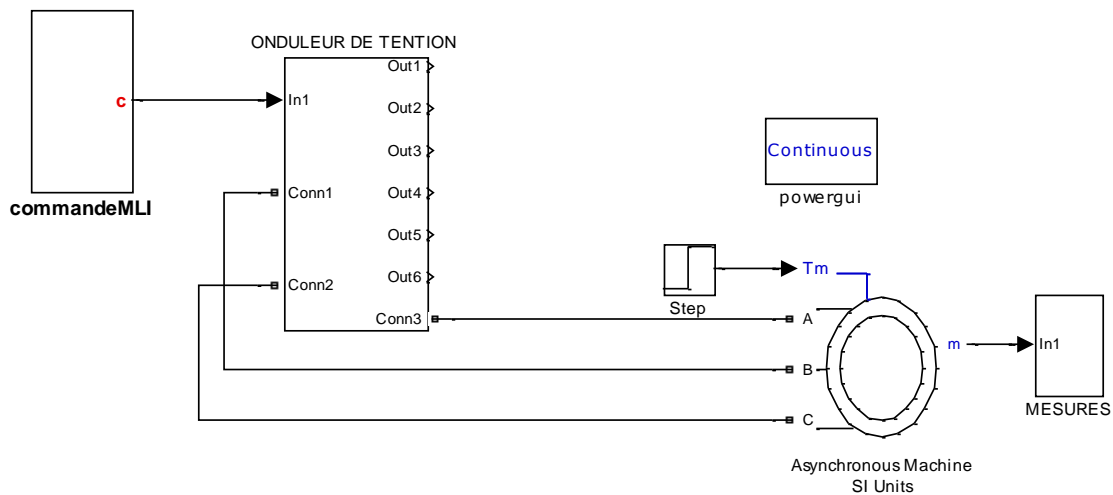


Figure III.8: Schéma bloc de l'association onduleur triphasé en pont à MLI – machine asynchrone

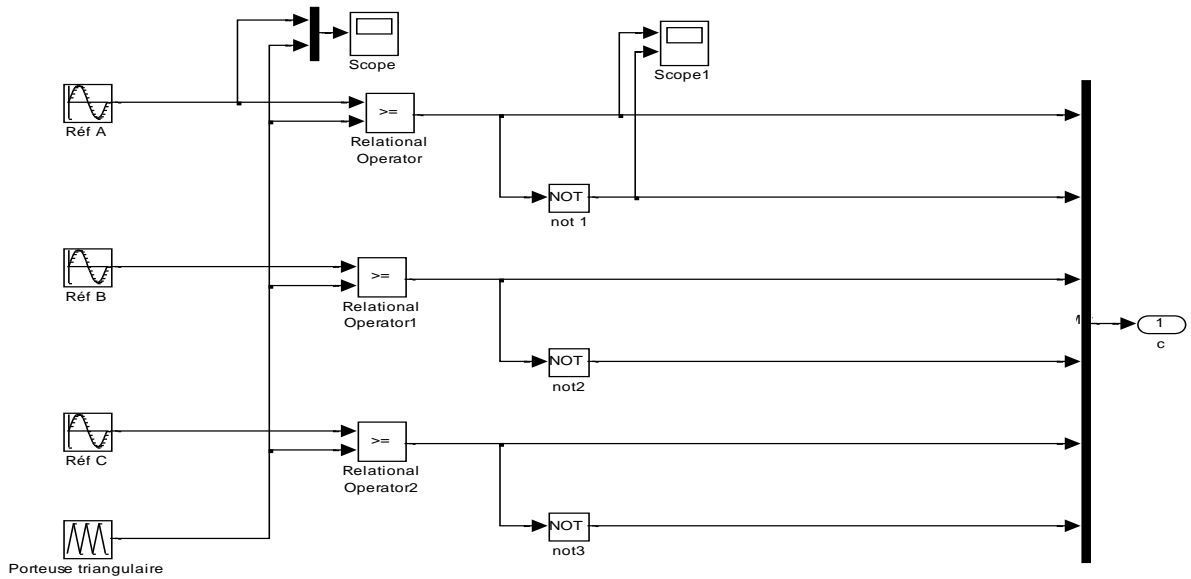


Figure III.11: Schéma bloc de technique du Modulation de Largeur d'Impulsion sinusoidal triangulaire (MLI)

