REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie électrique.

Spécialité : Commandes électriques.

Implémentation de la stratégie d'élimination Sélective d'harmonique par la Commande d'un Onduleur cinq Niveaux

---

Présenté par :

Megrous Omrane

Belhout mohamed

Proposé et Dirigé par :

Henini Noureddine

Promotion 2020

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents pour leurs soutient morale et les sacrifices qu'ils ont endurés dans, la Tendresse, l'amoure, la patience, le soutien, et l'encouragement, de ma réussite. Sans eux je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.

A nos frères A nos sœurs chacun à son nom.

A toute la famille Belhout.

A nos chers amis,

A tous les amis (es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2020.

Tous ceux, qui ont contribué à nos formations, de prés et de loin.

Belhout

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère,

Mon cher père,

Mon cher frère et ma sœur,

Toute ma famille megrous,

Et tous mes amis,

Et toute la promotion d'électrotechnique (2020).

Megrous Omrane

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **Allah**.*

*Nous tenons à remercie très vivement Notre encadreur **Henini Noureddine** qui est un potentiel infini pour les conseils*

Avisés et l'encouragement constant. Nos vifs remerciements d'adressent aussi à toutes les promotions 2ème année Master du département d'électrotechnique.

Enfin Nous associons nos remerciements à toute personne d'étant

Montré coopérant de près ou de loin à la réalisation

de ce mémoire de fin d'études.

Ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

Chapitre I : les onduleurs multi niveaux

I.1 Introduction 02

I.2 Principe de l'onduleur multi niveaux.....02

I.3 Principales topologies d'onduleurs multi niveaux.....02

I.3.1 Classification des topologies selon leur alimentation.....05

I.3.2 Classification des topologies selon les nombres de composants nécessaires 06

I.4 Stratégies de commande 07

I.5 conclusion 11

Chapitre II : Stratégie d'élimination sélective harmonique

II .1 Introduction.....13

II .2 Définition des harmoniques 13

II .2.1 Origine des harmoniques.....13

II .2.2 La distorsion harmonique THD 14

II .2.3 Rang harmonique 14

II .2.4 Harmonique de courant et de tension 14

II .2.5 Les déférents effets des harmoniques 16

II .3 La commande par élimination sélective des harmoniques 16

II.3.1. Décomposition en séries de Fourier.....17

II .3.2 Application de la méthode SHEPWM 18

II .3.3 Méthode de Newton-Raphson 19

II .4 Les méthodes d'optimisation 20

II .4.1 Les méthodes d'optimisation locale 20

II.4.2 Les méthodes d'optimisation globale 21

II.5 Optimisation stochastique 22

II.5.1 Optimisation par Colonie d'abeilles.....24

II.6 conclusion 27

Chapitre III : La simulation des onduleurs multi niveaux

III.1 Introduction.....28

III.2 Simulation d'un onduleur 5 niveaux 28

III.3 conclusion 34

Conclusion générale.....35

Références Bibliographique

Abréviation

F: la fréquence.

THD: la distorsion harmonique.

$\mathbf{F_H}$: la fréquence harmonique.

$\mathbf{F_i}$: la fréquence fondamentale.

$\mathbf{U_s}$: tension de la sortie alternative.

$\mathbf{U_N}$: amplitude de l'harmonique.

Ɵ: angle de commutation.

P: nombre totale de commutation.

N: nombre de niveau de l onduleur multi niveaux.

U: tension d alimentation.

M : modulation index.

Ap : Amplitude de la porteuse triangulaire.

W: la pulsation.

S: Le nombre de source tension continue.

$\mathbf{P_I}$: probabilité.

$\mathbf{V_{dc1}}$, $\mathbf{V_{dc2}}$: deux valeurs de la tension de sortie de l'onduleur.

ma : Indice de modulation.

NPC : neutral point clamped.

ABC : artifitiel bee colonies des abeilles.

SHEPWM : stratégie d élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion.

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.

RESUME

Résumé :

Ce travail traite l'onduleur multi niveaux à NPC (Neutral Point Clamped) est basée sur l'évaluation du taux de distorsion harmonique THD pour l'onduleur commandés par stratégie de commande SHEPWM "stratégie d'élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion"

Tous les circuits sont modélisés et simulés à l'aide du logiciel Matlab-Simulink-SimPowerSystems.

Mots clés : Onduleur multi niveaux, modulation de la largeur d'impulsion MLI, stratégie d'élimination sélective harmonique (SHE), Onduleur clampé par le neutre (NPC), Taux Distorsion Harmonique (THD).

Abstract :

This work deals with the multi-level inverter at NPC (Neutral Point Clamped) is based on the evaluation of the harmonic distortion rate THD for the inverter controlled by SHEPWM control strategy 'selective harmonic elimination of width modulation strategy. impulse" All circuits are modeled and simulated using Matlab-Simulink-SimPowerSystems software.

ملخص

يتناول هذا العمل العاكس متعدد المستويات استنادًا إلى تقييم معدل التشوه التوافقي للعاكس الذي يتم التحكم فيه بواسطة إستراتيجية عرض تعديل استبعاد التوافقية الانتقائية لإستراتيجية التحكم.

يتم تصميم ومحاكاة جميع الدوائر باستخدام برنامج الماطلاب

Liste des figures

Chapitre I : *les onduleurs multi niveaux*

Figure (I.1) : Schéma d'un bras d'onduleur : a) 2 niveaux b) 3 niveaux c) N niveaux. 04

Figure (I.2) : Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux. 04

Figure (I.3) : Onduleur multi niveaux à cellules imbriquées. 05

Figure (I.4) : Pont en H complet… 06

Figure (I.5) : Schéma de principe de la technique tringulo-sinusoïdale. 08

Figure (I.6) : Approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation. 09

Figure (I.7) : Représentation dans le plan (α, β) des vecteurs de tension de l'onduleur à trois Niveaux de tension. 10

Chapitre II : Stratégie d'élimination sélective harmonique

Figure (II.1) : Représentation spectrale d'un signal Périodique. 25

Figure (II.2) : Décomposition spectrale du Signale en fréquence.... 26

Figure (II.3) : Simulation de méthode de Newton Raphson. 27

Figure (II.4) : Exemple de l'Algorithme de ABC (Colonie d'abeilles). 28

Chapitre III: La simulation des onduleurs multi niveaux

Figure (III.1) : La tension simple pour : r = 0.6. 42

Figure (III.2) : La tension composée pour : r = 0.6. 43

Figure (III.3) : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 0.6. 44

Figure (III.4) : La tension simple pour : r = 0.9. 44

Figure (III.5) : La tension composée pour : r = 0.9. 44

Figure (III.6) : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 0.9. 44

Figure (III.7) : La tension simple pour : r = 1. 44

Figure (III.8) : La tension composée pour : r = 1. 44

Figure (III.9) : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1 44

Figure (III.10) : La tension simple pour : r = 1.1. 44

Figure (III.11) : La tension composée pour : r = 1.1. 44

Figure (III.12) : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1.1. 44

Figure (III.13) : La tension simple pour : r = 1.2. 44

Figure (III.14) : La tension composée pour : r = 1.2. 44

Figure (III.15) : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1.2. 44

Figure (III.16) : Allures tracées par les angles de commutations en fonction de différents Valeurs De taux de modulation 44

Liste des tableaux

Chapitre I : les onduleurs multi niveaux

Tableau (I.1) : Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux. 19

Tableau (I.2) : Tableau de comparaison entre les trois topologies 20

.

Chapitre III : La simulation des onduleurs multi niveaux

Tableau (III.1) : Tableau de résultat (THD) pour chaque taux de modulation…. 46

Introduction Générale

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif, ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses, certaines d'entre elles exigent une alimentation électrique à haute tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales. Des nouvelles techniques dites multi niveaux ainsi que des nouvelles topologies des convertisseurs ont été développées, elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur, le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés.

Donc, l'utilisation des onduleurs multi niveaux a la possibilité de produire une bonne qualité de tension avec une baisse fréquence de commutation ainsi la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques.

Il existe plusieurs topologies de ces convertisseurs de puissance qui sont utilisés dans l'industrie, dans le cas de notre travail, on va étudier l'onduleur de trois niveaux à structure NPC, ce dernier permet d'améliorer la forme de la tension de sortie pour qu'elle soit plus proche de la sinusoïde. Afin de satisfaire certains critères d'optimisation à savoir la réduction des harmoniques, plusieurs types de commande sont développés, poussés par le besoin et les progrès technologiques, dans notre cas, on va utiliser la commande par élimination sélective des harmoniques. [9] [6]

Nous avons organisé ce mémoire en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons citer les différents topologies du convertisseur multi niveaux, et les différentes stratégies de commande.

Le deuxième chapitre nous avons défini l'harmonique et ses effets. Ensuite la stratégie de commande SHEPWM "stratégie d'élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion" et à la fin en a choisir une méthode d'optimisation stochastique pour le calcul des angles de commutation pour éliminé les harmonique.

Le troisième chapitre, consiste la simulation de l'onduleur multi niveaux pour différentes valeurs d'indice de modulation, et cela pour avoir la valeur de THD la plus petite possible.

Chapitre I

Les Onduleurs Multi Niveaux

I.1. Introduction :

L'onduleur multi-niveaux est de loin plus performant que l'onduleur à deux niveaux. Ces convertisseurs sont dits multi-niveaux, car ils génèrent des tensions formées de plusieurs niveaux (généralement plus de deux). Les onduleurs multi-niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites imposées par les semi-conducteurs. [1]

Ils peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs manières. [2]

I.2 Principe de l'onduleur multi niveaux :

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi niveaux.

La figure (I.1) aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multi niveaux.

Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (I.1). (a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal.

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou Vdc1. Sur la figure (I.1). (b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs : 0, Vdc1 ou Vdc1 + Vdc2. Dans la figure (I.1). (c), le cas général de N niveaux. [2]

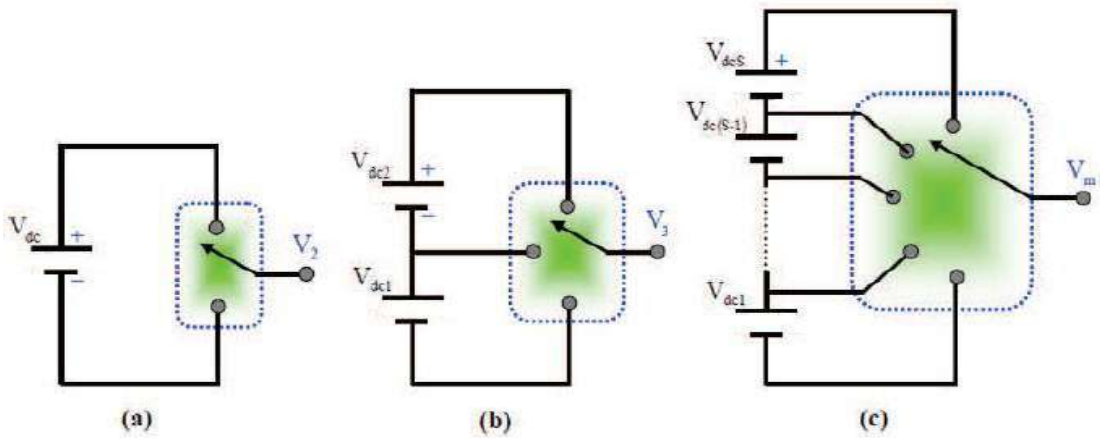


Figure I.1 : Schéma d'un bras d'onduleur : a) 2 niveaux b) 3 niveaux c) N niveaux

I.3 Principales topologies d'onduleurs multi niveaux :

Dans cette partie on va d'écrire les trois principales topologies de ces convertisseurs :

A)-La topologie à diode de bouclage (NPC).

B)-La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées).

C)-La topologie en cascade.

