

II.1 Introduction

Au début des années 90, l'évolution des propriétés des semi-conducteurs de puissance a stimulé la croissance du marché des convertisseurs dédiés aux applications moyenne et forte puissance allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts dans la gamme du kilovolt. Cette évolution a influencé principalement le domaine de l'industrie, mais a également eu un impact significatif sur les systèmes de génération d'énergie électrique.

Cette augmentation incessante des niveaux de puissance mis en jeu s'est traduite par une hausse des niveaux de tension et de courant, et a nécessité le développement de semi-conducteurs de plus en plus performants. Depuis les débuts de l'électronique de puissance, ces derniers (les semi-conducteurs), pour la plupart à base de silicium, ont été utilisés : *diodes, transistors bipolaires, thyristors, GTOs, IGBTs*, etc[34].

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [8], ainsi que le progrès réalisé dans le domaine de la micro-informatique.[35]

II.2 L'intérêt des onduleurs multi niveaux

Les motivations principales qui sont à l'origine des onduleurs multiniveaux sont d'une part l'augmentation de puissance par le biais de la génération de tensions plus élevées, au-delà de celles compatibles avec les tensions de blocage des dispositifs à semi-conducteurs de puissance. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire qui présentent un contenu harmonique réduit [36][37].

Ainsi, l'intérêt d'utiliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, une baisse de la fréquence de commutation, la réduction des pertes d'énergie et une diminution de l'effort des composants statiques [37]

Le but d'élever le niveau est prouvé dans la figure II.1 qui montre le THD en fonction de nombre de niveau.

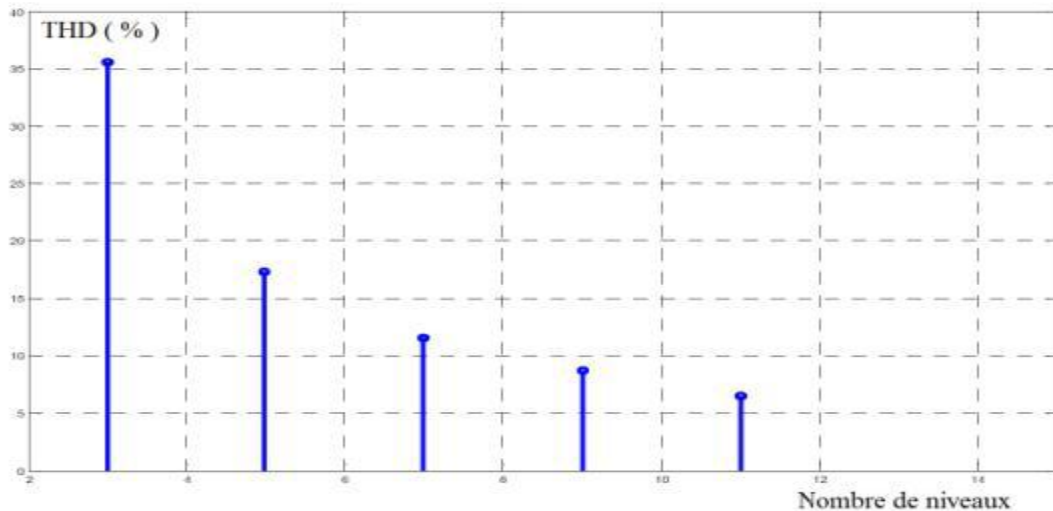


Figure II. 1: Profils de THD produits par l'augmentation des niveaux pour une fréquence d'échantillonnage, 1250 Hz

II.3 Les avantages des onduleurs multiniveaux

Ce type d'onduleur présente plusieurs avantages, parmi les plus importants on mentionne []:

- il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale ;
- les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux [10,11] ;
- les formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveau limitent naturellement les problèmes des surtensions ;
- il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

II.4 Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux

En général, les onduleurs de tension multiniveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets [14,15].

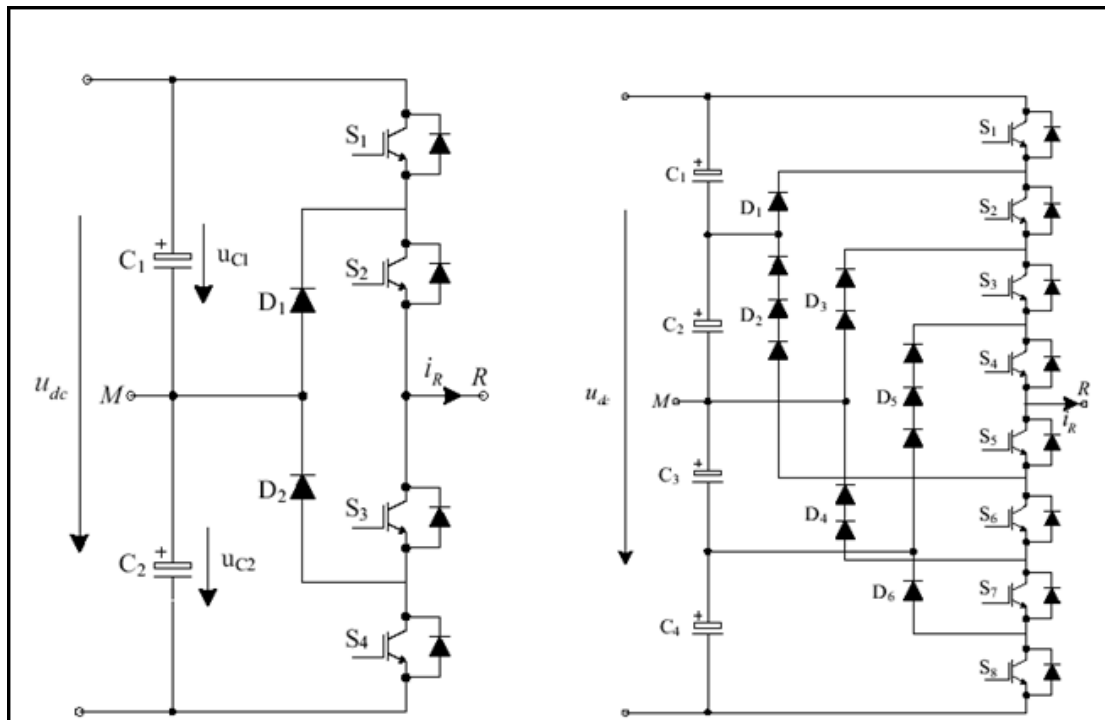
L'onduleur de tension multiniveaux possède trois ou plusieurs niveaux. On distingue trois topologies de base des onduleurs multiniveaux :

- la topologie à diode de bouclage (NPC),
- la topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- la topologie en cascade,

II.5 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage(NPC)

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped) [29]. Cette topologie a été initialement proposée par A.Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure (II.2) représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans laquelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0. afin d'avoir une tension de 220 V, $L = 3(N-1) (N-2)$, L est le nombre des diodes. Pour $N=5$, on a besoin de 36 diodes, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, $N-1$ capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/ (N-1)$, E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur (S_{TD}, S_{TD}') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire [31].



FigureII:2 Topologie des onduleurs NPC a) –NPC trois niveaux, b)-NPC cinq niveaux

Cet onduleur permet d'avoir un niveau impair de tension. Le premier onduleur NPC a été développé pour une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte [32] [33].

Après le premier onduleur NPC breveté par Baker, d'autres chercheurs ont développé les différentes structures basées sur NPC .L'onduleur NPC permet de disposer d'un nombre impair de

niveaux dans le motif de la tension en sortie [33]. Cependant, l'onduleur Multiple Point Clamped (MPC) a été développé dans les années 90 pour un nombre pair de tensions [34] [35].

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous [33] [27] :

- ✓ Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source.
- ✓ La forme de l'onde de trois niveaux résultants à une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.
- ✓ Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur ; celle-ci est donnée par $E/(N-1)$.
- ✓ Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.

Cependant en utilisant cette topologie, l'expérience a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas des grandes puissances, ce sont :

- ✓ Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à $E(N-1/N)$. donc les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions ; l'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes, et du cout de réalisation.

La technique des onduleurs multiniveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté la description des principales topologies de la conversion multiniveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances statiques et dynamique très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances statiques et dynamique très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

Dans la suite on présentera une nouvelle structure d'onduleur de tension à deux, à trois et à cinq niveaux à diode de bouclage (NPC), ainsi que leur principe de fonctionnement et l'étude de leurs modèles mathématiques en mode commandables.

II.6 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé a N niveaux

Les récents progrès technologique dans le domaine des dispositifs à semi-conducteur ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeur d'impulsion dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statique.

Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsions ont été proposées, on distingue :

- Commande pleine onde.
- Commande triangulaire sinusoïdale à échantillonnage naturel.
- Modulation vectorielle.
- Modulation calculée.

Dans cette partie, on va étudier un seul type de stratégie de commande par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI (technique triangulaire sinusoïdale).

II.7 Le principe de la technique triangulaire sinusoïdale

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. Cette technique exige une commande séparée pour chacune des phases de l'onduleur. La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique.

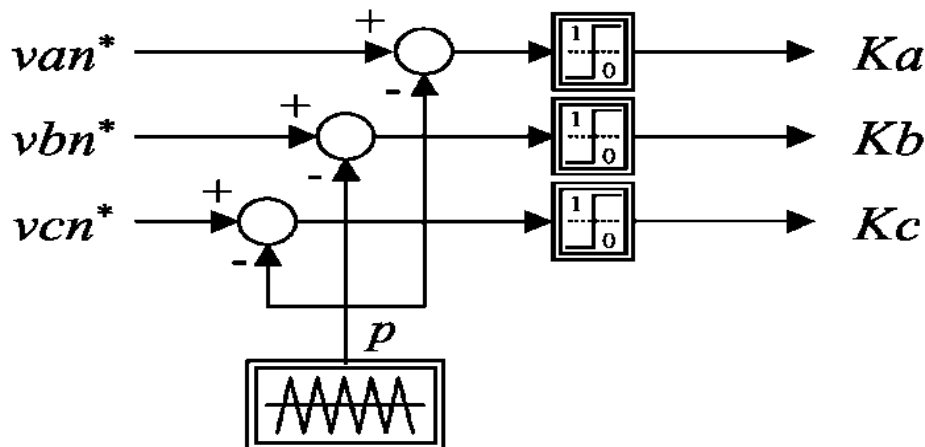


Figure II:3 Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale

Les caractéristiques de la modulation sinusoïdale sont :

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence (f_p) de la porteuse à la fréquence (f) de la référence

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

- Le coefficient de réglage r égale au rapport de l'amplitude (V_r) de la référence à l'amplitude crête (V_p) de la porteuse

$$r = \frac{V_r}{V_p} \leq 1$$

- Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD , définit par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension [30]:

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

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

La modulation est dite asynchrone si l'indice m n'est pas entier, elle est utilisée pour des valeurs suffisamment élevées. En modulation synchrone, si le maximum de la référence correspond à un pic de la porteuse, on dit que le calage est optimal et la tension bénéficie d'une double symétrie par rapport au quart et au milieu de la période.

II.8 Les onduleurs multiniveaux

II.8.1 Onduleur à deux niveaux de tension de type NPC

Les onduleurs les plus connus jusqu'ici sont les onduleurs à deux niveaux. Ces onduleurs à deux niveaux sont limités en tension (1.4KV) et en puissance (1MVA). Pour monter en puissance et en tension, on associe généralement plusieurs onduleurs en série ou en parallèle, d'où une complication dans la commande et une augmentation du coût du système [37].

II.8.1.1 Structure

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure (II.4). Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [37] [38].

