

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et populaire

Ménistère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université de RELIZANE

Faculté des sciences et de la technologie

Département : Electrotechnique et d' automatique



جامعة غليزان  
RELIZANE UNIVERSITY  
MEMOIR

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en:

Electrotechnique industrielle

Intitulé

**Elimination Sélective des harmonique SHE pour un onduleur multi niveaux a 9 niveaux utilisant l'algorithme PSO et GA.**

Présenté par :

BOUKORBAA Mohamed

TAHAR Abdelkader

Devant les membres de jury :

<b>Président :</b> M.Bessis Benhalima	Maître de conférence (A) A (U. Relizane)
<b>Encadreur :</b> Mme. ABDELGOUI Rim Feyrouz	Maître de conférence (A) A (U. Relizane)
<b>Examineur:</b> M.Mostefa Tounsi mahomoud	Maître de conférence (A) A (U. Relizane)

2024/2025



# Remercier

*Nous tenons à remercier tout d'abord nos très chers parents.*

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur de ce mémoire, Mme Abdelgoui Rim Feyrouz, pour son encadrement, orientations, ses conseils et sa présence constante tout le temps.*

*Est-on remercier M. Président Bessis Benhalima pour les remarque et Mr examinateur M. Mostefa Tounsi mahomoud et n'oublier pas les tous les enseignants*



# *DEDICACE*

*Je vais remercier tout d'abord mes parents*

*Mon encadreur mdm abdlegoui qui aide mois*

*Et une grande dédicace pour les ingénieurs de Sath-DP*

*louafi omar*

*Et Tamer Ahmed*

*Lakhderi Khalde*

*Ben Ali Mohamed Zidane*

*Ali Dahdah*

*Chefe division Guessoum Mohamed*

*Et la famille Boukorbaa*

BOUKORBAA Mohamed

## *DEDICACE*

*Je remercie profondément mes parents pour leur soutien constant dans la réalisation de mes objectifs. Mon encadreur Mme abdlegoui qui aide mois .*

*Je n'oublie pas mes amis, pour leur soutien, leur affection et les beaux moments partagés cette année.*

*Et n'oublie pas ma famille*

TAHAR abdelkader

## Résumé:

Cette étude a pour objectif d'expliquer la méthode d'élimination sélective des harmoniques (SHE) est une technique fréquemment utilisée en commande d'onduleurs multi-niveaux. Elle permet de réduire les harmoniques dominantes d'ordre faible. Les angles de commutation sont définis par la résolution d'un système d'équations transcendantes, ce qui en fait une approche basse fréquence. Pour le problème de l'élimination sélective des harmoniques (SHE), des techniques heuristiques telles que PSO et GA ont été utilisées dans cet mémoire, ainsi qu'une comparaison pour vérifier laquelle offre le plus faible THD. MATLAB/SIMULINK est utilisé pour une analyse de simulation détaillée.

**Mots-clés :** onduleur multi-niveau, GA, PSO, SHE, onduleur multi niveau hybride

---

### ملخص

---

تهدف هذه الدراسة إلى شرح طريقة الإزالة الانتقائية للتوافقيات (SHE), وهي تقنية شائعة الاستخدام في التحكم في العاكس متعدد المستويات. تعمل هذه الطريقة على تقليل التوافقيات السائدة منخفضة الدرجة. تُحدد زوايا التبديل بحل نظام من المعادلات المتسامية، مما يجعلها نهجًا منخفض التردد. بالنسبة لمسألة الإزالة الانتقائية للتوافقيات (SHE)، استُخدمت تقنيات استدلالية مثل PSO و GA في هذه البحث، بالإضافة إلى مقارنة للتحقق من أيهما يوفر أقل تشوه توافقي إجمالي. استخدم MATLAB/SIMULINK لتحليل المحاكاة التفصيلي.

**الكلمات المفتاحية :** عاكس متعدد المستويات، GA، PSO، SHE، عاكس هجين متعدد المستويات.

chapitre I.....	3
I.1.  Introductions.....	3
I.2.  Historique.....	3
I.3.  Intérêt des onduleurs.....	4
I.4.  Définition des onduleurs.....	4
I.5.  Principe général de fonctionnement.....	4
I.6.  Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	5
I.6.1.  Onduleurs de type NPC par les diodes.....	5
I.6.2.  Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants.....	7
I.6.3.  Onduleurs multi niveaux en cascade.....	8
I.6.4.  Les onduleurs multi niveaux hybride.....	10
I.7.  Applications des onduleurs multi-niveaux.....	11
I.7.1.  Application dans le domaine des énergies solaires.....	11
I.7.2.  Application dans énergies éoliennes.....	12
I.8.  Propriétés des principales structures.....	12
I.8.1.  Classification des topologies selon leur alimentation.....	12
I.8.2.  Nombres de composants nécessaires.....	12
I.9.  Définition des harmoniques.....	12
I.10.  La distorsion d'harmonique global THD.....	14
I.11.  Range harmonique.....	14
I.12.  Classification des harmoniques selon leur rang.....	14
I.13.  Impact des harmoniques de rang élevé:.....	14
I.14.  Comprendre les harmoniques dans les onduleurs.....	15
I.15.  Réduction des Harmoniques.....	15
I.16.  Avantages et inconvénients des harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux.....	15
I.16.1.  Avantages des Harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux.....	15
I.16.2.  Inconvénients des Harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux.....	16
chapitre II.....	18
II.1.  Introduction.....	18
II.2.  Classifications des stratégies des commandes.....	18
II.3.  Commutation à fréquence fondamentale.....	19

II.3.1.	Commutation à modulation vectoriel(SVM) .....	19
II.3.2.	Modulation à élimination sélective des harmoniques .....	20
II.3.3.	Techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM - Pulse Width Modulation):... ..	21
II.3.4.	Modulation Vectorielle PWM (SVPWM –Space Vector PWM):.....	21
II.3.5.	La modélisation par MLI vectoriel:.....	22
<b>II.4</b>	<b>Élimination sélective des harmoniques (SHE) .....</b>	<b>24</b>
II.4.1.	Méthode de Newton-Raphson:.....	25
II.5.	La commande heuristique .....	26
II.5.1.	Les algorithmes génétiques (GA) :.....	26
<b>II.5.2.</b>	<b>Stratégie d'élimination d'harmoniques par les AG .....</b>	<b>27</b>
II.6.	L'optimisation par essaim de particules (PSO) : .....	28
<b>II.6.1</b>	<b>Stratégie d'élimination d'harmoniques par PSO .....</b>	<b>31</b>
II.7.	Conclusion.....	33
<b>chapitre III .....</b>		<b>34</b>
III.1.	Introduction.....	34
III.2.	Modélisation de l'onduleur multi niveau asymétrique en cascade .....	34
III.3.	Résultat de simulation .....	36
III.3.2.	Résolution par les algorithmes génétiques.....	37
III.4.	Etude comparative :.....	39
III.4	Conclusion .....	40

## Nomenclature

<b>NPC</b>	Neutral points clamped.
<b><math>V_s</math></b>	La valeur de la tension de sortie.
<b>N</b>	Nombre de niveaux de l'onduleur multi-niveaux.
<b>Y(t)</b>	Valeur instantanée.
<b><math>Y_{eff}</math></b>	Valeur efficace du signal Y(t).
<b><math>y_0</math></b>	Valeur moyenne ou composant continue du Y(t).
<b><math>y_k</math></b>	Valeur efficace de l'harmonique de rang h.
<b><math>\Omega</math></b>	Vitesse angulaire de la fréquence fondamentale.
<b><math>\phi_k</math></b>	Phase de la composante harmonique.
<b><math>Y_1, Y_2, Y_n</math></b>	Valeur efficace de l'harmonique de rang 1,2eth.
<b>THD</b>	Taux de distorsion harmonique.
<b>SHE</b>	Sélective Harmonique élimination.
<b><math>\theta_1, \theta_2, \theta_3</math> et <math>\theta_4</math></b>	Modulation de Largeur d'impulsion.
<b>MLI</b>	Les angles de commutation.
<b><math>a_0, a_n</math> et <math>b_n</math></b>	Coefficient de série de Fourier.
<b><math>m_a</math></b>	L'indice de modulation.
<b>GA</b>	Algorithme genitic.
<b>PSO</b>	Particle swarm optimization.
<b>FFT</b>	Fast Fourier transforme.
<b><math>c_1</math> etc <math>c_2</math></b>	Coefficients D'accélération.

## Liste de figure

Figure I-1 Un convertisseur contenu alternatif.....	4
Figure I-2 Onduleur à niveaux multiples deux(a), à trois (b) et à m niveaux(c). ....	5
Figure I-3 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux. ....	5
Figure I-4 Onduleurs NPC par les diodes. ....	6
Figure I-5 Onduleur à condensateurs .....	7
Figure I-6 Onduleur on cascade.....	9
Figure I-7 Hybridation en pont de 2 onduleurs multi-niveaux.....	10
Figure I-8 Onduleur en type H-bridge.....	11
Figure I-9 Hybride cote-a-cote d'onduleur multi-niveaux .....	11
Figure I-10 Signal composé (propre, altère, harmonique) .....	13
Figure I-11 Décomposition harmonique d'un sigle déformé .....	13
Figure II-1 classification des stratégies de commande des onduleurs multi-niveaux.....	19
Figure II-2 Principe de la modulation SVM d'un onduleur 5-niveaux.....	20
Figure II-3 Exemple de tension de phase multi-niveau.....	21
Figure II-4 présent une commande Largeur d'Impulsion. ....	21
Figure II-5 comparaison entre le signal sinusoïdal et triangulaire.....	22
Figure II-6 représente la modélisation par MLI vectoriel. ....	23
Figure II-7 Schéma de principe de la M.L.I vectorielle. ....	23
Figure II-8 Organigramme de l'algorithme de Newton-Raphson.....	26
Figure II-9 Organigramme de l'algorithme génétique (AG).....	27
Figure II-10 Volé d'oiseaux. ....	29
Figure II-11 Principe de déplacement d'une particule. ....	29
Figure II-12 Organigramme d'essaim particulaire PSO.....	31
Figure III-1 Forme d'onde obtenue avec un onduleur de 9-niveaux. ....	34
Figure III-2 Schéma bloc de simulation. ....	35
Figure III-3 Forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur symétrique en cascade a neuf niveaux (PSO).....	36
Figure III-4 Angles de commutations. ....	36
Figure III-5 FFT Analyse de la tension de sortie (PSO). ....	37
Figure III-6 L'interface de GA.....	38
Figure III-7 Forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur asymétrique en cascade a neuf niveaux (GA). ....	38
Figure III-8 FFT Analyse de la tension de sortie (GA). ....	39

Introduction

Générale

Depuis de nombreuses années, l'évolution de l'électronique de puissance est très importante dans un monde où les aspects énergétiques sont devenus un enjeu essentiel. Les applications de celle-ci sont diverses et touchent un vaste domaine du génie électrique qui s'étend actuellement de quelques watts à des centaines de mégawatts.

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital touche plusieurs activités tel que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaires, maritime.....), l'énergie renouvelable et l'industrie. Dans cette époque l'énergie est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme. Alors c'est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance, cette dernière peut être contribue pour la bonification de signal électrique.

Les convertisseurs statiques monophasés à structure tension sont des éléments essentiels de nombreux systèmes d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les alimentations sans interruption et les filtres actifs. La sécurité de ces systèmes, leur fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie [1].

La technologie a dû s'adapter à cette croissance de la puissance à convertir, ainsi les nouvelles techniques de commandes des onduleurs, ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs d'une grande performance par rapport aux onduleurs conventionnels. Ce sont les convertisseurs multi-niveaux qui sont utilisés principalement pour l'alimentation à fréquence variable des machines alternatives de forte puissance.

La conception de l'onduleur dépend non seulement de la topologie matérielle et des types de dispositifs semi-conducteurs, mais également de la manière de les contrôler. Les convertisseurs électroniques de puissance convertissent l'énergie électrique d'une forme à une autre tout en contrôlant sa direction et ses caractéristiques grâce à des lois de contrôle appropriées telles que la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (PWM), l'élimination sélective des harmoniques (SHE) et la modulation vectorielle spatiale (SVM). L'élimination sélective des harmoniques PWM (SHE-PWM) est une méthode de contrôle de la commutation qui bénéficie d'une faible fréquence de commutation et d'une qualité de puissance de sortie élevée. de sa faible fréquence de commutation et de sa qualité de puissance de sortie élevée, ce qui permet d'économiser le coût du filtre pour les onduleurs . Il existe d'autres méthodes telles que la méthode de Newton-Raphson (N-R),cette méthode présente certains inconvénients tels que problèmes de divergence et la résolution d'équations linéaires, au lieu d'équations transcendantes non linéaires, c'est pour ça on a proposé des méthodes avancées comme les algorithmes génétiques (GA), Technique d'optimisation par essais de particules, (PSO),une optimisation est nécessaire pour résoudre un ensemble d'équations algébriques non linéaires pour exprimer l'amplitude harmonique en fonction de l'angle de commutation des composants de puissance .

Ce mémoire utilise les algorithmes génétiques (GA) et l'optimisation par essaims de particules (PSO) [12] pour réduire le THD total de la tension de sortie d'un onduleur asymétrique multi-niveau à 9 niveaux. Afin de calculer les angles de commutation tout en contrôlant les harmoniques d'ordre inférieur dans les limites autorisées, la fonction objective générée par le problème SHE est minimisée.

Ce travail est structuré en 3 chapitres:

- Le premier chapitre, traitera les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux : leurs structures, leurs avantages et leurs inconvénients.
- Dans le deuxième chapitre, nous étudions les stratégies de commandes des onduleurs multi-niveaux.
- Le troisième chapitre met en évidence les différentes techniques de commande des convertisseurs multi-niveaux avancées. A cet effet, une étude comparative entre les deux stratégies de commande (GA) et (PSO) a été élaborée. L'analyse de ces stratégies sera basée sur le taux d'harmoniques (THD) des tensions de sortie. Et voir qui donne le THD le plus faible.



Chapitre I



Topologies des onduleurs multi-niveaux

## chapitre I

### I.1. Introductions

Le concept de convertisseurs multi-niveaux a été mis en place depuis 1975. Le terme multi-niveaux a commencé avec les convertisseurs à trois niveaux. Ultérieurement, plusieurs topologies de convertisseurs multi-niveaux ont été développées. L'onduleur multi-niveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner :

- La qualité d'onde: les convertisseurs multi-niveaux peuvent générer des tensions de sortie avec une distorsion très faible et de bonnes qualités.
- Courant d'entrée: les convertisseurs multi-niveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.
- Fréquence de découpage: les convertisseurs multi-niveaux peuvent fonctionner à la fois à la fréquence fondamentale et à une fréquence de découpage élevée (MLI). Il convient de noter qu'une grande fréquence de commutation signifie généralement des pertes réduites, donc un gain plus élevé dans le rendement du convertisseur.

### I.2. Historique

L'histoire de la conversion multi-niveaux commencé au début des années 70. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétiser une sortie alternative sous forme d'escalier. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC). Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi-niveaux pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure [2].