A) La topologie à diode de bouclage (NPC) :

Cette structure d'onduleur multi niveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge. La répartition de la tension aux bornes des interrupteurs est assurée par les diodes connectée à des points milieux capacitifs. [2][4]

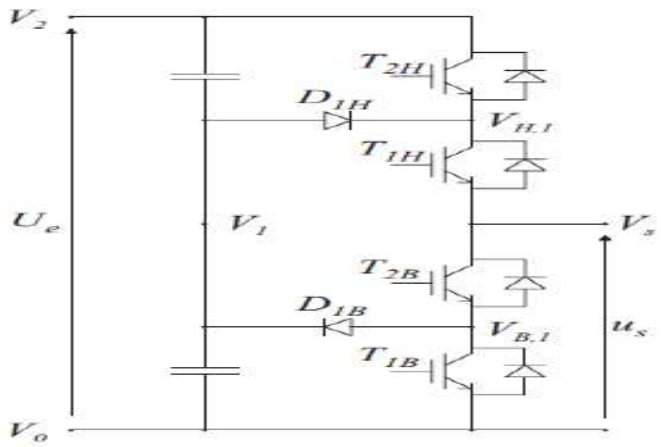


Figure I.2 : Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux.

Principes de base de la branche 3 niveaux

Dans sa version la plus simple, chaque branche de cet onduleur comporte 4 Interrupteurs contrôlables et 6 diodes. Ce montage est alimenté par une tension continue (Ue) entre les bornes V0 et V2. Les 3 états de commutation possibles permettent de Délivrer 3 niveaux distincts et positifs entre les bornes VS et V0. [2]

T_{2H}	T_{1H}	T_{2B}	T_{1B}	U_s
1	1	0	0	U_e
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$\frac{U_e}{2}$
1	0	0	1	indéfini

TAB I.1 : Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux. [4]

B) La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées) :

Cette structure a été introduite en 1992 par T. Meynard et H. Foch.

Elle est également connue sous l'appellation « *flying capacitors multilevel inverter* » dans la littérature anglo-saxonne. [4]

Elle est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flotteurs ». Cette structure est semblable à celle de l'onduleur NPC, sauf qu'au lieu d'utiliser les diodes de clampes, on doit les remplacer par des condensateurs qui jouent le rôle des sources de tension. [2]

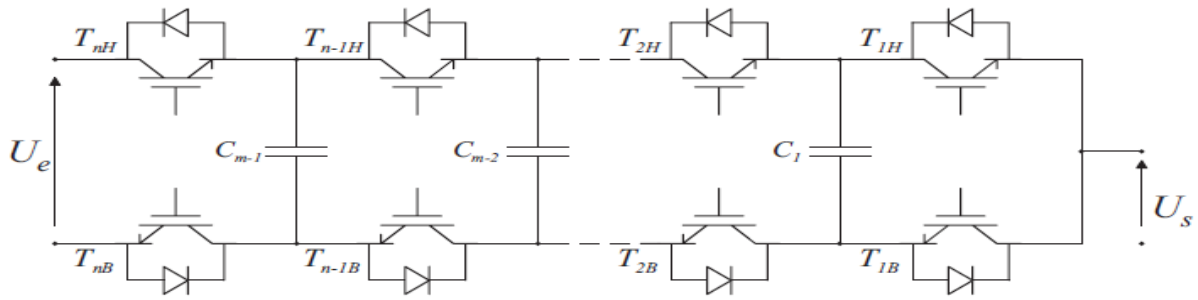


Figure I.3: Onduleur multi niveaux à cellules imbriquées.

Principes de base

La Figure I.3 illustre le schéma de principe en échelle d'une branche d'onduleur à m cellules imbriquées, chaque paire d'interrupteurs situés sur la même verticale forme une cellule de commutation dont les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire, toutes les combinaisons de signaux de commande respectant cette complémentarité sont autorisées, cet onduleur a donc 2m états possibles pour la commande. [4]

C) La topologie en cascade :

En1975, plusieurs auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui Consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés.

Ces ponts étant Connectés à des sources de tension continues séparées, donc isolées les unes par rapport aux Autres.

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série telle que l'onde de la tension Synthétisée est la somme des tensions de sortie.

Le nombre des niveaux de tension de sortie Dans un onduleur en cascade est défini par :

$N = 2S + 1$

Ou S : le nombre des sources des tensions continues De façon générale, un convertisseur à N niveaux est réalisé par l'association de (N-1) /2 onduleur monophasé.

L'avantage majeur de cette approche hybride est que le nombre de sorties peut être augmenté Davantage sans aucun ajout de nouveaux composants. Il faut seulement des sources de tensions continues avec différents niveaux de tensions. [2]

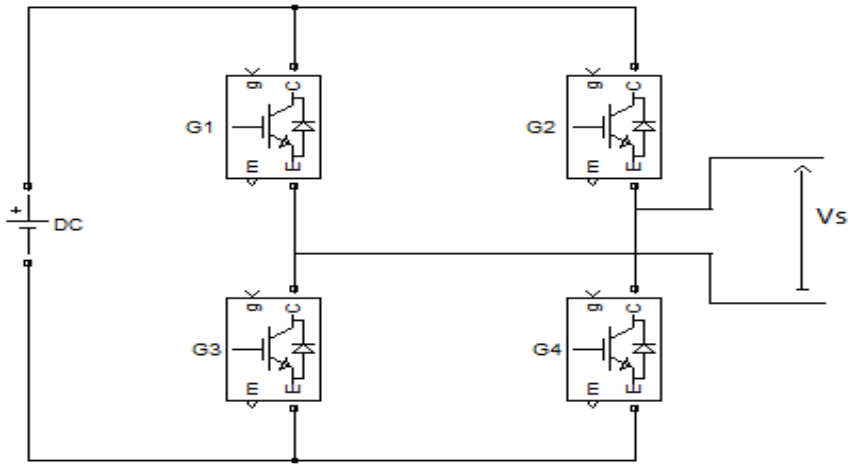


Figure I.4: Pont en H complet.

D) Autres topologies :

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

a) Le convertisseur asymétrique hybride,

b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,

c) Le convertisseur avec commutation douce,

d) Les convertisseurs reliés par transformateur,

e) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,

f) Le convertisseur multi niveaux généralisé. [6]

I.3.1 Classification des topologies selon leur alimentation :

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée, elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. [3]

Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels, dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. [4]

I.3.2 Classification des topologies selon les nombres de composants nécessaires :

A l'aide du tableau suivant, nous comparons le nombre de composants nécessaires Pour réaliser une branche d'onduleur, de tension de service et de nombre de niveaux donné, avec les 3 principales topologies d'onduleurs multi niveaux.

Les composants sont supposés de taille identique, tous les onduleurs sont supposés alimentés par une source de tension continue, les condensateurs intermédiaires ne sont donc pas comptabilisés pour les onduleurs en pont et pour les onduleurs à cellules imbriquées, les condensateurs se trouvant à l'étage intermédiaire des onduleurs NPC sont partagés par les différentes phases, leur nombre est donc divisé par le nombre de branches nous obtenons pour m+1 niveaux :

Topologie	m	T	D	C	N	N_E
NPC	m	2m	m^2+m	$\frac{2m}{b}$	m + 1	m + 1
Cellules imbriquées	m	2m	2m	$\frac{m^2-m}{2}$	m + 1	2^m
Cascade	m	2m	2m	m	m + 1	$3^{\frac{m}{2}}$

TAB I.2 : Tableau de comparaison entre les trois topologies.

Avec :

– m : le nombre d'étages ou de cellules.

– b : le nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé.

– T : le nombre de transistors.

– D : le nombre de diodes.

– C : le nombre de condensateurs.

– n : nombre de niveaux obtenus.

– NE : nombre d'états de commutation.

Cette comparaison basée sur le nombre de composant, permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs. Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les structures Permettant une conversion directe, telles que NPC et cellule imbriquées, sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, lorsqu'une isolation galvanique n'est pas nécessaire entre les sources échangeant de la puissance. Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active. Ce sont également des structures à privilégier pour les applications où il faut mettre en place une isolation galvanique à l'aide de transformateur moyenne ou haute fréquence. [2]

I.4 Stratégies de commande :

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivants plusieurs stratégies, a faible fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continu doit être réglable, a fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante.

Certaines applications nécessitent des performances de hauts niveaux, mais la présence des harmoniques d'ordre peu élevé dans le signal de tension peut dégrader ces performances, afin de produire des tensions de sortie proches de la sinusoïde, différentes stratégies de commande on été proposées par différents auteurs pour l'onduleur de tension, et on à les stratégies Suivantes :

A) _ Commande triangulo-sinusoïdale

B) _ Commande en pleine onde.

C) _ Commande à MLI vectorielle.

D) _ Stratégie d'élimination sélective harmonique(SHE).

La plus connue est la stratégie triangulo-sinusoïdale et la méthode d'élimination d'harmoniques adaptées au cas des onduleurs multi-niveaux asymétriques. [2]

A) Stratégie triangulo-sinusoïdale :

Cette méthode pousse les harmoniques vers les fréquences élevées, en ayant recours des à porteuses de hautes fréquences, Pour commander un convertisseur à *N* niveaux de tension, (*N-1*) porteuses triangulaires unipolaires sont générées, les signaux triangulaires ont la même fréquence *fp* et la même amplitude *Ap= 2/(N-1),* celles-ci sont ensuite comparées à

un système triphasé de référence d'amplitude *Ar* et de fréquence *fr*. Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à une référence, et 0 dans le cas contraire.

La somme des résultats obtenus de la comparaison, donne la valeur de la tension de phase de chaque niveau.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

• -Indice de réglage m= fp/fr

-Taux de réglage *r = Ar / (N-1)Ap*. [2]

Donc Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux (r1, r2, r3), d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence.

L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

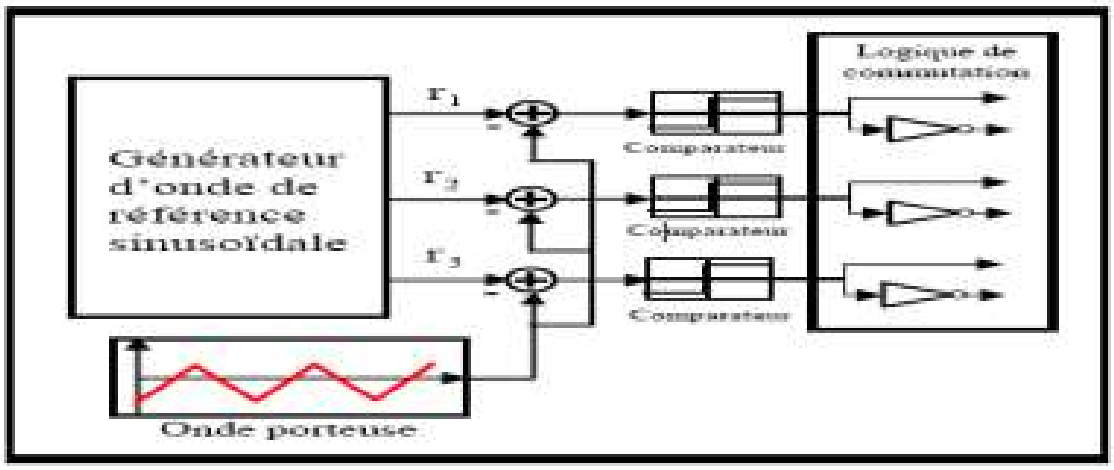


Figure I.5: schéma de principe de la technique tringulo-sinusoïdale.

Caractéristique de la modulation :

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

- Indice de modulation m égale au rapport de la fréquence fc de la porteuse à la fréquence fm de la référence m=fc/fm
- Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence Am à celle de la porteuse Ac ; r = Am/ Ac

La modulation est dite synchrone si l'indice m est entier c.à.d. lorsque la fréquence du porteuse fp est un entier multiple de la fréquence de l'onde de référence f. en modulation synchrone, si l'indice de modulation m est impair le développement en série de Fourier de la tension de sortie ne comporte alors que des harmoniques impairs. Si l'indice m est pair, on trouve la composante continue ainsi que les harmoniques pairs et impairs.

