République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies Filière : Génie Electrique Spécialité : Machines électriques

> Présenté par KAIS Dyhia BELKACEM Mohammed

Commande par élimination sélective d'harmoniques d'un onduleur multi niveaux asymétrique

Mémoire soutenu publiquement le/ 2016. Devant le jury composé de :

Mr Slimane Rezgui, MAA, Président

Mr Arezki Diche, MAA, Rapporteur

Mr Kaci Ghedamsi, Professeur, Co-Rapporteur

Mr Farid Namani, MAA, Examinateur

Mme Ferroudja Bouali Djadel, MAA, Examinatrice

Remerciements



Dieu merci qui nous a donné la force, le courage, et l'espoir nécessaire Pour accomplir ce modeste travail et surmonter l'ensemble des difficultés.

Nous exprimons nos gratitudes, nos remerciements à nos parents

qui ont fait de leur mieux pour nous aider.

Nous tenons à remercier vivement :

• nos encadreurs Mr. DICHE Arezki et Mr GHEDAMSI Kaci pour

leurs conseils et leur suivi durant la réalisation de notre projet.

• nous remercions aussi nos professeurs les personnes qui nous ont

aidé et encouragé le long de ce travail.

Dédicaces



Nous dédions ce modeste travail à: Nos parents en reconnaissance pour les sacrifices qu'ils ont consentis.

A nos frères et sœurs, Tita , Massi, Razika , Youcef , nos grands parents et aux familles KAIS , BELKACEM, nos oncles, tantes, cousins et cousines.

Spécial dédicace à nos belles familles (la famille HAMDANI et MESAOUDENE) et à tous les étudiants de notre promotion, à nos

amis et à tous nos professeurs.

KAIS DYHIA L BELKACEM Mohammed

Introduction générale

Introduction générale	1
Chapitre I : L'harmonique et les généralités sur les convertis niveaux	sseurs multi
I.1 Introduction	2
I.2 Définition de l'harmonique	3
I.2.1 La distorsion harmonique THD	4
I.2.2 Rang harmonique	4
I.2.3 Charges génératrices d'harmoniques	5
I.2.4 Emission d'harmoniques	5
I.2.5 Impact de la propagation des harmoniques	5
A) Les effets instantanés	6
B)Effet à long terme	6
I.3 Les onduleurs	7
I.3.1 Définition	7
I.3.2 Application des onduleurs	8
I.3.3 Onduleurs multi niveaux	9
I.4 Principe de l'onduleur multi niveaux	9
I.4.1 Les principales topologies des onduleurs multi niveaux.	9
A) La topologie à diode de bouclage (NPC)	9
B) La topologie au condensateur flotteur (à cellules imb	oriquées)11
C) La topologie en cascade	11
I.4.2 Alimentation des onduleurs multi niveaux asymétriques	12
I.4.2.1 Classification des topologies selon leur alimentation.	12
I.4.2.2 Nombres de composants nécessaires	13

I.4.2.3 Stratégies de modulation	14
I.5 Stratégie de commande	15
A) Stratégie triangulo-sinusoïdale	15
B) La commande en pleine onde	15
C) Commande à MLI vectorielle	15
D) Stratégie d'élimination sélective harmonique	16
Conclusion	16
Chapitre II : Modélisation de l'onduleur multi niveaux à structure	cascade
II.1 Introduction	17
II.2 Les ponts en H	17
II. 3 Modélisation du convertisseur pont en H cascadé	18
II.3.1. Onduleur 3 niveaux	18
II.3.2 Onduleur 5 niveaux	19
II.3.3 Onduleur 7 niveaux	20
II.3.4 Onduleur 9 niveaux	22
II.3.5 Onduleurs multi niveaux asymétrique à pas uniforme	23
II.4 Stratégie de commande des convertisseurs multi niveaux	24
II.4.1 La commande par élimination sélective des harmoniques	24
II.4.1.a Décomposition en séries de Fourier	24
II.4.1.b Application de la modulation de SHE	26
II.4.1.c Méthode de Newton-Raphson	27
Conclusion	27
Chapitre III : La simulation des onduleurs multi niveaux	
III.1 Introduction	

III.2 Onduleur à 3 niveaux	.28
III.2.1 Résolution de système d'équation des harmoniques	.28
III.3 Onduleur à 5 niveaux	.31
III.3.1 Détermination des angles optimaux	31
III.4 Onduleur à 7 niveaux	.35
III.4.1 Détermination des angles optimaux	35
III.5 Onduleur 9 niveaux	.39
III.5.1 Détermination des angles optimaux	40
III.6 La distorsion harmonique en fonction des niveaux de tension onduleurs	des .44
Conclusion	.45
Conclusion général	
Conclusion général	.46
Annexes	
Bibliographie	

Table des figures

Chapitre I : L'harmonique et les généralités sur les convertisseurs multi niveaux

I.1: Signal perturbé et composante fondamentale	3
I.2 : Décomposition harmonique d'un signal déformé	4
I.3 : Structure d'un onduleur monophasé	7
I.4 : Onduleur triphasé	8
I.5 : Schéma d'un bras d'onduleur : a) 2 niveaux b) 3 niveaux c) N niv	/eaux9
I.6 : Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux	10
I.7 : Onduleur multi niveaux à cellule imbriqué	11
I.8 : Pont en H complet	12
Chapitre II : Modélisation de l'onduleur multi niveaux à structur	e cascade
II.1 : Mise en série de deux ponts en H	17
II.2 : Onduleur 3 niveaux	18
II.3 : Convertisseur monophasé 5 niveaux à structure cascade	19
II.4 : Convertisseur monophasé 7 niveaux à structure cascade	
II.5 : Convertisseur monophasé 9 niveaux à structure cascade	22
II.6 : Forme de la tension obtenue à la sortie d'un convertisseur multi	niveaux.24
Chapitre III : La simulation des onduleurs multi niveaux	
III.1 : Variation de l'angle optimal en fonction de l'indice de modulat	ion28
III.2 : Valeur de la tension	29
III.3 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique	29
III.4 : Valeur de la tension	29
III.5 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique	
III.6 : Valeur de la tension	30