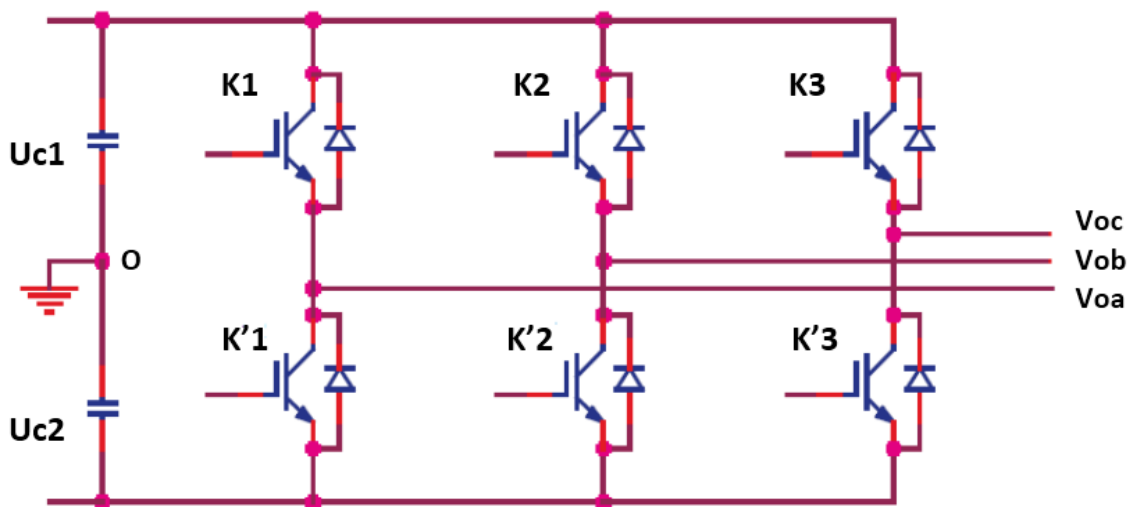


Figure II:4 Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux

Pour un convertisseur à 2-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions [37] :

Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, l'interrupteur K_1 est passant et K'_1 est bloqué comme le montre la figure (II.5.a). La tension de sortie V_{oa} est :

$V_{oa} = +U_{c1}$. La tension inverse appliquée à l'interrupteur K'_1 vaut : $V_{K'_1} = -U_{c2}$.

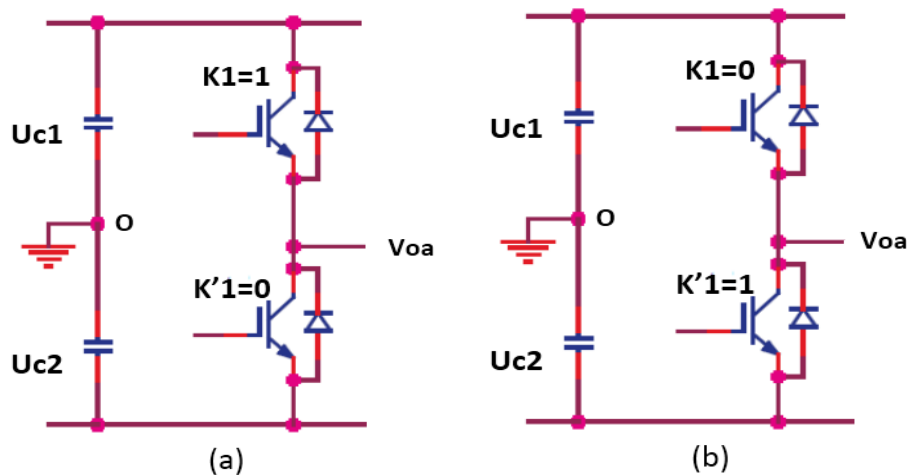


Figure II:5 Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

Séquences 2 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K'1 est passant comme le montre la figure (II.5.b). La tension de sortie Voa est :

$V_{oa} = -U_{c2}$. La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut : $V_{K1} = +U_{c1}$.

Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (II.1).

K1	K1'	Va
1	0	+Uc1
0	1	- Uc2

Tableau II:1 États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux

II.8.2 Onduleur à trois niveaux de tension de type NPC

II.8.2.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux

Les convertisseurs véhiculant des puissances élevées voient les composants qui constituent des contraintes considérables lors de la commande à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture. L'idée est de garder une puissance élevée sans pour autant surdimensionné les interrupteurs et d'associer des structures en séries au niveau de la partie concernant la conversion continu/alternatif. L'association en série de convertisseurs, certes, rend l'analyse des phénomènes relatifs à l'interaction plus complexe, mais en contrepartie une distribution raisonnable et acceptable des contraintes. Grace à cette mise en série, les contraintes dues aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs sont abaissées.

Pour éviter les phénomènes de ce type de groupement, on commence à utiliser les onduleurs multiniveaux [39] [40].

La figure (II.6) montre le circuit de puissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (Diode-Transistor) représentant chacune un interrupteur bidirectionnel et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage. Dans notre cas, on utilisera IGBT avec des diodes en antiparallèle.

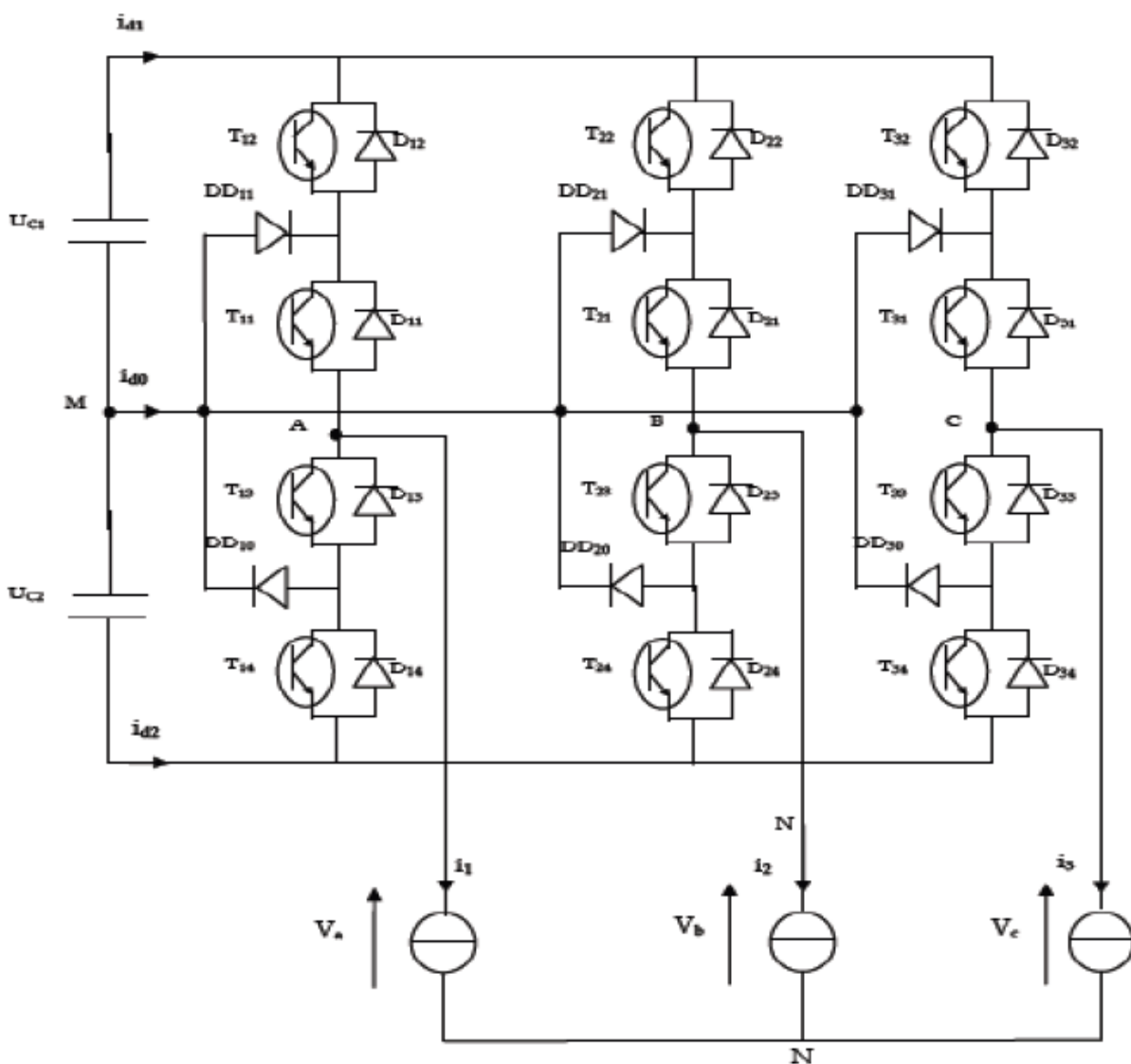


Figure II:6 Onduleur à trois niveaux à structure NPC

II.8.2.2 Principe de fonctionnement

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, de montrer les séquences de conceptions des interrupteurs.

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} et I_{d2} . Fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possible permettant de générer les N niveaux de tensions. Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement :

Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs $K1$, $K2$ sont passants et $K3$, $K4$, sont bloqués comme le montre la figure (II.8.a). Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{oa} = U_{c1}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs $K3$, $K4$ vaut : $V_{K3} = V_{K4} = U_{c1}$

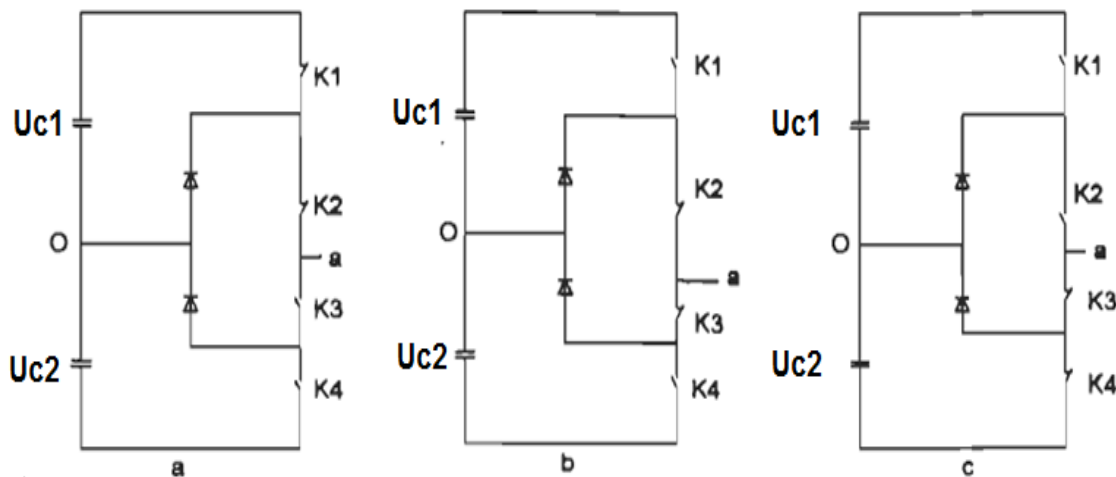


Figure II :7 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux

Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs $K2$, $K3$ sont passants et $K1$, $K4$ sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (II.8.b). Et la tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_{ao} = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K4 vaut : $V_{K1} = V_{K4} = U_{c1}$.

Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la figure (II.8.c). Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -U_{c2}$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K1, K2 vaut : $V_{K1} = V_{K2} = U_{c1}$.

Les figures suivantes illustrent les formes d'onde de la tension de sortie V_{ao} , ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur.