La modulation est dite asynchrone si l'indice m n'est pas entier, elle est utilisée pour des

valeurs suffisamment élevées, en modulation asynchrone, si le maximum de la référence correspond à un pic de la porteuse, on dit que le calage est optimal et la tension bénéficie d'un double symétrique par rapport au quart et milieu du période

- Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD, définit par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du Fondamental et des harmoniques de la tension [3]:

$$\text{THD} = \frac{(\sum_{i=2}^{n} V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^{n} V_i^2)^{1/2}}$$

B) La commande en pleine onde :

La tension générée par la stratégie de la commande pleine onde à une forme rectangulaire, Sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques. Pour une commande pleine onde (180°), la décomposition en série de Fourier de la tension composée est donnée par :

$$\text{Vab} = \sum_{n=1,3,5\ldots}^{a} \frac{4\text{Vs}}{n\pi} \cos\frac{n\pi}{6} \sin\left(n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right)$$

Les tensions Vbc, Vca sont décalée par rapport à Vab respectivement de 120° et 240° [3].

C) Commande à MLI vectorielle :

La stratégie de la modulation vectorielle est proposée par « Der Broek & al, 1988 ».
Elle consiste à générer une séquence spécifiée des états de l'onduleur, la modulation vectorielle est une modulation en temps réel, elle utilise le fait qu'un vecteur peut représenter les trois tensions d'un système triphasé de somme nulle.
Cette modulation est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif, les tensions de référence sont les tensions désirées à la sortie de l'onduleur. Cette technique à MLI est basée sur les principes suivants :

- Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles T (MLI régulière).
- Pour chaque phase, on envoie une impulsion de largeur centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux¬ extrémités de la période. [3]

Le principe de la modulation vectorielle :

Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur tension Vref à partir de huit vecteurs tensions, chacun de ces vecteurs corresponds à une combinaison de l'état des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé.

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes.

Elle consiste à considérer globalement le système triphasé, et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan (Vα, Vβ). Le système triphasé des tensions à générer pour la durée d'échantillonnage en cours peut alors être représenté comme un unique vecteur dans ce plan.

Ce vecteur n'est pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone), et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en valeur moyenne le vecteur recherché.

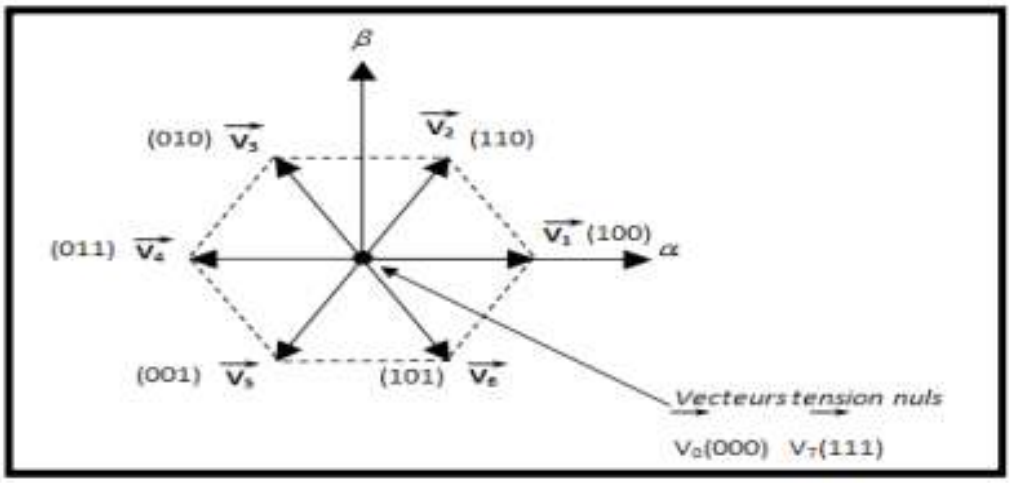


Figure I.6 : approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation.

La modulation vectorielle traite donc, les signaux triphasés comme un tout. L'onduleur triphasé à trois niveaux de tension ayant trois bras et trois configurations, il possède 33 =27 modes de commutations possibles. Il peut donc générer 27 vecteurs différents de tension de sortie.

La représentation sur le plan (α, β) de ces 27 vecteurs est donnée par la figure (**I.7)**. [3]

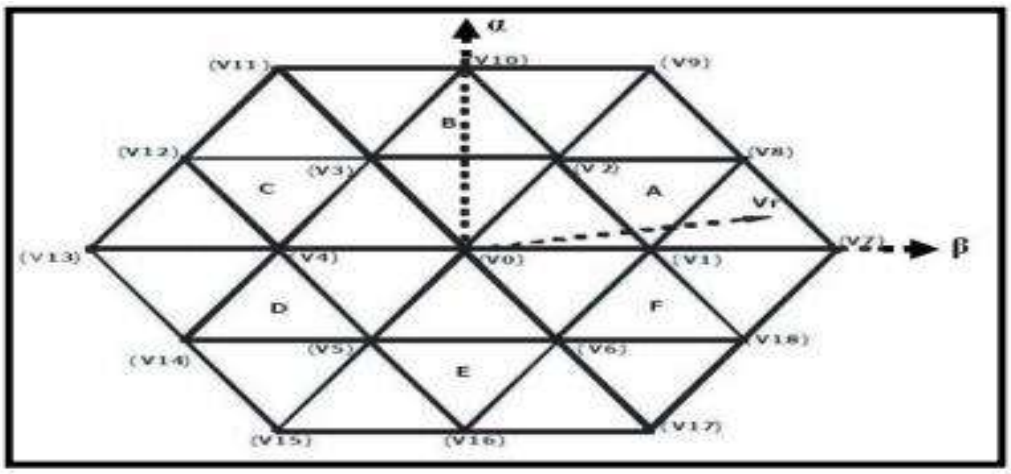


Figure I.7 : Représentation dans le plan (α, β) des vecteurs de tension de l'onduleur à trois niveaux de tension.

D) Stratégie d'élimination sélective harmonique :

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie, sera présentée ici pour commander un onduleur trois niveaux. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi- période. Cette onde est caractérisée par le nombre de créneaux ou d'impulsions par alternance. Que C soit impair ou pair, C angles suffisent pour déterminer la largeur de l'ensemble des créneaux ; C représente aussi le nombre d'angles de commutation par quart de période. Ces angles de commutation sont déterminés de telle façon à éliminer certains harmoniques. Dans la présente étude nous nous sommes intéressés à éliminer les premiers harmoniques (ex : 3, 5, 7, 9, 11,…pour le monophasé et 5, 7, 11, 13, 17, … pour le triphasé) qui sont les plus gênants et donc indésirables pour le fonctionnement des charges telles que les moteurs électriques.

A cause de la caractéristique de la courbe, qui est symétrique par rapport au demi et au quart de la période, la série de Fourier sera simplifiée et l'étude se limitera seulement au quart de période de cette même courbe.

La décomposition en série de Fourier, qui montre l'existence d'harmoniques d'ordres impairs seulement [5], est donnée par:

$$u_s = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\omega t)$$

$$u_n = \frac{4U}{n\pi}\sum_{i=1}^{p}\cos(n\theta_i)$$

Avec :$\theta_1 < \theta_2 < \cdots < \theta_n < \frac{\pi}{2}$

I.5 conclusion :

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude Ar et de fréquence Fr, avec un signal appelé porteuse d'amplitude Ap et de fréquence Fp très élevée.[7]

Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possible. [6]

Pour l'onduleur de notre système de commande, nous utilisons la technique SHEPWM

« Stratégie d'élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion ».

Chapitre II

Stratégie D'élimination Sélective harmonique

II.1 Introduction :

Afin d'améliorer la qualité de la tension de sortie de l'onduleur, différentes stratégies de modulation de largeurs d'impulsions (MLI) ont été proposées, la plus connue est la stratégie triangulo-sinusoïdale, elle pousse les harmoniques vers les rangs élevés, en ayant recours à des porteuses de fréquence élevée.

Pour les applications de moyenne tension, les composants de puissance sont limités en fréquence et en tension inverse, pour remédier cet inconvénient, la technique de MLI par élimination sélective d'harmonique (SHEPWM) est la plus adaptée.

L'idée de cette dernière a été introduite pour la première fois par Turnbull en 1967 puis développée par Patel et Hoft en 1973, cette technique permet l'annulation des harmoniques de bas ordre tout en contrôlant le fondamental et avec l'avantage d'une faible fréquence de commutation des composants de puissance.

La principale difficulté de la SHEPWM réside dans la résolution de l'inhérent système d'équations non linéaires pour déterminer les angles de commutation, la complexité de ce système augmente avec l'augmentation de nombre d'harmoniques à éliminer [8].

Dans ce chapitre nous avons étudions la SHEPWM, la formulation mathématique de cette dernière est basée sur quelques équations simples. Le principe de cette stratégie est basé sur le développement en série de Fourier de la tension *us* à la sortie du convertisseur.

II .2 Définition des harmoniques :

Un signal périodique se compose d'un signal de fréquence (***f***) et de forme quelconque peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant..

- ✓ Un signale sinusoïdale a la fréquence sinusoïdale, courbe fondamentale.
- ✓ Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont multiple entiers du fondamental, les harmonique.
- ✓ Une éventuelle composante continue.

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase. [13]

II .2.1 Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des

réseaux électriques, ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [6].

II .2.2 La distorsion harmonique THD :

Le taux global de distorsion harmonique THD permet d'évaluer l'écart entre la forme d'onde réelle et la forme d'onde sinusoïdale pour un courant ou une tension.
Quantitativement, la distorsion harmonique totale est définie comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale. Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension.

Le (THD) donne une mesure de la déformation du signal : [2] **THD=**$\sqrt{\sum_{2}^{\infty} \frac{{Y_h}^2}{{Y_I}^2}}$

II .2.3 Rang harmonique :

Rang harmonique est le rapport de fréquence harmonique (f_h) à celle du fondamental (f_I):[2]

$$Rang = \frac{f_h}{f_I}$$

En règle générale on distingue **les harmoniques de rangs pairs** (2, 4, 6,8...etc.) et **les harmoniques de rangs impairs** (3, 5, 7, 9 ...etc.) plus influents, dans les réseaux industriels. Il excite aussi d'autre type d'harmonique tel que :

-**Inter harmoniques :** sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence Fondamentale.

- **Infra harmoniques :** ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du Fondamental. [13]

II .2.4 Harmonique de courant et de tension :

A. Harmonique de courant

Dans la plupart des cas, les harmoniques présentés sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charge non linéaire.

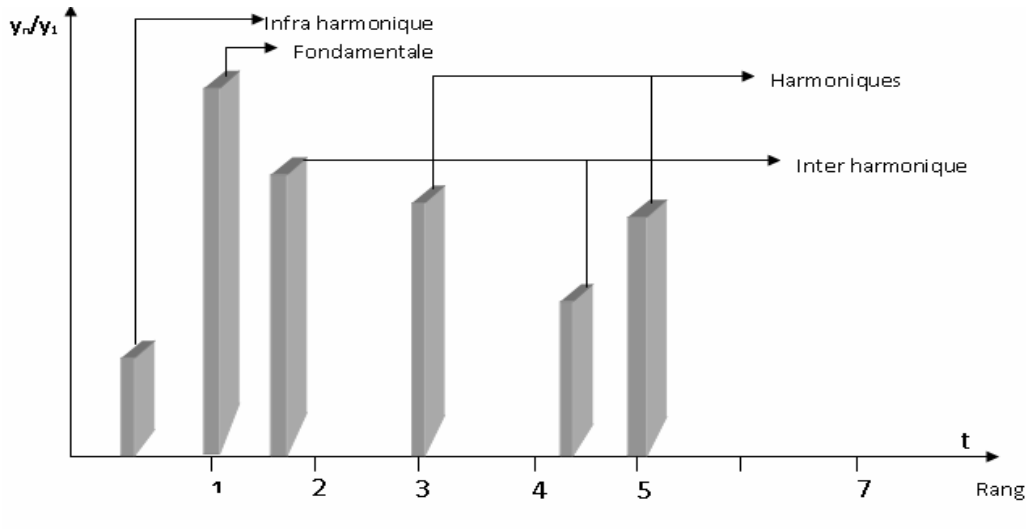


Figure II.1 : Représentation spectrale d'un signal Périodique.