➤ Bien que l'onduleur multi-niveaux en cascade ait été inventé le premier, ses applications n'ont pas régné jusqu'au milieu des années 90. Deux brevets importants ont été publiés pour indiquer la supériorité des onduleurs en cascade pour l'entraînement des moteurs. En raison de la grande demande des onduleurs de haute puissance et de moyenne tension, l'onduleur multi-niveaux en cascade a tiré d'énorme intérêt [3].

➤ Dans les années 90, les recherches sont tournées vers de nouvelles structures et ils sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série, aussi connus dans la littérature sous le nom de Flyin Capacitor (FC).

➤ Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série [4].

➤ Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multi-niveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures de base sont communes avec les nouvelles structures découvertes.

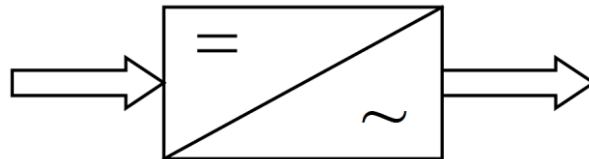
### I.3. Intérêt des onduleurs

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [5].

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets [6].

### I.4. Définition des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif alimenté en continue, il modifie de façon périodique la connexion entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie [7].



**Figure I-1** Un convertisseur continu alternatif

### I.5. Principe général de fonctionnement

Dans cette figure (2.a) on représente un convertisseur de deux niveaux comme indiqué, Dans ce cas, la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou  $V_{(dc1)}$ . En revanche, dans la figure (2.b), la tension de sortie d'un convertisseur a trois niveaux peut adopter trois valeurs distinctes : 0,  $V_{(dc1)}$  ou  $V_{(dc1)} + V_{(dc2)}$ . Enfin, la figure (2.c) illustre le cas général d'un convertisseur a (m) niveaux.

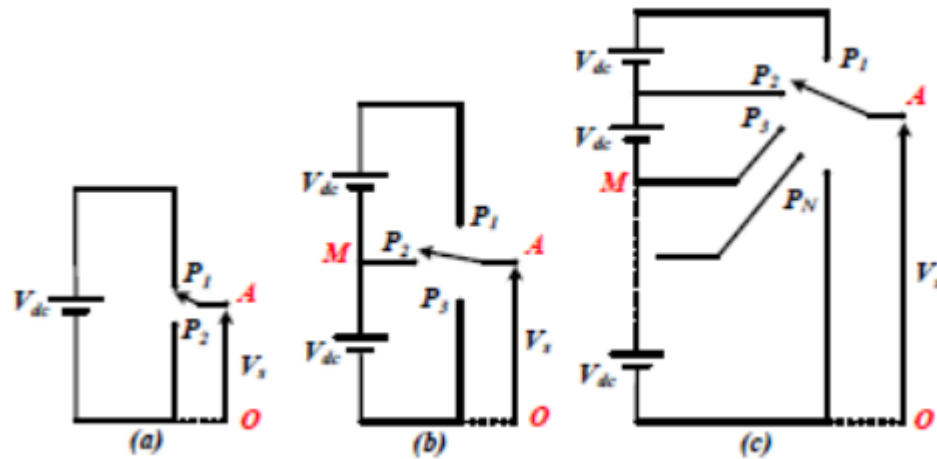


Figure I-2 Onduleur à niveaux multiples deux(a), à trois (b) et à m niveaux(c).

### I.6. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Les principales topologies des onduleurs multi-niveaux sont

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

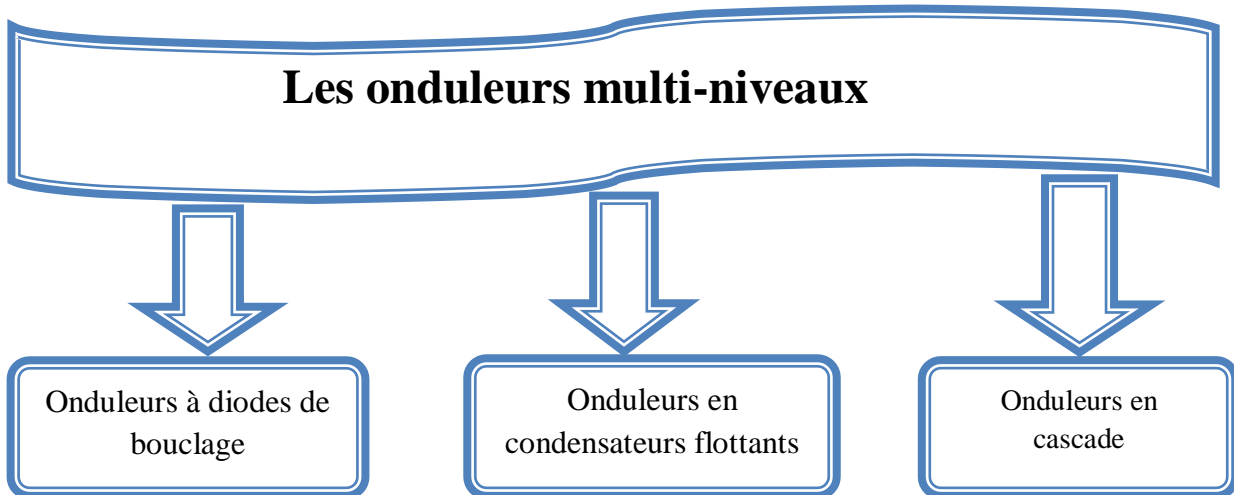


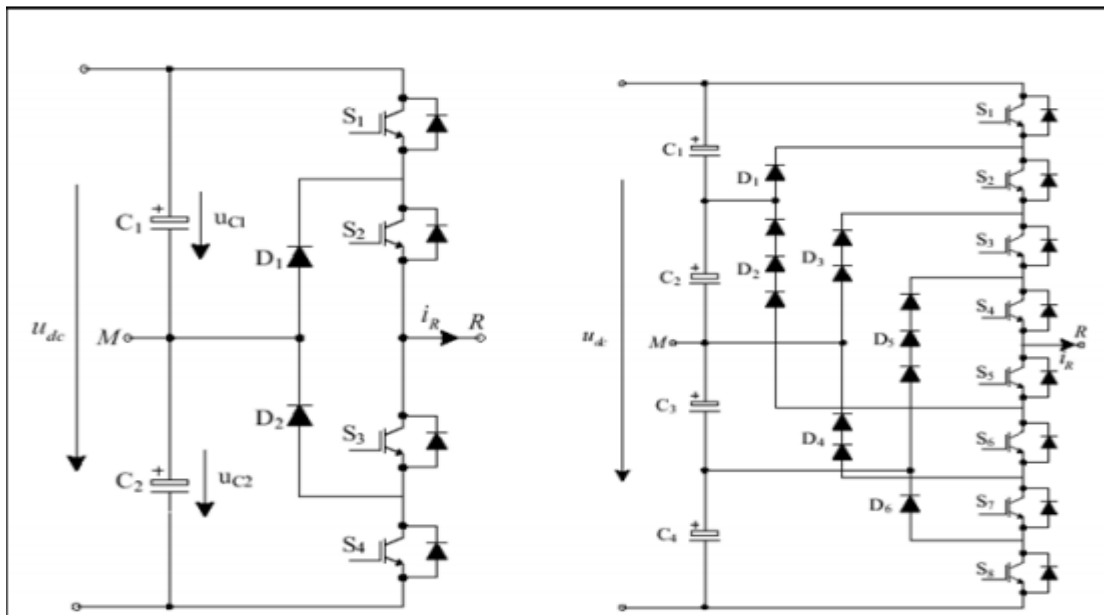
Figure I-3 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

#### I.6.1. Onduleurs de type NPC par les diodes

A première topologie, et la plus pratique, de l'onduleur de tension multi-niveaux est la structure NPC (Neutral-Point-Clamped). Elle est constituée principalement de trois bras

symétriques, cette structure d'onduleur multi-niveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagien 1981, dont l'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteurs [8].

L'onduleur NPC à trois niveaux est présenté respectivement par la figure suivant:



**Figure I-4** Onduleurs NPC par les diodes.

Un onduleur NPC (Neutral Point Clamped) de 5 niveaux est un convertisseur d'énergie utilisé dans les applications de moyenne et haute puissance, comme les systèmes photovoltaïques, les entraînements de moteurs et les réseaux électriques [8].

### I.6.1.1. Les Avantages

- Réduction des Harmoniques : Avec 9 niveaux de tension, l'ondulation de sortie est plus proche d'une onde sinusoïdale, ce qui réduit les distorsions harmoniques et améliore la qualité de l'alimentation.
- Meilleure Efficacité : Moins de pertes de commutation par rapport aux onduleurs à niveaux inférieurs, ce qui augmente l'efficacité énergétique.
- Réduction des Contraintes sur les Semi-conducteurs : Chaque interrupteur supporte une tension plus faible, permettant l'utilisation de composants moins coûteux et augmentant leur durée de vie.
- Meilleure Compatibilité avec les Réseaux Haute Tension : Grâce à la capacité de générer plusieurs niveaux de tension, il est adapté aux applications nécessitant de hautes tensions, comme les systèmes HVDC et les entraînements industriels.
- Faible Besoin de Filtrage : La sortie étant plus proche d'une sinusoïde parfaite, le besoin de filtres externes est réduit, ce qui diminue la complexité du système.

### I.6.1.2. Les inconvénients

- Complexité de Commande : Le contrôle d'un onduleur NPC à 9 niveaux nécessite des stratégies sophistiquées, comme la modulation par largeur d'impulsion (PWM) avancée, ce qui rend le système plus difficile à gérer.
- Nombre Élevé de Composants : Il nécessite plus de transistors, de diodes et de condensateurs, ce qui augmente les coûts et la taille du circuit.
- Difficulté de Conception et Maintenance : Avec un plus grand nombre de composants, la conception devient plus complexe et les réparations plus difficiles en cas de panne.
- Équilibrage de la Tension des Condensateurs : Il faut mettre en place des circuits supplémentaires pour équilibrer les tensions aux bornes des condensateurs, ce qui ajoute encore plus de complexité au système.
- Coût Initial Élevé: En raison du nombre élevé de composants et de la complexité du contrôle, le coût initial est plus élevé par rapport aux onduleurs à moins de niveaux.

### I.6.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation «Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes. Dans la topologie suivante on représente l'onduleur à condensateur flottant cinq niveau [9].

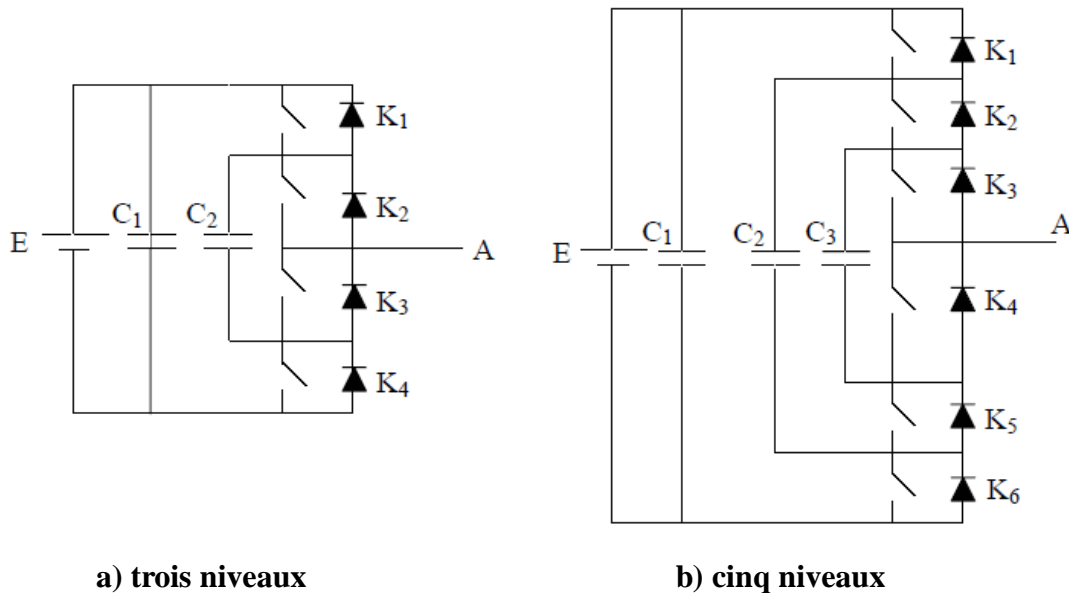


Figure I-5 .Onduleur à condensateurs

L'onduleur à condensateurs flottants (Flying Capacitor Inverter, FCI) de 9 niveaux est une topologie multi niveau qui utilise des condensateurs pour stocker et redistribuer l'énergie afin de créer plusieurs niveaux de tension de sortie.

### **I.6.2.1. Les Avantages**

- Bonne qualité de la forme d'onde : La sortie est plus proche d'une onde sinusoïdale, ce qui réduit les harmoniques et améliore la qualité de l'alimentation.
- Modularité : La structure permet d'ajouter plus de niveaux sans trop complexifier le circuit, facilitant ainsi l'adaptation à des tensions plus élevées.
- Réduction des contraintes sur les semi-conducteurs : Chaque interrupteur supporte une fraction de la tension totale, ce qui permet d'utiliser des composants de tension plus faible et donc potentiellement plus économiques.
- Moins de diodes de clamping : Contrairement à l'onduleur NPC, cette topologie ne nécessite pas de diodes supplémentaires pour gérer les niveaux intermédiaires de tension.
- Bonne redondance : En cas de panne d'un composant, le système peut souvent continuer à fonctionner en mode dégradé.

### **I.6.2.2. Les inconvénients**

- Complexité de commande : Le contrôle et la gestion des niveaux de tension nécessitent des algorithmes avancés, comme la modulation de largeur d'impulsion (PWM) multi-niveau.
- Équilibrage de la charge des condensateurs flottants : Il est crucial de maintenir les tensions des condensateurs équilibrées, ce qui nécessite une stratégie de gestion supplémentaire et peut entraîner des pertes.
- Nombre élevé de composants passifs : Plus il y a de niveaux, plus il faut de condensateurs flottants, ce qui augmente la taille, le coût et la complexité du circuit.
- Faible densité de puissance : Comparé aux autres topologies (comme l'onduleur NPC), il nécessite plus de condensateurs, ce qui peut poser des problèmes d'encombrement et de refroidissement.
- Risque de décharge inégale des condensateurs : Si les condensateurs ne se chargent pas et ne se déchargent pas correctement, cela peut entraîner des déséquilibres de tension et affecter les performances du système.

### **I.6.3. Onduleurs multi niveaux en cascade**

Cette topologie a été proposé par Baker Richard H et Bannister Lawrence H [10]. Un progrès des onduleurs multi-niveaux a été dû au modèle en pont H cascadié en série. La première application d'onduleur pont H était pour la stabilisation des plasmas en 1988[11]. Les sorties des

onduleurs en pont sont connectées en série de telle sorte que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie.

Le convertisseur peut être formé en connectant plusieurs modules H-bridge en série ; chaque module est connecté à sa propre alimentation continue isolée, afin d'éviter un court-circuit lors de la mise en série.

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 définie par :

$$m=2s+1 \quad (I.1)$$

Où  $s$  est le nombre des sources des tensions continues.