III.7 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique	.30
III.8 : Variation des angles optimaux en fonction de l'indice de modulation	.31
III.9 : Valeur et forme de la tension	.31
III.10 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique	.32
III.11 : Valeur et forme de la tension	.32
III.12 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique	.33
III.13 : Valeur et forme de la tension	.33
III.14 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.34
III.15 : Valeur et forme de la tension	.34
III.16 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.35
III. 17 : Variation des angles optimaux en fonction de l'indice modulation.	de 35
III.18 : Valeur et forme de la tension	.36
III.19 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.36
III.20 : Valeur et forme de la tension	.37
III.21 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.37
III.22: Valeur et forme de la tension	.38
III.23 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.38
III.24 : Valeur et forme de la tension	.39
III.25 : Valeur et forme de tension et l'analyse harmonique de la tension	39
III.26 : Variation des angles optimaux en fonction de l'indice de modulation.	.40
III.27 : Valeur et forme de la tension	40
III.28 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.41
III.29 : Valeur et forme de la tension	.41
III.30 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.42

III.31 : Valeur et forme de la tension	42
III.32 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	.43
III.33 : Valeur et forme de la tension	43
III.34 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique	44
III.35 : Distorsion harmonique (THD) en fonction des niveaux de tension onduleurs.	des 45

Liste des tableaux

Chapitre I : L'harmonique et les généralités sur les convertisseurs multi niveaux

10
13
structure cascade
20
21

Chapitre III : La simulation des onduleurs multi niveaux

Nomenclature

- Y(t) : Valeur instantanée.
- Y_{eff}: Valeur efficace du signal y(t).
- Y₀: Valeur moyenne ou composante continue du y(t).
- Y₁, Y₂, Y_h:Valeur efficace de l'harmonique de rang 1, 2 et h.
- W:Pulsation fondamentale.
- T : la période en seconde.
- f : La fréquence de la tension de sortie en Hz.
- f_{Harmo}: La fréquence d'harmonique.
- f_{Fond}: La fréquence fondamental.
- THD : Taux de distorsion harmonique.
- +V, -V : Les tensions de sorties d'un onduleur monophasé.
- Vdc1, Vdc2, Vdc3 : Les tensions d'entrées d'un onduleur monophasé.
- N : Nombre de niveau d'un onduleur multi niveaux.
- S : La somme des tensions de sortie.
- ma : Indice de modulation.
- r : Taux de modulation.
- E : Tension d'entrée continue du convertisseur.
- VS : Tension de sortie alternative.
- Θ : Angle de commutation d'un composant électronique.

Abréviation

- NPC: Neutral Point Clamped.
- SHE : Stratégie d'élimination sélective harmonique.

•

Introduction générale

Introduction générale

L'électronique de puissance connaît depuis longtemps un essor très important. A l'heure actuelle, cette discipline du génie électrique touche des domaines d'applications vastes et très divers pour des puissances couvrant une large gamme (de quelques Watt à plusieurs centaines de mégawatts). Les structures de conversion statique qui composent principalement les applications de l'électronique de puissance deviennent de plus en plus puissantes, la technologie a dû s'adapter à cette croissance de la puissance à convertir.

Cette croissance a été permise grâce à l'évolution des technologies des composants semiconducteurs. L'évolution des calibres en tension et courant ainsi que l'amélioration des performances de ces composants a permis d'utiliser une électronique de puissance plus performantes pour des applications de plus grande puissance.

L'apparition des structures de conversion multi niveaux depuis le début des années 1980 apporte des solutions par la mise en série de semi-conducteurs de puissance. Ces structures assurent la répartition de la contrainte en tension sur différents interrupteurs moyenne ou basse tension. Le terme multi niveaux a commencé par le convertisseur à trois niveaux.

De manière générale plus le nombre de niveaux de la tension généré par le convertisseur est grand, plus le taux de distorsion harmonique sera faible. Dans toutes les topologies de convertisseurs multi niveaux existantes, plus ce nombre de niveaux, est élevé, plus leur structure devient compliquée.

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 jusqu'à neuf niveaux à structure en pont H cascade. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge, ainsi 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.

Nous avons organisé ce mémoire en trois chapitres

Dans le premier chapitre nous allons comprendre les harmoniques, les différents convertisseurs multi niveaux, et les différentes stratégies de commande.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'onduleur multi niveaux à structure cascade et la stratégie de commande.

Le troisième chapitre est réservé à l'application et aux résultats.

Enfin, on terminera notre travail par une conclusion générale à travers laquelle on exposera les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :

L'harmonique et les généralités sur les convertisseurs multi niveaux

I.1 Introduction

Depuis quelques années, il y a une forte augmentation des charges non linéaires (ordinateurs, télécopieurs, lampes à décharge, fours à arc, chargeurs de batterie, alimentations électroniques...).Les conséquences sur le système d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait d'une utilisation croissante de ces équipements. En effet, une charge non linéaire implique un courant important, déformé, riche en harmoniques. Ces derniers, ont des effets négatifs sur la quasi-totalité des composants du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et / ou mécaniques.

Afin de résoudre le problème d'harmoniques dans cette étude on opte à la stratégie d'élimination harmonique par un onduleur multi niveaux asymétrique.

Les onduleurs multi niveaux asymétriques étudiés sont les onduleurs à structure cascade. La commande de ces derniers par la stratégie d'élimination d'harmoniques permet d'annuler les harmoniques les plus gênants et de réguler la composante fondamentale de la tension de sortie de l'onduleur avec l'avantage majeur d'une faible fréquence de commutation des composants électroniques.

