

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département d'Électrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Électrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Thème

Commande d'un Onduleur Monophasé par la MLI

à Élimination Sélective d'Harmoniques

par :

Bensmara Ahlem et Toureche Fatima

Soutenue publiquement le 13 / 07 / 2019 devant le jury composé de :

Président	N. BOUDJERDA	Professeur
Rapporteur	B. MAKHLOUF	Maître de Conférences
Examineur	D. LALILI	Maître de Conférences

Dédicaces

A mémoire de ma mère

A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

*A ceux qui m'ont encouragé et soutenu
dans mes moments les plus durs*

Et ceux à qui je dois tant

A mon père pour ça amour et support affectif

A mes sœurs

A mes frères

A tout ma famille, mes collègues

A mes amis chacun a son nom

Fatima

&

Ahlem

Remerciements

*Avant tout, nous remercions **Allah** qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à remercier très vivement Notre encadreur **MAKHLOUF Badr** qui est un potentiel infini pour les conseils avisés et l'encouragement constant.*

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à toutes les promotions 2^{ème} 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

<i>Introduction générale</i>	01
------------------------------------	----

Chapitre I : MLI par élimination sélective d'harmoniques

Introduction.....	03
I.1 Onduleur monophasé.....	03
I.2 Comparaison entre trois techniques de commande.....	04
I.3 Principe de la MLI-ESH.....	07
I.3.1 Série de Fourier	07
I.4 La MLI par élimination sélective d'harmoniques bipolaire (MLI-ESH-B)	08
I.5 La MLI par élimination sélective d'harmoniques Unipolaire (MLI-ESH-U)	09
I.6 Résolution des systèmes d'équation non linéaires.....	10
I.7 Stockage des angles de commutation	19
Conclusion.....	24

Chapitre II : Méthodes simplifiées pour le calcul des angles de commutation

Introduction.....	25
II.1 Technique 1.....	25
II.2 Technique 2.....	33
Conclusion.....	40

Chapitre III : Méthodes de simplification des trajectoires des angles de commutation

Introduction.....	41
III.1 La MLI-ESH à échantillonnage régulier (MLI-ESH-ER).....	41
III.2 La MLI-ESH linéarisante (MLI-ESH-L).....	45
Conclusion	58
<i>Conclusion générale</i>	59
<i>Références Bibliographiques</i>	

Chapitre I : MLI par élimination sélective d'harmoniques

Figure (I.1) : Structure d'un onduleur monophasé	04
Figure (I.2) : Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab.....	04
Figure (I.3) : Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale.....	05
Figure (I.4) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques - technique pleine onde -..	06
Figure (I.5) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques - technique MLI triangulo-sinusoïdale -	06
Figure (I.6) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques - technique MLI-ESH-.....	06
Figure (I.7) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (bipolaire).....	08
Figure (I.8) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (unipolaire)	09
Figure (I.9) : La fenêtre de la fonction optimtool.....	10
Figure (I.10) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-B).....	11
Figure (I.11) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-B).....	12
Figure (I.12) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-U).....	13
Figure (I.13) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-U).....	14
Figure (I.14) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$ MLI-ESH-B)....	15
Figure (I.15) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-B).....	15
Figure (I.16) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-B).....	16
Figure (I.17) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$ MLI-ESH-B)....	16
Figure (I.18) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$ MLI-ESH-U) ...	17
Figure (I.19) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-U)	17
Figure (I.20) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-U)	18
Figure (I.21) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$ MLI-ESH-U) ...	18
Figure (I.22) : Profil de variation de r	20
Figure (I.23) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$).....	21
Figure (I.24) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$).....	22
Figure (I.25) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$).....	23

Chapitre II : Méthodes simplifiées pour le calcul des angles de commutation

Figure (II.1) : Positionnement des différents angles	25
Figure (II.2) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r	26
Figure (II.3) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r	27
Figure (II.4) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$).....	28
Figure (II.5) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$).....	29
Figure (II.6) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$).....	30
Figure (II.7) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 11$).....	31
Figure (II.8) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 13$).....	32
Figure (II.9) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r	33
Figure (II.10) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r	34
Figure (II.11) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$).....	35
Figure (II.12) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$).....	36
Figure (II.13) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$).....	37
Figure (II.14) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 11$).....	38
Figure (II.15) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 13$).....	39

Chapitre III: Méthodes de simplification des trajectoires des angles de commutation

Figure (III.1) : Trajectoire des angles de commutation obtenus par la MLI-ESH-ER.....	42
Figure (III.2) : Erreur des angles de commutation.....	43
Figure (III.3) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$)	44
Figure (III.4) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 9$)	44
Figure (III.5) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 9$)	45
Figure (III.6) : Angles de commutation obtenus par la MLI-ESH-ER-L.....	52
Figure (III.7) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 10$)	53
Figure (III.8) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 10$)	54
Figure (III.9) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 12$)	54

Liste des figures

Figure (III.10) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N= 12$)	55
Figure (III.11) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N= 14$)	55
Figure (III.12) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N= 14$)	56
Figure (III.13): Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N= 16$)	57
Figure (III.14): Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N= 16$)	58

Chapitre I : MLI par élimination sélective d'harmoniques

Tableau (I.1) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 5$ MLI-ESH-B)..... 19
Tableau (I.2) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 7$ MLI-ESH-B)..... 20
Tableau (I.3) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 9$ MLI-ESH-B)..... 20

Chapitre III : Méthodes de simplification des trajectoires des angles de commutation

Tableau (III.1) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 10$)..... 46
Tableau (III.2) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 12$)..... 47
Tableau (III.3) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 14$)..... 47
Tableau (III.4) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 16$)..... 48
Tableau (III.5) : Valeurs numérique des coefficients des angles avec indices impair 49
Tableau (III.6) : Valeurs numérique des coefficients des angles avec indices pair 49
Tableau (III.7) : Valeurs numérique des coefficients des angles avec indices impair 50
Tableau (III.8) : Valeurs numérique des coefficients des angles avec indices pair 50

Introduction générale

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 [Ima-05].

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 (MLI-ESH) est la plus adaptée [Jas-05], [Hui-06]. 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 [Ima-11].

La principale difficulté de la MLI-ESH 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 [Ima-11].

La méthode classique ou standard pour l'implémentation de la MLI-ESH c'est la méthode des tableaux (Look up table) qui exige pratiquement l'utilisation des mémoires électroniques pour stocker les angles de commutation. D'autre méthode de génération des tensions désirées par la MLI-ESH; exigent le passage par l'étape soit de simplification ou d'approximation des trajectoires des angles de commutation calculées par la MLI-ESH [Bow-99], [Bow-01], [Azl-06], [Che97], [Vil-05].

Introduction générale

Le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude de la MLI-ESH avec symétrie par rapport au quart et à la demi-période bipolaire et unipolaire.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons la MLI-ESH simplifiée basée sur l'algorithme du centre de gravité qui est l'amélioration de la MLI-ESH basée sur l'algorithme des aires égaux.

La stratégie MLI-ESH à échantillonnage régulier et la MLI-ESH linéarisante seront l'objet du dernier chapitre.

Chapitre I

*MLI par élimination
sélective d'harmoniques*

Introduction

La qualité de la tension de sortie des onduleurs dépend fortement de la technique de commande utilisée, plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer une tension de sortie ayant le moins d'harmoniques possibles [Naa-11], [Ima-11], on rencontre plusieurs stratégies de commande, tels que la pleine onde, la MLI triangulo-sinusoïdale et la MLI-ESH.

La MLI-ESH est reconnue comme étant la plus performante et la plus utilisée pour les applications à faible nombre de commutation des interrupteurs de puissance ce qui a comme conséquence de l'amélioration de rendement de point de vue la durée de vie de l'onduleur [Had-07]. L'objectif de MLI-ESH est de calculer les angles adéquats d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de l'onduleur, pour contrôler le fondamental et annuler les harmoniques indésirables (de rang 3, 5, 7, 9,). Pour calculer les angles de commutation il faut d'abord formuler un modèle mathématique de l'amplitude des harmoniques, basé sur la décomposition en séries de Fourier du profil de la tension souhaitée, on obtient un système d'équations à des termes trigonométrique.

La stratégie MLI-ESH présente trois types de symétrie : la symétrie par rapport au quart et à la demi-période, par rapport à la demi-période et pas de symétrie, en plus de la symétrie il est à noter qu'on peut distinguer deux formes : bipolaire et unipolaire [Joh-05].

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon détaillée la MLI-ESH pour la symétrie par rapport au quart et à la demi-période bipolaire et unipolaire.

I.1 Onduleur monophasé

Un onduleur est un convertisseur statique d'électronique de puissance permettant de générer des tensions alternatives à partir d'une source de tension continue.

La structure de l'onduleur de tension se présente à la figure (I.1) se compose de quatre interrupteurs à semi-conducteurs avec des diodes antiparallèles.

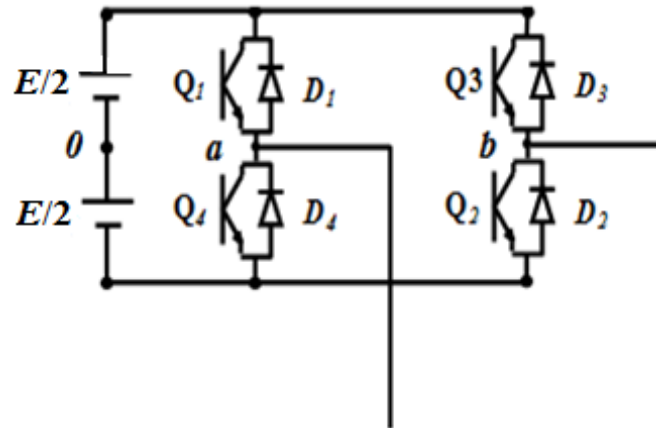


Figure (I.1) : Structure d'un onduleur monophasé

Sous Matlab/Simulink l'onduleur utilisé pour simuler les différentes techniques de commande, il est représenté par la figure ci-dessous.

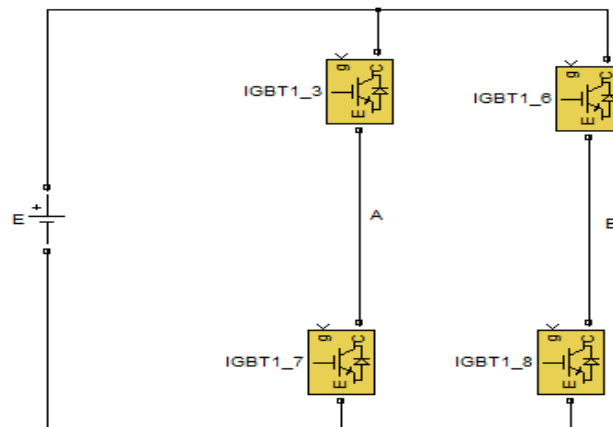


Figure (I.2) : Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab

I.2 Comparaison entre trois techniques de commande

Le but de cette partie est de comparer entre trois techniques de commande la pleine onde, la MLI triangulo-sinusoidale et la MLI-ESH.

La commande en pleine onde est une commande classique, et que les interrupteurs de même bras sont alternativement ouverts et fermés pendant la moitié de la période. Cette commande génère un très grand nombre d'harmoniques.

Le principe de la MLI triangulo-sinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence d'une forme sinusoidale et qui représente l'image

de la tension désirée, avec une porteuse. La forme de la porteuse est triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale [Ima-05].

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

Indice de modulation m : égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence :

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

Taux de modulation r : égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} à la valeur crête U_{pm} de la porteuse :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_{pm}}$$

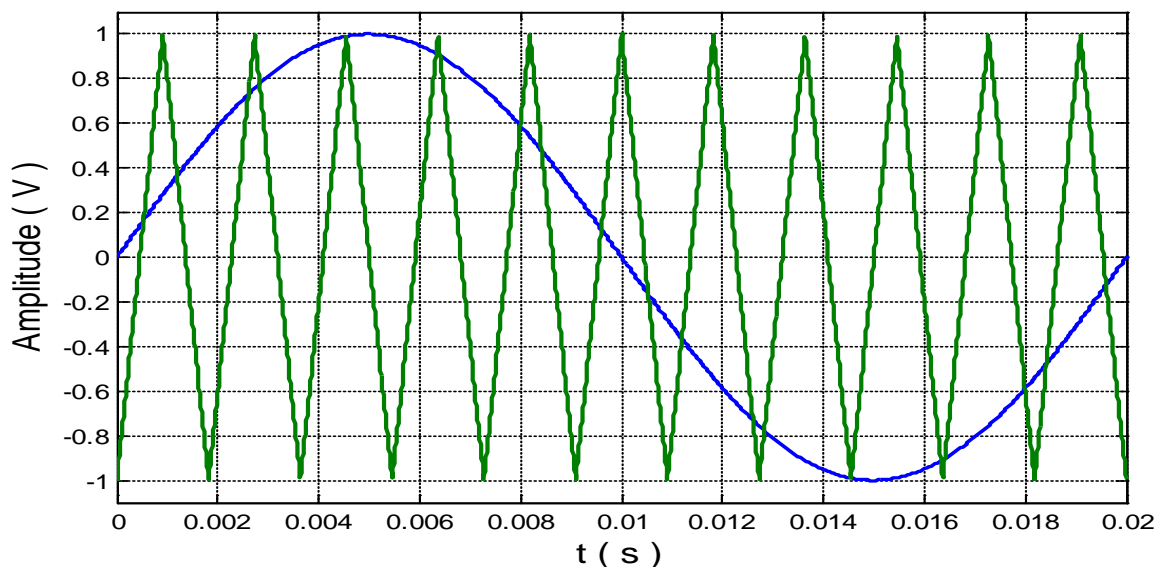


Figure (I.3) : Différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale ($r = 1$; $m = 11$)

Pour la technique MLI-ESH on prend un exemple de trois angles pour $r = 1$ $a_1 = 25^\circ$, $a_2 = 36^\circ$ et $a_3 = 89^\circ$ [Moh-95].

Résultats de simulation

La tension continue $E = 100V$, la fréquence de tension de sortie $f = 50$ Hz.

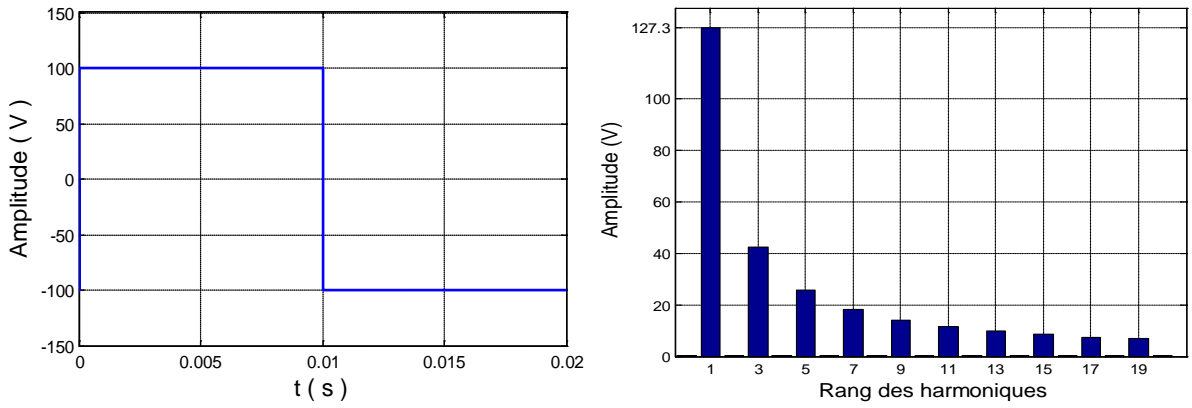


Figure (I.4) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques
- technique pleine onde -

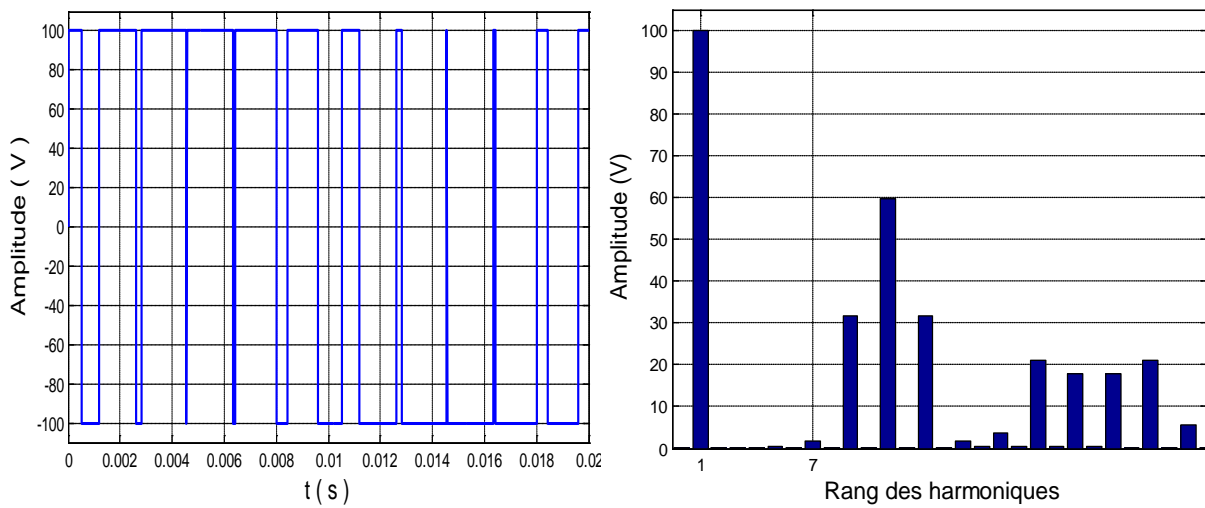
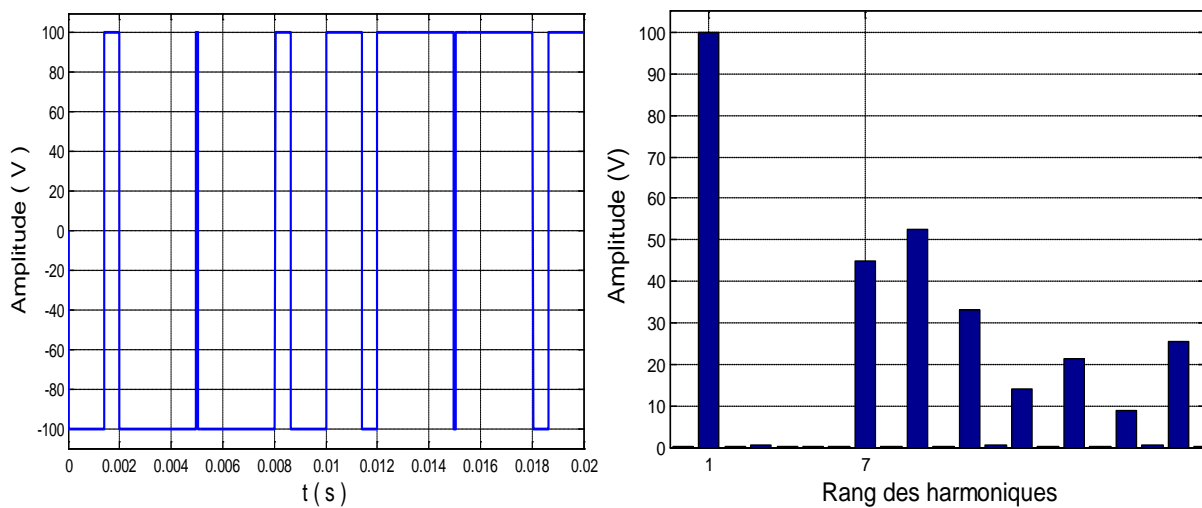


Figure (I.5) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques
- technique MLI triangulo-sinusoidale -



Figure(I.6) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques
- technique MLI-ESH -

D'après les résultats de simulation :

- On remarque bien que l'amplitude du fondamental égal à 127.3 V et 100 V pour la commande en pleine onde et les deux autres commandes respectivement, donc un gain de tension de 27%.
- Le nombre d'impulsion de commande pour la MLI triangulo-sinusoïdale sont le double par rapport à la MLI-ESH avec le même premier rang d'harmonique non nul.

1.3 Principe de la MLI-ESH

La mise en œuvre de la MLI-ESH nécessite d'abord d'imposer un profil de la tension, ensuite il faut extraire l'expression générale de l'amplitude du fondamentale et des harmoniques en fonction des angles de commutation α_i en se servant de la série de Fourier. La dernière étape consiste à calculer les angles de commutation par la résolution des systèmes d'équation non linéaires [Ima-11].

1.3.1 Série de Fourier

Le principe des séries de Fourier est introduit par *Jean Baptiste Joseph Fourier*. Les séries de Fourier sont des séries de fonctions périodiques. L'objectif est de décomposer un signal périodique en somme de sinus et de cosinus de fréquences égales à et multiples de la fréquence du signal de base. Ceci peut être exprimé d'une manière mathématique par la relation suivante [Ima-05].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t) \quad (\text{I.1})$$

Où: $n \in \mathbb{N}^*$ (1, 2, 3, ...).

Les paramètres a_0 , a_n et b_n sont dis : **coefficients de Fourier**.

Leur valeur donne des indications sur la nature du signal. On note aussi que f_0 est appelée la fréquence fondamentale et les multiples de ($2f_0$, $3f_0$, ...) les fréquences harmoniques.

La fonction $f(t)$ est donc une superposition continue de sinusoides dont les fréquences prennent leur valeur dans l'intervalle $[0, \infty]$.

Les coefficients a_0 , a_n et b_n sont déterminés à partir des relations suivantes [Ima-05] :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (\text{I.2})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad (\text{I.3})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(2\pi f_0 t) dt \quad (\text{I.4})$$

Avec :

T : la période du signal $f(t)$.

De l'équation (I.2), il est clair que le coefficient a_0 n'est autre que la valeur moyenne du signal $f(t)$ à décomposer.

I.4 La MLI par élimination sélective d'harmoniques bipolaire (MLI-ESH-B)

Pour cette stratégie, la tension de sortie entre le point milieu d'un bras de l'onduleur et le point milieu de la source bascule entre la valeur E et $-E$ ou $-E$ et E , donc la valeur crête-à-crête de cette tension est égale à $2.E$ figure (I.7). Un inconvénient lié à cette stratégie est le problème des interférences magnétiques engendrées par le passage brusque de la tension de l'onduleur de la valeur $E(-E)$ à la valeur $-E(E)$ [Mck-04].

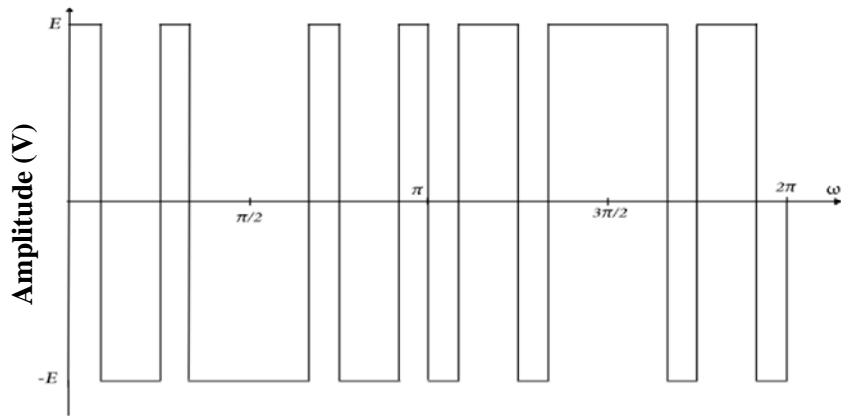


Figure (I.7) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (bipolaire)

Pour annuler $(N-1)$ harmoniques et contrôler le fondamental, on a besoin de N angles α_i . La décomposition en série de Fourier de la tension ne contient que les harmoniques impaires en sinus, l'amplitude de l'harmonique de rang n est donnée par l'expression suivante :

$$h_n = \frac{4}{n.\pi} [1 + 2. \sum_{i=1}^N (-1)^i . \cos(n. \alpha_i)] \quad (\text{I.5})$$

Avec la contrainte sur les angles :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_N \leq \pi/2 \quad (\text{I.6})$$

Comme exemple, nous considérons que $N = 5$

$$\begin{cases} I_1 = 1 + 2.(-\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4) - \cos(\alpha_5)) - M = 0 \\ I_2 = 1 + 2.(-\cos(3.\alpha_1) + \cos(3.\alpha_2) - \cos(3.\alpha_3) + \cos(3.\alpha_4) - \cos(3.\alpha_5)) = 0 \\ I_3 = 1 + 2.(-\cos(5.\alpha_1) + \cos(5.\alpha_2) - \cos(5.\alpha_3) + \cos(5.\alpha_4) - \cos(5.\alpha_5)) = 0 \\ I_4 = 1 + 2.(-\cos(7.\alpha_1) + \cos(7.\alpha_2) - \cos(7.\alpha_3) + \cos(7.\alpha_4) - \cos(7.\alpha_5)) = 0 \\ I_5 = 1 + 2.(-\cos(9.\alpha_1) + \cos(9.\alpha_2) - \cos(9.\alpha_3) + \cos(9.\alpha_4) - \cos(9.\alpha_5)) = 0 \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

Avec: $M = \pi.r/4$

I.5 La MLI par élimination sélective d'harmoniques Unipolaire (MLI-ESH-U)

Au contraire de la stratégie précédente, la tension de sortie entre le point milieu d'un bras de l'onduleur et le point milieu de la source bascule entre les valeurs (0, et E ou E et 0) et (0 et $-E$ ou $-E$ et 0), ce qui donne une valeur crête-à-crête de cette tension égale à E figure (I.8).

Un avantage de cette stratégie par rapport à la MLI-ESH-B est qu'elle produit moins de perturbations électromagnétiques à cause de passage de la tension de sortie de la valeur E (0) à la valeur 0 ($-E$).

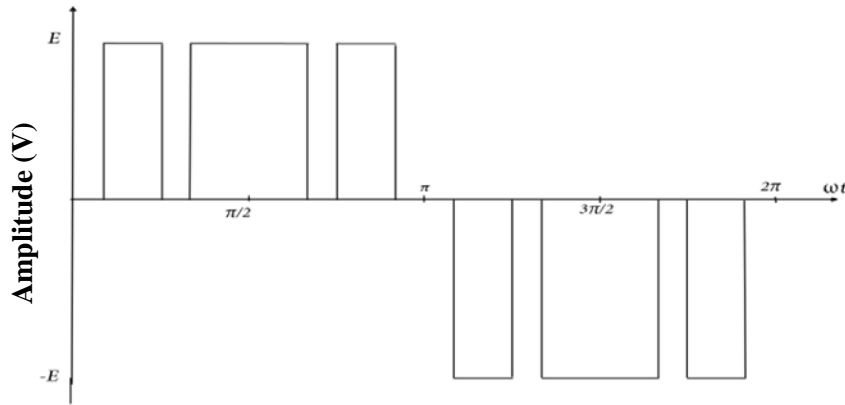


Figure (I.8) : La symétrie par rapport au quart et à la demi-période (unipolaire)

Pour annuler $(N-1)$ harmoniques et contrôler le fondamentale on a besoin de N angles α_i . La décomposition en série de Fourier de la tension ne contient que les harmoniques impairs en sinus. L'amplitude l'harmonique de rang n est donnée par l'expression suivante:

$$h_n = \frac{4}{n.\pi} [\sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} . \cos(n. \alpha_i)] \quad (\text{I.8})$$

Avec la contrainte sur les angles :

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_N \leq \pi/2 \quad (\text{I.9})$$

Comme exemple, nous considérons que $N = 5$

$$\begin{cases} I_1 = \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) - \cos(\alpha_4) + \cos(\alpha_5) - M = 0 \\ I_2 = \cos(3.\alpha_1) - \cos(3.\alpha_2) + \cos(3.\alpha_3) - \cos(3.\alpha_4) + \cos(3.\alpha_5) = 0 \\ I_3 = \cos(5.\alpha_1) - \cos(5.\alpha_2) + \cos(5.\alpha_3) - \cos(5.\alpha_4) + \cos(5.\alpha_5) = 0 \\ I_4 = \cos(7.\alpha_1) - \cos(7.\alpha_2) + \cos(7.\alpha_3) - \cos(7.\alpha_4) + \cos(7.\alpha_5) = 0 \\ I_5 = \cos(9.\alpha_1) - \cos(9.\alpha_2) + \cos(9.\alpha_3) - \cos(9.\alpha_4) + \cos(9.\alpha_5) = 0 \end{cases} \quad (\text{I.10})$$

Avec: $M = \pi. r/4$

I.6 Résolution des systèmes d'équation non linéaire

Après la formulation mathématique de la stratégie MLI-ESH, on cherche maintenant une méthode pour trouver la solution de ces systèmes d'équations non linéaires à fonctions trigonométriques. La difficulté principale de la stratégie MLI-ESH est dans le calcul des angles de commutation, dont la complexité augmente avec le nombre d'harmoniques à éliminer.

Plusieurs méthodes de résolution des systèmes d'équations non linéaires ont été proposées dans la littérature, pour notre cas la méthode de résolution appliquée est basée sur la fonction `optimtool` de toolbox de Matlab, la figure (I.9) montre la fenêtre de la fonction.

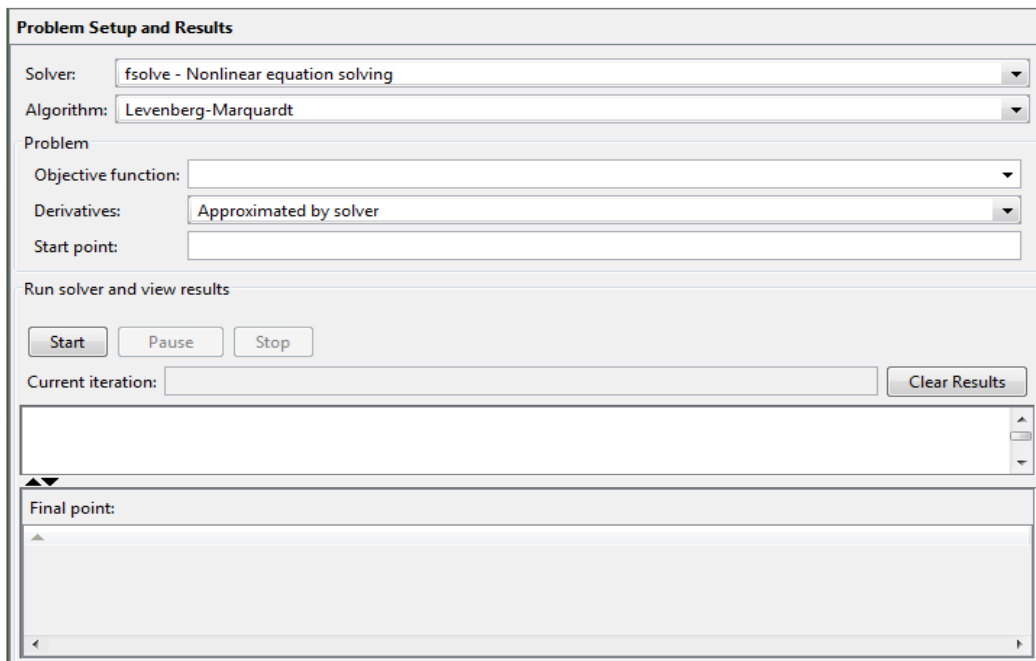


Figure (I.9) : La fenêtre de la fonction `optimtool`

Résultats de simulation

La variation des trajectoires des angles de commutation en fonction de r , sont présentés aux figures (I.10) et (I.11) pour le cas de la modulation bipolaire et aux figures (I.12) et (I.13) pour le cas de la modulation unipolaire.