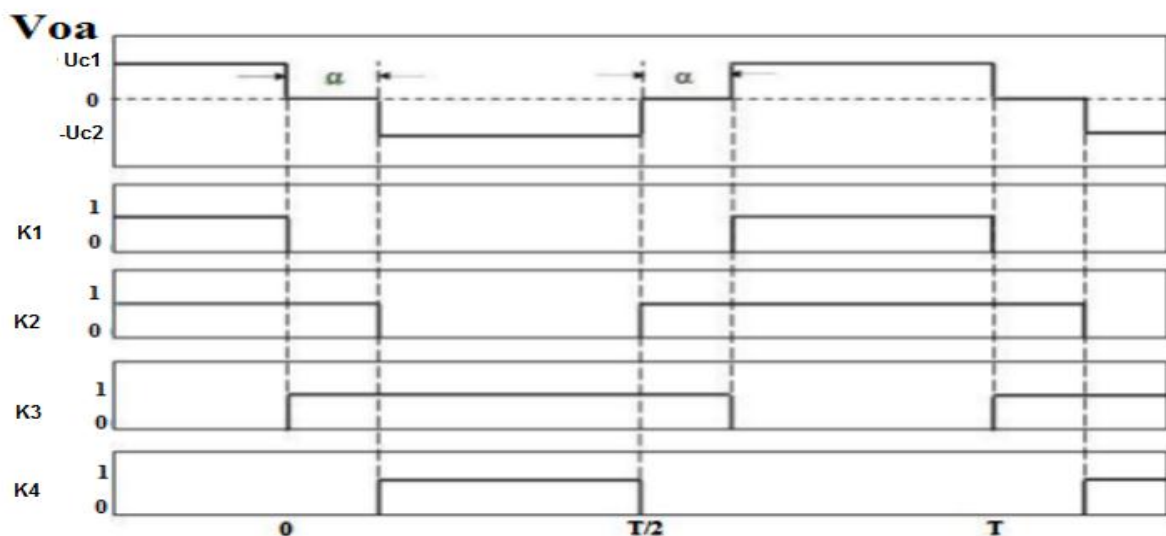


Figure II.8: Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC

Cette analyse montre que la structure de l'onduleur à trois niveaux limite à $U/2$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'ils sont bloqués, alors que dans la structure classique de l'onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète U .

C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monter en tension et en puissance dans le cas des applications de forte puissance

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (II.2).

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{ao}
1	1	0	0	U_{c1}
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-U_{c2}$

Tableau II.2 états possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux.

II.8.3 Onduleur à cinq niveaux de tension de type NPC

II.8.3.1 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois (3) bras et quatre (4) sources de tension continue ($+2U_c, +U_c, 0, -U_c, -2U_c$).

Chaque bras comporte huit (8) interrupteurs, six (6) en série et les deux autres en parallèle, plus deux (2) diodes.

Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche. La figure (II.9) donne une représentation schématique de cet onduleur [YOU-2008] [BOU-2001]. La structure choisie dans cette étude est celle de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping), représentée par la figure (II.10).

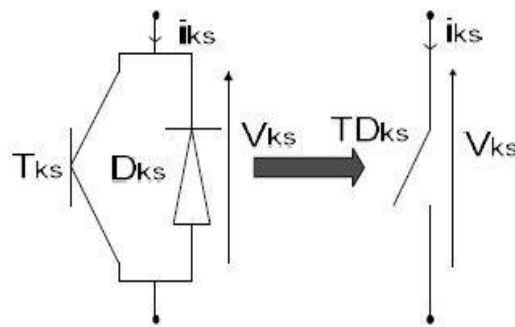


Figure II:9 Interrupteur bidirectionnel équivalent au pair transistor – diode

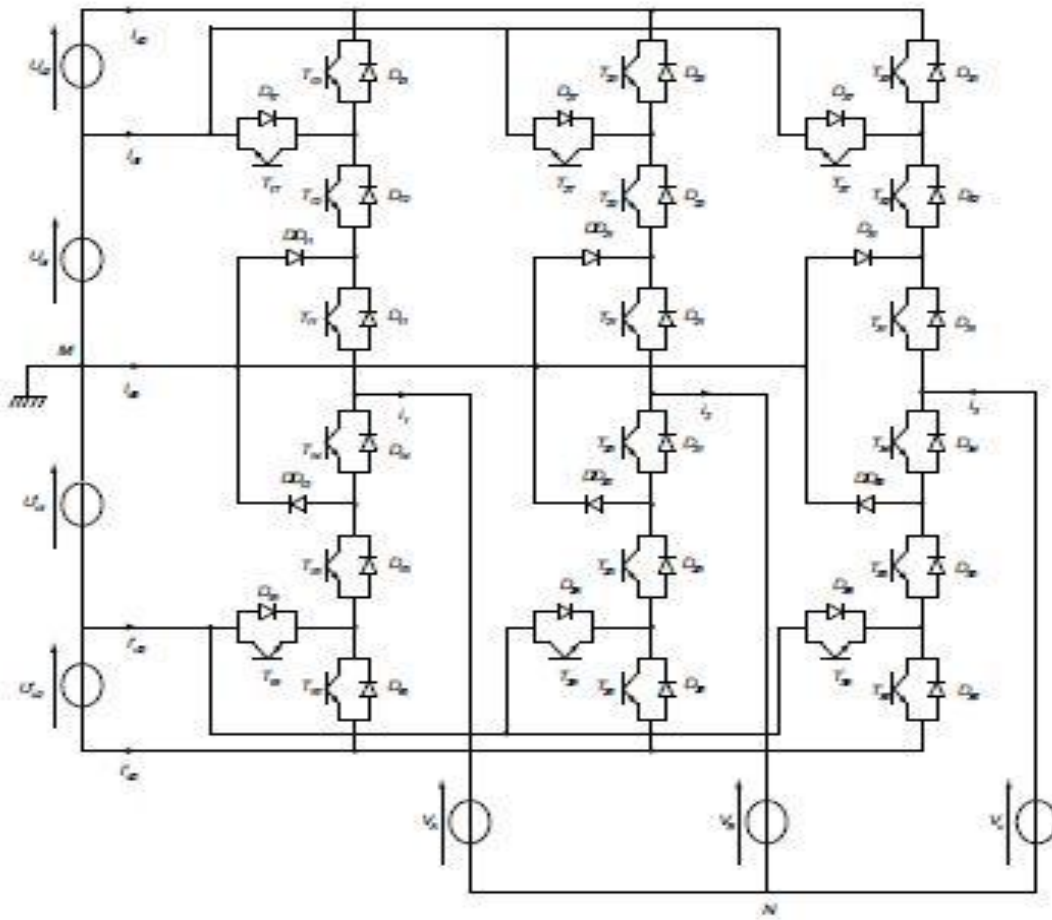


Figure II:10 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC

II.8.3.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

Pour simplifier la modélisation, on modélisera d'abord un bras de l'onduleur triphasé et on déduira le modèle de la structure globale, figure (II.11).

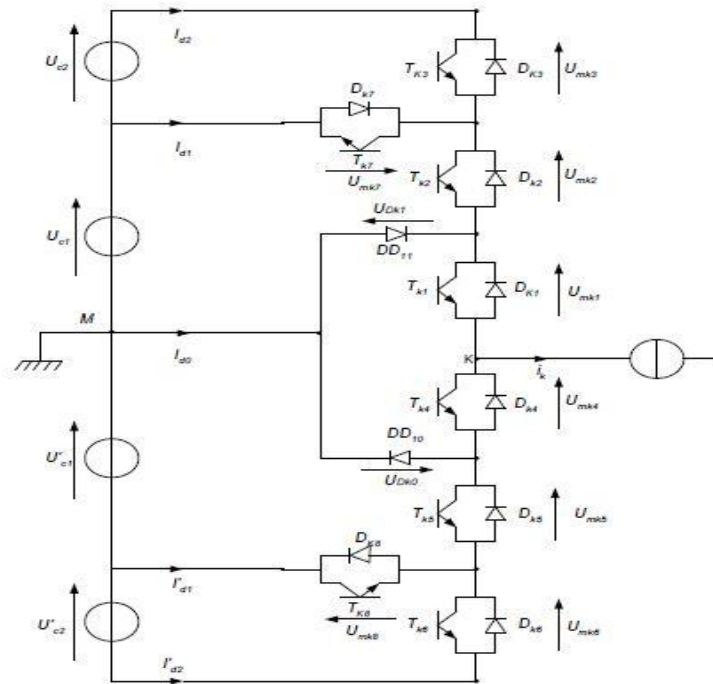
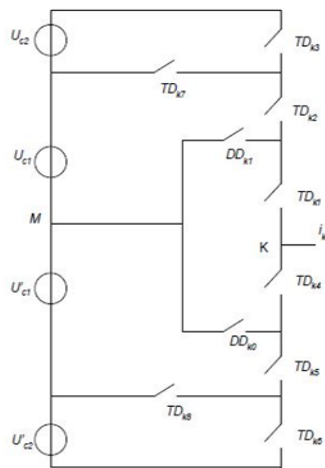


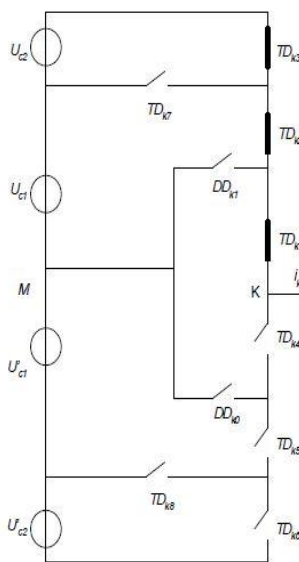
Figure II:11 Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

configuration	Grandeurs électroniques
<i>E0</i>	$I_k=0$
<i>E1</i>	$V_{km}=U_{c1}+U_{c2}=2U_c$
<i>E2</i>	$V_{km}=U_{c1}=U_c$
<i>E3</i>	$V_{km}=0$
<i>E4</i>	$V_{km}=-U'_{c1}=-U_c$
<i>E5</i>	$V_{km}=-U'_{c1}-U'_{c2}=-2U_c$
<i>E6</i>	$V_{km}=0$

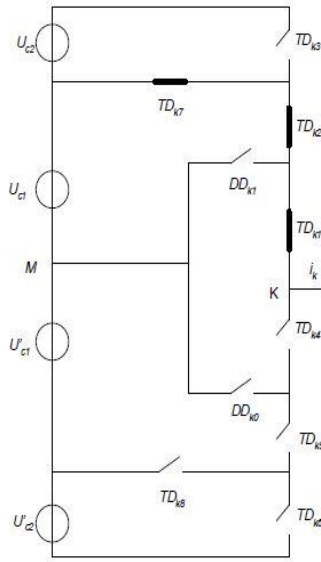
Tableau II:3 Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras k



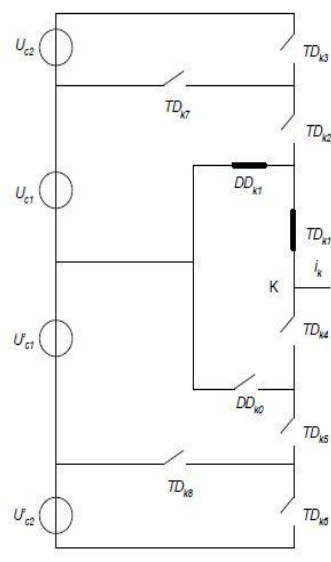
Configuration E0



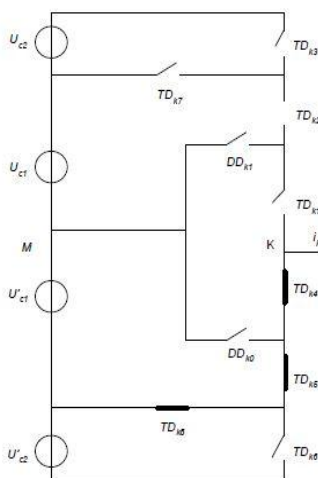
Configuration E1



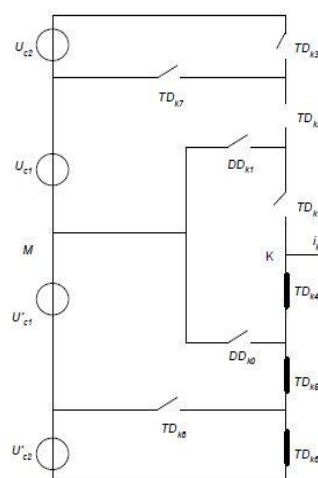
configuration E2



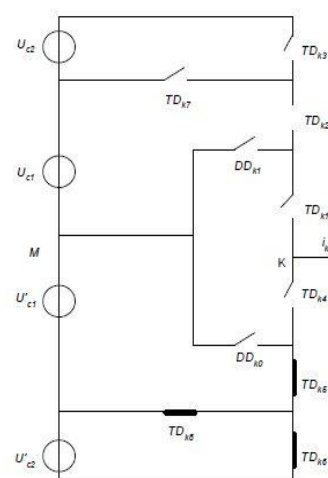
configuration E3



Configuration E4



configuration E5



configuration E6

Figure II:12 Différentes configurations pour un bras l'onduleur à cinq niveaux

II.8.3.3 Réseau de Pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

La transition entre les différentes configurations donne le réseau de Pétri (figure II.13).