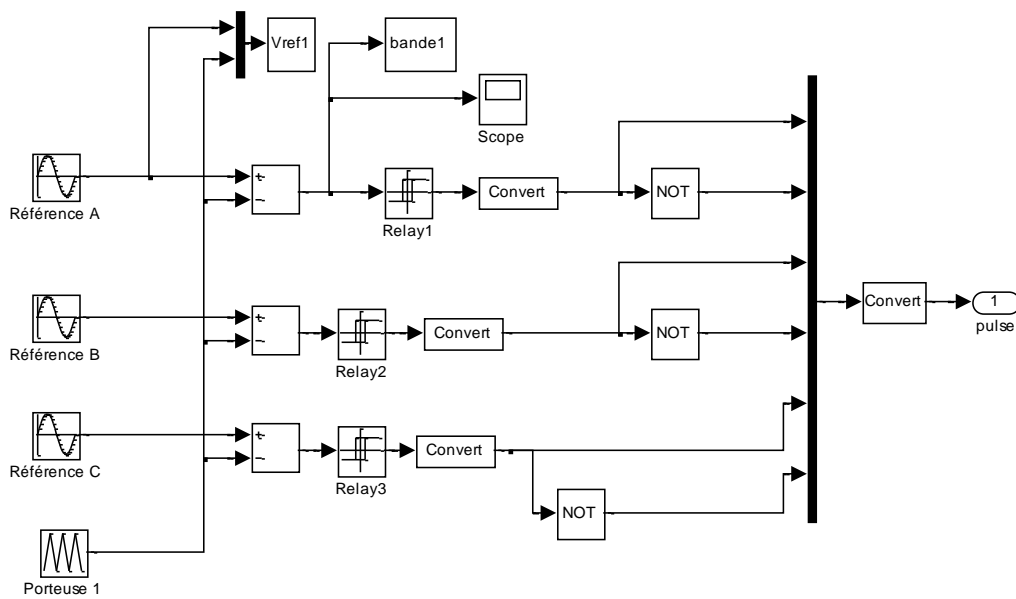


Figure III.12: Schéma bloc de technique du Modulation de Largeur d'Impulsion par hystérésis

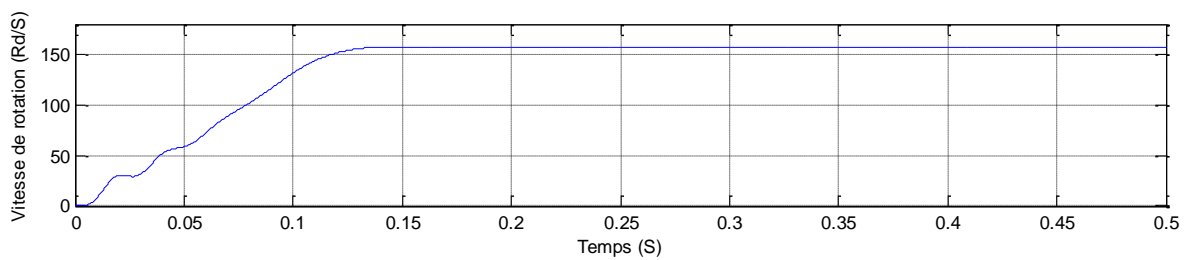


Figure III.13: L'Allures de la vitesse de rotation de la machine asynchrone (Rd/S).