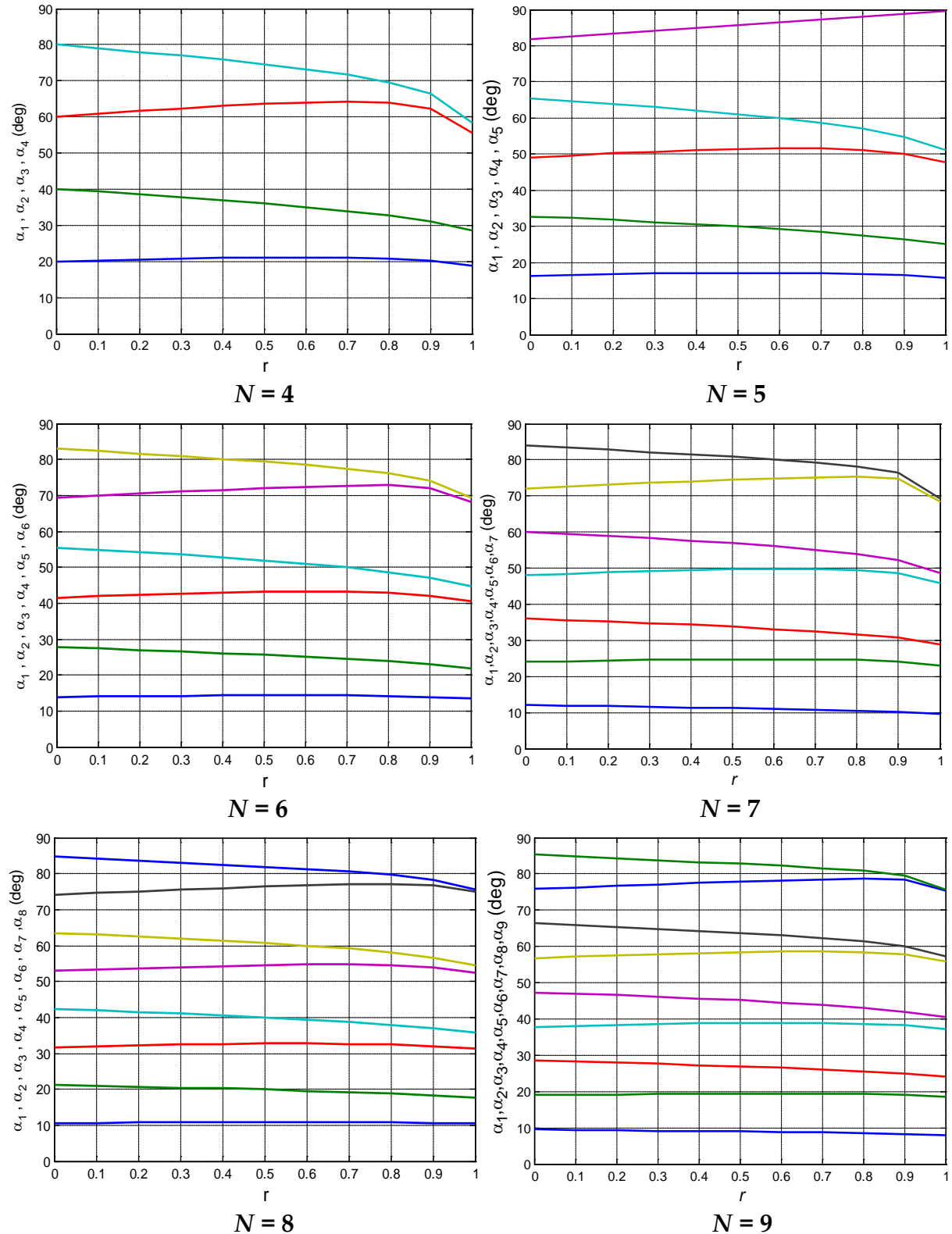


Figure (I.10) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-B)

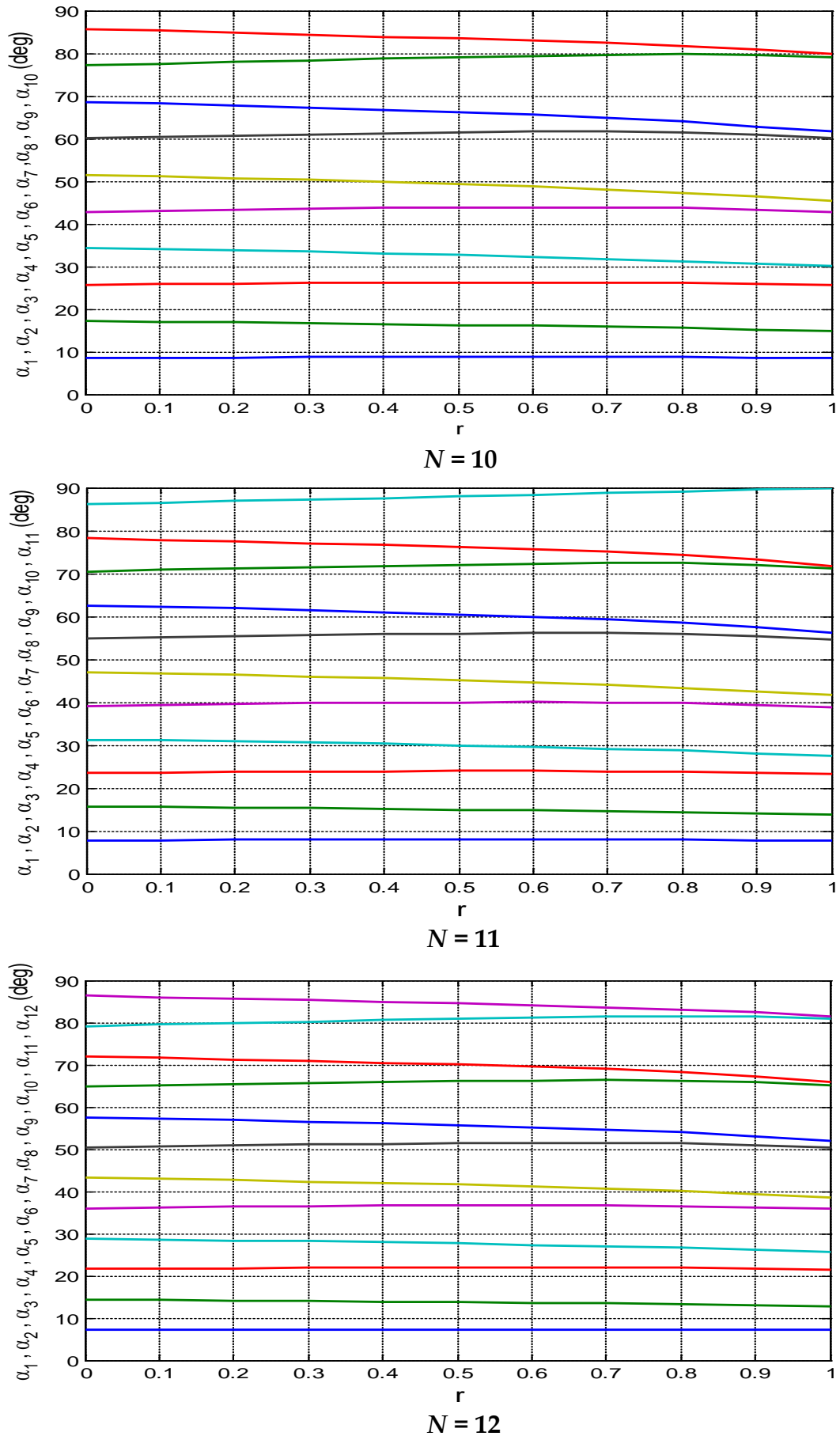


Figure (I.11) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-B)

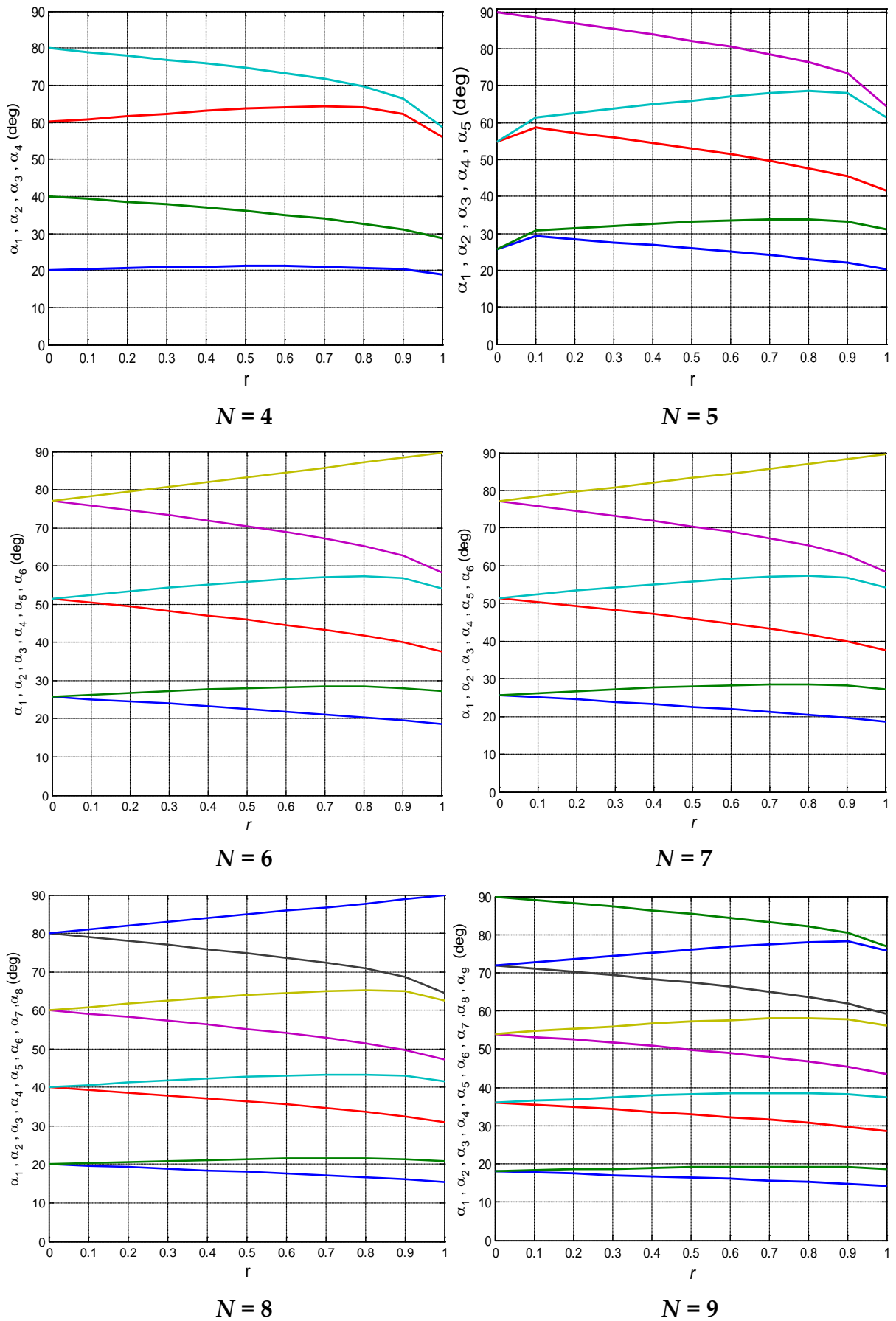


Figure (I.12) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-U)

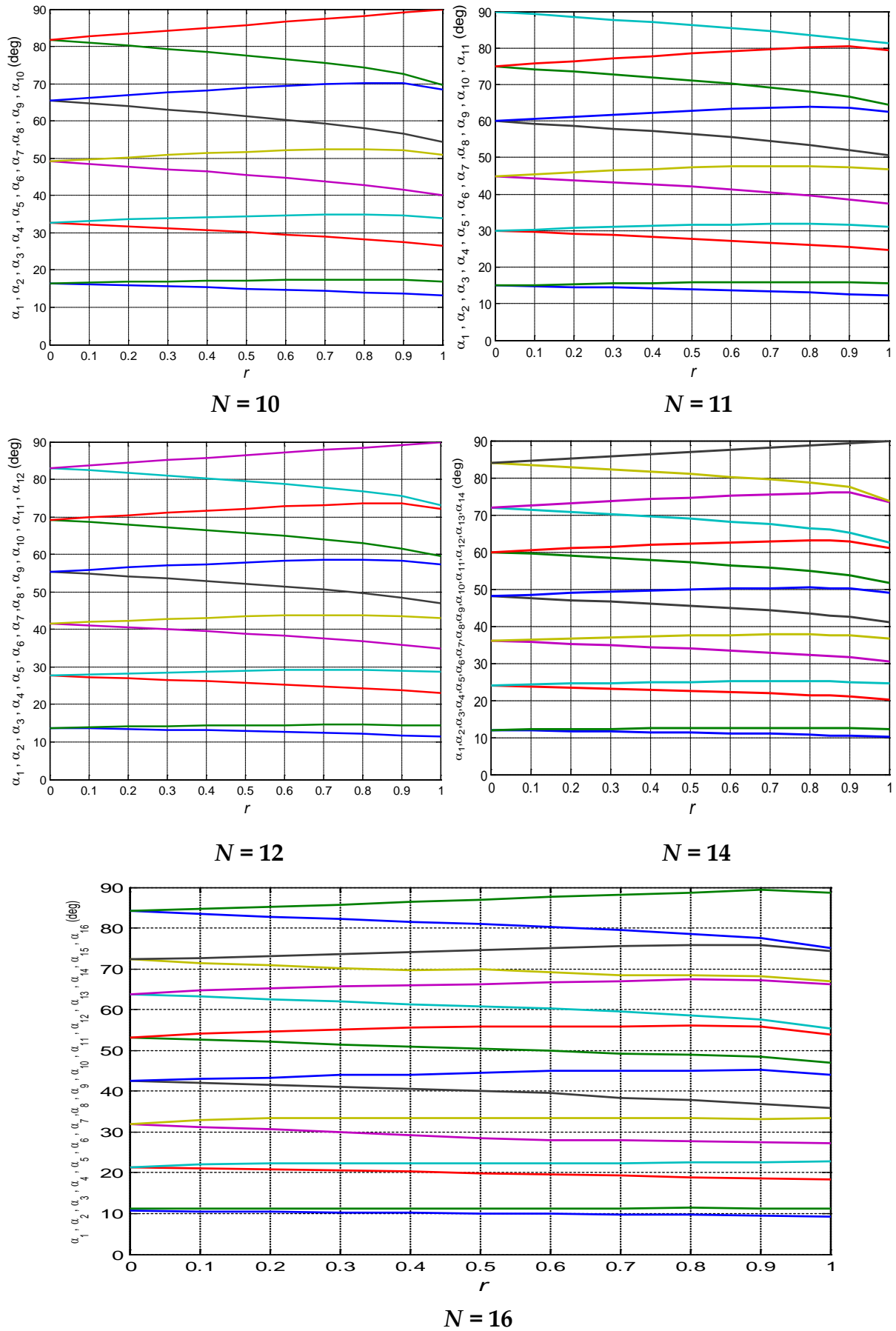
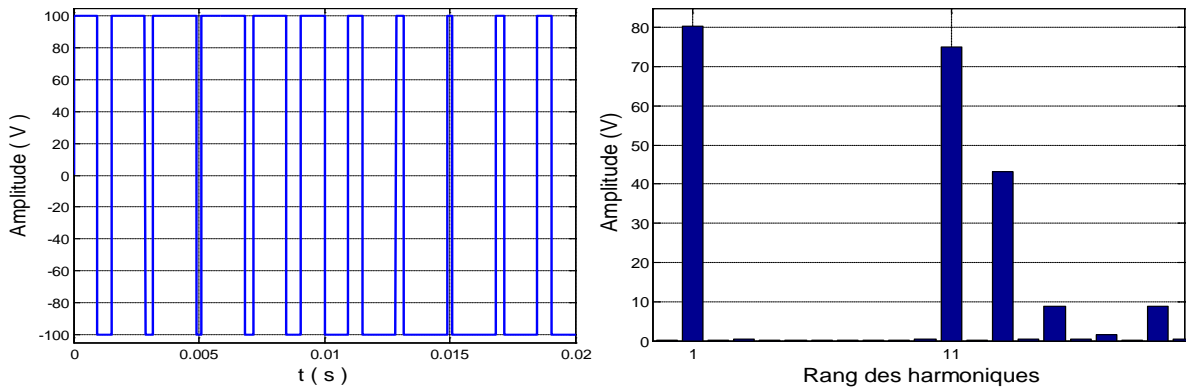


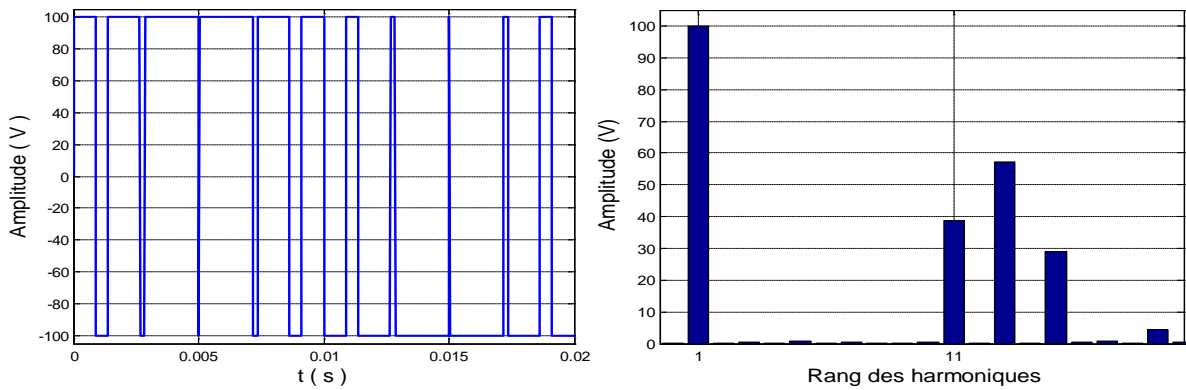
Figure (I.13) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r (MLI-ESH-U)

La tension continue $E = 100 \text{ V}$, la fréquence de la tension de sortie $f = 50 \text{ Hz}$.

Les allures des différentes tensions et leurs spectres d'harmoniques sont illustrées aux figures (I.14), (I.15), (I.16) et (I.17) pour la modulation bipolaire et aux figures (I.18), (I.19), (I.20) et (I.21) pour la modulation unipolaire.

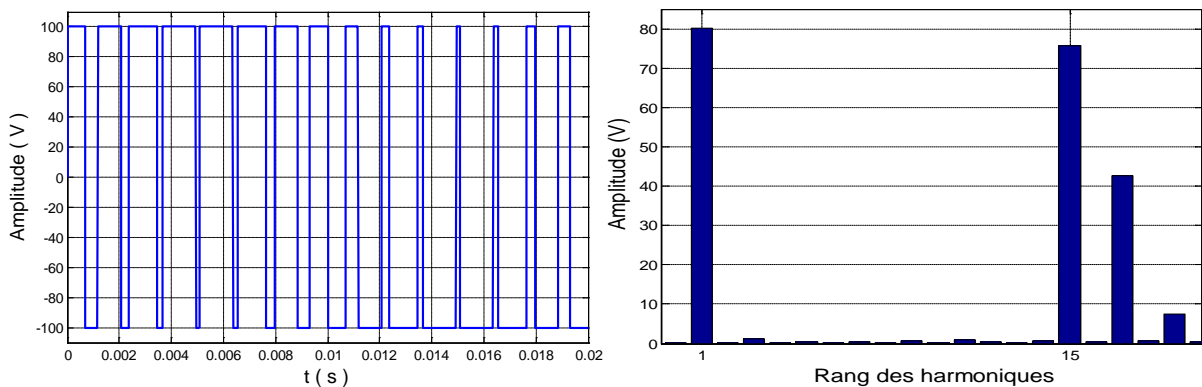


(a): $r = 0.8$



(b): $r = 1$

Figure (I.14) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$ MLI-ESH-B)



(a) : $r = 0.8$

Figure (I.15) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-B)

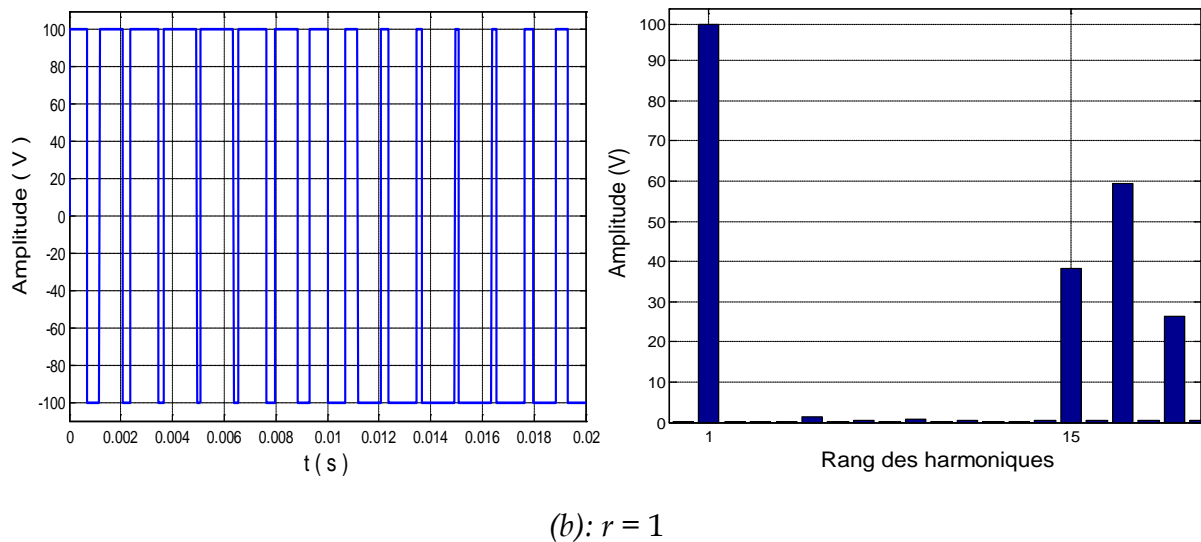


Figure (I.16) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-B)

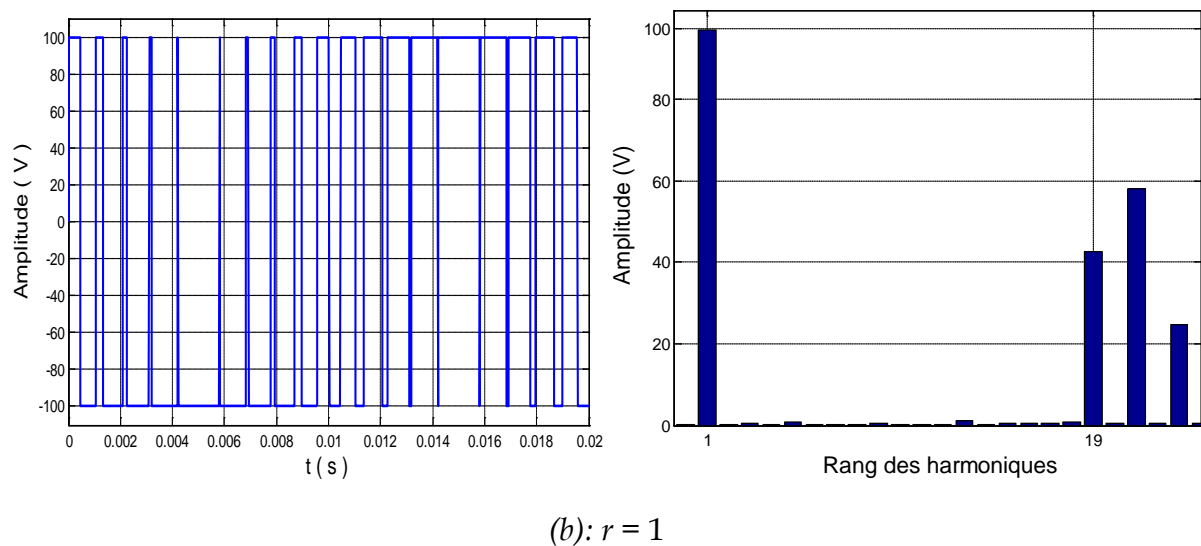
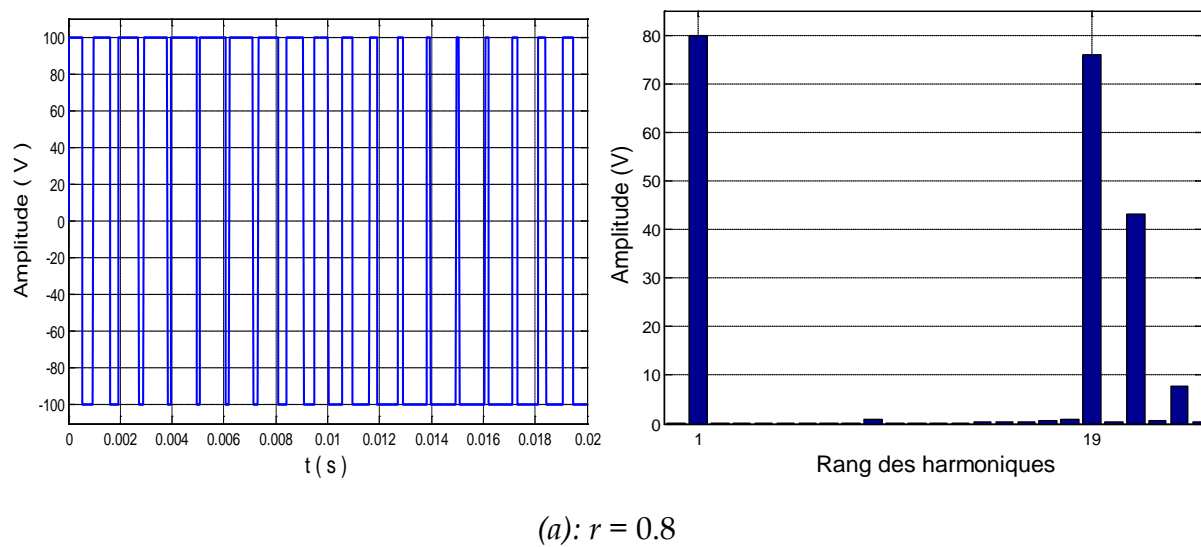


Figure (I.17) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$ MLI-ESH-B)

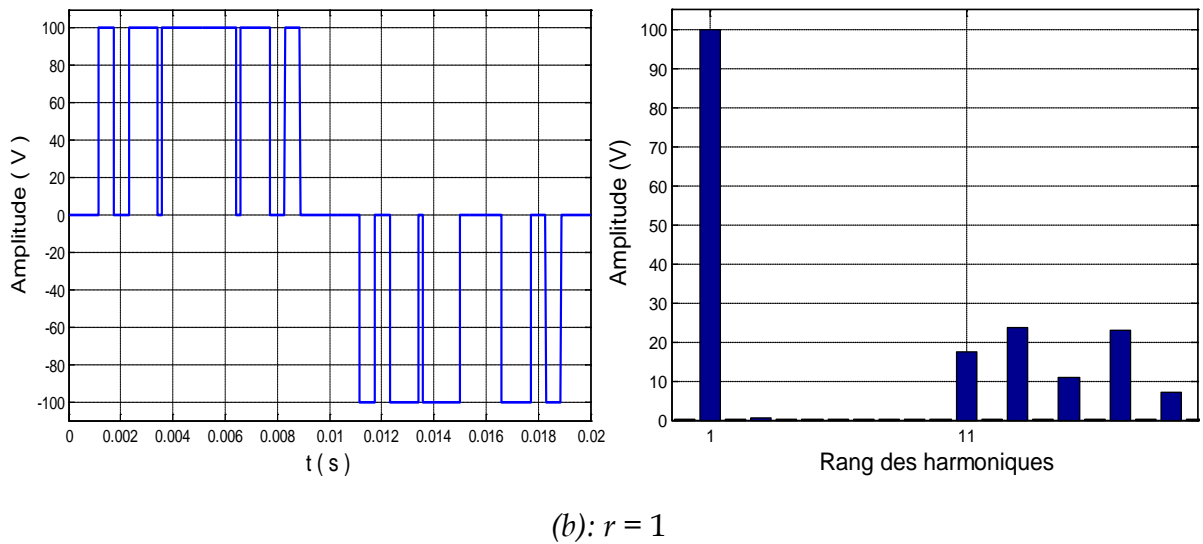
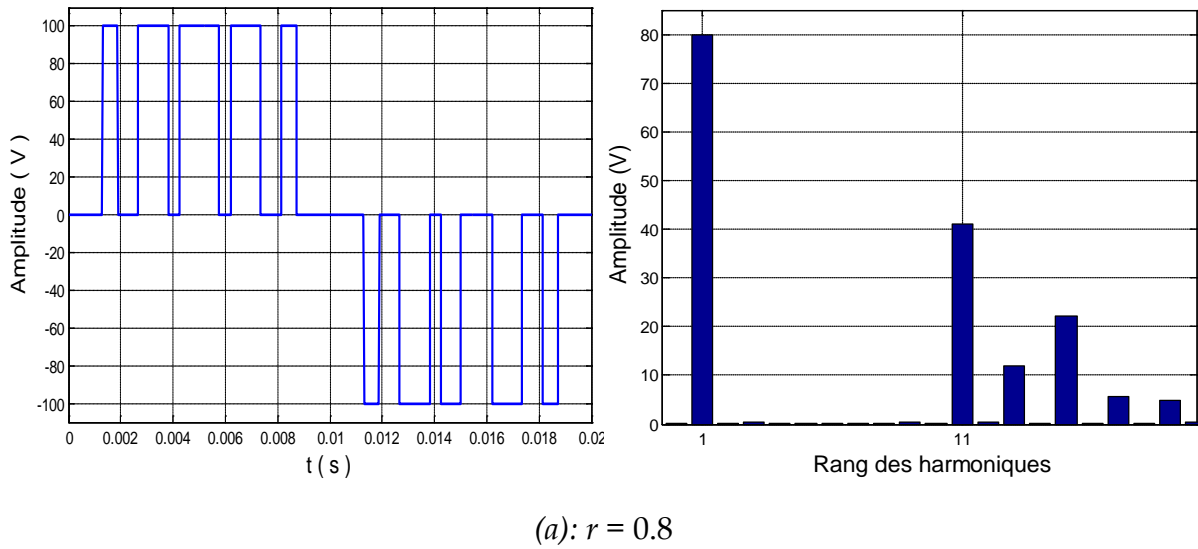