La variable R_{mn} intervenant dans le réseau de Pétri représente la réceptivité de la transition de la configuration E_m à la configuration E_n . Les différentes variables sont explicitées ci –dessous [40]

$R_{01} = [(U_{mk1} > 0 \text{ et } B_{k1} \text{ et } (U_{mk2} > 0 \text{ et } B_{k2})) \text{ et } (U_{mk3} > 0 \text{ et } B_{k3})] \text{ ou } [(U_{mk1} < 0) \text{ et } (U_{mk2} < 0) \text{ et } (U_{mk3} < 0)]$

$R_{02} = [(U_{mk1} > 0 \text{ et } B_{k1}) \text{ et } (U_{mk2} > 0 \text{ et } B_{k2}) \text{ et } B_{k3}] \text{ ou } [(U_{mk1} < 0) \text{ et } (U_{mk2} < 0) \text{ et } B_{k7}]$

$R_{03} = [(U_{mk1} > 0 \text{ et } B_{k1}) \text{ et } B_{k2} \text{ et } (U_{Dk1} > 0)]$

$R_{04} = [(U_{mk4} > 0 \text{ et } B_{k4}) \text{ et } (U_{mk5} > 0 \text{ et } B_{k5}) \text{ et } B_{k6}] \text{ ou } [(U_{mk4} < 0) \text{ et } (U_{mk5} < 0) \text{ et } B_{k8}]$

$R_{05} = [(U_{mk4} > 0 \text{ et } B_{k4}) \text{ et } (U_{mk5} > 0 \text{ et } B_{k5}) \text{ et } (U_{mk6} > 0 \text{ et } B_{k6})] \text{ ou } [(U_{mk4} < 0) \text{ et } (U_{mk5} < 0) \text{ et } (U_{mk6} < 0)]$

$R_{06} = [(U_{mk4} > 0 \text{ et } B_{k4}) \text{ et } B_{k5} \text{ et } (U_{Dk0} > 0)]$

$R_{10} = (i_k = 0)$

$R_{12} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2} \text{ et } B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k7}]$

$R_{13} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2}]$

$R_{14} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k8}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k5}]$

$R_{15} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k5} \text{ et } B_{k6}]$

$R_{16} = [(i_k < 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k4}]$

$R_{20} = (i_k = 0)$

$R_{21} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2} \text{ et } B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k7}]$

$R_{23} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2}]$

$R_{24} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k8}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k5}]$

$R_{25} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k8}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k5} \text{ et } B_{k6}]$

$R_{26} = [(i_k < 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k4}]$

$R_{30} = (i_k = 0)$

$R_{31} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2} \text{ et } B_{k3}]$

$R_{32} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2}]$

$R_{34} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k8}]$

$R_{35} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k8}]$

$R_{36} = \text{impossible.}$

$R_{40} = (i_k = 0)$

$R_{41} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k8} \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2} \text{ et } B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k7}]$

$R_{42} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k8} \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2} \text{ et } B_{k3}] \text{ ou } [(i_k < 0) \text{ et } B_{k4} \text{ et } B_{k7}]$

$R_{43} = [(i_k > 0) \text{ et } B_{k8} \text{ et } B_{k1} \text{ et } B_{k2}]$

$R45 = [(ik > 0) \text{ et } B k8] \text{ ou } [(ik < 0) \text{ et } Bk4 \text{ et } Bk5 \text{ et } Bk6]$

$R46 = [(ik < 0) \text{ et } B k5]$

$R50 = (ik=0)$

$R51 = [(ik > 0) \text{ et } Bk1 \text{ et } Bk2 \text{ et } Bk3] \text{ ou } [(ik < 0) \text{ et } B k4]$

$R52 = [(ik > 0) \text{ et } Bk1 \text{ et } Bk2 \text{ et } B k3] \text{ ou } [(ik < 0) \text{ et } B k4 \text{ et } Bk7]$

$R53 = [(ik > 0) \text{ et } Bk1 \text{ et } B k4]$

$R54 = [(ik > 0) \text{ et } Bk4 \text{ et } Bk5 \text{ et } Bk8] \text{ ou } [(ik < 0) \text{ et } B k6]$

$R56 = [(ik < 0) \text{ et } B k5]$

$R60 = (ik=0)$

$R61 = [(ik < 0) \text{ et } B k4]$

$R62 = [(ik < 0) \text{ et } B k4 \text{ et } Bk7]$

$R63 = \text{impossible.}$

$R64 = [(ik < 0) \text{ et } Bk4 \text{ et } Bk5 \text{ et } B k6]$

$R65 = [(ik < 0) \text{ et } Bk4 \text{ et } Bk5 \text{ et } Bk6]$

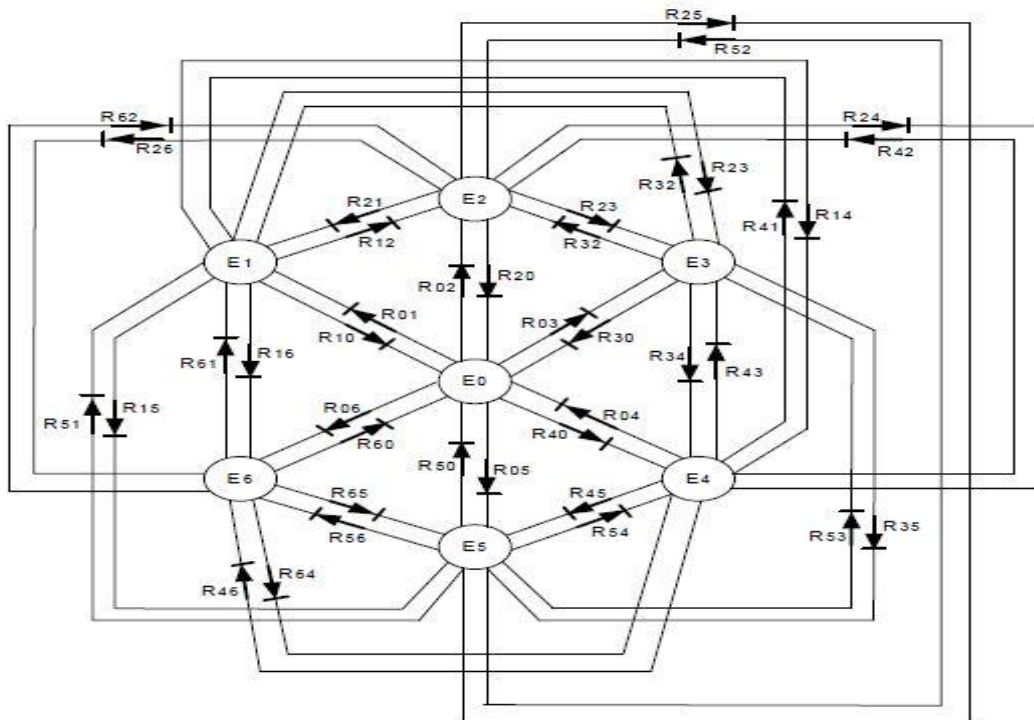


Figure II:12 Réseau de pétri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux

II.8.3.4 Modèle de commande de l'onduleur à cinq niveaux

II.8.3.4.1 Commande complémentaire

Pour éviter des court circuits des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire. Pour un bras k de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, figure (III.3), plusieurs commandes complémentaires sont possibles, la commande optimale est définie comme suit :

$$B_{K4} = B_{K2}$$

$$B_{K5} = B_{K1}$$

$$B_{K6} = B_{K3}$$

Pour un bras k , les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{K2} \cdot F_{K3}$$

$$F_{k0}^b = F_{k4} \cdot F_{K5} \cdot F_{K6}$$

Avec la commande complémentaire et mode commandable, le réseau de Pétri du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux se simplifie de sept à cinq configurations. Le réseau de Pétri obtenu dans ces conditions est représenté à la figure (II.14).

V_{KM}	B_{K1}	B_{K2}	B_{K3}
$2U_c$	1	1	1
U_c	1	1	0
0	1	0	0
$-U_c$	0	0	1
$-2U_c$	0	0	0

Tableau II:4 Table d'excitation des Interrupteurs de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

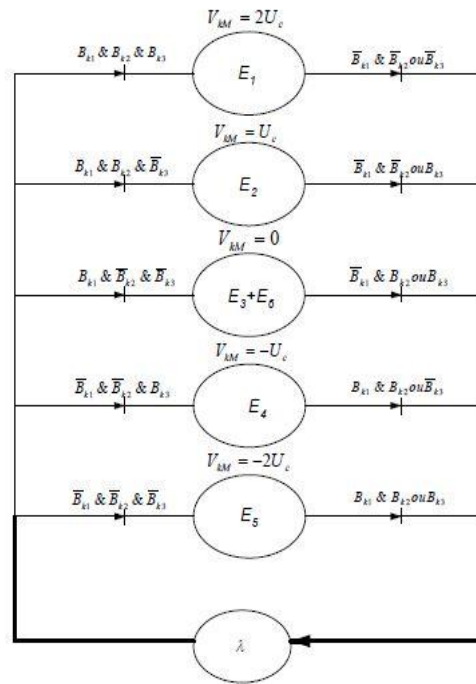


Figure II:13 Réseau de pétri réduit d'un bras

II.8.3.4.2 Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à cinq niveaux

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant:

$$\begin{aligned}
 V_{AM} &= F_{11}F_{12} (1- F_{13}) U_{C1} + F_{11}F_{12}F_{13} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{14}F_{15} (1- F_{16}) U_{C1} - F_{14}F_{15}F_{16} (U_{C1} + U_{C2}) \\
 V_{BM} &= F_{21}F_{22} (1- F_{23}) U_{C1} + F_{21}F_{22}F_{23} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{24}F_{25} (1- F_{26}) U_{C1} - F_{24}F_{25}F_{26} (U_{C1} + U_{C2}) \\
 V_{CM} &= F_{31}F_{32} (1- F_{33}) U_{C1} + F_{31}F_{32}F_{33} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{34}F_{35} (1- F_{36}) U_{C1} - F_{34}F_{35}F_{36} (U_{C1} + U_{C2})
 \end{aligned}$$

Pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux, les fonctions de connexion des demi-bras sont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 F_{11}^b &= F_{11}F_{12}F_{13} & F_{21}^b &= F_{21}F_{22}F_{23} & F_{31}^b &= F_{31}F_{32}F_{33} \\
 F_{10}^b &= F_{14}F_{15}F_{16} & F_{20}^b &= F_{24}F_{25}F_{26} & F_{30}^b &= F_{34}F_{35}F_{36}
 \end{aligned}$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs placée en parallèle sont définies comme suit:

$$\begin{aligned}
 F_{17} &= F_{11}F_{12}(1 - F_{13}) & F_{27} &= F_{21}F_{22}(1 - F_{23}) & F_{37} &= F_{31}F_{32}(1 - F_{33}) \\
 F_{18} &= F_{14}F_{15}(1 - F_{16}) & F_{28} &= F_{24}F_{25}(1 - F_{26}) & F_{38} &= F_{34}F_{35}(1 - F_{36})
 \end{aligned}$$