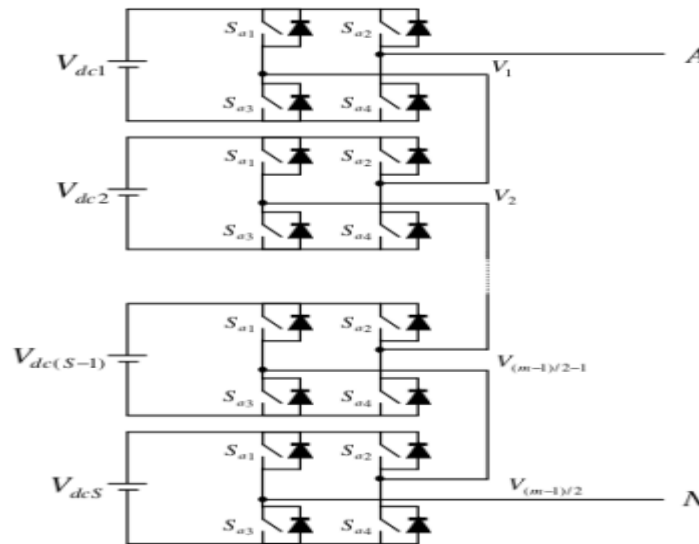


Figure I-6 Onduleur on cascade.

### I.6.3.1. Les Avantages

- L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.
- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur  $\pi$  nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune  $\pi$  diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.

- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à Courant continu

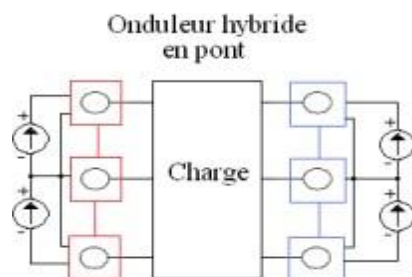
### I.6.3.2. Les inconvénients

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC

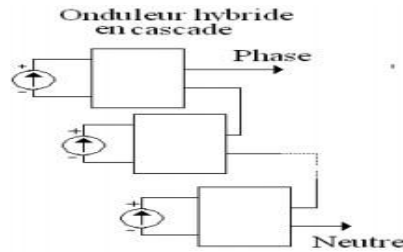
### I.6.4. Les onduleurs multi niveaux hybride

Un onduleur multi-niveaux hybride triphasé est un dispositif électronique de conversion d'énergie qui permet de transformer une tension continue (DC) en une tension alternative (AC) triphasée tout en utilisant plusieurs niveaux de tension pour améliorer les performances et en intégrant plusieurs sources d'énergie pour une gestion optimisée. Il est particulièrement utilisé dans les systèmes de production d'énergie renouvelable et les applications industrielles nécessitant une alimentation électrique de haute qualité. Les topologies hybrides permettent d'améliorer la qualité de Puissance et l'augmentation du nombre de niveaux de la tension de sortie en utilisant moins de sources de tension continue à l'entrée et moins de commutations. Trois types d'hybridation sont développés dans l'industrie

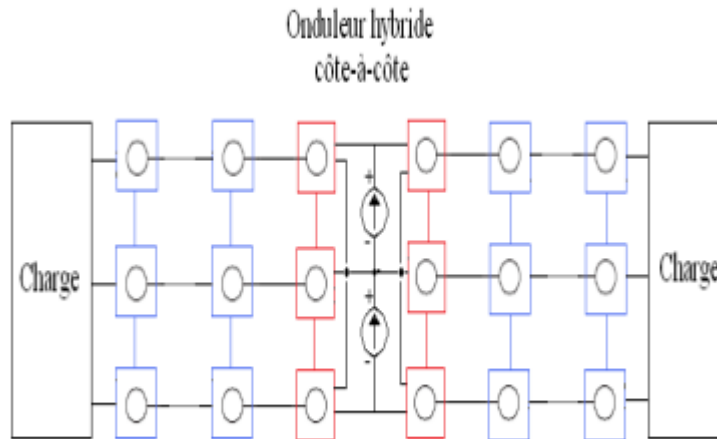
- Hybridation en pont généralement entre onduleurs de même nature: la Figure (1.6) Montre une hybridation en pont de deux onduleurs multi-niveaux.
- Hybridation en cascade, les topologies fournissent un effet multiplicateur du nombre De niveaux selon le modèle de structuration; la Figure (1.7) montre une hybridation En cascade d'onduleurs multi-niveaux de type H-bridge.
- Hybridation cote a cote pour alimenter deux charge la figure (1.8) [12].



**Figure I-7** Hybridation en pont de 2 onduleurs multi-niveaux.



**Figure I-8** Onduleur en type H-bridge.



**Figure I-9.**Hybride cote-a-cote d'onduleur multi-niveaux

## I.7. Applications des onduleurs multi-niveaux

Les convertisseurs multi-niveaux trouvent une attention importante dans l'industrie et le milieu universitaire en tant qu'un des choix privilégiés de la conversion pour les applications de haute puissance. Ils ont façonné avec succès leur voie en milieu industriel et peuvent pour cette raison être considérés comme une technologie mature et prouvée. Actuellement, ils sont commercialisés dans les normes et qui actionnent une large gamme d'applications, tel-que les compresseurs, les extrudeuses, les pompes, les ventilateurs, les fraises, les laminoirs, les convoyeurs, les broyeurs, les souffleries de fourneau, les démarreurs de turbine à gaz, les mélangeurs, les élévateurs, la compensation d'énergie réactive, la propulsion maritime, boîte à vitesses à courant continu à haute tension, le stockage hydro pompé, l'énergie photovoltaïque et l'éolienne et la traction ferroviaire. Les convertisseurs de ces applications sont commercialement offerts par un ensemble d'entreprises croissant dans le domaine, telque : ABB, SIEMENS, Schneider-Electric, Alstom, TMEIC-GE [13]

### I.7.1. Application dans le domaine des énergies solaires

Afin d'améliorer le rendement du système photovoltaïque (PV), autrement dit, maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur photovoltaïque, plusieurs moyens d'optimisation ont été appliqués, et des techniques suivies pour obtenir une bonne

adaptation et un rendement élevé. Parmi ces moyens, l'amélioration de la qualité de la tension de sortie de l'onduleur par l'utilisation d'onduleurs multi-niveaux 'OMN'. Les structures à base d'onduleurs multi-niveaux ont apporté un plus indéniable à la conversion continue alternative, surtout dans les applications de grandes puissances. Cependant, la plupart des systèmes photovoltaïques comportent des charges à basse tension [14].

### **I.7.2. Application dans énergies éoliennes**

Vu que la place que prennent la production des énergies renouvelables, particulièrement les aérogénérateurs. L'association des convertisseurs multi-niveaux permet d'améliorer la forme d'onde en utilisant les différents niveaux de tension, injecté au point commun de connexion pour les aérogénérateurs à vitesse variable afin d'éviter la déconnexion de l'éolienne du réseau. Ces convertisseurs contribuent à traiter les harmoniques, on associe ces derniers à des filtres (filtrage actif ou passif [15]).

## **I.8. Propriétés des principales structures**

### **I.8.1. Classification des topologies selon leur alimentation**

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. [16]

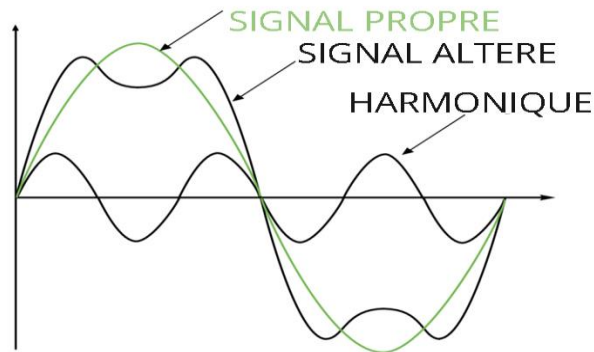
### **I.8.2. Nombres de composants nécessaires**

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multi-niveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires. [17]

## **I.9. Définition des harmoniques**

Les harmoniques sont des composantes de fréquence multiples de la fréquence fondamentale d'un signal électrique alternatif. Elles sont générées par des charges non linéaires et entraînent une déformation de l'onde sinusoïdale idéale du réseau électrique. La présence d'harmoniques dans un réseau peut engendrer divers effets négatifs, tels que des pertes

énergétiques accrues, une surchauffe des équipements et une diminution de la qualité de l'alimentation électrique.



**Figure I-10.**Signal composite (propre, altère, harmonique)

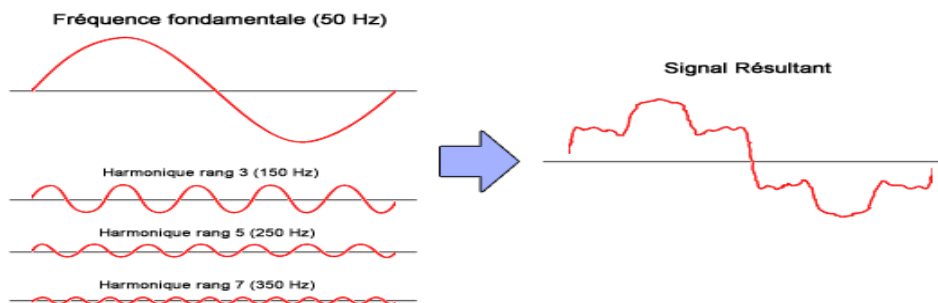
L'équation de la décomposition harmonique présentée par cette fonction:

$$y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} y_k * \sqrt{2} \sin(k\omega t - \varphi_k) \tag{I-1}$$

- ❖  $Y_0$  : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle ci-après,
- ❖  $Y_k$  : valeur efficace de l'harmonique de rang h,
- ❖  $\omega$  : vitesse angulaire de la fréquence fondamentale,
- ❖  $\varphi_k$ : phase de la composante harmonique à  $t = 0$ .

La valeur efficace du signal exprime par [18]:

$$y_{effe} = \sqrt{y_0^2 + y_1^2 + y_2^2 + y_k^2 + \dots} \tag{I-2}$$



**Figure I-11.**Décomposition harmonique d'un sigle déformé

### I.10. La distorsion d'harmonique global THD

La distorsion harmonique totale (THD) est un indicateur de la distorsion d'un signal. Il est largement utilisé en génie électrique et dans la gestion des harmoniques en particulier. Pour un signal Y, le THD est défini comme suit [19]:

$$THD = \sqrt{\sum_{K=2}^{K=H} \left(\frac{y_k}{y_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_k^2}}{y_1} \quad (I-3)$$

THD est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques du signal Y, ramenée à la composante fondamentale  $Y_1$ .

H est généralement pris égal à 50, mais peut être limité dans la plupart des cas à 25

### I.11. Range harmonique

Le rang harmonique désigne l'ordre d'une harmonique par rapport à la fréquence fondamentale d'un signal électrique alternatif. Il est défini comme le rapport entre la fréquence de l'harmonique et la fréquence fondamentale, il est défini par :

$$rang = \frac{f_h}{f_1} \quad (I-4)$$

$f_h$ : fréquence d'harmonique       $f_1$ : fréquence fondamentale

### I.12. Classification des harmoniques selon leur rang

- Harmoniques paires ( $n = 2, 4, 6, \dots$ ) : Elles apparaissent généralement en raison d'un déséquilibre ou d'un défaut dans le réseau, mais sont souvent moins problématiques.
- Harmoniques impaires ( $n = 3, 5, 7, \dots$ ) : Elles sont plus courantes et plus nuisibles, notamment les rangs 3, 5, 7, 9, 11, qui affectent fortement la qualité de l'alimentation électrique.
- Harmoniques de rang 3 et multiples ( $3^e, 6^e, 9^e, \dots$ ) – dites harmoniques triphasées : Elles s'additionnent dans le neutre des réseaux triphasés et peuvent provoquer des surcharges dans les câbles neutres.

### I.13. Impact des harmoniques de rang élevé:

- 1) Détérioration de la qualité de l'onde sinusoïdale → Augmente la distorsion harmonique totale (THD).
- 2) Échauffement des transformateurs et moteurs → Diminue leur durée de vie.
- 3) Résonance avec les composants du réseau → Peut provoquer des surtensions ou des dysfonctionnements.
- 4) Baisse du rendement énergétique → Augmente les pertes Joule et les coûts d'exploitation.

### **I.14. Comprendre les harmoniques dans les onduleurs**

Les harmoniques dans un onduleur sont des composantes de fréquence multiples de la fréquence fondamentale du signal de sortie. Elles sont générées par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur et peuvent causer des perturbations dans les systèmes électriques.

### **I.15. Réduction des Harmoniques**

Pour atténuer ces harmoniques, plusieurs techniques sont utilisées:

1. *Filtrage*: Utilisation de filtres passifs ou actifs pour éliminer les fréquences indésirables.
2. *Augmentation de la fréquence de commutation*: Permet de réduire les harmoniques de basse fréquence.
3. *Techniques de commande avancées*: Comme la modulation sinusoïdale (SPWM) qui permet d'obtenir une forme d'onde plus proche du sinus idéal.

### **I.16. Avantages et inconvénients des harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux**

Les onduleurs multi-niveaux sont utilisés pour améliorer la qualité de la tension de sortie et réduire les harmoniques par rapport aux onduleurs classiques. Cependant, les harmoniques restent un facteur clé influençant leur performance.

#### **I.16.1. Avantages des Harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux**

Réduction des Harmoniques de Basse Fréquence

- Comparé aux onduleurs classiques à deux niveaux, les onduleurs multi-niveaux produisent une tension plus proche d'une sinusoïde, ce qui réduit la distorsion harmonique totale (THD).
- Meilleure Qualité de l'Énergie
- Moins d'harmoniques signifie moins de perturbations dans le réseau électrique et une meilleure compatibilité avec les charges sensibles (ex.: moteurs, transformateurs).
- Réduction des Pertes et Échauffements
- Une diminution des harmoniques réduit les pertes dans les équipements électriques (moteurs, câbles, transformateurs), prolongeant ainsi leur durée de vie.
- Efficacité Énergétique Améliorée
- Moins d'harmoniques signifie moins de pertes par effet Joule, ce qui améliore le rendement global du système.

**I.16.2. Inconvénients des Harmoniques dans un Onduleur Multi-Niveaux**

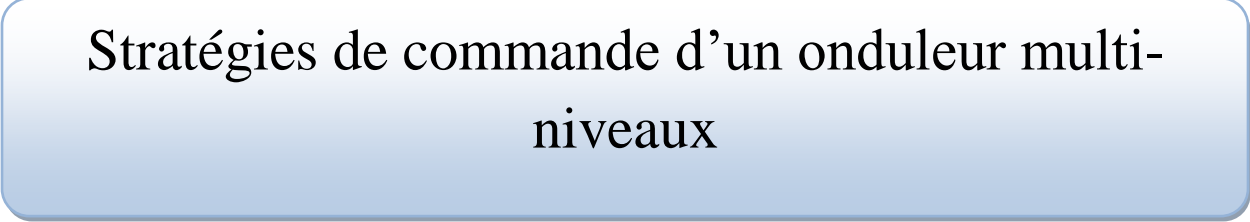
- ✓ Présence d'Harmoniques de Haute Fréquence
  - Bien que les harmoniques de basse fréquence soient réduites, des harmoniques de plus haute fréquence peuvent apparaître, nécessitant des filtres spécifiques.
- ✓ Complexité de Commande et de Modulation
  - Les stratégies de modulation (ex.: PWM sinusoïdal, SVPWM) deviennent plus complexes pour minimiser les harmoniques, ce qui nécessite des processeurs plus puissants.
- ✓ Besoin de Filtres Supplémentaires
  - Même si les harmoniques sont réduites, des filtres passifs ou actifs sont souvent nécessaires pour améliorer davantage la qualité du signal.
- ✓ Augmentation du Coût et de la Taille
  - L'utilisation de plusieurs niveaux de tension implique plus de composants (transistors, condensateurs, diodes), ce qui augmente la complexité, le coût et la taille de l'onduleur.