L'onduleur multi niveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner :

- La qualité d'onde : les convertisseurs multi niveaux peuvent générer les tensions de sortie avec une distorsion très faible
- Courant d'entrée : les convertisseurs multi niveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.

Malheureusement, les convertisseurs multi niveaux présentent quelques inconvénients. Un inconvénient particulier est le grand nombre d'interrupteurs semi-conducteurs, ce qui peut rendre le système général cher et complexe.

I.2 Définition de l'harmonique

L'arrivée massive de l'électronique de puissance pose de plus en plus de problèmes relatifs à la pollution harmonique des réseaux d'alimentation. Une charge non linéaire appelle du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Et ces charges génèrent des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin la moindre impédance. Les courants harmoniques sont des courants dont la fréquence est un multiple entier de la fondamentale (celle de l'alimentation électrique). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental induit des formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires. Toute fonction périodique de fréquence (f) peut se décomposer en une somme de sinusoïdes de fréquence h x f (h : entier), h est appelé rang harmonique (h > 1). La composante de rang 1 est la composante fondamentale.



Figure I.1 : Signal perturbé et composante fondamentale.

La déformation du signal est donnée par :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(2\pi h f - \varphi_h)$$
(I.1)

Valeur efficace du signal s'exprime par :

$$Y_{eff} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_h^2 + \cdots} \quad [2]$$
 (I.2)

 Y_0 : valeur moyenne ou composante continue du signal y(t),

 Y_h : valeur efficace de l'harmonique au rang h,

W: pulsation fondamentale $(2\pi f = 2\pi/T)$



Figure I.2: Décomposition harmonique d'un signal déformé.[3]

Un signal déformé est la somme des signaux sinusoïdaux, d'amplitudes et de fréquences multiple de la fréquence fondamentale.

I.2.1 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 taux de distorsion harmonique (THD) donne une mesure de la déformation du signal :

$$THD = \int_{h=2}^{\infty} \frac{Y_h}{Y_1}^2$$
(I.3)

I.2.2 Rang harmonique

Rang harmonique est le rapport de sa fréquence harmonique (f_h) à celle du fondamental (f₁) : $rang = \frac{f_h}{f_1}$ (I.4)

Les harmoniques se distinguent par leur rang, de type pair ou impair. Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue.

Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7,9...) sont fréquemment rencontrés sur les réseaux électriques.

I.2.3 Charges génératrices d'harmoniques

Une charge est dite non linéaire lorsque le courant absorbé n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente.

On a deux types de charge génératrice d'harmoniques :

A) Charges génératrices d'harmoniques de tension :

Principalement causés par les alternateurs, les transformateurs.

B) Charges génératrices d'harmoniques de courant :

Principalement causés par les charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente.

Un tableau de spectre d'harmoniques de quelques composants et matériel electriques est donné en annexe 1.

I.2.4 Emission d'harmoniques

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents :

A) Les secteurs industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).

B) **Tertiaires :** les redresseurs à filtre capacitif (informatique, bureautique),le froid alimentaire, la climatisation, les ascenseurs et les lampes fluorescentes.

C) **Domestiques.**: les appareils électrodomestiques, l'un des principaux appareils perturbateurs est le poste de télévision dont l'alimentation est constituée d'un redresseur monophasé à filtre capacitifsur un réseau de taille réduite. Il est possible de mesurer l'émission harmonique des clients industriels. S'agissant d'un réseau plus vaste, on se permet d'utiliser, sur la base de résultats de mesure, des modélisations du réseau par secteur d'activité dont le comportement harmonique est relativement homogène.

I.2.5 Impact de la propagation des harmoniques

Les harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés.

- soit des effets à long terme dus aux échauffements.

A) Les effets instantanés

- Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension.
- Les récepteurs de télécommande centralisée et la fréquence musicale peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système.
- Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.
- Des perturbations induites peuvent survenir sur les lignes à courant faible (ex : téléphone) lorsque celle-ci chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courant et tension déformée.
- Augmentation du courant efficace dans le conducteur neutre dû aux harmoniques impairs multiples de 3.
- Déclenchements intempestifs des dispositifs de protection.

B) Effet à long terme

- Echauffement des condensateurs. (ces échauffements peuvent conduire au claquage des condensateurs).
- Pertes supplémentaires dans le stator des machines (cuivre et fer) et dans leurs circuits rotoriques.
- Pertes supplémentaires des transformateurs dues à l'effet de peau. (augmentation de la résistance avec la fréquence).
- Echauffement des câbles et des équipements.

I.3 Les onduleurs

I.3.1 Définition

L'onduleur est un des convertisseurs d'énergie électrique qui a comme fonction la conversion de l'énergie, courant continue (c.c) en courant alternatif (c.a),il convertit une tension continue d'entrée en une tension alternative de sortie avec une amplitude et une fréquence convenable. Ces deux paramètres peuvent être fixes ou variables.

Si la tension d'entrée est variable et le gain de l'onduleur est constant, on obtient une tension variable à la sortie, cependant, si la tension d'entrée est constante et non commandée, la tension de sortie peut varier en changeant le gain de l'onduleur.

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue.

- **Dradisteudenontyphase** onduleur selon le type de réseaux disponible :
- Onduleur triphasé

A) Onduleur monophasé

La tension de sortie peut prendre pour valeur +V, -V, 0 V. Cela implique une structure en pont (identique à celle du hacheur 4 quadrants) :



Figure I.3 : Structure d'un onduleur monophasé.

B) Onduleur triphasé

Notre onduleur est composée, d'une tension d'entrée continue et trois bras chacun à deux interrupteurs, ils sont reliés à une charge triphasé ou la tension de sortie est alternative.



Figure I.4 : Onduleur triphasé.

I.3.2 Application des onduleurs

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Nous citons quelques domaines d'application :

- Production des tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques dizaines), comme le soudage...

- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs, chauffage à induction....

- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable

I.3.3 Onduleurs multi niveaux

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi-conducteurs, ils peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs manières.

I.4 Principe de l'onduleur multi niveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi niveaux. La figure I.5 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multi niveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure I.5.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.5.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, Vdc1 ou Vdc1 + Vdc2. Dans la figure I.5.c, le cas général de N niveaux.



Figure I.5 : Schéma d'un bras d'onduleur : a) 2 niveaux b) 3 niveaux c) N niveaux

I.4.1 Les principales topologies des onduleurs multi niveaux

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

- La topologie à diode de bouclage (NPC).
- La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées).
- La topologie en cascade.

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

Cette topologie est présentée la première fois par A. Nabae et H. Akagi en 1981 sous læo**noue** « neutral point clamped». 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.



Figure I.6 : Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux. [5]

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 V_0 et V_2 . Les 3 états de commutation possibles permettent de délivrer 3 niveaux distincts et positifs entre les bornes V_s et V_0 .

T _{2H}	T_{1H}	T _{2B}	T _{1B}	Us
1	1	0	0	Ue
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$\frac{U_e}{2}$
1	0	0	1	indéfinie

TAB I.1: Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux. [6]

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», 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



Figure I.7: Onduleur multi niveaux à cellules imbriquées. [5]

Principe de base :

Cette figure 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 2^m états possibles pour la commande.

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 monophasé.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 :

$$N = 2S + 1 \tag{I.5}$$

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.



Figure I. 8 : Pont en H complet.

I.4.2 Alimentation des onduleurs multi niveaux asymétriques

Tout comme pour les onduleurs multi niveaux symétriques, la principale difficulté des onduleurs multi niveaux asymétriques réside dans la réalisation d'une alimentation performante, les alimentations des cellules devant être isolées les unes des autres. Le problème est même plus délicat, car il peut y avoir une circulation de puissance entre les cellules.

I.4.2.1 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 à cellules en série élèvent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. 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. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension. [6]

I.4.2.2 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	Т	D	С	Ν	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. [6]

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.

I.4.2.3 Stratégies de modulation

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 :

-Commande triangulo-sinusoïdale

- Commande en pleine onde.

-Commande à MLI vectorielle.

-Stratégie d'éliminationsélective harmonique(SHE).

La plus connue est la stratégie triangulo-sinusoïdaleet la méthode d'élimination d'harmoniques adaptées au cas des onduleurs multi-niveaux asymétriques.

I.5 Stratégie de commande

A) Stratégie triangulo-sinusoïdale

Cette méthode pousse les harmoniques vers les fréquences élevées, en ayant recours des 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 paramètre caractérisent cette stratégie :

- -Indice de réglage m= fp/fr
 - -Taux de réglage r = Ar / (N-1)Ap.

B) La commande en pleine onde

Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°).

Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode à une duré (60°) , les transistors sont numérotes dans l'ordre dans lequel ils reçoivent les séquences de déplacement l'un de l'autre de (60°) .

C) Commande à MLI vectorielle :

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 technique à MLI basée les est sur 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 [4].

D) Stratégie d'élimination sélective harmonique

La méthode d'élimination d'harmoniques adaptées au cas des onduleurs multi-niveaux asymétriques. Cette technique permet d'annuler les harmoniques les plus gênants et de régler la composante fondamentale du signal 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 à pas uniforme.

Conclusion

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Il existe plusieurs topologies d'onduleur, dont chacun correspond à un type d'application déterminé où permettant d'atteindre des performances recherchées. On a aussi présenté les différentes techniques de modulation. L'évolution des structures de conversion multiniveaux est possible en ajoutant différentes cellules comme dans un jeu de construction. Il est tout de même nécessaire de mener des études plus approfondies sur ces structures afin d'avoir une certitude sur la faisabilité de

la réalisation de celle-ci.

Chapitre II : Modélisation de l'onduleur multi niveaux à structure cascade

II.1 Introduction

Afin de générer une tension la plus sinusoïdale possible, plusieurs stratégies ont été proposées. Dans notre travail, la commande utilisée est élimination sélective des harmoniques.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation et à la commande du convertisseur de tension monophasée à 3,5,7 et 9 niveaux, de structure en pont H cascadé.

II.2 Les ponts en H

Cette famille de structures de conversion est la première décrite dans la littérature comme une structure de conversion multiniveaux. En effet, la mise en cascade de plusieurs structures à 2 niveaux permet d'avoir en sortie une forme d'onde de tension multiniveaux.

Mise en série

Un des intérêts de la structure en pont en H, est de pouvoir réaliser une mise en série pour avoir en sortie une forme d'onde de tension multi niveaux. La disposition de deux ponts en H mis en série est montrée sur la figure II.1. Le point A d'un pont en H est relié au point B de l'autre et ainsi de suite, si l'application met plus de 2 ponts en H en série. Ce type de conversion nécessite des sources de tension isolées les unes par rapport aux autres, si le système de conversion doit fournir de la puissance active. Dans le cas d'un filtrage d'harmonique, ces sources peuvent être remplacées par des condensateurs dont il sera nécessaire d'assurer l'équilibrage [7].



Figure II.1 : Mise en série de deux ponts en H.

II. 3 Modélisation du convertisseur pont en H cascadé

II.3.1 Onduleur 3 niveaux

La figure II.2 suivante représente le convertisseur de tension monophasée. La modélisation est faite pour un onduleur à 3 niveaux.



Figure II.2 : Onduleur 3 niveaux.

- Pour avoir les niveaux de tension Vs=0 Vs=E, il y a deux combinaisons possibles
 - G4 = 1 donc Vs =0
 - G1 = G4 = 1 donc Vs=E
- Pour avoir les niveaux de tension Vs=0 Vs=-E, il y a deux combinaisons possibles
 - G3 = 1 donc Vs=0
 - G2 = G3 = 1 donc Vs= -E
- représentation des équations des niveaux de tension sont résumées dans le tableau cidessous :

G1	G2	G3	G4	Vs
0	0	0	1	0
1	0	0	1	Е
0	0	1	0	0
0	1	1	0	-E

TAB II.1 : structure à 3 niveaux.