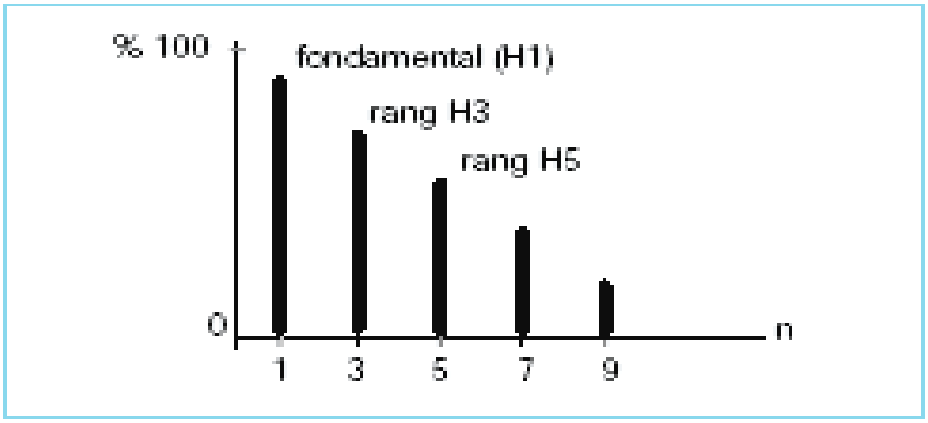


Figure II.2 : Décomposition spectrale du Signale en fréquence.

Ces charges se comportement approximativement comme des sources de courant harmonique c'est-à dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension de réseau auquel elles sont raccordées.

Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide autorisant un découpage de l'onde 50 Hz, au contraire des charges actives. Les charges actives utilisant toujours des commutateurs électroniques de puissance.

B. Tension harmonique :

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet dans ce cas, on s'intéressé à l'étude du raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent. [13]

II .2.5 Les déférents effets des harmoniques :

Les harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés.
- soit des effets à long terme dus à l'échauffement.

A. Les effets instantanés

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les liaisons et les équipements "courants faibles", entraînant des pertes d'exploitation. Les compteurs d'énergie présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques.

B. Les effets à l'échauffement

En prendre comme un exemple en explique : l'échauffement des câbles et des équipements les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence. Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des matérielle électrique perturbés par la pollution harmonique. [13]

II .3 La commande par élimination sélective des harmoniques :

Le principe de cette stratégie est basé sur le développement en série de Fourier de la Tension *us* à la sortie du convertisseur à pas Uniforme [2]. Cette tension admet une symétrie par rapport à la demi et au quart de la période, de ce fait les composantes harmoniques paires en cosinus et en sinus sont nulles, la décomposition en série de Fourier de cette tension est donnée par la relation :

$$u_s = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\omega t)$$

$$u_n = \frac{4U}{n\pi} \sum_{i=1}^{p} \cos(n\theta_i)$$

Avec :$\theta_1 < \theta_2 < \cdots < \theta_n < \frac{\pi}{2}$

• u_n : Amplitude de l'harmonique de rang *n* (*n* impaire)

• *p:* Nombre total de commutations sur un quart de période, *p = (N-1)/2 ;*

• θ_i: Angles de commutation (*i = 1, 2,…, p*).

Les *p* angles de commutation de la relation (4) sont déterminés en imposant l'amplitude de la composante fondamentale et en annulant les (*p*-1) harmoniques.

Dans la présent étude, nous nous sommes intéressés éliminer les harmonique d'ordre (5,7, 11, 13,17 pour les systèmes triphasé). [14]

II.3.1. Décomposition en séries de Fourier :

Une fonction périodique $f(t)$ de période T peut, sous certaines conditions mathématiques qui seront toujours réalisées dans la pratique en physique, être décomposée en une somme de fonctions sinusoïdales de la forme :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \qquad \text{II.1}$$

(n : entier, $\omega = \frac{2\pi}{T}$)

Les coefficients : a_0, $a_n$et b_n sont indépendants du temps et sont donnés par les intégrales Suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos nwt\, dt \qquad \text{II. 2}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin nwt\, dt$$

On remarque que a_0 est la valeur moyenne de la fonction $f(t)$, il est donc nul si la fonction $f(t)$ est alternative.

Si la courbe représentative de la fonction $f(t)$ admet un centre de symétrie situé sur l'axe O_x, alors, donc une fonction périodique possède la symétrie impaire, en choisissant ce point comme origine des temps :

$$f(-t) = -f(t) \qquad \text{II.3}$$

Pour une fonction périodique impaire, son développement en séries de Fourier ne comportera que des termes en sinus, en outre, afin de déterminer l'amplitude de ces fonctions de sinus, on doit seulement intégrer sur la demi ou bien sur le quart de la période.

$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0 \qquad \text{II. 4}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin nwt \, dt$$

Utilisant la sortie de l'onduleur multi niveaux donnée sur la figure II.1:

On pose : $\theta = \omega t$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} E(\theta) \sin(n\theta) \, d\theta \qquad \text{II. 5}$$

Pour un onduleur de 7 niveaux on aura :

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} (E) \sin(n\theta) \, d\theta + \frac{4}{\pi} \int_{\theta_2}^{\frac{\pi}{2}} (E) \sin(n\theta) \, d\theta + \frac{4}{\pi} \int_{\theta_3}^{\frac{\pi}{2}} (E) \sin(n\theta) \, d\theta \qquad \text{II.6}$$

Où θ_1, θ_2 et θ_3 sont les angles de commutation et la tension d'entrée de chaque pont H. En Intégrant l'équation on aura :

$$b_n = -\frac{4}{n\pi} E \cos(n\theta) \Big|_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} - \frac{4}{n\pi} E \cos(n\theta) \Big|_{\theta_2}^{\frac{\pi}{2}} - \frac{4}{n\pi} E \cos(n\theta) \Big|_{\theta_3}^{\frac{\pi}{2}} \qquad \text{II. 7}$$

Finalement, pour *n* nombre entier et impair, $\cos n\frac{\pi}{2} = 0$

Donc on aura l'équation [2]:

$$b_n = \frac{4}{n\pi} E \left[\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3)\right] \quad n=1,3,5 \ldots \qquad \text{II. 8}$$

II .3.2 Application de la méthode SHEPWM :

La tension *VS* de l'onduleur est une onde sous forme d'escalier de 7 niveaux, elle s'exprime en terme de série de Fourier sous la forme :

$$V_S = \frac{4}{n\pi} E \sum_{n=1,2,3\ldots}^{\infty} \left[\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3)\right] \sin(n\theta) \qquad \text{II. 9}$$

Où *n* est l'ordre harmonique, et θ_1 , θ_2 et θ_3 sont les angles de commutation.

Le coefficient $4E\ \pi$ représente la valeur crête de la tension fondamentale maximale d'une cellule à pont H. Ce qui se produit quand un angle de commutation réduit à zéro. Les trois angles indépendants peuvent être utilisés pour éliminer deux harmoniques en *VS* comme suit :

$$m_a = \frac{\widehat{V_s}}{H \times \widehat{V_s}} = \frac{\widehat{V_s}}{H \times 4\,E/\pi} \qquad \text{II. 10}$$

Pour trouver le nombre total de commutation, on peut appliquer la relation suivante :

$P = (N - 1/2)$

Avec cette relation, on a les angles de commutations θ_i (i=1…P) qu'on doit déterminer, dans

notre cas pour N=7 niveaux, on doit calculer trois angles de façon à annuler les composantes harmoniques impaires de rang 3 et 5.Dans ce cas, cela revient à résoudre le système non linéaire suivant :

$$b_1 = \frac{4}{\pi}\ E\ [\cos(\theta_1)\ + \cos(\theta_2)\ + \cos(\theta_3)]\ = V_S$$

$$b_3 = \frac{4}{3\pi}\ E\ [\cos(3\theta_1)\ + \cos(3\theta_2)\ + \cos(3\theta_3)]\ = 0 \qquad \text{II. 11}$$

$$b_5 = \frac{4}{5\pi}\ E\ [\cos(5\theta_1)\ + \cos(5\theta_2)\ + \cos(5\theta_3)]\ = 0$$

Qui peut être réécrit comme suit :

$$\cos(\theta_1)\ + \cos(\theta_2)\ + \cos(\theta_3) = 3\,m_a$$

$$\cos(3\theta_1)\ + \cos(3\theta_2)\ + \cos(3\theta_3)\ = 0 \qquad \text{II. 12}$$

$$\cos(5\theta_1)\ + \cos(5\theta_2)\ + \cos(5\theta_3)\ = 0$$

La solution recherchée doit satisfaire la condition suivante [2]:

$$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \pi/2 \qquad \text{II. 13}$$

II .3.3 Méthode de Newton-Raphson :

La méthode de Newton-Raphson, encore appelée méthode des tangentes a été exposée par Newton vers 1669 et complétée par Joseph Raphson en 1690, c'est une méthode par approximations successives, conçue pour la résolution des systèmes non linéaires, cette méthode consiste à prendre pour θ_{k+1}la racine du développement de Taylor de premier ordre autour de θ_k ; cela revient, pour autant que : $f'(\theta_k) \neq 0$, à déterminer θ_{k+1}qui satisfait

$(\theta_k) + f'(\theta_k) \times (\theta_{k+1} - \theta_k) = 0$

Et donc :

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{f(\theta_k)}{f'(\theta_k)}$$

Les étapes pratiques de cette méthode sont explicitées comme suit :

- ✓ Considérer un estimé initial : $\theta_{(0)}$.

- ✓ Calcul de $f\ (\theta_{(0)}\ )$ et la Jacobéenne $J\ (\theta_{(0)}\ )$.
- ✓ Détermination de $y_{(0)}$ en résolvant le système : $J\ (\theta_{(0)}\ ) \times y_{(0)} = f\ (\theta_{(0)}\ )$
- ✓ Le calcul de $\theta_{(1)}$: $\theta_{(1)} = \theta_{(0)} + y_{(0)}$
- ✓ Répéter le processus jusqu'à convergence, donc on a déterminé la solution de notre système $(\theta) = 0$. [2]

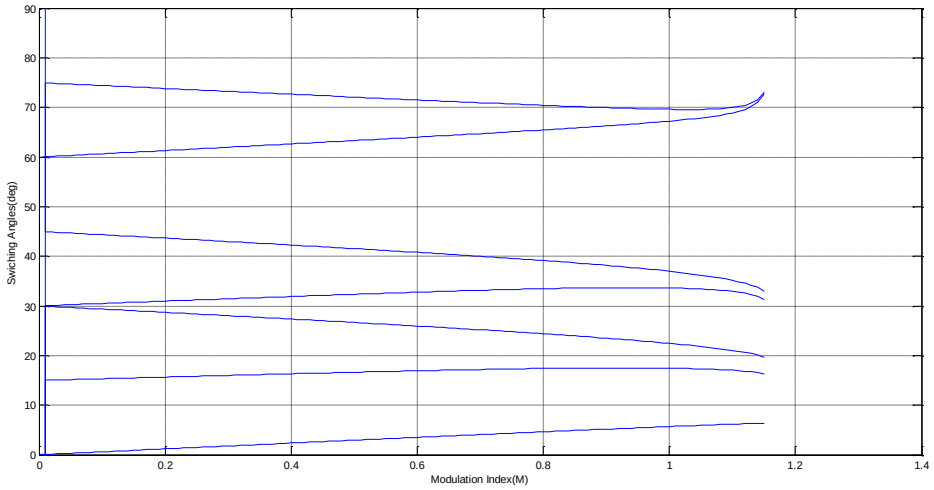


Figure II.3 : Simulation de méthode de Newton Raphson.