En introduisant ces fonctions dans le système (II.3), on aboutit au système suivant:

$$\begin{aligned} V_{AM} &= F_{17} U_{C1} + F_{11}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{18} U'_{C1} - F_{10}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{BM} &= F_{27} U_{C1} + F_{21}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{28} U'_{C1} - F_{20}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \\ V_{CM} &= F_{37} U_{C1} + F_{31}^b (U_{C1} + U_{C2}) - F_{38} U'_{C1} - F_{30}^b (U'_{C1} + U'_{C2}) \end{aligned}$$

Sous forme matricielle (II.6) s'écrit

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C2} \quad (III.7)$$

Dans le cas où $U_{C1}=U_{C2}=U'_{C1}=U'_{C2}=U_C$, la relation (II.7) s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C1} \quad (III.8)$$

Les équations de mailles du système source – onduleur - charge donnent:

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \quad (III.9)$$

Puisque la charge triphasée est couplée en étoile avec neutre isolé :

$$V_{NM} = 1/3(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (III.10)$$

Les tensions simples aux bornes aux de la charge sont :

$$\begin{aligned} V_A &= V_{AM} - V_{NM} = 1/3(2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B &= V_{BM} - V_{NM} = 1/3(-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C &= V_{CM} - V_{NM} = 1/3(-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{aligned} \quad (III.11)$$

A partir des relations (II.7) et (II.11), on obtient le système matriciel ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{C2} \quad (III.12)$$

Dans le cas $U_{C1}=U_{C2}=U'_{C1}=U'_{C2}=U_C$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \quad (\text{III.13})$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur, s'expriment en fonction des courants de la charge i_1, i_2, i_3 en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{aligned} i_{d1} &= F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} &= F_{11}F_{12}F_{13}i_1 + F_{21}F_{22}F_{23}i_2 + F_{31}F_{32}F_{33}i_3 \\ i'_{d1} &= F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i'_{d2} &= F_{14}F_{15}F_{16}i_1 + F_{24}F_{25}F_{26}i_2 + F_{34}F_{35}F_{36}i_3 \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

En remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion des demi-bras, le système (III.14) devient :

$$\begin{aligned} i_{d1} &= F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} &= F_{11}^b i_1 + F_{21}^b i_2 + F_{31}^b i_3 \\ i'_{d1} &= F_{18}i_1 + F_{28}i_2 + F_{38}i_3 \\ i'_{d2} &= F_{10}^b i_1 + F_{20}^b i_2 + F_{30}^b i_3 \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Le courant i_{d0} s'exprime en fonction des courants d'entrée et courants de charge par la relation :

$$i_{d0} + i_{d1} + i_{d2} + i'_{d1} + i'_{d2} = i_1 + i_2 + i_3 \quad (\text{III.16})$$

II.9 Simulation des onduleurs multiniveaux à structure NPC

II.9.1 Onduleur à deux niveaux

Pour générer les impulsions de commande MLI-ST du convertisseur à 2-niveaux de tensions, une porteuse triangulaire d'amplitude U_r et de fréquence F_r est nécessaire. Elle est ensuite comparée au signal de référence (sinus) d'amplitude U_r et de fréquence F_r . chaque comparaison donne 1 si la porteuse est supérieure ou égale à la référence, 0 dans le cas contraire. Les signaux de commande des interrupteurs K1 et K2 sont complémentaires.

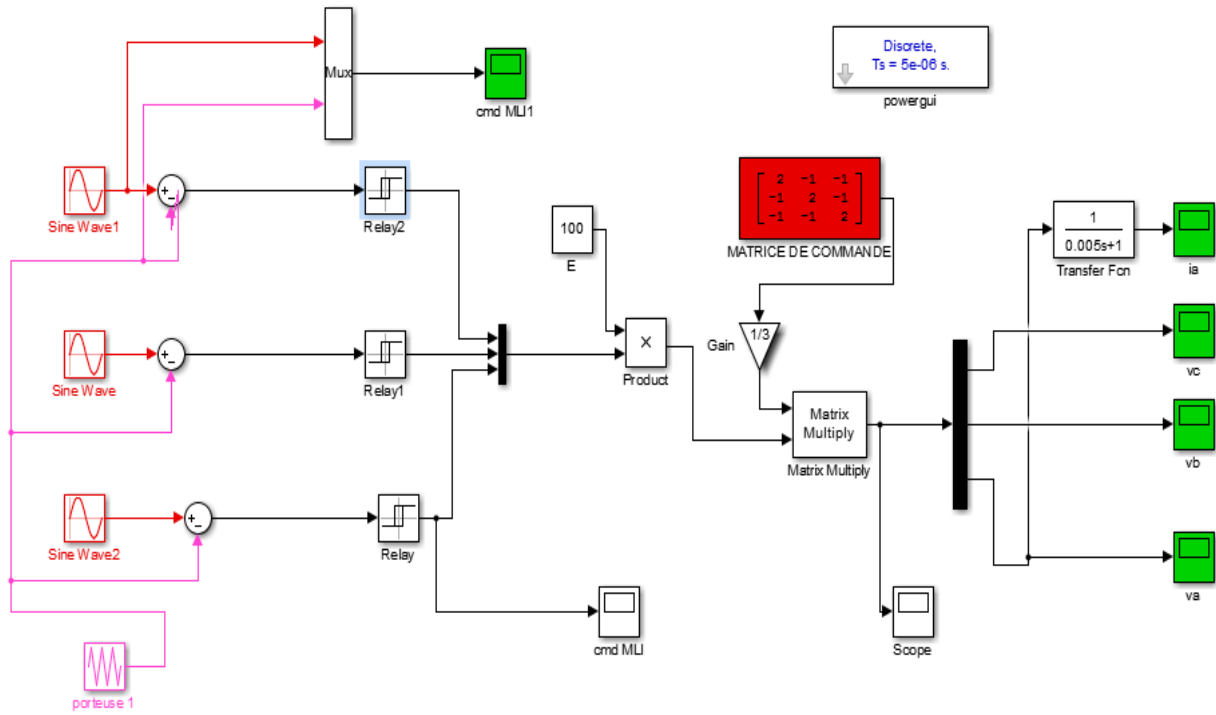


Figure II:14 Schéma du modèle de simulation de l'onduleur à deux niveaux

La méthode de commande MLI de type triangulaire sinusoïdale est utilisé pour la commande des interrupteurs les sources continues utilisées valent 100 Volt, nous avons aussi pris comme charge une résistance en série avec une inductance de valeurs respectives :
 $R=1$ Ohm et $L=5$ mH.

II.9.1.1 Résultats de simulation

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 1080$ Hz.

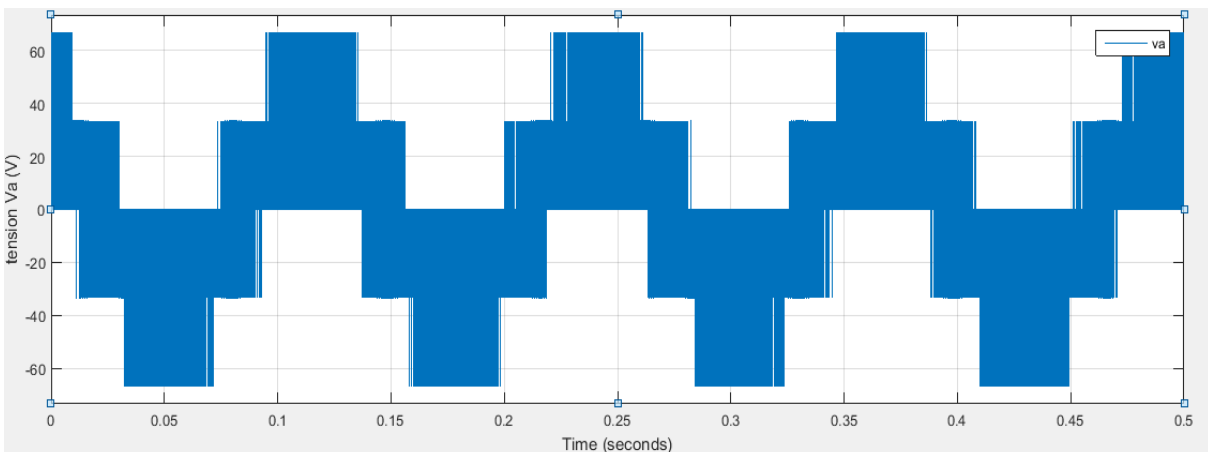


Figure II:15 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

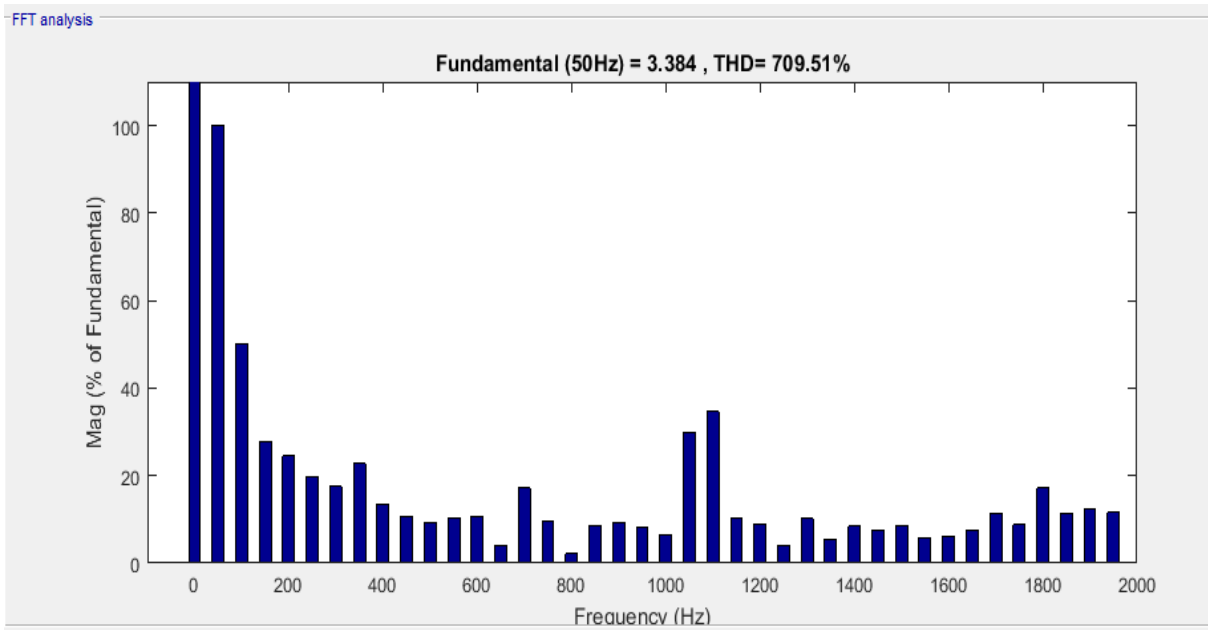


Figure II:16 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 3000$ Hz.