II.3.2 Onduleur 5 niveaux

La figure II.3 représente le convertisseur de tension monophasée à structure en pont H.La modélisation est faite pour un onduleur à 5 niveaux.



Figure II.3 : Convertisseur monophasé 5 niveaux à structure cascade.

1. Pour avoir les niveaux de tension VS=0 VS=E1, VS= $E1_+E2$, il y a trois combinaisons possibles

- G2 = G6 = 1 donc Vs=0
- G2 = G6 = G3 = 1 donc Vs=E1
- G2 = G7 = G6 = G3 = 1 donc Vs=E1+ E2

2. Pour avoir les niveaux de tension Vs=0, combinaisons possibles

- G1 = G5 = 1
- G1 = G5 = G4 = 1
- G1 = G8 = G5 = G4 = 1

Vs=-E1, Vs= -E1-E2, il y a trois

donc Vs=0

donc Vs= -E1

donc Vs= -E1- E2

G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Vs
0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	E1
0	1	1	0	0	1	1	0	E1+E2
1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	-E1
1	0	0	1	1	0	0	1	-E1-E2

La représentation des équations des niveaux de tension sont résumées dans le tableau cidessous :

TAB II.2:Structure cascade à 5 niveaux.

II.3.3 Onduleur 7 niveaux

La figure II.4représente le convertisseur de tension monophasée à structure en pont H.La modélisation est faite pour un onduleur à 7 niveau.



Figure II.4 : Convertisseur monophasé 7 niveaux à structure cascade.

1. Pour avoir les niveaux de tensionVs=0,Vs=E1, Vs= $E1_+E2$ ou bien Vs= $E1_+E2$ +E3, il y a quatre combinaisons possibles

•	G2 = G10 = G6 = 1	donc Vs=0
	G2 = G10 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1
	G2 = G10 = G7 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1+E2
•	G2 = G10 = G11 = G7 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1+E2+E3

2. Pour avoir les niveaux de tension Vs=0, Vs=-E1, Vs= -E1-E2ou bien Vs=-E1-E2-E3, il y a quatre combinaisons possibles

•	G1 = G5 = G9 = 1	donc Vs=0
•	G1 = G5 = G9 = G4 = 1	donc Vs= $-E1$
•	G1 = G8 = G5 = G9 = G4 = 1	donc Vs= -E1- E2
•	G1 = G8 = G5 = G12 = G9 = G4 = 1	donc Vs=-E1-E2-E3

La représentation	des équations	des	niveaux	de	tension	sont	résumées	dans	le	tableau	ci-
dessous :											

G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	VS
0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	E1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	E1+E2
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	E1+E2+E3
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	-E1
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	-E1-E2
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	-E1-E2-E3

TAB II.3 :Structure cascade à 7 niveaux.

II.3.4 Onduleur 9 niveaux

La figure II.5, représente le convertisseur de tension monophasée à structure en pont H.La modélisation est faite pour un onduleur à 9 niveaux.



Figure II.5 : Convertisseur monophasé 9 niveaux à structure cascade.

1. Pour avoir les niveaux de tension Vs=0, Vs=E1, Vs= E1₊ E2 ou bien Vs=E1₊ E2 +E3, Vs=E1+E2+E3+E4 il y a cinq combinaisons possibles

	G2 = G14 = G10 = G6 = 1	donc Vs=0
•	G2 = G14 = G10 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1
•	G2 = G14 = G10 = G7 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1+E2
•	G2 = G14 = G11 = G10 = G7 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1+E2+E3
-	G2 = G15 = G14 = G11 = G10 = G7 = G6 = G3 = 1	donc Vs=E1+E2+E3+E4

2. Pour avoir les niveaux de tension VS=0, VS=-E1, VS= -E1-E2ou bien Vs=-E₁-E2-E3,Vs= -E1-E2-E3-E4 il y a cinq combinaisons possibles

•	G1 = G5 = G9 = G13 = 1	donc Vs=0
•	G1 = G5 = G9 = G13 = G4 = 1	donc Vs= $-E1$
•	G1 = G8 = G5 = G9 = G13 = G4 = 1	donc Vs= -E1- E2
•	G1 = G8 = G5 = G12 = G9 = G13 = G4 = 1	donc Vs= -E1-E2-E3
•	G1 = G8 = G5 = G12 = G9 = G16 = G13 = G4 = 1	donc Vs=-E1-E2-E3-E4

G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	Vs
0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	E1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	E1+E2
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	E1+E2+E3
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	E1+E2+E3+E4
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	E1
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	-E1-E2
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	-E1-E2-E3
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	-E1-E2-E3-E4

La représentation des équations des niveaux de tension sont résumées dans le tableau cidessous :

TAB II.4 : Structure cascade à 9 niveaux.

II.3.5 Onduleurs multi niveaux asymétrique à pas uniforme

La figure II.6, montre la forme de la tension genéralement obtenue à la sortie d'un convetisseur multiniveaux. Les valeurs V_1 , V_2 ... V_N correspondent aux niveaux N possibles de tension V.Le convertisseur est dit à pas uniforme ou régulier, si la difference entre deux niveaux consécutifs est constante[8,9]. Autrement dit :

$$V_2 - V_1 = V_3 - V_2 = V_N - V_{(N-1)} = \Delta V$$
 (II.1)

Dans le cas contraire, le convertisseur est dit à pas non uniforme ou irrégulier.



Figure II.6: Forme de la tension obtenue à la sortie d'un convetisseur multiniveaux.