Figure (I.18) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$ MLI-ESH-U)

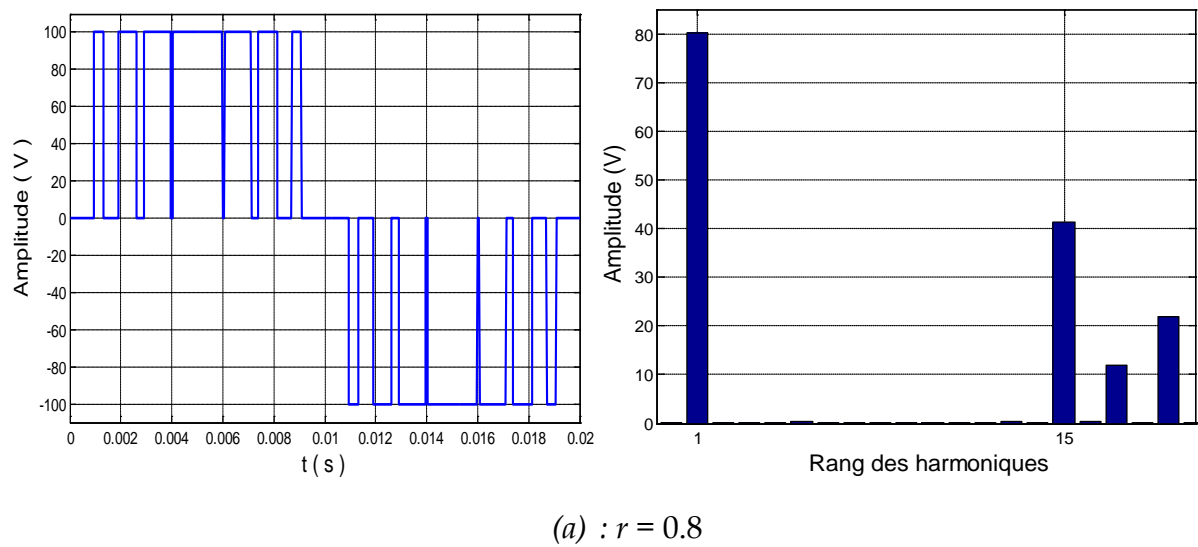


Figure (I.19) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-U)

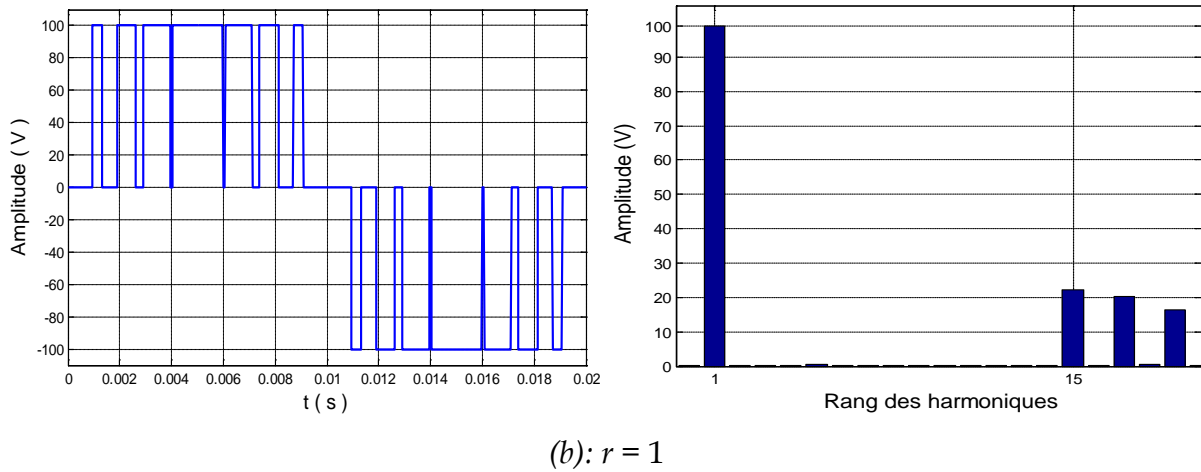


Figure (I.20) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 7$ MLI-ESH-U)

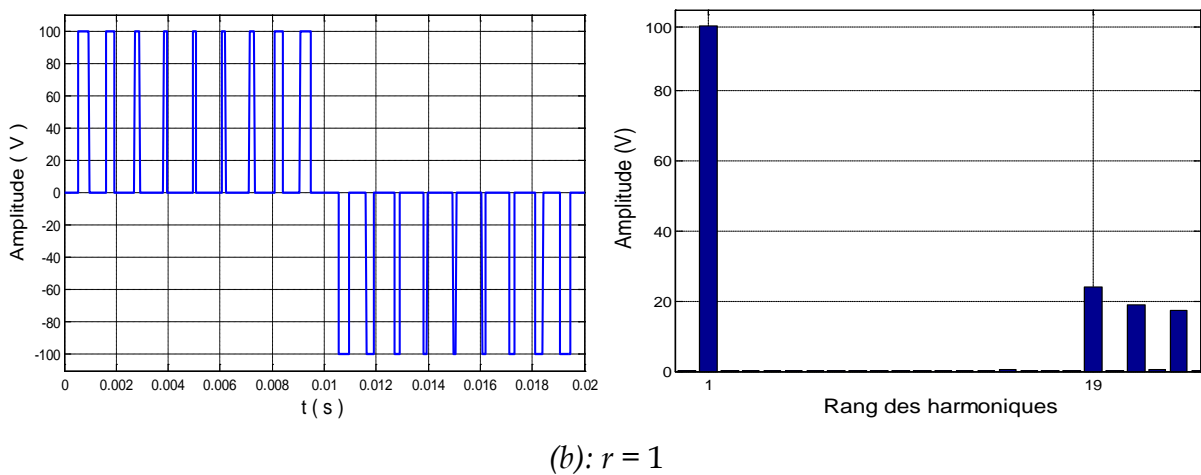
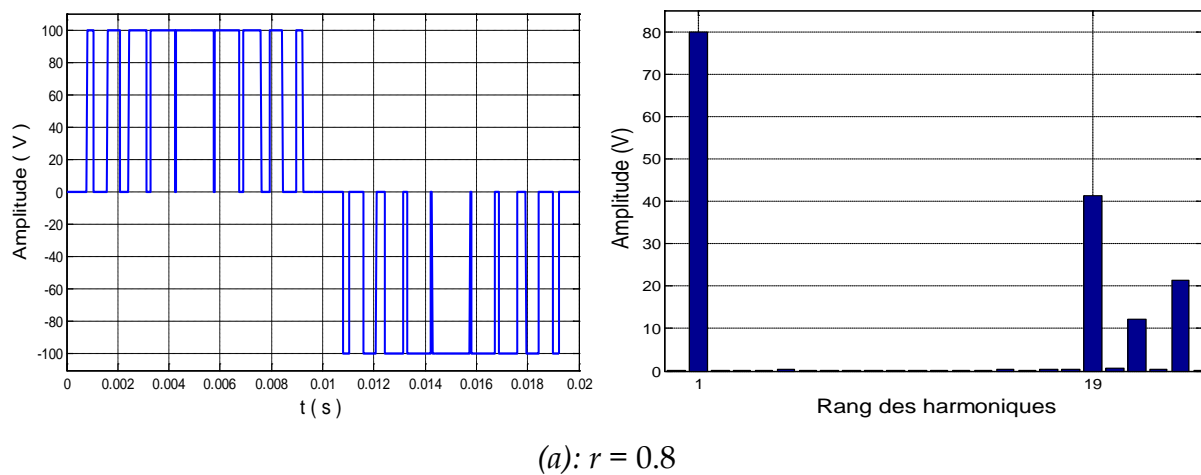


Figure (I.21) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$ MLI-ESH-U)

D'après les résultats de simulation :

- L'analyse spectral des différentes tensions montre clairement que les harmoniques d'ordre ciblées effectivement disparues tout en assurant que le fondamental prend sa valeur désirée.

- Le premier harmonique non nul est de rang $2.N+1$.
- Pour $N = 7$ et $r = 1$ les amplitudes des harmoniques de rang 15, 17 et 19 pour la forme bipolaire et unipolaire sont (38.07 V, 59.40 V et 26.70 V), (22.23 V, 20.32 V et 16.15 V) respectivement, donc on peut dire que la forme unipolaire offre un spectre d'harmoniques meilleur que la forme bipolaire.

I.7 Stockage des angles de commutation

Dans le but d'obtenir une variation continue du taux de modulation un block sous Matlab/Simulink permet de stocker les différents trajectoires des angles de commutation, ce bloc est nommé « Look up Table ». Dans le cas où la valeur du taux de modulation ne correspond pas aux valeurs dans le tableau, on utilise une méthode d'interpolation linéaire pour les deux points qui limitent le point à chercher.

On prend comme exemple les angles de commutation pour $N = 5$, $N = 7$ et $N = 9$. Les valeurs des angles sont présentées dans les tableaux (I.1), (I.2) et (I.3):

r	a_1 (deg)	a_2 (deg)	a_3 (deg)	a_4 (deg)	a_5 (deg)
0.0	16.3637	32.7273	49.0910	65.4547	81.8184
0.1	16.5814	32.2633	49.6812	64.6927	82.6205
0.2	16.7647	31.7476	50.2198	63.8791	83.4112
0.3	16.9137	31.1918	50.6953	63.0196	84.1961
0.4	17.0226	30.5845	51.0964	62.0972	84.9811
0.5	17.0856	29.9313	51.4000	61.0888	85.7546
0.6	17.0856	29.2151	51.5662	59.9543	86.5338
0.7	17.0168	28.4244	51.5376	58.6365	87.3130
0.8	16.8507	27.5306	51.1709	57.0093	88.1037
0.9	16.5298	26.4707	50.1625	54.7862	88.9059
1.0	15.8537	25.0039	47.6243	51.1651	89.7309

Tableau (I.1) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 5$ MLI-ESH-B)

r	$\alpha_1(deg)$	$\alpha_2(deg)$	$\alpha_3(deg)$	$\alpha_4(deg)$	$\alpha_5(deg)$	$\alpha_6(deg)$	$\alpha_7(deg)$
0.0	12.0000	24.0000	36.0000	48.0000	60.0000	72.0000	84.0000
0.1	11.8671	24.2285	35.6281	48.4254	59.4625	72.5589	83.3986
0.2	11.7185	24.4244	35.2179	48.8079	58.8875	73.0944	82.7854
0.3	11.5545	24.5842	34.7685	49.1428	58.2702	73.6055	82.1561
0.4	11.3752	24.7029	34.2769	49.4210	57.6019	74.0879	81.5038
0.5	11.1801	24.7733	33.7377	49.6277	56.8684	74.5330	80.8175
0.6	10.9674	24.7844	33.1418	49.7373	56.0453	74.9229	80.0768
0.7	10.7338	24.7190	32.4735	49.7040	55.0894	75.2176	79.2395
0.8	10.4718	24.5455	31.7023	49.4367	53.9154	75.3104	78.1970
0.9	10.1605	24.1884	30.7518	48.7115	52.3134	74.7850	76.5340
1.0	9.5963	23.0082	28.9343	45.8733	48.7076	68.4929	69.2369

Tableau (I.2) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 7$ MLI-ESH-B)

r	$\alpha_1(deg)$	$\alpha_2(deg)$	$\alpha_3(deg)$	$\alpha_4(deg)$	$\alpha_5(deg)$	$\alpha_6(deg)$	$\alpha_7(deg)$	$\alpha_8(deg)$	$\alpha_9(deg)$
0.0	9.4737	18.9474	28.4211	37.8947	47.3684	56.8421	66.3158	75.7895	85.2632
0.1	9.3904	19.0908	28.1818	38.1693	47.0033	57.2234	65.8695	76.2409	84.7880
0.2	9.2967	19.2124	27.9152	38.4098	46.6045	57.5730	65.3968	76.6772	84.3054
0.3	9.1928	19.3103	27.6209	38.6126	46.1693	57.8878	64.8936	77.0976	83.8124
0.4	9.0785	19.3817	27.2972	38.7720	45.6931	58.1609	64.3528	77.4997	83.3047
0.5	8.9533	19.4224	26.9412	38.8785	45.1676	58.3805	63.7621	77.8783	82.7752
0.6	8.8160	19.4261	26.5474	38.9172	44.5790	58.5251	63.1003	78.2223	82.2112
0.7	8.6641	19.3830	26.1063	38.8627	43.9042	58.5535	62.3272	78.5067	81.5858
0.8	8.4924	19.2744	25.5990	38.6677	43.0985	58.3760	61.3564	78.6639	80.8291
0.9	8.2873	19.0564	24.9790	38.2209	42.0572	57.7513	59.9580	78.4195	79.6667
1.0	7.9994	18.5593	24.0838	37.1191	40.4379	55.7600	57.3270	75.2765	75.7258

Tableau (I.3) : Valeurs numériques des angles de commutation ($N = 9$ MLI-ESH-B)

La figure (I.22) présente un exemple de profil de variation de r .

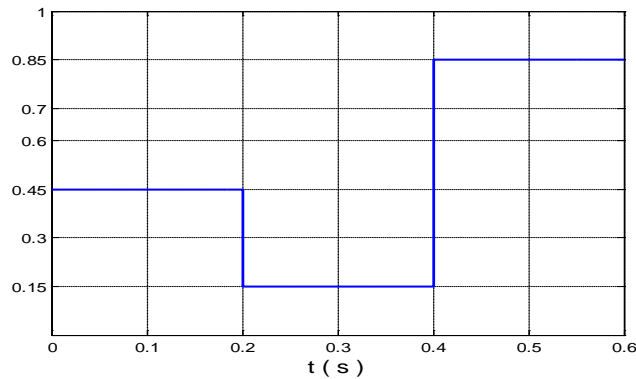
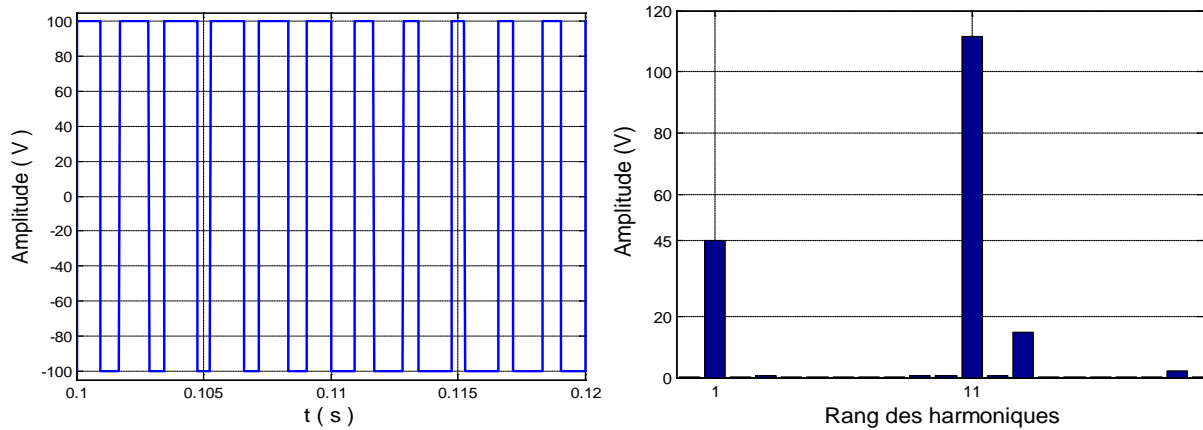


Figure (I.22) : Profil de variation de r

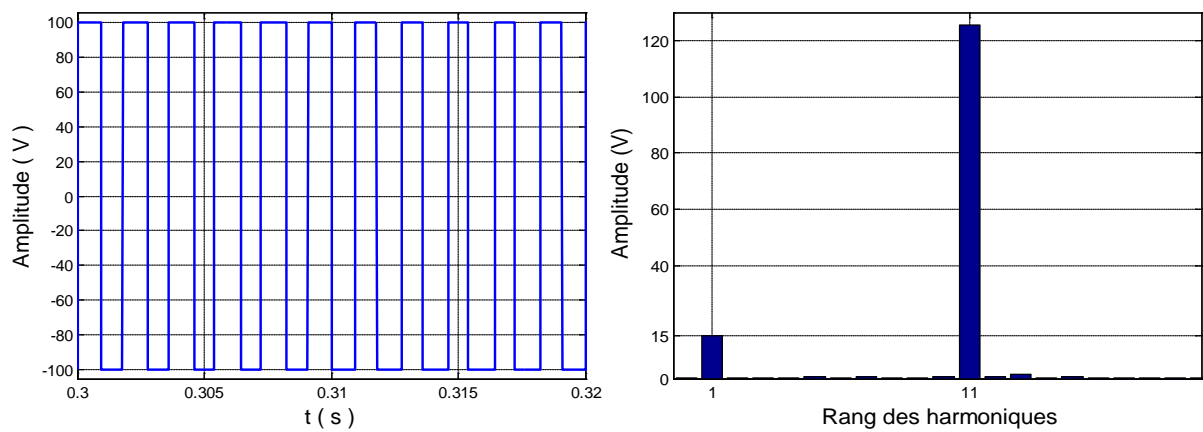
Résultat de simulation

La tension continue $E = 100 \text{ V}$, la fréquence de tension de sortie $f = 50 \text{ Hz}$.

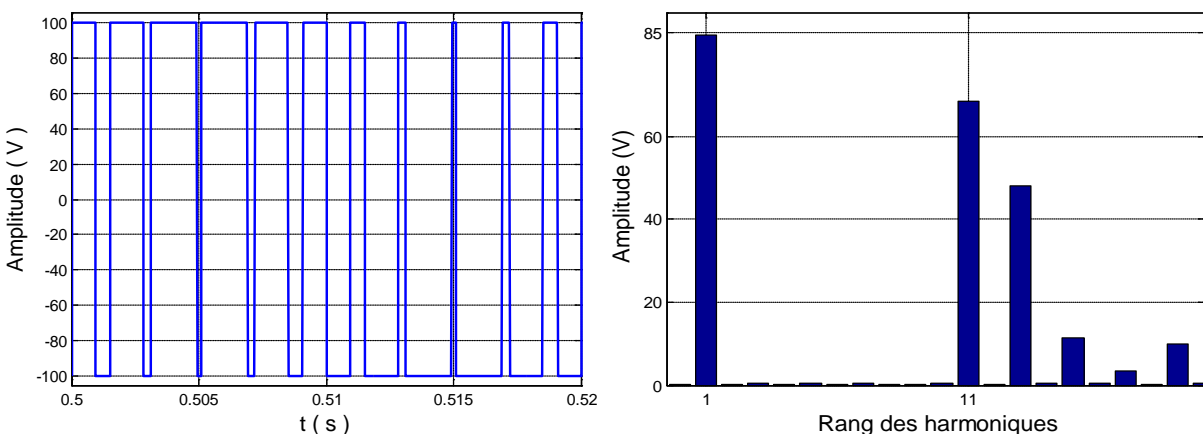
Les allures des différentes tensions et leurs spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (I.23), (I.24) et (I.25).



(a) : $r = 0.45$

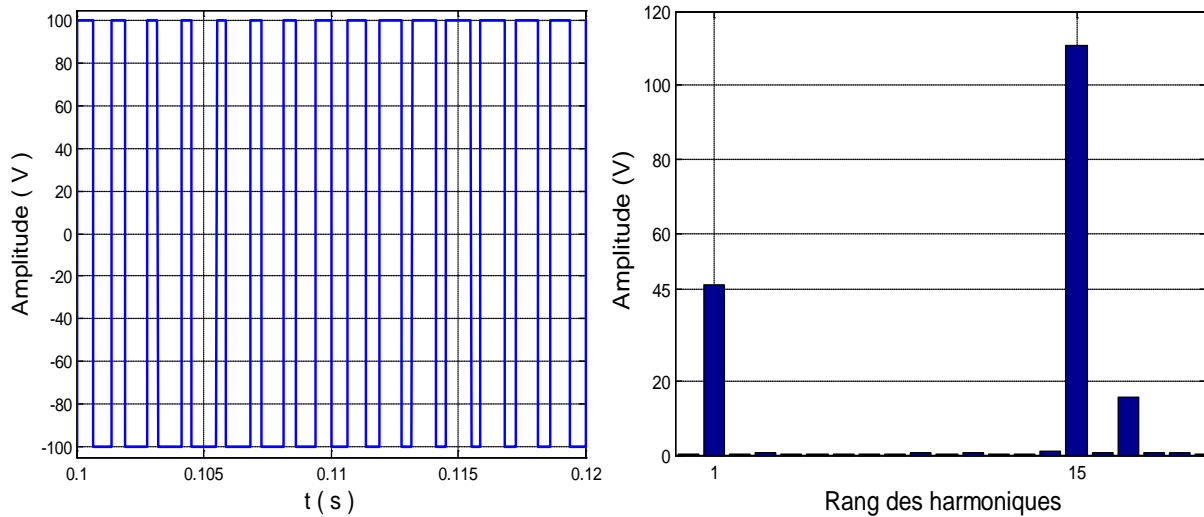


(b) : $r = 0.15$

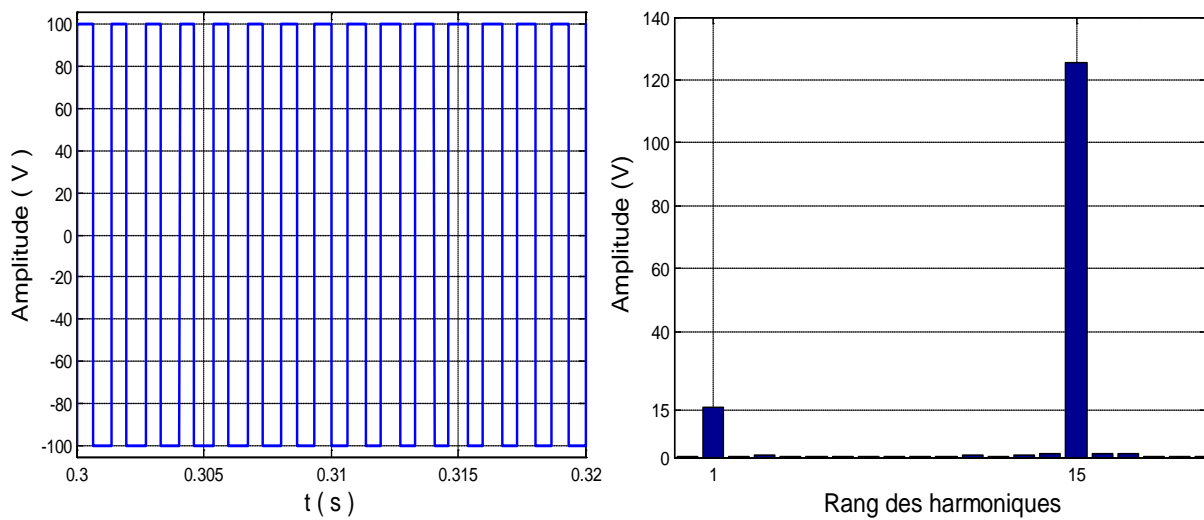


(c) : $r = 0.85$

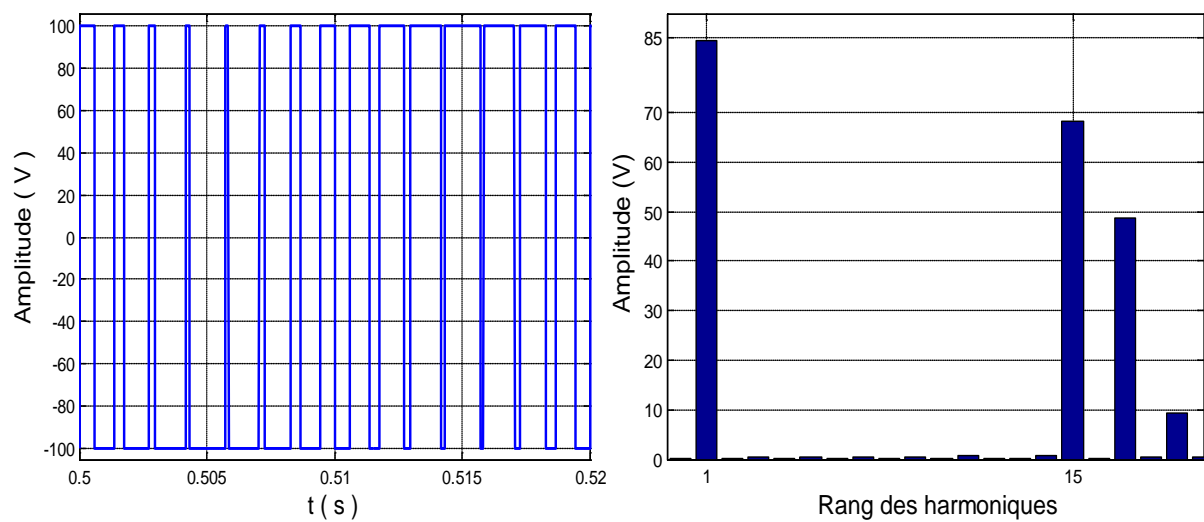
Figure (I.23) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$)



(a) : $r = 0.45$



(b) : $r = 0.15$



(c) : $r = 0.85$

Figure (I.24) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$)

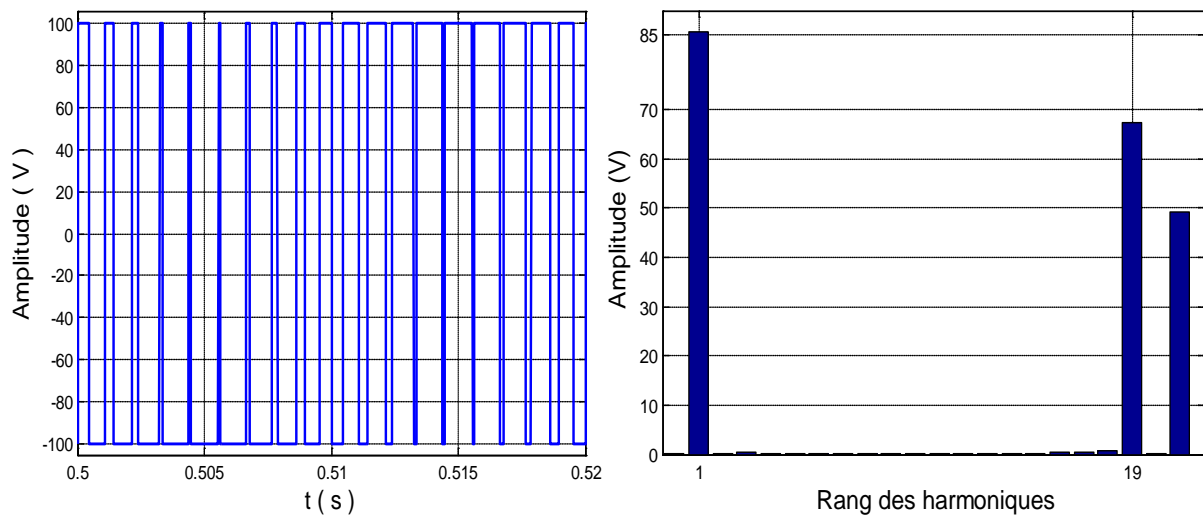
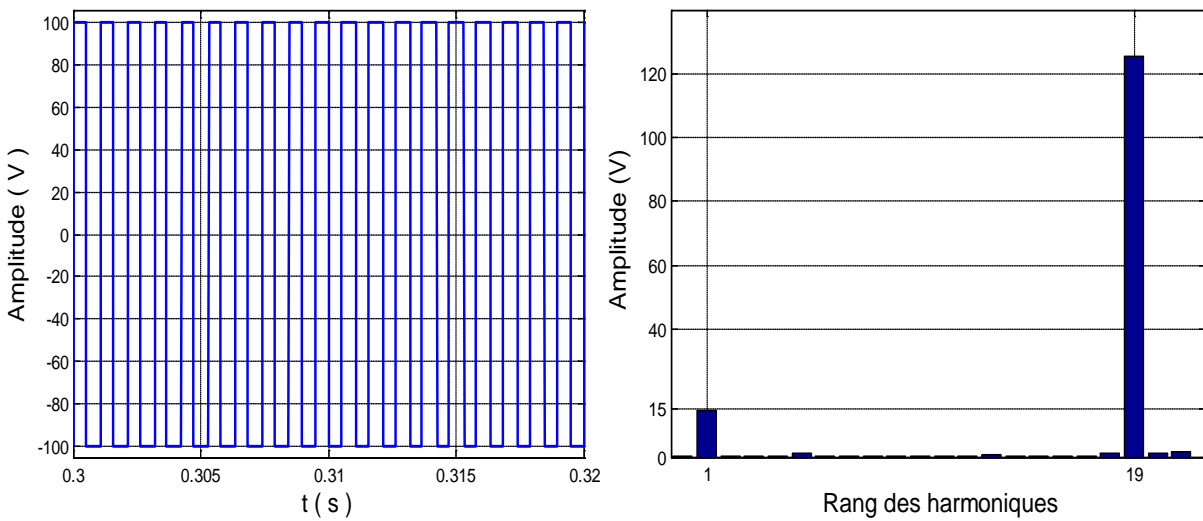
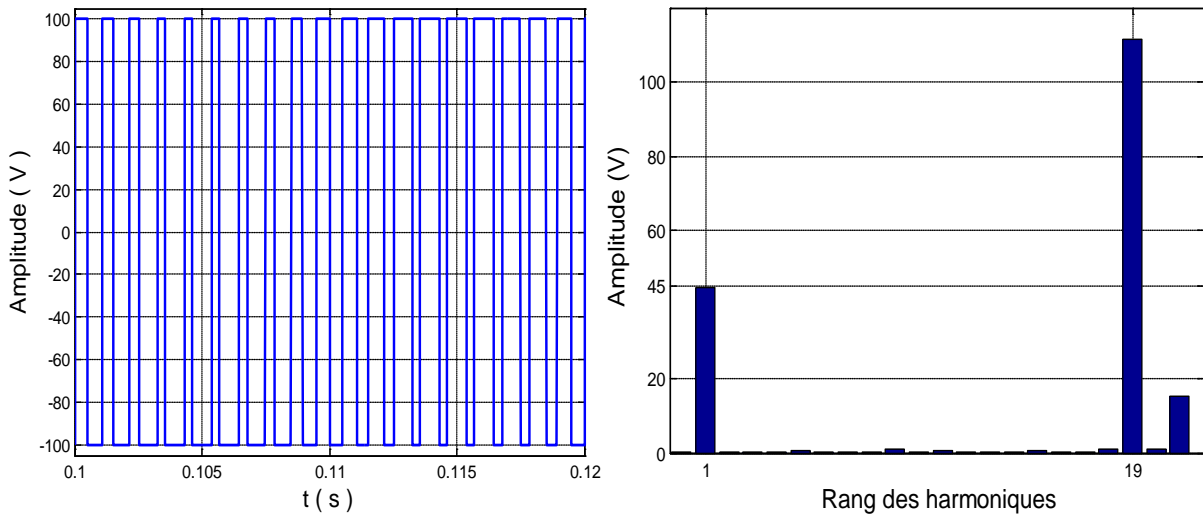


Figure (I.25) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$)

D'après les résultats de simulation :

- On remarque que les harmoniques (3, 5, 7 et 9), (3, 5, 7, 9, 11 et 13) et (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 et 17) sont nuls, et le fondamental prend la valeur souhaitée.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la MLI-ESH pour deux formes. Cette stratégie permet d'éliminer les harmoniques indésirables d'ordre spécifiques et d'assurer un bon contrôle du fondamental.

