



# Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Réalisé par :

AMROUCHE AYOUB

Et

SEDRATI OUARDIA

## Thème

---

### Modélisation et simulation d'un onduleur 7 niveaux H\_bridge en cascade

---

Soutenu le : 23/09/2024

Devant la commission composée de :

➤ Mr. Mellah Hacene	M.C. A	Univ. Bouira	Encadreur
➤ Mme.Yassa Nacira	M.A. A	Univ. Bouira	Président
➤ Mme.Aggoun Ghania	M.A. A	Univ. Bouira	Examineur

# DEDICACES

❖ Je dédie ce travail à :

*A ma mère et mon père*

*À toute ma famille*

*À tous mes amis et collègues*

**AMROUCHEAYOUB**

❖ Je dédie ce travail à:

*A mes chers parents*

*A mes frères, sœurs et toute ma famille*

*A tous mes amis*

**SEDRATI OUARDIA**

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Nous tenons à remercier, en premier lieu, Dr. Mellah Hacene, Directeur de ce mémoire et Professeur à l'université AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira, pour avoir initialement proposé ce sujet, suivi le développement de ce mémoire, et pour la confiance ainsi que l'intérêt qu'il nous a accordés tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Mr. Mellah Hacene, Mme.Yassa Nacira et Mme.Aggoune Ghania.

Enfin, nous associons à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

# Résumé

### Résumé :

Le but de ce mémoire est de développer une stratégie d'élimination sélective des harmoniques pour le contrôle des onduleurs H-bridge multiniveaux à 7 niveaux, en optimisant les angles de commutation impairs des interrupteurs. Cette approche vise à réduire les distorsions harmoniques et sera comparée à la modulation sinusoïdale par largeur d'impulsion (MLI) ainsi qu'à d'autres stratégies d'élimination des harmoniques. L'objectif est de concevoir un convertisseur capable de respecter les normes internationales tout en offrant des performances améliorées en termes de qualité du signal et d'efficacité. Enfin, les résultats seront validés par des simulations sous MATLAB/SIMULINK, démontrant l'efficacité de la stratégie dans les systèmes électriques.

### Mots clés :

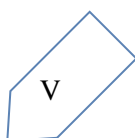
Les onduleurs multi-niveaux, onduleur H\_Bridge en cascade, fréquence de commutation, segmentation de la puissance, Taux distorsion harmonique THD.

# **Table des Matières**

Remerciements -----	I
Résumé-----	II
Table des Matières -----	III
Listes des figures-----	VI
Liste des tableaux -----	VIII
Listes des Acronymes et Symboles -----	IX
Introduction Générale -----	1
<b>Chapitre 1: Généralités sur les onduleurs multi-niveaux -----</b>	<b>3</b>
1.1. Introduction-----	3
1.2. Historique des onduleurs-----	3
1.3. Définition de l'onduleur-----	4
1.4. Classification des onduleurs -----	5
1.4.1. En fonction de leur nombre de phases (monophasé ou triphasé)-----	5
1.4.1.1. Onduleur de tension monophasé en demi-pont -----	5
1.4.1.2. Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en demi- pont-----	6
1.4.2. Onduleur de tension monophasé en pont H-----	6
1.4.2.1.Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en pont H. -----	8
1.4.3. Onduleur de tension triphasé -----	8
1.4.4. Selon la nature de la grandeur (tension ou courant) à transformer -----	9
1.4.4.1. Onduleurs de tension-----	9
1.4.4.2 Onduleurs de courant -----	9
1.4.5. Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs-----	10
1.4.5.1. Onduleurs autonomes -----	10
1.4.5.2. Onduleurs non autonomes -----	10
1.5. Les onduleurs multi-niveaux -----	10
1.5.1 Introduction -----	10

1.6. Différentes structures des onduleurs multi-niveaux -----	11
1.6.1. Topologies de base -----	11
1.6.1.1. Onduleur de tension à diode de bouclage (Neutral Point Converter ‘NPC’) -----	11
1.6.1.2. Onduleur de tension à condensateur flotteur (Flying capacitor) -----	12
1.6.1.3. Onduleur de tension en cascade à pont en H (H-bridge)-----	12
1.6.2. Onduleurs multi-niveaux symétriques -----	14
1.6.3. Onduleurs multi-niveaux asymétriques -----	15
1.7. Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel -----	16
1.7.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif-----	16
1.7.2. Alimentation de secours -----	17
1.7.3. Applications relatives aux transports -----	17
1.7.4. Intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique -----	18
1.8. Conclusion-----	18
<b>Chapitre 2:Modélisation de l'onduleur sept niveaux et sa stratégie de commande-----</b>	<b>19</b>
2.1. Introduction-----	19
2.2. La modélisation de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC -----	19
2.2.1. Architecture de l'onduleur -----	19
2.2.2. Postulats -----	20
2.2.3. Fonction de liaison -----	20
2.2.4. Fonction de génération-----	20
2.2.5. Stratégie de contrôle supplémentaire-----	21
2.2.6. Modélisation basée sur les valeurs instantanées -----	21
2.2.7. Modélisation à valeurs moyennes -----	24
2.3. Stratégie de commande de l'onduleur -----	24
2.3.1. Modulation calculée-----	25
2.3.2. Comparaison des différentes stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux -----	27
2.3.3. Modulation sinusoïdale classique mono porteuse-----	28
2.3.4. Modulation sinusoïdale à double triangle-----	29

2.3.5. La commande par hystérésis (ou commande en fourchette) -----	29
2.3.6. La modulation vectorielle-----	30
2.4. Conclusion-----	32
<b>Chapitre 3:Simulation et interprétation des résultats -----</b>	<b>33</b>
3.1 Introduction -----	33
3.2. Onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement résistive « R »)-----	33
3.3 Onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement inductive « L »)-----	38
3.4. Onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement capacitif « C») -----	41
3.5. Onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge RLC) -----	44
3.6. Onduleur H_bridge sept niveaux (Alimentant une machine synchrone à aimant permanent) -----	47
3.7. Conclusion-----	52
Conclusion Générale-----	53
Références bibliographiques-----	54
Annexe -----	57



## *Listes des figures*

Figure 1:Schéma de principe de la conversion de courant continu en courant alternatif (DC–AC).--	4
Figure 2:Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi – pont. -----	5
Figure 3:Schéma de principe ainsi que la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.-----	7
Figure 4: Symbole et structure de montage d'un onduleur triphasé. -----	9
Figure 5:Onduleur à trois et quatre niveaux (phase A). -----	11
Figure 6:Onduleurs à condensateurs flottants à trois et à quatre niveaux (phase A). -----	12
Figure 7: Schéma d'un onduleur pont H en cascade N niveaux. -----	13
Figure 8:Niveaux de tension possibles en utilisant des topologies symétriques et asymétriques.---	16
Figure 9:Réglage de la vitesse d'un moteur à courant alternatif. -----	16
Figure 10:Alimentation de secours. -----	17
Figure 11:Interrupteur bidirectionnel équivalent du pair transistor – diode -----	19
Figure12:La structure de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral PointClamping (VSI) -----	20
Figure 13:Modèle conceptuel de l'onduleur triphasé à sept niveaux avec structure NPC-----	24
Figure 14:Diagramme d'une modulation calculée exploitant le modèle de commande de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC.-----	25
Figure15:Génération des fonctions de connexion discontinues à partir de leurs fonctions génératrices -----	26
Figure 16:Principe de la modulation à double triangle pour la MLI. -----	29
Figure 17:Principe de la commande par hystérésis. -----	30
Figure 18: Représentation dans le plan ( $\alpha$ , $\beta$ ) des vecteurs de tension de L'onduleur à trois niveaux de tension V18. -----	31
Figure 19:Schéma bloc d'un onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge résistive). -----	34
Figure 20:Block significatif d'un onduleur en H-bridge à l'intérieur. -----	34
Figure 21:Block significatif de générateur des pulses. -----	35
Figure 22:La tension $V_a$ et son spectre harmonique.-----	35
Figure 23:La tension $V_b$ et son spectre harmonique.-----	36
Figure 24:La tension $V_c$ et son spectre harmonique.-----	36
Figure 25: Le courant $I_{ar}$ de la phase A et son spectre d'harmonique.-----	37



Figure 26: Allure de courant $I_{a\_r}$ et la tension $V_{a\_r}$ de la phase A. -----	37
Figure 27:Schéma bloc d'un onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement inductive). -----	38
Figure 28:La tension $V_a$ et son spectre harmonique. -----	39
Figure 29:La tension $V_b$ et son spectre harmonique.-----	39
Figure 30:La tension $V_c$ et son spectre harmonique. -----	39
Figure 31: Le courant $I_{a\_L}$ de la phase A et son spectre d'harmonique. -----	40
Figure 32:Allure de courant $I_{a\_L}$ et la tension $V_{a\_L}$ de la phase A. -----	40
Figure 33:Schéma bloc d'un onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement capacitive). -----	41
Figure 34:La tension $V_a$ et son spectre harmonique. -----	42
Figure 35:La tension $V_b$ et son spectre harmonique.-----	42
Figure 36:La tension $V_c$ et son spectre harmonique. -----	42
Figure 37: Le courant $I_{a\_c}$ de la phase A et son spectre d'harmonique. -----	43
Figure 38:Allure de courant $I_{a\_c}$ et la tension $V_{a\_c}$ de la phase A. -----	43
Figure 39:Schéma bloc d'un onduleur H_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge RLC). -	44
Figure 40:La tension $V_a$ et son spectre harmonique. -----	45
Figure 41:La tension $V_b$ et son spectre harmonique.-----	45
Figure 42:La tension $V_c$ et son spectre harmonique. -----	45
Figure 43: Le courant $I_{s\_rlc}$ de la phase A et son spectre d'harmonique. -----	46
Figure 44: Allure de courant $I_{a\_rlc}$ et la tension $V_{a\_rlc}$ de la phase A.-----	46
Figure 45:Schéma bloc d'un onduleur H_bridge sept niveaux (alimentant une machine synchrone à aimant permanent).-----	48
Figure 46: Allure de courant de la phase A $I_a$ et son spectre d'harmonique. -----	48
Figure 47:Allure de la vitesse $W_r$ (rad/s) en fonction du temps. -----	49
Figure 48:Allure du couple électromagnétique $C_e$ (N.m).-----	50

## *Liste des tableaux*

Tableau 1: Liste des symboles. ....	IX
Tableau 2: Liste des notes attribuées. ....	X
Tableau 3: Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur Monophasé pont H. ....	6
Tableau 4: Comparaison entre les différentes structures. ....	15
Tableau 5: Tableau de comparaison des différentes stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux. ....	28
Tableau 6: Comparaison des valeurs de THD des charges R,L,C et RLC. ....	50

## *Listes des Acronymes et Symboles*

### ❖ Symboles

**Tableau 1:** Liste des symboles.

<b>K</b>	Nombre d'onduleur monophasé en série sur la même phase
<b>N</b>	Nombre de niveaux de la tension générée à la sortie de l'onduleur
<b>E</b>	La tension
<b>U<sub>c</sub></b>	Alimentation parfaite de l'onduleur
<b>R</b>	Taux de modulation
<b>U<sub>n</sub></b>	Amplitude de l'harmonique de rang n
<b>U<sub>s</sub></b>	Tension de sortie de l'onduleur
<b>V<sub>d</sub></b>	Tension continue
<b>P</b>	Puissance active
<b>S</b>	Puissance apparente
<b>K<sub>p</sub></b>	Gain de l'action proportionnelle
<b>K<sub>i</sub></b>	Gain de l'action intégrale
<b>T<sub>1</sub>,T<sub>2</sub>,T<sub>3</sub>,T<sub>4</sub></b>	Des interrupteurs
<b>V<sub>L</sub>(t)</b>	La tension aux bornes de la charge RL
<b>V<sub>réf</sub></b>	1,2,3 tensions de références 1,2 ou 3 (Sinusoïdal)
<b>V<sub>a</sub>,V<sub>b</sub>;V<sub>c</sub></b>	Tensions des références
<b>V<sub>an</sub>, V<sub>bn</sub>, V<sub>cn</sub></b>	Tensions de sortie
<b>TD<sub>ks</sub></b>	Interrupteur
<b>F<sub>ks</sub></b>	Fonction de connexion
<b>T<sub>h</sub></b>	Période de commutation
<b>T<sub>ks</sub></b>	Transistor

► Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.

### ❖ Acronymes

**Tableau 2:**Liste des notes attribuées.

<b>DC</b>	Courant continu (direct current)
<b>AC</b>	Courant alternatif (alternating current)
<b>H</b>	Pont H (H-bridge)
<b>MLI</b>	Modulation de la Largeur d'impulsions
<b>SPWM</b>	Sinusoidal pulse Width Modulation
<b>SHE</b>	Selective Harmonic Elimination
<b>SVM</b>	Space Vector Modulation
<b>FACTS</b>	Le système de transmission à courant alternatif flexible
<b><i>FFT</i></b>	Fast Fourier Transform
<b>NPC</b>	Neutral Point Converter
<b><i>FC</i></b>	Flying capacitor
<b><i>CHB</i></b>	cascaded H bridge
<b><i>DE</i></b>	Differential Evolution
<b><i>THD</i></b>	Taux distorsion harmonique
<b><i>MSAP</i></b>	Machine synchrone à aimant permanent

# Introduction Générale

L'énergie électrique, depuis sa production jusqu'à son utilisation finale, nécessite souvent plusieurs conversions pour répondre aux besoins des consommateurs. Dans ce contexte, les onduleurs H-bridge à 7 niveaux et, plus généralement, les onduleurs multiniveaux, se démarquent comme des solutions optimales grâce à leur faible coût et leur efficacité élevée [1]. Ces dispositifs jouent un rôle clé dans l'électronique de puissance, où la qualité de la tension de sortie est cruciale. En effet, la performance des convertisseurs statiques dépend largement de la technique de commande employée, et plusieurs méthodes ont été développées pour minimiser les harmoniques dans la tension de sortie. La distorsion harmonique tend à diminuer avec l'augmentation du nombre de niveaux de tension fournis par les convertisseurs, ce qui est un avantage significatif des onduleurs multiniveaux. Cependant, cette complexité accrue peut entraîner des défis en termes de contrôle, augmentant les coûts et diminuant la fiabilité. Les harmoniques générées par des charges non linéaires peuvent perturber le fonctionnement des équipements électriques, engendrant des coûts considérables pour les réseaux électriques [2]. Dans ce contexte, les onduleurs H-bridge à 7 niveaux offrent des solutions innovantes. Conçus pour fournir plusieurs niveaux de tension tout en garantissant une isolation adéquate entre les composants, ces onduleurs permettent d'obtenir une forme d'onde de sortie de meilleure qualité. Notre étude se concentre sur la modélisation de ces onduleurs, en utilisant des stratégies d'élimination d'harmoniques, dans le but d'obtenir une tension de sortie en escalier proche d'une sinusoïde. Face à la demande croissante de puissances convertibles, il est essentiel d'adapter les technologies existantes. Les structures innovantes, comme les filtres multiniveaux, émergent pour répondre à ces défis, en répartissant la tension entre plusieurs composants semi-conducteurs connectés en série, tout en maintenant leurs performances statiques et dynamiques [3].

L'objectif de cette mémoire est d'étudier un onduleur H-bridge à 7 niveaux. Ce type d'onduleur, qui fait partie des systèmes de conversion d'énergie, est particulièrement pertinent dans le contexte des applications modernes, notamment dans les énergies renouvelables et les systèmes de propulsion électrique. À travers cette étude, nous explorerons les principes de fonctionnement de l'onduleur, ses avantages par rapport à d'autres topologies, ainsi que les aspects liés à sa conception, ses performances et ses applications spécifiques. En analysant en détail le fonctionnement et les caractéristiques d'un onduleur H-bridge à 7 niveaux, nous visons à fournir une compréhension approfondie de cet équipement essentiel dans le domaine de l'électrotechnique.

- **Le premier chapitre,** Ce chapitre sera dédié à l'historique et à la classification des onduleurs multi-niveaux. À cette fin, une description chronologique de leur évolution au fur et à mesure sera présentée. Nous examinerons brièvement leurs différentes topologies, structures et

caractéristiques, tout en illustrant leurs domaines d'application industrielle et en mettant en lumière l'intérêt des onduleurs dans ces contextes.

- **Le deuxième chapitre** traitera de la représentation théorique d'un onduleur à sept niveaux, des différentes techniques de commande des convertisseurs multi-niveaux, ainsi que des stratégies de commande des onduleurs, à la fois classiques et avancées.
- **Le troisième chapitre,** La modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale pour l'onduleur à sept niveaux H-bridge en cascade sera étudiée, accompagnée d'une simulation complète. Une étude comparative des différentes stratégies de commande sera également réalisée. Un accent particulier sera mis sur l'analyse du taux de distorsion harmonique totale (THD) des tensions de sortie, en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK seront présentés en détail. Enfin, la conclusion générale résumera les points clés de ce travail, mettant en lumière les principales découvertes et implications de cette étude.

# Chapitre 1

## *Généralités sur les onduleurs multi-niveaux*

### 1.1. Introduction

La puissance que ce composant peut gérer est le résultat du produit entre le courant maximal qu'il peut supporter lorsqu'il est conducteur et la tension maximale qu'il peut supporter lorsqu'il est bloqué. En électronique de puissance, les composants ne sont pas parfaits et dissipent de l'énergie sous forme de chaleur. Cependant, la puissance thermique qu'un composant peut dissiper est bien inférieure à la puissance qu'il peut contrôler. À l'heure actuelle, les composants largement utilisés sont principalement fabriqués à partir de semi-conducteurs tels que le silicium et le germanium. Les capacités de commande en puissance varient considérablement. En effet, il existe des composants capables de supporter des tensions de plusieurs centaines de volts à l'état bloqué, et des courants de plusieurs milliers d'ampères à l'état conducteur. En outre, trois grandes structures de convertisseur multi-niveau ont été rapportées dans la littérature: convertisseurs en pont en H en cascade avec des alimentations en courant continu séparées, diode clampée (neutre-clamped), et condensateurs volants (condensateur clamped). Les avantages des onduleurs multi-niveaux peuvent être mentionnés comme : Amélioration de la qualité du signal de sortie et faible distorsion harmonique totale (THD), interface électromagnétique inférieure, et plus petite taille de filtre. De plus, de nombreuses applications de convertisseurs multi-niveaux se concentrent sur les moteurs industriels à moyenne tension, l'interface des services publics pour les systèmes d'énergie renouvelable, le système de transmission à courant alternatif flexible (FACTS) et les systèmes de traction,...etc. Ce chapitre examine l'état de l'art de la technologie de convertisseur de puissance multi-niveau. Les structures fondamentales de convertisseur multi-niveau. Une concentration particulière est abordée dans les applications industrielles modernes et plus pratiques des convertisseurs multi-niveaux [4].

### 1.2. Historique des onduleurs

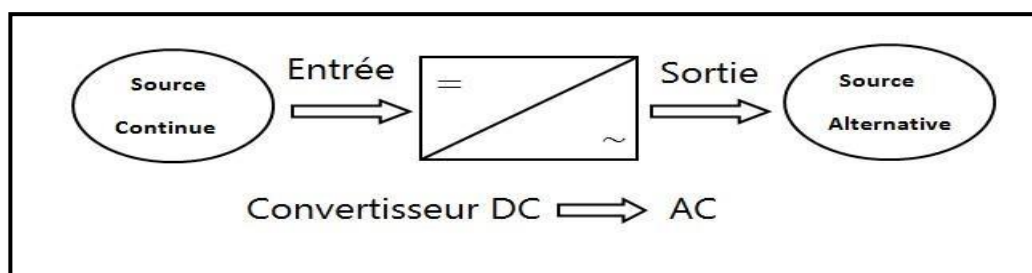
La technologie de l'électronique de puissance est aujourd'hui omniprésente dans le secteur industriel en raison de son application étendue, comme les sources d'alimentation régulées et la commande des machines électriques. Cette croissance indiscutable est largement due aux avancées significatives des convertisseurs statiques et des semi-conducteurs. Un convertisseur statique est un dispositif qui adapte une source d'énergie électrique à un récepteur déterminé. Pour assister à la demande croissante dans l'industrie, les puissances contrôlées par les convertisseurs statiques augmentent constamment, souvent par une augmentation du courant et/ou de la tension commutée. Bien que l'augmentation de la tension soit souvent privilégiée, elle peut poser des défis de maîtrise à l'échelle des composants semi-conducteurs, entraînant une détérioration de leurs performances

dynamiques et statiques. Il y a un grand nombre des études ont été menées sur les convertisseurs à deux niveaux, qui utilisent une source de tension continue en entrée pour alimenter des machines électriques en courant alternatif en sortie. L'analyse des courants et tensions dans ces machines alimentées par des convertisseurs à deux niveaux a révélé plusieurs restrictions. En particulier, les brusques variations de tension ( $dv/dt$ ) causent des tensions de mode commun aux bornes de la machine, notamment lorsque le convertisseur commute à haute fréquence [5]. De plus, la présence d'harmoniques excessives dans le système est également problématique, entraînant des pertes tant dans la charge que dans le convertisseur (pertes joules et par courants de Foucault dans la charge, pertes joules dans le convertisseur). Ces harmoniques introduisent du bruit et des caractéristiques non linéaires qui rendent la stabilisation du système de régulation plus complexe. Pour pallier ces désavantages, certains chercheurs ont proposé l'utilisation de convertisseurs à trois niveaux de tension, ce qui réduit la génération d'harmoniques que les convertisseurs à deux niveaux. Un convertisseur à niveaux multiples permet de commuter chaque entrée ou sortie de manière synchrone entre au moins trois niveaux de tension ou de courant différents. En général, plus le nombre de niveaux de tension générés par le convertisseur électrique est élevé, plus faible est son taux de distorsion harmonique. Cependant, dans toutes les configurations de convertisseurs multi-niveaux existantes, une augmentation du nombre de niveaux rend la structure du convertisseur plus complexe [6].

### 1.3. Définition de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif de conversion statique, qui transforme une source de tension ou de courant continu en une source de tension ou de courant alternatif en sortie. Ainsi, on distingue principalement deux types d'onduleurs : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant [7].

La Figure (1) suivante illustre le schéma de principe de la conversion de courant continu en courant alternatif (DC-AC) [7].



**Figure 1:** Schéma de principe de la conversion de courant continu en courant alternatif (DC-AC).

L'amplitude et la fréquence de la tension (ou du courant) de sortie peuvent être fixes ou variables en fonction de l'application, les onduleurs à fréquence de sortie fixe sont principalement utilisés pour convertir l'énergie stockée dans des batteries en électricité dans des applications industrielles, comme celles utilisées par Sonalgaz en cas de perte d'alimentation secteur. Les onduleurs à tension de sortie et fréquence variables sont couramment utilisés dans des applications



où la vitesse d'un moteur doit être ajustée pour augmenter ou pousser des charges [7].

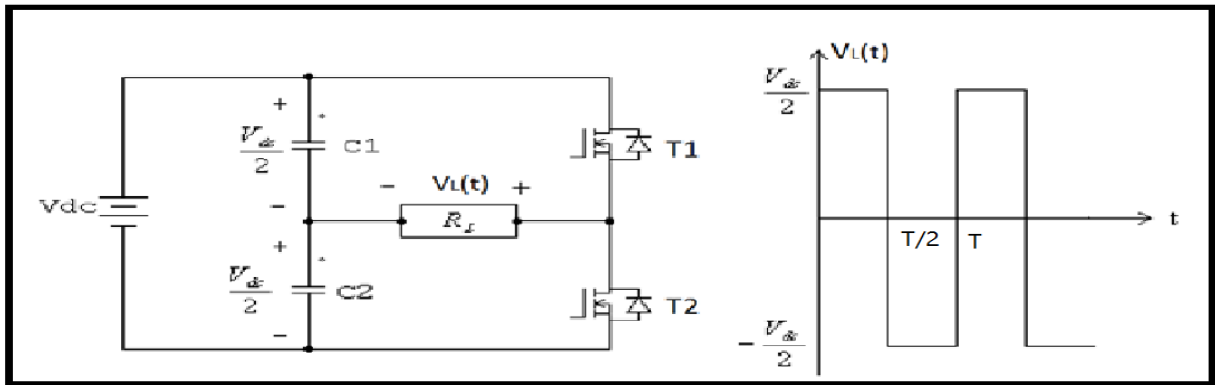
#### 1.4. Classification des onduleurs

Les onduleurs sont classés selon plusieurs critères : le nombre de phases (monophasé ou triphasé), la grandeur à transformer (tension ou courant), et le mode de commutation des semi-conducteurs utilisé.