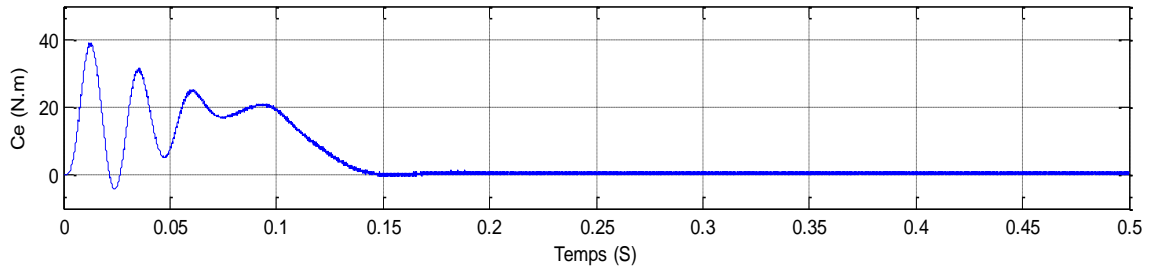


Figure III.14: L'Allures du couple électromagnétique de la machine asynchrone (N.m).

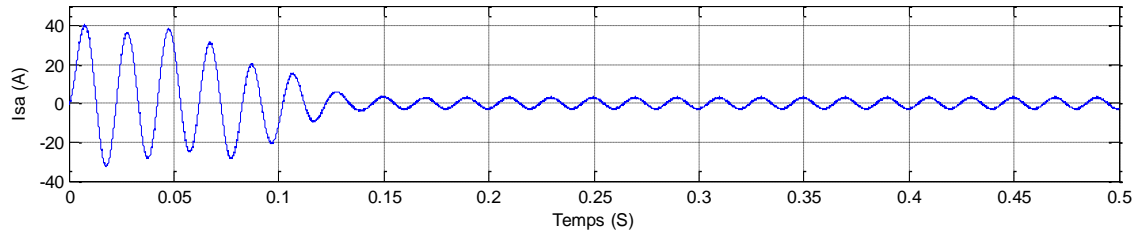


Figure III.15: L'Allures du courant statorique de la phase « A » a la sortie de l'onduleur (A).

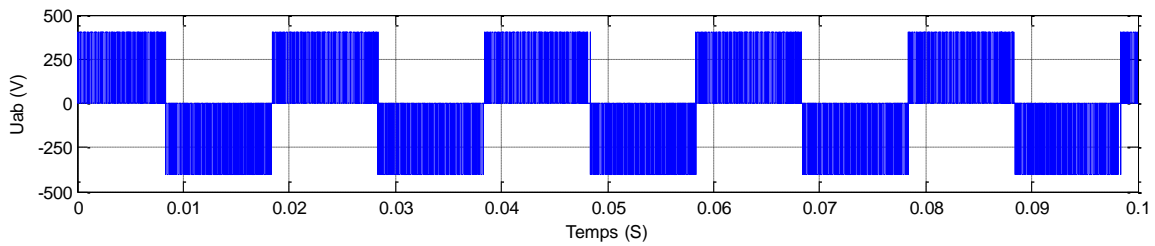


Figure III.16: L'Allures de la tension composé entre les deux phase « A » et « B » a la sortie de l'onduleur(V).

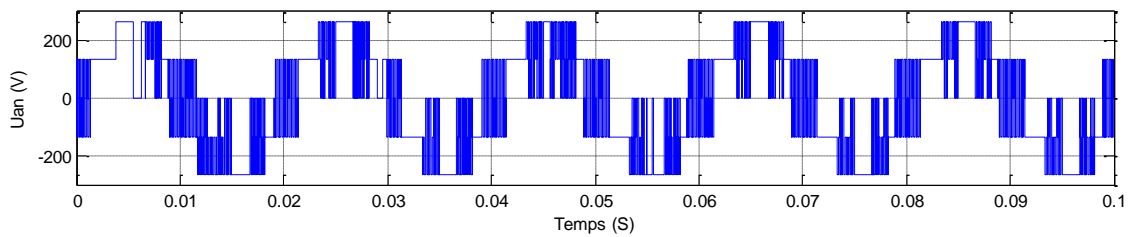


Figure III.17: L'Allures de la tension simple de la phase « A » a la sortie de l'onduleur (V)