Dans le but d'obtenir une variation continue du taux de modulation la MLI-ESH-LUT qui utilise le bloc « Look up Table » sous Matlab pour stocker les différents angles de commutation calculés par la MLI-ESH. Les allures des spectres d'harmoniques sont satisfaisantes.

Chapitre II

*Méthodes simplifiées
pour le calcul des
angles de commutat*

Introduction

Nous avons vu au chapitre précédent que le calcul des angles de commutation se fait par la résolution des systèmes d'équations non linéaires.

Une nouvelle technique pour déterminer les angles de commutation, cette technique basée sur l'algorithme des aires égaux et l'algorithme du centre de gravité. Par conséquent, il n'est donc pas nécessaire de résoudre un ensemble d'équations non linéaires pour calculer les angles de commutation [Che-97], [Vil-05].

Dans ce chapitre nous avons présenté deux techniques, la première est proposée par [Che-97] nommée algorithme des aires égaux, une amélioration de cette dernière par [Vil-05] est basée sur les coordonnées de centre de gravité.

II.1 Technique 1

Elle est reconnue par le nom algorithme des aires égaux, la méthode proposée par [Che-97]. Le principe de cette stratégie est décrit comme suit ; on prend l'exemple de la figure (II.1) pour une demi période d'un signal sinusoïdal $V_{ref} = r \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$, $r = 1$ et $f = 50 \text{ Hz}$, la demi période est divisée en cinq secteurs ($N = 5$) de largeurs égaux limités par deux angles ϕ_i et ϕ_{i+1} .

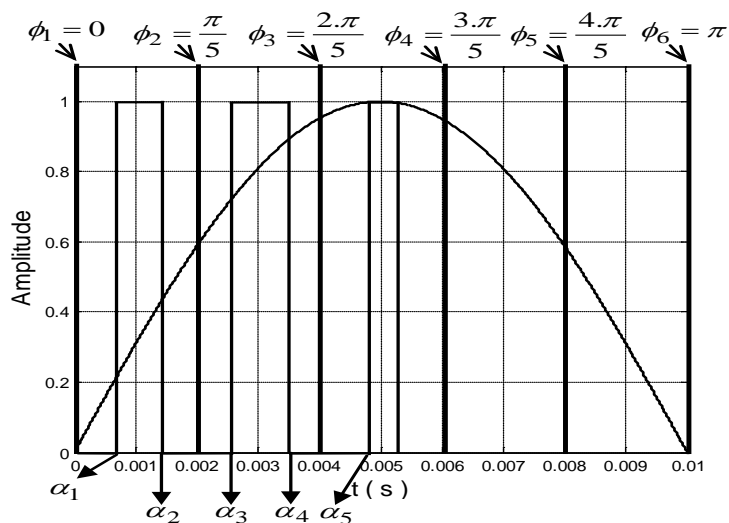


Figure (II.1) : Positionnement des différents angles

L'aire limitée par la sinusoïde et l'axe des abscisses en chaque secteur est donnée par la formule suivante :

$$aire_i = r. \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \sin(\omega.t) d\omega t = r. (\cos \phi_i - \cos \phi_{i+1}) \quad , i = [1:3] \quad (II.1)$$

À l'intérieur de chaque secteur on a deux angles a_i et a_{i+1} qui présentent l'extrémité de l'impulsion de commande, donc le principe de cette méthode est de rendre l'aire de l'impulsion qui a une forme rectangulaire (avec une longueur unitaire) égale à l'aire calculée par l'équation (II.1), et met les deux angles $\alpha_{2,i}$ et $\alpha_{2,i-1}$ symétrie par rapport au centre de secteur.

$$\begin{cases} \alpha_{2,i} - \alpha_{2,i-1} = aire_i \\ \alpha_{2,i} + \alpha_{2,i-1} = \phi_i + \phi_{i+1} \end{cases} \quad (II.2)$$

Les angles de commutation dans chaque secteur pour un quart de période sont calculés comme suit

$$\begin{cases} \alpha_{2,i-1} = \frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} - \frac{aire_i}{2} \\ \alpha_{2,i} = \frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2} + \frac{aire_i}{2} \end{cases} \quad , i = [1:3] \quad (II.3)$$

Résultats de simulation

La variation des trajectoires des angles de commutation en fonction de r , sont présentés dans les figures (II.2) et (II.3).

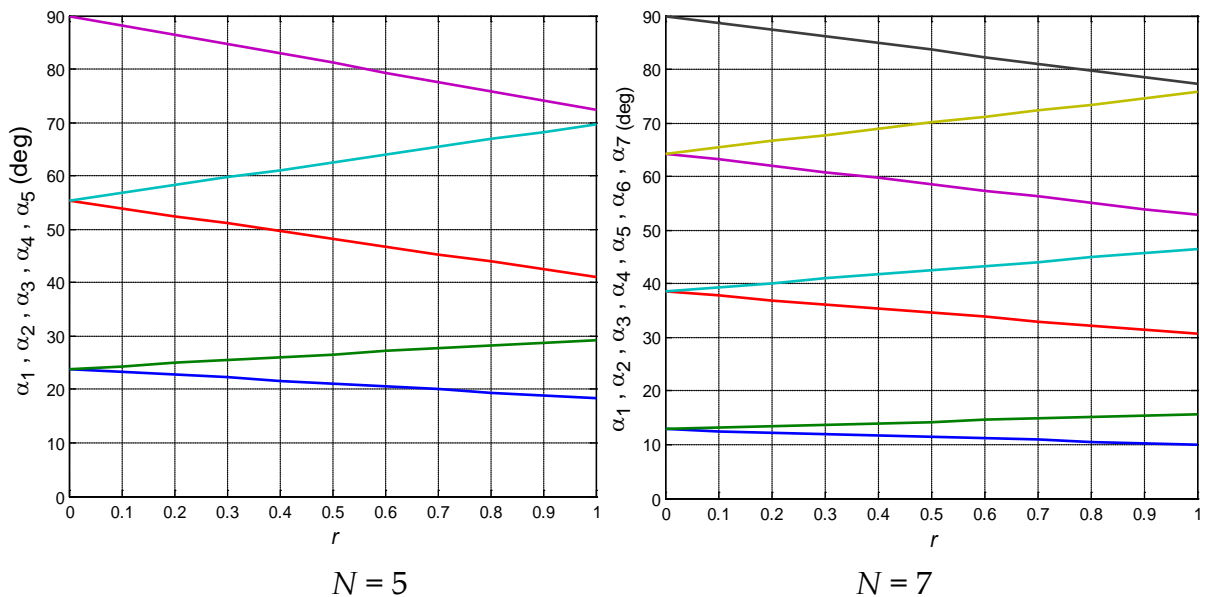
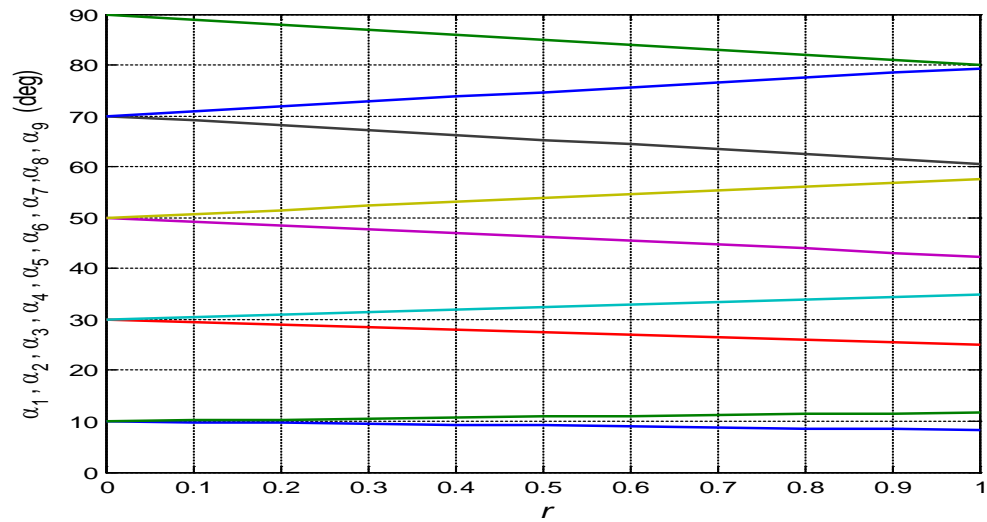
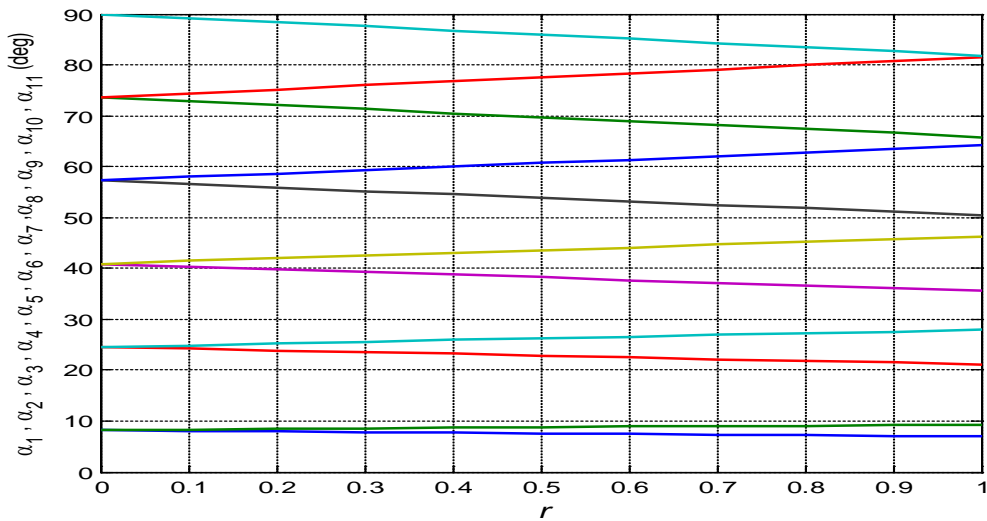


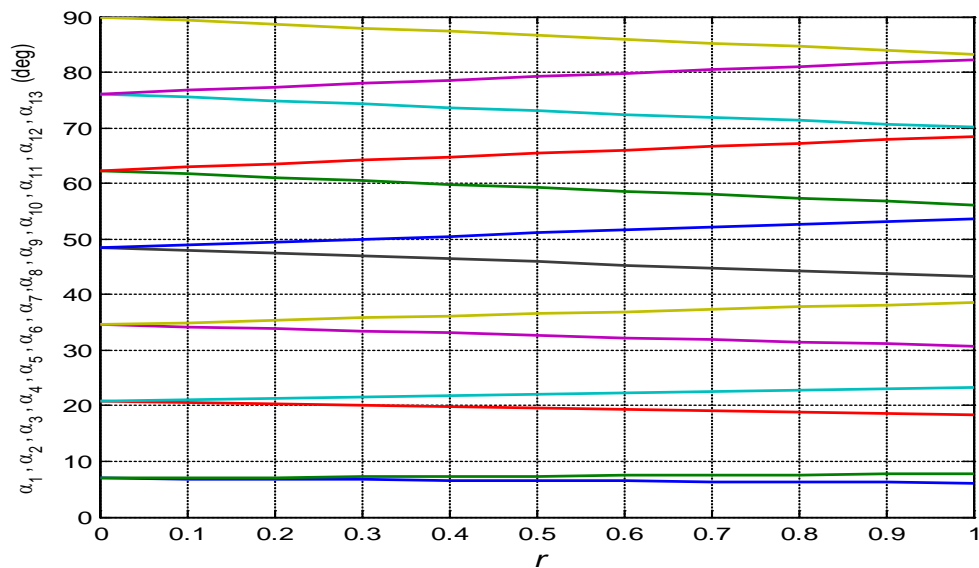
Figure (II.2) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r



$N = 9$



$N = 11$



$N = 13$

Figure (II.3) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r

La tension continue $E = 100V$, la fréquence de tension de sortie $f = 50$ Hz.

Les allures des différentes tensions et leurs spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (II.4), (II.5), (II.6), (II.7) et (II.8).

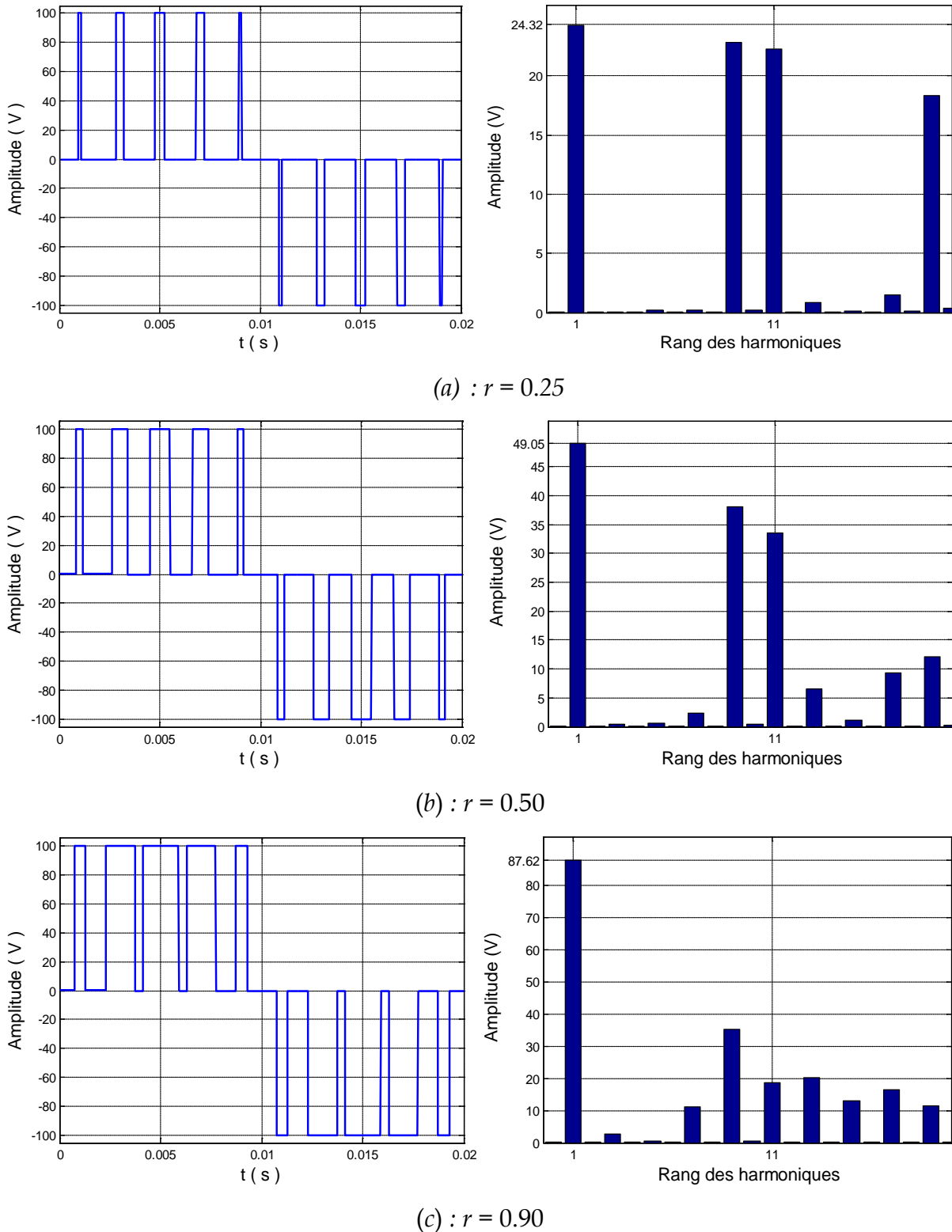
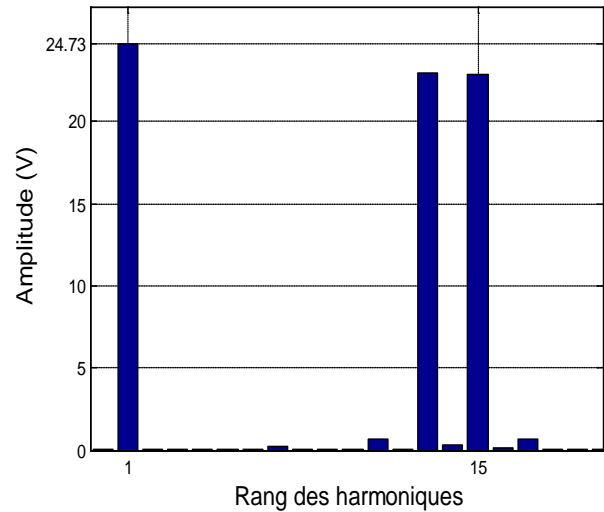
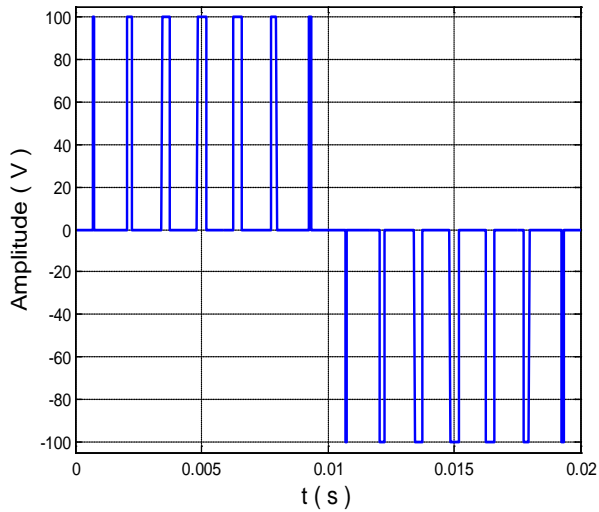
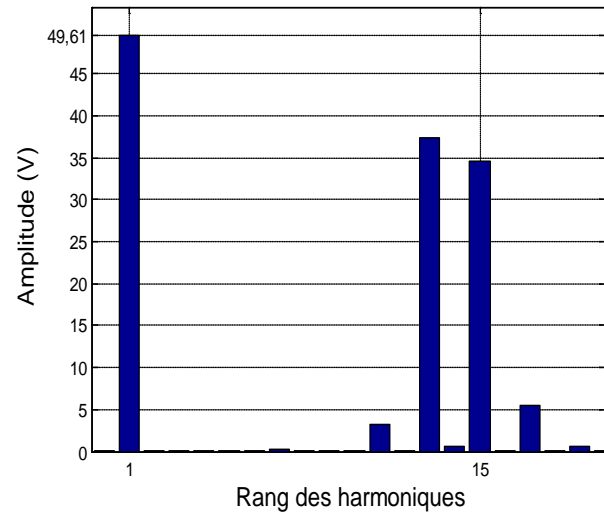
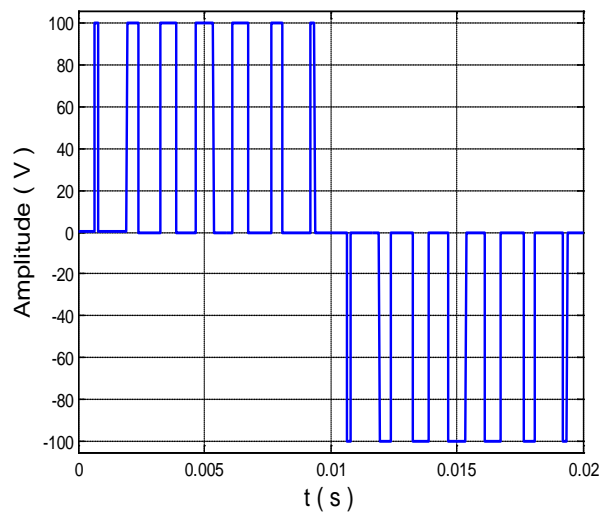


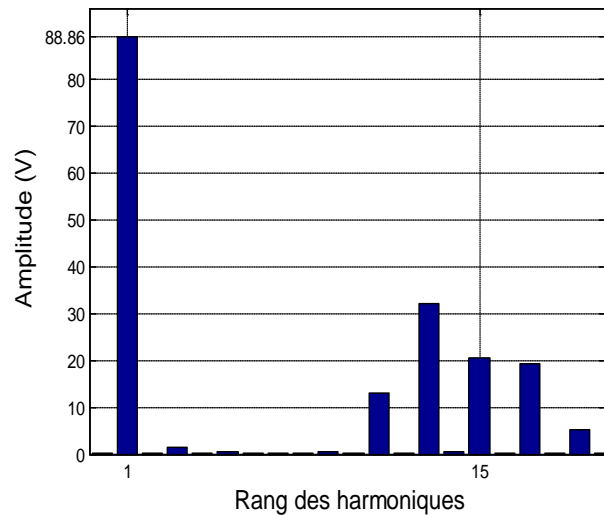
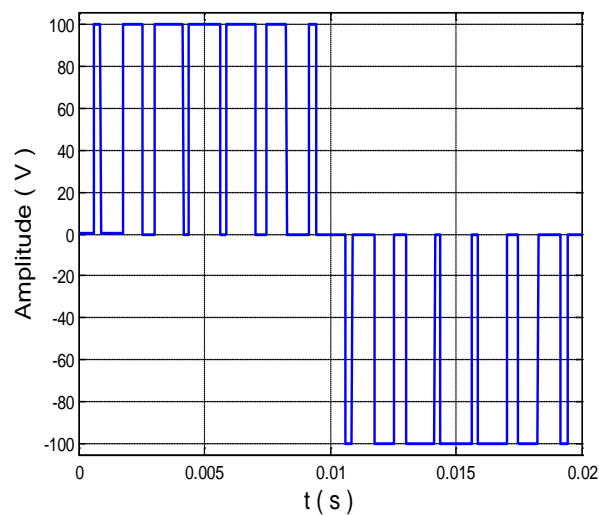
Figure (II.4) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$)



(a) : $r = 0.25$

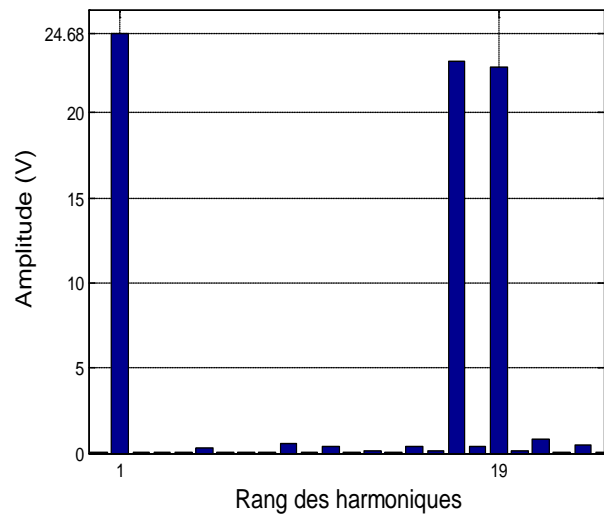
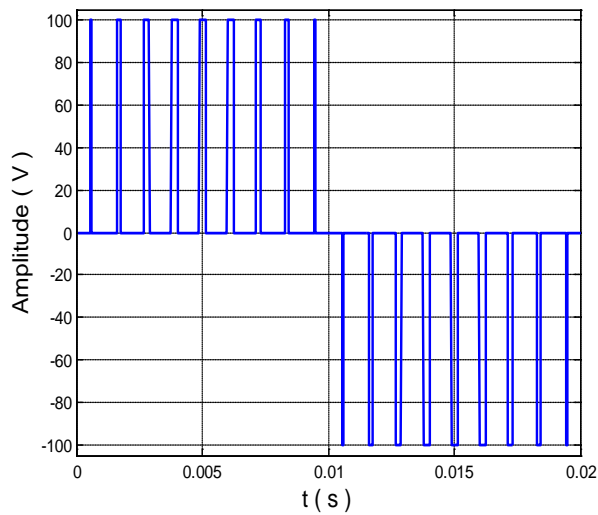


(b) : $r = 0.50$

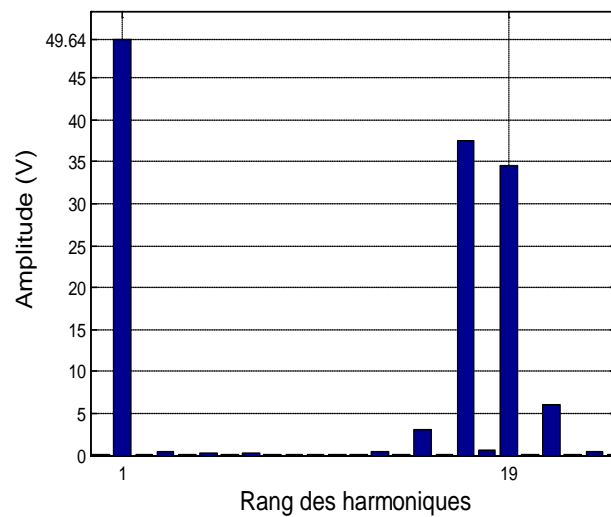
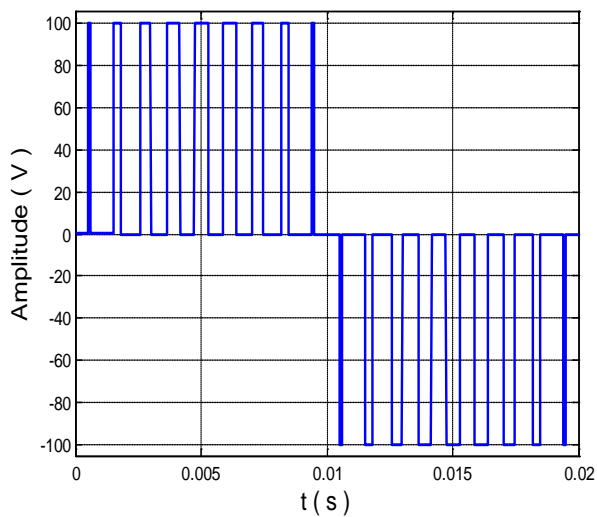


(c) : $r = 0.90$

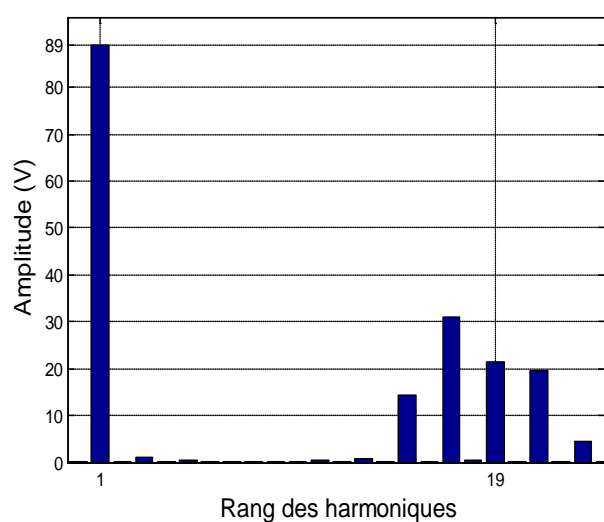
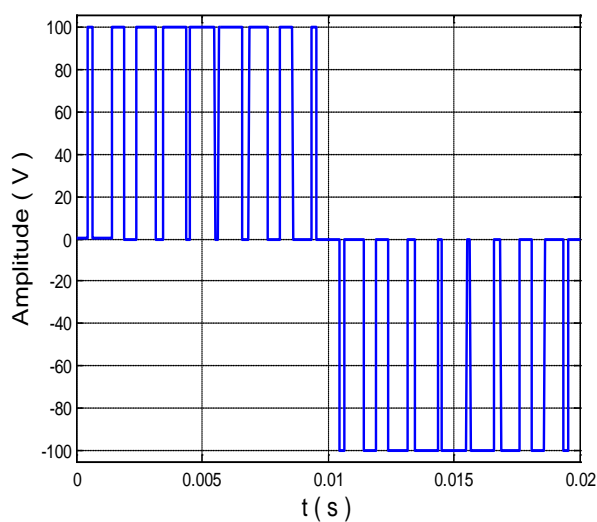
Figure (II.5) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$)