##### 1.4.1. En fonction de leur nombre de phases (monophasé ou triphasé)

##### 1.4.1.1. Onduleur de tension monophasé en demi-pont

Ce type d'onduleur produit en sortie une tension alternative monophasée. Il existe deux types d'onduleurs monophasés selon leur topologie. La figure suivante illustre le schéma de principe ainsi que la tension de sortie aux bornes de la charge RL de l'onduleur monophasé en demi- pont [8].



**Figure 2:**Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi – pont.

L'onduleur monophasé en demi-pont se compose d'un seul bras contenant deux interrupteurs de puissance, désignés par T1 et T2, commandés de manière complémentaire. Ces interrupteurs de puissance peuvent être des MOSFET, des IGBT ou d'autres dispositifs similaires, ou autres. Deux diodes montées en antiparallèle avec les interrupteurs permettent à la bobine de libérer l'énergie stockée lors de l'ouverture des interrupteurs.

##### ▪ Principe de fonctionnement

Dans ce schéma circuit, la commutation des interrupteurs T1 et T2 est réalisée de manière complémentaire : lorsque l'un est ouvert, l'autre est nécessairement fermé, et vice versa.

- Sur la première demi période ( $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ ) l'interrupteur T1 est fermé (T2 ouvert), la tension aux bornes de la charge inductive RL est :

$$V_L(t) \rightarrow \frac{+V_{dc}}{2} \quad (1.1)$$

- Sur la deuxième demi période ( $\frac{T}{2} \leq t \leq T$ ), quand l'interrupteur T2 est fermé (T1 ouvert), la tension aux bornes de la charge est :

$$V_L(t) \rightarrow \frac{-V_{dc}}{2} \quad (1.2)$$

La fermeture simultanée des interrupteurs T1 et T2 entraîne un court-circuit de la tension d'entrée  $V_{dc}$ . Provoquant un courant élevé qui peut endommager sévèrement les interrupteurs de puissance. Le Tableau ci-dessous présente les états de commutation des interrupteurs [8] :

**Tableau 3** : Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en Demi -pont.

T1	T2	$V_L$
ON	OFF	$\frac{+V_{dc}}{2}$
OFF	ON	$\frac{-V_{dc}}{2}$

#### 1.4.1.2. Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en demi- pont

- **Avantages**

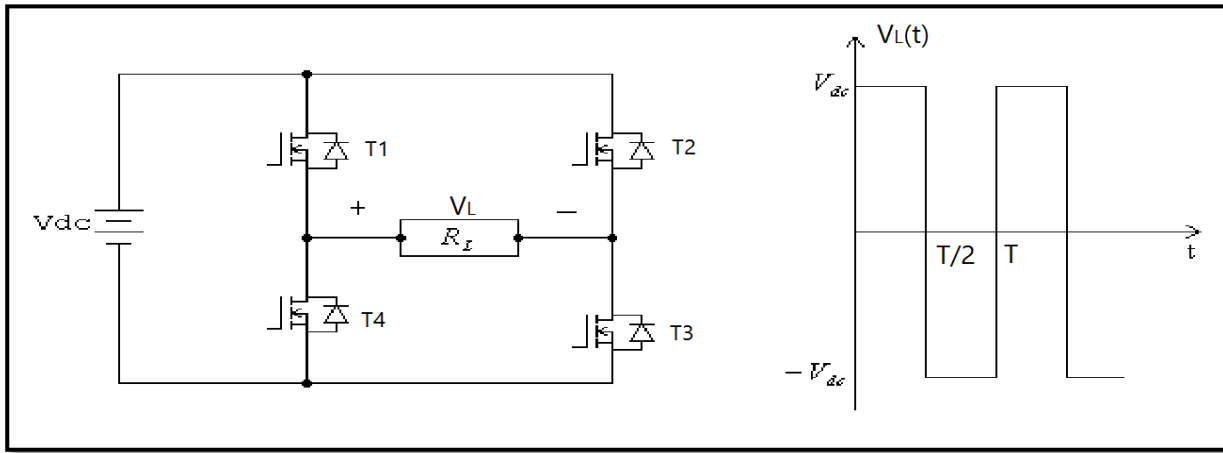
- L'onduleur monophasé en demi-pont présente une structure simple et économique [8].
- Un seul interrupteur est conducteur à tout moment, ce qui entraîne une diminution de tension réduite.

- **Inconvénients**

- Perte d'efficacité, Les onduleurs en demi-pont peuvent avoir des pertes plus importantes à cause de la conduction de la diode et d'autres éléments passifs, ce qui peut affecter leur rendement global.
- Harmoniques, La conception peut générer des harmoniques de courant plus élevées, ce qui peut nécessiter des filtres supplémentaires pour répondre aux normes de qualité de l'énergie [8].

#### 1.4.2. Onduleur de tension monophasé en pont H

La figure (3) suivante montre un onduleur monophasé en pont H ainsi que la forme de la tension de sortie aux bornes de la charge RL [9].



**Figure 3:** Schéma de principe ainsi que la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.

Cet onduleur est composé de deux bras, chacun comportant deux interrupteurs avec une diode montée en antiparallèle. Les diodes antiparallèles assurent la réversibilité du courant dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet de générer une tension de sortie qui se rapproche davantage d'une sinusoïde [9].

- **Principe de fonctionnement**

La commande de l'onduleur monophasé en pont H est établie comme suit :

- Quand les interrupteurs T1 et T3 sont fermés pendant la première demi-période ( $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ ), Les interrupteurs T2 et T4 sont ouverts. A ce moment la tension de sortie aux bornes de la charge égale à  $+V_{dc}$ .
- Quand les interrupteurs T2 et T4 sont fermés pendant le reste de la période ( $\frac{T}{2} \leq t \leq T$ ), les interrupteurs T1 et T3 sont ouvertes, la tension de sortie aux bornes de la charge devient  $-V_{dc}$ .

Effectivement, dans un onduleur monophasé en pont H, La tension de sortie varie entre la borne positive et négative au cours de la première et de la seconde demi-période respectivement. Pour éviter tout risque de court-circuit de la tension d'entrée, il est crucial de maintenir un temps mort entre deux commutations.

Ce temps mort est une période durant laquelle tous les interrupteurs sont ouverts simultanément pour éviter qu'ils ne se ferment ensemble. Cela garantit qu'il n'y a jamais de chemin de courant direct entre la borne positive et négative de la source d'alimentation continue  $+V_{dc}$ . Le respect de ce temps mort est essentiel pour assurer la sécurité et la fiabilité de l'onduleur, en minimisant les risques de court-circuit et en optimisant la commutation des interrupteurs.

Le Tableau (3) ci-dessous représente l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé à pont H. [9] :

**Tableau 3:** Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur Monophasé pont H.

T1	T2	T3	T4	$V_L(t)$
ON	OFF	ON	OFF	+Vdc
OFF	ON	OFF	ON	-Vdc
ON	OFF	OFF	ON	0
OFF	ON	ON	OFF	0

#### 1.4.2.1. Avantages et inconvénients de l'onduleur monophasé en pont H.

##### ➤ Avantages

- Coût réduit, Comparé aux onduleurs plus complexes, le pont H est généralement moins coûteux, tant en termes de composants que de fabrication [9].
- La simplicité et la rapidité de montage sont des avantages clés de ce type d'onduleur.

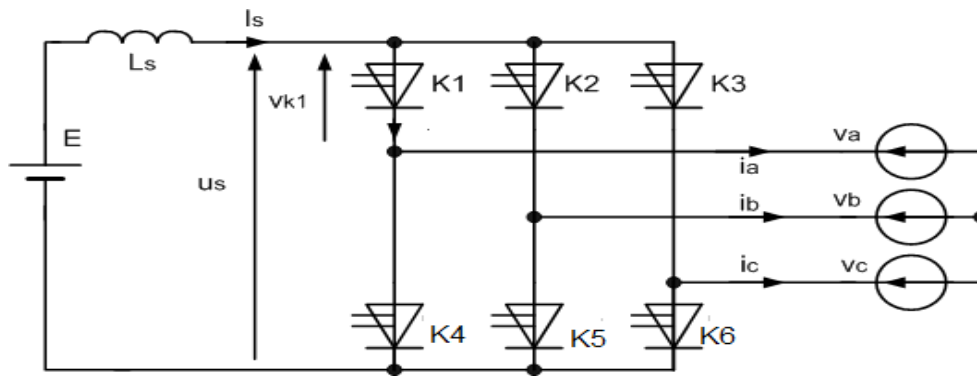
##### ➤ Les inconvénients

- Les pertes de puissance par les interrupteurs ont une influence directe sur la tension de sortie de l'onduleur [9].
- Génération d'harmoniques, Comme d'autres types d'onduleurs, ceux en pont H peuvent produire des harmoniques qui nécessitent des filtres supplémentaires pour garantir la qualité de l'énergie.

#### 1.4.3. Onduleur de tension triphasé

L'onduleur triphasé à deux niveaux est couramment utilisé pour les applications de moyenne puissance. Sa structure est obtenue en mettant en parallèle trois onduleurs monophasés en demi-pont, comme illustré dans la Figure suivante. Chaque bras de l'onduleur contient deux interrupteurs complémentaires commandés pour prévenir les courts-circuits de la tension d'entrée.

Ce type d'onduleur est souvent associé à la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) pour alimenter des charges triphasées équilibrées avec des tensions et des fréquences variables, ce qui permet de générer une tension triphasée équilibrée à partir d'une source de tension continue [10].



**Figure 4:** Symbole et structure de montage d'un onduleur triphasé.

Les caractéristiques de l'onduleur sont principalement définies par divers paramètres techniques et de performance. Ces composants déterminent la puissance maximale, la tension et le courant que l'onduleur peut commuter, ainsi que la fréquence maximale de commutation et le temps mort. Ces deux dernières caractéristiques sont particulièrement critiques car elles influencent directement la conception et les performances de l'onduleur. La fréquence maximale de commutation fait référence à la vitesse à laquelle les interrupteurs de l'onduleur peuvent être activés et désactivés pour moduler la tension de sortie. Une fréquence élevée permet généralement d'obtenir une sortie plus lisse et une meilleure régulation, mais elle nécessite également des composants de puissance capables de commuter rapidement sans surchauffe ni dégradation des performances [10].

#### **1.4.4. Selon la nature de la grandeur (tension ou courant) à transformer**

##### **1.4.4.1. Onduleurs de tension**

Les onduleurs de tension connectent une source de tension continue à faible impédance à une source de courant alternative en utilisant des interrupteurs électroniques réversibles en courant. Ils génèrent une tension de sortie de fréquence fixe ou variable selon les exigences du système. Contrairement à la tension de sortie, qui reste stable indépendamment de la charge, le courant de sortie varie en fonction de cette dernière. Les onduleurs de tension sont largement utilisés dans l'industrie pour contrôler des moteurs de moyenne à grande puissance. Leur capacité à fournir une tension stable et à ajuster la fréquence de sortie en fonction des besoins en fait des composants essentiels dans les systèmes industriels nécessitant une régulation précise de la vitesse et du couple des moteurs électriques [11].

##### **1.4.4.2 Onduleurs de courant**

L'onduleur de courant est positionné entre une source de courant continu et une source de tension alternative. Ce type d'onduleur utilise des semi-conducteurs de puissance qui sont unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension. À sa sortie, il fournit un courant efficace ajustable qui reste stable indépendamment de la charge, contrairement à la tension de sortie, qui varie en fonction de celle-ci. Les onduleurs de courant sont principalement utilisés dans les

entraînements à vitesse variable des moteurs à courant alternatif. Leur capacité à fournir un courant précis et stable, tout en permettant de contrôler la vitesse et le couple des moteurs, en fait des composants essentiels dans diverses applications industrielles nécessitant une régulation fine de la performance des moteurs électriques [11].

### 1.4.5. Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs

#### 1.4.5.1. Onduleurs autonomes

Les onduleurs autonomes sont composés d'interrupteurs contrôlés qui s'ouvrent et se ferment selon des instants de commutation déterminés par des circuits externes. Dans ce contexte, il est possible de régler la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur [12].

#### 1.4.5.2. Onduleurs non- autonomes

Les onduleurs non autonomes sont constitués de simples thyristors qui sont commandés uniquement pour la fermeture. La commutation est dite "naturelle", ce qui signifie qu'elle dépend du passage naturel du courant par zéro dans le circuit. Contrairement aux onduleurs autonomes, où les instants de commutation sont contrôlés activement par des circuits externes, les onduleurs non autonomes utilisent cette méthode de commutation naturelle ces onduleurs sont principalement utilisés dans les variateurs pour les moteurs synchrones de très forte puissance, atteignant des ordres de grandeur de plusieurs mégawatts. Ils sont adaptés aux applications industrielles nécessitant une régulation précise et robuste de la vitesse et du couple des moteurs synchrones à grande échelle [12].

### 1.5. Les onduleurs multi-niveaux

#### 1.5.1 Introduction

De nombreuses topologies des convertisseurs multi-niveaux proposées au cours Pendant les vingt dernières années. La recherche contemporaine a fait appel à de nouvelles topologies de conversion et à des schémas de modulation uniques. En outre, trois grandes structures de convertisseur multi-niveau ont été rapportées dans la littérature : convertisseurs en pont en H en cascade avec des alimentations en courant continu séparées, diode clampée (Neutre-Clamped), et condensateurs volants (condensateur clamped). Les avantages des onduleurs multi-niveaux peuvent être mentionnés comme : Optimisation de la qualité du signal de sortie et faible distorsion harmonique totale (THD), interface électromagnétique inférieure, et plus petite taille de filtre. De plus, de nombreuses applications de convertisseurs multi-niveaux se concentrent sur les moteurs industriels à moyenne tension, l'interface des services publics pour les systèmes d'énergie renouvelable, le système de transmission à courant alternatif flexible (FACTS) et les systèmes de traction [13].

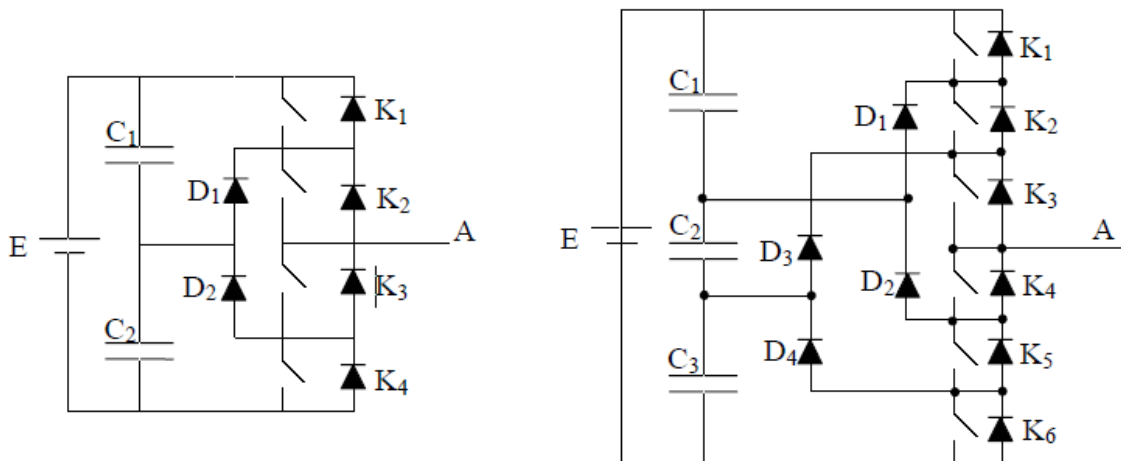
## 1.6. Différentes structures des onduleurs multi-niveaux

Par définition, un onduleur de tension multi-niveaux possède trois niveaux ou plus. Cette section vise à fournir une vue d'ensemble des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux : la topologie à diode de bouclage, la topologie au condensateur flottant et la topologie en cascade. Bien que cette partie ne prétende pas être exhaustive en matière de topologies d'onduleurs multi-niveaux, elle se concentre sur celles qui suscitent l'intérêt des chercheurs [13].

### 1.6.1. Topologies de base

#### 1.6.1.1. Onduleur de tension à diode de bouclage (Neutral Point Converter 'NPC')

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveaux est le NPC (Neutral-Point-Clamped). Cette configuration a été proposée pour la première fois par Nabac en 1981, Pour la génération de N niveaux de tension. Les onduleurs NPC à trois et quatre niveaux sont illustrés dans la figure (5) suivante [13].



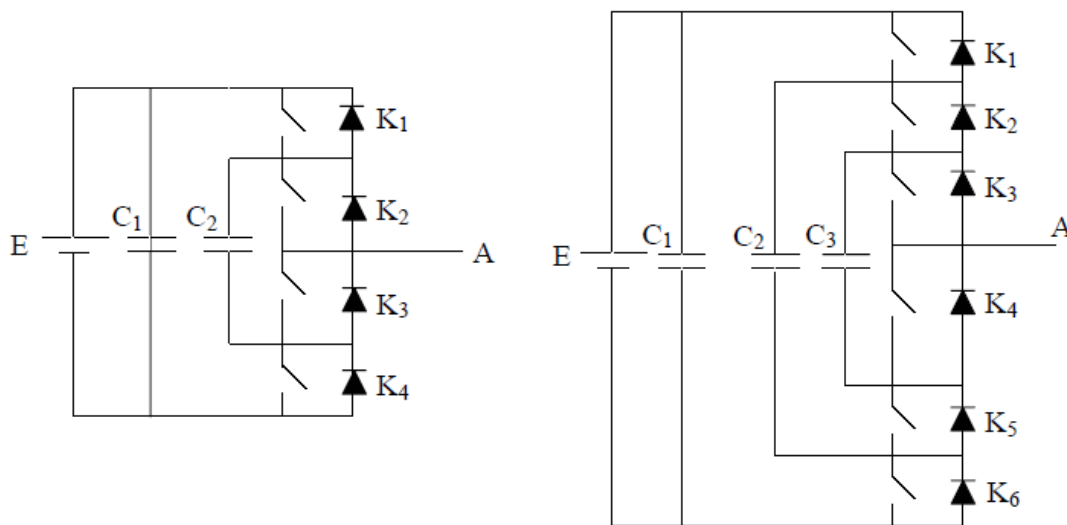
**Figure 5:** Onduleur à trois et quatre niveaux (phase A).

La Figure précédente montre une topologie qui se compose de quatre éléments de commutation connectés en série avec des diodes de blocage reliant le côté CA au milieu du bus CC. La tension à travers les dispositifs de commutation est la moitié de la tension d'entrée pour la configuration à trois niveaux l'élément de commutation et un quart de l'entrée DC pour une configuration à cinq niveaux, pour les topologies comportant plus de trois niveaux, les diodes de clamping peuvent augmenter les contraintes de tension jusqu'à une valeur égale à  $E(m-1)/m$ , où  $m$  est le nombre de niveaux. Par conséquent, des connexions série de diodes pourraient être requises, ce qui complexifie la conception et soulève des questions de fiabilité et de coût.

La topologie NPC est principalement utilisée pour les applications d'entraînement de moteur mais a également été utilisée pour les applications photovoltaïques et les applications de réseau [13].

### 1.6.1.2. Onduleur de tension à condensateur flotteur (Flying capacitor)

L'utilisation de condensateurs flotteurs au lieu de diodes clampées est une autre méthode de conversion de puissance à plusieurs niveaux. Cette topologie qui a été proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. Il est considéré comme une bonne alternative à la topologie à diode clampée. Le convertisseur est composé de plusieurs éléments de commutation connectés en série avec un condensateur ou plusieurs condensateurs connectés à chaque branche du convertisseur comme illustré sur la Figure (6) suivante.[13]



**Figure 6:** Onduleurs à condensateurs flottants à trois et à quatre niveaux (phase A).

### 1.6.1.3. Onduleur de tension en cascade à pont en H (H-bridge)

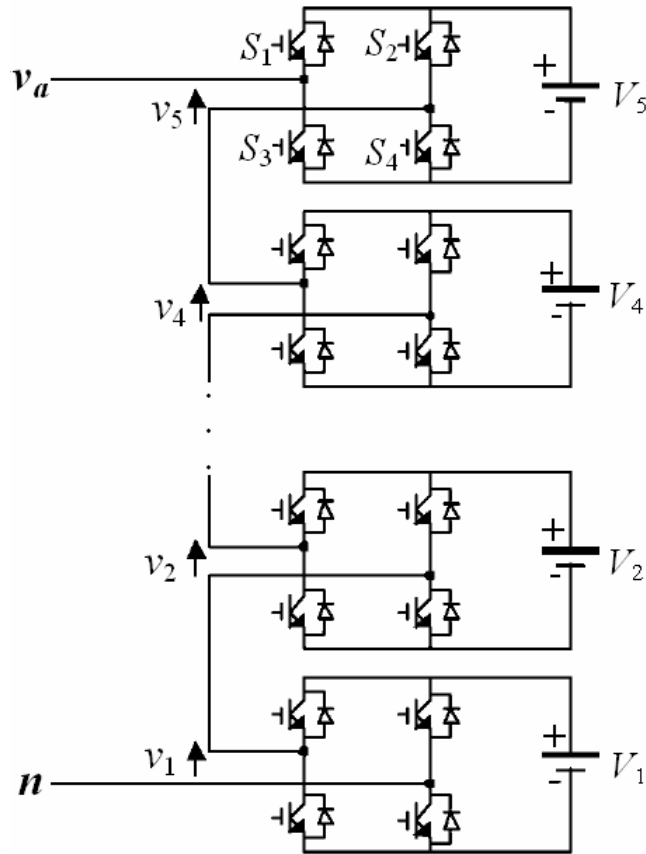
Cette topologie a été proposée par Baker Richard H et Bannister Lawrence H en 1975. Un progrès dans les onduleurs multi-niveaux a été le modèle en cascade série de ponts en H. La première application des onduleurs en ponts en H remonte à 1988 pour la stabilisation des plasmas. Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de manière à ce que 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 tout risque de court-circuit lorsqu'elles sont mises en série.

Le principal avantage de cette méthode est qu'en plus de fournir une méthode très pratique pour augmenter le nombre de niveaux du système, la topologie de l'onduleur est également facile à maintenir [14].

La Figure (7) suivante représente : Le schéma d'un onduleur pont H en cascade N niveaux [15].





**Figure 7:** Schéma d'un onduleur pont H en cascade N niveaux.

#### 1.6.1.3.1. Avantages et inconvénients d'un onduleur multi-niveau en cascade

L'onduleur multi-niveaux en cascade présente à la fois des avantages et des inconvénients, résumés comme suit :

##### ❖ Avantages

- L'onduleur multi-niveaux en cascade est une structure de conversion d'énergie qui utilise des sources de courant continu séparées pour générer une forme d'onde en tension alternative.
- Ce type de convertisseur requiert moins de composants pour atteindre le même nombre de niveaux de tension que d'autres topologies.
- Contrairement aux onduleurs à diodes de bouclage ou à condensateurs flottants, il ne nécessite aucune diode supplémentaire.
- La tension de sortie totale de phase résulte de la somme des tensions générées par chaque onduleur monophasé.
- Il utilise généralement de petites sources de courant continu, réduisant ainsi les risques liés à la sécurité.

- Le nombre de niveaux de tension de sortie possibles est supérieur au double du nombre de sources de courant continu ( $N = 2s + 1$ ).

### ❖ Inconvénients

- Pour un système triphasé, un nombre plus important de commutateurs est nécessaire par rapport à un onduleur traditionnel.
- Il est indispensable de maintenir l'équilibre entre les différentes sources de courant continu.
- L'utilisation de plusieurs connecteurs et câbles est nécessaire pour relier les différentes sources de courant continu [4].

Les sorties des onduleurs en pont sont connectées en série de manière à ce que l'onde de la tension synthétisée soit la somme des tensions de sortie. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est défini par :

$$M = 2s + 1 \quad (1.3)$$

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

La topologie du pont en cascade H a été utilisée dans de multiples applications telles que les systèmes photovoltaïques, les systèmes d'entraînement des moteurs, alimentation des véhicules électriques. Par contre dans d'autres applications mobiles (comme dans la traction ferroviaire, et dans la propulsion maritime). Dans des applications industrielles comme l'alimentation des compresseurs de forte puissance (plusieurs dizaines de mégawatts) pour le pompage du pétrole et du gaz par exemple [15].