II .4 Les méthodes d'optimisation :

II .4.1 Les méthodes d'optimisation locale :

La recherche locale est une méthode utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles. La recherche locale peut être utilisée sur des problèmes de recherche d'une solution maximisant un critère parmi un ensemble de solutions candidates. Les algorithmes de recherche locale passent d'une solution à une autre dans l'espace des solutions candidates (l'espace de recherche) jusqu'à ce qu'une solution considérée comme optimale soit trouvée ou que le temps imparti soit dépassé. En revanche optimiser localement, c'est chercher une solution à un problème qui soit proche d'une solution de départ (optimisation locale), mais qui soit meilleure en terme de coût (fonction objectif). Pour cela, nous recherchons une meilleure solution par itérations successives cette classe de méthodes peut être ***déterministe*** ou ***non-déterministe***.

Les limites des méthodes d'optimisation locale

Dans la catégorie de problèmes que nous avons présentés en haut, les méthodes cherchent le minimum d'une fonction en se basant sur la connaissance d'une direction de recherche. Bien sûr, ces méthodes seront toujours applicables et même recommandées lorsque la solution

cherchée est réputée proche de la solution connue (point de départ) ou si la fonction objectif est convexe, en particulier, si le calcul n'est pas coûteux.

Toutefois, elles ne sont pas indiquées pour les problèmes multimodaux où le risque de rester bloqué dans un optimum local est fort probable, cela suffit pour illustrer l'enjeu des problèmes d'autres types : L'optimisation globale. Quand un utilisateur se rend compte qu'il trouve des minimums locaux différents en exécutant son code d'optimisation (locale), il est tout
à fait légitime qu'il songe à un code qui serait capable d'en tenir compte et de donner le meilleur de tous.

C'est ce genre de problèmes que ***l'optimisation globale*** propose de résoudre, ci après, un état de l'art des méthodes d'optimisation globale. [11]

II.4.2 Les méthodes d'optimisation globale :

Durant ces dernières années, l'optimisation globale a fait l'objet de plusieurs études grâce à des résultats théoriques nouveaux, une forte demande dans plusieurs domaines incluant des applications industrielles, et au développement des moyens de calcul.

C'est ainsi que plusieurs articles ont été publiés sur le sujet traduisant la richesse des approches et des motivations, Contrairement à ce que l'on pourrait être tenté de croire, l'optimisation globale numérique n'a pas hérité (du moins pas systématiquement) des facilités des techniques numériques d'optimisation locale. En effet, ces dernières utilisent pour la plupart des directions de descentes (conditionnées par des calculs de gradients ou de leurs approximations) comme nous avant vu, ce qui permet de converger naturellement vers un point de minimum local. Or, justement, l'optimisation globale évite de rester en de tels points, il lui faudrait, au contraire
en échapper.

C'est pourquoi beaucoup d'approches ont été utilisées dans la tentative de résoudre le problème. Il s'agit, de trouver un état de minimum et de ne s'arrêter que s'il est le meilleur (l'optimum global). Pour illustration de cette diversité, nous citons dans la suite les méthodes les plus utilisées d'entre elles ainsi que les différents principes sur lesquels elles se basent. En dépit de l'abondance des méthodes proposées, nous pouvons leur trouver des traits caractéristiques suivant leurs approches. Ainsi nous donnons la classification suivante : On distingue deux types d'approches selon qu'elles incluent ou non des processus probabilistes : ***Les méthodes déterministes*** et **les *méthodes non-déterministes***.

Les limites des méthodes d'optimisation globale

Les algorithmes d'optimisation globale sont particulièrement efficaces lorsque la fonction est multimodale. Leur gros désavantage est que leur coût augmente, dans le pire des cas,

exponentiellement avec la complexité du problème. Bellman a décrit ce concept en tant que malédiction dimensionnelle ***curse of dimensionality***.

Bellman nous indique que si l'on veut trouver le minimum global d'une fonction de n_α variables avec une erreur relative sur les variables inférieure à ξ, alors il faudra effectuer $n_{eval} = \varphi((1/\xi)^{n_\alpha})$ évaluations. Par exemple, sur un problème de dimension $n_\alpha = 10$, si l'on veut localiser à 10% près les variables optimales, il faut $n_{eval} = (1/0.1)^{10}$ évaluations. Même pour une fonction évaluée en seulement 0.1 seconde, il faut plus de10000 jours pour obtenir la solution. Afin de palier cet inconvénient, on assiste à une tendance vers les algorithmes hybrides. [11]

Choix d'une méthode d'optimisation

A notre avis quand un utilisateur est confronté à un problème d'optimisation on va choisir Une ***méthode d'optimisation stochastique.***

II.5 Optimisation stochastique :

L'optimisation stochastique est une méthode qui génère et utilise des variables aléatoires, ces variables aléatoires apparaissent dans la formulation du problème d'optimisation lui-même, qui impliquent des fonctions objectif aléatoires ou des contraintes aléatoires, par exemple. Certaines méthodes d'optimisation stochastiques aléatoires itérées sont utilisées pour résoudre des problèmes stochastiques, en combinant les deux significations de l'optimisation stochastique.

En effet les méthodes d'optimisation stochastique généralisent les méthodes déterministes pour les problèmes déterministes.

De plus, une demande croissante existe pour la résolution de problèmes d'optimisation issus du monde réel, pour lesquels les données ou les fonctions objectif sont souvent incertaines, et où il s'avère parfois nécessaire de trouver des solutions robustes à des modifications ultérieures susceptibles de survenir sur les variables de décision. C'est la prise en compte de ces incertitudes dans le processus d'optimisation qui a donné naissance à l'optimisation stochastique.

Autrement dit, l'optimisation stochastique est un domaine de la programmation mathématique classique qui tient compte de l'incertitude du problème. La notion d'incertitude dans la programmation mathématique est apparue pour la première fois dans les années cinquante, elle a rencontré depuis un développement rapide.

Les avancées récentes ont ouvert de nouvelles perspectives qui devraient être fructueuses tant d'un point de vue théorique que pratique.

L'optimisation stochastique n'est pas une famille de problèmes, de modèles et d'outils différents des autres domaines d'optimisation (programmation linéaire, non-linéaire, dynamique) ; au contraire, elle constitue un complément de ces familles lorsque la notion d'incertitude intervient. Dans ce cas nous parlerons de programmation stochastique linéaire, non-linéaire ou bien de programmation stochastique dynamique. En effet, le but qui se fixe dans un problème d'optimisation stochastique est de prendre la meilleure décision vis à vis des situations qui comportent de ***l'incertitude***.

La littérature autour de la programmation stochastique devient de plus en plus riche.

Modèles de décision dans l'incertain

Les approches qui dominent sur la modélisation des problèmes de la programmation stochastique sont les suivantes :

- Modèles avec des contraintes probabilistes,
- Modèles robustes.

a) Modèles avec des contraintes probabilistes :

Ce sont des problèmes dont la modélisation appartient à la catégorie des modèles probabilistes, c.à.d. au lieu de considérer des contraintes déterministes nous travaillons plutôt avec des contraintes probabiliste, sans pour autant changer la fonction objectif qui reste, quand à elle, déterministe.

Le modèle mathématique s'écrit comme suit :

$$\left|\begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{Sous les contraintes} \\ h_i(x) = 0, \quad i = 1, \ldots, m \\ \text{Þ}\,(\zeta \leq \mathrm{T}\, x) \geq p \\ x_l \leq x \leq x_u \end{array}\right.$$

ζ est une variable aléatoire : Variable dont la valeur est déterminée en fonction du résultat d'une expérience aléatoire

p est une probabilité réglée par l'utilisateur qui reflète une tolérance acceptable.

L'interprétation des contraintes Þ $(\zeta \leq \mathrm{T}\, x) \geq p$ reflète l'exigence que la contrainte $\zeta \leq \mathrm{T}\, x$ soit satisfaite dans p% des cas, et pas nécessairement toujours, surtout pour un problème où la non-satisfaction d'une contrainte est tolérée dans p% des cas, une exigence de p = 100% aurait été

trop contraignante, ceci est souvent le cas dans les problèmes de dimensionnement et de fiabilité où l'exigence par rapport aux probabilités de défaillance se modélise avec les contraintes probabilistes.

b) Modèles robustes :

Dans le cas où l'aléa n'intervient que dans la fonction objectif ; c'est l'optimisation robuste.

Au fait, ce que l'on considère ici est la qualité de la solution obtenue et d'une certaine manière sa robustesse, à savoir les variations en termes de coûts pour différentes réalisations de la variable aléatoire, cet aléa peut provenir de différentes sources (erreur de mesure sensorielle, simulations aléatoires), pour ce genre de problème, à chaque appel de la fonction objectif avec les mêmes arguments, celle-ci retourne une valeur différente.

Le modèle mathématique s'écrit comme suit : [11]

$$\left|\begin{array}{l} \text{Minimiser } y(x, \zeta) \\ \text{Sous les contraintes} \\ h_i(x) = 0, \quad i = 1, ..., m \\ g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, ..., k, \\ x_l \leq x \leq x_u \end{array}\right.$$

- Parmi les méthodes d'optimisation stochastique en a choisir dans cette travaille ***Optimisation par Colonie d'abeilles*** pour la simulation

II.5.1 Optimisation par Colonie d'abeilles :

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des métas heuristiques. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles dans la vie. Cette approche de résolution fait l'objet de notre étude.

L'algorithme Artificial Bee Colony (ABC) à été proposé par Karaboga en 2005 pour résoudre des problèmes d'optimisation multidimensionnelle et multimodale.

Parmi les algorithmes inspirés des abeilles, c'est le plus étudié et le plus utilisé pour résoudre des problèmes du monde réel. Jour après jour, le nombre de chercheurs s'intéressant à ABC augmente rapidement. Dans les auteurs présentent une étude exhaustive de l'algorithme ABC, de ses variantes et de ses applications.

L'algorithme ABC commence par n solutions (sources de nourriture) de dimension d qui sont modifiées par les abeilles artificielles. Chaque solution est évaluée par une fonction de fitness, i =1,..., n.

Les abeilles visent à découvrir des endroits contenant des sources de nourriture (régions de l'espace de recherche) avec une grande quantité de nectar (une bonne fitness).

Il existe trois types d'abeilles : les abeilles scouts qui volent au hasard dans l'espace de recherche sans orientation ; les abeilles employées qui exploitent le voisinage de leur emplacement en sélectionnant une solution aléatoire ; et les abeilles spectatrices qui utilisent la fitness de la population pour choisir, de manière probabiliste, une solution de guidage pour exploit leur voisinage.

Si la quantité de nectar d'une nouvelle source est supérieure à celle de la précédente dans la mémoire, ils mettent à jour la nouvelle position et oublient la précédente (greedy selection). Si une solution n'est pas améliorée par un nombre prédéterminé d'essais, contrôlé par le paramètre de la limite, alors la source de nourriture est abandonnée par l'abeille employée correspondante et celle-ci devient une abeille scoute.