**Conclusion:**

Au cours de ce chapitre, nous avons tout d'abord passé en revue les diverses topologies d'onduleurs multi niveaux. L'onduleur en cascade a attiré notre intérêt. Ce dernier suscite l'intérêt en raison de sa capacité à produire des ondes de haute qualité tout en nécessitant un nombre limité de composants électriques. Le mérite de ce mémoire, qui porte sur le contrôle d'un onduleur asymétrique en cascade à 9 niveaux, réside dans l'identification et la présentation des méthodes de modulation les plus appropriées, qui seront détaillées au second chapitre.



## Chapitre II



Stratégies de commande d'un onduleur multi-niveaux

## chapitre II

### II.1. Introduction

La commande de l'onduleur est la partie du système qui contrôle la conversion du courant continu en courant alternatif. Elle est généralement réalisée à l'aide d'un microcontrôleur qui surveille en permanence l'état de l'onduleur et ajuste les signaux de commande pour garantir une conversion efficace et fiable. La commande de l'onduleur peut également inclure des fonctionnalités de protection et de sécurité, telles que la détection des courts-circuits, des surtensions et des surintensités, ainsi que des mécanismes de limitation de la tension de sortie pour protéger les équipements connectés.

Parmi les différentes stratégies de commande, la technique d'élimination des harmoniques dans onduleur hybride a suscité un grand intérêt dans les applications industrielles.

Dans ce chapitre on a présenté les différentes stratégies pour la commande d'un onduleur asymétrique en cascade multi-niveaux.

### II.2. Classifications des stratégies des commandes

Plusieurs techniques de commande ont été développées pour les onduleurs multi-niveaux comprenant: l'élimination des harmoniques, MLI sinusoïdal (modulation de largeur d'impulsion) (SPWM Pulse With Modulation en anglais), et la modulation vectorielle connue sous le nom space vector modulation (SVM), sont considérées comme les trois principales commandes [20].

Les méthodes de modulation employées dans les onduleurs multi-niveaux peuvent être classifiées selon leurs fréquences de commutation en trois types: à fréquence fondamentale, mixte, et à haute fréquence de commutation [21].

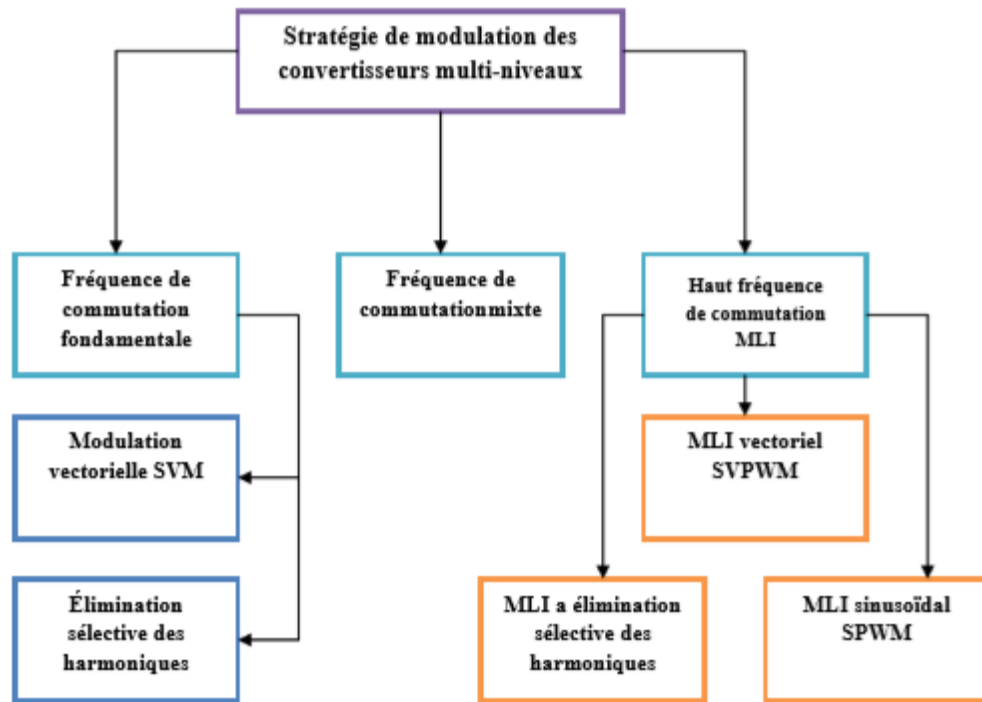


Figure II-1.classification des stratégies de commande des onduleurs multi-niveaux

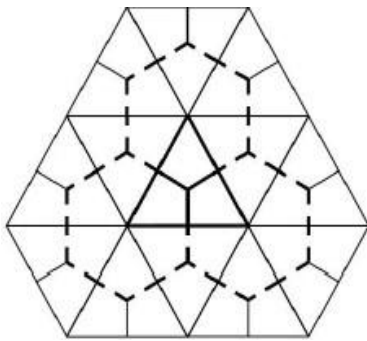
## II.3. Commutation à fréquence fondamentale

### II.3.1. Commutation à modulation vectoriel(SVM)

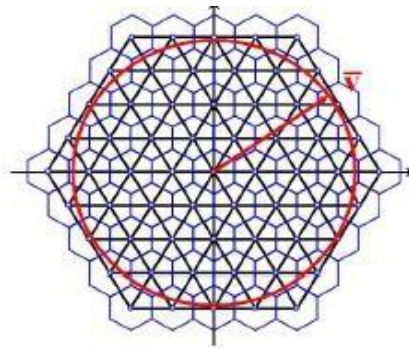
Commutation à modulation vectoriel (SVM), comme son nom l'indique est une technique de modulation vectorielle. Une stratégie qui a été utilisée convenablement dans des onduleurs à trois niveaux. SVM est une méthode de commutation de fréquence fondamentale et exécute un ou deux commutations pendant un cycle de tension de sortie pour produire une forme d'onde en escalier. Dans la modulation à élimination sélective des harmoniques la sortie est une onde en escalier avec la durée de chaque phase est optimisée pour annuler les harmoniques spécifiques. Cependant le nombre d'harmoniques qui peuvent être éliminés en même temps est proportionnel au nombre de niveaux de convertisseur. Les modulations de fréquence mixte sont ceux dans lesquelles les commutateurs commutent à la fréquence différente, et il est particulièrement approprié aux convertisseurs hybrides où les différentes cellules peuvent facilement commuter à différentes fréquences ou aux convertisseurs asymétriques [22].

Dans la figure.2(a)un seul élément de cette grille à savoir un triangle équilatéral est mis en évidence. Ses médianes représentées sur la figure possèdent une propriété particulièreils subdivisent le triangle en trois zones définissant les ensembles des points qui sont les plus proches de l'un des sommets. En dessinant les médianes de tous les triangles de la grille, crée des mailles hexagonales centrées en chaque sommet et détermine les ensembles de points les plus proches de chaque vecteur a généré [22].

La figure.2(b) montre les mailles hexagonales d'un convertisseur 5-niveaux, ainsi que tous les triangles équilatéraux de la grille et le vecteur générique  $V$ . Certes, le vecteur va se mettre dans l'une des régions hexagonales déterminant, de cette façon son plus proche vecteur a généré qui doit être appliqué à la sortie. Dans une période de temps, comme dans le cycle MLI, SVM ne produit pas un vecteur de sortie ayant la même valeur de référence dc. Ceci détermine une erreur qui n'est pas compensée, mais le but de la modulation est de choisir parmi tous les vecteurs possibles celui qui minimise l'erreur. Si la référence est un vecteur tournant à une vitesse angulaire constante la forme d'onde de tension de sortie sera en forme d'escalier symétrique [22].



a) définition des zones de proximité



b) Choix du vecteur.

**Figure II-2.** Principe de la modulation SVM d'un onduleur 5-niveaux.

### II.3.2. Modulation à élimination sélective des harmoniques

Le principe de cette stratégie est basé sur le développement en série de Fourier de la tension  $u_s$  à la sortie du convertisseur à pas uniforme ( $\Delta u = u_{d1}$ ) (Figure 2.2) Cette tension admet une symétrie par rapport au demi et au quart de la période. De ce fait, les composantes harmoniques paires en cosinus et en sinus sont nulles. La décomposition en série de Fourier de cette tension est donnée par la relation suivante [23]:

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

$$u_n = \frac{4U_{d1}}{4\pi} \sum_{i=1}^p \cos(n\theta_i) \quad \text{(II-2)}$$

Avec :

- ✓  $U_n$ : Amplitude de l'harmonique de rang  $n$  ( $n$ =impair).
- ✓  $P$ : Nombre total de commutation sur un quart de période  $P=(N-1)/2$ .
- ✓  $\theta_i$ : Angles de commutation ( $i=1,2,\dots,p$ )

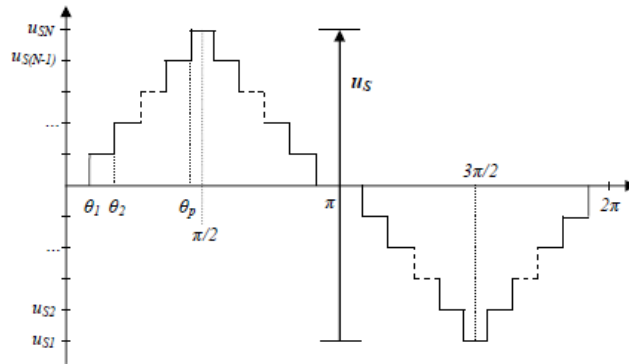


Figure II-3. Exemple de tension de phase multi-niveau

### II.3.3. Techniques de Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM - Pulse Width Modulation):

Historiquement, les premières méthodes MLI analogiques ont été développées. La plus avancée est la modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (CB-PWM ou SPWM). Le principe de fonctionnement de cette méthode repose sur la comparaison de signal de tension commandée avec le signal porteur triangulaire. Le résultat de cette opération est signal rectangulaire. La largeur du rectangle est proportionnelle à la valeur moyenne du signal commandé. Le signal de sortie de cette opération peut être directement transmis au conducteur du semi-conducteur, voir figure. 3.2. Fonctionnant avec une fréquence constante de signal porteur concentrer les harmoniques de tension autour de la fréquence de commutation (qui est double fréquence porteuse) et multiple de la fréquence de commutation [24].

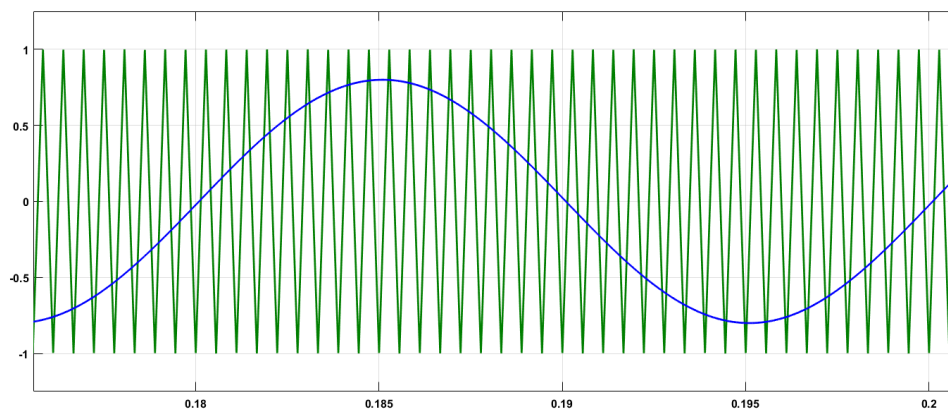
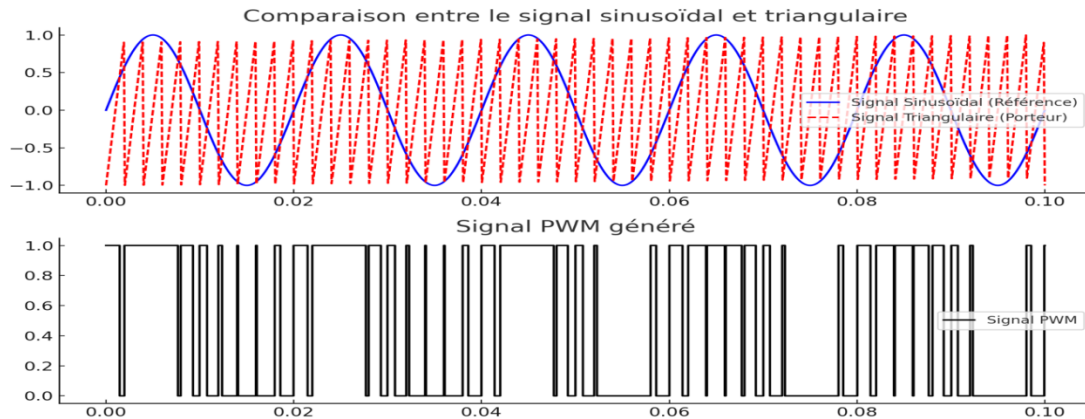


Figure II-4 présente une commande Largeur d'Impulsion.

### II.3.4. Modulation Vectorielle PWM (SVPWM –Space Vector PWM):

La modulation sinusoïdale par largeur d'impulsion (SPWM - Sinusoïdal Pulse Width Modulation) est une technique de modulation utilisée dans les onduleurs pour convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC) de forme quasi-sinusoïdale. Elle consiste

à comparer une onde sinusoïdale de référence (signal de commande) avec un signal triangulaire de fréquence plus élevée (signal porteur). Lorsque la valeur du signal sinusoïdal est supérieure à celle du signal triangulaire, un signal de commande active l'interrupteur de l'onduleur.



**Figure II-5** comparaison entre le signal sinusoïdal et triangulaire.

### II.3.5. La modélisation par MLI vectoriel:

La modulation vectorielle, dite "Space Vector PWM", 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. Elle est conduite en synchronisme sur les trois phases Cette technique de MLI suit les principes suivants :

- Le signal de référence est échantillonné à intervalles réguliers  $T$  (MLI régulière),
- Pour chaque phase, réalisation d'une impulsion de largeur  $T$  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.