### 1.6.2. Onduleurs multi-niveaux symétriques

Les topologies présentées précédemment (diode clampée, condensateur flottant et en cascade en pont H) sont considérés comme des onduleurs symétriques, car les tensions des condensateurs des circuits intermédiaires sont égales, et tous les éléments de commutation ont même tension nominale (capacité de blocage de tension). L'un des principaux inconvénients de ces topologies est le nombre élevé de dispositifs de commutation en particulier pour le nombre élevé de tension niveaux, le Tableau (5) suivant compare le nombre de dispositifs de commutation requis pour chaque topologie [16].

On suppose que les éléments de commutation ont la même puissance nominale.

**Tableau 4:** Comparaison entre les différentes structures.

	Topologies	T	D	M
3 niveaux	NPC	4	6	2
	FC	4	4	2
	Cascade en pont H	4	4	2
5 niveaux	NPC	8	20	4
	FC	8	8	4
	Cascade en pont H	8	8	4
7 niveaux	NPC	12	42	6
	FC	12	12	6
	Cascade en pont H	12	12	6
$m+1$ niveaux	NPC	$2m$	$m^2+m$	$M$
	FC	$2m$	$2m$	$M$
	Cascade en pont H	$2m$	$2m$	$M$

Avec :

T : Nombre de transistors ;

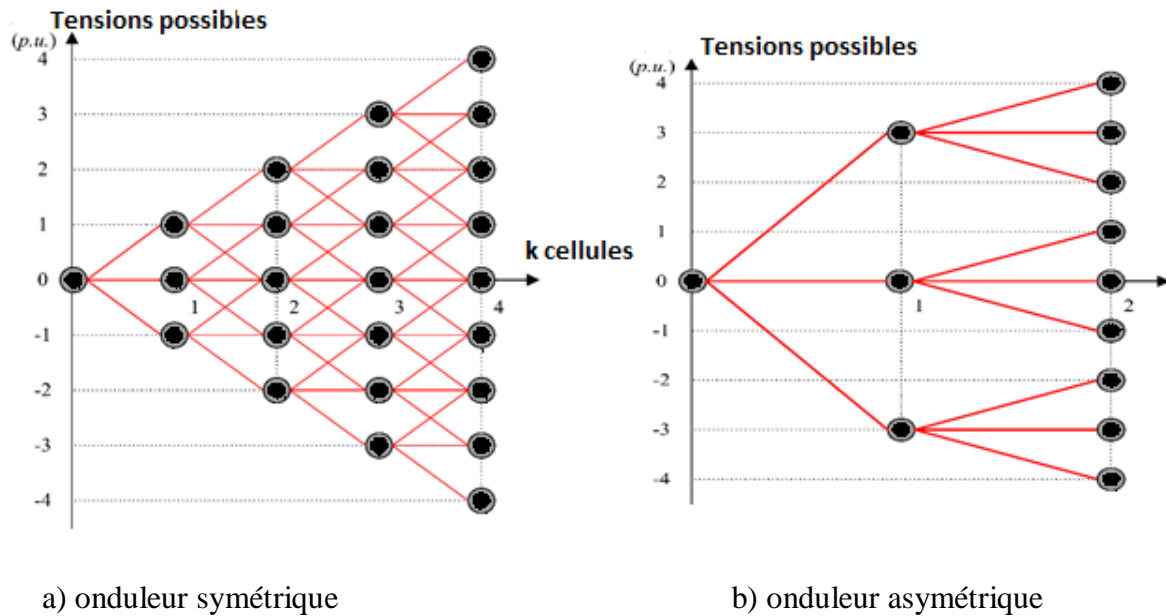
D : Nombre de diodes ;

m : Nombre de niveaux obtenus ;

### 1.6.3. Onduleurs multi-niveaux asymétriques

La plupart des onduleurs multi-niveaux asymétriques ont la même topologie exacte que les onduleurs symétriques à plusieurs niveaux. La seule différence est la valeur de la tension continue d'entrée de chaque module et la tension/tension nominale du composant de commutation. Tout comme pour les onduleurs multi-niveaux symétriques, la principale difficulté des onduleurs multi-niveaux asymétriques réside dans la réalisation d'une alimentation performante, les alimentations des cellules devant être isolées les unes des autres. Le problème est même plus délicat, car il peut y avoir une circulation de puissance entre les cellules [16].

La Figure (8) suivante : représente la topologie de convertisseur en pont H en cascade monophasée [16].



**Figure 8:** Niveaux de tension possibles en utilisant des topologies symétriques et asymétriques.

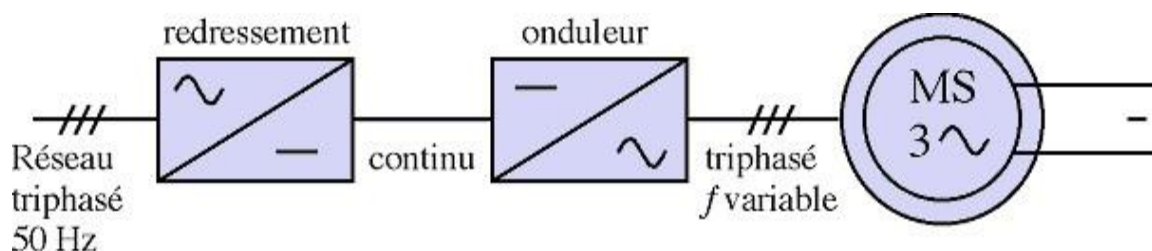
## 1.7. Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel

Parmi les nombreux domaines où l'utilisation des onduleurs est croissante, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée, alimentés directement à partir du réseau via un redresseur avec filtrage, ainsi que ceux alimentés par une batterie d'accumulateurs [17].

Les onduleurs sont très utilisés dans les applications industrielles, ils sont très nécessaires dans le domaine de l'industrie, On peut citer par exemple :

### 1.7.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif

Le contrôle de la vitesse d'un moteur à courant alternatif dépend de la fréquence des courants statiques. Cela s'effectue en ajustant à la fois la fréquence et l'amplitude de la tension [18]. Pour ce faire, il est nécessaire de redresser la tension du réseau puis de la convertir en une fréquence désirée à l'aide d'un onduleur. La Figure (9) suivante représente le Réglage de la vitesse d'un moteur à courant alternatif [18].



**Figure 9:** Réglage de la vitesse d'un moteur à courant alternatif.

### Remarque :

Pour garantir la puissance nominale du moteur lors des variations de fréquence, il est crucial de maintenir constant le rapport entre la fréquence et la tension ( $f/v$ ). Cela signifie qu'une augmentation de la fréquence doit s'accompagner d'une augmentation proportionnelle de la tension d'alimentation.

### 1.7.2. Alimentation de secours

En cas de panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des équipements à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est essentiel pour prévenir la perte d'informations lors de coupures de courant [19].

- La Figure (10) suivante représente : Alimentation de secours [19].

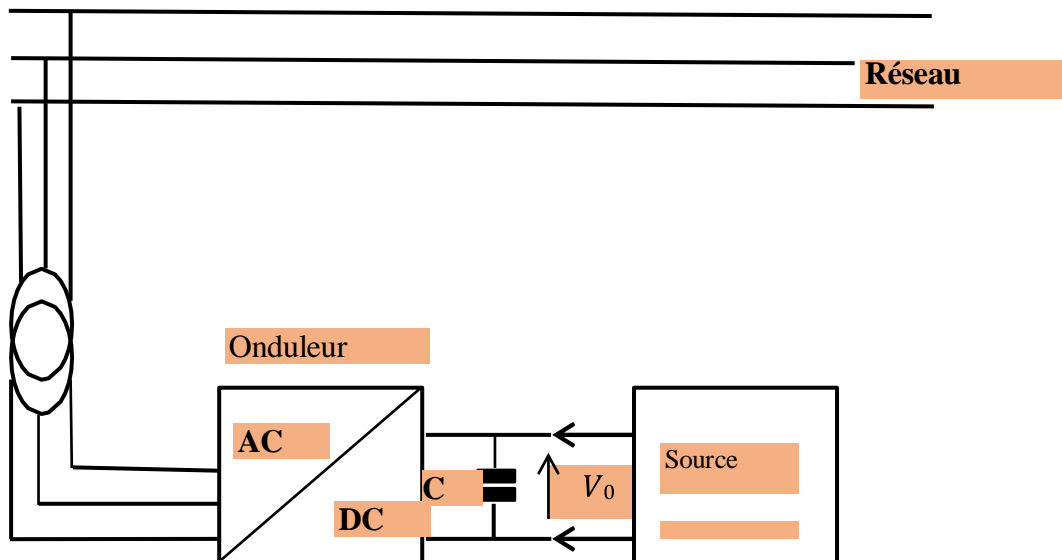


Figure 10:Alimentation de secours.

### 1.7.3. Applications relatives aux transports

- **Transport ferroviaire**

Les motrices actuellement développées sont entraînées par des machines alternatives asynchrones. Pour contrôler la vitesse de rotation de celles-ci, il est nécessaire de pouvoir ajuster la fréquence de leur alimentation. Cela est réalisé grâce à un onduleur. Par exemple, dans les TGV, les trains et les tramways [20].

- **Transport aérien et maritime**

Chaque avion génère son propre approvisionnement en énergie électrique pour alimenter ses équipements de bord [20].

### **1.7.4. Intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique**

Si les centrales renouvelables sont destinées à remplacer à terme les centrales conventionnelles dans toutes leurs fonctions dans le système électrique, elles doivent également assurer la stabilité en participant aux services systèmes, tels que le réglage de fréquence et de tension. Pour participer au réglage de fréquence, une centrale doit pouvoir ajuster rapidement sa puissance de sortie en réponse à une demande. Pour ce faire, la centrale doit inclure dans son plan de production des marges de manœuvre par rapport à ses limites de puissance, ce qui lui permet de modifier son injection au réseau, que ce soit à la hausse ou à la baisse. Pour les centrales à prévisibilité limitée comme les centrales photovoltaïques et éoliennes, il n'est pas possible de garantir ces marges à l'avance. Les systèmes de stockage peuvent alors fonctionner comme des réserves bidirectionnelles pendant les périodes où aucune charge ou décharge n'est prévue selon le plan de production [21].

## **1.8. Conclusion**

À la fin de ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance de l'onduleur multi-niveaux et ses applications dans le domaine de l'électronique de puissance. Nous avons examiné ses différents types et sa structure générale, qui sont intéressants et utilisables dans l'industrie. Cela nous amène au chapitre suivant où nous aborderons la modélisation de l'onduleur sept niveaux ainsi que sa stratégie de commande. Nous discuterons également de la modélisation de la charge et des différentes techniques de commande adaptées selon le domaine d'application.

# Chapitre 2

## *Modélisation de l'onduleur sept niveaux et sa stratégie de commande*

### 2.1. Introduction

Les onduleurs sont des dispositifs de conversion statique qui assurent la conversion de courant continu en courant alternatif. Il existe deux catégories principales d'onduleurs : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant (ou commutateurs). Ils trouvent de nombreuses applications, parmi lesquelles la plus variée est probablement celle de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. L'avancement de la fonction de conversion repose d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part sur l'adoption quasi-généralisée des techniques de modulation de largeur d'impulsions [22]. Dans ce chapitre, nous examinerons l'onduleur à sept niveaux et sa stratégie de commande adaptées à ce type d'onduleur.

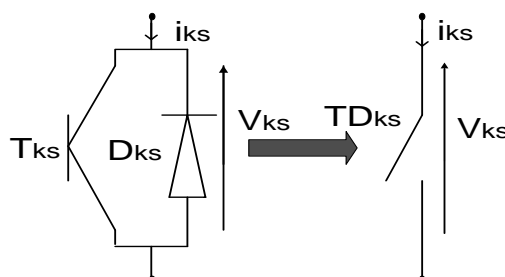
- ❖ Premièrement, nous présenterons la modélisation du fonctionnement de l'onduleur à sept niveaux, en développant son modèle de fonctionnement et son modèle de commande.
- ❖ Deuxièmement, nous nous pencherons sur les stratégies de commande spécifiques aux onduleurs triphasés à sept niveaux. Ces stratégies permettent de générer des signaux de commande pour les onduleurs afin de produire une source de tension aussi sinusoïdale que possible. Dans ce chapitre, nous étudierons les stratégies de commande possibles.

### 2.2. La modélisation de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC

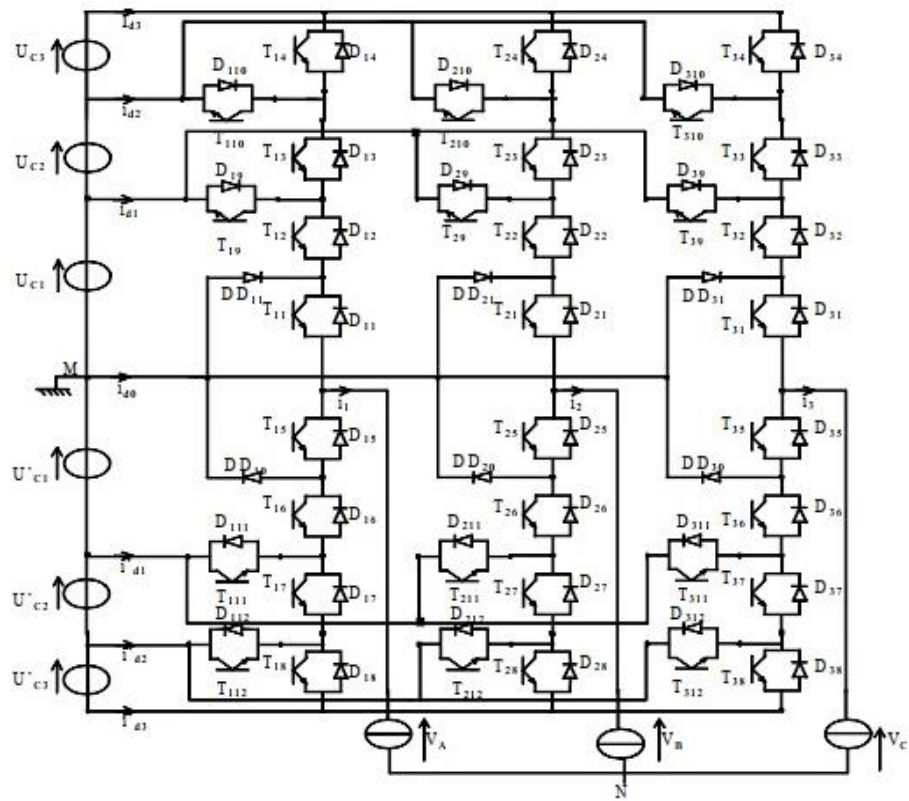
#### 2.2.1. Architecture de l'onduleur

L'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) étudié est composé de trois bras et de six sources de tension continue. Chaque bras comporte douze interrupteurs, avec huit en série et quatre en parallèle, ainsi que deux diodes montées en antiparallèle. La figure (11) illustre schématiquement cet onduleur [22].

- La structure examinée dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à sept niveaux à structure NPC, comme représentée dans la figure 12 : [23].



**Figure 11:** Interrupteur bidirectionnel équivalent du pair transistor – diode.[22]



**Figure 12:**La structure de l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC (Neutral PointClamping (VSI) [23].

### 2.2.2. Postulats

- Les tensions d'entrée de l'onduleur sont considérées idéales, ce qui implique que la tension aux bornes de l'alimentation reste constante quel que soit le courant délivré par celle-ci:

$$(U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U'_{C1} = U'_{C2} = U'_{C3} = U_C)$$

- La chute de tension à travers les semi-conducteurs est insignifiante par rapport à la tension d'alimentation, qui se situe généralement autour de quelques centaines de volts.
- L'onduleur fonctionne en mode de commande.

Dans ces conditions, on peut définir le fonctionnement des interrupteurs [24][25].

### 2.2.3. Fonction de liaison

Chaque interrupteur  $TD_{ks}$  introduit une fonction de connexion  $F_{ks}$ , qui décrit son état ouvert ou fermé [26][27], tel que :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{ks} \text{ est fermé.} \\ 0 & \text{dans le cas contraire.} \end{cases}$$

### 2.2.4. Fonction de génération

La fonction génératrice de connexion  $F_{ksg}$  est une fonction continue qui représente la moyenne de la fonction de connexion discontinue  $F_{ks}$  sur une période de commutation  $T_h$  [26][27].



Cette période  $T_h$  est supposée être infinitésimale. La fonction génératrice de connexion est définie par l'expression suivante:

$$F_{ksg} = \left[ \frac{1}{T_h} \int_{nT_h}^{(n+1)T_h} F_{KS}(\tau) d\tau \right] \in [0, 1] \rightarrow (2.1)$$

Avec  $n \in N$  et  $T_h \rightarrow 0$

### 2.2.5. Stratégie de contrôle supplémentaire

La structure de l'onduleur à sept niveaux. Dans cette configuration, il est possible d'avoir vingt-quatre combinaisons complémentaires, mais seules deux d'entre elles sont pertinentes pour notre étude, nous avons opté pour l'utilisation de la commande complémentaire définie comme suit :

$$\begin{cases} B_{K5} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K6} = \overline{B_{K1}} \\ B_{K7} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K8} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \rightarrow (2.2)$$

Avec  $B_{ks}$ , commande de base du transistor  $T_{ks}$  de ce bras  $k$ . Ainsi, avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs du bras  $K$  sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K5} = 1 - F_{K2} \\ F_{K6} = 1 - F_{K1} \\ F_{K7} = 1 - F_{K4} \\ F_{K8} = 1 - F_{K3} \end{cases} \rightarrow (2.3)$$

Pour l'onduleur à sept niveaux, on définit une fonction de connexion du demi-bras

Avec:

$K$ : numéro du bras.

$m=1$  pour le demi-bras du haut, et  $m=0$  pour le demi-bras du bas.

Pour un bras  $k$ , les fonctions de connexion des demi-bras sont exprimées en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs de la manière suivante :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \cdot F_{k3} \cdot F_{k4} \\ F_{K0}^b = F_{k5} \cdot F_{k6} \cdot F_{k7} \cdot F_{k8} \end{cases} \rightarrow (2.4)$$

$F_{K1}^b$  La fonction de connexion est liée au demi- bras supérieur.  $(TD_{K1} \cdot TD_{K2} \cdot TD_{K3} \cdot TD_{K4}) \cdot F_{K0}^b$

Elle est liée au demi -bras supérieur du bras.  $(TD_{K5} \cdot TD_{K6} \cdot TD_{K7} \cdot TD_{K8})$ .

### 2.2.6. Modélisation basée sur les valeurs instantanées

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à sept niveaux par rapport au point milieu M sont exprimés sous forme matricielle dans le système suivant, en considérant leur association avec une charge triphasée connectée en étoile avec neutre isolé, représentée par une machine asynchrone (MAS).

Soit le système d'équation suivant:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{19} + F_{110} + F_{11}^b \\ F_{29} + F_{210} + F_{21}^b \\ F_{39} + F_{310} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{110} + F_{11}^b \\ F_{210} + F_{21}^b \\ F_{310} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C3} - \begin{bmatrix} F_{111} + F_{112} + F_{10}^b \\ F_{211} + F_{212} + F_{20}^b \\ F_{311} + F_{312} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C1} - \begin{bmatrix} F_{112} + F_{10}^b \\ F_{212} + F_{20}^b \\ F_{312} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C2} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C3} \rightarrow (2.5)$$

Le système d'équations (2.5) démontre que l'onduleur à sept niveaux peut être vu comme une série de six onduleurs à deux niveaux ou trois onduleurs à trois niveaux.[28]

Dans le cas où  $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U'_{C1} = U'_{C2} = U'_{C3} = U_C$ ,

La relation (2.5) se limite à:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{19} + 2F_{110} + 3F_{11}^b - F_{111} - 2F_{112} - 3F_{10}^b \\ F_{29} + 2F_{210} + 3F_{21}^b - F_{211} - 2F_{212} - 3F_{20}^b \\ F_{39} + 2F_{310} + 3F_{31}^b - F_{311} - 2F_{312} - 3F_{30}^b \end{bmatrix} U_C \rightarrow (2.6)$$

Le système suivant expose les relations fondamentales de conversion de l'onduleur à sept niveaux:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d3} \\ i'_{d1} \\ i'_{d2} \\ i'_{d3} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ U_{C3} \\ U'_{C1} \\ U'_{C2} \\ U'_{C3} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \rightarrow (2.7)$$

La matrice de conversion simple est désignée par  $[N(t)]$ . Sa définition est la suivante:

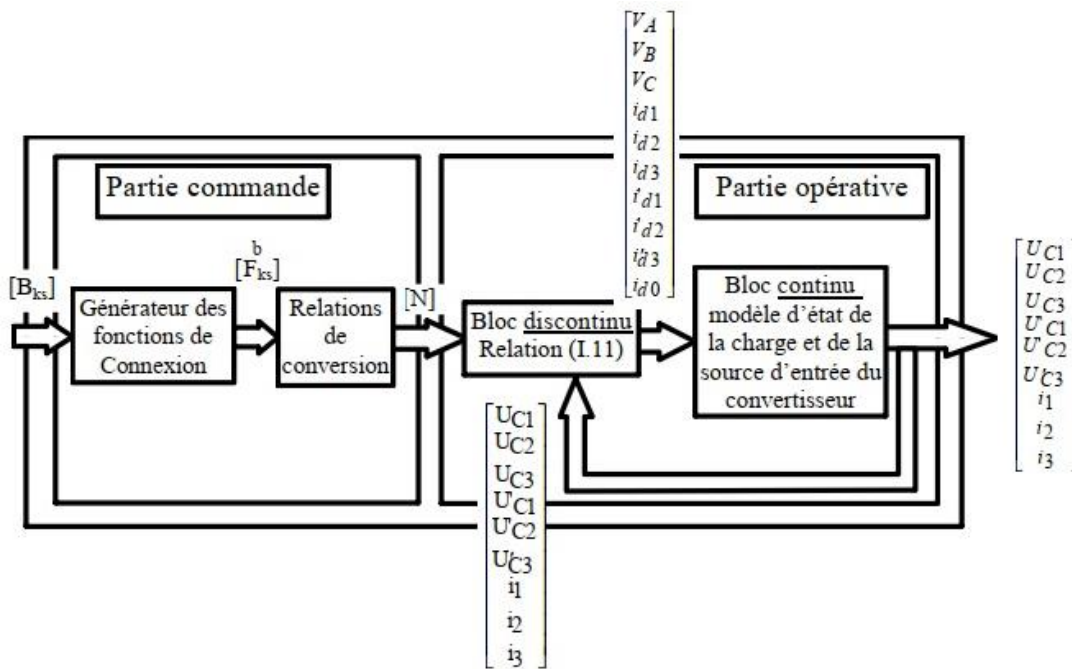
$$[N(t)] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{14} & N_{15} & N_{16} & 0 & 0 & 0 \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{24} & N_{25} & N_{26} & 0 & 0 & 0 \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{34} & N_{35} & N_{36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{19} & F_{29} & F_{39} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{110} & F_{210} & F_{310} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{111} & F_{211} & F_{311} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{112} & F_{212} & F_{312} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11} & F_{15} & F_{21} & F_{25} & F_{31} & F_{35} \end{bmatrix} \rightarrow (2.8)$$

Avec :

$$\begin{aligned}N_{11} &= 1/3[2.(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) - (F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) - (F_{39} + F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{12} &= 1/3[2.(F_{110} + F_{11}^b) - (F_{210} + F_{21}^b) - (F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{13} &= 1/3[2.(F_{11}^b) - (F_{21}^b) - (F_{31}^b)] \\N_{14} &= 1/3[2.(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{15} &= 1/3[2.(-F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{16} &= 1/3[2.(-F_{10}^b) - (-F_{20}^b) - (-F_{30}^b)] \\N_{21} &= 1/3[-(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) + 2.(F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) - (F_{39} + F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{22} &= 1/3[-(F_{110} + F_{11}^b) + 2.(F_{210} + F_{21}^b) - (F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{23} &= 1/3[-(F_{11}^b) + 2.(F_{21}^b) - (F_{31}^b)] \\N_{24} &= 1/3[-(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) + 2.(-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{25} &= 1/3[-(-F_{112} - F_{10}^b) + 2.(-F_{212} - F_{20}^b) - (-F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{26} &= 1/3[-(-F_{10}^b) + 2.(-F_{20}^b) - (-F_{30}^b)] \\N_{31} &= 1/3[-(F_{19} + F_{110} + F_{11}^b) - (F_{29} + F_{210} + F_{21}^b) + 2.(F_{39} + F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{32} &= 1/3[-(F_{110} + F_{11}^b) - (F_{210} + F_{21}^b) + 2.(F_{310} + F_{31}^b)] \\N_{33} &= 1/3[-(F_{11}^b) - (F_{21}^b) + 2.(F_{31}^b)] \\N_{34} &= 1/3[-(-F_{111} - F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{211} - F_{212} - F_{20}^b) + 2.(-F_{311} - F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{35} &= 1/3[-(-F_{112} - F_{10}^b) - (-F_{212} - F_{20}^b) + 2.(-F_{312} - F_{30}^b)] \\N_{36} &= 1/3[-(-F_{10}^b) - (-F_{20}^b) + 2.(-F_{30}^b)]\end{aligned}$$

Le modèle global de l'onduleur triphasé à sept niveaux en mode commandable, associé à sa source de tension d'entrée et sa charge triphasée. Il est possible de distinguer deux composants principaux:

- La partie de commande, représentée par un réseau de Petri, supervise le fonctionnement de l'onduleur triphasé en mode commandable. Cette section génère la matrice de conversion en utilisant la relation (2.6).
- La section opérationnelle, est composée de:
  - À partir d'un bloc discontinu qui reçoit les entrées internes générées par le convertisseur à partir de ses variables d'état et de la matrice de conversion.
  - D'un bloc continu qui représente le modèle d'état de la charge de l'onduleur et de sa source de tension d'entrée.