Les paramètres de l'algorithme ABC :

- ✓ La taille de la colonie N
- ✓ Nombre maximale de cycle C_{max}
- ✓ Le nombre des abeilles employées N_e
- ✓ Le nombre des abeilles employées onlookers N_o
- ✓ Le nombre des scoute N_S
- ✓ Le nombre de variable de décision D
- ✓ Le nombre de tentative d'amélioration de la solution ***limit***
- ✓ Le compteur de tentative d'amélioration d'une solution ***compt***

```
Placer chaque abeille employée sur une position aléatoire dans l'espace de recherche.
Tant que le critère d'arrêt n`est pas atteint faire
    Pour toutes les abeilles employées faire
        Si le nbr d'étapes sur la même position = la limite alors
        Choisir une position aléatoire dans l'espace de recherche ;
        Sinon
        tenter d'améliorer la position ;
            Si  la meilleure position est trouvée, alors
            changer la position ;
            Réinitialisation le nbr d'étapes sur la même position ;
            Fin Si ;
        Fin Si ;
     Fin Pour ;
    Pour toutes les abeilles spectateurs faire
    Choisir la position d'abeille employée ;
    tenter d'améliorer la position ;
    Fin pour ;
Fin tant que
```

Figure II.4 : Exemple de l'Algorithme de ABC (Colonie d'abeilles).

Le processus de l'algorithme ABC est présenté comme suit :

Etape1 : Initialisation

On commence par sélectionner F_e pourcentage de population de façon aléatoire dans l'espace de recherche, sachant que chaque abeille porte un vecteur 'U' de 'n' solution ensuite on calcule leurs valeurs Fitness, appelées la quantité de nectar par l'équation suivante :

$$fitness = \frac{1}{F\ \text{objective}}$$

F_e reprisant le rapport des abeilles dans la population totale

Etape2 : déplacement des abeilles employeuses : Calculer la probabilité de choisir une source de nourriture par l'équation :

$$Pi = \frac{0.9 * fitness}{\max(fitness)} + 0.1$$

Puis sélectionner une source de nourriture et ensuite déterminer ses quantités de nectar. L'équation de mouvement des abeilles observatrices est donnée ci-dessous :

$$\text{mij}(\text{t}+1) = \text{xkj} + \text{y}(\text{xij}(\text{t})) - \text{xkj}(\text{t}))$$

Tel que mij est la $ieme$ position de l'abeille spectatrice, t est le nombre d'itération, xij est l'abeille utilisée choisie aléatoirement, *'j'* représente la dimension du vecteur de solution qui produit une série de variables aléatoires dans la gamme [-1,1]; où $k\in$ 1, 2,3 …... N et $j\in$ 1,2,…...D sont choisis aléatoirement :

'D' est le nombre de paramètre à optimiser.

'*K'* est aussi choisi aléatoirement mais doit être différent de l'indice '*i*'.

Etape 3-Déplacer les scouts : Si les valeurs de Fitness des abeilles employeuses ne sont pas améliorées par un nombre d'itérations prédéterminé, appelé "max-cycle", ces sources de nourriture sont abandonnées, et l'abeille trouvée dans cet emplacement passera aléatoirement pour explorer d'autres nouveaux emplacements. (Abeilles employeuses deviennent des Scouts). Cette explication est traduite mathématiquement par l'équation :

$$V_{ij} = V_{ij}^{min} + \varphi_{ij} * (V_{ij}^{max} - V_{ij}^{min})$$

Étape 4-Mettre à jour la meilleure source de nourriture trouvée jusqu'ici : Apprendre la meilleure valeur de Fitness et la position, qui sont trouvées par les abeilles, et les mémoriser.

Étape 5-Critère d'arrêt : Vérifier le processus de calcule jusqu'à ce que le nombre d'itérations atteigne la valeur maximale prédéfinie ou qu'une solution de la fonction objective acceptable soit trouvée. [10][12]

II.6 conclusion :

On utilise la technique SHEPWM "stratégie d'élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion" pour annuler les harmoniques les plus gênant et de réglée la composante fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur avec l'avantage majeur d'une faible fréquence de commutation des composants Électroniques.

Le principe de cette stratégie est basé sur le développement en série de Fourier de la tension *us* à la sortie du convertisseur. [2]

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande par élimination sélective des harmoniques de ces onduleurs multi niveaux par l'utilisation de la méthode de Newton-Raphson, et les méthodes d'optimisation stochastique.

Chapitre III

La simulation des onduleurs multi niveaux

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on a appliqué les algorithmes (ABC) dans la résolution d'un système algébrique non linéaire où cette résolution est nécessaire pour étudier la technique d'élimination d'harmoniques appliquée à l'onduleur triphasés à cinq niveaux. Le principe de la technique est d'imposé les créneaux de tension et calculé les angles de commutation pour éliminer les harmoniques des rangs voulues par la résolution d'un système équations non linaires en appliquant les Algorithmes (ABC) et tracer l'allure des angles de commutations en fonction de taux de modulation,

III.2 Simulation d'un onduleur 5 niveaux :

L'onduleur à 5 niveaux, présente deux tension simple et composé (Va, Vab) à déterminer. Après résolution du système algébrique non linéaire obtenu, on trouve les résultats consignés dans les figures suivantes pour chaque indice de modulation (r).

Pour r = 0.6

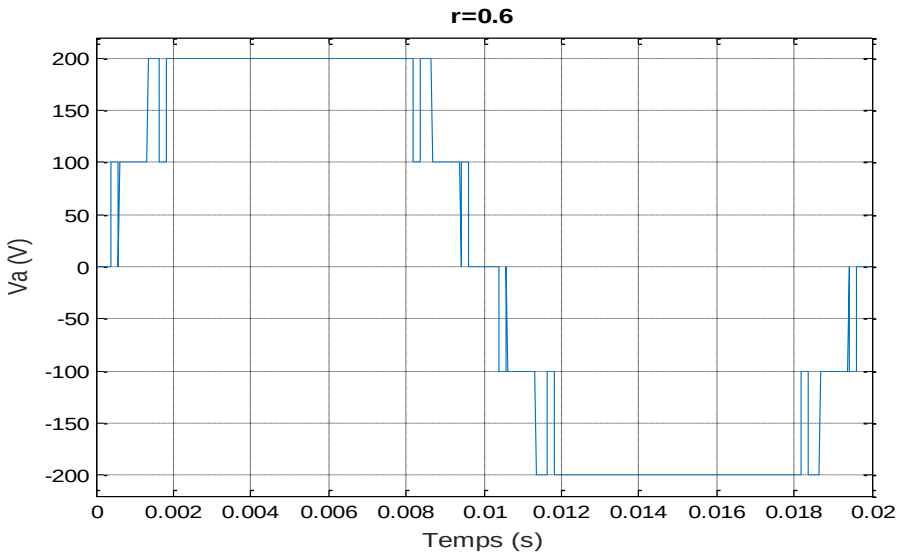


Figure III.1 : La tension simple pour : r = 0.6.

.

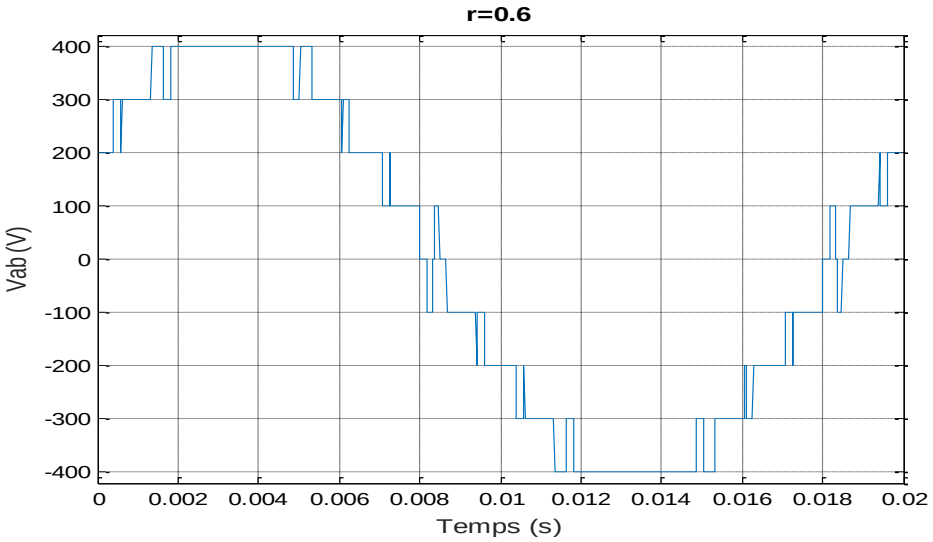


Figure III.2 : La tension composée pour : r = 0.6.

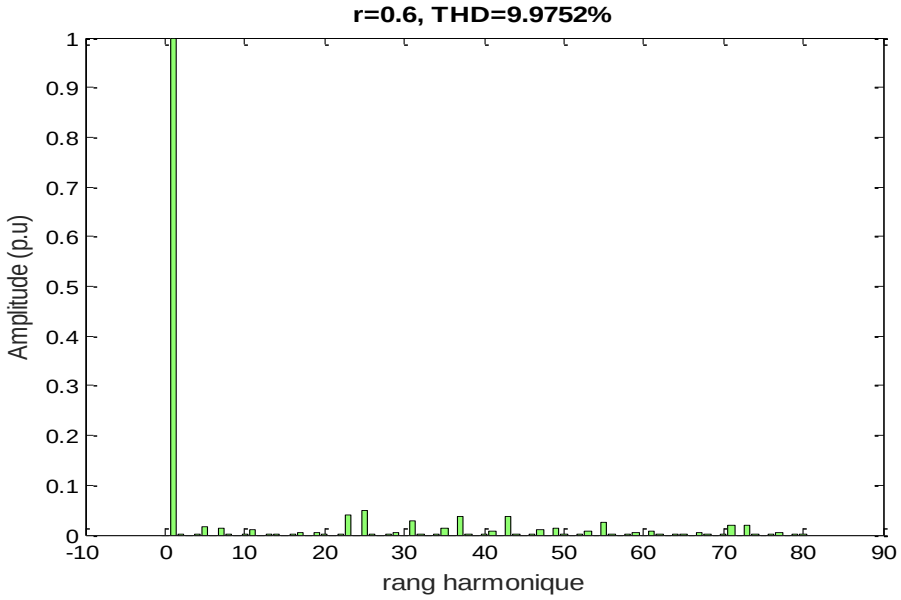


Figure III.3 : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 0.6.

Pour r = 0.9

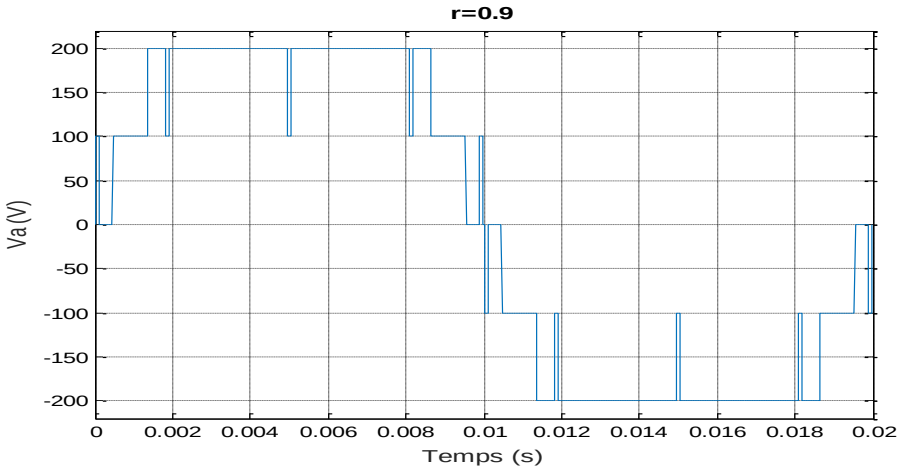


Figure III.4 : La tension simple pour : r = 0.9.