(a) : $r = 0.25$

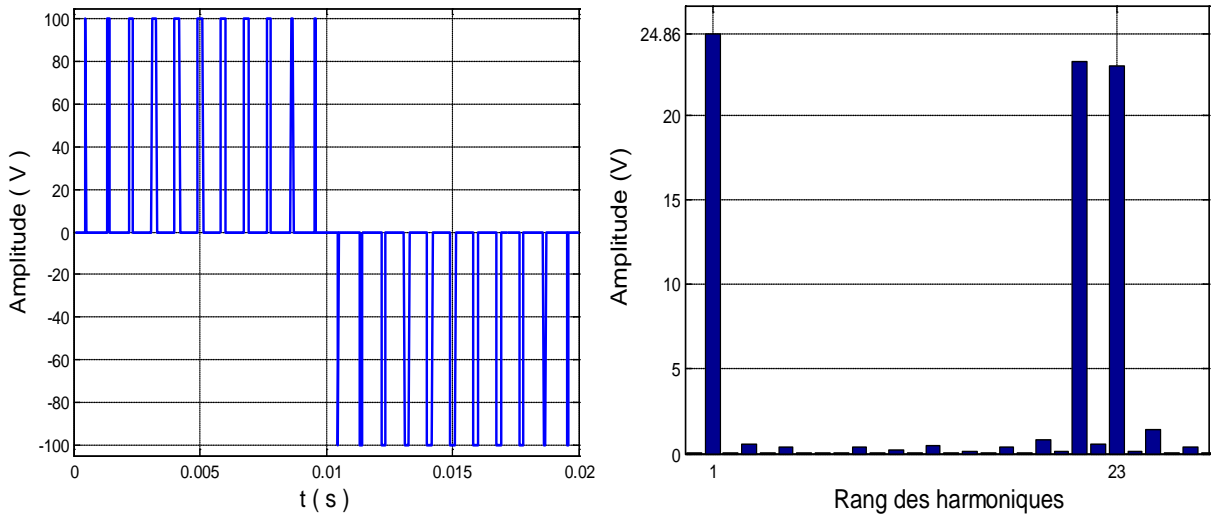


(b) : $r = 0.50$

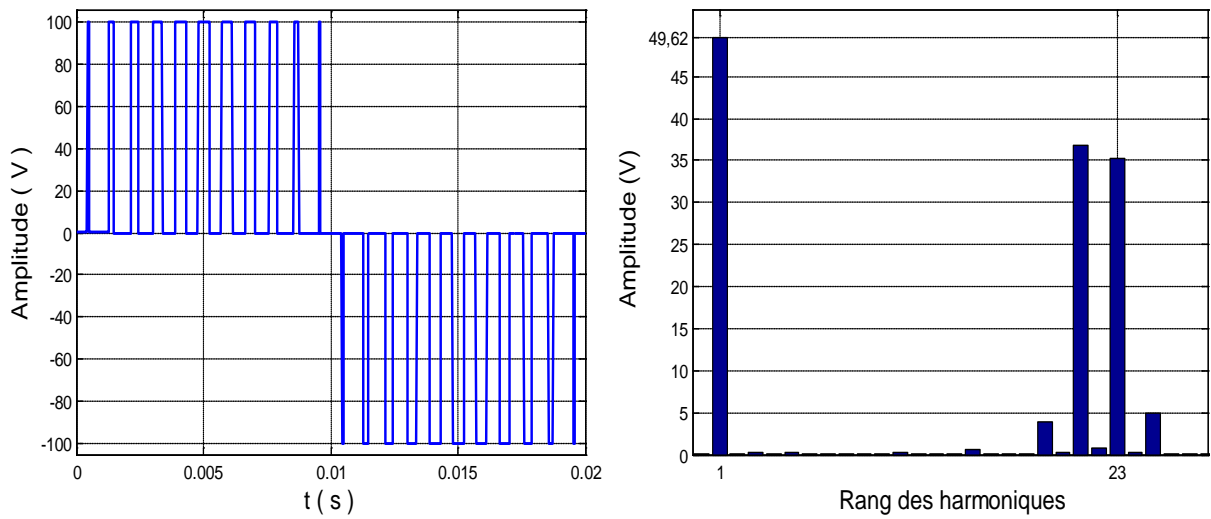


(c) : $r = 0.90$

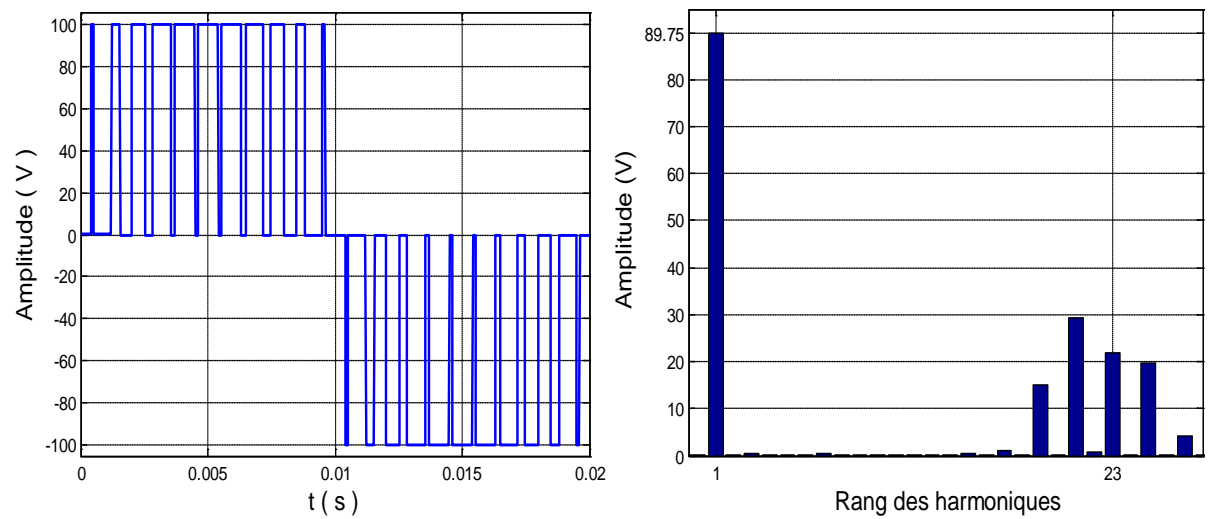
Figure (II.6) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$)



(a) : $r = 0.25$

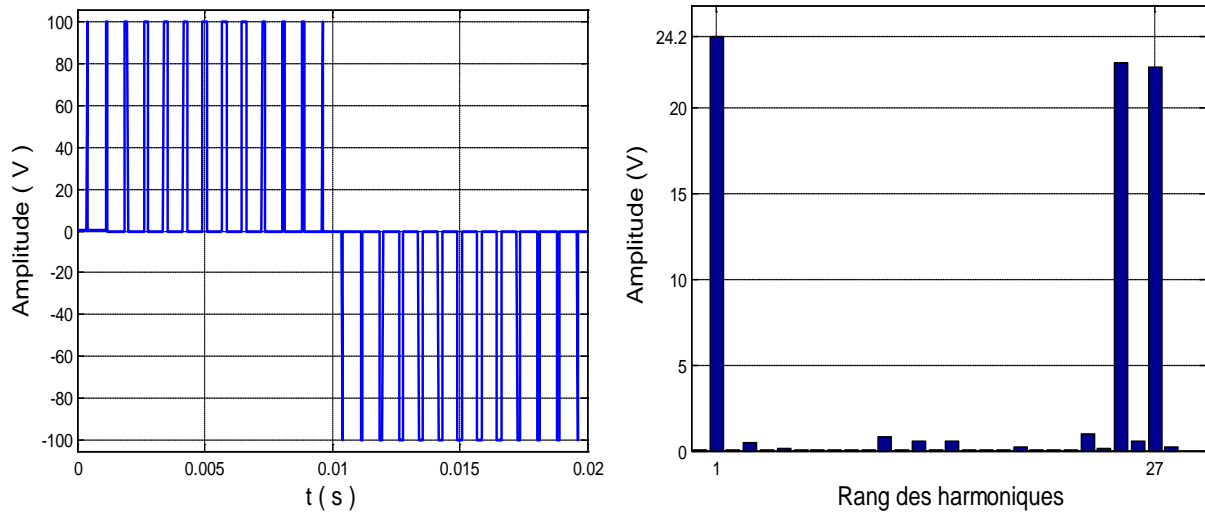


(b) : $r = 0.50$

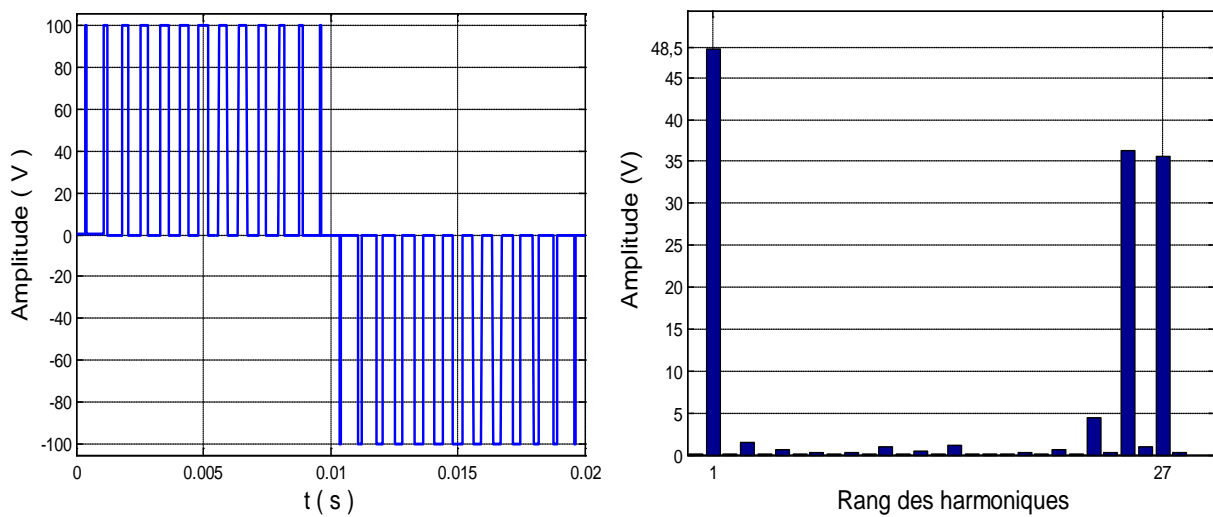


(c) : $r = 0.90$

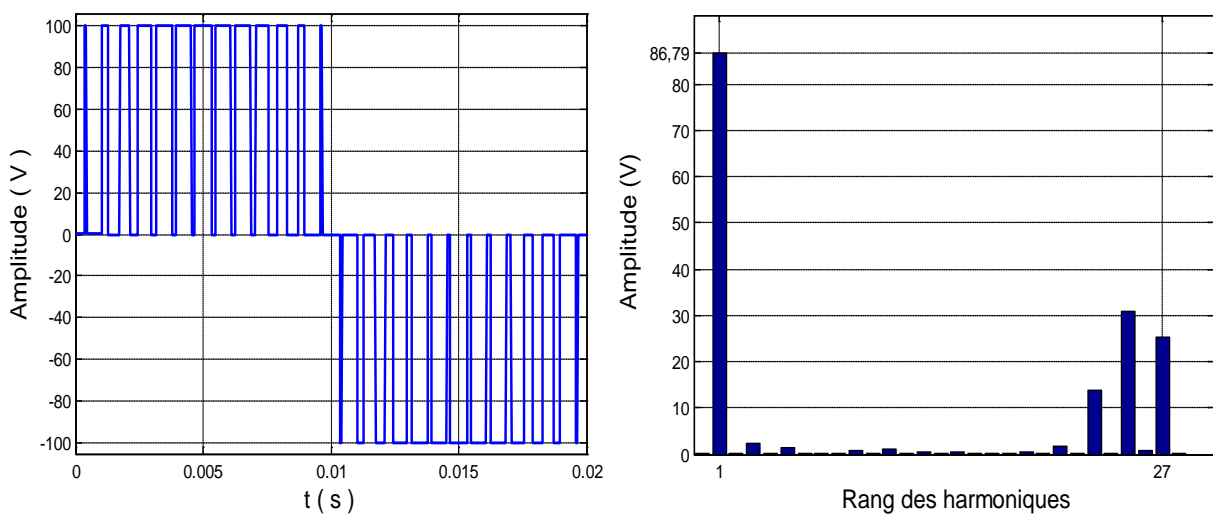
Figure (II.7) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 11$)



(a) : $r = 0.25$



(b) : $r = 0.50$



(c) : $r = 0.90$

Figure (II.8) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 13$)

D'après les résultats de simulation:

- On constate que l'amplitude du fondamental est égale à la valeur désirée.
- Avec $r = 0.25$, le premier harmonique non nul est de rang $2.N-1$, mais pour $r = 0.50$ ($r = 0.90$) le premier harmonique non nul est de rang $2.N-3$.

II.2 Technique 2

La technique 1 proposée par [Che-97] est améliorée par [Vil-05], cette technique permettant de déterminer les angles de commutation basés sur le centre de gravité de l'aire limitée par la sinusoïde et l'axe des abscisses pour chaque secteur.

En remplace le terme $\frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{2}$ par la coordonnée \bar{x}_i .

$$\bar{x}_i = \frac{\sin(\phi_{i+1}) - \phi_{i+1} \cdot \cos(\phi_{i+1}) - \sin(\phi_i) + \phi_i \cdot \cos(\phi_i)}{\cos(\phi_i) - \cos(\phi_{i+1})} \quad (\text{II.4})$$

Par conséquent, les angles de commutation sont donnés par les équations suivantes [Vil-05]:

$$\begin{cases} \alpha_{2i-1} = \bar{x}_i - \frac{\text{aire}_i}{2} \\ \alpha_{2i} = \bar{x}_i + \frac{\text{aire}_i}{2} \end{cases}, i = [1:3] \quad (\text{II.5})$$

Résultats de simulation

La variation des trajectoires des angles de commutation en fonction de r , sont présentés dans la figure (II.9) et (II.10)

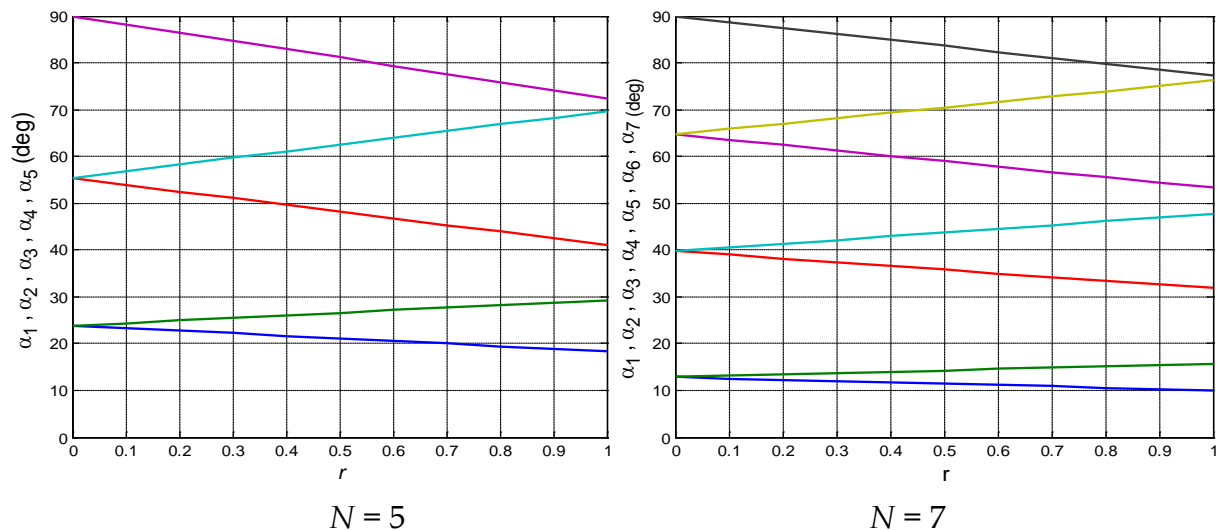
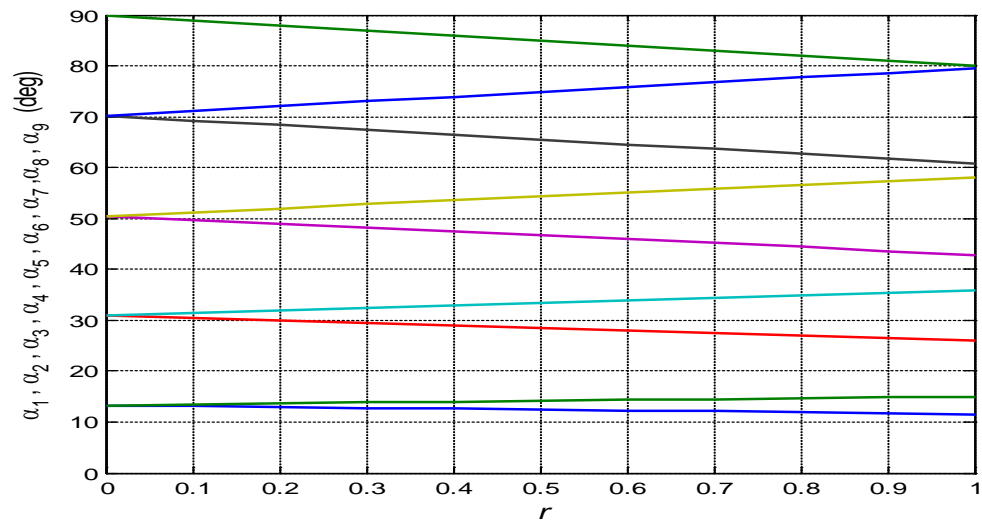
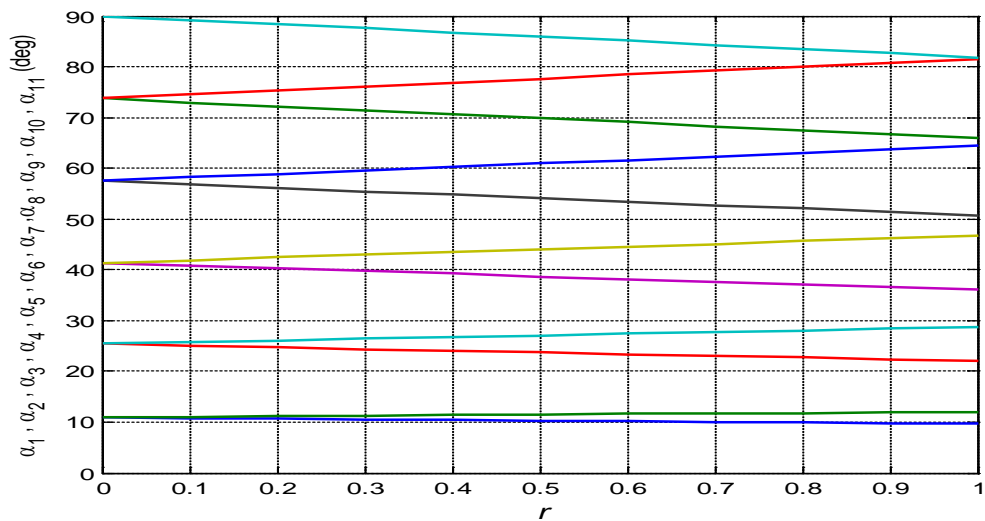


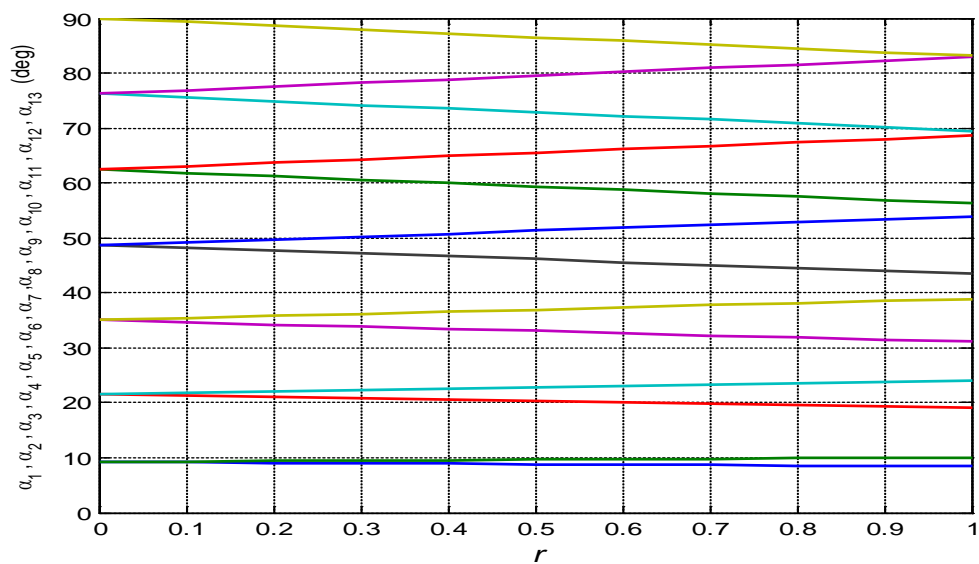
Figure (II.9) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r



$N = 9$



$N = 11$



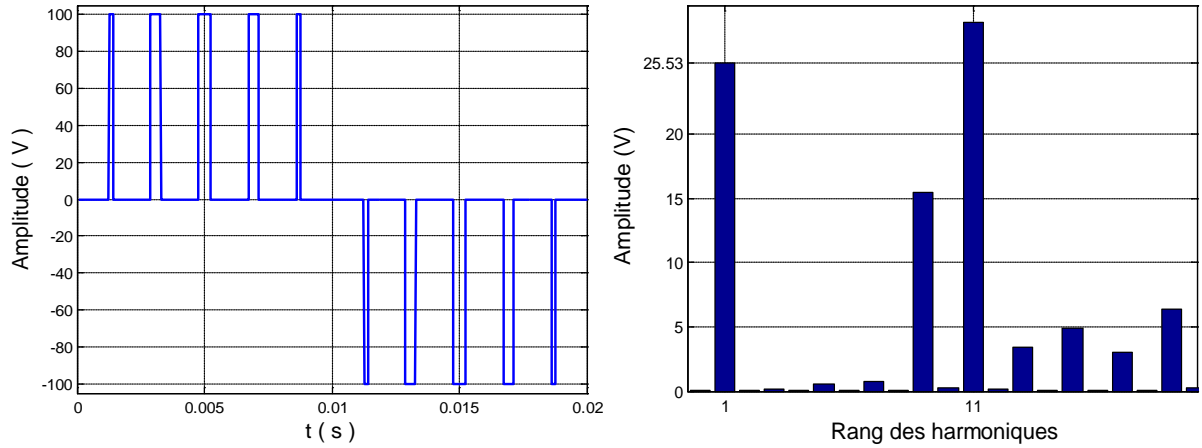
$N = 13$

Figure (II.10) : Trajectoire des angles de commutation en fonction de r

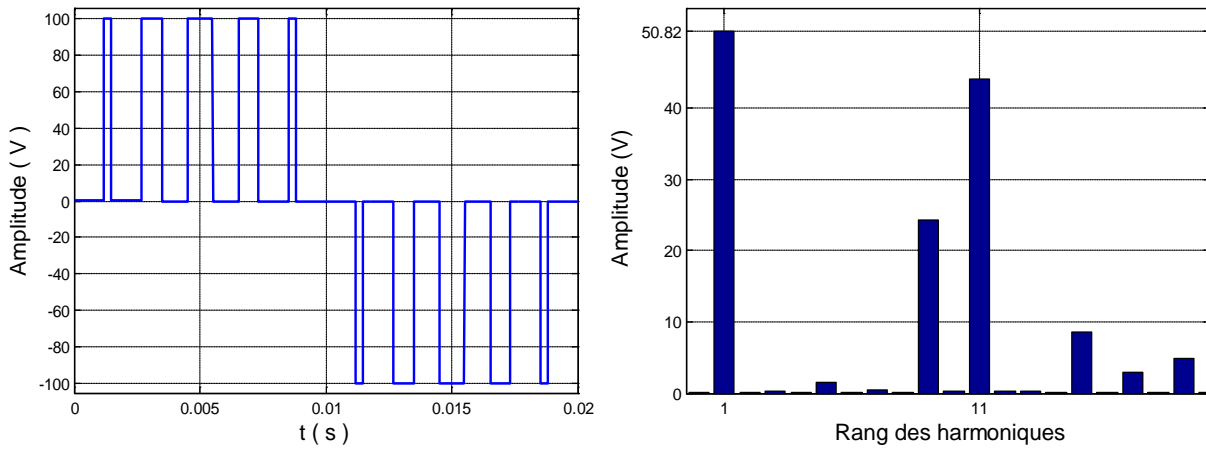
Chapitre II : Méthodes simplifiées pour le calcul des angles de commutation

La tension continue $E = 100\text{V}$, la fréquence de tension de sortie $f = 50\text{ Hz}$.

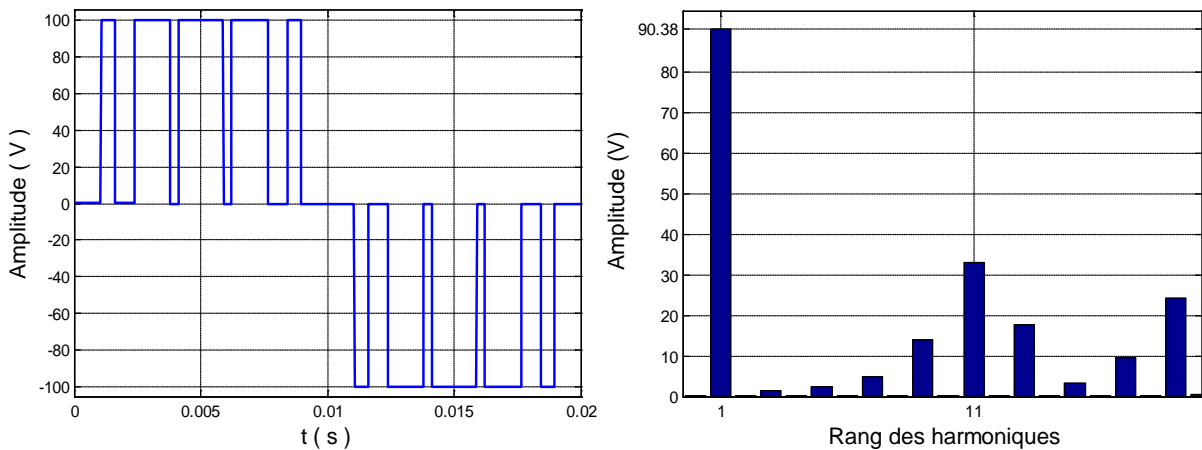
Les allures des différentes tensions et leurs spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (II.11), (II.12), (II.13), (II.14) et (II.15).