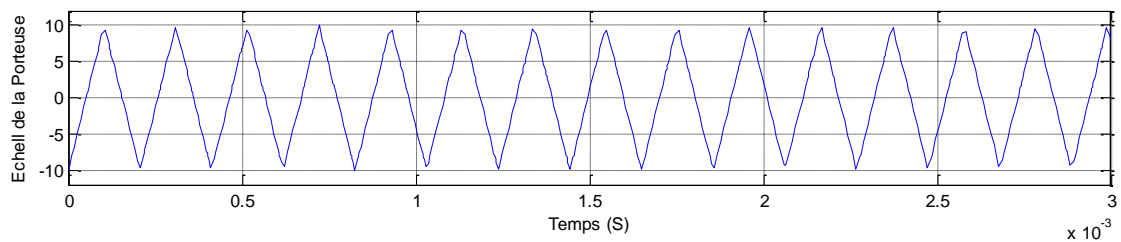


Figure III.18: Porteuse triangulaire de la technique MLI.

III.4. Interprétation des résultats :

Pour chaque type des onduleurs qui nous avons présenté dans cette partie nous simulerons quelques paramètres fondamentaux pour illustrer leurs performances. Les résultats des simulations numériques montrent que :

- ✓ Pour l'onduleur monophasé, grâce à sa structure simple et économique ce type d'onduleur est le plus souvent utilisé pour l'alimentation en basse tension. En remarque que la tension de blocage de chaque interrupteur est égale à la tension maximale aux bornes de la charge, et la commande à décalage permet de régler la puissance fournie sans augmenter la fréquence de commutation avec une chute de tension réduite donc possibilité de travailler à fréquence élevée. Noter aussi que le fonctionnement de la charge en régime quasi sinusoïdal donc pas besoin de filtre de sortie.
- ✓ Pour l'onduleur triphasé en pont, on peut dire que ce type est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre. Celui-ci est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables. Il peut être considéré comme étant la superposition de trois onduleurs demi-pont monophasés. Chacune des trois tensions de sortie est formée d'une onde bivalente prenant les valeurs $-U$ et $+U$ mais décalées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre. De plus si le récepteur est couplé en étoile sans neutre ou en triangle, les harmoniques multiples de trois sont éliminées. Ainsi, le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois. Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer une fois dans un sens, l'autre fois dans l'autre à la charge. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux, la période de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs. L'architecture de ce convertisseur se compose de plusieurs bras, connectés chacun à une phase du réseau et comportant deux interrupteurs de puissance, ainsi que la fréquence maximale de commutation est déterminée par les temps de commutation (ouverture et fermeture du composant) des interrupteurs et par le temps mort. Sur une période des commutations, un interrupteur commuté au maximum deux fois: à l'ouverture et à la fermeture, **Figure III.6**. Le temps mort sert à prévenir les risques de

court-circuit sur un bras, **Figure III.6**; Ce temps introduit entre l'ouverture d'interrupteur et la fermeture de son complémentaire, dépend des temps de commutation (*temps de réponse*) donc notre choix des semi-conducteurs.

- ✓ Pour *l'onduleur triphasé en pont à commande 120° (décalée)*, Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à un tiers de période, mais avec des séquences décalée de 120° d'un bras par rapport aux autres d'où :
 - à tous instants deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués ;
 - deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.

On obtient donc six séquences de conduction par période tel que l'illustre la **Figure III.4**; de plus il est judicieux de considérer le montage comme étant l'association de trois onduleurs monophasés en demi-pont en décomposant la source continue par deux sources équivalentes de tension $E/2$ avec un point milieu.

L'analyse des chronogrammes des tensions composées, représentés sur **la Figure III.7** montre que l'on obtient un système de tensions triphasé en marches d'escalier, d'amplitude E , de période T et déphasée deux à deux d'un angle de 120° .

Il est aisé de déduire les allures des tensions simples à partir de celles des tensions composées. La **Figure III.6** illustre cette construction. Sur ces chronogrammes, on voit que les trois tensions simples ont une forme en créneaux alternativement positifs et négatifs, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées d'amplitude $E/2$, de période T égale à celle des tensions composées. L'angle de déphasage qu'elles présentent entre elles, deux à deux, est égal à 120° .

L'inconvénient major de cette technique (120°) c'est qu'un onduleur triphasés pilotée par une commande à 120° , ne permet un réglage des valeurs efficaces des tensions composées et simples que par la variation de la tension délivrée par la source continue.