**Figure 13:**Modèle conceptuel de l'onduleur triphasé à sept niveaux avec structure NPC [27].

### 2.2.7. Modélisation à valeurs moyennes

Le modèle conceptuel global présenté précédemment dans la Figure 13 est bien adapté à la simulation, ainsi qu'à la validation des stratégies de commande. Pour le rendre compatible avec la commande de l'onduleur par un ordinateur numérique, on élabore un modèle de commande en utilisant le concept de fonction génératrice (équation (2.1)) [27][28]. Cette approche découpe le fonctionnement de l'onduleur se déroule par intervalles de temps réguliers qui définissent sa période de fonctionnement, notée  $T_h$ . L'usage de ces fonctions génératrices permet de modéliser les valeurs moyennes du bloc discontinu du modèle de connaissance sur une période  $T_h$ .

### 2.3. Stratégie de commande de l'onduleur

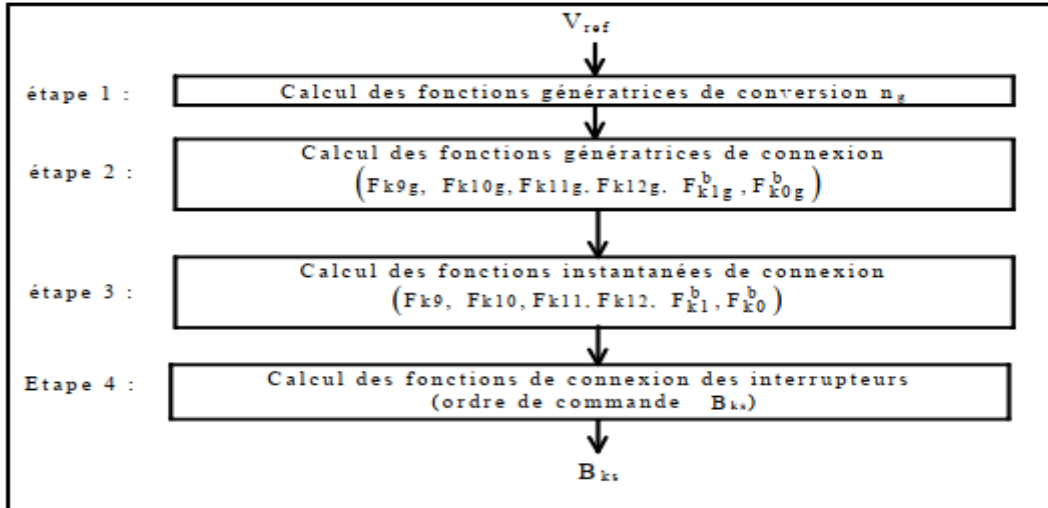
L'évolution rapide des algorithmes de commande haute performance pour les machines à courant alternatif nécessite des méthodes de réglage avancées pour les tensions et la fréquence d'alimentation. Afin de produire une source de tension aussi sinusoïdale que possible, différentes stratégies de commande ont été développées pour les onduleurs à deux et trois niveaux [29][30][31].

Pour l'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC, plusieurs méthodes de commande ont également été développées, souvent étendant celles utilisées pour les onduleurs à deux et trois niveaux. Dans ce contexte, nous étudierons deux algorithmes de modulation calculée. L'évaluation de ces stratégies portera sur les performances du contrôle de la machine asynchrone triphasée alimentée par cet onduleur, ainsi que sur la bande passante de réglage et la distorsion harmonique des tensions de sortie [28].

### 2.3.1. Modulation calculée

Dans cette section, nous allons introduire deux algorithmes de commande pour l'onduleur NPC à sept niveaux, adaptés à une implémentation numérique en utilisant le modèle de commande de ce convertisseur [32].

L'organigramme global d'une stratégie MLI utilisant le modèle de commande est illustré dans la figure 14 suivante : [32].



**Figure 14:**Diagramme d'une modulation calculée exploitant le modèle de commande de l'onduleur à sept niveaux à structure NPC.

- **Premier algorithme**

Cet algorithme repose sur la modulation à une seule porteuse triangulaire-sinusoïdale [28][33]. Les différentes étapes de l'organigramme illustré à l'équation 2.4 se déroulent comme suit

✓ **Première Étape** calcul des fonctions génératrices de conversion de base  $ng_k$ :

$$ng_k = \frac{V_{refk}}{U_c} \rightarrow (2.9)$$

Avec : pour k égal à 1.2 et 3

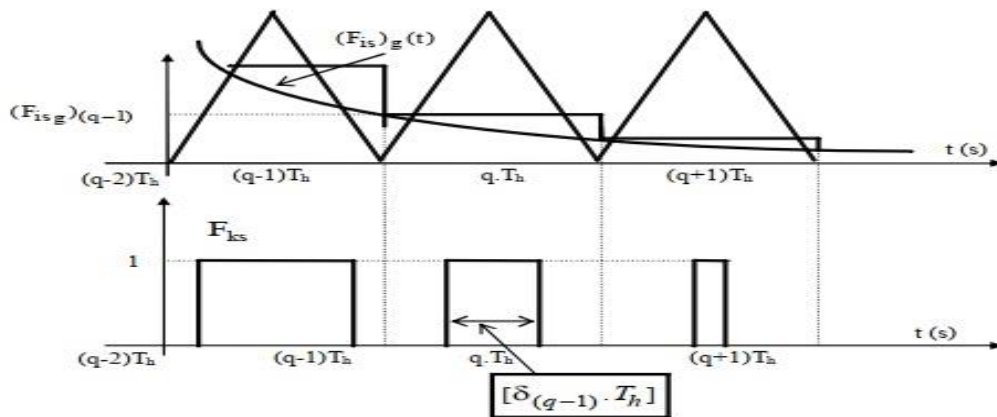
✓ **Deuxième Étape** Calcul des fonctions génératrices de connexion pour les demi -bras et les interrupteurs.

$$\begin{aligned}
 0 \leq ng_k \leq 1 &\rightarrow (F_{k9})_g = ng_k \\
 1 < ng_k \leq 2 &\rightarrow \begin{cases} (F_{k9})_g + 2 \cdot (F_{k10})_g = ng_k \\ (F_{k9})_g + (F_{k10})_g = 1 \end{cases} \\
 2 < ng_k \leq 3 &\rightarrow \begin{cases} 2 \cdot (F_{k10})_g + 3 \cdot (F_{k1}^b)_g = ng_k \\ (F_{k10})_g + (F_{k1}^b)_g = 1 \end{cases} \\
 -1 < ng_k \leq 0 &\rightarrow (F_{k11})_g = ng_k \\
 -2 < ng_k \leq -1 &\rightarrow \begin{cases} (F_{k11})_g + 2 \cdot (F_{k12})_g = ng_k \\ (F_{k11})_g + (F_{k12})_g = 1 \end{cases} \\
 -3 \leq ng_k \leq -2 &\rightarrow \begin{cases} 2 \cdot (F_{k12})_g + 3 \cdot (F_{k0}^b)_g = ng_k \\ (F_{k12})_g + (F_{k0}^b)_g = 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

### ✓ Troisième Étape

Calcul des fonctions instantanées de connexion pour les interrupteurs et les demi-bras. La figure 2.5 illustre la transformation des fonctions génératrices continues  $(F_{ks})_g$   $(F_{ks})_g$   $(F_{ks})_g$  en fonctions de connexion, qui se présentent comme une répartition temporelle d'impulsions de largeur variable, soit une modulation de largeurs d'impulsion (MLI). Si l'échantillonnage est effectué au début de la période entre les instants  $(q-1) \cdot T_h$  et  $q \cdot T_h$ ,  $(F_{ks})_g(q-1)$ , représente l'amplitude échantillonnée de la fonction génératrice sur cette période. La moyenne de la connexion établie pendant cette période doit être égale à  $(F_{ks})_g(q-1)$ , donc:

$$\left(\frac{1}{T_h}\right) \cdot \int_{(q-1)T_h}^{qT_h} F_{ks} \cdot dt = \delta_{(q-1)} = (F_{ks_g})_{(q-1)} \rightarrow (2.10)$$



**Figure 15:**Génération des fonctions de connexion discontinues à partir de leurs fonctions génératrices. [34]

• **Deuxième algorithme**

Pour faciliter l'implémentation de la modulation vectorielle, nous proposons cet algorithme qui utilise le modèle de commande spécifique à l'onduleur à sept niveaux.

✓ **Première Étape** Calcul des fonctions génératrices de conversion élémentaires simples

$$ng_k^* = \frac{V_{refk}^*}{U_C} \rightarrow (2.10)$$

Telle que:

$$V_{refk}^* = V_{refk} + V_0 \rightarrow (2.11)$$

et

$$V_0 = - \{ \max (V_{refk=1,2,3}) + \min (V_{refk=1,2,3}) \} / 2 \rightarrow (2.12)$$

✓ **Deuxième Étape** Calcul des fonctions génératrices de connexion pour les demi-bras et les interrupteurs

$$. 0 \leq ng_k^* \leq 1 \rightarrow (F_{k9})_g = ng_k^*$$

$$. 1 < ng_k^* \leq 2 \rightarrow \begin{cases} (F_{k9})_g + 2 \cdot (F_{k10})_g = ng_k^* \\ (F_{k9})_g + (F_{k10})_g = 1 \end{cases}$$

$$. 2 < ng_k^* \leq 3 \rightarrow \begin{cases} 2 \cdot (F_{k10})_g + 3 \cdot (F_{k1}^b)_g = ng_k^* \\ (F_{k10})_g + (F_{k1}^b)_g = 1 \end{cases}$$

$$. -1 \leq ng_k^* \leq 0 \rightarrow (F_{k11})_g = ng_k^*$$

$$. -2 \leq ng_k^* < -1 \rightarrow \begin{cases} (F_{k11})_g + 2 \cdot (F_{k12})_g = ng_k^* \\ (F_{k11})_g + (F_{k12})_g = 1 \end{cases}$$

$$. -3 \leq ng_k^* < -2 \rightarrow \begin{cases} 2 \cdot (F_{k12})_g + 3 \cdot (F_{k0}^b)_g = ng_k^* \\ (F_{k12})_g + (F_{k0}^b)_g = 1 \end{cases}$$

### 2.3.2. Comparaison des différentes stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux

Le choix d'une stratégie de commande pour un convertisseur de puissance dépend de l'efficacité de réglage de la stratégie et de l'analyse des harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur. À cette fin, une comparaison des diverses stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux a été effectuée [28][35], dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 5:** Tableau de comparaison des différentes stratégies de commande de l'onduleur à sept niveaux.

Stratégie de commande	Rmax de la caractéristique de réglage	TDH Maximal	TDH Minimal	Fréquence centrale de la première famille d'harmoniques	Fréquence du couple
Triangulo- sinusoïdale à une seule porteuse	1	0.67	0.12	m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoïdale à six porteuses triangulaires	1	0.697	0.113	6.m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoïdale à six porteuses (algorithme 1)	1	0.44	0.1	6.m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoïdale à six porteuses (algorithme 2)	1	0.44	0.11	m.f	6.f où 3.f
Triangulo-sinusoïdale à six porteuses (algorithme 3)	1	0.686	0.11	m.f	6.f où 3.f
Modulation vectorielle	1.15	0.694	0.14	m.f	6.f où 3.f
Modulation calculée(algorithme 1)	1	0.71	0.127	m.f	6.f où 3.f
Modulation calculée(algorithme 2)	1.2	0.73	0.098	m.f	6.f où 3.f

### 2.3.3. Modulation sinusoïdale classique mono porteuse

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI:en anglais: Pulse Width Modulation, soit PWM), est la stratégie de modulation la plus utilisée dans les onduleurs multi-niveaux dite à modulation sinusoïdale. Elle consiste à comparer d'une onde de référence ou modulante, dans le cas général elle est sinusoïdale à une porteuse généralement triangulaire. Le signal de sortie change l'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse [1].

Le facteur de distorsion totale harmonique (THD) de la tension de sortie est défini comme le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la somme quadratique de la valeur du fondamental et des harmoniques de tension.

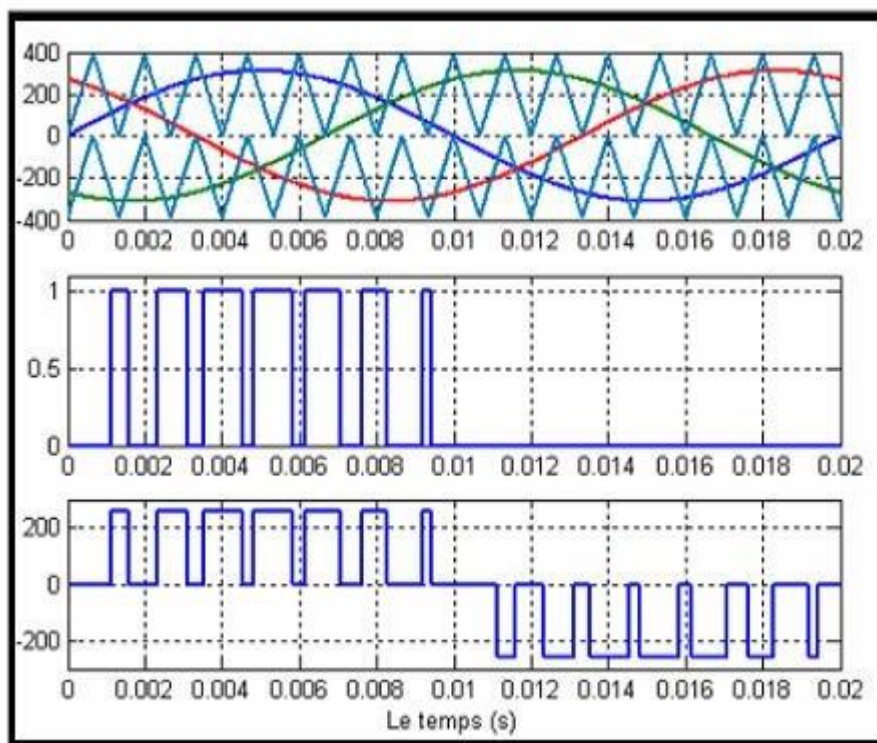
$$THD = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n V_i^2)^{1/2}} \rightarrow (2.10)$$



### 2.3.4. Modulation sinusoïdale à double triangle

Cette stratégie repose fondamentalement sur la modulation sinusoïdale naturelle, pour les onduleurs à trois niveaux, il est recommandé d'utiliser deux signaux triangulaires de même fréquence  $f_c$  et d'amplitude  $A_c$ . Chaque phase est comparée à un signal de référence de fréquence  $f_m$  et d'amplitude  $A_m$ , formant ainsi la modulation sinusoïdale à double triangle est préconisée pour les onduleurs à plusieurs niveaux ( $n$  supérieur à trois), la technique sinusoïdale naturelle avec un seul signal triangulaire ne permet pas de générer tous les signaux de commande requis. C'est pourquoi la modulation sinusoïdale à triangles multiples est nécessaire, utilisant  $(n-1)$  signaux triangulaires de fréquence  $f_c$  et d'amplitude  $A_c$  identiques [36].

La figure 16 suivante montre le fonctionnement de la modulation sinusoïdale à double triangle. Cette approche utilise deux porteuses et trois signaux de référence pour générer la commande de chaque phase [37].

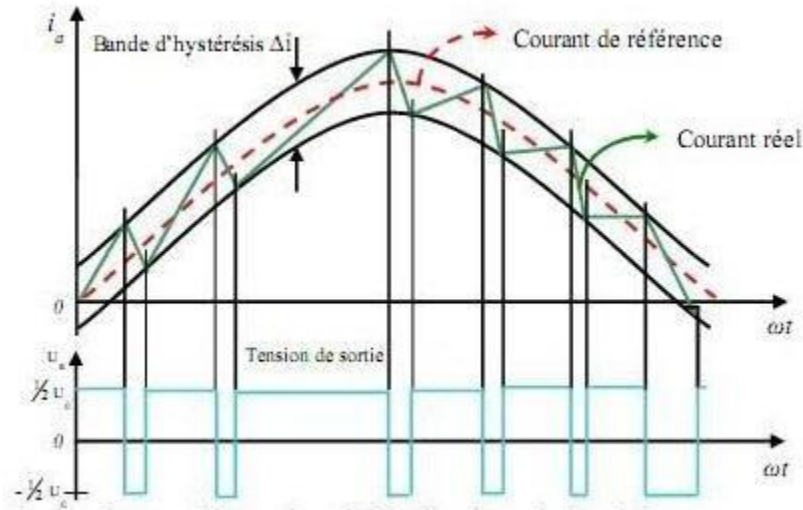


**Figure 16:** Principe de la modulation à double triangle pour la MLI.

### 2.3.5. La commande par hystérésis (ou commande en fourchette)

La commande par hystérésis, aussi appelée commande à bande, est une méthode non linéaire qui repose sur la différence entre le courant de référence et le courant de sortie de l'onduleur, comparée à une bande d'hystérésis préétablie. Cette méthode utilise un comparateur à hystérésis pour comparer le courant mesuré avec le courant de référence. En fonction de cette comparaison, des commandes d'activation et de désactivation des interrupteurs de l'onduleur sont générées afin de maintenir le courant de phase dans une plage spécifique autour du courant de

référence. La figure suivante illustre le schéma de principe de cette stratégie [38].



**Figure 17:** Principe de la commande par hystérésis.

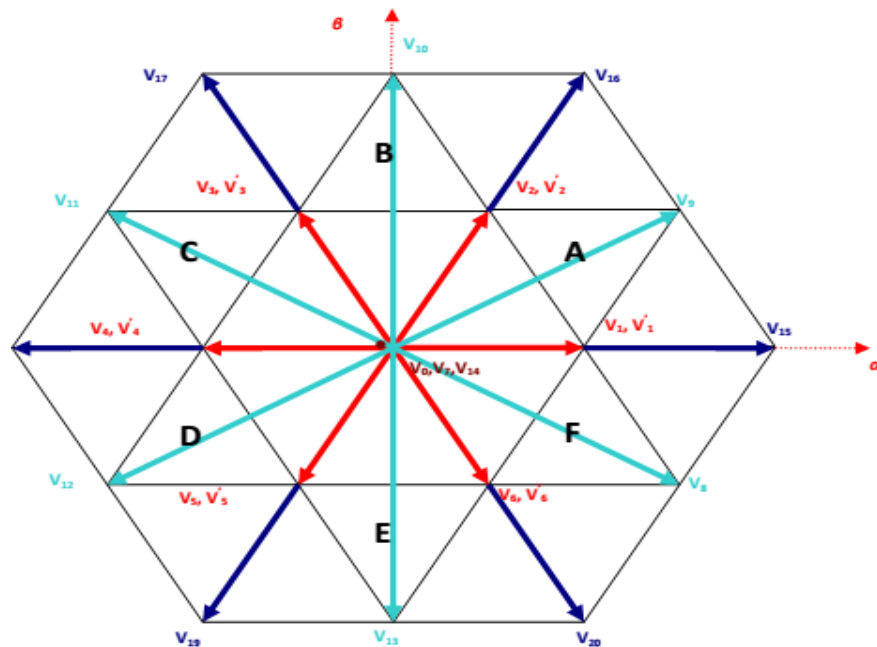
### 2.3.6. La modulation vectorielle

La modulation vectorielle, connue sous le nom de "Space Vector PWM" (Modulation par Largeur d'Impulsion de Vecteur d'Espace), est une méthode de modulation en temps réel utilisant les vecteurs pour représenter les tensions triphasées d'un système à somme nulle, synchronisée sur les trois phases. et se base sur les principes suivants :

Le signal de référence est échantillonnée à intervalles réguliers  $T$  (MLI régulière), Pour chaque phase, une impulsion de largeur  $T$  est générée et centrée sur la période (MLI symétrique), avec une valeur moyenne égale à la tension de référence au moment de l'échantillonnage [39].

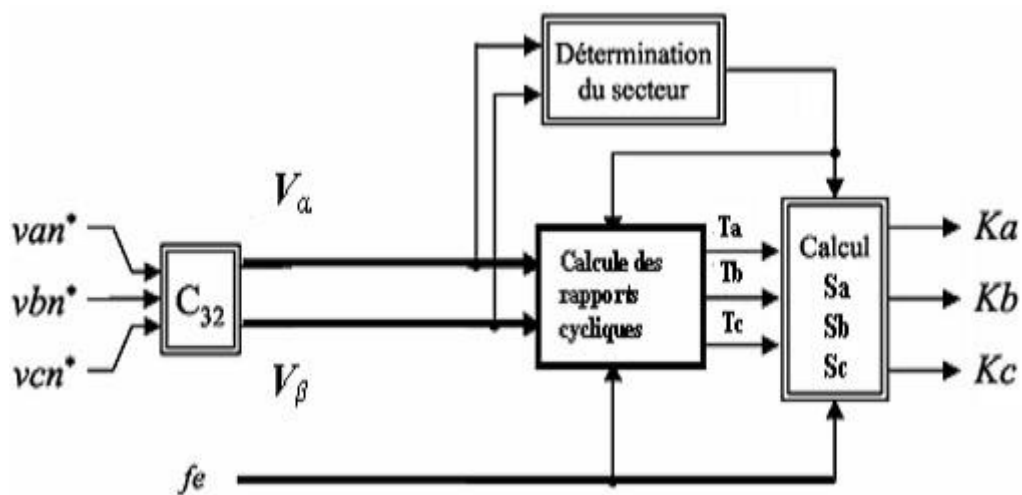
Le vecteur PWM traite directement les signaux au niveau biphase. Il traite donc des signaux triphasés dans leur ensemble. L'onduleur triphasé à trois niveaux de tension ayant trois bras et trois configurations, donc, il possède  $3^3 = 27$  modes de commutations possibles. Il peut donc générer 27 vecteurs différents de tension de sortie ( $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ ).

- La Figure () suivante représente : la représentation dans le plan  $(\alpha, \beta)$  des vecteurs de tension de L'onduleur à trois niveaux de tension V18 [39].



**Figure 18:** Représentation dans le plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) des vecteurs de tension de L'onduleur à trois niveaux de tension V18.

La Figure (19) suivante représente : Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle [39].



**Figure 19:**Le schéma de principe de la M.L.I Vectorielle

### 2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle opérationnel pour un onduleur triphasé à sept niveaux de structure NPC sans hypothèse préalable sur la commande, en utilisant des réseaux de Petri. Nous avons détaillé les diverses configurations possibles d'un bras de cet onduleur. Pour la commande de cet onduleur, nous avons défini une stratégie complémentaire optimale permettant un fonctionnement entièrement contrôlable. L'utilisation des fonctions de connexion des demi-bras en mode commandable nous a permis d'établir une analogie entre le modèle de l'onduleur NPC à sept niveaux et ceux des onduleurs à deux et trois niveaux (structure NPC). En particulier, nous avons montré que la structure de l'onduleur triphasé à sept niveaux peut être considérée comme une série de six onduleurs à deux niveaux ou de trois onduleurs à trois niveaux (structure NPC). L'application des fonctions génératrices a simplifié la construction d'un modèle uniforme de l'onduleur multi-niveaux où toutes les grandeurs sont continuées. Sur cette base, deux stratégies de commande ont été proposées. L'analyse des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur pour ces différentes stratégies a révélé un faible taux d'harmoniques regroupe les composantes de tension selon des familles centrées autour des multiples de la fréquence fondamentale, selon les stratégies adoptées. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la modulation MLI sinusoïdale de l'onduleur sept niveaux de type pont H-bridge, et nous conclurons par les résultats des simulations auxquels nous avons abouti.