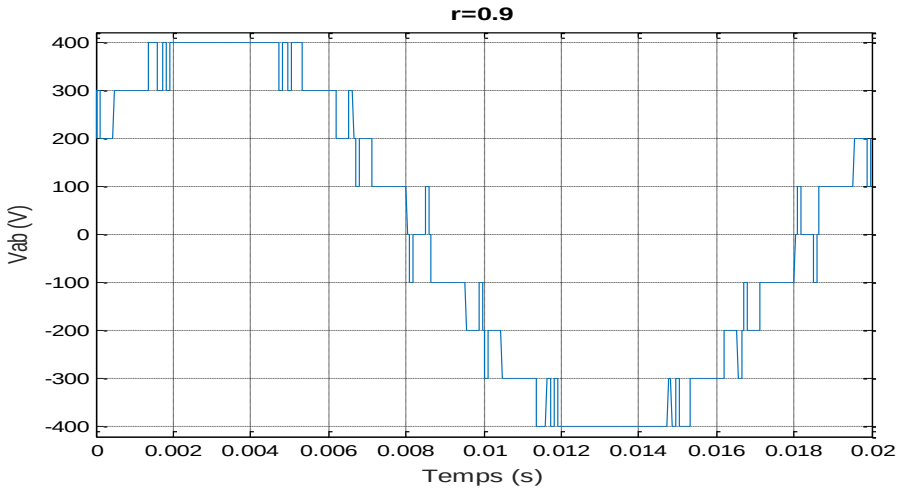


Figure III.5 : La tension composée pour : r = 0.9.

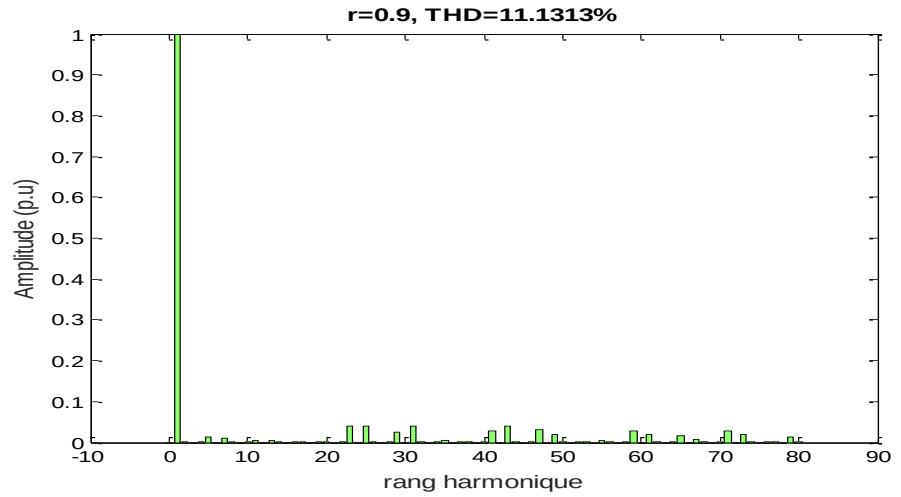


Figure III.6 : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 0.9.

Pour r = 1

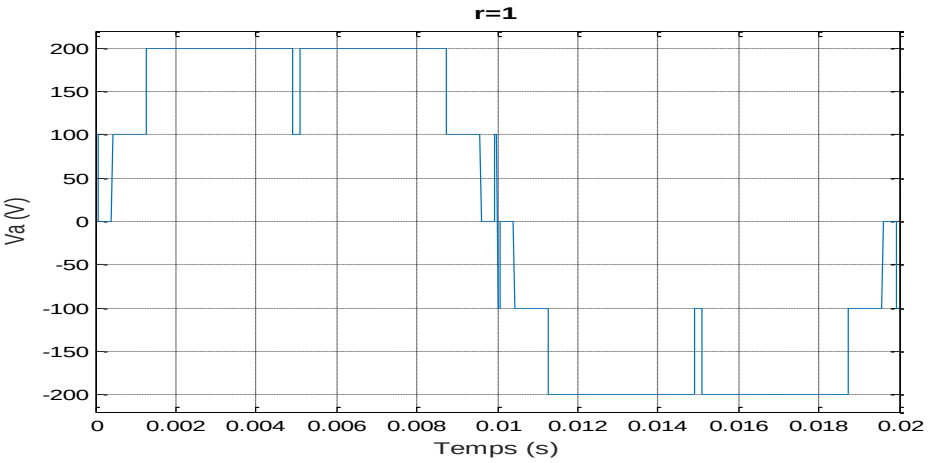


Figure III.7 : La tension simple pour : r = 1.

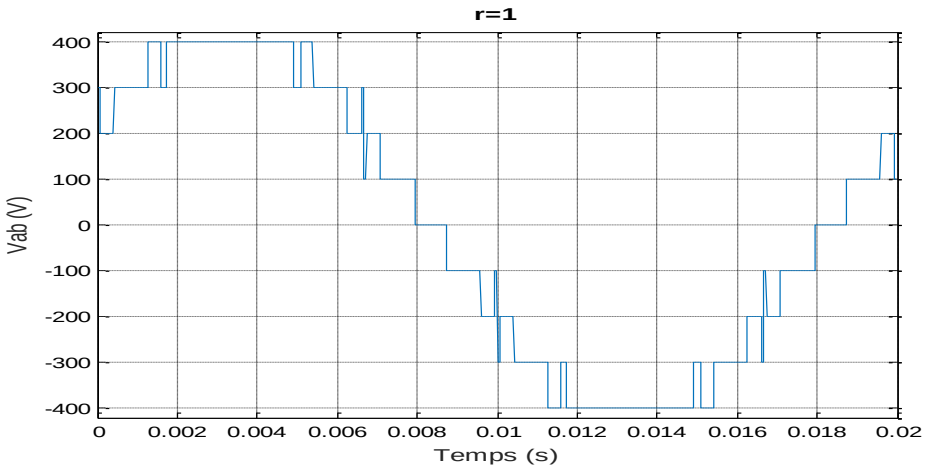


Figure III.8 : La tension composée pour : r = 1.

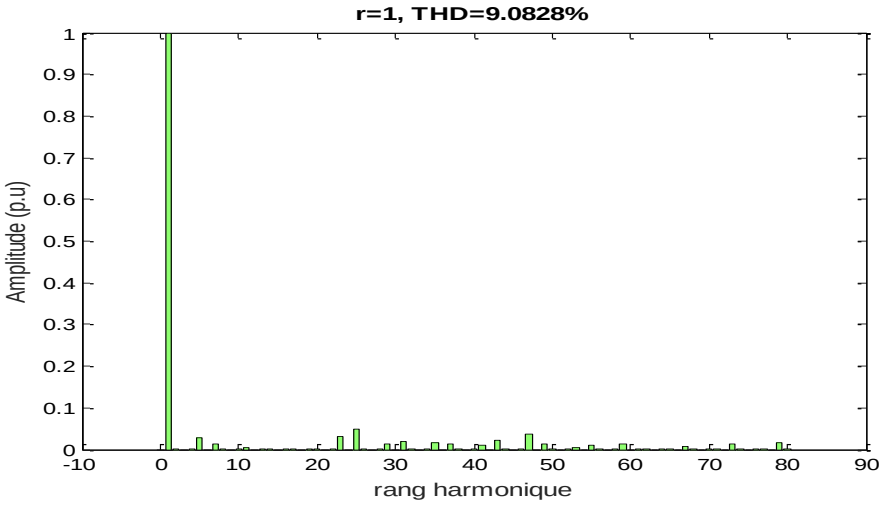


Figure III.9 : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1.

Pour r = 1.1

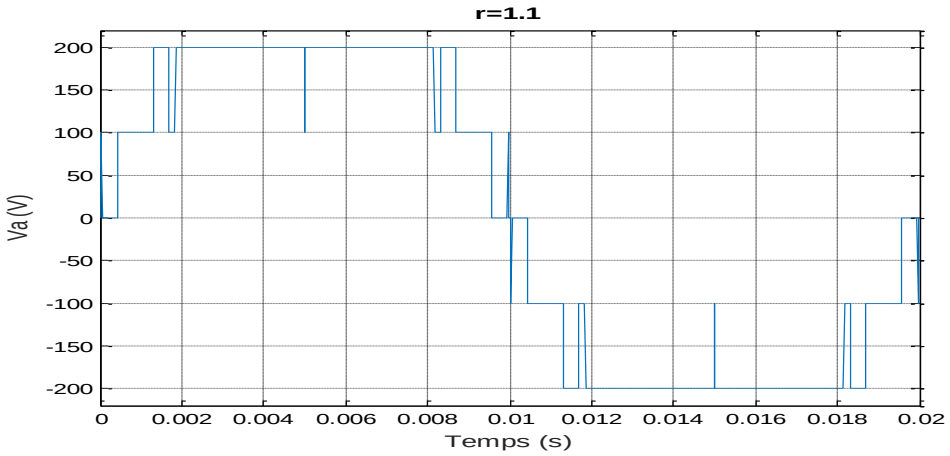


Figure III.10 : La tension simple pour : r = 1.1.

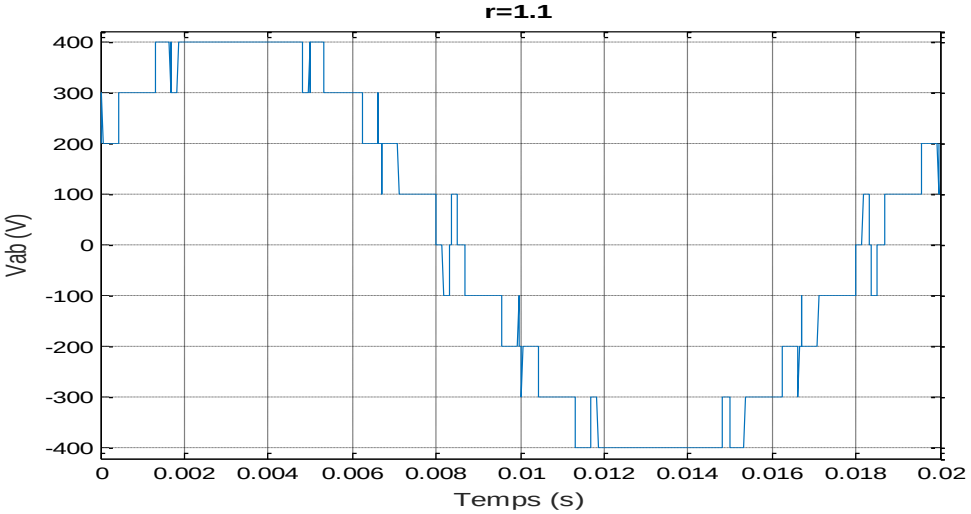


Figure III.11 : La tension composée pour : r = 1.1.

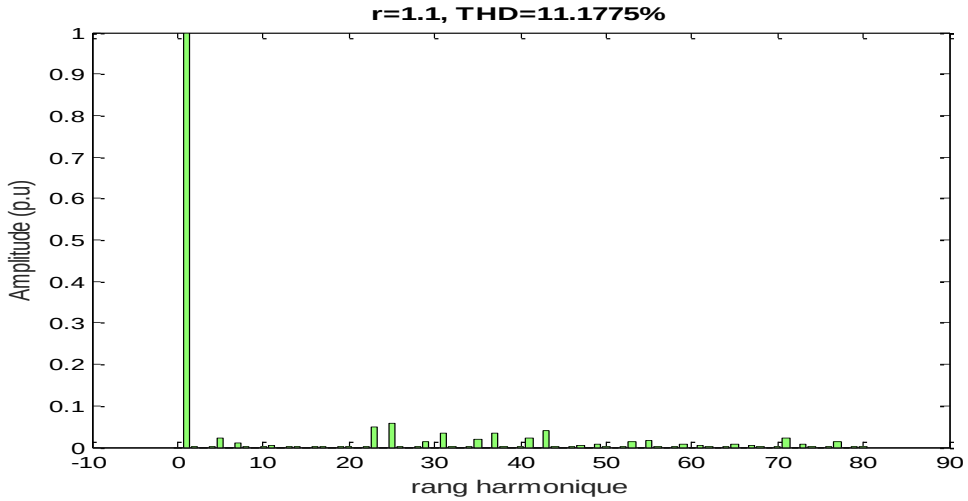


Figure III.12 : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1.1.