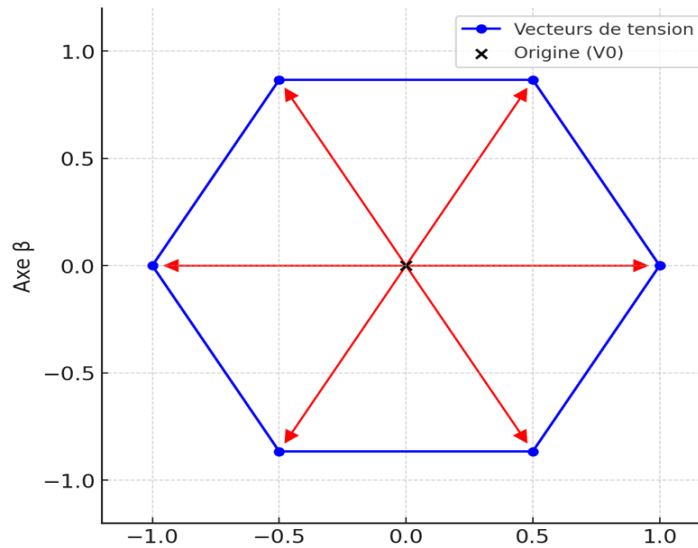


Figure II-6 représente la modélisation par MLI vectoriel.

- Les flèches rouges représentent les vecteurs de tension fondamentaux dans le plan  $\alpha$ - $\beta$ .
- Ces six vecteurs actifs ( $V_1$  à  $V_6$ ) correspondent aux différentes combinaisons de commutation des interrupteurs du pont triphasé.
- Le point noir ( $V_0$ ) est l'état de repos où tous les interrupteurs sont ouverts ou fermés simultanément.

Le schéma de principe MLI vectoriel est présenté dans la figure (II.11)

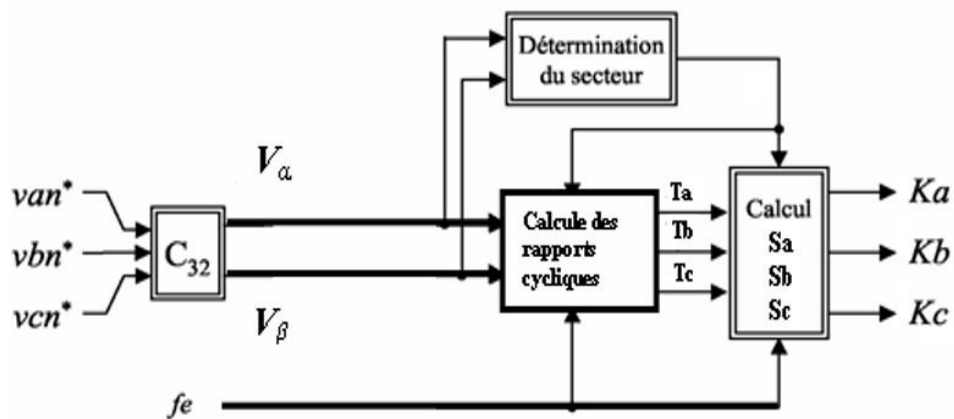


Figure II-7 . Schéma de principe de la M.L.I vectorielle.

## II.4 Élimination sélective des harmoniques (SHE)

La méthode d'élimination harmonique sélective est également appelée méthode fondamentale de fréquence de commutation basée sur la théorie d'élimination harmonique proposée par Patel [25][26]. Elle est une méthode MLI préprogrammée. Les points de commutation doivent être calculés hors ligne pour une gamme d'indices de modulation et stockés dans une table de consultation pour être utilisés par la modulation du convertisseur [27].

La stratégie de modulation de largeur d'impulsion d'élimination harmonique sélective est basée sur la décomposition de série de Fourier de la forme d'onde générée par un convertisseur de puissance, la forme d'onde peut être exprimée sous cette forme [27] :

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t] \quad (\text{II-3})$$

$$a_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \quad (\text{II-4})$$

pour  $n$  impair est l'ordre harmonique

$a_n$  est le coefficient de Fourier,

$N$  est le nombre d'angles de commutation par quart

$E$  est l'amplitude de la source continue.

Étant donné que la forme d'onde analysée est symétrique en quart et demi d'onde, cette équation peut être réduite à celle indiquée en (II-4), ceci est dû au fait que  $a_n$  vaut zéro pour toutes les valeurs paires de  $n$ , et  $b_n$  vaut zéro pour toutes les valeurs de  $n$  [27][28].

Les angles de conduction,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s$ , peuvent être choisis de telle sorte que la distorsion harmonique totale de la tension soit minimale. Normalement, ces angles sont choisis de manière à annuler les harmoniques de basse fréquence prédominantes.

Pour assurer une forme d'onde de quart symétrique et physiquement correcte, les angles de commutation dans la forme d'onde de quart doivent respecter la contrainte suivante [29] :

$$\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \dots < \theta_N < \frac{\pi}{2} \quad (\text{II-5})$$

Pour un onduleur à neuf niveaux, quatre est le nombre de niveaux de tension en quart d'onde. Cela signifie que le nombre d'harmoniques pouvant être éliminées est de trois. les angles de commutation  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  et  $\theta_4$  doivent être calculés d'une manière conçue permettant le contrôle du composant fondamental et l'élimination des harmoniques 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup> [29].

En résolvant le système suivant d'équations non linéaires (II-4), ces angles de commutation peuvent être déterminés [29] :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{p=4} \cos(\theta_i) = \pi r \\ \sum_{i=1}^{p=4} \cos(n\theta_i) = 0 \text{ for } n \in \{5, 7, 11\} \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

Ou  $r = U_1/4U_{d1}$  est le taux de modulation

$$\begin{cases} H_1 = \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) = M \\ H_5 = \cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) + \cos(5\theta_4) = 0 \\ H_7 = \cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) + \cos(7\theta_4) = 0 \\ H_{11} = \cos(11\theta_1) + \cos(11\theta_2) + \cos(11\theta_3) + \cos(11\theta_4) = 0 \end{cases} \quad (\text{II-7})$$

Où  $M = ((N - 1)/2)r/4$ ,  $M$  est l'indice de modulation.

La solution de (II-7) devrait également satisfaire la contraintes suivante:

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \pi/2 \quad (\text{II-8})$$

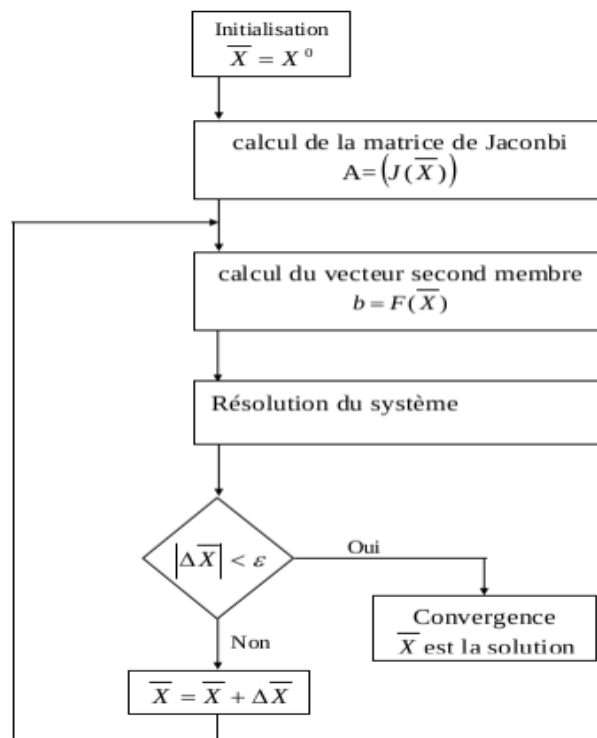
Pour la méthode d'optimisation, qui est choisie pour mesurer l'efficacité de supprimer le rang harmonique choisi en maintenant l'élément fondamental à une valeur prédéfinie, une fonction objective est alors requise. Par conséquent, cette fonction objective est représentée comme suit [29] :

$$F(\theta) = F(\theta_1 \wedge \theta_4) = \left( \sum_{i=1}^{p=4} \cos(\theta_i) - \pi r \right)^2 + \sum_{i=5,7,11} U_i^2 \quad (\text{II-9})$$

Des angles de commutation optimaux sont obtenus en minimisant l'équation (II-9) soumise à la contrainte (II-8) et, par conséquent, il atteint le profil harmonique nécessaire. La non-linéarité de l'ensemble transcendantal d'équations (II-6) est la principale difficulté parce que de nombreuses méthodes itératives comme la méthode de Newton- Raphson luttent contre les difficultés de convergence et d'autres approches sont compliquées, c'est pour ça on propose des méthodes avancées comme les algorithmes génétiques, Réseaux de neurones artificiels, Technique d'optimisation par essais de particules, Recherche locale, Évolution différentielle...

#### II.4.1. Méthode de Newton-Raphson:

Pratiquement, les méthodes d'analyse, utilisées pour résoudre une équation algébrique non linéaire implicite de la forme suivante  $f(x) = 0$  sont basées sur la méthode de Newton- Raphson. Cette méthode de Newton-Raphson d'analyse non linéaire détermine itérativement la solution à condition que la dérivée existe. Ainsi, partant d'une solution  $x(0)$  assez proche de la vraie solution  $x$  jusqu'à ce que la différence, entre les deux valeurs consécutives, soit négligeable. L'algorithme de la méthode est présenté sur le schéma de la figure suivante:



**Figure II-8** Organigramme de l'algorithme de Newton-Raphson.

## II.5. La commande heuristique

Offre une approche alternative, basée sur des techniques inspirées de l'intuition humaine et de stratégies empiriques. Contrairement aux méthodes déterministes, les heuristiques ne garantissent pas toujours la meilleure solution absolue, mais elles permettent d'obtenir des solutions satisfaisantes en un temps réduit. Elles sont donc particulièrement adaptées aux problèmes d'optimisation difficiles, où les méthodes classiques sont trop coûteuses en temps de calcul. Parmi les stratégies heuristiques utilisées en commande des systèmes électriques, on retrouve :

- ❖ Les algorithmes génétiques (GA), inspirés de la sélection naturelle,
- ❖ L'optimisation par essaim de particules (PSO), basée sur le comportement collectif des oiseaux ou des poissons

### II.5.1. Les algorithmes génétiques (GA) :

L'algorithme génétique (GA –Genetic Algorithm) est une méthode d'optimisation inspirée du processus d'évolution biologique. Il est particulièrement adapté aux systèmes complexes tels que les onduleurs multi-niveaux hybrides, où la commande classique peut être inefficace en raison de la non-linéarité du système et du grand nombre de paramètres à ajuster.

Il permet d'optimiser les angles de commutation, la fréquence de découpage et les paramètres de modulation en recherchant la meilleure solution possible parmi un grand nombre de configurations possibles. Il améliore ainsi la performance globale de l'onduleur hybride en réduisant les pertes et en améliorant la qualité de l'onde de sortie.

Un algorithme génétique à codage réel cherche les extrema d'une fonction définie sur un espace de recherche selon les phases principales suivantes [30][31]:

1. *Initialisation*: Générer aléatoirement une population initiale de N chromosomes répartie sur tout l'espace de recherche,
2. *Evaluation*: Evaluer la fonction d'adaptation de chaque chromosome,
3. *Sélection*: Créer une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection basée sur le Principe de la survie du plus performant,
4. *Reproduction* : Effectuer des croisements et mutations entre les chromosomes de la nouvelle Population,
5. *Test*: Si le critère d'arrêt est satisfait, stop, et retourner la meilleure solution,
6. *Boucle* : Retour à la phase d'évaluation.

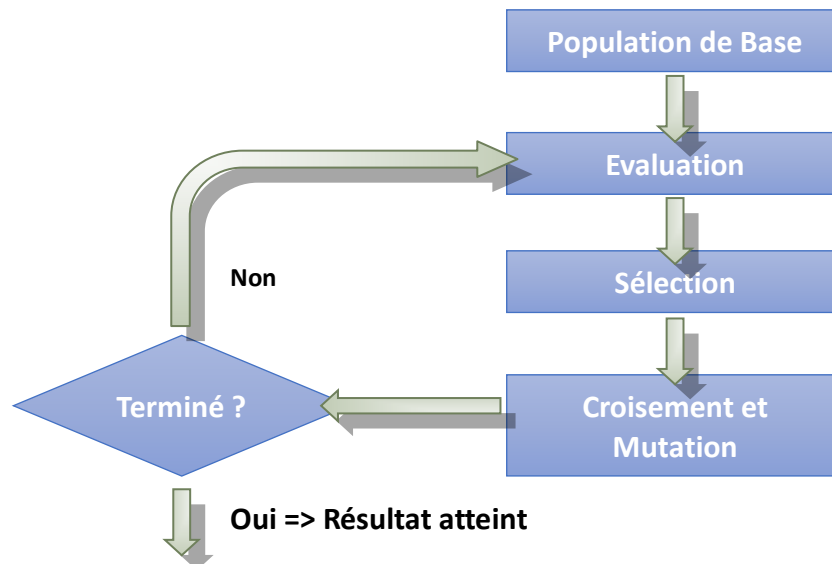


Figure II-9 Organigramme de l'algorithme génétique (AG).

### II.5.2. Stratégie d'élimination d'harmoniques par les AG

Le pseudo code adopté pour le calcul des angles de commutation se résume dans les étapes suivantes [32][33][34][35] :

**Étape 1** : Génération aléatoire d'une population initiale de  $N_{ch}$  individus en tenant compte de la contrainte (II.8).

génération = 0

**while** génération < génération max (nombre maximal des générations)

Génération = génération + 1

**Etape 2 :** Evaluation de la fonction d'adaptation (Fitness) de chaque individu selon

$$l'équation : F(\theta) = F(\theta_1 \wedge \theta_4) = \left( \sum_{i=1}^{p=4} \cos(\theta_i) - \pi r \right)^2 + \sum_{i=5,7,11} U_i^2$$

**Etape 3 :** Sélection des  $N_{élites}$  premières élites basées sur leur adaptation pour la reproduction dans la nouvelle population

**Etape 4 :** Le reste de la population de taille élites  $N_{ch} - N_{élites}$  est généré moyennant la sélection par tournoi à deux avec une probabilité  $p_{tournoi}$

*Opération* = nombre aléatoire tiré dans  $[0, 1]$

**if** *Opération* < *Probabilité de croisement*  $p_{cr}$

Sélection aléatoire de 2 individus (parents) parmi les individus de la population sans élites

**Etape 5 :** Croisement des deux parents pour donner naissance à deux enfants

**Else if** *Opération* < *Probabilité de mutation*  $p_{m1}$

**Etape 6 :** mutation d'un individu choisi aléatoirement

**Else if** *Probabilité de croisement*  $p_{cr}$  < *Opération* <  $p_{cr} + \text{Probabilité de mutation } p_{m2}$

**Etape 7 :** mutation de l'un des élites choisies aléatoirement avec un taux de mutation  $\tau_{m1}$   
else

**Etape 8 :** mutation du meilleur individu avec un taux de mutation  $\tau_{m2}$

**end if**

Il faut s'assurer que les solutions retenues ne doivent pas violer la contrainte suivante :  $0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \pi/2$

**end while**

Retourner la meilleure solution.