(a) : $r = 0.25$

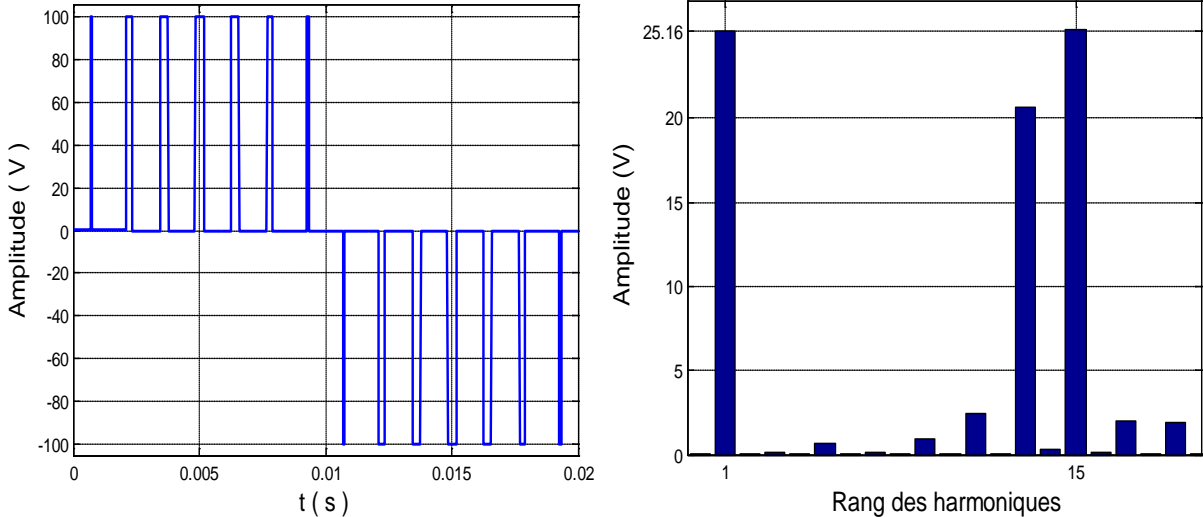


(b) : $r = 0.50$

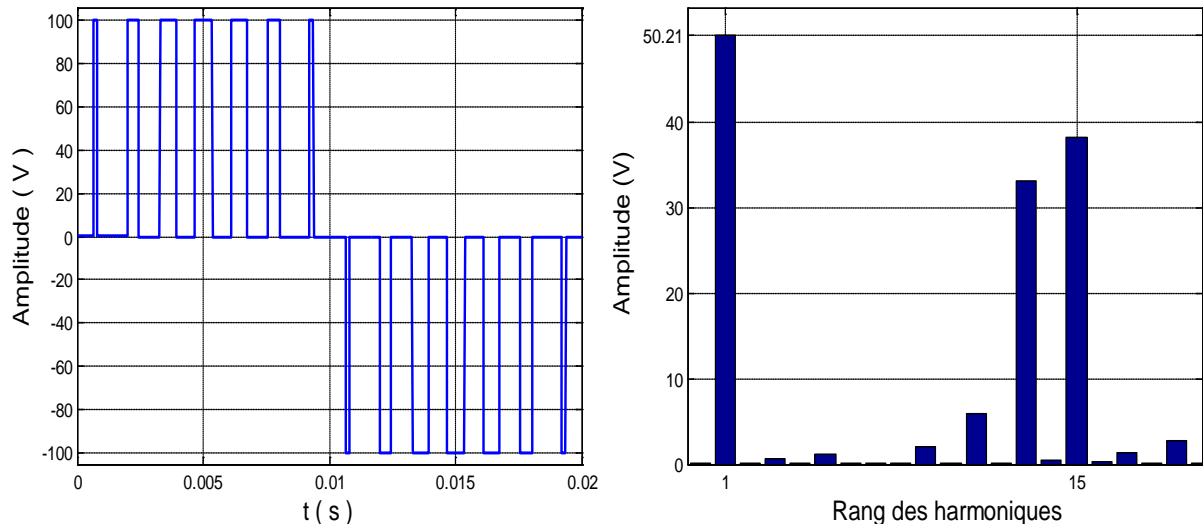


(c) : $r = 0.90$

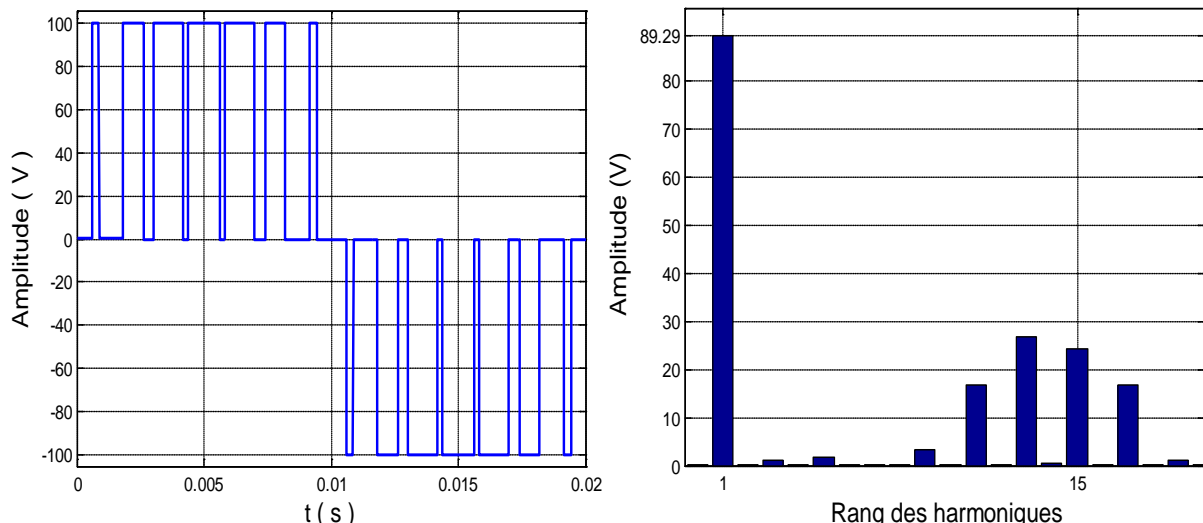
Figure (II.11) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 5$)



(a) : $r = 0.25$

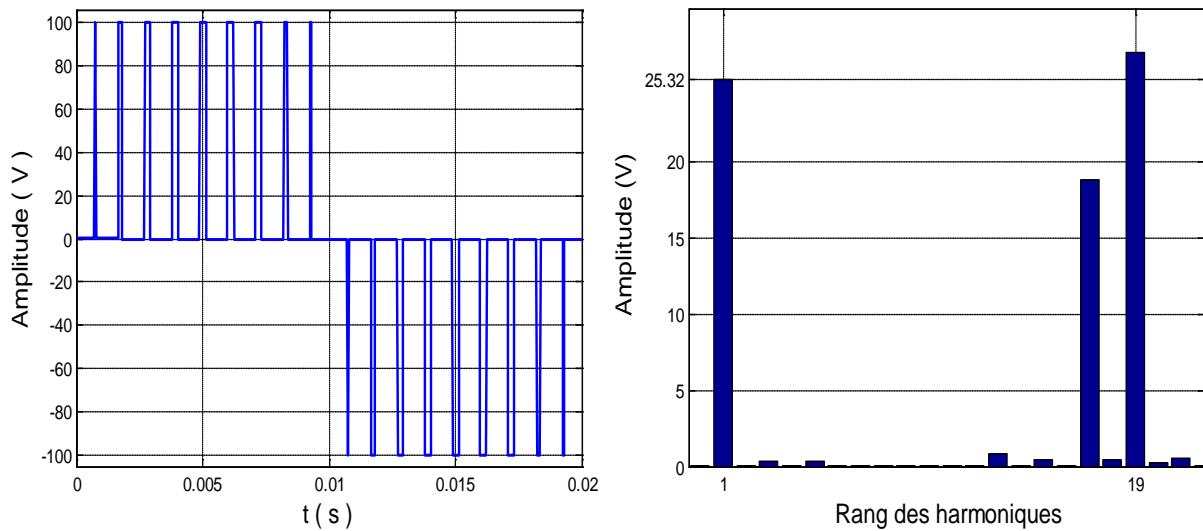


(c) : $r = 0.50$

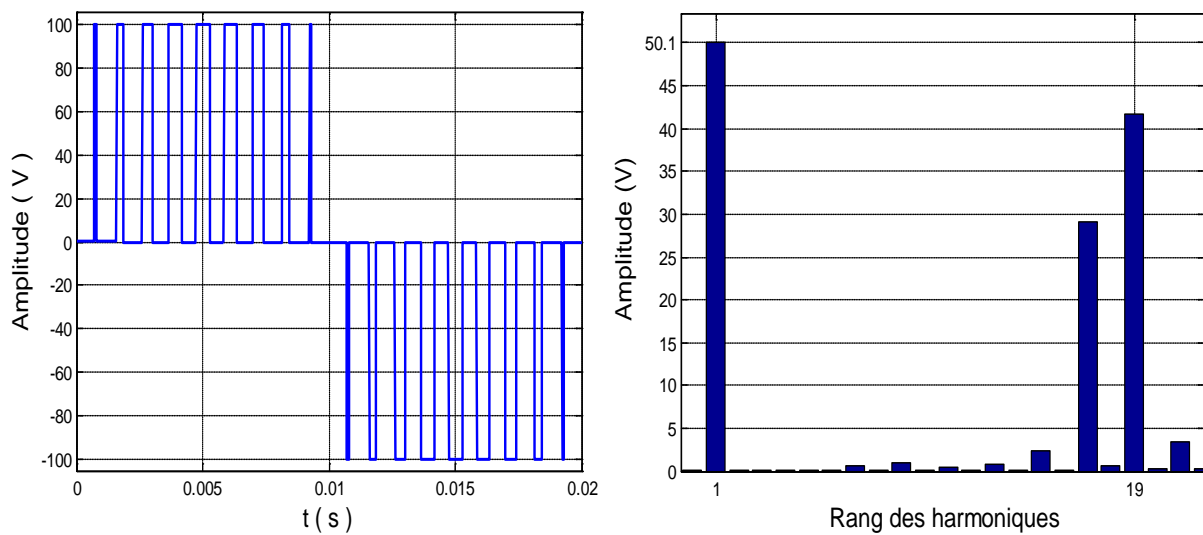


(c) : $r = 0.90$

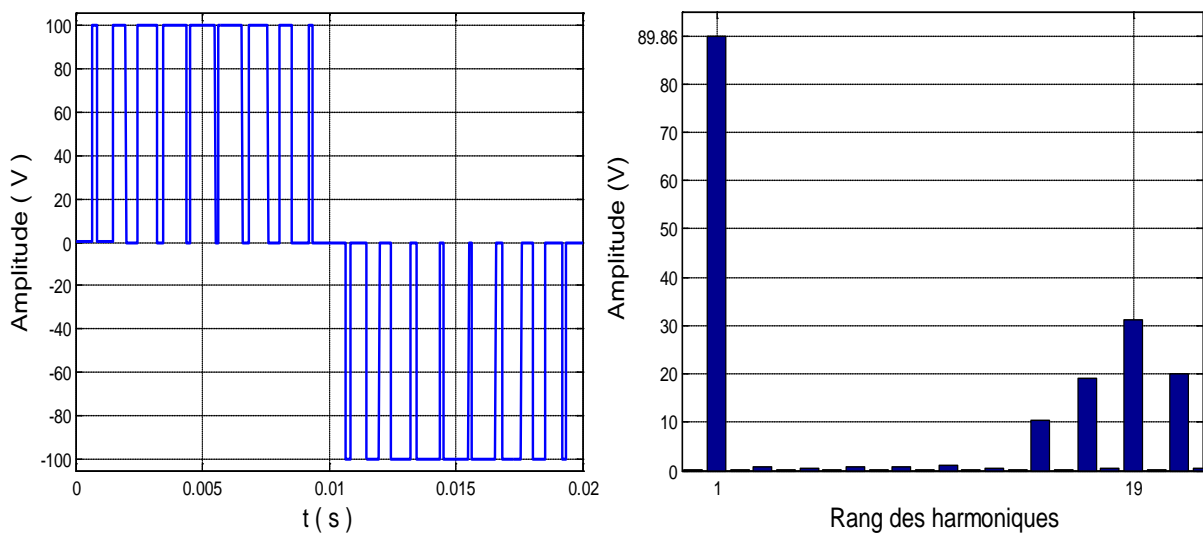
Figure (II.12) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$)



(a) : $r = 0.25$

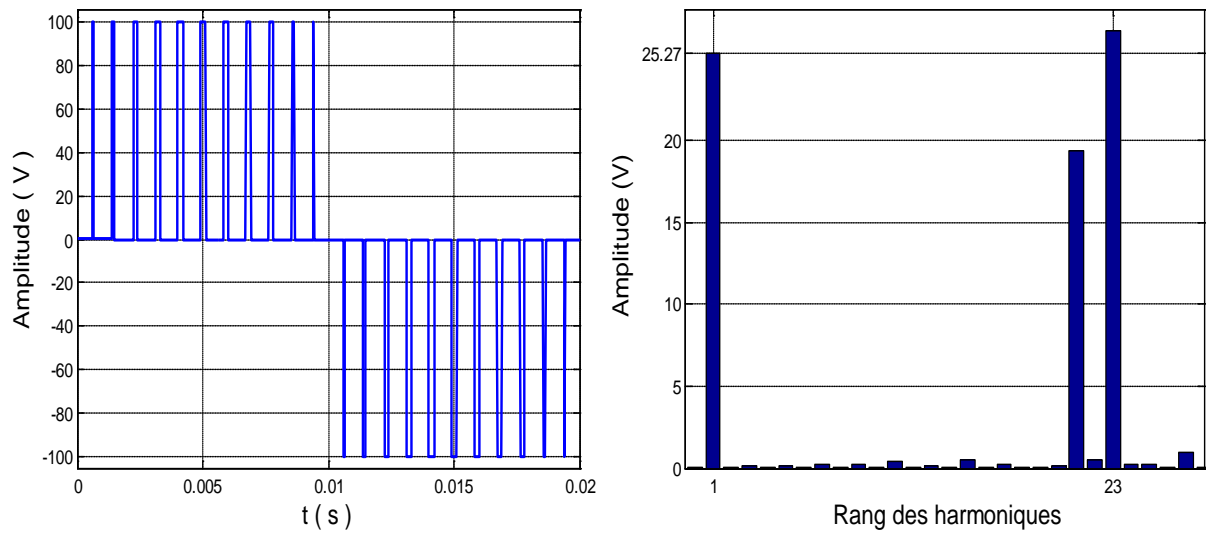


(b) : $r = 0.50$

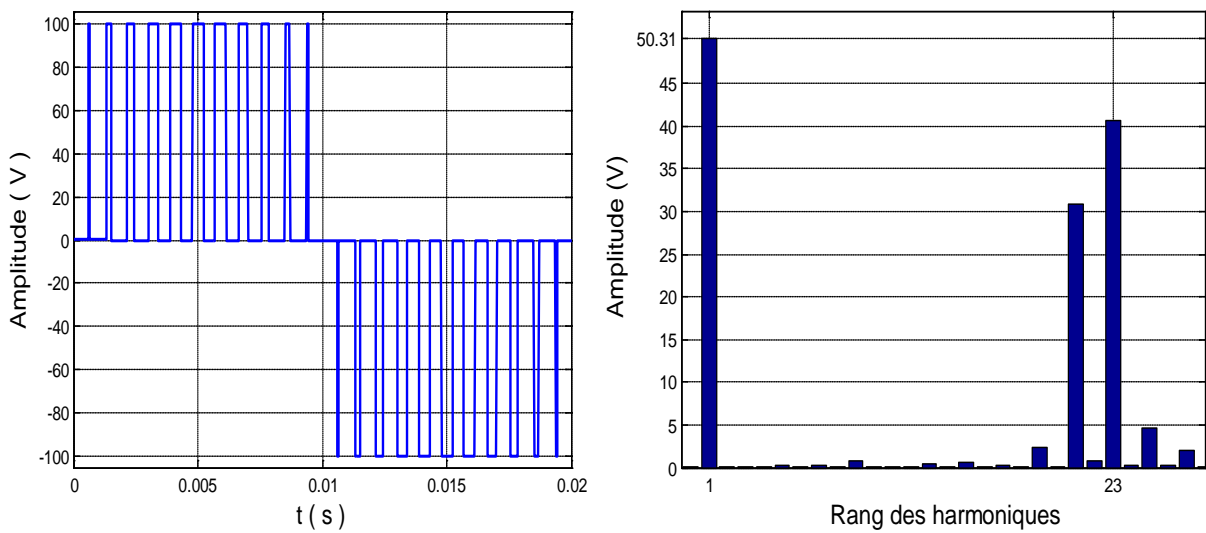


(c) : $r = 0.90$

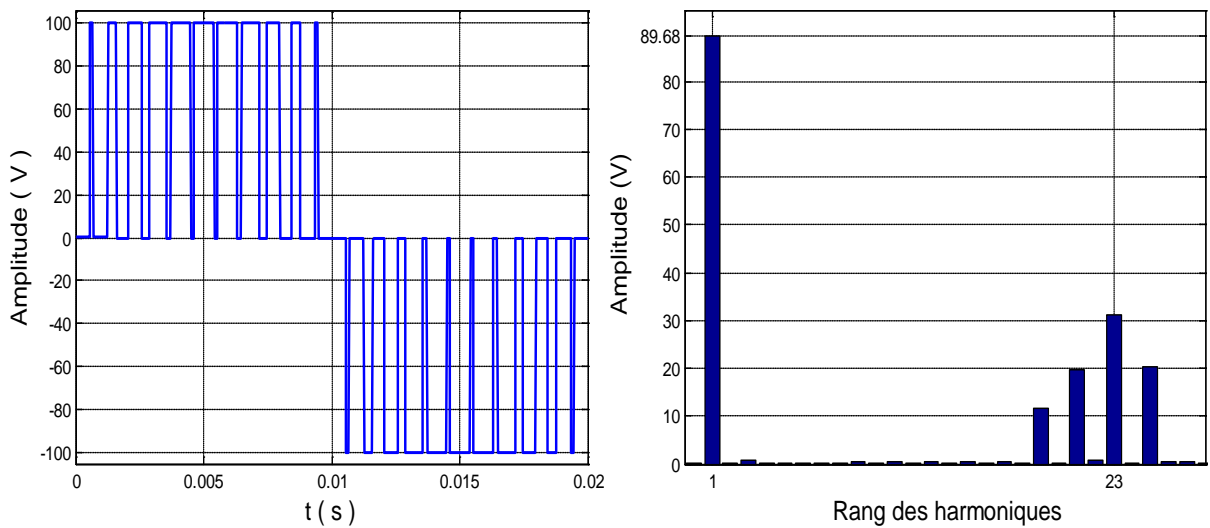
Figure (II.13) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 9$)



(a) : $r = 0.25$

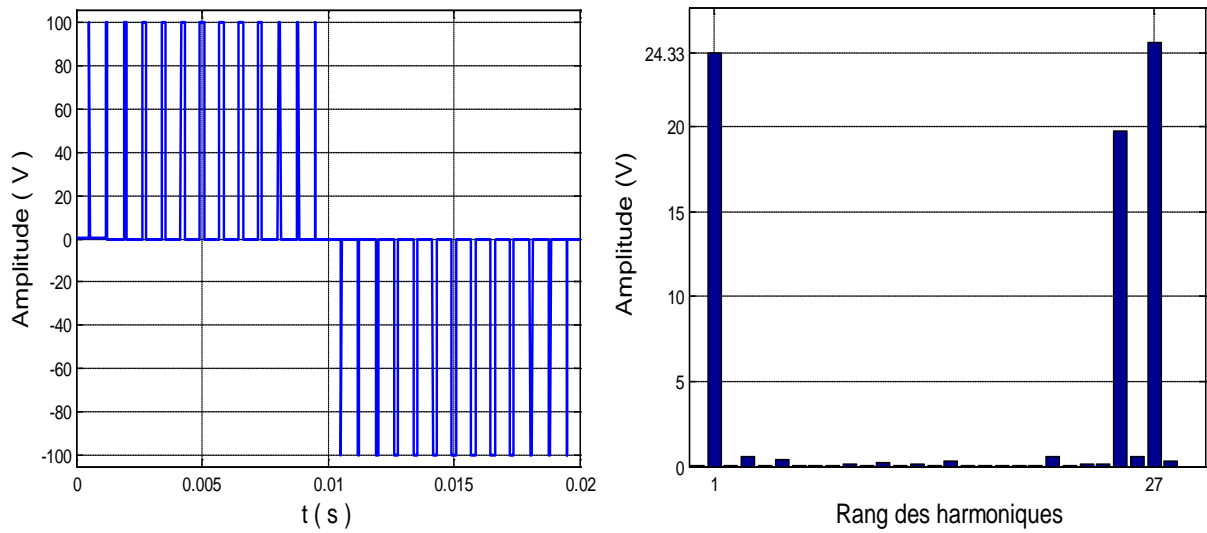


(b) : $r = 0.50$

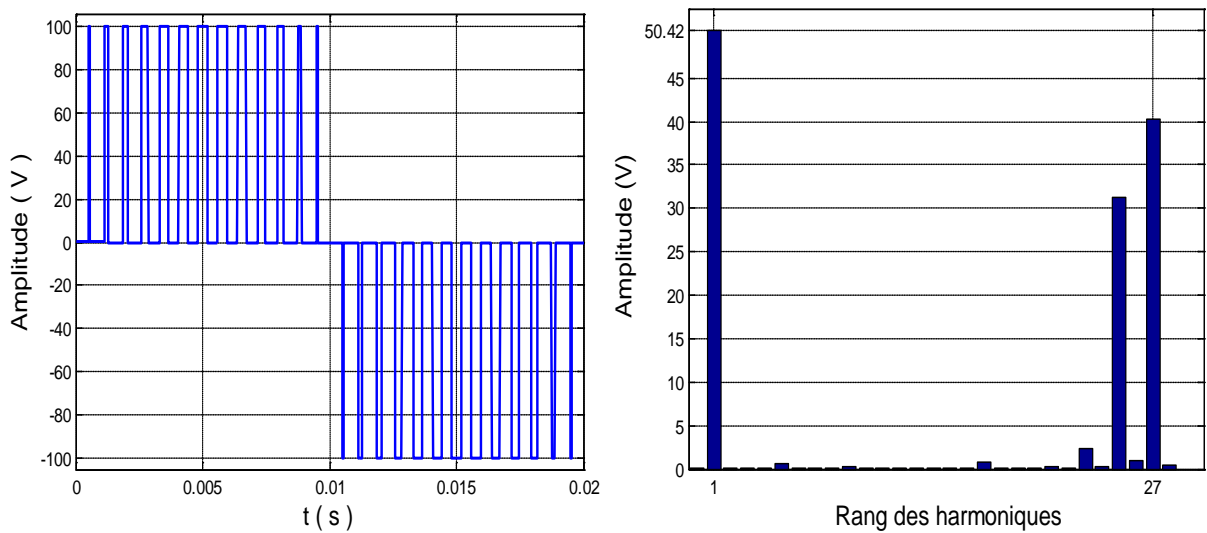


(c) : $r = 0.90$

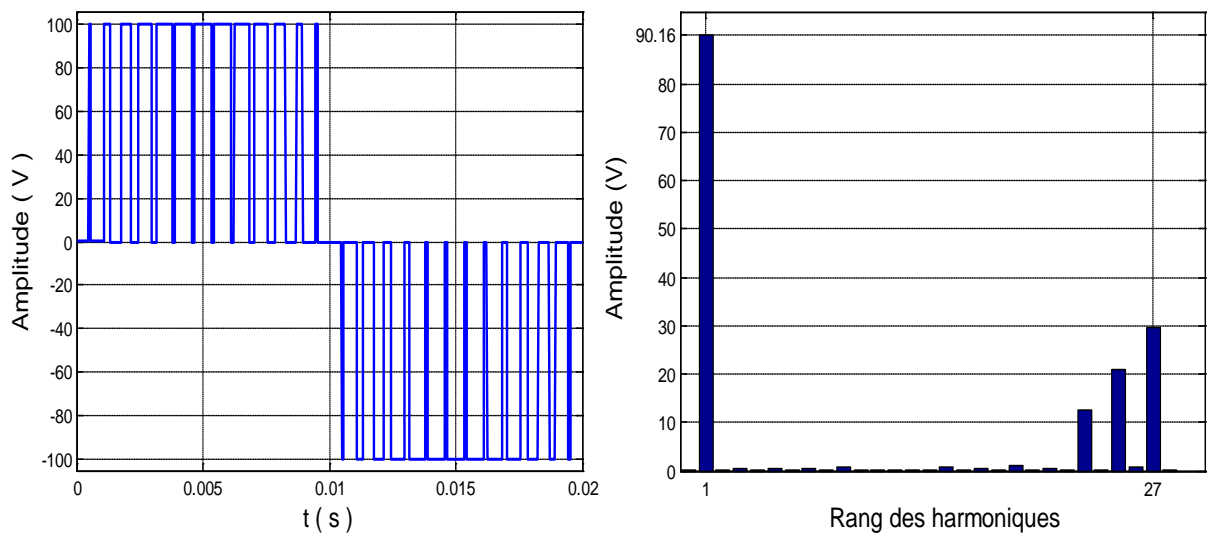
Figure (II.14) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 11$)



(a) : $r = 0.25$



(b) : $r = 0.50$



(c) : $r = 0.90$

Figure (II.15) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 13$)

D'après les résultats de simulation:

- On remarque que le fondamental prend sa valeur souhaité $r.E$.

On constate une amélioration notable aux niveaux des spectres d'harmoniques présentés dans les figures (II.11), (II.12), (II.13), (II.14) et (II.15) par rapport aux spectres des figures de la technique 1, mais l'harmonique de rang $2.N-1$ reste non nul.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudiés la MLI-ESH-S, la formulation mathématique de cette dernière est basée sur quelques équations simples. On remarque à partir des résultat de la technique 1 l'apparition des harmoniques de rang qui sont normalement nuls surtout l'harmonique du rang $2.N-1$ qui a une amplitude considérable, qui diminue avec l'augmentation du taux de modulation. Par contre la technique 2 donne une amélioration notable aux niveaux des spectres d'harmoniques par rapport aux spectres de la technique 1, mais l'harmonique $2.N-1$ reste non nul, pour l'amplitude du fondamental on peut conclure que cette dernière est égale a la valeur désirée.

Chapitre III

*Méthodes de
simplification des
trajectoires des
angles de commutation*

Introduction

D'autres méthodes sont basées sur la recherche d'une relation mathématique de la variation de trajectoire des angles en fonction de taux de modulation. La stratégie MLI-ESH à échantillonnage régulier (MLI-ESH-ER) est définie par des équations mathématiques sur des intervalles bien déterminés suivant les allures des trajectoires des angles de commutation obtenus par la MLI-ESH, cette technique est applicable pour une symétrie par rapport au quart et à la demi-période bipolaire avec un nombre pair d'harmoniques à éliminer [Bow-95], [Bow-99], [Bow-01], [Bow-06], par contre la technique MLI-ESH linéarisante (MLI-ESH-L) repose sur la linéarisation des trajectoires des angles de commutation obtenus pour la MLI-ESH par des équations du premier ordre et deuxième ordre, pour une symétrie par rapport au quart et à la demi-période unipolaire et un nombre impair d'harmoniques à éliminer [Azli-06].

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle mathématique, des différentes simplifications des trajectoires des angles de commutation calculés par la MLI-ESH.

III.1 La MLI-ESH à échantillonnage régulier (MLI-ESH-ER)

Le développement de cette technique s'appuie sur des remarques sur la variation des trajectoires des angles de commutation obtenus par la MLI-ESH, il est valable pour toute valeur de N impaire.

A partir de figure (I.10) on peut extraire les caractéristiques suivantes [Bow-95]:

- Les trajectoires des angles de commutation sont approximativement linéaires dans l'intervalle de variation de taux de modulation $[0, 0.95]$.
- Les trajectoires des angles de commutation avec indice impaire sont parallèles et ont des pontes négatives. Au contraire ceux qui ont un indice pair sont aussi parallèles mais avec des pentes positives.
- Pour la valeur du taux de modulation nulle, la différence entre deux paires des angles successives est donnée par la relation suivante :

$$T = \frac{2\pi}{2.N+1} \quad \text{(III.1)}$$

La formulation mathématique de cette stratégie est définie par les équations suivantes :

- ✓ Avec un indice impair des angles ($i = 1, 3, 5, \dots, N$)

$$\alpha_i = i \frac{T}{2} - M_1 \frac{T}{2} \sin\left(i \frac{T}{2} + \varphi_1\right) - A \frac{T}{2} \quad (\text{III.2})$$

Avec : $M_1 = \frac{r}{2}$, $\varphi_1 = \frac{T}{4}$, $A = 0.2 \cdot (1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot r}{2}\right))$

- ✓ Avec un indice pair des angles ($i = 2, 4, 6, \dots, N-1$)

$$\alpha_i = i \frac{T}{2} - M_2 \frac{T}{2} \sin\left(i \frac{T}{2} + \varphi_2\right) + B \frac{T}{2} \quad (\text{III.3})$$

Avec : $M_2 = 0.343 \cdot r$, $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$, $B = 0.145 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r}{1.4}\right)$

Résultats de simulation

A partir des équations (III.1), (III.2) et (III.3) les résultats correspondants à la mise en œuvre de la technique MLI-ESH-ER sont montrés dans la figure (III.1)

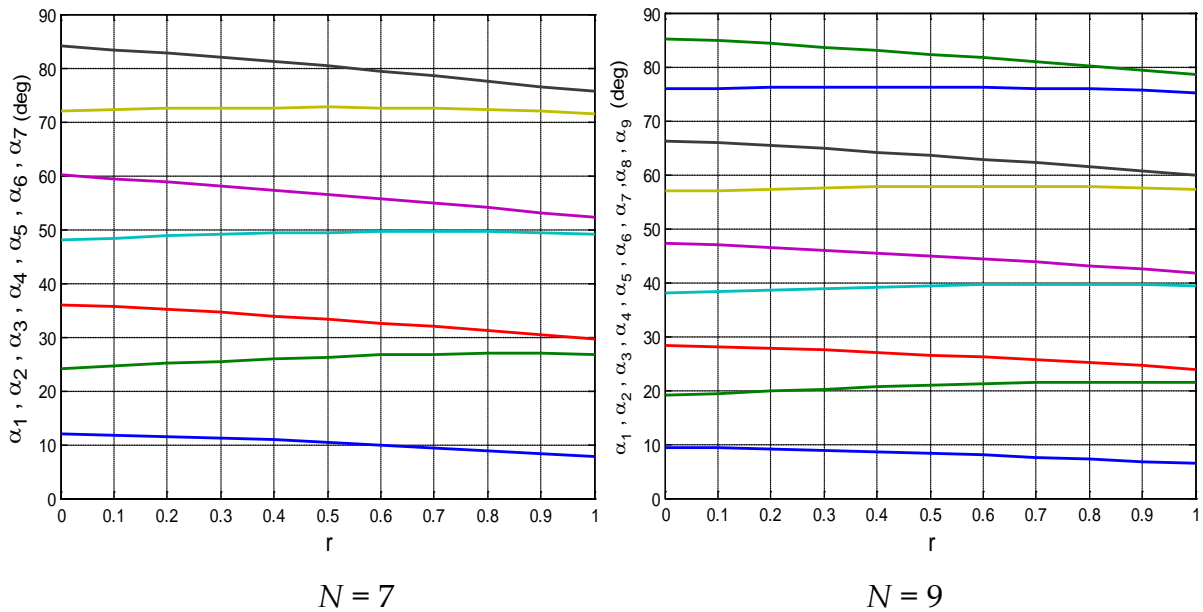
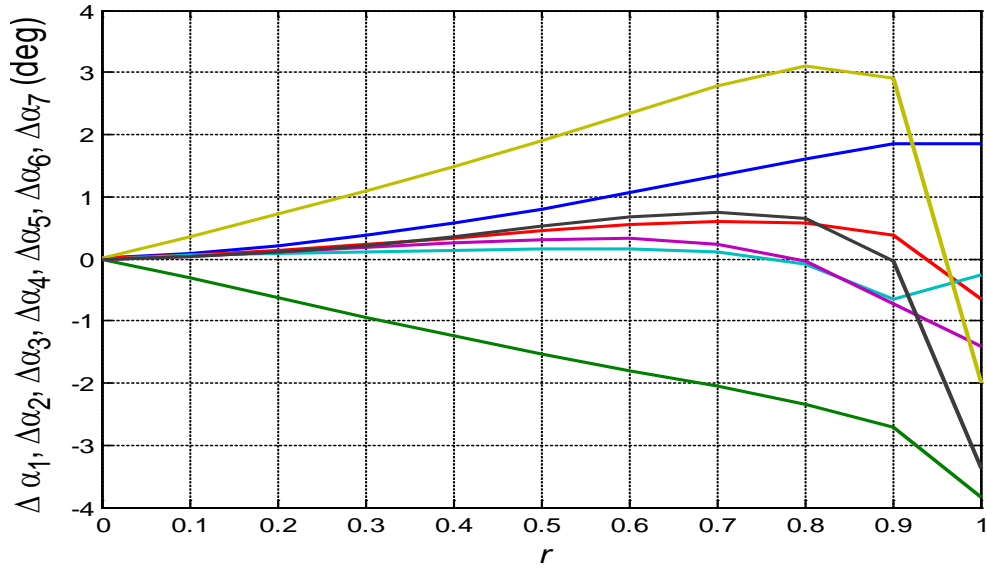
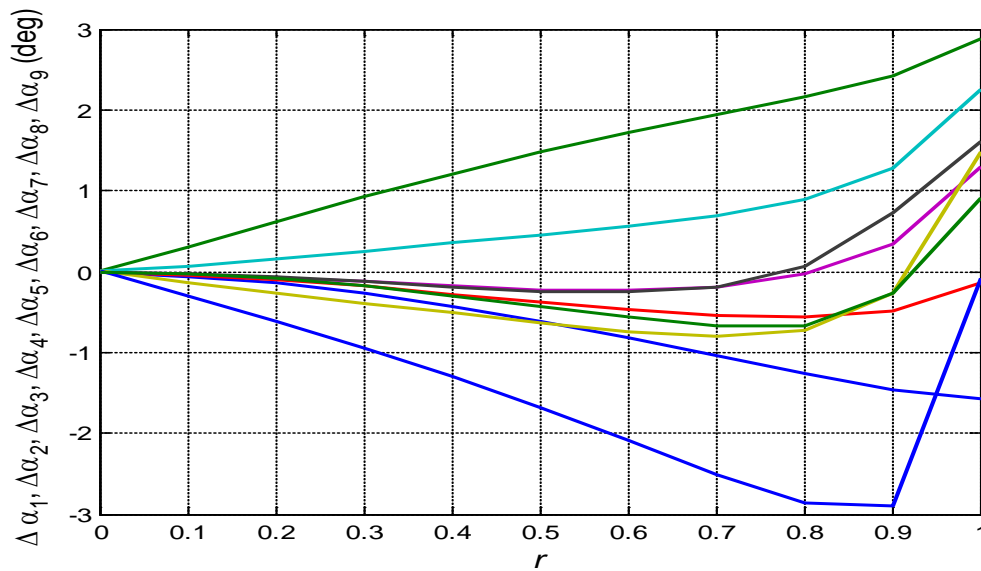


Figure (III.1) : Trajectoire des angles de commutation obtenus par la MLI-ESH-ER

L'erreur ($\Delta\alpha_i$) entre les valeurs des angles calculées par la technique MLI-ESH et MLI-ESH-ER.