- ✓ Pour *l'onduleur triphasé en pont à commande 180° (plein onde)*, Cette commande est conçue de façon à ce que les interrupteurs soient commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais leurs conceptions déphasages, d'où:
 - à tout instant trois interrupteurs sont en état de conduire et les trois autres sont bloqués ;

- deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandé de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.

Les allures des tensions composées, **Figure III.5**, et tensions simples, **la Figure III.4**, montre le détail de cette construction. Sur ces chronogrammes on voit que les trois tensions simples ont une forme en marches d'escalier, et qu'elles forment, elles aussi, un système de tensions triphasées, d'amplitude $2E/3$, de période T égale à celles des tensions composées. L'angle de déphasage qu'elles présentent entre elles, deux, est égal à 120° .

Comme pour la commande précédente, un onduleur triphasé pilotée par une commande à 180° permet un réglage de la fréquence des tensions composées et simples, mais s'il est nécessaire, le réglage des valeurs efficaces ne peut être réalisé, selon l'origine de la tension continue il sera nécessaire d'insérer un convertisseur statique. Les deux solutions précédentes sont encore envisageables. La commande à 180° sera privilégiée par rapport à la commande à 120° , en effet elle délivre des tensions efficaces supérieures à la commande à 180° .

- ✓ Pour l'onduleur triphasé en pont à commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques qui serrent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine asynchrone. La technique *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 fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement.

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La *MLI*. permet de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur de fondamental de la tension de sortie, elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie ; ce que facilite le filtrage. Cependant, cette technique est imparfaite.

Le contenu harmonique génère par une onde *MLI*. entraîne des pertes dans le réseau (*pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur*), dans la charge (*pertes Joule, fer et par courant de Foucault*). Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électroniques. Elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Il faut donc minimiser ces harmoniques.

Pour notre travail, nous avons choisila *MLI sinus-triangle*, cette dernière est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (*tension de référence*) à une onde porteuse (**Figure III.18**) haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois référence sinusoïdales sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f .

D'ordinaire la modulation est synchrone, c'est-à-dire f_p est un multiple entier de f_m . La tension de sortie u est alors vraiment périodique et a bien une période T égal à $1/f_m$.

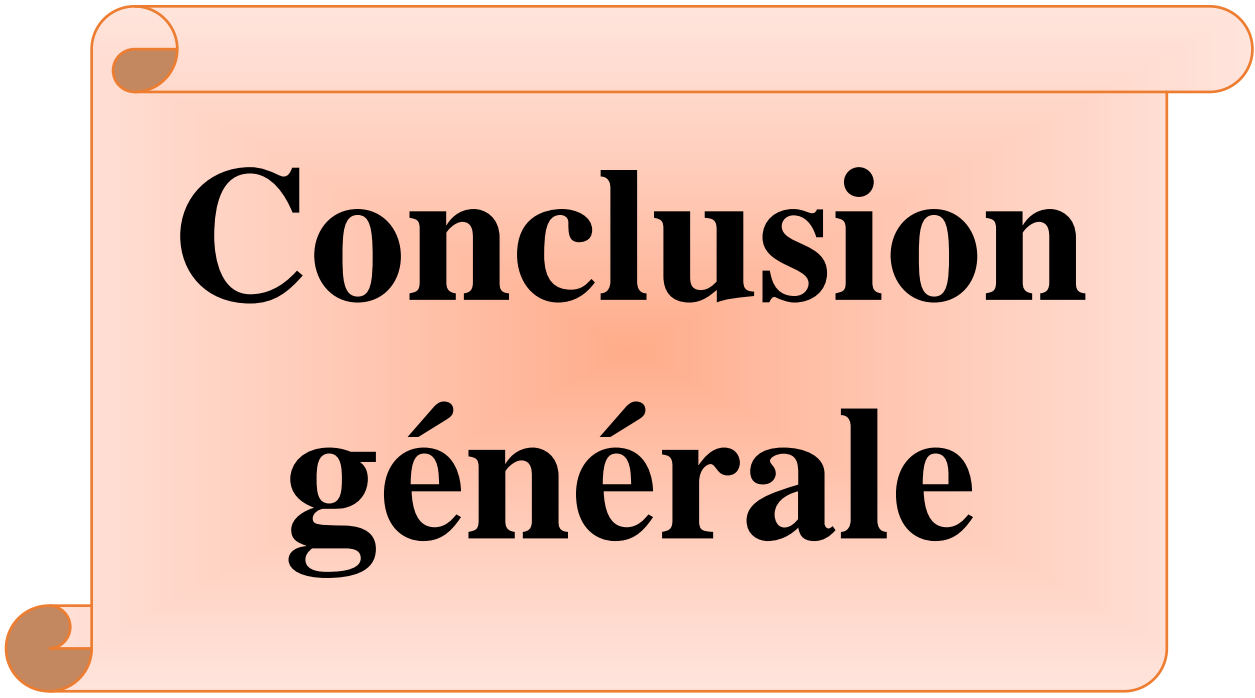
Mais dans certains cas modulation est asynchrone, notamment quand à fréquence de modulation f_p donnée on fait varier de façon continue la fréquence de la référence. En modulation synchrone, si m est impair, l'alternance négative de u reproduit au signe près son alternance positive. Le développement en série de u ne comporte que des harmoniques impairs.