# **Chapitre 3**

## ***Simulation et interprétation des résultats***

### **3.1 Introduction**

MATLAB est une plateforme logicielle spécialisée dans le calcul scientifique, la modélisation et la simulation. Il comprend un noyau de calcul intégré à l'environnement Simulink, offrant une modélisation basée sur des schémas de blocs. Des bibliothèques spécialisées, connues sous le nom de "Toolboxes", sont disponibles pour différentes disciplines scientifiques. Tels que l'automatique, le traitement du signal, les mathématiques appliquées, les télécommunications, etc. Chaque Toolbox est conçu pour résoudre des problèmes spécifiques ou effectuer des tâches particulières, incluant des calculs numériques, des visualisations de données et d'autres manipulations mathématiques ou scientifiques. Un programme MATLAB est typiquement constitué de fonctions, de scripts et peut faire usage de bibliothèques de fonctions prédéfinies ou personnalisées pour atteindre ses objectifs [40]. Dans ce chapitre, nous aborderons la modulation MLI sinusoïdale pour l'onduleur à sept niveaux H-Bridge en cascade. Nous traiterons également le fonctionnement en charge R (purement résistive), L (purement inductive), C (purement capacitive) et comportement des trois charges RLC, ainsi que pour l'alimentation d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP). Enfin, nous concluons en présentant les résultats des simulations obtenus.

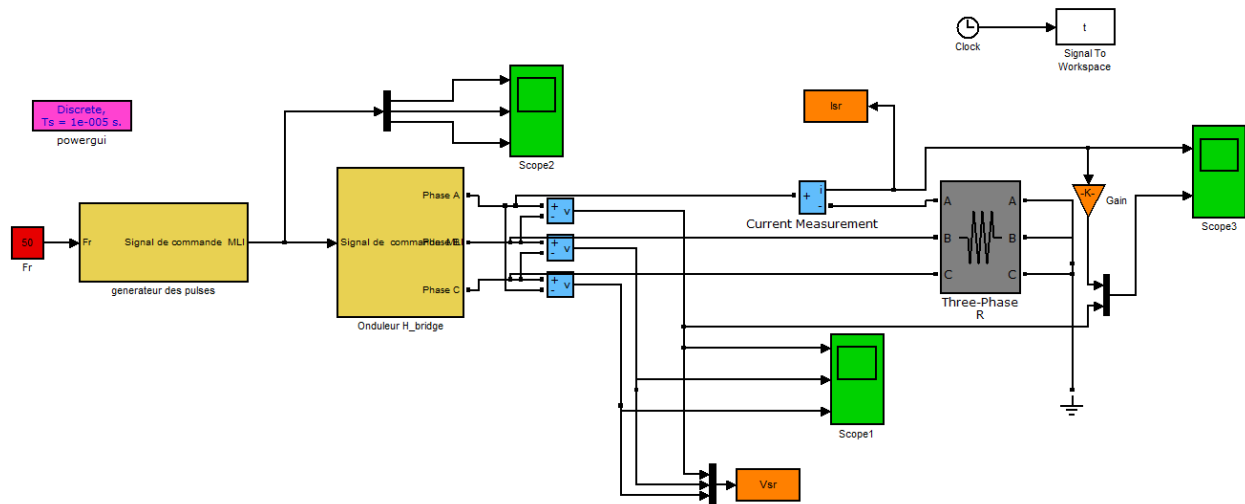
### **3.2. Onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement résistive « R »)**

Le but de ce scénario est de valider et visualiser le modèle de l'onduleur en pont H à sept niveaux fonctionnant en charge purement résistive (R). Parmi les objectifs du scénario, on trouve la vérification du fonctionnement : il s'agit de s'assurer que chaque interrupteur fonctionne correctement et qu'il n'y a ni court-circuit ni défaut dans le circuit. La vérification inclut également la précision des niveaux de tension produits à la sortie. Ensuite, une analyse des performances sera effectuée : on observera les formes d'onde de sortie pour s'assurer qu'elles correspondent aux attentes théoriques, tout en évaluant la stabilité et la qualité du signal produit. Enfin, une préparation à l'utilisation en charge réelle sera effectuée, où les performances de l'onduleur seront mises à l'épreuve dans des conditions d'utilisation concrètes. En résumé, le scénario de test en charge purement résistive pour un onduleur H-bridge à sept niveaux permet de vérifier et d'ajuster son fonctionnement, en s'assurant que les interrupteurs opèrent correctement, que les niveaux de tension sont précis, et que les performances de l'onduleur, en termes de stabilité et de qualité du signal, répondent aux attentes dans des conditions de charge réelle.

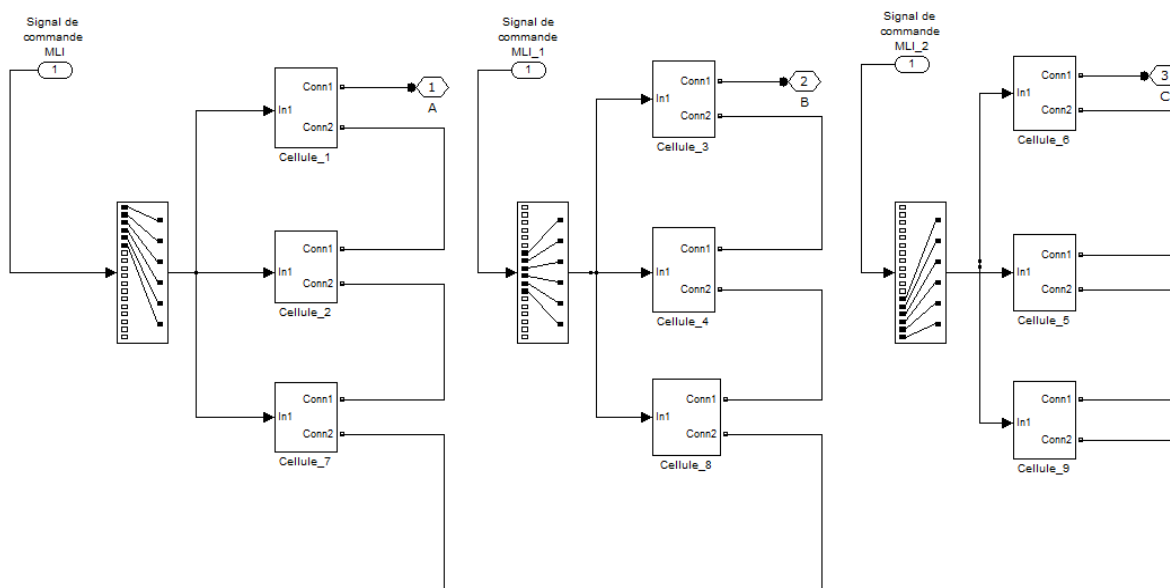
- La figure (25) suivante montre le schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge résistive)

• **Paramètres de simulation :**

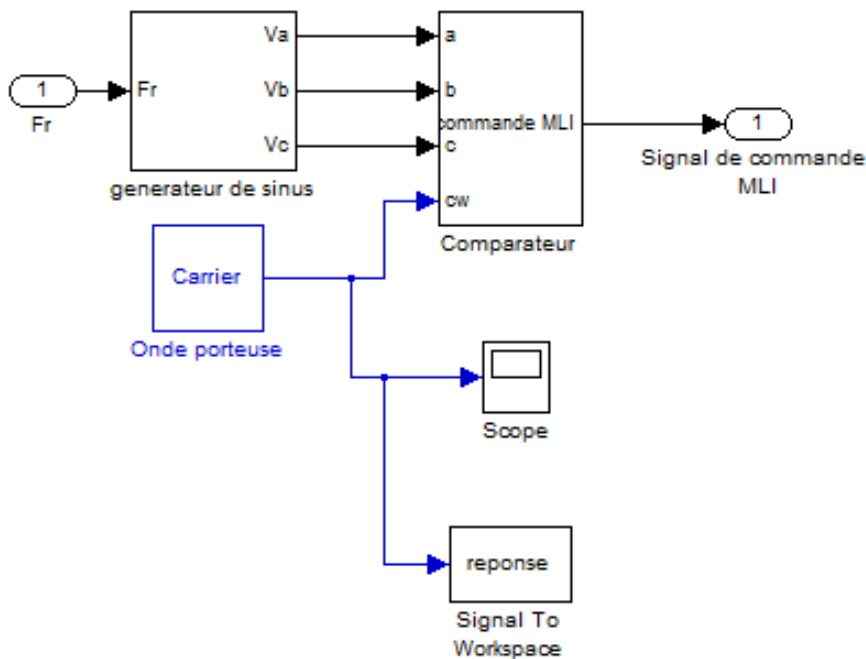
Temps de simulation=0.1s, Tension d'alimentation=280V, Fréquence fondamentale =50 Hz,  $R=10\Omega$ .



**Figure 19:**Schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge résistive).

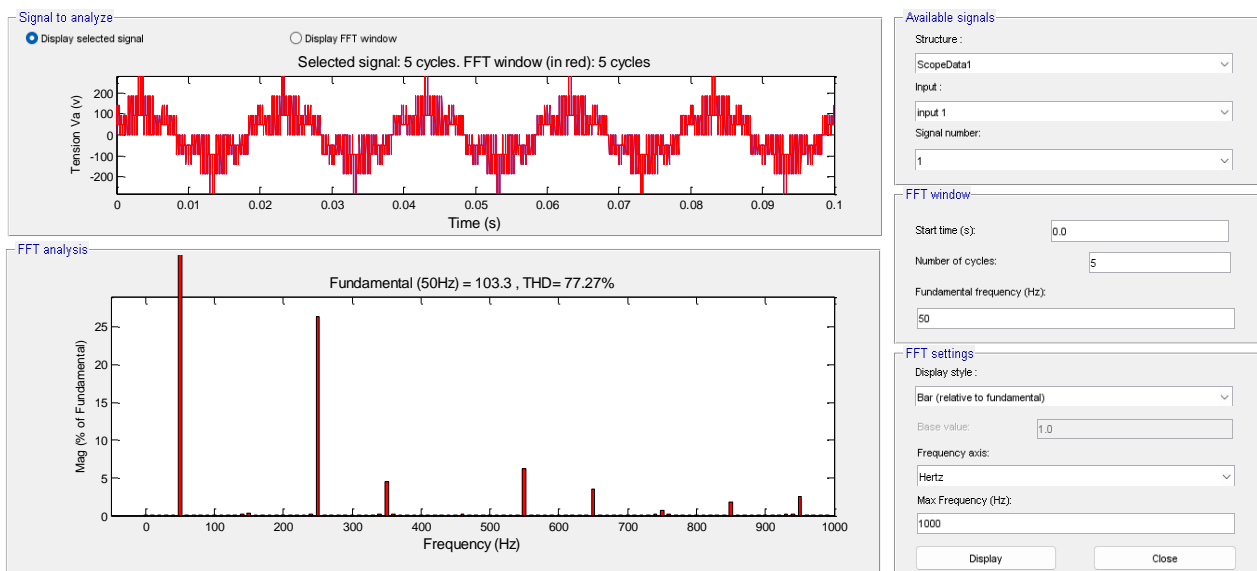


**Figure 20:**Block significatif d'un onduleur en H-bridge à l'intérieur.

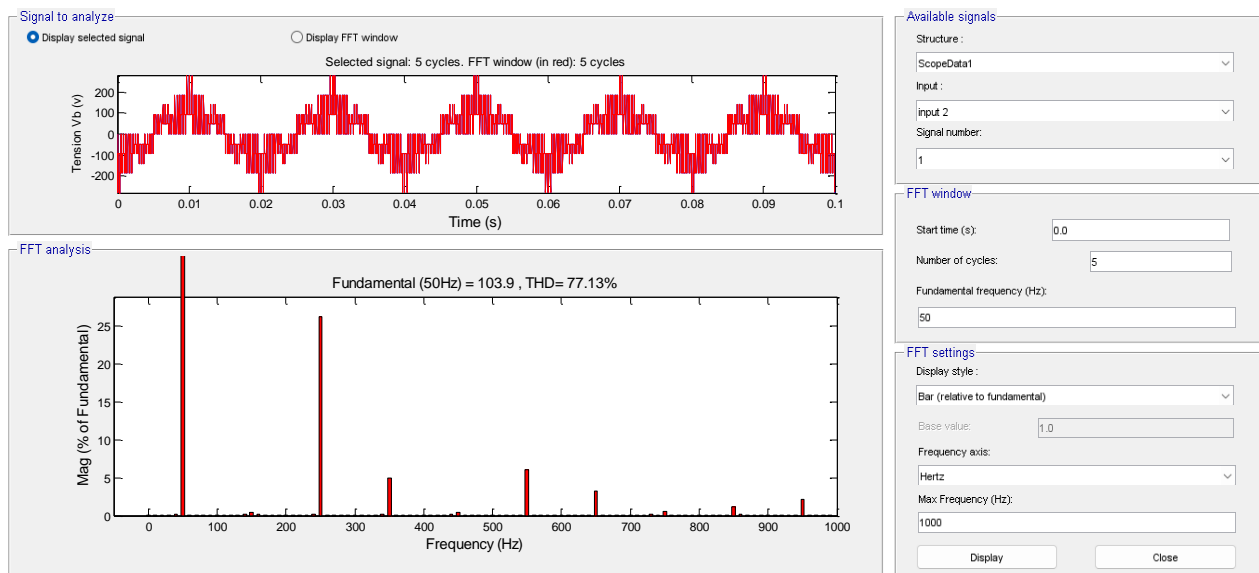


**Figure 21:**Block significatif de générateur des pulses.

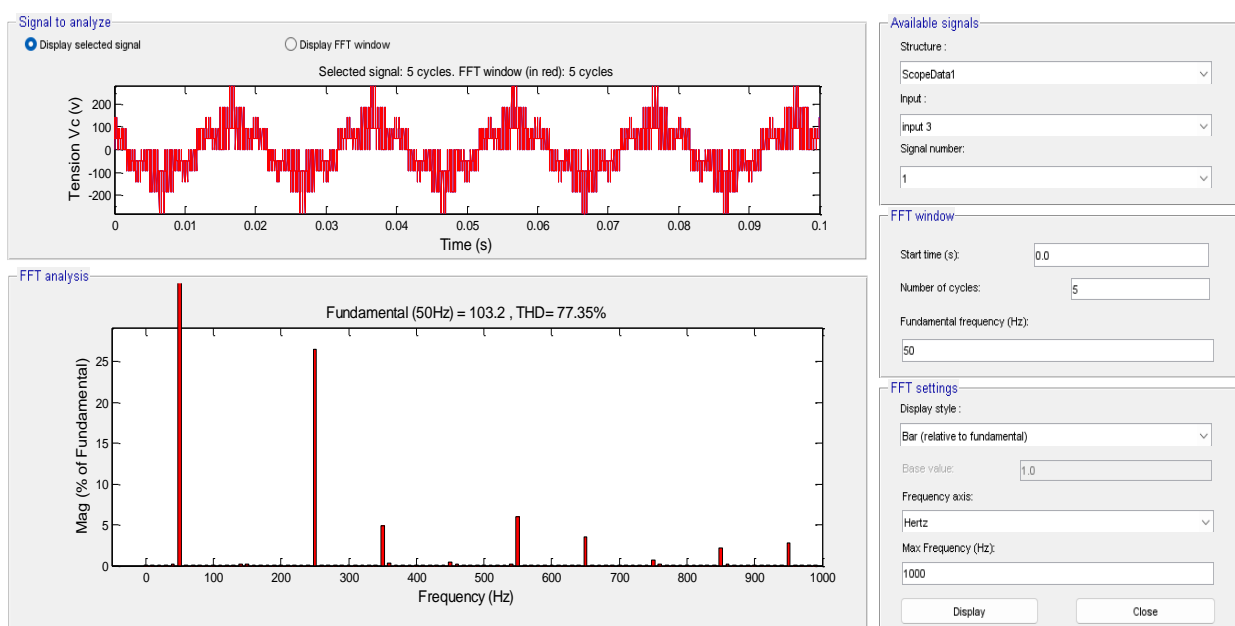
- Les figures 22, 23 et 24 présentent les tensions des trois phases A, B et C ainsi que leur spectre harmonique analysé via l'outil FFT sur une période de 5 cycles, en fonction de la fréquence fondamentale de 50 Hz.



**Figure 22:**La tension Va et son spectre harmonique.



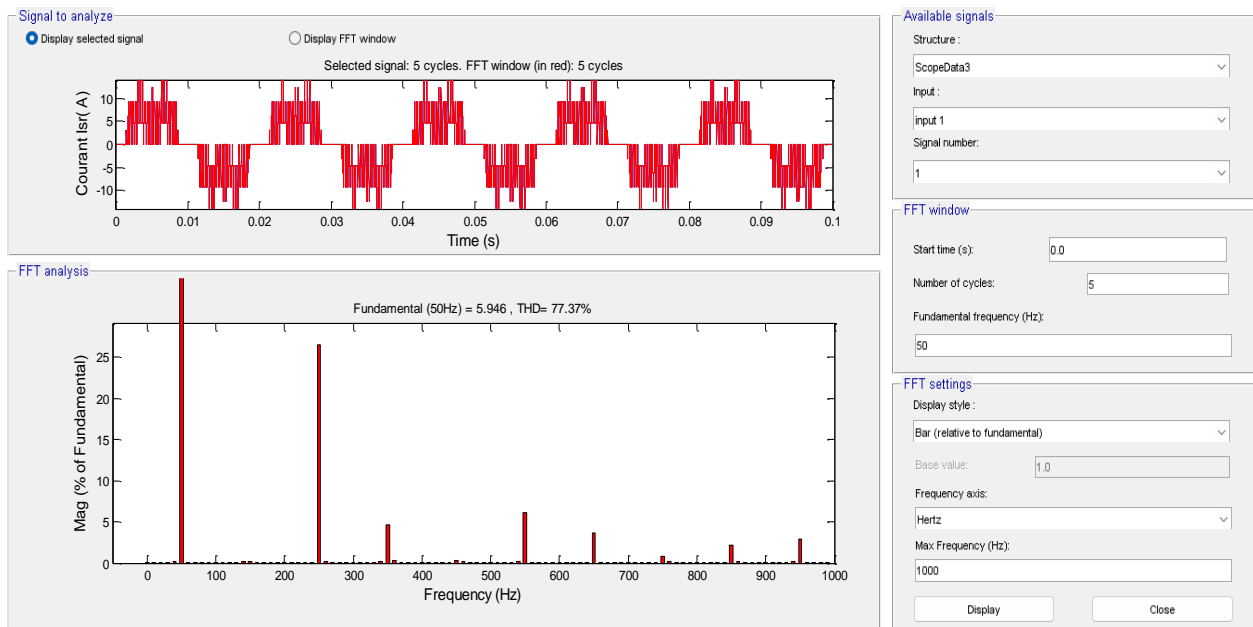
**Figure 23:**La tension Vb et son spectre harmonique.



**Figure 24:**La tension Vc et son spectre harmonique.

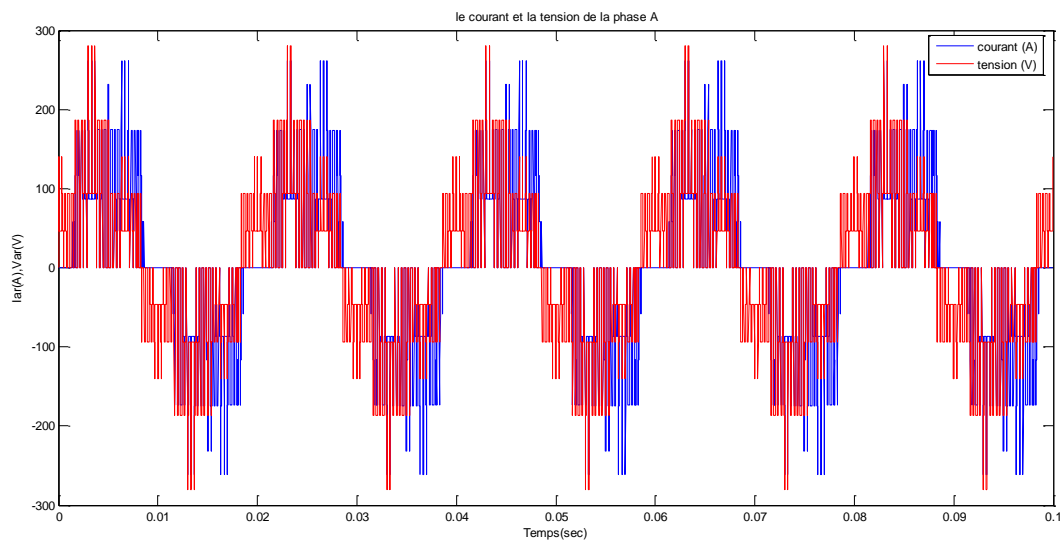
➤ La figure (25) suivante montre le courant Iar de la phase A et son spectre d'harmonique.





**Figure 25:** Le courant  $I_{ar}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.

➤ La figure (26) suivante représente le courant  $I_{ar}$  de la phase A et la tension  $V_{a\_r}$ .



**Figure 26:** Allure de courant  $I_{a\_r}$  et la tension  $V_{a\_r}$  de la phase A.

➤ On remarque que le courant  $I_{a\_r}$  et la tension  $V_{a\_r}$  de la phase A sont en phase. En résumé, dans un système où un onduleur H-bridge est utilisé avec une charge résistive, le courant et la tension sont en phase en raison de la nature purement résistive de la charge. La loi d'Ohm assure que la relation entre la tension et le courant est linéaire et immédiate, sans décalage de phase, ce qui est une caractéristique des charges résistives.

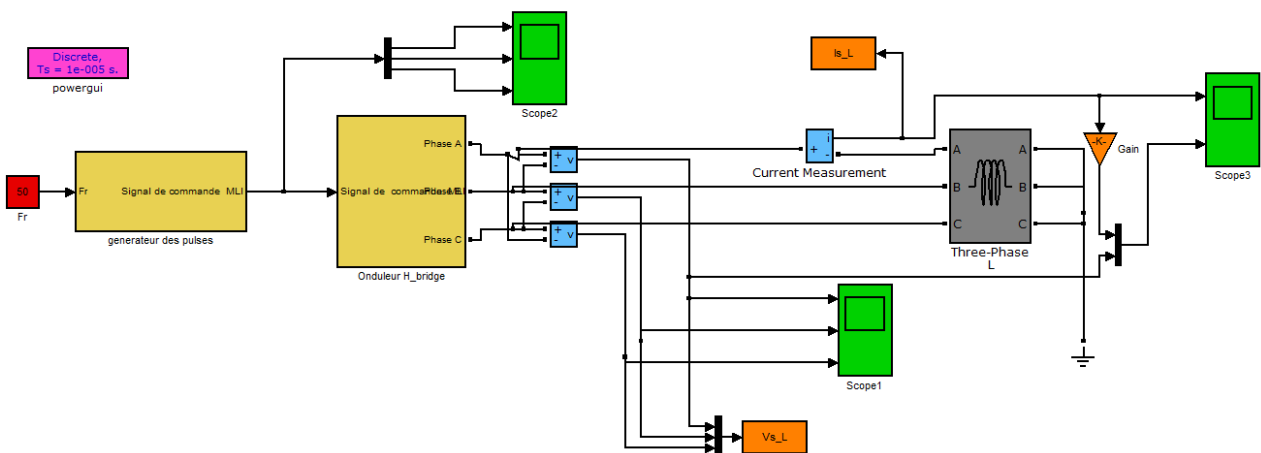
### 3.3 Onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement inductive « L »)

Le but de ce scénario est de valider et visualiser le modèle de l'onduleur en pont H à sept niveaux fonctionnant en charge inductive (L). Parmi les objectifs du scénario, on trouve la vérification du fonctionnement : il s'agit de s'assurer que chaque interrupteur fonctionne correctement et qu'il n'y a ni court-circuit ni défaut dans le circuit. La vérification inclut également la précision des niveaux de tension produits à la sortie. Ensuite, une analyse des performances sera effectuée : on observera les formes d'onde de sortie pour s'assurer qu'elles correspondent aux attentes théoriques, tout en évaluant la stabilité et la qualité du signal produit sous charge inductive. Enfin, une préparation à l'utilisation en conditions réelles sera effectuée, où les performances de l'onduleur seront mises à l'épreuve dans des situations d'utilisation concrètes. En résumé, le scénario de test en charge inductive pour un onduleur H-bridge à sept niveaux permet de vérifier et d'ajuster son fonctionnement, en s'assurant que les interrupteurs opèrent correctement, que les niveaux de tension sont précis, et que les performances de l'onduleur, en termes de stabilité et de qualité du signal, répondent aux attentes dans des conditions de charge inductive réelle.