$N = 7$



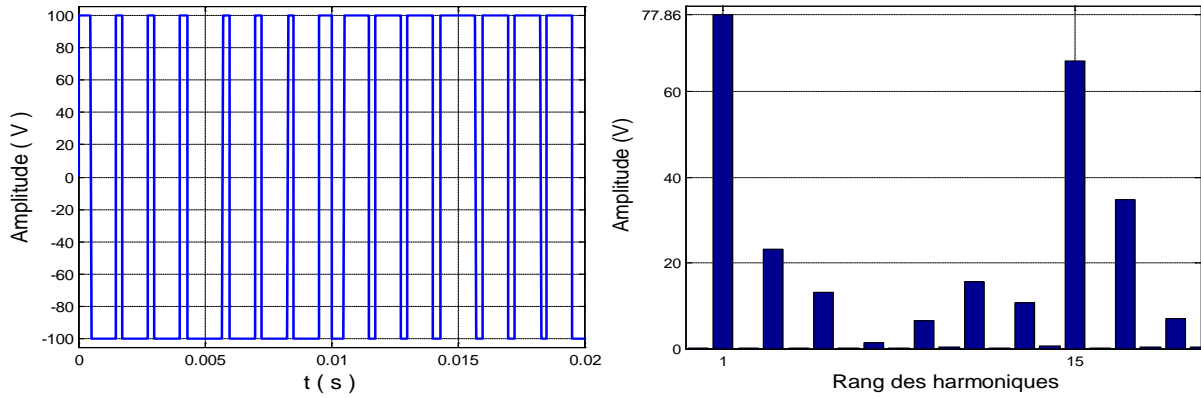
$N = 9$

Figure (III.2) : Erreur des angles de commutation

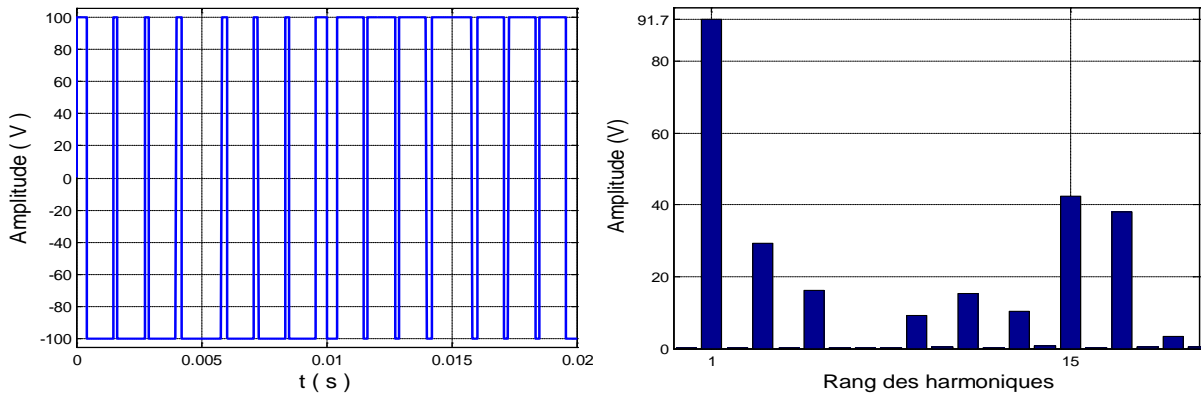
A partir de figure (III.2) on remarque bien que, l'erreur est variée dans l'intervalle $[-3, 3]$ degrés pour $r \in [0, 0.9]$. Par contre pour $r \in [0.9, 1]$ l'erreur atteint sa valeur maximale de - 4 degrés, donc on déduit que les approximations appliquées ne sont pas vraiment fiables surtout dans l'intervalle $[0.9, 1]$.

Pour voir l'effet de l'erreur des angles de commutation sur la forme du spectre d'harmoniques de la tension de sortie, on considère deux valeurs de taux de modulation. Les spectres sont présentés aux figures (III.3), (III.4) et (III.5).

La tension continue $E = 100 \text{ V}$, la fréquence de tension de sortie $f = 50 \text{ Hz}$.

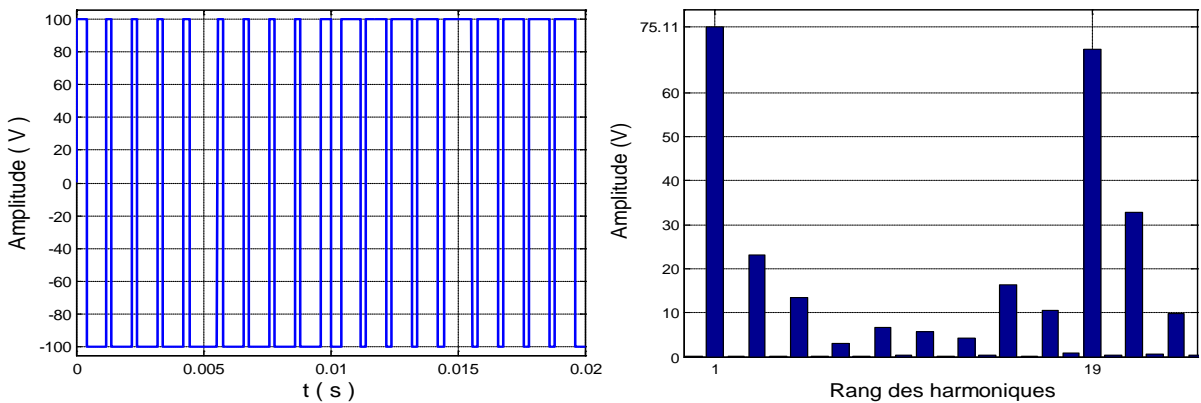


(a) : $r = 0.80$



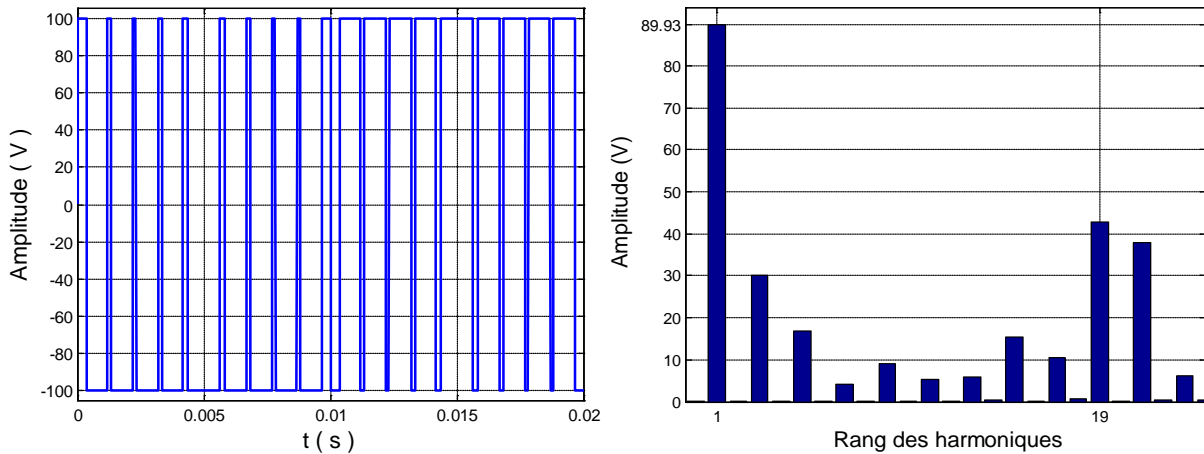
(b) : $r = 1$

Figure (III.3) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 7$)



(a) : $r = 0.80$

Figure (III.4) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 9$)



(b) : $r = 1$

Figure (III.5) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 9$)

D'après les résultats de simulation :

- Avec $N = 7$ et $r = 0.8$ ($r = 1$), l'amplitude du fondamental prend la valeur 77.86 V (91.7 V). À partir de figure (III.3) on constate que les harmoniques ciblées (3^{ème} jusqu'à 13^{ème}) restent non nuls et présentent une amplitude maximale de 30% par rapport à l'amplitude du fondamental.

- Avec $N = 9$ et $r = 0.8$ ($r = 1$), l'amplitude du fondamental prend la valeur 75.11 V (89.93 V). À partir des figures (III.4) et (III.5) on constate que les harmoniques ciblées (3^{ème} jusqu'à 17^{ème}) restent non nuls et présentent une amplitude maximale de 30% par rapport à l'amplitude du fondamental.

III.2 La MLI-ESH linéarisation (MLI-ESH-L)

La théorie de cette méthode est basée sur le développement des équations simples du premier ordre [Azli-06], dérivées de la linéarisation des trajectoires des angles de commutation présentées dans la figure (I.13).

Le développement de cette méthode consiste à exploiter les observations sur les allures de figure (I.13) comme première étape, on peut citer :

- ✓ Pour chaque trajectoire des angles de commutation on va divisée en deux intervalles adéquats, cette segmentation permet une représentation linéaire de ces trajectoires. La première segmentation pour $r \in [0, 0.85]$ et la deuxième pour $r \in [0.85, 1]$.

✓ Les trajectoires des angles de commutation qui ont un indice impair sont parallèles et ont des pentes négatives. Au contraire que ceux qui ont un indice pair qui sont aussi parallèles mais avec des pentes positives.

✓ Pour la valeur du taux de modulation nulle, la différence entre deux paires des angles successives est donnée par la relation suivante :

$$T = \frac{\pi}{N+1} \quad \text{(III.4)}$$

La deuxième étape est de présenter chaque trajectoire par une équation du premier ordre :

$$\alpha_k = a.r + b, \quad k = [1:N] \quad \text{(III.5)}$$

Les tableaux (III.1), (III.2), (III.3) et (III.4) donnent les valeurs numériques des coefficients a et b de l'équation (III.5). Le calcul de ces coefficients pour chaque trajectoire se fait à partir de la fonction Curve Fitting dans le logiciel MATLAB.

	$r < 0.85$		$r > 0.85$	
<i>Indice i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	-2.9765	16.4439	-5.27	18.33
3	-5.7250	32.8992	-10.82	37.09
5	-7.9698	49.3489	-17.14	56.92
7	-9.35.64	65.7756	-25.02	78.81
9	-9.4538	82.0476	-35.60	104.2
<i>Indice i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
2	1.1958	16.5241	-3.46	20.33
4	2.4780	33.0196	-7.53	41.26
6	3.9649	49.4348	-13.08	63.63
8	5.8213	65.7183	-21.10	88.56
10	7.9985	81.8184	8.57	81.34

Tableau (III.1) : Valeurs numériques des coefficients a et b (N = 10)

Indice i	$r < 0.85$		$r > 0.85$	
	a	b	a	b
1	-2.1910	13.9100	-4.0340	15.4300
3	-4.2530	27.8300	-8.2260	31.1000
5	-6.0410	41.7400	-12.7900	47.3100
7	-7.3860	55.6400	-18.0700	64.5000
9	-8.0820	69.4900	-24.6300	83.3800
11	-7.8990	83.2600	-32.9000	104.6000
Indice i	a	b	a	b
2	0.8459	13.9600	-2.5370	16.7300
4	1.7310	27.9100	-5.3740	33.7600
6	2.7090	41.8200	-8.9100	51.4500
8	3.8570	55.6700	-13.7400	70.4300
10	5.2530	69.4200	-20.1900	91.1200
12	6.7920	83.0800	7.2610	82.6800

Tableau (III.2) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 12$)

Indice i	$r < 0.85$		$r > 0.85$	
	a	b	a	b
1	-1.6830	12.06	-3.194	13.3
3	-3.2880	24.11	-6.476	26.74
5	-4.7280	36.17	-9.962	40.49
7	-5.9100	48.21	-13.82	54.77
9	-6.7270	60.24	-18.32	69.91
11	-7.0500	72.23	-23.84	86.38
13	-6.76.70	84.14	-30.34	104.3
Indice i	a	b	a	b
2	0.6249	12.09	-1.933	14.19
4	1.2720	24.17	-4.033	28.54
6	1.9690	36.24	-6.509	43.25
8	2.75.40	48.27	-9.661	58.61
10	3.6720	60.24	-13.88	75.04
12	4.7550	72.15	-19.04	92.52
14	5.9000	84.00	6.277	83.69

Tableau (III.3) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 14$)

Indice i	$r < 0.85$		$r > 0.85$	
	a	b	a	b
1	-1.3250	10.6300	-2.5920	11.6700
3	-2.6040	21.2700	-5.2370	23.04300
5	-3.7800	31.9000	-8.0020	35.3800
7	-4.7960	42.5300	-10.9800	47.6400
9	-5.5880	53.1400	-14.310	60.3900
11	-6.0850	63.7400	-18.2000	73.8900
13	-6.2100	74.3000	-22.8900	88.4200
15	-5.9060	84.8200	-28.0600	103.800
Indice i	a	b	a	b
2	0.4891	10.6500	-1.5230	12.3100
4	0.9865	21.3100	-3.1470	24.7100
6	1.5120	31.9500	-4.9920	37.3200
8	2.0860	42.5700	-7.2200	50.3000
10	2.7340	53.1700	-10.0600	63.8800
12	3.4830	63.7300	-13.7500	78.3100
14	4.3400	74.2400	-17.2200	93.3300
16	5.2200	84.7100	-5.5270	84.4500

Tableau (III.4) : Valeurs numériques des coefficients a et b ($N = 16$)

Dans le but de réduire le nombre d'équations (car chaque angle (a_k) est représenté par une équation), on va présenter les constantes a et b chacune par une seule équation en fonction des indices des angles (K). Il est préférable de présenter les coefficients a et b par des équations du deuxième ordre et du premier ordre respectivement pour un taux de modulation inférieur à 0.85, et par des équations de deuxième ordre pour un taux de modulation supérieur à 0.85 respectivement [Az1-06] :

$$a = d.k^2 + e.k + l \quad (III.6)$$

$$b = h.k + q, \quad b = h.k^2 + q.k + v \quad (III.7)$$

Chapitre III: Méthodes de simplification des trajectoires des angles de commutation

Les valeurs numériques des coefficients d , e , l , h , q et v pour les différentes valeurs de N sont résumées dans les tableaux (III.5), (III.6), (III.7) et (III.8)

N	Coefficients		
$r < 0.85$	d	e	l
10	0.1100464	-1.9296291	-1.0793990
12	0.0696106	-1.4263959	-0.7350828
14	0.0468942	-1.0989697	-0.5203273
16	0.0328576	-0.8698174	-0.3709166
$r > 0.85$	d	e	l
10	-0.2074048	-1.668593	-3.5827694
12	-0.1266383	-1.3206454	-2.8147927
14	-0.0820399	-1.0754506	-2.2760433
16	-0.5601594	-0.89242431	-1.8840180

Tableau (III.5) : Valeurs numérique des coefficients des angles des indices impair

N	Coefficients		
$r < 0.85$	d	e	l
10	0.0385333	0.3848488	0.2867169
12	0.0220435	0.2834859	0.2097356
14	0.0139540	0.2141497	0.1628913
16	0.0092283	0.1698528	0.1363938
$r > 0.85$	d	e	l
10	1.1608241	-13.4052245	22.0343197
12	0.6240102	-8.7400530	16.0760857
14	0.3616802	-6.0147772	2.2150204
16	0.2225960	-4.3258588	9.5927857

Tableau (III.6) : Valeurs numérique des coefficients des angles des indices pair

N	Coefficients		
$r < 0.85$	h	q	
10	8.2042333	8.2806310	
12	6.9376946	7.0201072	
14	6.0099450	6.0968365	
16	5.30155053	5.3791336	
$r > 0.85$	h	q	v
10	0.2747347	7.9291278	10.3635012
12	0.1707640	6.8042432	8.749127
14	0.1124617	5.9565599	5.5497686
16	0.0778055	5.2922308	6.62994072

Tableau (III.7) : Valeurs numérique des coefficients des angles des indices impair

N	Coefficients		
$r < 0.85$	h	q	
10	8.1638842	0.3170128	
12	6.9137648	0.2492214	
14	5.9946794	0.2086254	
16	5.2911726	0.1703916	
$r > 0.85$	h	q	v
10	-0.9594558	19.9788804	-18.6347156
12	-0.5147764	14.6469215	-13.6030285
14	-0.2974016	11.3341693	-10.3344734
16	-0.1823041	9.1424123	-8.1110660

Tableau (III.8) : Valeurs numérique des coefficients des angles des indices pair

A partir des résultats obtenue on peut présenter les coefficients d , e , l , h , q et v en fonction de N par des équations du deuxième ordre. On obtient une équation générale qui englobe toutes les variables :

Angles avec indices impairs

✓ Pour $r < 0.85$

$$\begin{aligned} \alpha_K = & [(0.0016499.N^2 - 0.0556129.N + 0.5007285).K^2 \\ & + (-0.0171300.N^2 + 0.6207245.N - 6.4199924).K \\ & + (-0.0121815.N^2 + 0.4337315.N - 4.1953445)].r \\ & + (0.0348811.N^2 - 1.3887076.N + 18.5972165).K \\ & + (0.0339263.N^2 - 1.3634722.N + 18.5161382) \end{aligned} \quad \text{(III.6)}$$

✓ Pour $r > 0.85$

$$\begin{aligned} \alpha_K = & [(-0.0034214.N^2 + 0.1138947.N - 1.0033324).K^2 \\ & + (-0.0103076.N^2 + 0.3966827.N - 4.6026316).K \\ & + (-0.0234969.N^2 + 0.8926711.N - 10.1556696)].r \\ & + (0.043321.N^2 - 0.14509050.N + 1.2913232).K^2 \\ & + (0.0287847.N^2 - 1.18632012.N + 16.90911770).K \\ & + (0.04348503.N^2 - 1.7505522.N + 23.5135636) \end{aligned} \quad \text{(III.7)}$$

Angles avec indices pairs :

✓ Pour $r < 0.85$

$$\begin{aligned} \alpha_K = & [(0.0007352.N^2 - 0.0239169.N + 0.2039250).K^2 \\ & + (0.0035666.N^2 - 0.1284484.N + 1.3123212).K \\ & + (0.0031552.N^2 - 0.1069268.N + 1.0399720)].r \\ & + (0.0341632.N^2 - 1.3651064.N + 18.3928471).K \\ & + (0.0018473.N^2 - 0.0720541.N + 0.8515772) \end{aligned} \quad \text{(III.8)}$$

✓ Pour $r > 0.85$

$$\begin{aligned} \alpha_K = & [(0.024858.N^2 - 0.8001616.N + 6.6690673).K^2 \\ & + (-0.1860158.N^2 + 6.3345800.N - 58.1042658).K \\ & + (+0.2084999.N^2 - 7.4802823.N + 75.94442303)].r \\ & + (-0.02059886.N^2 + 0.663011937.N - 5.5234375).K^2 \\ & + (0.19626261.N^2 - 6.8939358.N + 69.2470669).K \\ & + (-0.1755174.N^2 + 6.30542963.N - 64.1013648) \end{aligned} \quad \text{(III.9)}$$

Résultats de simulation

La variation des trajectoires des angles de commutation en fonction de r , sont présentés à la figure (III.6).

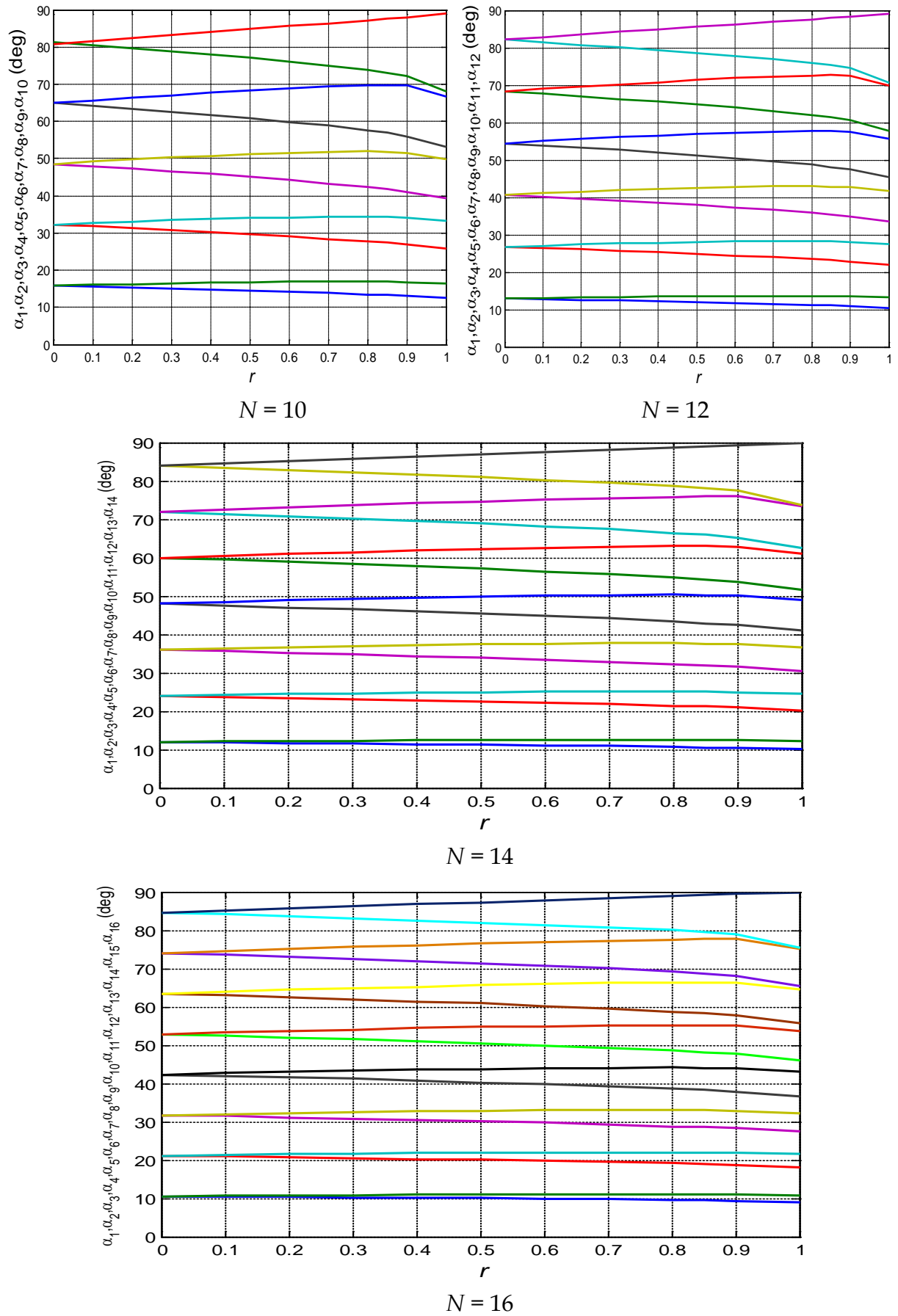
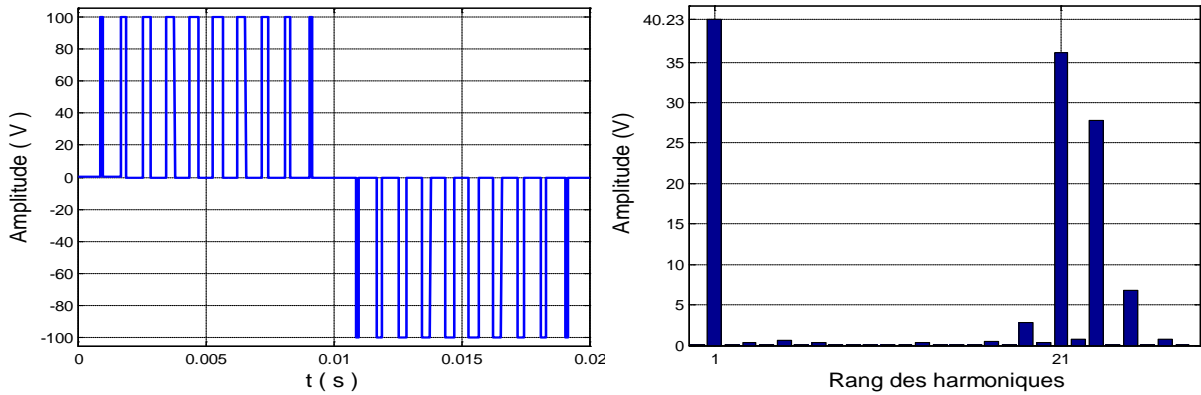


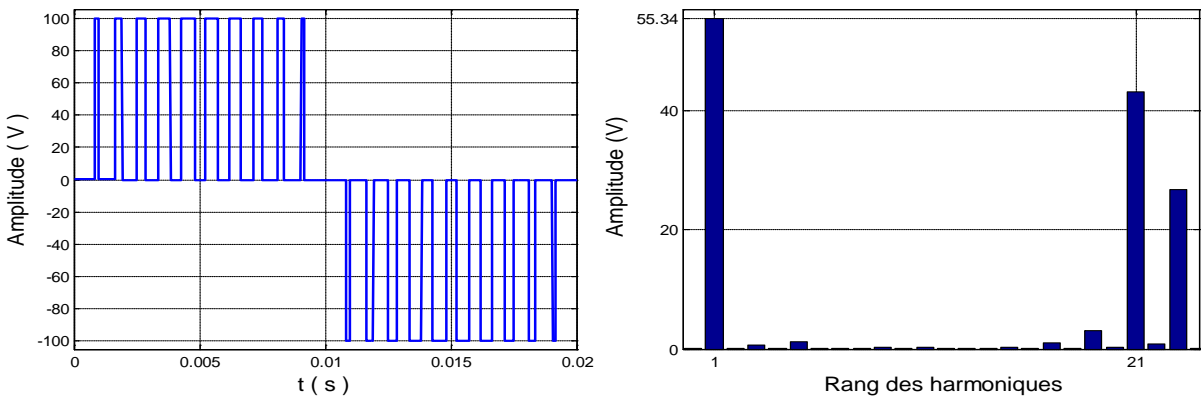
Figure (III.6) : Angles de commutation obtenus par la MLI-ESH-L

La tension continue $E = 100V$, la fréquence de tension de sortie $f = 50$ Hz

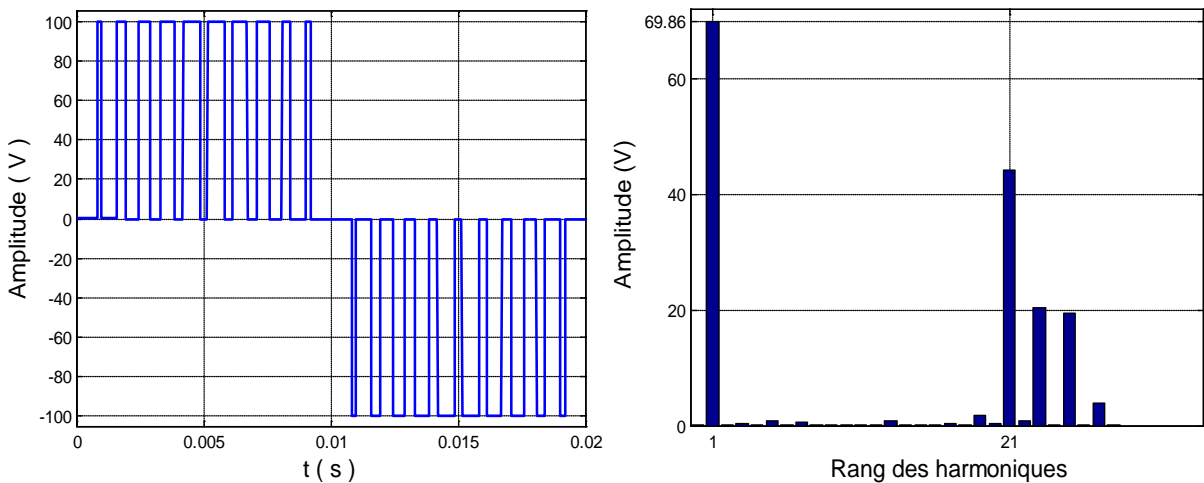
Les allures des différentes tensions et leurs spectres d'harmoniques sont illustrés aux figures (III.7), (III.8), (III.9), (III.10), (III.11), (III.12), (III.13) et (III.14).