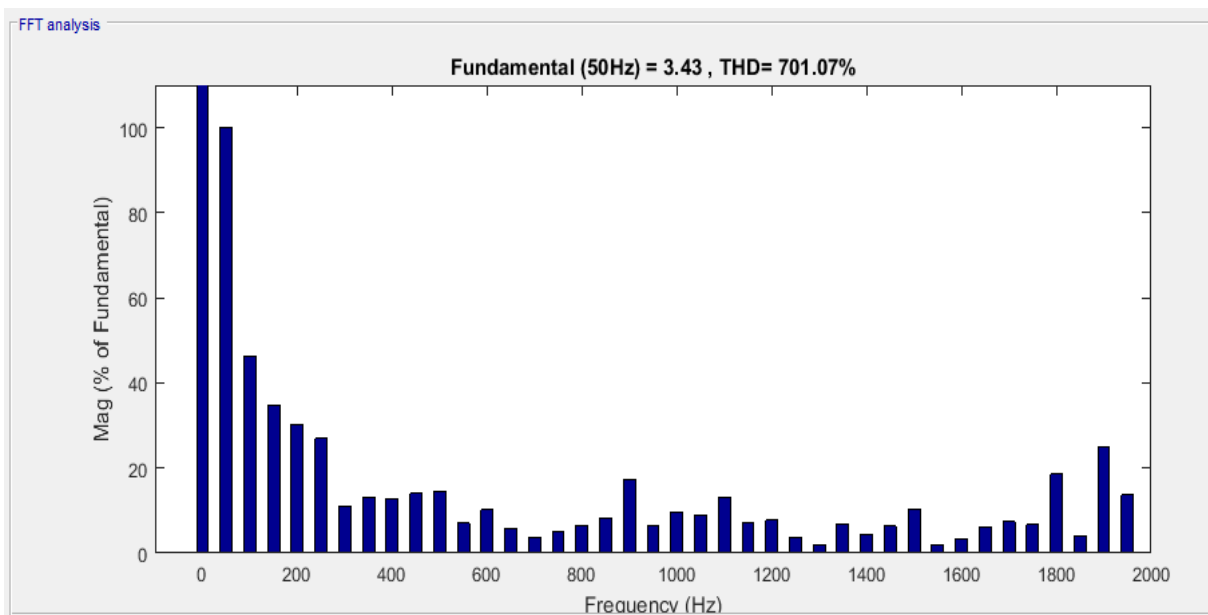


Figure II :17 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 9600$ Hz

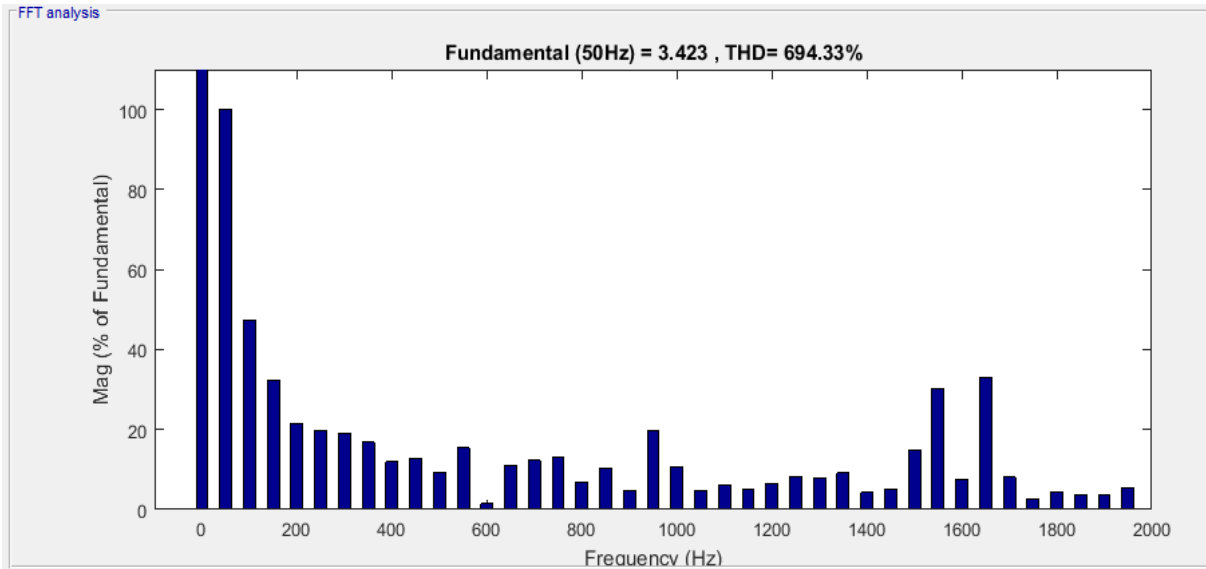


Figure II:18 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 1080$ Hz

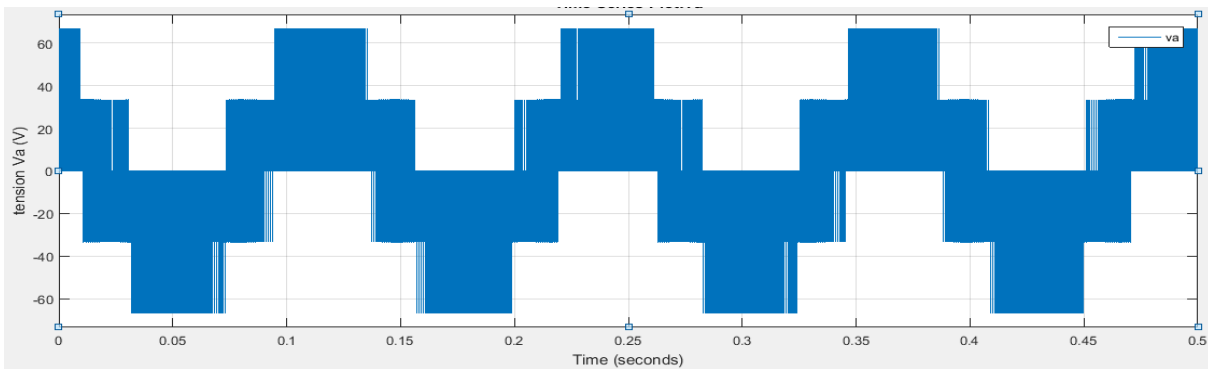


Figure II:19 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l’onduleur

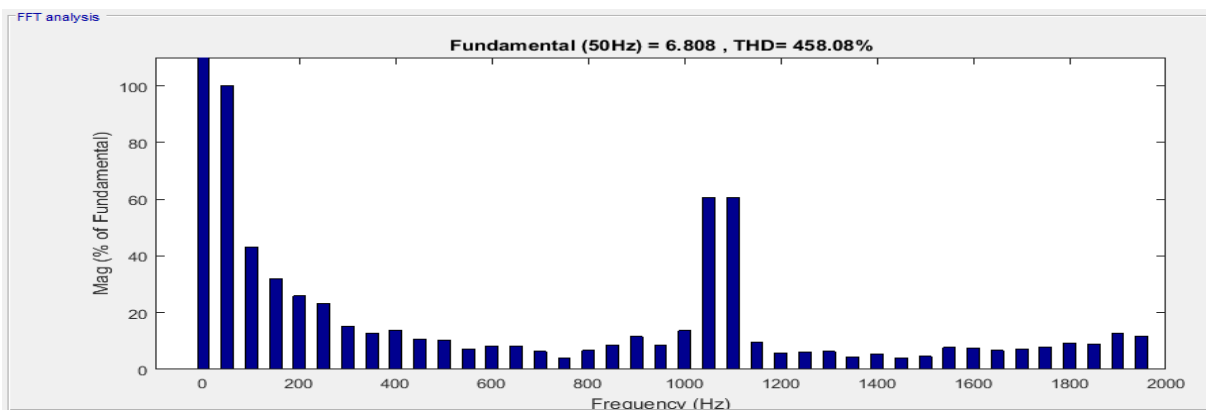


Figure II:20 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 3000$ Hz

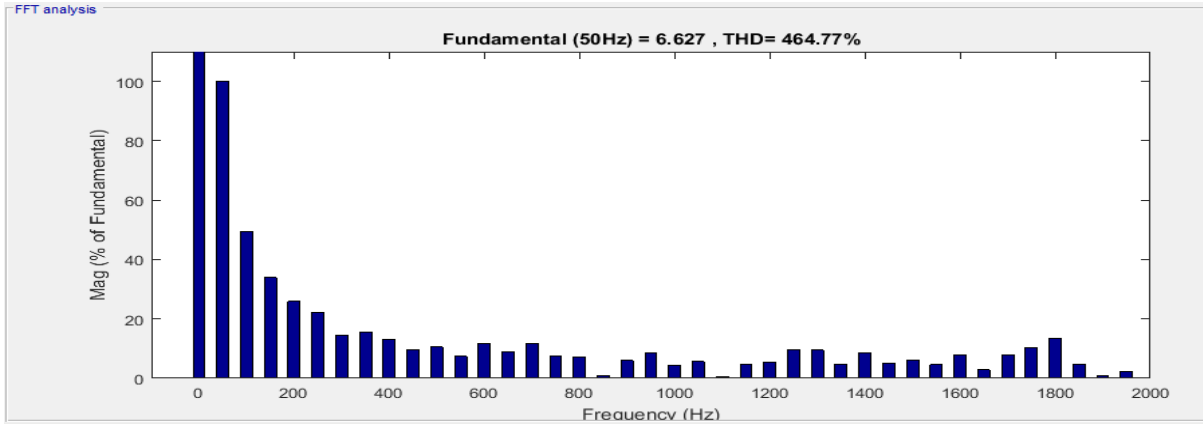


Figure II:21 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 9600$ Hz

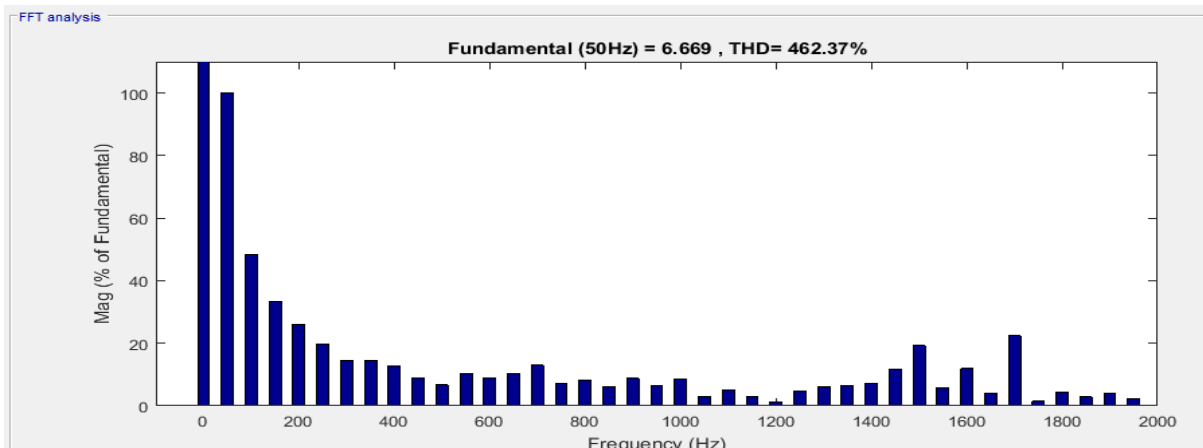


Figure II:22 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 1080$ Hz.