Pour obtenir un onduleur multiniveaux asymétrique à pas uniforme, les tensions continues d'alimentation des cellules partielles $E_j(j=1...k)$, doivent respecter les deux conditions suivants[10]:

$$E_1 \leq E_2 \leq \cdots \leq E_k$$

$$E_j \leq 1+2 \quad \substack{j-1\\k=1} E_k$$
(II.2)

Le nombre de niveaux pour un groupe de tension donnée, s'obtient à partir de la relation suivante [8] :

$$N = 1 + 2 \quad {}_{j=1}^{k} E_{j} \tag{II.3}$$

II.4 Stratégie de commande des convertisseurs multi niveaux

II.4.1 La commande par élimination sélective des harmoniques

Plusieurs techniques de commande ont été développées pour les onduleurs multi niveaux, et dans ce chapitre on va s'intéresser à la stratégie de l'élimination sélective des harmoniques. Cette méthode est basée sur le développement en serie de Fourier.

II.4.1.a 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 :

$$f(t) = a_0 + \mathop{\max}_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \qquad (n : entier, \omega = \frac{2\pi}{T})$$
(II.4)

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

$$a_{0} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(t) dt$$

$$a_{n} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} f(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_{n} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} f(t) \sin n\omega t dt$$
(II.5)

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 Ox, alors, donc une fonction périodique possède la symétrie impaire, en choisissant ce point comme origine des temps :

$$f(-t) = -f(t) \tag{II.6}$$

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 lapériode.

$$a_0 = 0 \tag{II.7}$$

$$a_n = 0 \tag{II.8}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \frac{T}{2} f(t) \sin(n\omega t) dt$$
(II.9)

Utilisant la sortie de l'onduleur multi niveaux donnée sur la figure II.4:

On pose :
$$\theta = \omega t$$

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} E(\theta) \sin(n\theta) d(\theta)$$
(II.10)

Pour un onduleur de 7 niveaux on aura :

$$b_n = \frac{4}{\pi} \frac{\pi}{\theta_1} E)\sin(n\theta)d\theta + \frac{4}{\pi} \frac{\pi}{\theta_2} E)\sin(n\theta)d\theta + \frac{4}{\pi} \frac{\pi}{\theta_3} (E)\sin(n\theta)d\theta$$
(II.11)

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 :

$$b_n = -\frac{4}{n\pi} E[\cos(n\theta) \frac{\pi}{\theta_1} - \frac{4}{n\pi} E[\cos(n\theta) \frac{\pi}{\theta_2} - \frac{4}{n\pi$$

Finalement, pour n nombre entier et impair, $\cos\left(n\frac{\pi}{2}\right) = 0$ donc on aura l'équation :

$$b_n = \frac{4}{n\pi} E[\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3)] \qquad n=1,3,5...$$
(II.13)

II.4.1.b Application de la modulation de SHE

La tension V_S 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 :

$$V_s = \frac{4}{n\pi} E \quad \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \cos(n\theta_3) \sin(n\theta) \qquad (\text{II.14})$$

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

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

$$m_{a} = \frac{\widehat{V_{s}}}{H \times \widehat{V_{H}}} = \frac{\widehat{V_{s}}}{H \times 4E/\pi}$$
(II.15)

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

$$P = (N - 1/2)$$
(II.16)

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 :

$$b_1 = \frac{4E}{\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)] = V_s$$
(II.17)

$$b_3 = \frac{4E}{3\pi} \left[\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) \right] = 0$$
(II.18)

$$b_5 = \frac{4E}{5\pi} \left[\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) = 0 \right]$$
(II.19)

Qui peut être réécrit comme suit :

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) = 3m_a \tag{II.20}$$

$$\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(\theta_3) = 0 \tag{II.21}$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) = 0 \tag{II.22}$$

La solution recherchée doit satisfaire la condition suivante [10] : $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \pi/2$. (II.23)

II.4.1.c 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 [11].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

$$f(\theta_k) + f'(\theta_k) \times (\theta_{k+1} - \theta_k) = 0$$
(II.24)

Et donc :

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{f(\theta_k)}{f'(\theta_k)} \tag{II.24}$$

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 :

$$J(\theta_{(0)}) \times Y_{(0)} = -f(\theta_{(0)}$$
(II.25)

✓ Le calcul de
$$\theta_{(1)}$$
:
 $\theta_{(1)} = \theta_{(0)} + Y_{(0)}$
(II.26)

✓ Répéter le processus jusqu'à convergence. Donc on a déterminé la solution de notre système $f(\theta) = 0$. [12]

Conclusion

Dans ce chapitre on a modélisé l'onduleur de trois jusqu'à à neuf niveaux.Puis nous avons étudié la commande par élimination sélective des harmoniques de ces onduleurs multi niveaux en pont H par l'utilisation de la méthode de Newton-Raphson.

Chapitre III :

La simulation des onduleurs multi niveaux

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on simule les 4 types d'onduleurs 3, 5, 7 et 9 niveaux, et cela pour montrer en 1^{ere} étape l'optimisation en élimination d'harmoniques entre chaque valeur d'indice de réglage (ma) et en 2^{eme} étape l'optimisation en élimination harmonique, entre chaque type d'onduleur en montant en niveaux.

La détermination des instants optimaux où l'on injectera les impulsions de gâchettes, un système non linéaire dont la taille dépend du niveau de tension, est résolu en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

III.2 Onduleur à 3 niveaux

III.2.1 Résolution de système d'équations des harmoniques

En utilisant la méthode de Newton-Raphson on a pu obtenir la variation de l'anglede commutation en fonction de l'indice de réglage (ma). Pour l'onduleur à 3 niveaux, on a une seule variable (Θ 1),qui diminue en augmentant l'indice de réglage (ma).La variation de l'angle (thêta) en fonction del'indice de réglage (ma) est donnée par la Figure 1 :



Figure III.1 : Variation de l'angle optimal en fonction de l'indice de réglage.