➤ La figure (27) suivante montre le schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge inductive) :

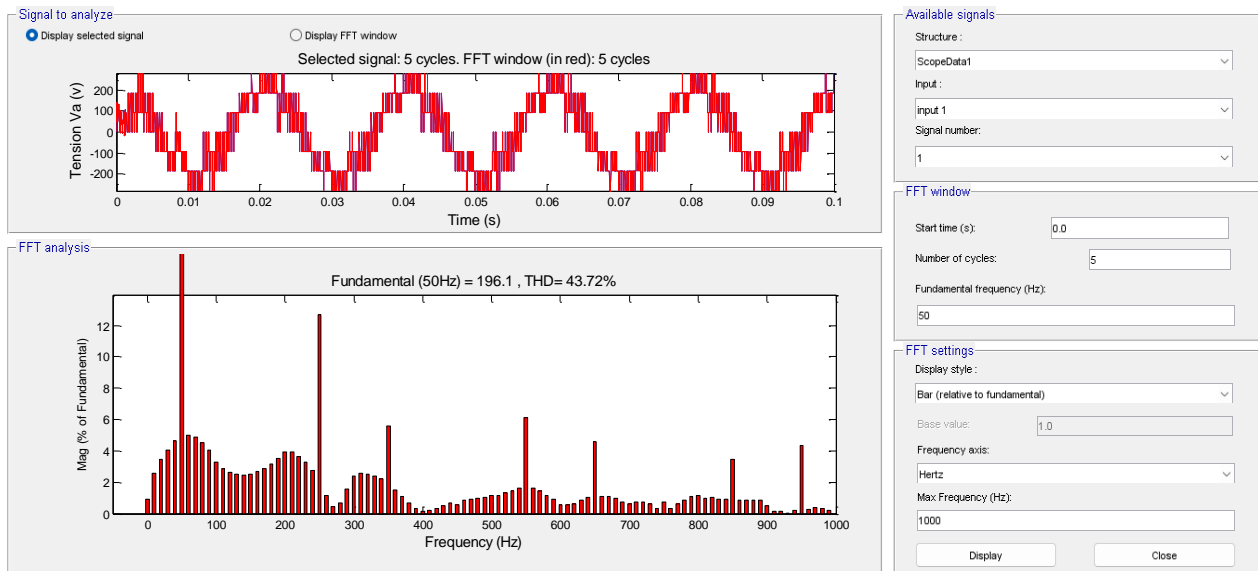
- **Paramètres de simulation :**

Temps de simulation=0.1s, Tension d'alimentation=280V, Fréquence fondamentale =50 Hz,  $L=0.4H$ .

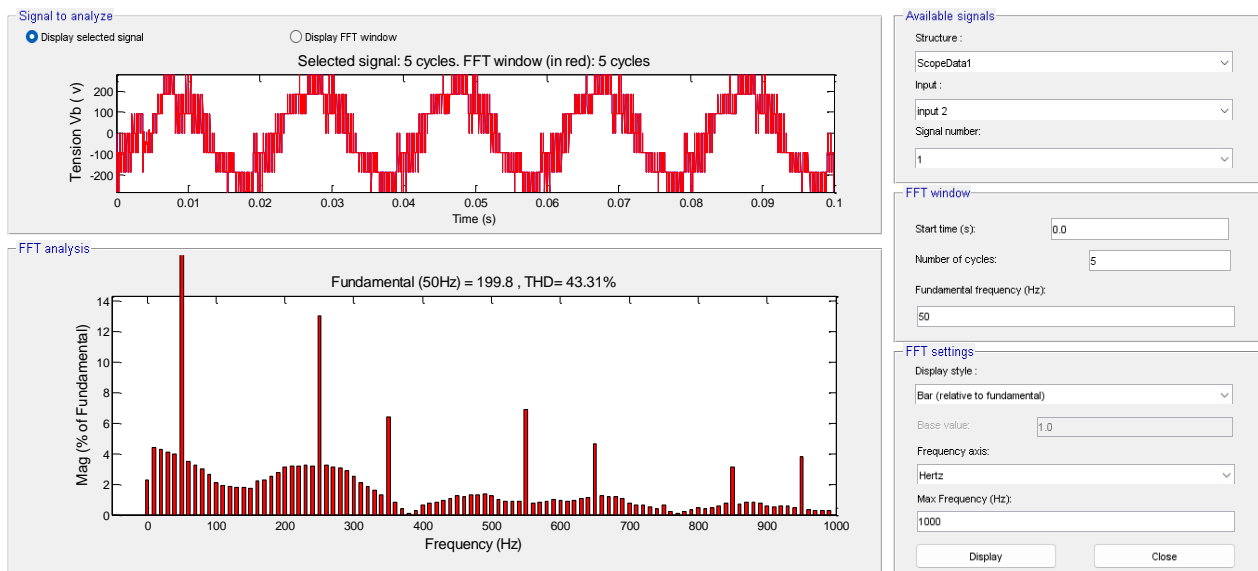


**Figure 27:**Schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement inductive).

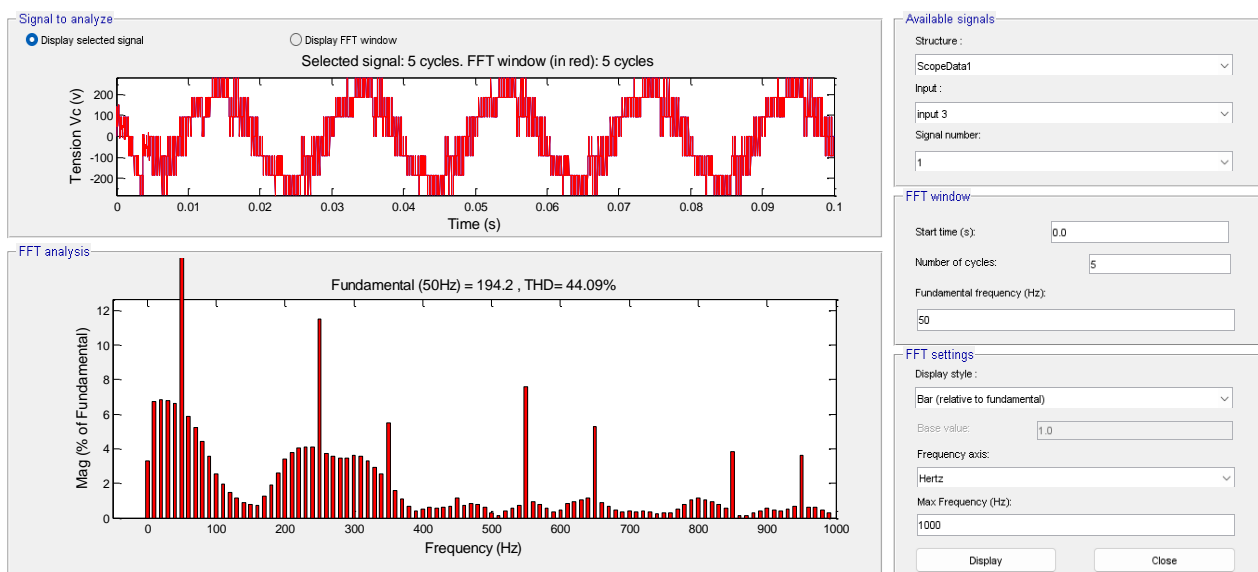
➤ Les figures 28, 29 et 30 présentent les tensions des trois phases A, B et C ainsi que leur spectre harmonique analysé via l'outil FFT sur une période de 5 cycles, en fonction de la fréquence fondamentale de 50 Hz.



**Figure 28:**La tension Va et son spectre harmonique.

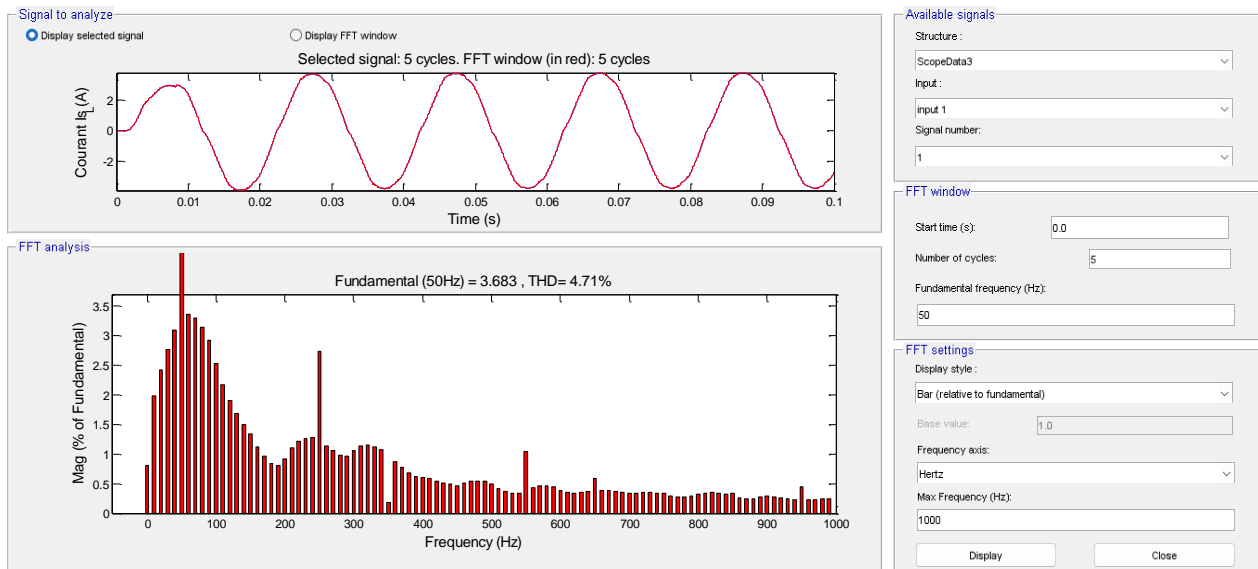


**Figure 29:**La tension Vb et son spectre harmonique.



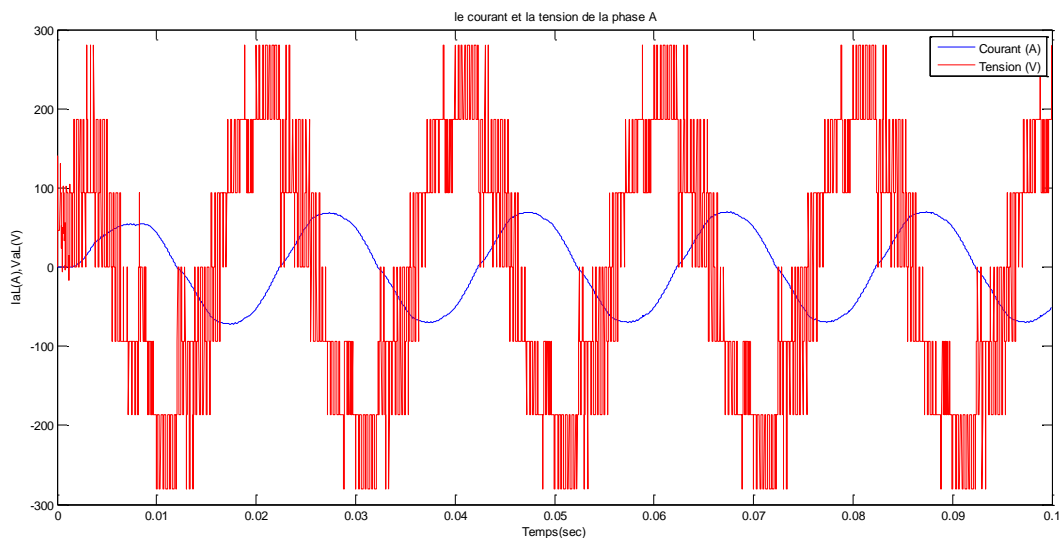
**Figure 30:**La tension Vc et son spectre harmonique.

- La figure (31) suivante montre le courant  $I_{a\_L}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.



**Figure 31:** Le courant  $I_{a\_L}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.

- La figure (32) suivante montre le courant  $I_{a\_L}$  et la tension  $V_{a\_L}$ .



**Figure 32:** Allure de courant  $I_{a\_L}$  et la tension  $V_{a\_L}$  de la phase A.

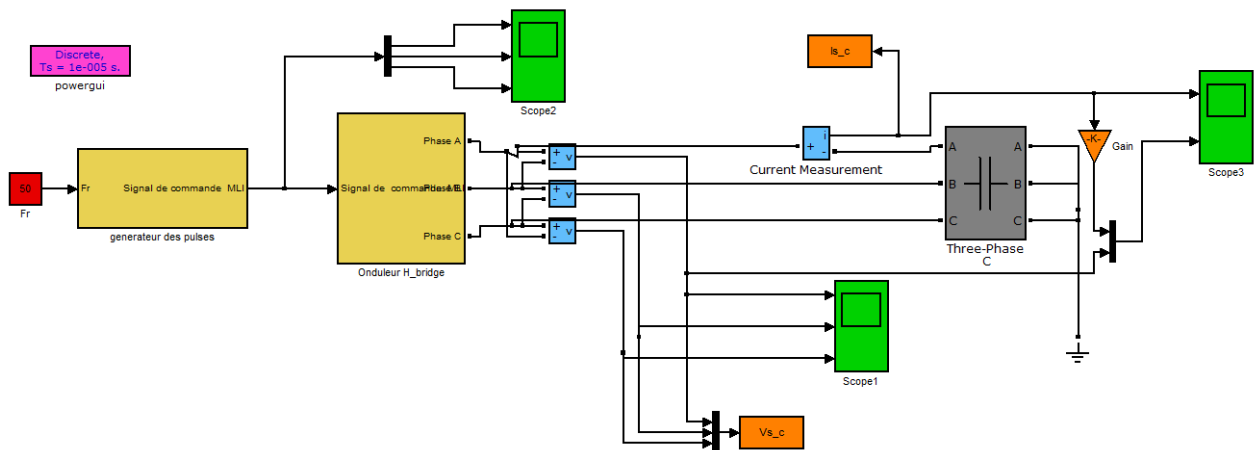
- On remarque que le courant  $I_{a\_L}$  et la tension  $V_{a\_L}$  de la phase A présentent un déphasage en raison de la nature inductive de la charge. En résumé, dans un système où un onduleur H-bridge est utilisé avec une charge inductive, le courant est en retard par rapport à la tension. Ce déphasage est dû à l'effet de l'inductance, qui stocke de l'énergie sous forme de champ magnétique et s'oppose aux variations de courant. La loi de l'induction de Faraday explique que l'inductance crée une opposition à l'établissement rapide du courant, ce qui entraîne un lissage du courant et un décalage temporel entre les pics de tension et de courant.

### 3.4. Onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement capacitif « C »)

Le but de ce scénario est de valider et visualiser le modèle de l'onduleur en pont H à sept niveaux fonctionnant en charge purement capacitive (C). Parmi les objectifs du scénario, on trouve la vérification du fonctionnement : il s'agit de s'assurer que chaque interrupteur fonctionne correctement et qu'il n'y a ni court-circuit ni défaut dans le circuit. La vérification inclut également la précision des niveaux de tension produits à la sortie. Ensuite, une analyse des performances sera effectuée : on observera les formes d'onde de sortie pour s'assurer qu'elles correspondent aux attentes théoriques, tout en évaluant la stabilité et la qualité du signal produit sous charge capacitive. Enfin, une préparation à l'utilisation en conditions réelles sera effectuée, où les performances de l'onduleur seront mises à l'épreuve dans des situations d'utilisation concrètes. En résumé, le scénario de test en charge capacitive pour un onduleur H-bridge à sept niveaux permet de vérifier et d'ajuster son fonctionnement, en s'assurant que les interrupteurs opèrent correctement, que les niveaux de tension sont précis, et que les performances de l'onduleur, en termes de stabilité et de qualité du signal, répondent aux attentes dans des conditions de charge capacitive réelle.

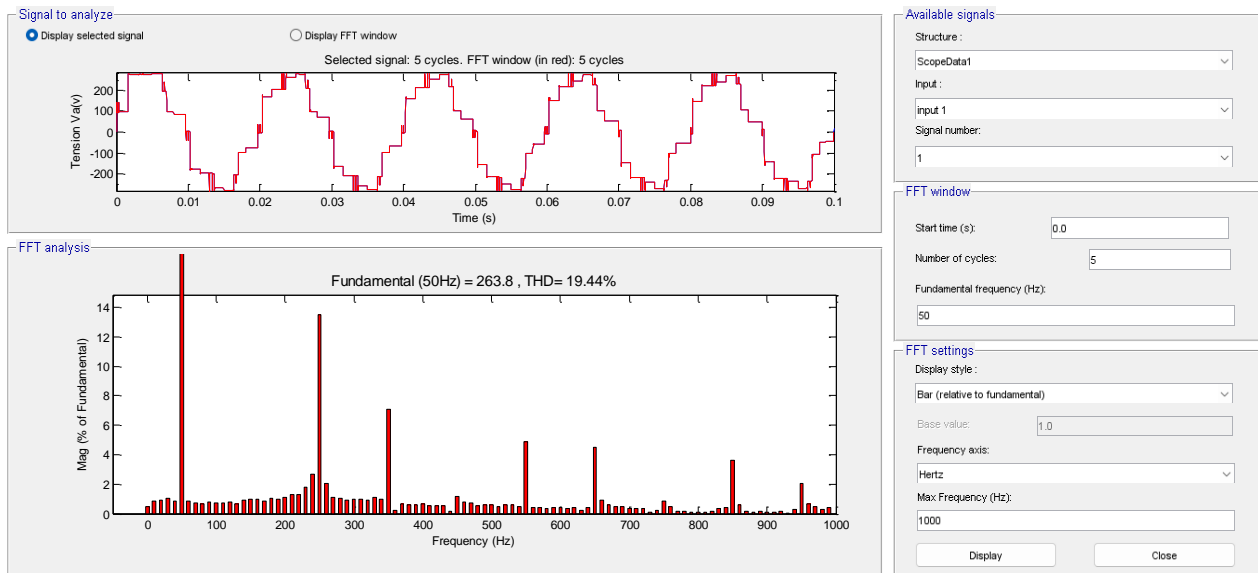
➤ La figure (33) suivante montre le schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement capacitive) :

- **Paramètres de simulation :** Temps de simulation=0.1s, Tension d'alimentation=280V, Fréquence fondamentale =50 Hz, C=0.003F.

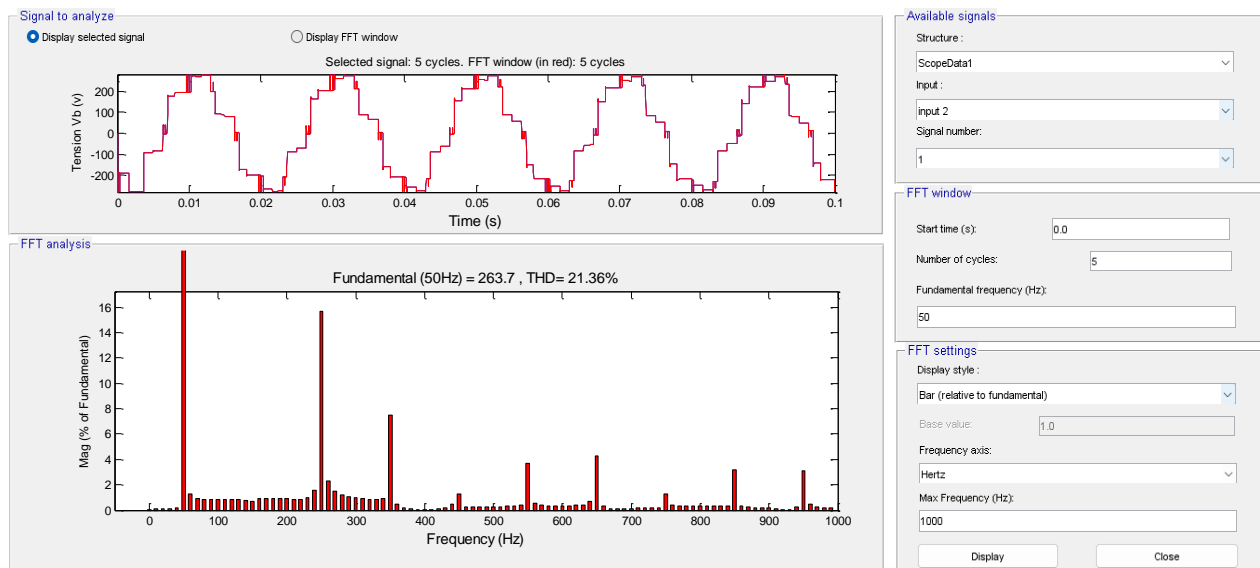


**Figure 33:**Schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge purement capacitive).

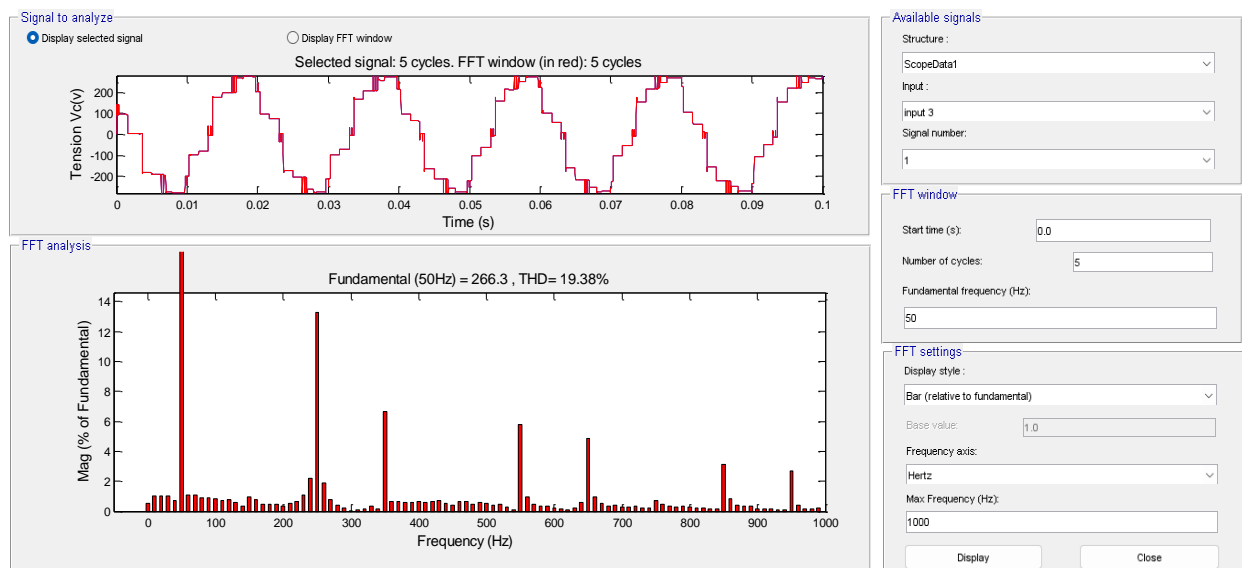
➤ Les figures 34, 35 et 36 présentent les tensions des trois phases A, B et C ainsi que leur spectre harmonique analysé via l'outil FFT sur une période de 5 cycles, en fonction de la fréquence fondamentale de 50 Hz.