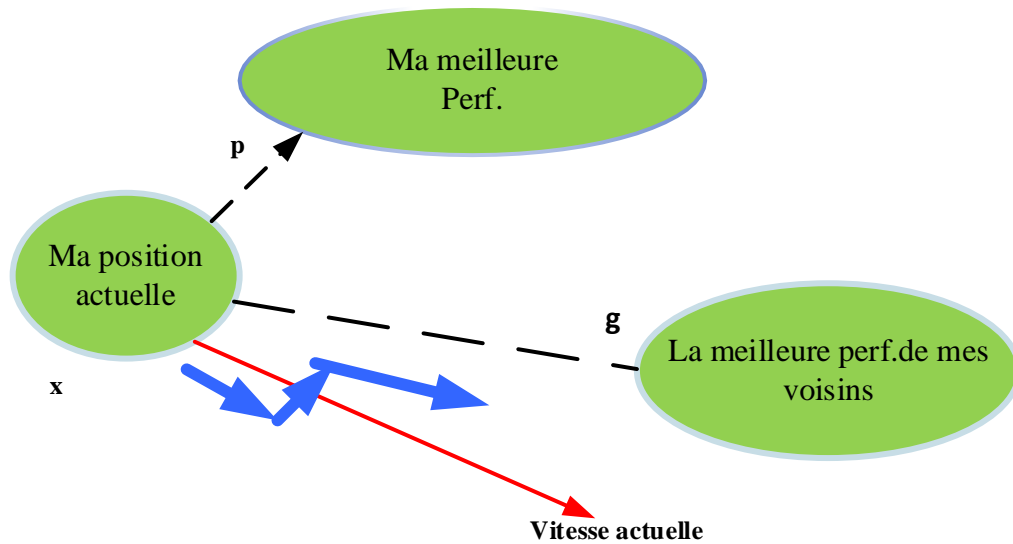
## II.6. L'optimisation par essaim de particules (PSO) :

L'optimisation par essaim de particules (PSO – Particle Swarm Optimization) est une méthode heuristique inspirée du comportement collectif des groupes d'animaux, comme les bancs de poissons ou les volées d'oiseaux. Introduite par Kennedy et Eberhart en 1995, cette approche repose sur la coopération entre plusieurs agents (appelés particules) qui explorent un espace de recherche pour trouver une solution optimale à un problème donné. Contrairement aux méthodes d'optimisation classiques, qui nécessitent des dérivées ou des propriétés analytiques précises, le PSO est simple, rapide et efficace pour résoudre des problèmes complexes et non linéaires. Il est largement utilisé en électronique de puissance, intelligence artificielle et ingénierie des systèmes pour optimiser des paramètres de commande, Elle s'inspire fortement des relations grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir des longues distances et qui doivent donc optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, comme par exemple la formation en V.



**Figure II-10** Volé d'oiseaux.

La théorie de la socio-psychologie suggère que les individus sont influencés par leur comportement passé et par le succès de leurs voisins dans le réseau social et non pas nécessairement dans l'espace [35][36]. Dans ce contexte, chaque particule interroge chaque congénère de proximité sur sa meilleure performance. Sur la base des informations dont elle dispose, chaque particule modifie sa vitesse d'une manière stochastique en fonction de sa propre vitesse actuelle, sa meilleure performance et la meilleure performance de ses voisins.



**Figure II-11** Principe de déplacement d'une particule.

Chaque membre de l'essaim conserve une connaissance partielle de sa meilleure position  $p_i$ , et la meilleure position de toutes les particules de l'essaim  $p_g$  et ajuste dynamiquement sa propre vitesse en se basant sur ces informations. L'ajustement de vitesse est basé sur les

comportements historiques des particules eux-mêmes aussi bien que leurs compagnons. La particule la mieux placée dans une région proche de l'endroit de la nourriture (optimum global) va motiver l'essaim d'explorer de proximité cette région et les régions adjacentes. De cette façon, les particules tendent à se rapprocher davantage de cet optimum d'une étape à l'autre durant le processus de recherche. Dans chaque étape on définit une nouvelle meilleure particule qui, à son tour, va attirer vers elle l'ensemble de l'essaim [37].

Pour le problème de commutation optimal, chaque particule de la population est composée d'angles de commutation par quart de forme d'onde. Pour commencer l'opération de recherche, les angles de commutation sont générés aléatoirement de manière à satisfaire la contrainte exprimée en (II.8) pour le nombre de population choisi. En utilisant les valeurs générées, les harmoniques individuelles sont calculées, ce qui représente l'aptitude d'un point de recherche. Le meilleur ensemble d'angles de commutation parmi la population à une certaine itération est appelé la meilleure solution actuelle (*pbest*). La meilleure solution jusqu'à la présente itération est appelée la meilleure solution globale (*gbest*). À chaque itération, de nouveaux points de recherche sont créés à partir des points courants et des informations concernant les solutions *pbest* et *gbest* en utilisant les équations suivantes [32][37] :

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 \text{rand}(pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \text{rand}(gbest_i^k - x_i^k) \quad (\text{II-10})$$

Et

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (\text{II-11})$$

Où

$k$ : est le numéro d'itération

$x_i^k$ : est la position actuelle de la particule  $i$  à l'itération  $k$ ,

$v_i^{k+1}$ : est la vitesse courante de la particule  $i$  à l'itération  $k$ ,

$c_1, c_2$ : sont les coefficients d'accélération,

$\text{rand}_1, \text{rand}_2$ : sont des nombres aléatoires de distribution uniforme sur  $[0,1]$ ,

$w$ : est le coefficient d'inertie.

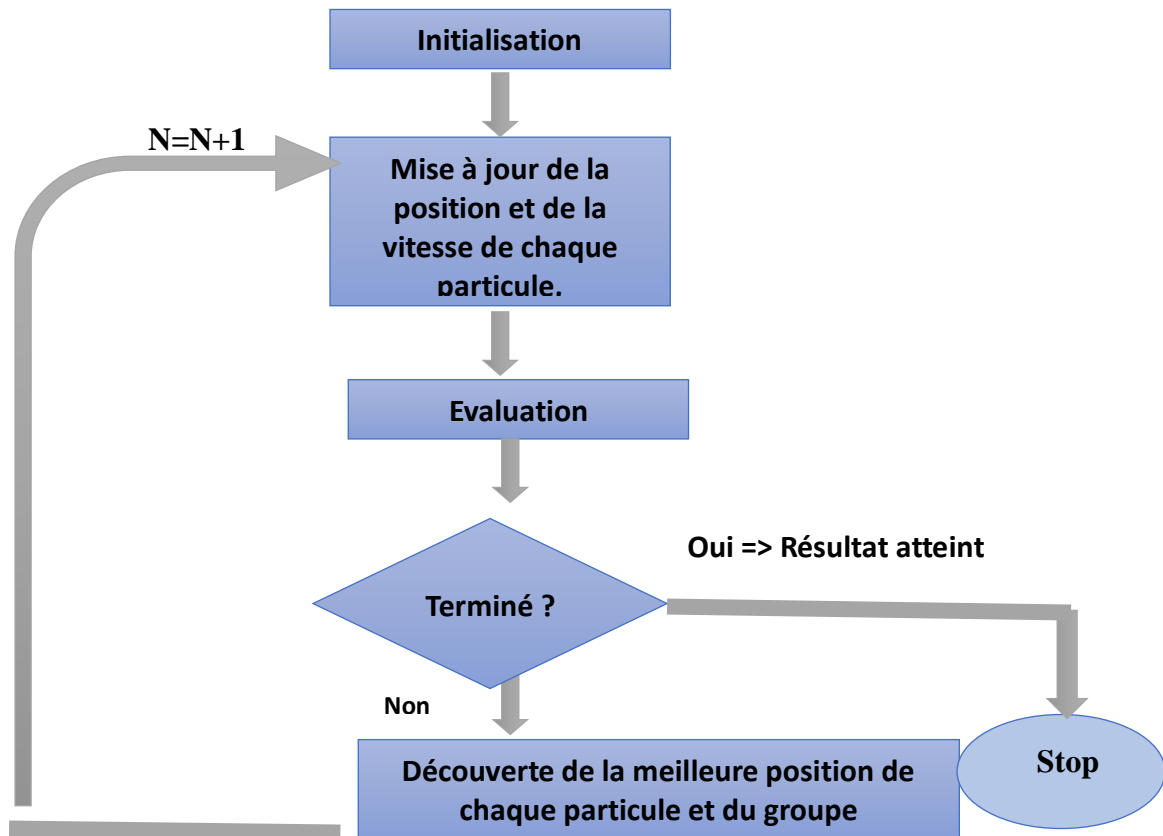


Figure II-12 Organigramme d'essaim particulaire PSO.

### II.6.1 Stratégie d'élimination d'harmoniques par PSO

Le but de l'algorithme PSO est d'optimiser une fonction en trouvant sa valeur maximale ou minimale dans une fonction donnée. L'application de PSO au problème d'élimination des harmoniques de l'onduleur asymétrique triphasé à neuf niveaux inclut la recherche de l'équation [38][40] :

$$F(\theta_1 \theta_2 \dots \theta_n) = (\sum_n^p \cos(\theta_n) - M)^2 + (\sum_{n=1}^p \cos(5\theta_n))^2 + (\sum_{n=1}^p \cos(7\theta_n))^2 + (\sum_{n=1}^p \cos(11\theta_n))^2 \quad (\text{II-11})$$

Les solutions obtenues doivent satisfaire la contrainte suivante :

$$0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \pi/2 \quad (\text{II-12})$$

Le code pseudo utilisé dans ce cas est [7]:

**Étape 1:** Initialisation pour chaque particule:

- Initialiser la position  $\theta_i(0) = [\theta_{i1}(0), \theta_{i2}(0), \dots, \theta_{ip}(0)]$  de chaque particule avec des angles aléatoires respectant la contrainte (3.10)
- Initialiser la Vitesse  $v_i(0) = [v_{i1}(0), v_{i2}(0), \dots, v_{ip}(0)]$  de chaque particule à des valeurs aléatoires ;
- Initialiser la meilleure fonction objectif  $F_{p\_besti}$  de particule  $i$ .

**end for**

- Initialiser la valeur de  $F\_g_{best}$  de la l'essaim

**while** nombre maximal d'itérations non atteint et/ou critère de précision non atteint

$$itération = itération + 1$$

- Calculer le coefficient d'inertie  $w$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{itération_{max}} itération$$

Etape 2: Evaluation de la fonction objective

Calculer la valeur de la fonction  $fitness_i$  de chaque particule  $i$  de l'essaim en utilisant l'équation (II-11).

**Etape 3:** Mise à jour de la meilleure position de la particule  $i$

**if**  $F_i < F\_pbest$

**then**  $F\_pbest = F_i$  and  $\theta_{pbest} = \theta_i$

**end if**

**Etape 4:** Mise à jour de la meilleure position de l'essaim

**if**  $F_i < F\_gbest$

**then**  $F\_gbest = F_i$  and  $\theta_{gbest} = \theta_i$

**endi**

**end for**

**for** chaque particule

**Etape 5:** Mise à jour de la vitesse et de la position de la particule

$$v_{\theta i} = wv_{\theta i} + c_1r_1(\theta_{pbest} - \theta_i) + c_2r_2(\theta_{gbest} - \theta_i)$$

$$\theta_i = \theta_i + v_{\theta i}$$

**End while**

## II.7. Conclusion

Ce chapitre a examiné le problème de l'élimination sélective des harmoniques (SHE) dans les onduleurs à plusieurs niveaux. On a pris en compte diverses méthodes de résolution essentielles, notamment : NR, GA et PSO. Chaque méthode a été méticuleusement détaillée et mise en œuvre pour la suppression sélective des harmoniques dans un USAMI à neuf niveaux en cascade. Il a été prouvé qu'on peut convertir le problème du SHE en une question d'optimisation et que des algorithmes heuristiques sont facilement applicables pour y apporter une solution.

Pour connaître la méthode qui donne le THD le plus faible, une étude comparative entre PSO, GA sera prouvé dans le chapitre3.



Chapitre III



Etude comparative

## chapitre III

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons largement utilisé la simulation et les calculs pour développer les méthodes de contrôle proposées. La simulation a été réalisée avec Matlab Simulink. En particulier, nous avons utilisé une simulation d'un onduleur asymétrique en cascade à 9 niveaux avec deux algorithmes : Algorithme génétique (GA) et PSO. Cette simulation nous a permis de modéliser le comportement du système, d'évaluer différentes stratégies de commande et d'optimiser les paramètres afin de répondre aux besoins spécifiques notamment d'obtenir le meilleur THD. Dans la suite, nous avons comparé ces deux approches.

### III.2. Modélisation de l'onduleur multi niveau asymétrique en cascade

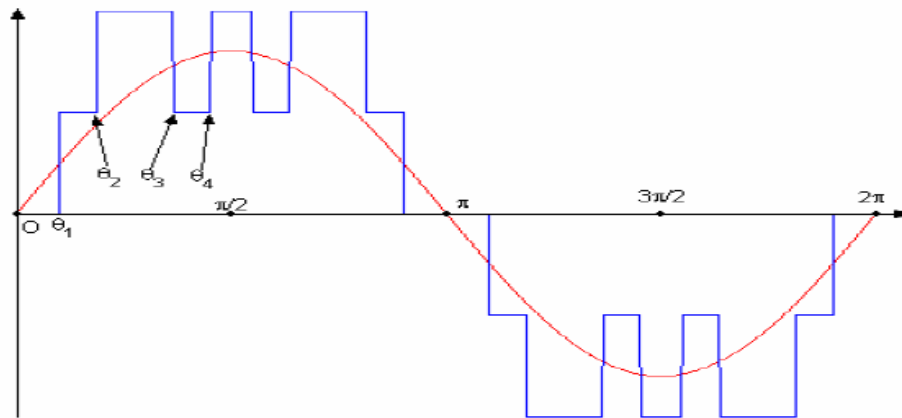
Dans ce chapitre, des simulations ont été effectuées pour tester les deux méthodes présentées dans le chapitre II en utilisant Matlab-Simulink. On va simuler une topologie d'un onduleur asymétrique multi niveau à 9 niveau en cascade pour convertir une tension continue en une tension alternative sinusoïdale en utilisant deux sources de tension continue

$V_{dc1} = 200V, V_{dc2} = 200V, V_{dc3} = 200V$  et  $V_{dc4} = 400V$ , une charge  $RL$  d'où :  $R = 5\Omega$  et  $L = 0.005H$ .

La figure III.1 montrée la forme d'onde obtenue avec un onduleur de 9-niveaux.

La figure III.2 représente le schéma bloc de l'onduleur asymétrique en cascade à 9 niveaux.

Tableau III.1. Présentes les états de commutation des interrupteurs d'un onduleur asymétrique en cascade a 9niveaux.