Au contraire si m est pair, on trouve dans le développement série de u une composante continue, des harmoniques pairs et impairs. L'angle décalage (*MLI synchrone*), on dit le décalage est optimal si la porteuse passe par un maximum ou un minimum au milieu des alternances de la modulante, pour une modulation synchrone suffisamment importante ($m \geq 15$), les raies des harmoniques se répartissent par groupe au rang : $1, (m-2, m, m+2), (2m-5, 2m-3, 2m-1, 2m+1, 2m+3, 2m+5), \dots$

L'augmentation de m rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et facilite donc le filtrage. Mais, m est limité par les temps des commutations des interrupteurs des convertisseurs et donc par la largeur minimale des impulsions.

III.5. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique des différents montages des onduleurs ainsi que l'association onduleur triphasé en pont à commande MLI, avec une machine asynchrone. Nous avons validé la simulation numérique de système dans l'environnement *MATLAB /SIMULINK*, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenues.



Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'électronique de puissance est la branche de la physique appliquée qui traite des modifications de présentation de l'énergie électrique à l'aide des semi-conducteurs fonctionnant en commutation. Cette modification est pour réaliser des commandes de plus en plus sophistiquées.

Le présent travail a apporté une contribution à l'étude des performances dynamiques des convertisseurs statiques de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative (les onduleurs).

Les systèmes en électrotechnique sont caractérisés par la mise en œuvre d'énergie électrique. L'outil bond graph à vocation pluridisciplinaire nous a permis de décrire par une approche unifiée ce type de convertisseur de l'électronique de puissance. Toutefois, la complexité de ces phénomènes nécessite une analyse pour le choix des variables de puissance. L'application de cet outil sur un onduleur monophasé et triphasé a permis de représenter clairement les phénomènes de conversion d'énergie au sein du système grâce au caractère graphique du modèle d'une part et de prédire l'évolution du système grâce à sa représentation dynamique d'autre part [1].

Les onduleurs qui convertissent l'énergie des sources à courant continu en énergie sous forme de courant alternatif de 220V/50Hz ne cessent de prendre de l'importance à cause de leur utilité dans les milieux isolés qui ne trouvent que les batteries ou l'énergie solaire comme source. Le besoin du marché concurrentiel actuel met en avant les onduleurs performants, peu coûteux et faciles à réparer[4].

La commande prédictive appliquée à la machine asynchrone triphasée est présentée dans notre travail. L'accent a particulièrement été mis sur le modèle prédictif de la commande et la fonction de coût, afin de désigner le meilleur état de commutation possible pour les onduleurs et les convertisseurs matriciels alimentant la machine. À ce stade, les simulations des performances statiques et dynamiques de stratégie de la commande appliquée à la machine asynchrone triphasée ont été effectuées dans l'environnement Matlab/Simulink.