**Figure 34:**La tension Va et son spectre harmonique.

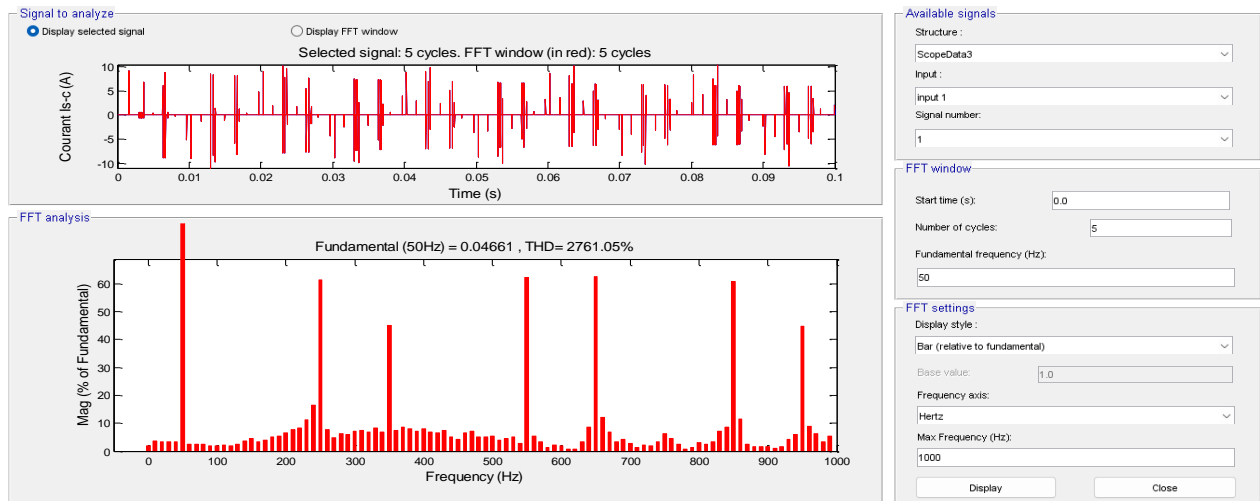


**Figure 35:**La tension Vb et son spectre harmonique.

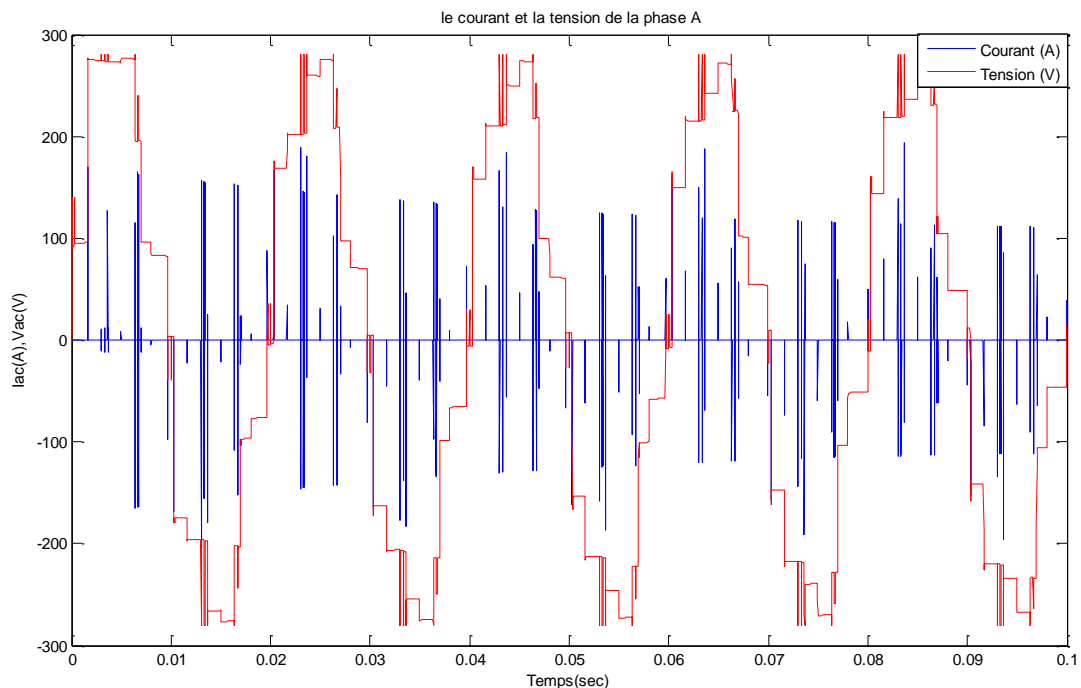


**Figure 36:**La tension Vc et son spectre harmonique.

- La figure (37) suivante montre le courant  $I_{a\_c}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.



**Figure 37:** Le courant  $I_{a\_c}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.



**Figure 38:** Allure de courant  $I_{a\_c}$  et la tension  $V_{a\_c}$  de la phase A.

- On remarque que le courant  $I_{a\_C}$  et la tension  $V_{a\_C}$  de la phase A présentent un déphasage en raison de la nature capacitive de la charge. En résumé, dans un système où un onduleur H-bridge est utilisé avec une charge capacitive, le courant est en avance par rapport à la tension. Ce déphasage est dû à l'effet de la capacité, qui stocke de l'énergie sous forme de champ électrique et s'oppose aux variations rapides de tension. Selon la loi des condensateurs, la capacité crée une opposition à l'établissement rapide de la tension, ce qui entraîne un lissage de la tension et un décalage temporel entre les pics de courant et de tension. Dans ce cas, on peut observer un THD (Total Harmonic Distorsion) très élevé, dû aux composantes harmoniques présentes dans le signal de sortie.

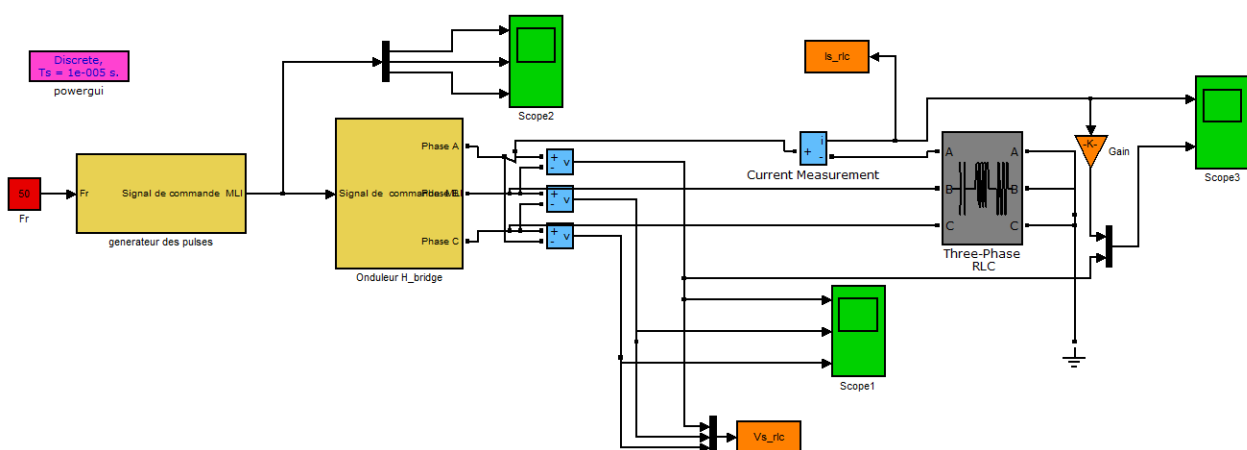
### 3.5. Onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge RLC)

Le but de ce scénario est de valider et visualiser le modèle de l'onduleur en pont H à sept niveaux fonctionnant en charge RLC (résistive, inductive et capacitive). Parmi les objectifs du scénario, on trouve la vérification du fonctionnement : il s'agit de s'assurer que chaque interrupteur fonctionne correctement et qu'il n'y a ni court-circuit ni défaut dans le circuit. La vérification inclut également la précision des niveaux de tension produits à la sortie. Ensuite, une analyse des performances sera effectuée : on observera les formes d'onde de sortie pour s'assurer qu'elles correspondent aux attentes théoriques, tout en prenant en compte le comportement spécifique d'une charge RLC, qui peut entraîner des déphasages complexes entre courant et tension. Cette analyse inclura la stabilité et la qualité du signal produit sous charge RLC, ainsi que l'impact de la résonance éventuelle entre les composants inductifs et capacitifs. Enfin, une préparation à l'utilisation en conditions réelles sera effectuée, où les performances de l'onduleur seront mises à l'épreuve dans des situations d'utilisation concrètes. En résumé, le scénario de test en charge RLC pour un onduleur H-bridge à sept niveaux permet de vérifier et d'ajuster son fonctionnement, en s'assurant que les interrupteurs opèrent correctement, que les niveaux de tension sont précis, et que les performances de l'onduleur, en termes de stabilité et de qualité du signal, répondent aux attentes dans des conditions de charge RLC réelle.

➤ La figure (39) suivante montre le schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge RLC):

- **Paramètres de simulation :**

Temps de simulation=0.1s, Tension d'alimentation=280V, Fréquence fondamentale=50 Hz,  $R=10\Omega$ ,  $L=0.4H$ ,  $C=0.003F$ .

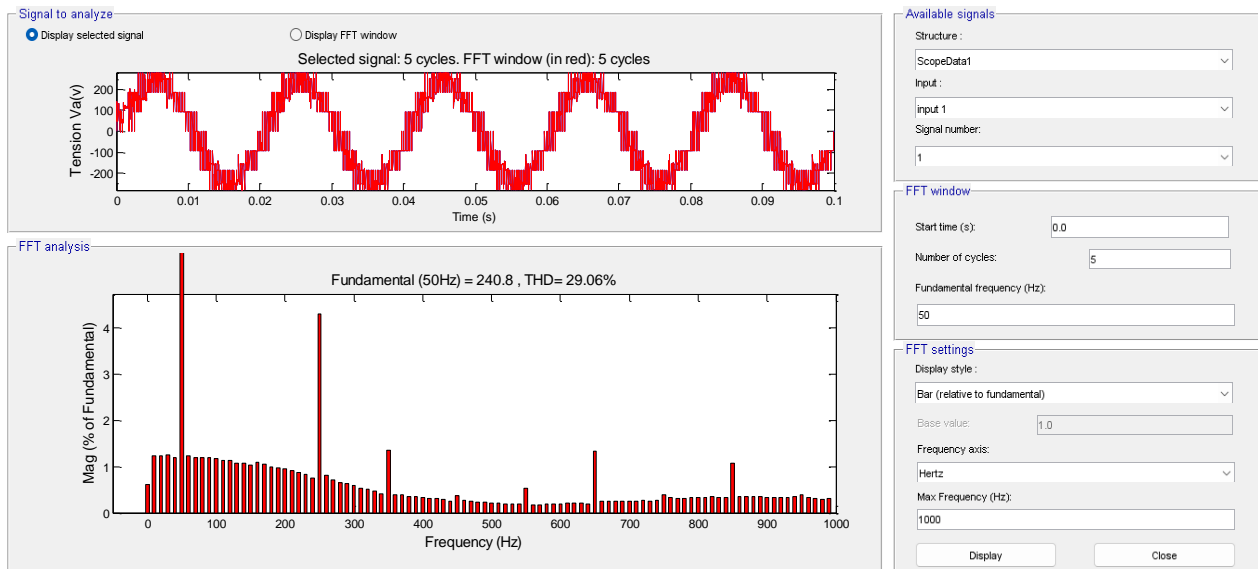


**Figure 39:**Schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (fonctionnement en charge RLC).

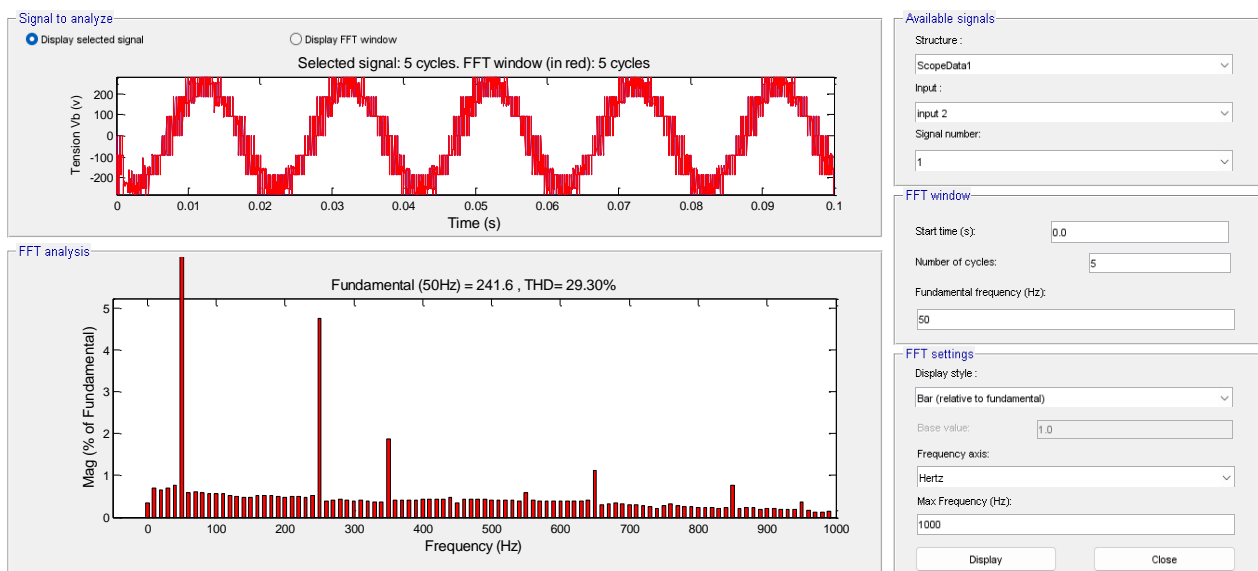
➤ Les figures 40, 41 et 42 présentent les tensions des trois phases A, B et C ainsi que leur spectre harmonique analysé via l'outil FFT sur une période de 5 cycles, en fonction de la fréquence



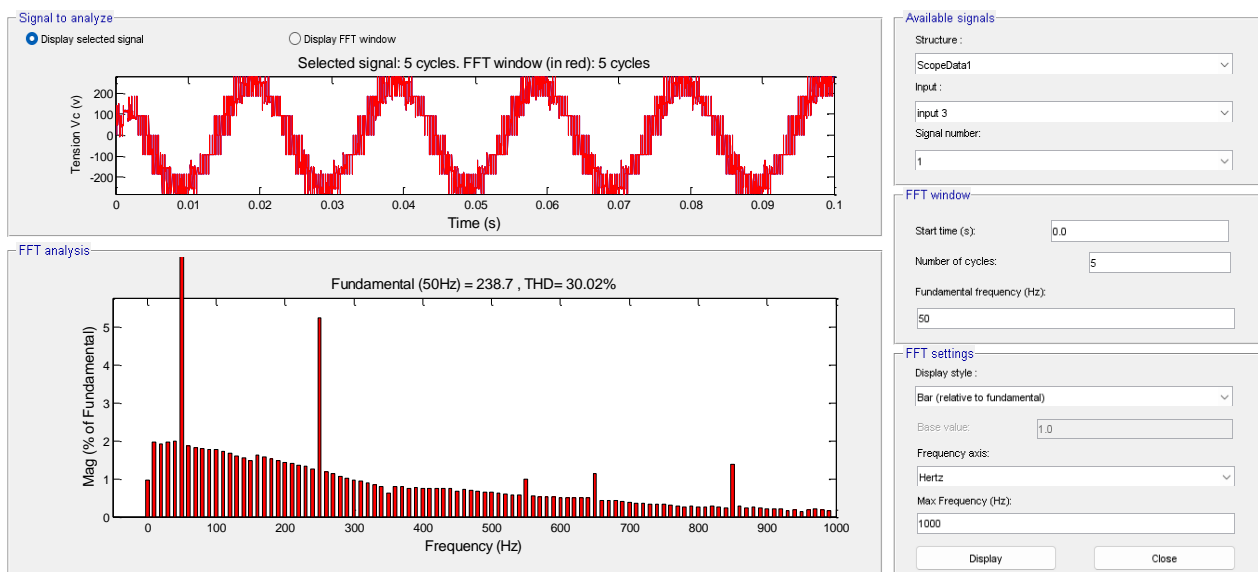
fondamentale de 50 Hz.



**Figure 40:**La tension  $V_a$  et son spectre harmonique.

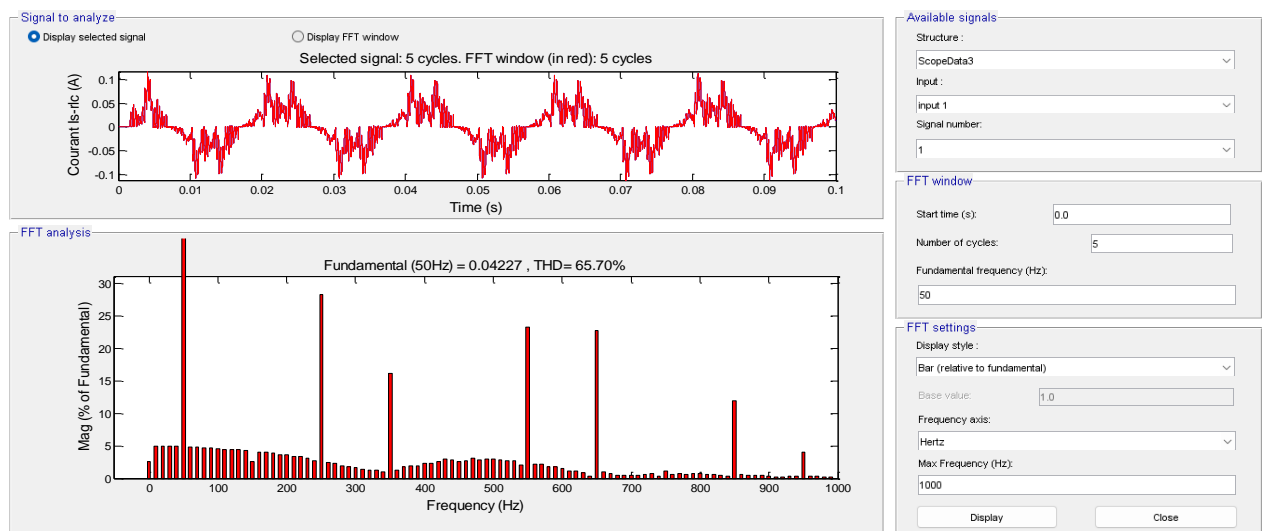


**Figure 41:**La tension  $V_b$  et son spectre harmonique.



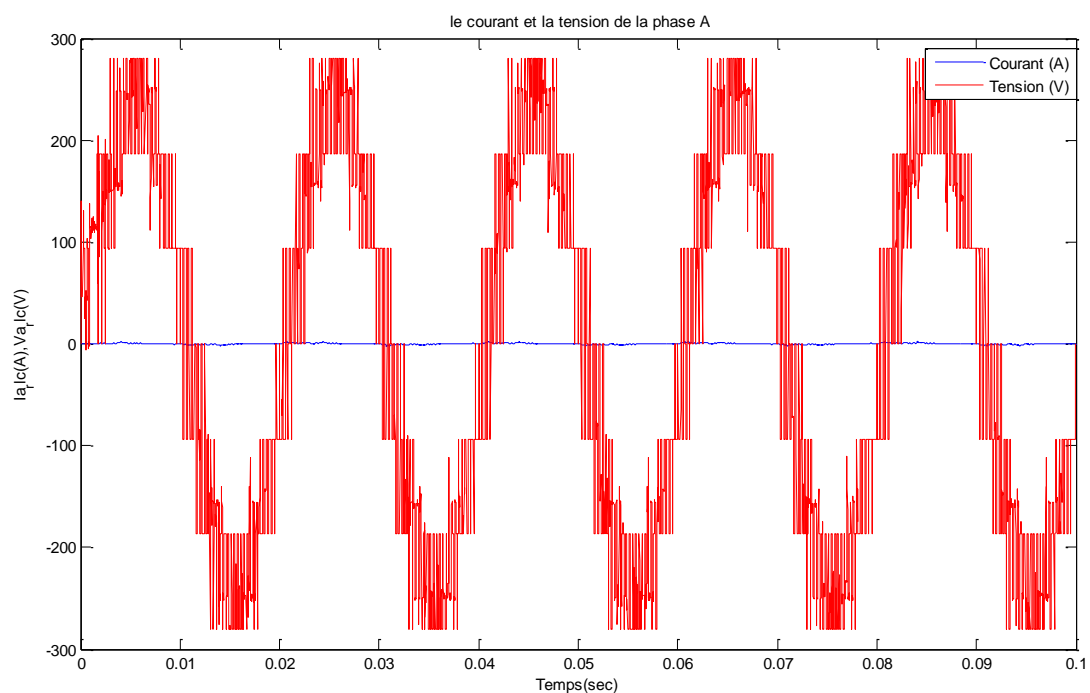
**Figure 42:**La tension  $V_c$  et son spectre harmonique.

- La figure (43) suivante montre le courant  $I_{a\_rlc}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.



**Figure 43:** Le courant  $I_{a\_rlc}$  de la phase A et son spectre d'harmonique.

- La figure (44) suivante montre le courant  $I_{a\_rlc}$  et la tension  $V_{a\_rlc}$  de la phase A.



**Figure 44:** Allure de courant  $I_{a\_rlc}$  et la tension  $V_{a\_rlc}$  de la phase A.

- On remarque que le courant  $I_{a\_rlc}$  et la tension  $V_{a\_rlc}$  de la phase A présentent un comportement complexe en fonction de la nature mixte de la charge RLC (résistive, inductive et capacitive). Dans

un système où un onduleur H-bridge est utilisé avec une charge RLC, le déphasage entre le courant et la tension dépend de l'équilibre entre les composantes résistives, inductives et capacitives.

- Pour la composante résistive, le courant et la tension sont en phase, car la relation entre les deux est immédiate et linéaire selon la loi d'Ohm.
- Pour la composante inductive, le courant est en retard par rapport à la tension, l'inductance stockant l'énergie sous forme de champ magnétique, s'opposant ainsi aux variations de courant rapide (loi de Faraday).
- Pour la composante capacitive, c'est le courant qui est en avance sur la tension. Le condensateur stocke l'énergie sous forme de champ électrique et s'oppose aux variations rapides de tension.

En résumé, le comportement global du circuit RLC dépend de l'importance relative des composantes R, L, et C. Si la charge est principalement inductive, le courant sera en retard par rapport à la tension ; si elle est capacitive, le courant sera en avance ; et si elle est résistive, ils resteront en phase.

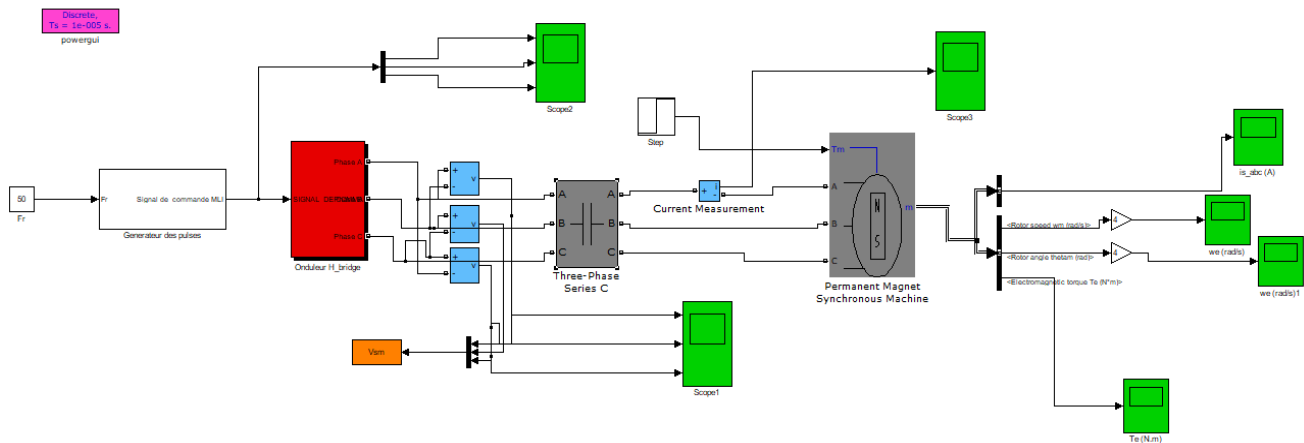
#### **3.6. Onduleur H\_bridge sept niveaux (Alimentant une machine synchrone à aimant permanent)**

Le but de ce scénario est de valider et visualiser le modèle de l'onduleur en pont H à sept niveaux alimentant une machine synchrone à aimant permanent. Les objectifs principaux incluent la vérification du fonctionnement correct de l'onduleur et de ses interrupteurs, en s'assurant qu'il n'y a ni court-circuit ni défaut dans le circuit. Ce scénario permet également d'évaluer la précision des niveaux de tension produits, ainsi que la stabilité et la qualité du signal de sortie lorsque la machine synchrone est alimentée. Une analyse des performances dynamiques de la machine sera réalisée, en observant les réponses en termes de couple, vitesse, et courants dans des conditions de fonctionnement réelles. L'objectif final est de garantir que l'onduleur et la machine interagissent de manière optimale, en assurant une alimentation stable et performante pour la machine synchrone à aimant permanent.