L'optimisation harmonique avec l'onduleur asymétrique à 3 niveaux, ne peux cibler une harmonique d'un rang spécifique, cela est dû à la limitation de notre équation à une seule variable (Θ 1). Dans ce cas, c'est une optimisation globale des harmoniques, les résultats se résultats se résultats les figures III.2, III.3 et III.4 avec des thêta et des indices de réglage différents :



Figure III.2 : Valeur de la tension.



Figure III.3 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique.







Figure III.5 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique







Figure III.7 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique.

• Dans les figuresIII.3,III.5 et III.7, une optimisation globale des harmoniques se traduit par la diminution du THD tout en augmentantl'indice de modulation.

III.3 Onduleur à 5 niveaux

III.3.1 Détermination des angles optimaux

L'onduleur à 5 niveaux, présente deux angles ($\Theta 1, \Theta 2$) à déterminer. Après résolution du système algébrique non linéaire obtenu, on trouve les résultats consignés dans la figure III.8 suivante. Elle donne l'évolution des deux angles en fonction de l'indice de modulation. On remarque que dans l'intervalle [0,1], le système en question présente une seule zone de convergence de ma= 0.53 à ma=1.



Figure III.8 : Variation des angles optimaux en fonction de l'indice de réglage

L'optimisation harmonique avec l'onduleur asymétrique à 5 niveaux, peut cibler un harmonique spécifique : il s'agit de l'harmonique du rang 3 ainsi. Les résultats se résument dans les figures III.9,III.10 et III.11 avec des thêta et des indices de réglage différents.

a) Pour des angles $\Theta 1=35^{\circ} \Theta 2=70^{\circ}$ sans optimisation







Figure III.10 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique.

- Avec des angles non optimisés on a un THD et l'harmonique de rang 3 assez élevés.
- **b**) Pour des angles optimisé $\Theta 1 = 24.7356^\circ$, $\Theta 2 = 84.7356^\circ$, avec un indice de réglage ma = 0.5000.







Figure III.12 : Valeur et forme de courant et l'analyse harmonique.

- optimisation globale cela se traduit par la diminution du THD et l'élimination des harmoniques de rang 3 et de rang 5.
- **c)** Pour : $\Theta 1=19.7097$ $\Theta 2=79.7099$ ma = 0.5700



Figure III.13 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.14 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

- optimisation globale des harmonique cela se traduit par la diminution du THD et l'harmonique du rang 3 avoisine les 2% du module du fondamental.
- **d**) Pour des angles optimisé : $\Theta 1 = 12.3530^{\circ}\Theta 2 = 72.3531^{\circ}ma = 0.6300$



Figure III.15 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.16 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

• optimisations globale des harmoniques et élimination de l'harmonique de rang 3.

III.4 Onduleur à 7 niveaux

III.4.1 Détermination des angles optimaux

L'onduleur à 7 niveaux, à trois variables (Θ 1, Θ 2, Θ 3) qu'il faut déterminer. La variation de ces derniers en fonction de l'indice de réglage est donnée dans la Figure III.17. On remarque que le système non linéaire présente deux zones de convergence de ma = 0.45 à ma= 0.7 et de ma= 0.8 à ma= 0.84.



Figure III. 17 : Variation desangles optimaux en fonction de l'indice de réglage.

L'optimisation harmonique avec l'onduleur asymétrique à 7 niveaux peut cibler 2 harmoniques de rang spécifique à éliminer.Dans ce cas, on peut éliminer les harmoniques des rangs 3 et 5.





Figure III.18 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.19 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique

avec des angles non optimisé l'harmonique de rang 3 est élevé.





Figure III.20 : Valeur et forme de la tension.



FigureIII.21 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

• une optimisation globale des harmoniques cela se traduit par la diminution du THD et l'harmonique de rang 3 avoisine les 5% et celui de rang 5 avoisine les 2%.

c) Pour des angles optimisés $\Theta 1=11.7113^{\circ} \Theta 2=45.5387^{\circ} \Theta 3=88.2584$ ma=0.5700



Figure III.22: Valeur et forme de la tension.



Figure III.23 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

• On a obtenu une optimisation globale des harmoniques. Cela s'est traduit par la diminution du THD et l'élimination des harmoniques des rangs 3 et 5.

d) Pour des angles optimisés Θ 1=14.0317° Θ 2=36.2797° Θ 3=81.7382°ma=0.6400



Figure III.24 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.25 : Valeur et forme de tension et l'analyse harmonique de la tension.

Dans la figure III.25 : une optimisation globale des harmoniques cela se traduit par la diminution du THD et éliminions des harmoniques de rangs 3 et 5.

III.5 Onduleur 9 niveaux

III.5.1 Détermination des angles optimaux

L'onduleur à 9 niveaux présente un système algébrique non linéaire à quatre variables $(\Theta 1, \Theta 2, \Theta 3, \Theta 4)$. La variation des angles en fonction de l'indice de réglage est donnée par la figure III.26 suivante.



Figure III.26: Variation des angles optimaux en fonction de l'indice de réglage

L'optimisation harmonique avec l'onduleur asymétrique à 9 niveaux peut cibler 3 harmoniques de rangs spécifiques à éliminer : dans ce cas on peut éliminer les harmoniques de rangs 3 ,5 et 7.

a) pour des angles non optimisé $\Theta 1=20$ $\Theta 2=40$ $\Theta 3=60$ $\Theta 4=80$



Figure III.27 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.28 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

- Avec des angles non optimisé l'harmonique du rang 3 est élevé.
 - **a**) pour des angles optimisés Θ1=10.9779°Θ2=32.6701°Θ3=64.2286°Θ4=84.3165°ma = 0.5400





Figure III.29 : Valeur et forme de la tension.