Nôtre travail concerne en premier lieu l'état de l'art du système en commence par des généralité sur les différents montages des onduleurs ainsi que les principes de fonctionnement de chaque type avec leur application correspond et aussi les différentes lois de commande de l'onduleur tel que la commande en pleine onde 180°, la commande décalée 120° et la commande MLI sinusoidal et vectoriel,, puis nous avons présenté une généralité sur les machines électriques et précisâmes la machine asynchrone .

La deuxième partie est consacrée à la modélisation du système, premièrement celle de la machine asynchrone et grâce à la transformée de Park qui permet de donner un modèle mathématique de la machine. Ce modèle permet de guider les développements observer expérimentalement. Puis la modélisation de l'onduleur de tension se forme d'une matrice qui nous donne la relation entre les grandeurs de l'entrée avec celle à la sortie du convertisseur.

Dans le dernier chapitre nous avons simulé sous l'environnement Matlab/Simulink tous les montages étudiés théoriquement, les résultats sont présentés et interprétés. On remarque que la technique de MLI sinusoïdal repousse les harmoniques vers des fréquences les plus élevées.

Nôtre étude peut être élargie (perspective) en se basant sur les mêmes stratégies, mais pour un autre type d'onduleur de tension à savoir les onduleurs multi-niveaux ou un autre type de modulation à savoir la modulation SIGMA-DELTA, ou encore commande par LOGIQUE FLOUE.



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOUKAROURA Abdelkader, «Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph» mémoire de magister en electrotechnique, universite ferhat abbas de setif, 2009.
- [2] TAYEBI AZZEDINNE, «Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque», thèse doctorat en science, universite djillali liabes de sidi-bel-abbes, 2021.
- [3] BENHADJER Abdeslam, «Etude, simulation et réalisation d'un onduleur triphasé pour les trains électro-diesel», Mémoire de master, ecole superieure en sciences appliquee -tlemcen-2019.
- [4] Saou Souhila, « Etude et réalisation d'un onduleur solaire sinusoïdal», Mémoire de master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi –2016.
- [5] BOUCHEBTOUL Youcef et LEMTAICHE Atmane, «réalisation pratique et implémentation des techniques de commandes à travers un onduleur triphasé», mémoire de master, universite de jijel, 2018.
- [6] Ben Ahmed Bouzid et Chelbi Farid, «implémentation sur dsp f28335 des stratégies de commande d'un convertisseur dc/ac», mémoire de master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2018 .
- [7] LAKEHAL Bilel, «Modélisation et commande d'un onduleur triphasé à structure multi-niveaux», mémoire de master, Université A/Mira – Bejaia, 2015.
- [8] Derdega Abdel Monaim et Hamaida Mohamed Lotfi, «commande prédictive d'une machine à induction alimentée par un convertisseur matriciel double étage», mémoire de master, université echahidhammalakhdar d'el-oued faculté de technologie, 2019.
- [9] GHERBI Allel et ABBAD Abdellah, «commande d'un moteur asynchrone par la logique floue adaptative», mémoire de master, université de bouira, 2018.
- [10] GUERFI YOUCEF, «régulation des onduleurs multi niveaux par un régulateur à logique floue», mémoire de magister, universite de badjimokhtare- annaba, 2009.
- [11] OUSSAMA DEGLA et TAREK SAYAH LEMBAREK, «Etude par simulation d'un onduleur», mémoire de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [12] Adjimi Nadia et Belaidi Wahiba, «modélisation et commande d'un onduleur MLI», mémoire de master en systèmes électriques & automatique (SEA), universitaire larbi ben m'hidi oum el-bouaghi, 2009.

- [13] GHOUISSEM Mohammed, «commande par logique floue d'un moteur asynchrone alimente par un onduleur sous défaut», mémoire de magistère , université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf,2016.
- [14] LARBI CHERIF Saïd et KOUIDER Nadir, «modelisation des pertes de puissance d'un onduleur de tension triphasee», mémoire d'ingénieur d'état en electrotechnique, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou,2008.