➤ La figure (45) suivante montre le schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (alimentant une machine synchrone à aimant permanent):

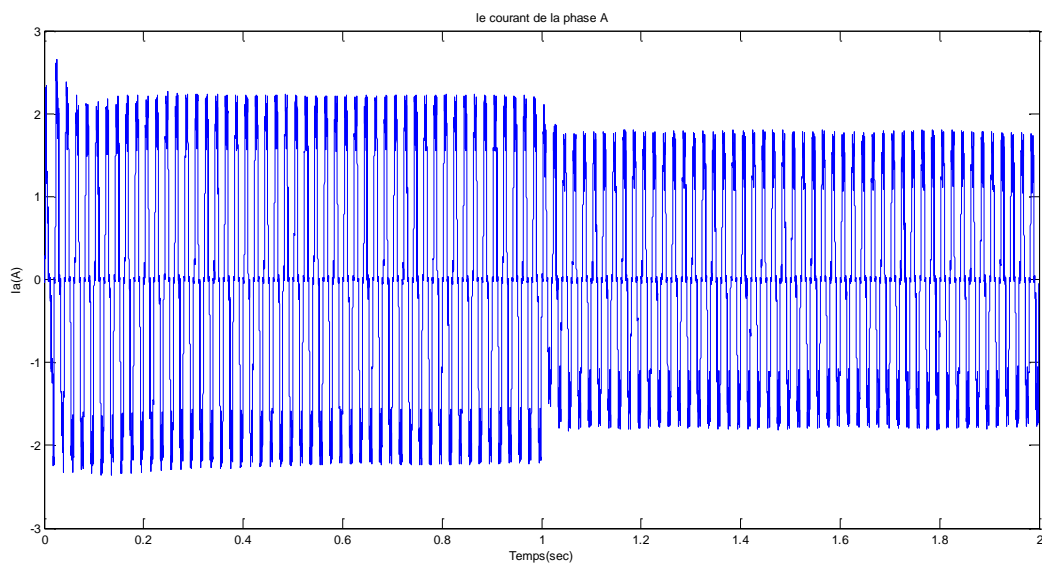
➤ **Paramètres de simulation:**

Temps de simulation=2s, Tension d'alimentation=280V, Fréquence fondamentale =50 Hz.



**Figure 45:**Schéma bloc d'un onduleur H\_bridge sept niveaux (alimentant une machine synchrone à aimant permanent).

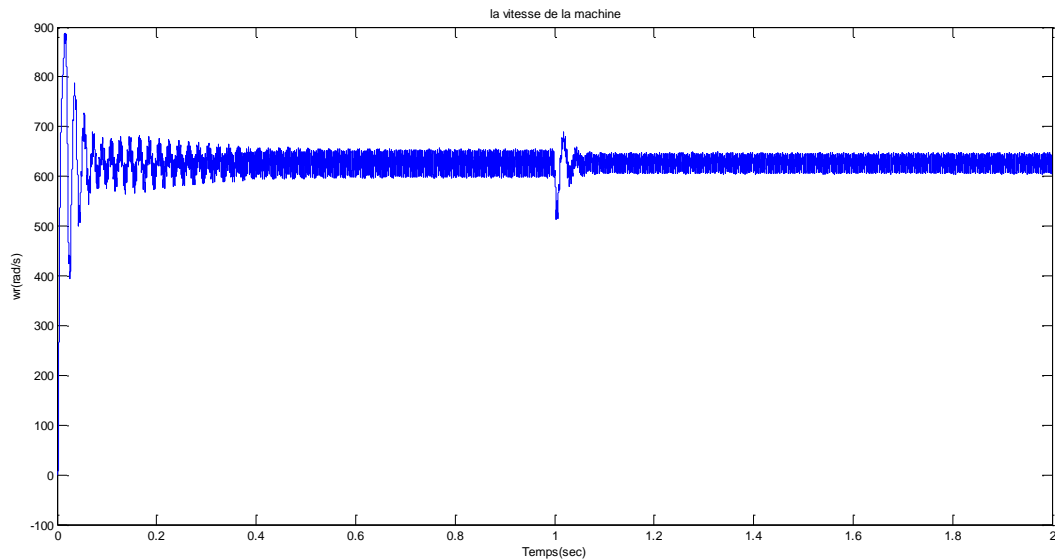
- La figure (46) suivante représente le courant  $I_A$  de la phase A reliant avec la charge capacitive C et son spectre d'harmonique :



**Figure 46:** Allure de courant de la phase A  $I_a$  et son spectre d'harmonique.

- ✓ Le courant généré par un onduleur H\_Bridge est plus proche d'une sinusoïde idéale, ce qui réduit le contenu harmonique par rapport aux onduleurs Le courant présente moins de pics et de fluctuations, minimisant ainsi les pertes par surchauffe dans la machine et prolongeant la durée de vie des composants. Cela est également important pour la réduction des interférences électromagnétiques.

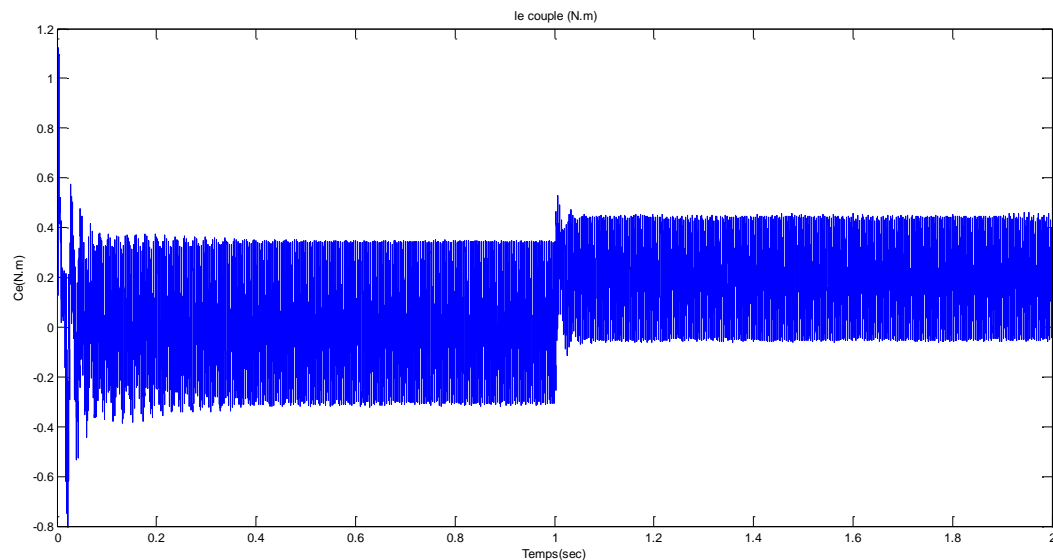
- La figure (47) suivante représente la vitesse  $W_r$  (rad/s) en fonction du temps :



**Figure 47:** Allure de la vitesse  $W_r$  (rad/s) en fonction du temps.

- ✓ La vitesse de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est proportionnelle à la fréquence du signal fourni par l'onduleur. Avec un onduleur à 7 niveaux H\_Bridge, la génération d'une tension plus proche d'une sinusoïde permet une régulation plus précise de la fréquence donc de la vitesse. Parmi les avantages vitesse stable et lissée : La réduction des distorsions harmoniques dans la tension de sortie permet de minimiser les fluctuations et les ondulations dans la vitesse. Cela garantit une rotation régulière du moteur, ce qui est crucial dans des applications nécessitant un mouvement précis (robots, servomoteurs, etc.).

- La figure (48) suivante représente le couple électromagnétique  $C_e$  (N.m) :



**Figure 48:** Allure du couple électromagnétique  $C_e$  (N.m).

- ✓ On remarque que le couple dans une machine synchrone à aimant permanent est directement proportionnel au courant d'alimentation, et il est influencé par la qualité du signal fourni par l'onduleur. Un onduleur à 7 niveaux H\_Bridge permet une commutation plus fine et réduit les fluctuations du courant, améliorant ainsi la stabilité du couple. Donc on peut dire que l'onduleur à 7 niveaux H-bridge constitue une solution idéale pour les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) utilisées dans des environnements exigeant un contrôle de précision, une efficacité élevée et une réduction des pertes énergétiques. Cette configuration est particulièrement bénéfique pour des applications industrielles, robotiques et automobiles où la stabilité, la réponse rapide et l'efficacité sont essentielles.

## • Comparaison des résultats :

La comparaison des valeurs de THD (%) des quartes charges R, L, C et RLC. Suivant la fréquence fondamentale 50 Hz.

**Tableau 6:** Comparaison des valeurs de THD des charges R, L, C et RLC.

THD (%)															
R				L				C				RLC			
Va	Vb	Vc	IphA	Va	Vb	Vc	IphA	Va	Vb	Vc	IphA	Va	Vb	Vc	IphA
77,27	77,13	77,35	77,37	43,72	43,31	44,09	4,71	19,44	21,36	19,38	2761	29	29	30	66

➤ Pour comparer les valeurs du taux de distorsion harmonique total (THD) du fonctionnement d'un onduleur H-bridge lorsqu'il alimente différentes charges (R, L, C et RLC), il est important de comprendre l'impact de chaque type de charge sur la qualité du signal de sortie de l'onduleur.

- **Pour la charge purement résistive R :**

La charge purement résistive R est la plus simple, car elle ne provoque aucun déphasage entre le courant et la tension dans ce cas le THD des trois phases est environ 77% et le courant de la phase est aussi 77% de valeur (le courant et la tension sont en phase), car il n'y a pas de réactance pour induire des distorsions supplémentaires.

- **Pour la charge purement inductive L :**

La charge purement inductive introduit un déphasage entre la tension et le courant, les valeurs des tensions des trois phases est environ 44% par contre le courant de la phase A est très petite est environ 5% (phénomène lissage de courant), cela peut entraîner une augmentation du THD car les harmoniques sont plus présentes dans la forme d'onde de sortie.

- **Pour la charge purement capacitive C :**

La charge purement capacitive provoque également un déphasage, mais cette fois ci en avance, on remarque que les valeurs de tensions des trois phases est environ 19 et 20 % par contre la valeur de courant de la phase A est très grande de valeur de THD de 2761, (Phénomène lissage de tension). L'effet sur le THD dépendra de la réactance capacitive à la fréquence de fonctionnement.

- **Pour la charge RLC :**

La charge RLC (résistive, inductive, et capacitive combinée) présente un comportement plus complexe, les valeurs des tensions des trois phases est environ 30% et la valeur de courant de la phase A est de valeur de THD de 66%, la combinaison des effets réactifs de l'inductance et de la capacité peut amplifier certaines harmoniques ou créer des distorsions plus marquées dans le signal de sortie de l'onduleur.

### 3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les simulations des onduleurs de type H\_bridge à sept niveaux fonctionnement en charge R, L, C et RLC ensuite étude de l'alimentation d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) avec interprétation des résultats obtenues. Il a été constaté que l'augmentation du nombre de niveaux dans l'onduleur réduit le THD (Total Harmonic Distortion) du signal de sortie, améliorant ainsi les performances globales. Pour garantir une qualité d'énergie plus efficace, des solutions de filtrage actif et passif peuvent être appliquées afin de diminuer les harmoniques résiduels. En outre, une étude plus approfondie de la commande de l'onduleur H-bridge, utilisant des méthodes de commande plus développées, permettrait d'obtenir un contrôle plus précis et efficace, assurant ainsi une meilleure qualité d'énergie dans diverses applications.



# Conclusion Générale

Le but principal de cette étude est d'explorer les onduleurs H-bridge à sept niveaux, en mettant en avant leur intérêt dans le domaine industriel, notamment pour améliorer la qualité de l'énergie. Ces onduleurs multiniveaux sont particulièrement prisés en raison de leur capacité à réduire significativement la distorsion harmonique totale (THD) tout en optimisant la qualité du signal de sortie, ce qui les rend adaptés aux exigences croissantes des applications industrielles. Ces onduleurs multiniveaux sont particulièrement prisés en raison de leur capacité à réduire significativement la distorsion harmonique totale (THD) tout en optimisant la qualité du signal de sortie, ce qui les rend adaptés aux exigences croissantes des applications industrielles. Grâce à leur structure modulaire, ces dispositifs permettent une meilleure gestion des fluctuations de tension et de courant, ce qui en fait des solutions idéales pour des applications exigeantes en qualité d'énergie. L'intégration de techniques avancées de commande, combinée à des solutions de filtrage actif et passif, vise à garantir une efficacité énergétique accrue, tout en répondant aux besoins croissants en matière de performance et de fiabilité des systèmes électriques. Dans **le premier chapitre**, nous avons passé en revue l'état de l'art des topologies d'onduleurs multiniveaux, en mettant l'accent sur trois architectures principales : les onduleurs à diodes, les onduleurs à condensateurs volants et les onduleurs H-bridge en cascade. Nous avons également abordé les structures émergentes qui combinent ces topologies de base, souvent désignées sous le terme d'onduleurs multiniveaux. L'une des structures optimisées que nous avons proposées vise à réduire le nombre de dispositifs de puissance nécessaires, ce qui diminue le coût global du système tout en améliorant sa fiabilité. **Le deuxième chapitre** se concentre sur la modélisation de l'onduleur à sept niveaux et sur sa stratégie de commande. Nous avons utilisé une approche de modélisation basée sur l'onduleur à structure NPC (Neutral Point Clamped). Les résultats des simulations présentés dans **le troisième chapitre** montrent que l'utilisation des onduleurs H-bridge à sept niveaux améliore significativement la qualité du signal de sortie en réduisant le taux de THD. Toutefois, l'augmentation du nombre de niveaux implique l'ajout de composants supplémentaires, tels que des blocs de commutation et des condensateurs d'équilibrage, ce qui peut accroître les coûts. Nos simulations confirment que l'onduleur H-bridge à sept niveaux se distingue comme l'une des meilleures topologies testées. En outre, nous avons examiné la commande des filtres actifs parallèles multiniveaux, montrant que l'augmentation du nombre de niveaux de tension améliore les performances de filtrage. Cela permet d'optimiser l'efficacité des onduleurs H-bridge à sept niveaux pour réduire les harmoniques et améliorer le THD, tout en garantissant une meilleure qualité d'énergie. Parmi les solutions à développer, l'étude des onduleurs H-bridge en cascade se concentre sur l'amélioration de la qualité

de l'énergie en intégrant des techniques de filtrage adaptées pour relever les défis contemporains dans divers secteurs d'application.

## *Références bibliographiques*

- [1] : LEREDDE, Alexandre. Etude, « commande et mise en œuvre de nouvelles structures multiniveaux ».2011. Thèse de doctorat.
- [2]: Luo, Fang Lin, and Hong Ye. « Advanced DC/AC inverters: applications in renewable energy». Crc Press, 2017.
- [3] : Piou, M. (2010). « Conversion DC → AC (Onduleurs) ». Édition du 24/11/2010.
- [4] : RODRIGUEZ, Jose, LAI, Jih-Sheng, et PENG, Fang Zheng. «Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications ». IEEE Transactions on industrial electronics, 2002, vol. 49, no 4, p. 724-738.
- [5]: Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). «Power Electronics: Converters, Applications, and Design (3rd ed.) ». John Wiley & Sons.
- [6] : Song Manguelle, J., Veenstra, M., Mariethoz, S., & Rufer, A. (2000). « Convertisseurs multi-niveaux asymétriques pour des applications de forte et moyenne puissance ». In Actes du Colloque d'Electronique de Puissance du Futur (EPF-2000) (pp. 295-300). Lille, France.
- [7] : Gutierrez, M. F. E. (2001). « Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande de machines à courant alternatif par DTC » (Thèse de doctorat, Univ Paris 6).
- [8]: Bose, B. K. (2002). « Modern Power Electronics and AC Drives ». IEEE Press.
- [9] : Hidri Imed: « Les convertisseurs DC-DC et DC-AC », Institute supérieurs des études technologiques de Nabeul, PDF.
- [10] : Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [11]: MERAH, Mohamed et KARI, Mohamed Zakaria. « Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-Tie Inverter) ».Thèse de doctorat. 2015.
- [12] : Khaled SAIDOUN, Mourad SI Moussi : « Commande MLI d'un onduleur multi-niveaux », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzo, 29/09/2015.
- [13] : HOURIA, Benzemamouche. « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à Base de GTO et d'IGBT ». Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [14] : BOSE, Bimal K. « Power electronics and AC drives ». Englewood Cliffs, 1986.
- [15] : Ammiche Abd ennour « Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diodeflottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de M'sila 2012/2013.
- [16] : ABDELGOUI, Rim Feyrouz. « Commandes avancées des onduleurs multi niveaux hybrides ». Thèse de doctorat. Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes.
- [17] : Toumi, Mohamed. « Application des onduleurs multi-niveaux dans les systèmes de

chauffage par induction ». 2012. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.

[18] : YAICHE SALIM, SAIDOUNE Abdelhakim. « Étude et analyse des performances d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension multi-niveaux ». Thèse de doctorat. Faculté des sciences et de la technologie univ bba.2013.

[19] : RJEM, FETHI et LECHAB, ABDELGHANI. « Commande d'onduleur Multiniveaux Asymétrique application à la conduite de la machine asynchrone double étoile ». Thèse de doctorat.

[20] : LESNICAR, Anton et MARQUARDT, Rainer. «An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range ». In: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, IEEE, 2003. p. 6 pp. Vol. 3.

[21] : BLAABJERG, Frede, TEODORESCU, Remus, LISERRE, Marco, et al. « Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems ». IEEE Transactions on industrial electronics, 2006, vol. 53, no 5, p. 1398-1409.

[22] : GUILLAUD, Xavier, et al. « Sur la modélisation et la commande des redresseurs de courant à interrupteurs bi-commandables ». Thèse de Doctorat, Lille, 1992.

[23] : X.Guillaud, J.P.Hautier, « Concepts de modélisation pour la modélisation des convertisseurs », Journal physique 3, April 1994.

[24] : Barre, Pierre-Jean, et al. « Commande par inversion pour entraînements électromécaniques, principe et applications ». CIFA, 2006.

[25] : PLATEAU, Jean-Philippe. « Sur la conception et la réalisation d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsions à faible pollution harmonique ». 1994. Thèse de doctorat.

[26]: BERKOUK, M., BEN ROMDHANE, Y., et MANESSE, G. « Knowledge and control models for three-level voltage inverters ». Systems Analysis Modelling Simulation, 1995, vol. 18, p. 511-521.

[27]: GHERAIA, H., BERKOUK, E. M., et MANESSE, G. « Knowledge and control models of the seven levels NPC voltage source inverters ». In: Electrimacs 99 (modelling and simulation of electric machines converters and systems). 1999. p. III. 281-III. 285.

[28] : GHERAI, Hakim. « Modélisation et commande d'un onduleur NPC à sept niveaux ». Diss. Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 1999.

[29]: Bowes, S. R., and B. M. Bird. « Novel approach to the analysis and synthesis of modulation processes in power convertors ». Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. Vol. 122. No. 5. IET Digital Library, 1975.

[30]: Bowes, S. R., and T. Davies. « Microprocessor-based development system for PWM variable-speed drives ». IEE Proceedings B-Electric Power Applications. Vol. 1. No. 132. 1985.

[31]: Séguier, Guy. « Convertisseurs de L'électronique de Puissance». Vol. 1. McGraw-Hill Companies, 1986.

- [32]: P.C.Krause, « Analysis of Electrical Machinery » Mc.GRWHILL,1986.
- [33]: GHERAIA, H., BERKOUK, E. M., et MANESSE, G. « Modelling and control of a seven level NPC voltage source inverter. Application to high power induction machine drive». The European Physical Journal-Applied Physics, 2001, vol. 15, no 2, p. 105-115.
- [34]: DJEGHLOUD, Hind et BENALLA, Hocine. « Space vector pulse width modulation applied to the three-level voltage inverter ». IEEE Trans. On Power Electronics, 2004, vol. 19, p. 732-738.
- [35] : FAUCHER, J. « Quelques aspects de la modulation de largeur d'impulsion. Journées 3EI93 sur la commande des machines asynchrones », ESE Gifsur Yvette, 1993.
- [36]: Bentouba, Said, Aek Slimani, and Med Seghir Boucherit. « Stratégies de Commande et Modélisation de l'Onduleur à Cinq Niveaux ».
- [37] : WILDI, Théodore et SYBILLE, Gilbert. Electrotechnique 4 éme édition. Edition de boeck, Paris, 2005, vol. 27.
- [38] : Alali, Mohamad Alaa Eddin. « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension:(Automatisation des systèmes de puissance électriques)». | Theses. fr. Diss. Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008), 2002.
- [39]: VAN DER BROECK, Heinz Willi, SKUDELNY, H.-C., et STANKE, Georg Viktor. «Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors ». IEEE transactions on industry applications, 1988, vol. 24, no 1, p. 142-150.
- [40]: PALM, William John. « Introduction to MATLAB for Engineers ». New York : McGraw-Hill, 2011.

## **Annexe**

- Paramètres et caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée en simulation :

$$R_s=18.7\Omega$$

$$L_d=0.02682H$$

$$L_q(H)=0.02682H$$

$$V_c=62.3V$$

$$C_r=0.5151N.M$$

$$J=0.0152Kg\ m^2$$

$$F=0.00909N.m.s$$

$$P=2$$

- Conditions initiales:

$$\omega_m=0rad/s$$

$$\theta=0^\circ$$

$$i_a,i_b=0A$$

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تطوير استراتيجية انتقائية لإزالة التوافقيات للتحكم في المحولات المتعددة المستويات H-bridge ذات السبعة مستويات، من خلال تحسين زوايا التبديل الفردية لمفاتيح المحول. تهدف هذه الطريقة إلى تقليل التشوهات التوافقية، وسيتم مقارنتها بتقنية تعديل عرض النبضة الجيبية واستراتيجيات أخرى لإزالة التوافقيات. الهدف هو تصميم محول يلتزم بالمعايير الدولية ويوفر أداءً محسناً من حيث جودة الإشارة والكفاءة. وأخيراً، سيتم التحقق من النتائج من خلال محاكاة باستخدام MATLAB/SIMULINK لإثبات فعالية الاستراتيجية في الأنظمة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** محولات الجهد المتعدد المستويات، محول H-Bridge المتسلسل، تردد التبديل، تقسيم القدرة، التشوه التوافقي الكلي. (THD).

## Résumé

Le but de ce mémoire est de développer une stratégie d'élimination sélective des harmoniques pour le contrôle des onduleurs H-bridge multiniveaux à 7 niveaux, en optimisant les angles de commutation impairs des interrupteurs. Cette approche vise à réduire les distorsions harmoniques et sera comparée à la modulation sinusoïdale par largeur d'impulsion (MLI) ainsi qu'à d'autres stratégies d'élimination des harmoniques. L'objectif est de concevoir un convertisseur capable de respecter les normes internationales tout en offrant des performances améliorées en termes de qualité du signal et d'efficacité. Enfin, les résultats seront validés par des simulations sous MATLAB/SIMULINK, démontrant l'efficacité de la stratégie dans les systèmes électriques.

**Mots clés:** Les onduleurs multi-niveaux, onduleur H\_Bridge en cascade, fréquence de commutation, segmentation de la puissance, Taux distorsion harmonique THD.

## Abstract

The purpose of this thesis is to develop a selective harmonic elimination strategy for controlling 7-level H-bridge multilevel inverters by optimizing the odd switching angles of the inverter switches. This approach aims to minimize harmonic distortions and will be compared to sinusoidal pulse width modulation (SPWM) and other harmonic elimination strategies. The goal is to design a converter that meets international standards while providing enhanced performance in terms of signal quality and efficiency. Finally, the results will be validated through simulations in MATLAB/SIMULINK, demonstrating the effectiveness of the strategy in electrical systems.

**Keywords:** Multilevel inverters cascaded H-Bridge inverter, switching frequency, power segmentation, Total Harmonic Distortion (THD).