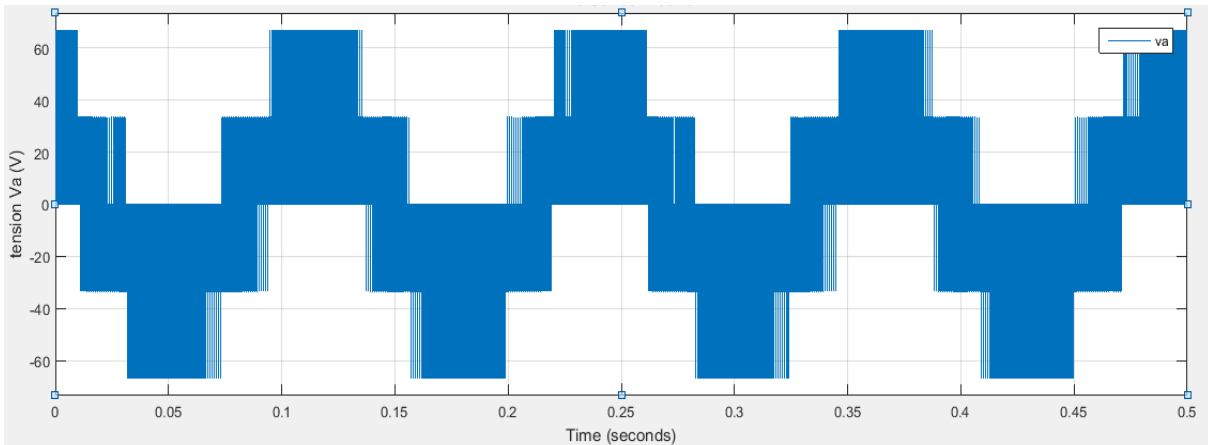


Figure II:23 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

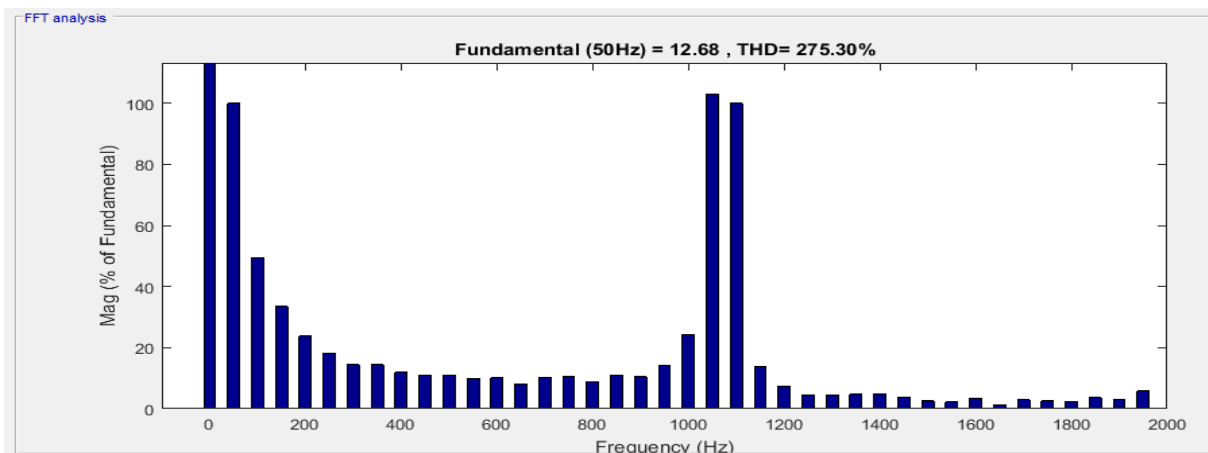


Figure II:24 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 3000$ Hz.

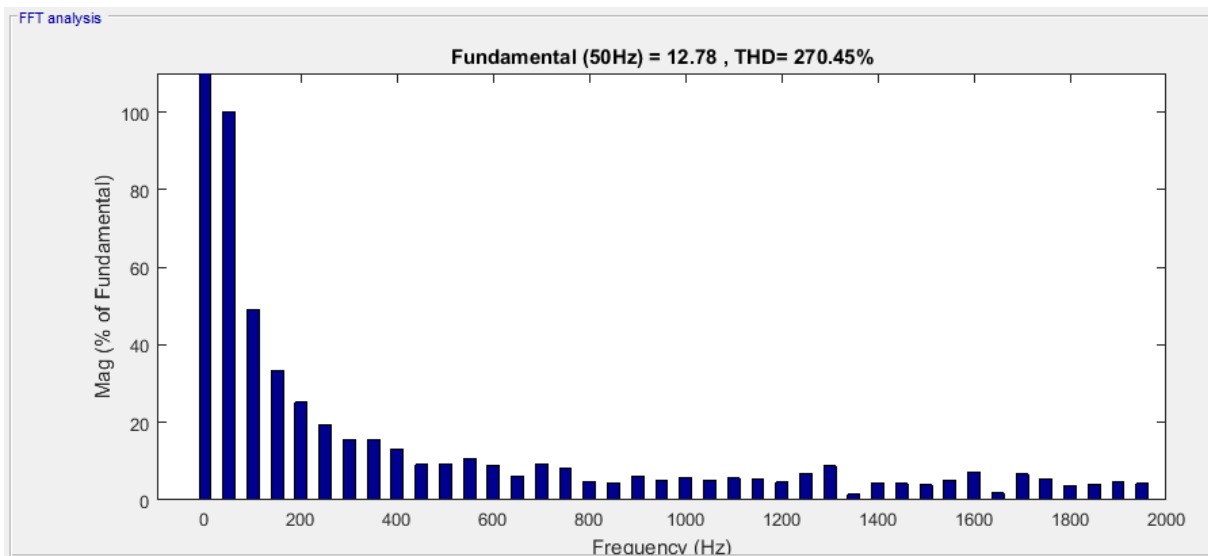


Figure II:25 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 9600$ Hz.

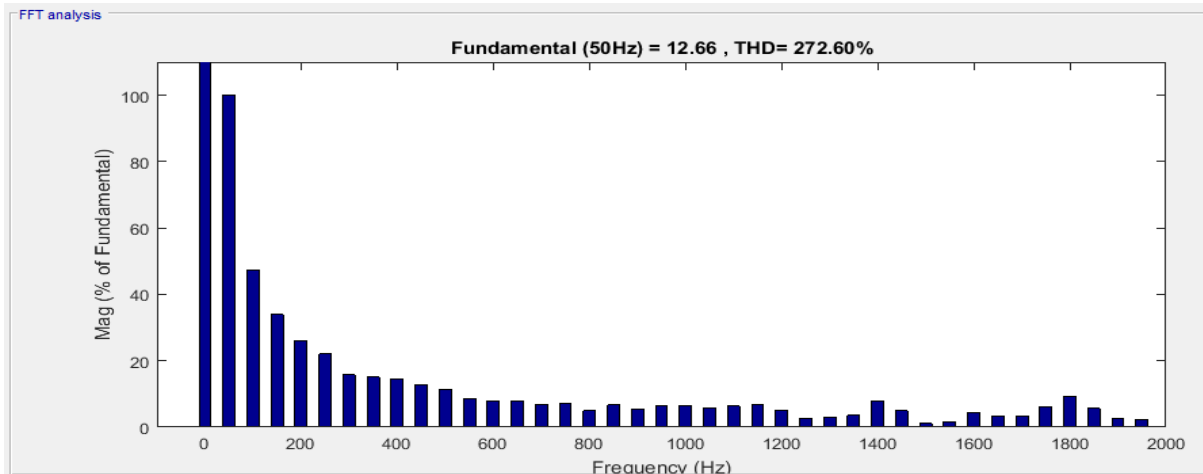


Figure II:26 Le spectre d’harmonique de tension VA

II.9.2 Onduleur à trois niveaux

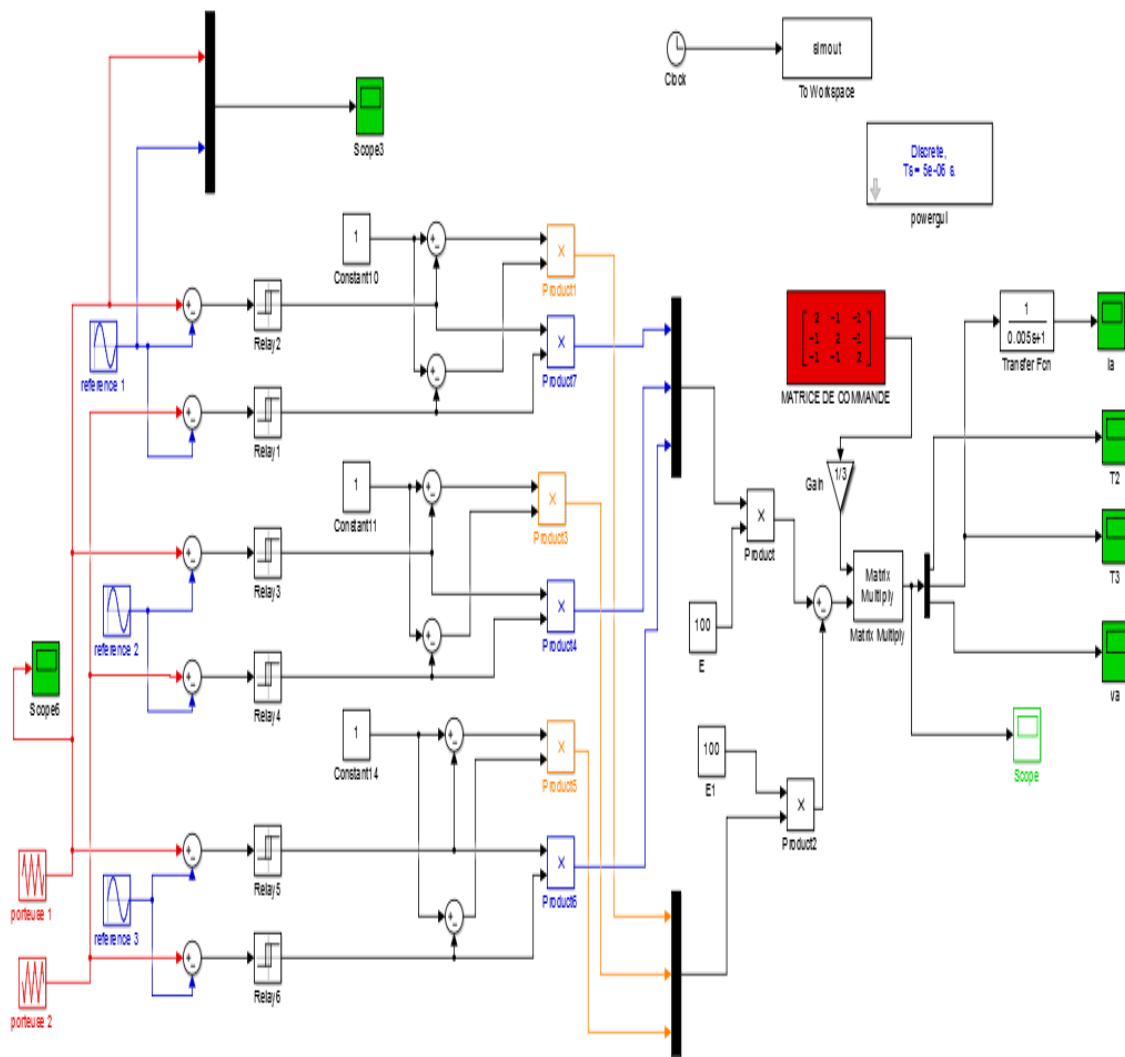


Figure II:27 Schéma du modèle de simulation de l’onduleur à trois niveaux

II.9.2.1 Résultats de simulation

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 1080$ Hz.