Pour r = 1.2

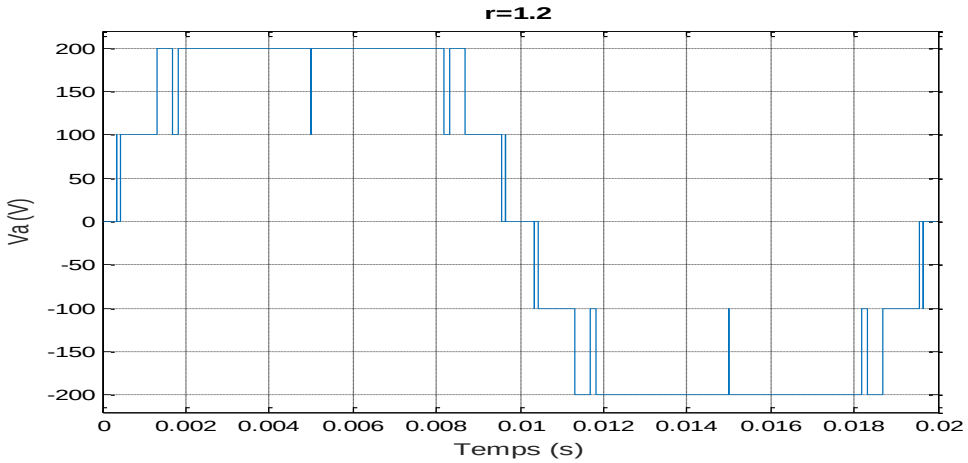


Figure III.13 : La tension simple pour : r = 1.2.

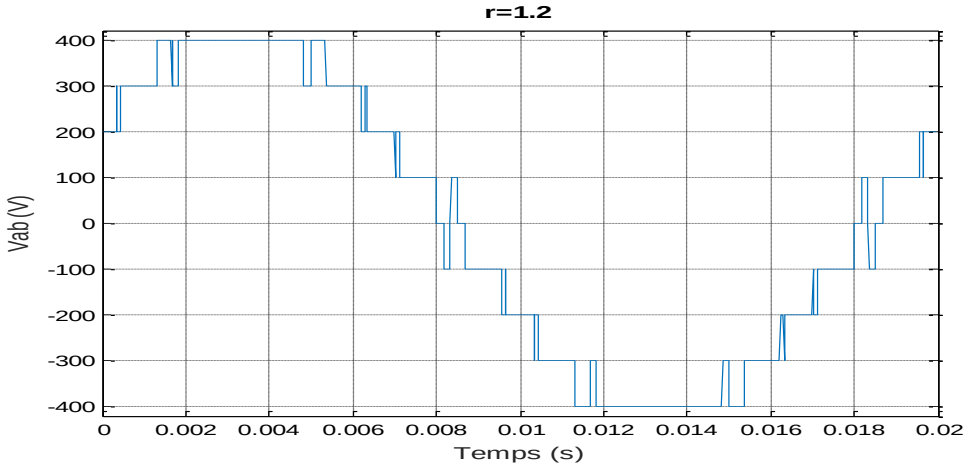


Figure III.14 : La tension composée pour : r = 1.2.

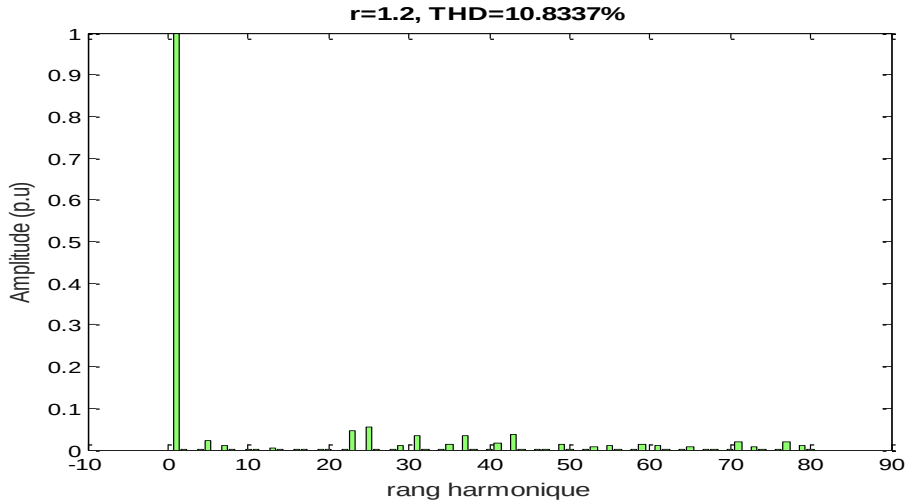


Figure III.15 : Le taux global de distorsion harmonique THD pour : r = 1.2.

Résultats finales

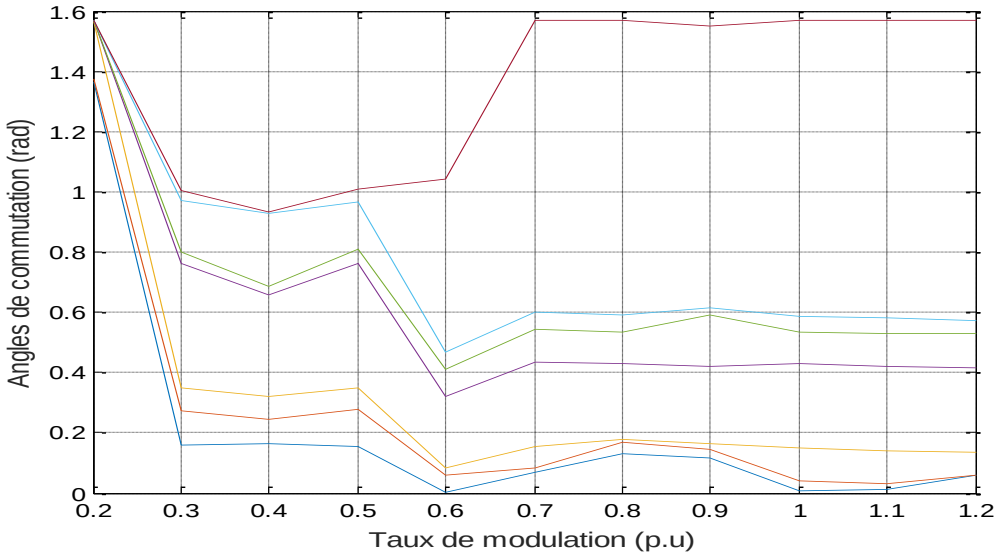


Figure III.16 : Allures tracées par les angles de commutations en fonction de différents Valeurs de taux de modulation.

taux de modulation (r)	*Taux de distorsion harmonique (THD)*
0.6	9.9752 %
0.9	11.1313 %
1	9.0828 %
1.1	11.1775 %
1.2	10.8335 %

TAB III.1 : Tableau de résultat (THD) pour chaque taux de modulation.

III.3 conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation des résultats de technique d'élimination d'harmoniques appliquée à l'onduleur triphasés à cinq niveaux par la méthode d'algorithme Artificial Bee Colony (ABC), et tracer l'allure des angles de commutations en fonction de taux de modulation,

D'après les résultats de simulation on constate que

- ✓ la variation des valeurs des angles n'est pas linéaire en fonction de ***r***.
- ✓ pour angle de commutation $\geq$ 0.2 et le taux de modulation $\geq$ 0.7 le système presque linéaire.
- ✓ Avantage d'un petit Taux de distorsion harmonique (THD) pour cette méthode.

Conclusion

Générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de la commande par élimination sélective d'harmoniques d'un onduleur multi niveaux a structure NPC qui permet d'annuler les harmoniques les plus gênantes.

Tout d'abord, dans le premier chapitre, nous avons présentés d'une façon détaillée les onduleurs multi niveaux. Ensuite nous avons présenté les différentes topologies d'onduleurs multi niveaux, et enfin un bref rappel sur les différentes stratégies de commande ou bien de modulation.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini l'harmonique et ses effets. Ensuite la stratégie de commande SHEPWM "stratégie d'élimination sélective harmonique de modulation de largeur d'impulsion" qui consiste la décomposition en séries de Fourier et à la fin en a choisir parmi les méthodes d'optimisation une méthode stochastique pour le calcul des angles de commutation pour éliminé les harmonique.

Le troisième chapitre, consiste la simulation de l'onduleur multi niveaux pour différentes valeurs d'indice de modulation, et cela pour avoir la valeur de THD la plus petite possible.

Les onduleurs multi niveaux permettant d'éliminer les harmonique ciblés et une optimisation globale des harmonique cela se reflète dans la diminution du THD l'ord de l'application des angles optimisé et nous permet d'augmenter la tension de sortie, tant on augmente le niveau de l'onduleur, la tension de sortie s'approche de la sinusoïde.

L'augmentation dans les niveaux nous permet d'éliminer plus d'harmonique et un meilleur taux de distorsion harmonique.

Références Bibliographiques

[1] **M. Yaïchi, M.K. Fellah, A. Neçaibia** et **A. Mammeri** « Structure des onduleurs multiniveaux asymétriques "Applications aux systèmes photovoltaïques" », Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar · (2011) .

[2] **KAIS Dyhia** et **BELKACEM Mohammed** « Commande par élimination sélective d'harmoniques d'un onduleur multi niveaux asymétrique », Mémoire de Fin d'Etudes de master academique, **u**niversite **m**ouloud **m**ammeri de **t**izi-**o**uzou · 2016.

[3] **Houria Ben Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba · 2010.

[4] **Jean-Sébastien MARIETHOZ** « Etude formelle pour la synthèse de convertisseur multi niveaux asymétrique asymétriques: topologies, modulation et commande», thèse doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne · 2005.

[5] **Y. SAHALI,** et **M.K. FELLAH** « Technique de Modulation à Sélection d'Harmoniques à Eliminer (SHE PWM) pour la Commande des Onduleurs de Tension Trois Niveaux Monophasés et Triphasés », Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory ICEPS, University Djillali Liabes of Sidi-Bel-Abbes, Conference Paper · September 2003.

[6] **DELLALOU KHEIREDDINE** « Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLI ST et MLI Vectorielle) », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master, université badji mokhtar- annaba · 2019.

[7] **Moussa BOUSEHABA** « Realisation d'une Commande MLI a Choix Multiple », Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplome de master academique, université abou bekr belkaïd de tlemcen · 28 Juin 2017.

[8] **Bensmara Ahlem** et **Toureche Fatima** « Commande d'un Onduleur Monophasé par la MLI à Élimination Sélective d'Harmoniques », Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel · 13 / 07 / 2019.

[9] **ZEROUAL Yamina** « Techniques de commande des convertisseurs appliquées aux onduleurs multi-niveaux », Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent · 2015/2016.

[10] **RAIHANI Hind** « Adaptation de l'algorithme des colonies d'abeilles pour l'optimisation et le dimensionnement des circuits intégrés analogiques », Mémoire de projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme Ingénieur d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah · 29 Juin 2015.

[11] **Hanaa Hachimi** « Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications », thèse de doctorat, Université Mohammed V - Agdal, Rabat école mohammadia d'ingénieurs · 29 Juin 2013.

[12]**Souhil MOUASSA** « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS », le diplôme De Magister, UNIVERSITE Ferhat ABBAS SETIF · 19/06/2012.

[13]**A. SAADI** « Les harmoniques », Cours: N°2-UE9 /MME9 - 1ème Année Master, Université de Mohammed Kheider Biskra · 2011/2012.

[14]**Rachid TALEB, Abdelkader MEROUFEL and Patrice WIRA** « Commande par la stratégie d'élimination d'harmoniques d'un onduleur multi niveau asymétrique à structure Cascade », ACTA ELECTROTEHNICA Mediamira Science Publisher · Number 4, 2008.