Figure III.30 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

- une optimisation globale des harmoniques cela se traduit par la diminution du THD et l'harmonique du rang 3 et 5 a été optimisé et avoisine les 2 % et celle du rang 7 avoisine les 1%.
 - **b**) Pour des angles optimisés : Θ1=11.7055°Θ2= 28.7854°Θ3=59.7251°Θ4=87.7141°ma=0.5800







Figure III.32 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique

- une optimisation globale des harmoniques cela se traduit par la diminution du THD et les harmoniques de rangs 3, 5 et 7 avoisinent les 1%
 - **c)** Pourdes angles optimisés Θ1 =10.7029°Θ2=26.3503° Θ3=52.7580°Θ4=87.9318° ma=0.6300



Figure III. 33 : Valeur et forme de la tension.



Figure III.34 : Valeur et forme du courant et l'analyse harmonique.

• une optimisation globale des harmoniques : cela se traduit par la diminution du THD et les harmoniques du rang 3,5 et 7 ont été éliminés.

III.6 La distorsion harmonique en fonction des niveaux de tension des onduleurs

Les résultats obtenus avec l'optimisation harmonique des différents niveaux des onduleurs et leur distorsion harmonique (THD) sont résumés dans le tableau III.1 et la figure III.35.

Onduleur	Etat	ma	θ1	Θ2	θ3	θ4	THD
3 niveaux	Non optimisé		60.0001°				23%
	optimisé	0.7900	37.8152°				8%
5 niveaux	Non optimisé		35°	70°			11.52%
	optimisé	0.5000	24.7356°,	84.7356°,			3.75%
7 niveaux	Non optimisé		25°	50°	75°		9,52%
	optimisé	0.5700	11.7113°	45.5387°	88.2584		1.65%
9 niveaux	Non optimisé		20°	40°	60°	80°	7.41%
	optimisé	0.6300	10.7029°	26.3503°	52.7580°	87.9318°	0.81%

TAB III.1 : La distorsion harmonique THD des résultats obtenus avant et après optimisation.



Figure III.35 : distorsion harmonique (THD) en fonction des niveaux de tension des onduleurs.

En montant dans les niveaux on a une meilleure optimisation des harmoniques avec un (THD) réduit

Conclusion

L'optimisation harmonique via un onduleur multi niveaux montre son efficacité et cela en réduisant le taux de distorsion harmonique et l'élimination des harmoniques ciblés.

En montant dans les niveaux cela nous permet de cibler plus d'harmoniques à éliminer et nous donne de meilleurs résultats.

Conclusion générale

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 à structure en pont H qui permet d'annuler les harmoniques les plus gênantes.

Dans le premier chapitre, nous avons défini l'harmonique et ses effets. Ensuite nous avons présenté les différents types d'onduleurs multi niveaux, et enfin un bref rappel sur les différentes stratégies de commande.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé l'onduleur monophasé 3, 5, 7 et 9, et la stratégie de commande qui consiste la décomposition en séries de Fourier, et à la fin pour le calcul des angles de commutation en a utilisé la méthode de Newton Raphson.

Le troisième chapitre, consiste la simulation de l'onduleur asymétrique 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.

Annexes

Annexe 1[3]

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse	Ŵ M / · ·	% 100 50 0 1 5 7 11 13 17 19 23 25 h	44 %
Redresseur / chargeur	\hat{h}_{ω}	% 100 - 50 - 0 - 1 5 7 11 13 17 19 h	28 %
Charge informatique		% 100 _ 50 _ 0 _ 1 3 5 7 9 11 13 h	115 %
Eclairage fluorescent		% 100 50 0 1 3 5 7 9 11 13	53 %

Annexe

Annexe

Paramètre de l'onduleur

La tension d'entrée :	E1+E2+E3+E4=200V
La résistance :	R=10Ω
L'inductance :	L=100mH

Référence Bibliographique

Référence Bibliographie

[1] SANAE RECHKA,' Etude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électrique de distribution' thèse de diplôme de maitre est science appliqué 2002 en génie électrique présenté par a Université du Québec à Trois-Rivières

[2] Philippe FERRACCI 'La qualité de l'énergie électrique' Schneider Electric n° : CT 199(e) édition octobre 2001

[3] Puissances, Énergies, Perturbations – présentation du 24/0305 – 1

PUISSANCES ÉNERGIES PERTURBATIONS. Créé par Marie-Aude MASSIN Alain KOHLER Chef de Produits Chef de Marché. Présentation S.WOLFF ET L. PITOIZET

[4] Melle BEN ZEMAMOUCHE HOURIA 'Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT ' thèse magistère université Badji Mokhtar Annaba.2010.

[5] Jean-Sébastien MARIÉTHOZ 'ÉTUDE FORMELLE POUR LA SYNTHÈSE DE CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX ASYMÉTRIQUES: TOPOLOGIES, MODULATION ET COMMANDE' thèse ingénieur en électricité diplômé EPF. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. 2005

[6] Jean-Sébastien MARIETHOZ, 'Etude formelle pour la synthèse de convertisseur multi niveau asymétrique', thèse doctorat .2005.

[7] Alexander Leredde, 'Etude, commande et mise en œuvre de nouvelle structure multi niveaux'. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.

[8] J.Song Manuelle, 'Convertisseur multi niveaux asymétriques alimentés par transformateur multi secondaire basse-fréquence : réaction au réseau d'alimentation. Thèse EPFL N° 3033, école Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004.

[9] J.Rodriguez;J.S.Lai;F.Z.Penz, 'Multilevelinverter: A severy of topologies,controls,and applications. IEEET ransaction on industryelectronic, vol 49, N°, pp 724-738, Aug 2002.

[10] J. Song-Manuelle;S.Mariethoz;M.Veenstra, A.Rufer,'A generalized design principal of a uniform step asymmetrical multilevel converter for high power conversion', European conference on power Electronics and Applications, EPE 01, Graz, Austria 2001.

[11] Frack Jedrzejewski, 'Introduction aux méthodes numériques', deuxième édition, Sping-Verlag, France ,Paris,2005.

[12] 1878-0296 @ 2013 The Auther, Published by Elsevier B.V.Open access under CC BY-NC-ND license.