**Figure III-1** Forme d'onde obtenue avec un onduleur de 9-niveaux.

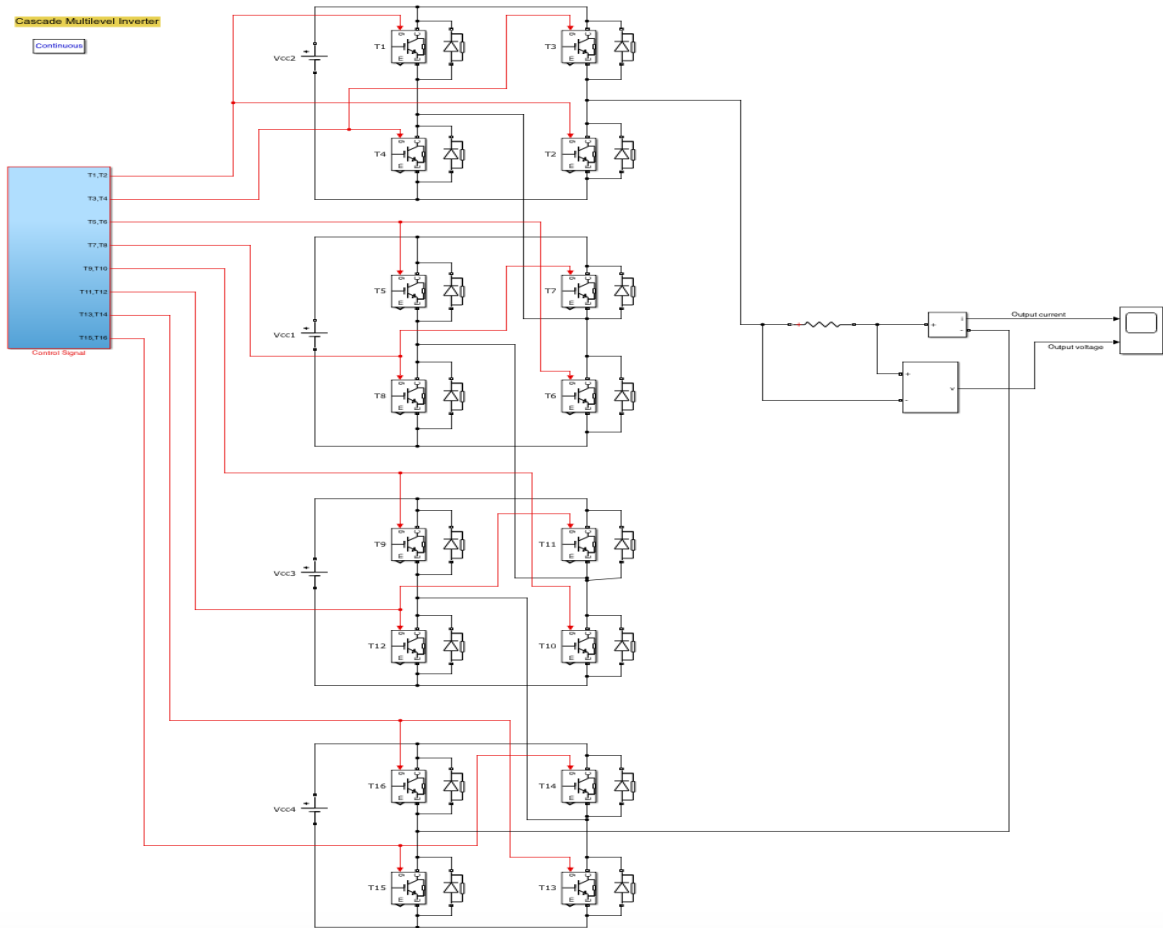


Figure III-2 Schéma bloc de simulation.

Tableau (III.1) : Les états des interrupteurs d'un onduleur asymétrique en cascade à 9 niveaux

$V_s$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$	$S_{16}$
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
2	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
3	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
4	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
-2	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
-3	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
-4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1

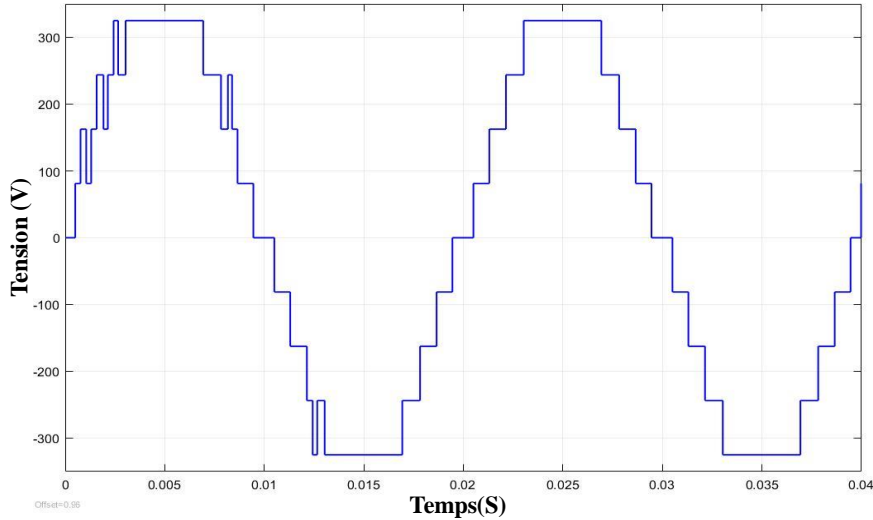
### III.3. Résultat de simulation

#### III.3.1 Résolution par la méthode PSO

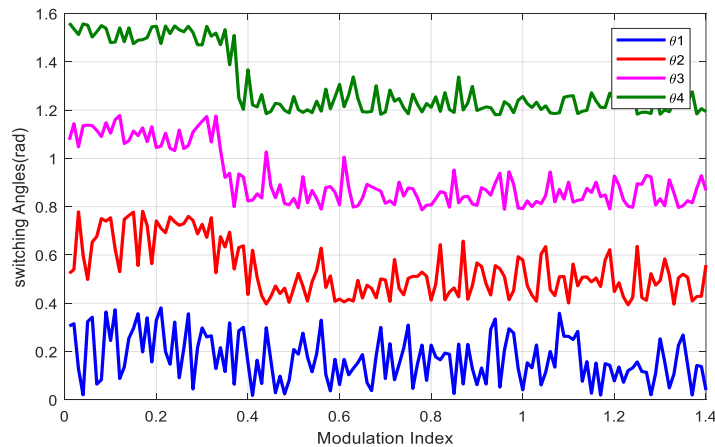
Pour obtenir les quatre angles de commutation  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  et  $\theta_4$  quatre équations SHE doivent être résolues pour l'onduleur multi-niveaux asymétrique à neuf niveaux (déjà expliqué dans le 2<sup>ème</sup> chapitre).

L'algorithme PSO est utilisé pour observer les angles de commutation pour chaque valeur de l'indice de modulation  $r$  ; aussi, pour chaque  $r$  la distorsion harmonique totale est calculée, les paramètres choisis pour la mise en œuvre de PSO sont : La taille de la population = 500 particules,  $w = 0,2$  et  $c_1 = c_2 = 2$ .

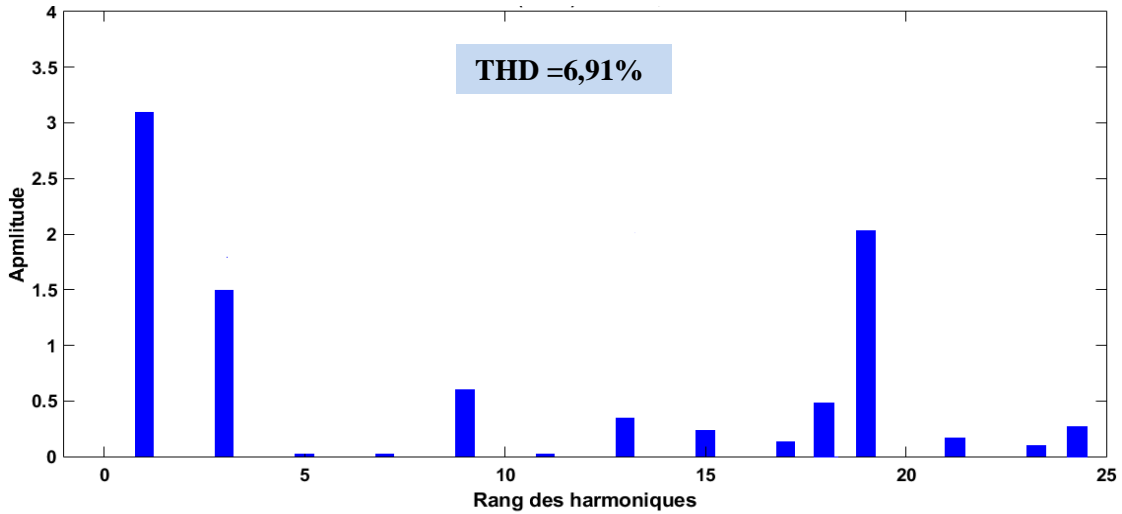
Les angles de commutation optimaux (en rad) par rapport à l'indice de modulation  $r$  avec  $r \in [0,1 1,4]$  sont es sont calculés avec un pas fin de 0,01 qui correspond à  $\theta_1 = 2.15^\circ$ ,  $\theta_2 = 32^\circ$ ,  $\theta_3 = 50.02^\circ$  et  $\theta_4 = 69.05^\circ$ .



**Figure III-3** Forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur symétrique en cascade à neuf niveaux (PSO).



**Figure III-4** Angles de commutations.



**Figure III-5** FFT Analyse de la tension de sortie (PSO).

La forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur est montrée sur la figure III.3, la figure III.4 présente les angles de commutations et le spectre harmonique est illustré à la figure III.5. L'analyse harmonique de la tension ne contient pas le 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup> harmoniques, dont son THD est égale à 6,91% .

### III.3.2. Résolution par les algorithmes génétiques

Pour calculer les angles de commutation on va utiliser l'interface des algorithmes génétiques sur Matlab illustré dans la figure III-6, en commençant par choisir « ga », ensuite de faire rentrer la fonction objective (déjà cité dans le deuxième chapitre, l'équation II.9) ainsi les contraintes (II.8) présenté par deux matrices A et B définies par :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\pi}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{III-1})$$

Les angles de commutation optimaux (en rad) par rapport à l'indice de modulation  $r$  avec  $r \in [0,1,1,4]$  sont indiqués sur la Fig.3.17 tandis que les angles sont calculés avec un pas fin de 0,01 qui correspond à  $\theta_1 = 2.13^\circ, \theta_2 = 31.97^\circ, \theta_3 = 49.72^\circ$  et  $\theta_4 = 68.37^\circ$ .

La forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur est montrée sur la figure III.7, son spectre harmonique est illustré à la figure III.8. L'analyse harmonique de la tension ne contient pas le 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup> harmoniques, dont son THD est égale à 2,06% .

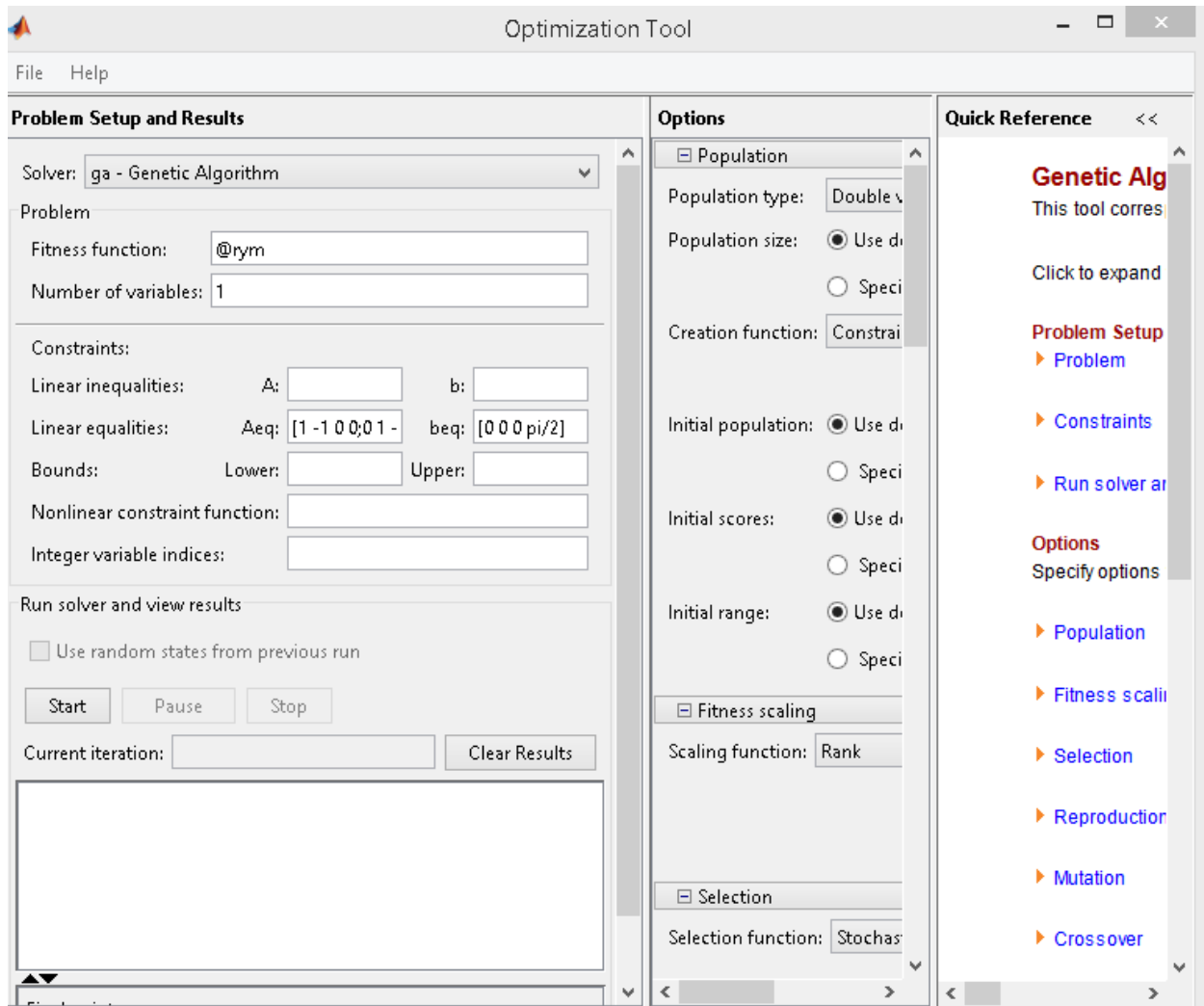


Figure III-6 L'interface de GA.