(a) : $r = 0.40$



(b) : $r = 0.55$



(c): $r = 0.70$

Figure (III.7) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N=10$)

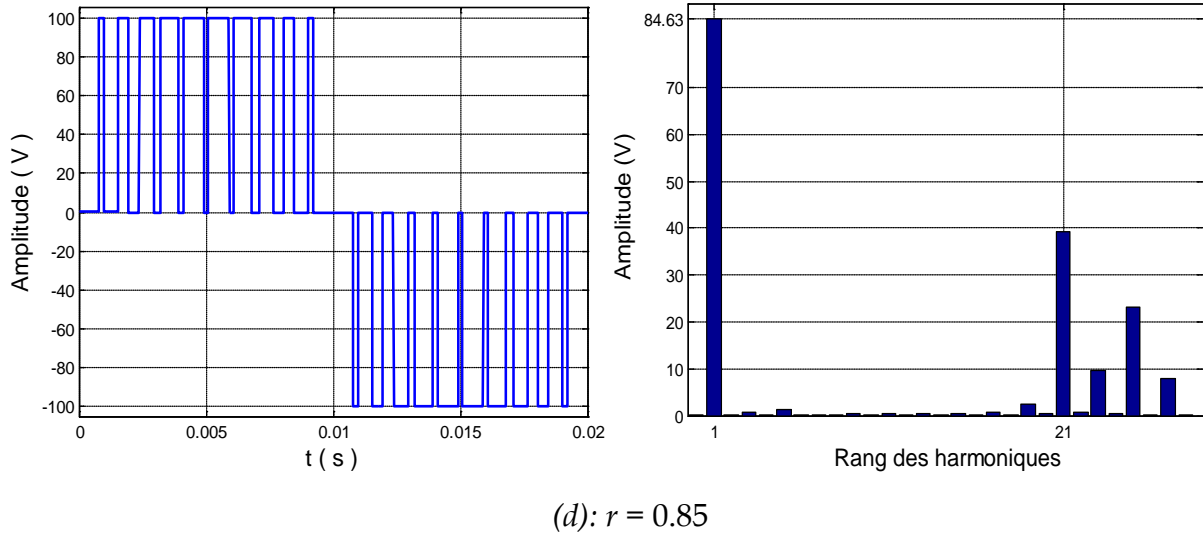


Figure (III.8) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 10$)

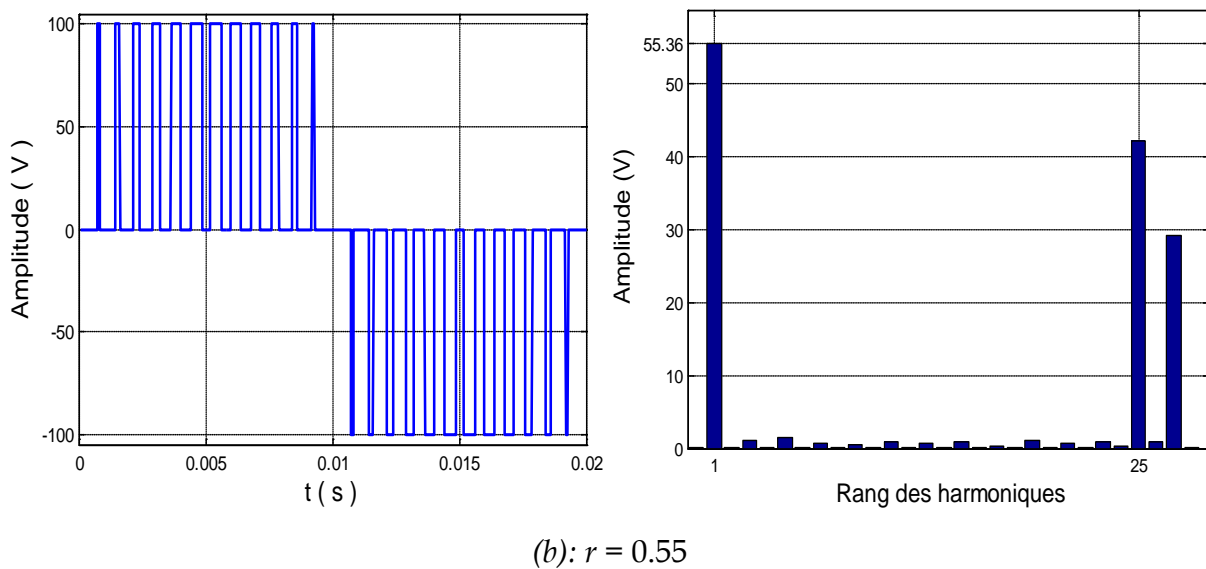
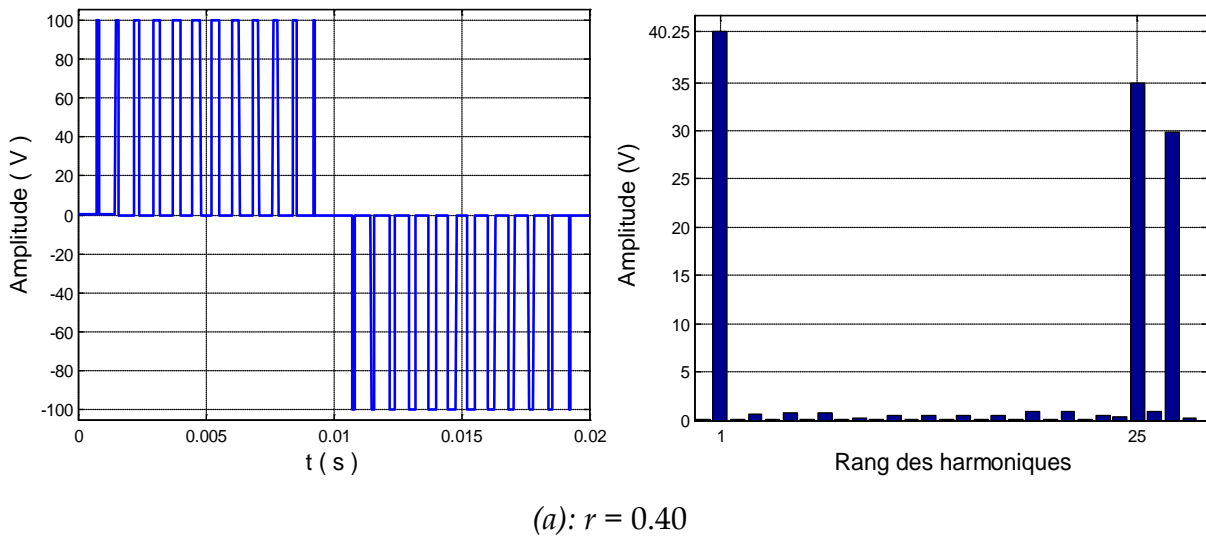
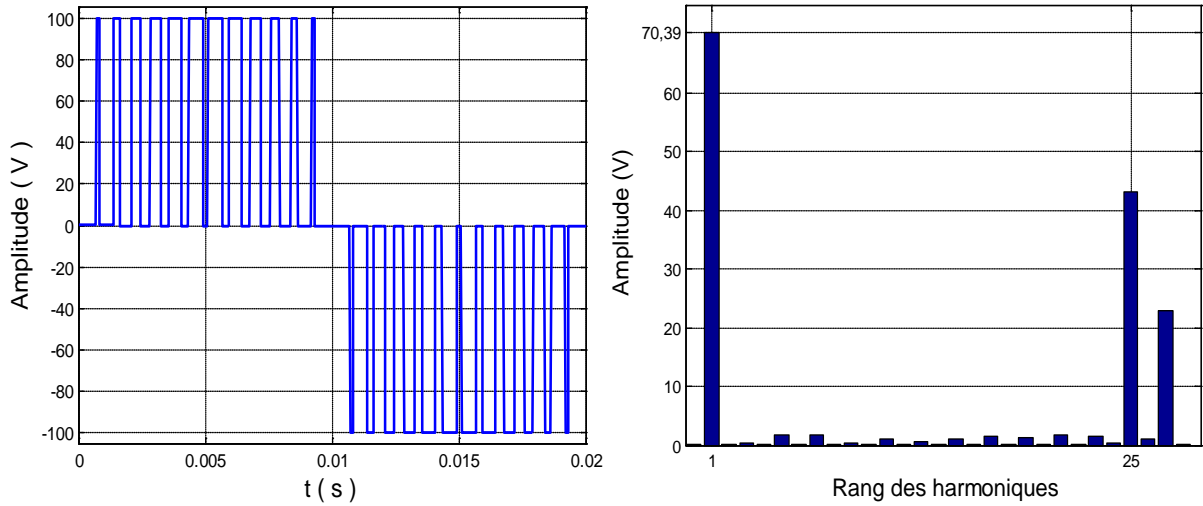
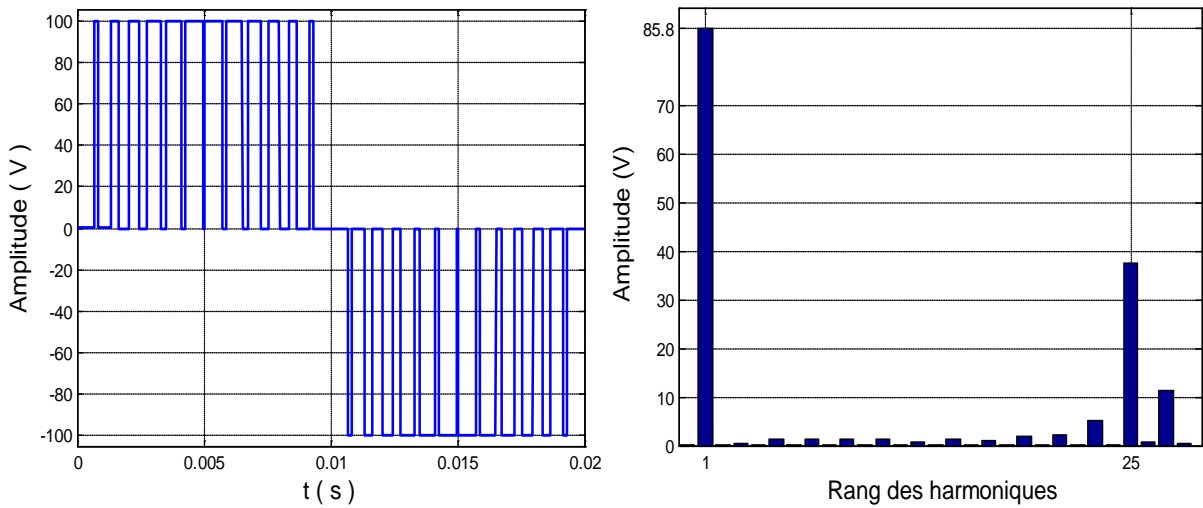


Figure (III.9) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 12$)

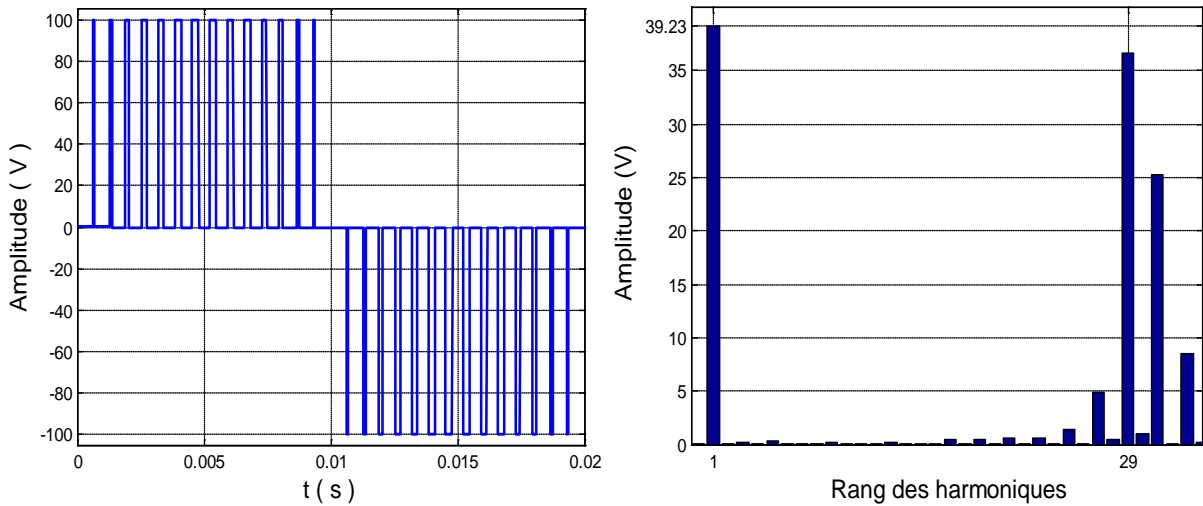


(c): $r = 0.70$



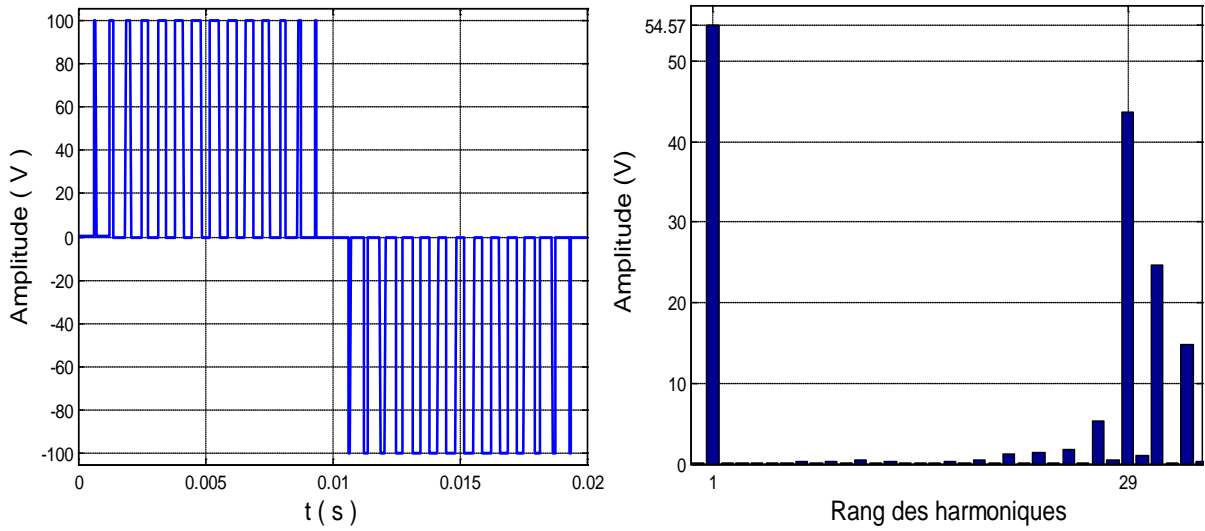
(d): $r = 0.85$

Figure (III.10) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 12$)

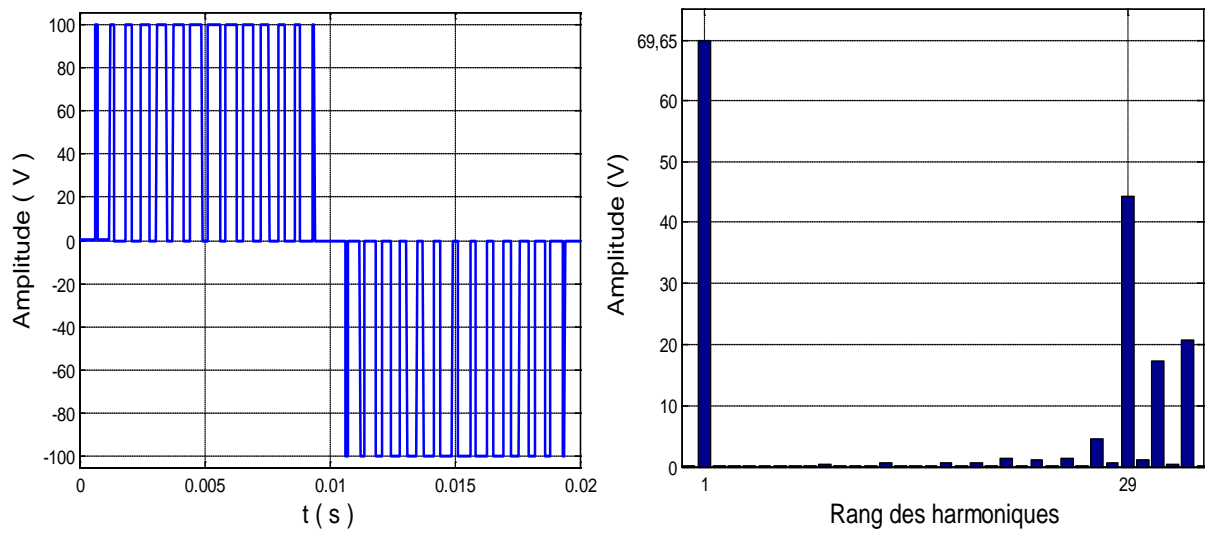


(a): $r = 0.40$

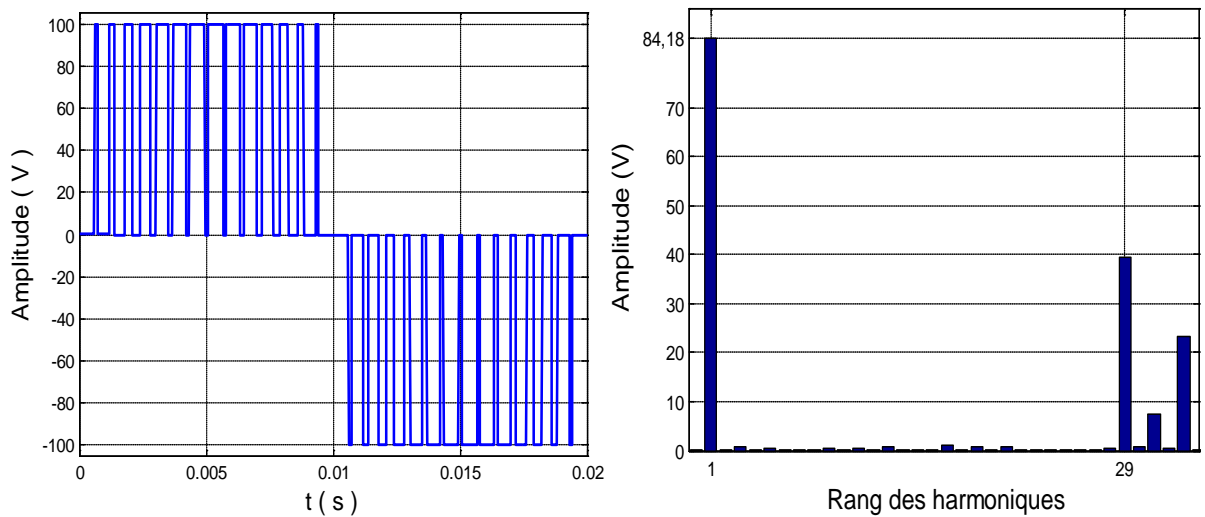
Figure (III.11) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N = 14$)



(b): $r = 0.55$

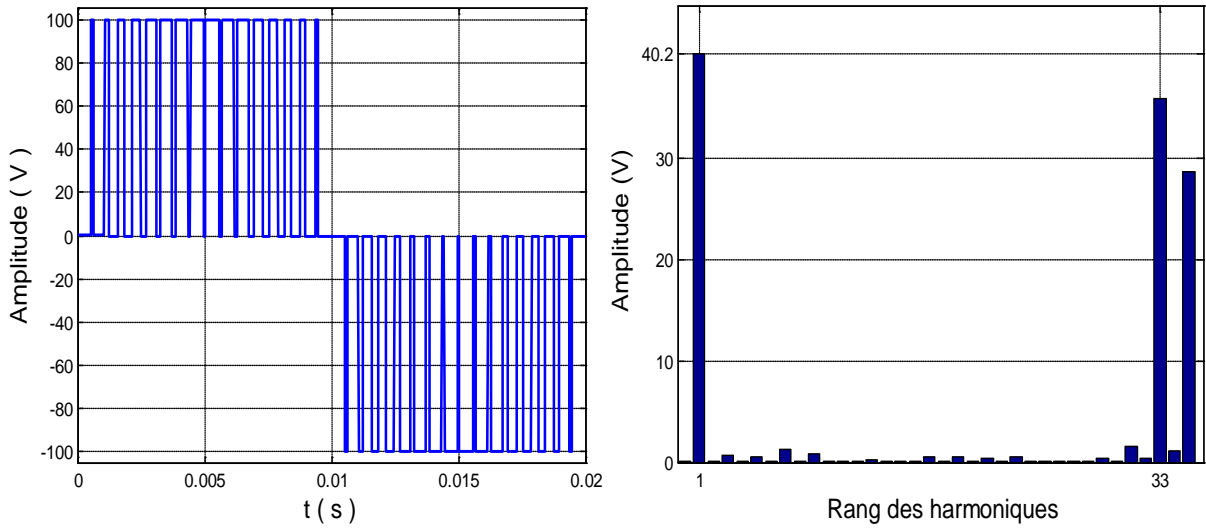


(c): $r = 0.70$

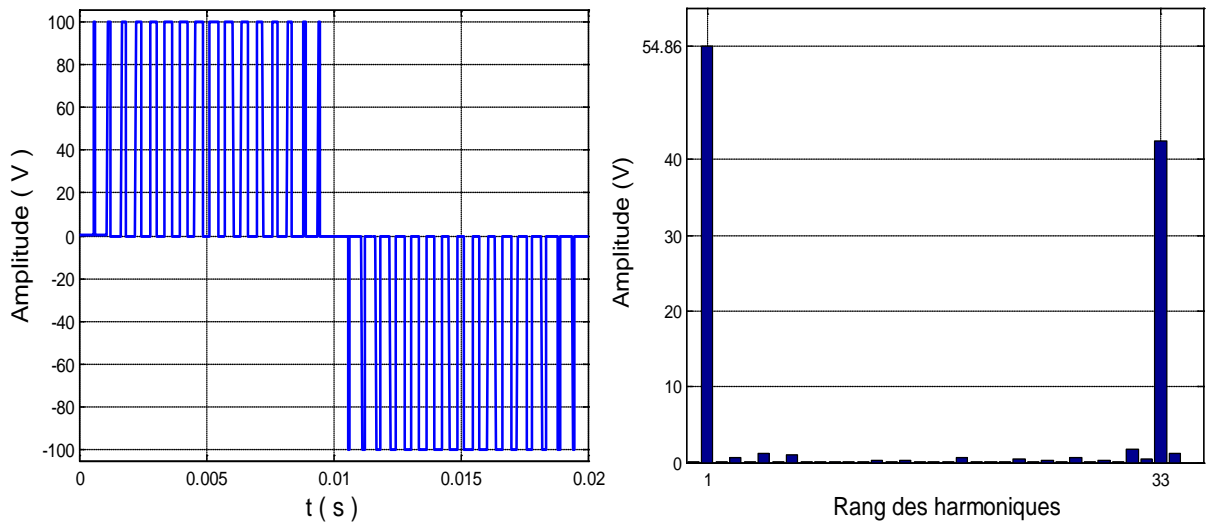


(d): $r = 0.85$

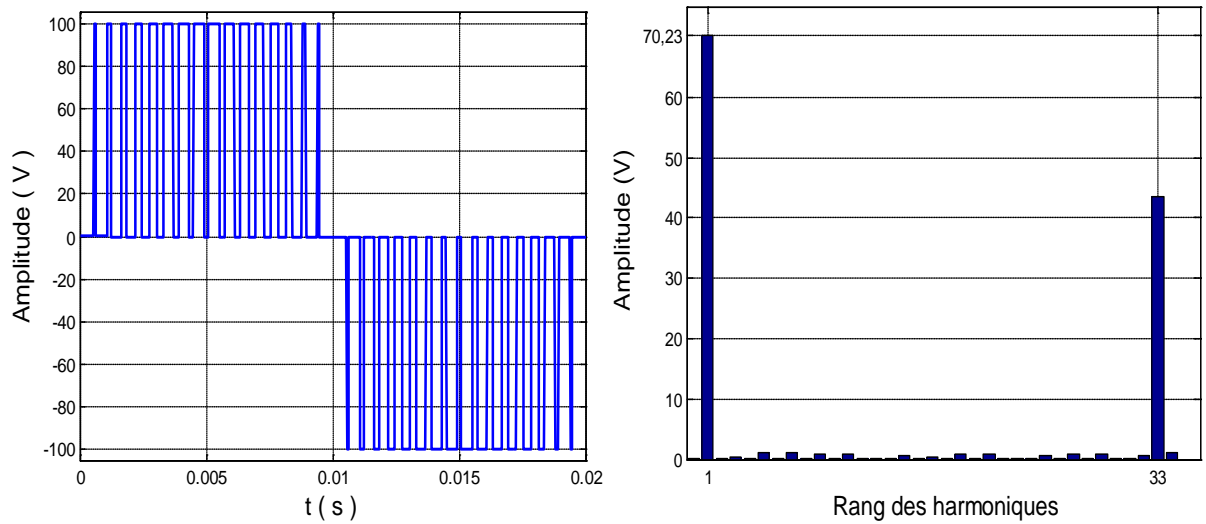
Figure (III.12) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 14$)



(a): $r = 0.40$

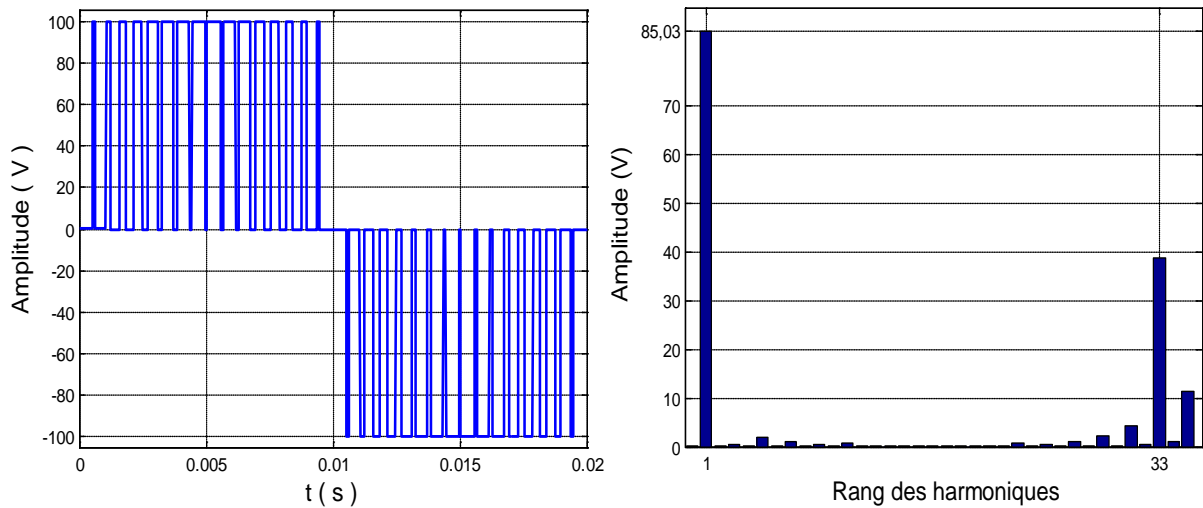


(b): $r = 0.55$



(c): $r = 0.70$

Figure (III.13) : Tensions de sortie et leurs spectres d'harmoniques ($N = 16$)



(d): $r = 0.85$

Figure (III.14) : Tension de sortie et son spectre d'harmoniques ($N=16$)

D'après les résultats de simulation :

- On remarque que la plupart des harmoniques ciblés sont éliminés.
- L'amplitude du fondamental a une bonne concordance avec le taux de modulation.

Conclusion

Nous avons étudiés dans ce chapitre deux stratégies basées sur l'approximation mathématique des angles de commutation, la MLI-ESH-ER et la MLI-ESH-L sont présentées.

Le développement mathématique de la MLI-ESH-ER est très compliqué et on n'aura pas une élimination complète des harmoniques ciblées mais une minimisation à cause d'erreur d'approximation.

La formulation mathématique correspondante à la MLI-ESH-L est donnée par des équations simples mais le processus du calcul des coefficients est long. L'analyse harmonique montre l'absence des harmoniques ciblés, ce qui valide l'efficacité de cette technique.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous nous intéressons à la commande de l'onduleur monophasé par la MLI à élimination sélective d'harmoniques.

Tout d'abord, dans le premier chapitre nous avons présentés d'une façon détaillée la stratégie MLI-ESH qui est caractérisée par deux formes. Nous avons vu que le calcul des angles de commutation revient à la résolution des systèmes d'équations non linéaires à fonction trigonométrique.

Dans le but d'obtenir une variation continue du taux de modulation nous appliquons la méthode des tableaux pour stocker les angles de commutation. Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants (tension souhaitée à la sortie de l'onduleur avec l'élimination des harmoniques désirés).

Au deuxième chapitre on a présenté la MLI-ESH simplifiée avec l'algorithme des aires égaux et l'algorithme du centre de gravité.

Pour confirmer la validité de ces algorithmes, on simule pour différentes valeurs de N . On remarque l'apparition des harmoniques de rang qui sont normalement nuls. Ces deux méthodes garantissent la valeur désirée de l'amplitude du fondamental.

Enfin, le troisième chapitre, on a présenté deux méthodes d'approximation des trajectoires des angles de commutation. Les simplifications ne donnent pas toujours de bons résultats surtout aux niveaux des tensions de sortie à cause de l'apparition des harmoniques de rang qui sont normalement nuls.

La MLI-ESH-ER garantit la valeur désirée du fondamental mais n'élimine pas les harmoniques, la MLI-ESH-L présente un avantage considérable du point de vue simplicité car elle se base sur quatre équations générales.

Comme perspective de ce travail, on propose :

- Etude de l'association redresseur - onduleur - moteur asynchrone ;
- Validation expérimentale des différentes techniques MLI-ESH.

*Références
Bibliographiques*

- [Azl-06] N.A. Azli, L. Y. Chan, « Development of equations through trajectories linearization for an HEPWM inverter », IEEE International conference on power and energy, Putra Jaya 2006, pp. 416-421.
- [Ber-06] F. Berrezzek «Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » Mémoire de MAGISTER, Université Badji Mokhter. Annaba 2006.
- [Bow-95] S. R. Bowes, « Advanced regular-sampled PWM control techniques for drives and static power converters », IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 42, No. 4, pp. 367-373, August 1995.
- [Bow-99] S.R. Bowes, S. Grewal, « Novel harmonic elimination PWM control strategies for three-phase PWM inverters using space vector techniques », IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 146, No. 5, September 1999.
- [Bow-01] S.R. Bowes, D. Holliday, S. Grewal, « Regular-sampled harmonic elimination PWM control of single-phase two-level inverters », IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 148, No. 4, July 2001.
- [Bow-06] S.R. Bowes, D. Holliday, « Comparison of pulse-width-modulation control strategies for three-phase inverter systems », IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 153, No. 4, July 2006.
- [Che-97] J.W. Chen, T.J. Liang, « A novel algorithm in solving nonlinear equations for programmed PWM inverter to eliminate harmonics », 23rd International conference on industrial electronics, control and instrumentation, New Orleans, LA 1997, pp. 698-703.
- [Had-07] S. Hadji, «correction du facteur de puissance dans les systèmes de traction alimentés en courant alternatif monophasé », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2007.

- [Ima-05] K. Imarazene, «Application des Réseaux de Neurones à la Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multi niveaux», mémoire de MAGISTER, Nationale Polytechnique, Alger 2005.
- [Ima-11] K. Imarazene, « Etude de la Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multiniveaux avec Equilibrage des Tensions du Bus Continu », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2011.
- [Joh-04] N.C. John, M.T. Leon, J.M. Keith, D. Zhong, « A complete solution to the harmonic elimination problem », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 2, pp. 491-498, March 2004.
- [Mck-04] K. J. McKenzie, « Eliminating harmonics in a cascaded H-bridges multilevel inverter using resultant theory, symmetric polynomials, and power sums », master of science, The University of Tennessee, Knoxville, 2004.
- [Moh-95] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, « Power Electronics: Converters, Applications, and Design », 2nd ed. New York: Wiley, 1995
- [Naa-11] A. Naami «La Stratégie MLI Vectorielle Optimisée : Recherche de Toutes les Solutions d'angles de Commutation », mémoire de MAGISTER, Nationale Polytechnique, Alger 2011.
- [Vil-05] R. A. Villarreal-Ortiz, M. Hernández-Angeles, C. R. Fuerte-Esquivel, R. O. Villanueva-Chávez, « Centroid PWM Technique for Inverter Harmonics Elimination », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.2, pp. 1209-1210, April 2005.