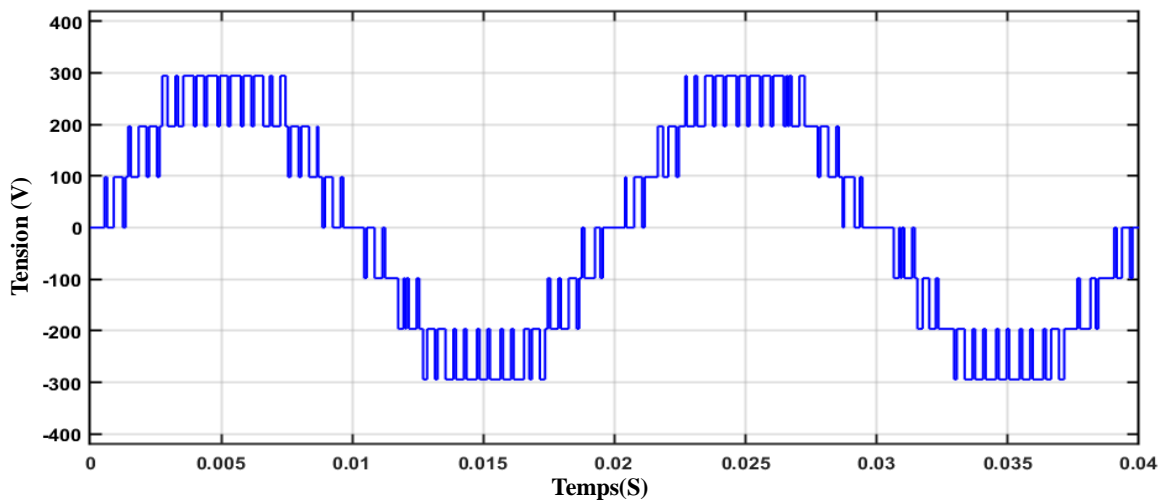


Figure III-7 Forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur asymétrique en cascade a neuf niveaux (GA).

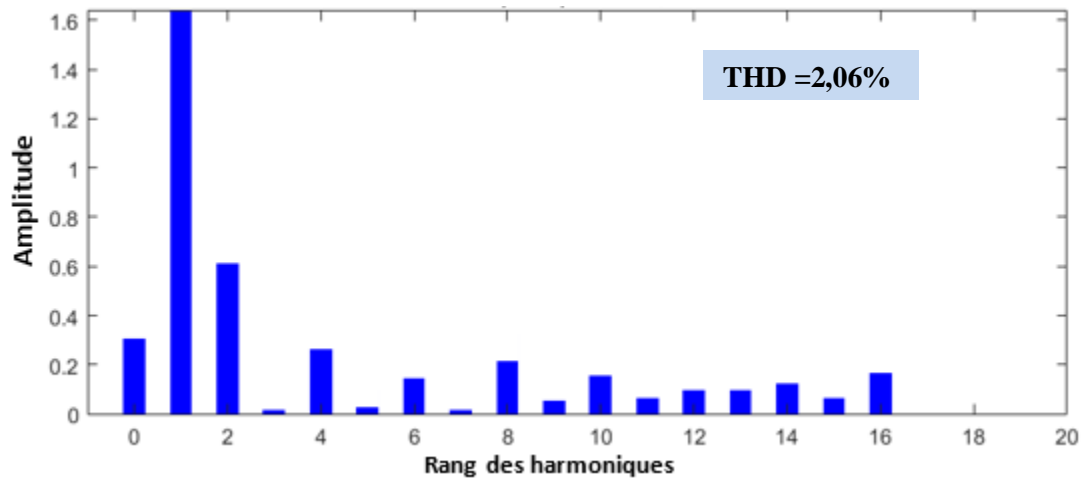


Figure III-8 FFT Analyse de la tension de sortie (GA).

#### III.4. Etude comparative :

Une étude comparative est faite entre GA et le PSO illustré dans par le tableau. III.1.

Tableau.III.2 .les agnels de commutation et THD

	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	THD
PSO	2.15°	32°	50.02°	69.05°	6.91%
GA	2.13°	31.97°	49.72°	68.37°	2.06%

D'après les résultats du Tableau. III.2, on remarque que les algorithmes génétiques (GA ) a donné un THD plus faible que la méthode par essaim de particules(PSO).

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons recherché les meilleures valeurs d'angle et le plus faible taux de distorsion harmonique (THD) pour la modulation d'un onduleur asymétrique à 9 niveaux en cascade. Nous avons comparé deux méthodes méta heuristiques : les algorithmes génétiques (GA) et la méthode par essaim de particules (PSO) pour l'élimination sélective des harmoniques (SHEPWM). Notre objectif était de déterminer les angles optimaux et d'obtenir le THD le plus faible possible.

D'après les résultats obtenus, nous avons affirmé que la meilleure méthode est les algorithmes génétiques (GA), qui a permis d'obtenir un taux de distorsion harmonique plus faible.

Un THD plus faible indique généralement une meilleure performance en termes de réduction des distorsions harmoniques. Cela suggère que les algorithmes génétiques (GA) a réussi à produire des résultats de meilleure qualité en minimisant les distorsions harmoniques par rapport à la méthode PSO.

Conclusion

Général

Dans ce mémoire nous avons étudié les topologies d'onduleurs multi-niveaux et les stratégies de modulation qui y sont associées. L'étude se concentre particulièrement sur un onduleur multi-niveau à 9 niveaux en cascade et examine deux approches de simulation : la méthode de Algorithme genitic GA et l'algorithme méta heuristique PSO.

Les résultats obtenus de la simulation permettent de conclure que l'algorithme genitic GA a donner un meilleur taux de distorsion harmonique par rapport à la méthode Newton Raphson.

D'après les résultats obtenus, nous avons confirmé que la meilleure méthode est l'Algorithme genitic, qui a permis d'obtenir un taux de distorsion harmonique plus faible qui indique généralement une meilleure performance en termes de réduction des harmoniques.

En conclusion, l'utilisation de l'algorithme genitic dans un onduleur multi-niveau en cascade à 9 niveaux présente de nombreux avantages en termes de qualité de l'onde de sortie, par pour la méthode de PSO

Ces resulta qui a donner elle être doivent un avantage pour faire la comparaison entre les deux méthodes.

## Annexe

### **Matalb :**

Le logiciel MATLAB est construit autour du langage MATLAB. Une interface en ligne de commande, qui est un des éléments du bureau MATLAB, permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulées dans une fonction.

Est un environnement de diagramme pour la simulation multi-domaine et la Conception basée sur un modèle. Il fournit l'environnement de modélisation graphique par Schéma- blocs. Il prend en charge la conception au niveau du système, la simulation, la Génération automatique de code et le test et la vérification continus des systèmes embarqués. Simulink fournit un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des Solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, vous permettant d'incorporer des algorithmes MATLAB dans des modèles et D'exporter les résultats de simulation vers MATLAB pour une analyse plus approfondie. Parmi les bibliothèques Simulink on trouve: Sim-scape, Stateflow, Sim-Mechanics, Sim Electronics et Sim-Power-Systems.

### **simulink**

SIMULINK est un module particulier venant compléter le noyau MATLAB, et fournir une interface graphique pour la modélisation de systèmes dynamiques sous forme de schémasblocs. Grâce aux nombreux blocs de base fournis, il est possible de créer des modèles sans écrire une seule ligne de code. L'architecture ouverte permet d'étendre l'environnement de simulation par : la création de blocs personnalisés et de bibliothèques à partir du code MATLAB, • Fortran ou C ou bien de façon graphique ; l'intégration de code Fortran ou C existant pour récupérer des modèles validés ; • la génération de code C à partir des modèles de simulation. • De même que MATLAB et ses Toolboxes, Simulink peut être complété de bibliothèques de blocs spécialisés - les Blocksets, qui viennent s'ajouter à la bibliothèque de base.

## Annexe

### Program de GA

```
clc
A=[-1 0 0 0;1 -1 0 0;0 1 -1 0;0 0 1 -1;0 0 0 1];
b=[0;0;0;0;pi/2];
%lb=[0 0 0 0];
%ub=[90 90 90 90];
r = 0.01:0.01:1.4;
options = optimoptions('ga','HybridFcn',@fmincon);
for i = 1:length(r)
    fun = @(x)Fitrym(x,r(i));
    theta(i,:) = ga(fun,4,A,b,[],[],[],[],[],options);
    disp(r(i))
    disp(theta(i,:))

    V1star=3*r(i);
    V1= cos(theta(1))+cos(theta(2))+cos(theta(3))+cos(theta(4));
    V1nesbi=V1/V1star;

    V5=abs((1/5)*(cos(5*theta(1))+cos(5*theta(2))+cos(5*theta(3))+cos(5*theta(4)))/V1);

    V7=abs((1/7)*(cos(7*theta(1))+cos(7*theta(2))+cos(7*theta(3))+cos(7*theta(4)))/V1);

    V11=abs((1/11)*(cos(11*theta(1))+cos(11*theta(2))+cos(11*theta(3))+cos(11*theta(4)))/V1);

    THD=100.*sqrt((V5^2)+(V7^2)+(V11^2));

    Modulation_Index=r(i);

    Total_Harmonic_Distortion(i)=THD;
end
figure(9);
plot(r,theta(1),'b','LineWidth',2)
hold on
plot(r,theta(2),'r','LineWidth',2)
hold on
plot(r,theta(3),'m','LineWidth',2)
hold on
plot(r,theta(4),'y','LineWidth',2)
legend('\theta1','\theta2','\theta3','\theta4')
xlabel('Modulation Index')
ylabel('Optimum Switching Angles (Degree)')
grid
figure(10);
plot(r>Total_Harmonic_Distortion,'LineWidth',2)
xlabel('Modulation Index')
ylabel('Total Harmonic Distortion (%)')
grid
```

## Référence

- [1] **guy seguier, francis labrique,Robert Baussiere** « Les convertisseurs de l'électronique de puissance ».2017
- [2] **BANNISTER, R. H. Baker et L. H. Bannister**, " Electric Power Converter", U.S Patent Number, Feb. 1975.
- [3] **A.Nabae, I. Takahashi, H. Akagi**, "A new-point-clamped PWM Inverter ", IEEE trans. OnIndeect, Vol.1A-17, NO 5, pp. 518-523, 1981.
- [4]**F. Z. Peng, J. S. Lai**, "Multilevel cascade voltage-source inverterwithseparate DC sources", U.S. Patent 5 642 275, June 24, 1997
- [5]**A.Leredde**, "Etude, Commande et Mise en Oeuvre de Nouvelles Structures Multi-niveaux", Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2011.
- [6] **AYACHI ZAKARIADJOTNI KARIM** « ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE » Université BADJI MOKHTAR Annaba page (15)
- [7] **HOUICHI Abdelhak** « Dimensionnement et commende des onduleur multi-niveaux asyemetriques » page 5 années 2014/2015
- [8] **TOUCHE SOULEF** « commende realization d'un convertisseur multi niveaux (MLDC) » Université saaddahlab, Blida 2020 page 7
- [9] T. A. Meynard, H. Foch,« Multilevel Conversion: High Voltage Choppers and Voltage Source Inverters », IEEE-PESC'92 Conférence Record, pp. 397- 403, 1992.
- [10] K.Yakoub«Réduction des effets de la tension homopolaire dans las associations onduleurs multi-niveaux moteur à induction ».Mémoire de Mgister,Université de Batna.2005
- [11] **MANSOURI Abdallah** " Commande des Onduleurs Multi-niveaux ", Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.2016.
- [12]**S.Fernandez**, " Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes.et indirectes connecté au réseau." Thèse de doctorat, Université Lille 1, Nord de France, 2013.
- [13]**C. De Almeida Martins**, "Controle direct du couple d'une machine asynchrone alimentée par convertisseurs Multi-niveaux à fréquence imposée", Thèse de doctorat, INP de Toulouse, 2000.
- [14] **H. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir**, "Review of multi level voltage source inverter topologies and control schemes", Elsevier, 2011.
- [15]**J.Rodriguez,L.Moran,P.Correa,C.Silva**, "A vector control techniquefor Medium voltage multilevelinverters", IEEE Trans. onInd. Elec, 2002.
- [16] **DELLALOU KHEIREDDINE**, "Stratégies De Commande Des Onduleurs Multi niveaux (MLI ST et MLI Vectorielle)" UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2019

- [17] [https://fr.electrical installation.org/frwiki/D%C3%A9finition\\_des\\_harmoniques](https://fr.electrical installation.org/frwiki/D%C3%A9finition_des_harmoniques)
- [18] **J. Rodriguez, L. Moran, P. Correa, C. Silva**, "A vector control technique for Medium voltage multilevel inverters", IEEE Trans. on Ind. Elec, 2002.
- [19] **A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi**, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, 1981.
- [20] **Carlos canudas de Witt**. "Commande des moteurs asynchrones. Volume 1 «Modélisation, contrôle vectoriel et DTC"» Hermès science publication 2014.
- [21] **BOUAKAZ OUAHID**, "Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone", Mémoire MAGISTER UBMA-2006.
- [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_de\\_largeur\\_d%27impulsion](https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d%27impulsion)
- [23] Surin Khomfoi and Leon M. Olbert, Chapter 31 Multilevel Power Converters, Université du Tennessee.
- [24] H. S. Patel and R. G. Hoft, « Generalized Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Converters: Part I – harmonic elimination», IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 9, May/June 1973. pp. 310-317.
- [25] M. Ahmed, E. Hendawi, B. Alamri, M. Alharthi, F. Salem, M. Orabi, & S. Ghoneim, « Classical Control for Unequal DC Sources Five-Level Inverter-Based SHE Technique». Energies, 13(18), 4715. 2020.
- [26] **CHOUAF Fethi** These "COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PAR MLI VECTORIELLE" Université Badji Mokhtar- Annaba 2018
- [27] R. F. Abdelgouli, R. Taleb, A. Bentaallah, & F. Chabni, «Improved hybrid algorithm based on GA and local search method for asymmetrical 9-level inverter», Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS), 21(3), 1309. 2021
- [28] S. Barkat, « Modélisation et commande d'un onduleur à sept niveaux à diodes flottantes : Application à la conduite d'une machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique. 2008.
- [29] D. Kumar, S. Pattnaik, & V. Singh, « Genetic algorithm based approach for optimization of conducting angles in cascaded multilevel inverter », IJERA, 2(3), 2389-2395. 2012
- [30] R. Taleb, « Commande des onduleurs multiniveaux asymétriques pour l'entraînement des machines électriques ». Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès, 2011
- [31] M. S. Dahidah, & V. G. Agelidis, « A hybrid genetic algorithm for selective harmonic elimination control of a multilevel inverter with non-equal dc sources ». International Conference on Power Electronics and Drives Systems. IEEE, 2005. p. 1205-1210.
- [32] E. Deniz, O. Aydogmus, & Z. Aydogmus, « Implementation of ANN-based selective harmonic elimination PWM using hybrid genetic algorithm-based optimization ». Measurement, 85, 32-42. 2016

- [33] M. N.Alam, B.Das, & V. Pant, « A comparative study of metaheuristic optimization approaches for directional overcurrent relays coordination»,*Electric Power Systems Research*, Volume 128,2015, Pages 39-52.
- [34] M. S. Sundari ,& D.Periyasamy, « PSO Based Selective Harmonic Elimination PWM for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter ». In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1012, No. 1, p. 012054). IOP Publishing. 2021
- [35] J.L. Redondo,« Solving competitive location problems via memetic algorithms high performance computing approaches »,Thèse de doctorat,Université d'Almería.2008
- [36] F.Chabni , « Commandes avancées et réalisation de convertisseurs multiniveaux ».Thèse de doctorat. Université Hassiba Benbouali de Chlef.2018
- [37] O.Ceylan, M. Neshat, & S.Mirjalili, « Cascaded H-bridge multilevel inverters optimization using adaptive grey wolf optimizer with local search ». *Electrical Engineering*, 1-15. 2021