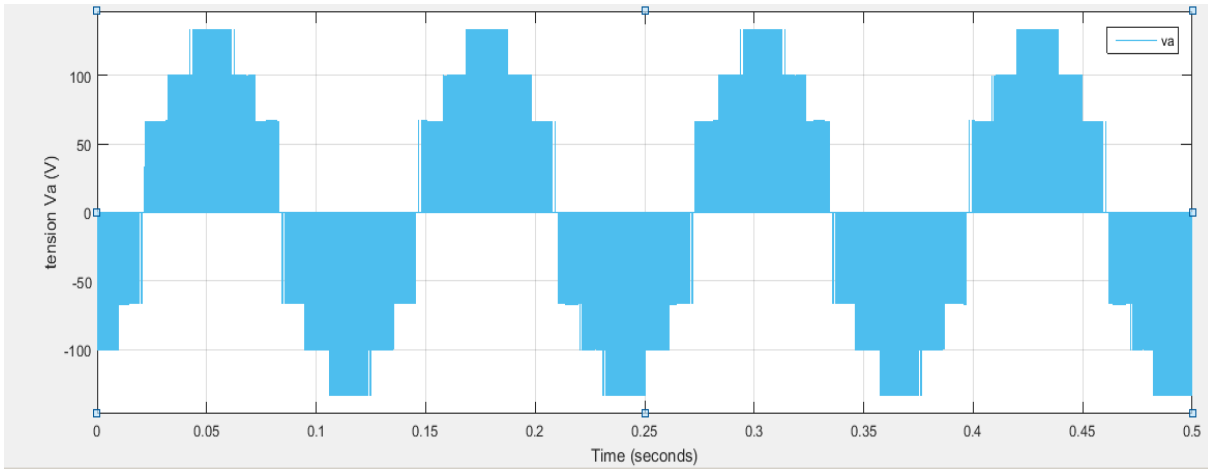


Figure II:28 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

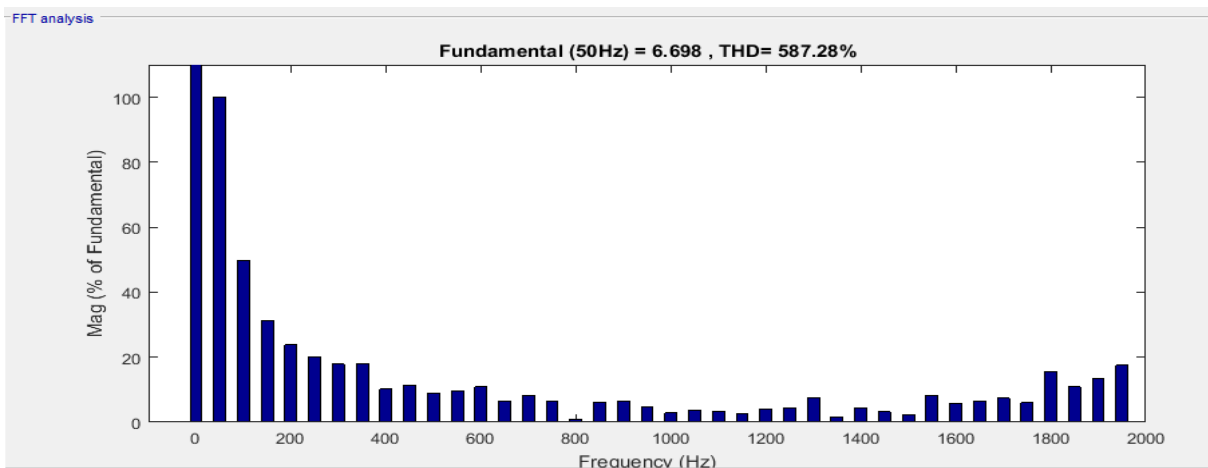


Figure II:29 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 3000$ Hz.

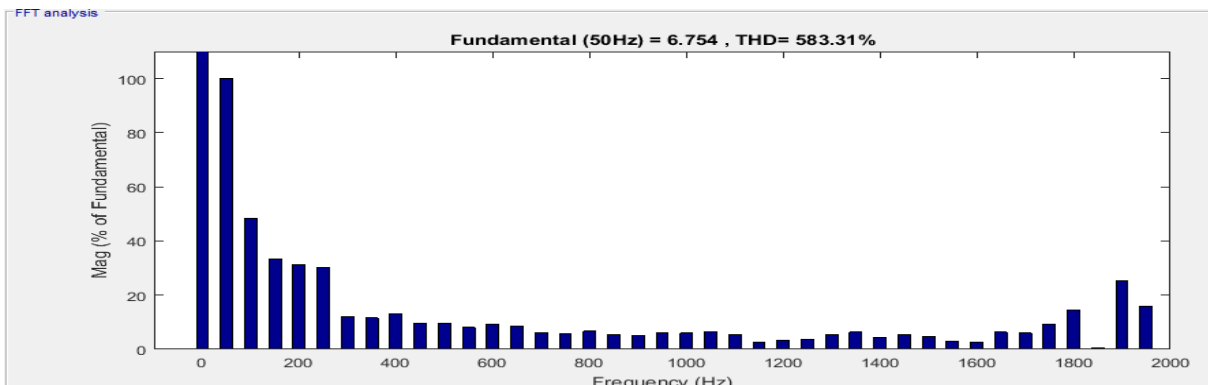


Figure II:30 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 9600$ Hz.

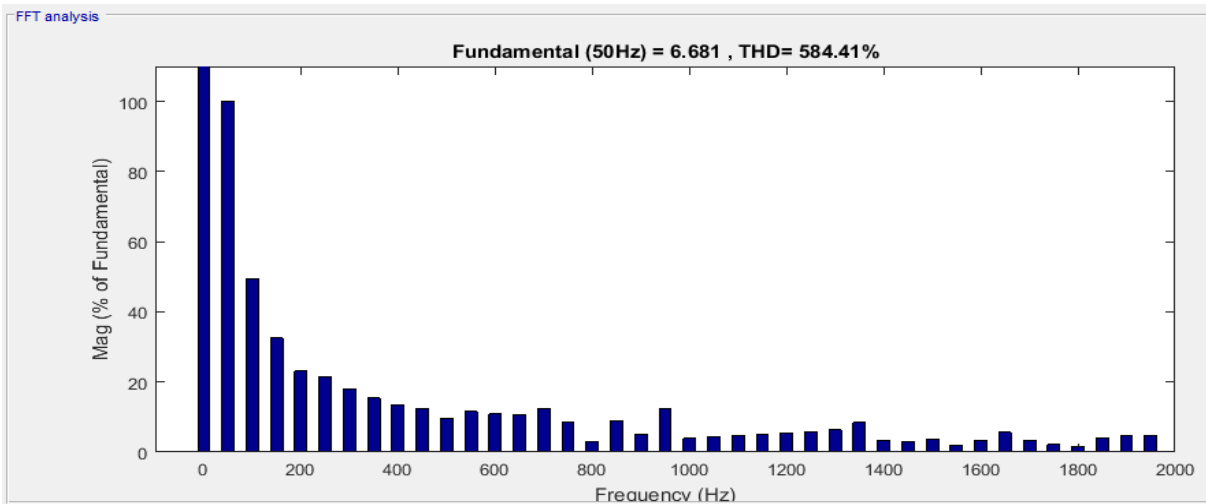


Figure II:31 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 1080$ Hz.

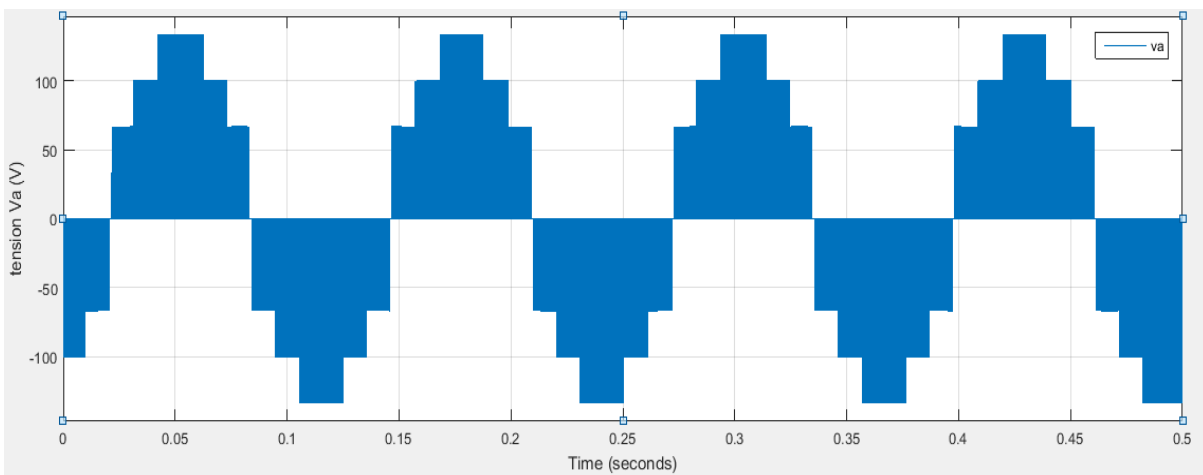


Figure II:32 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

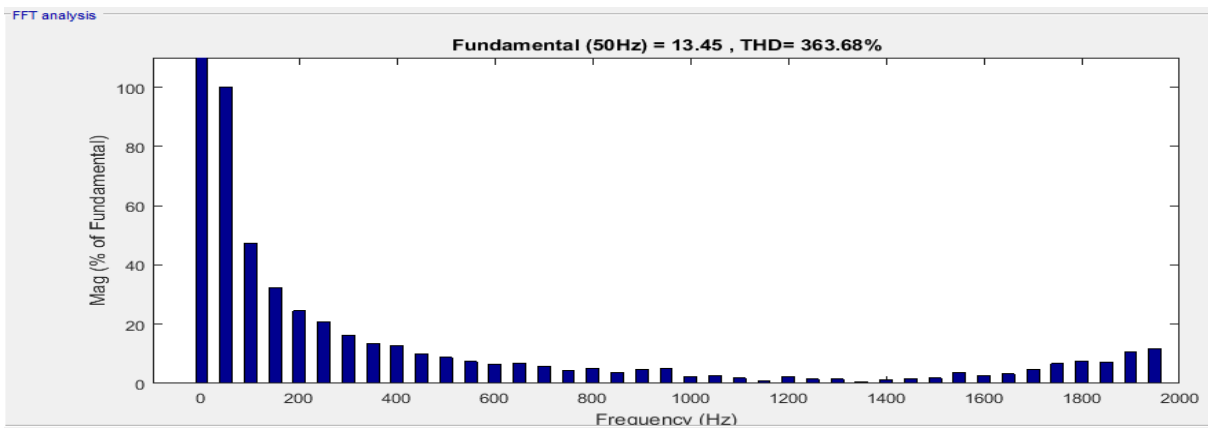


Figure II:33 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 3000$ Hz

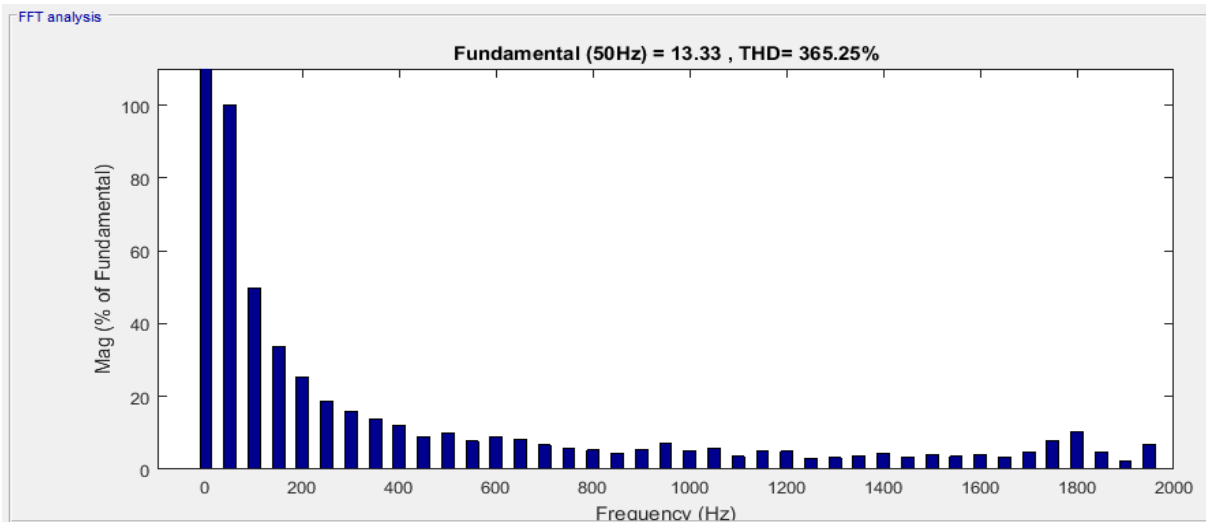


Figure II:34 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 9600$ Hz

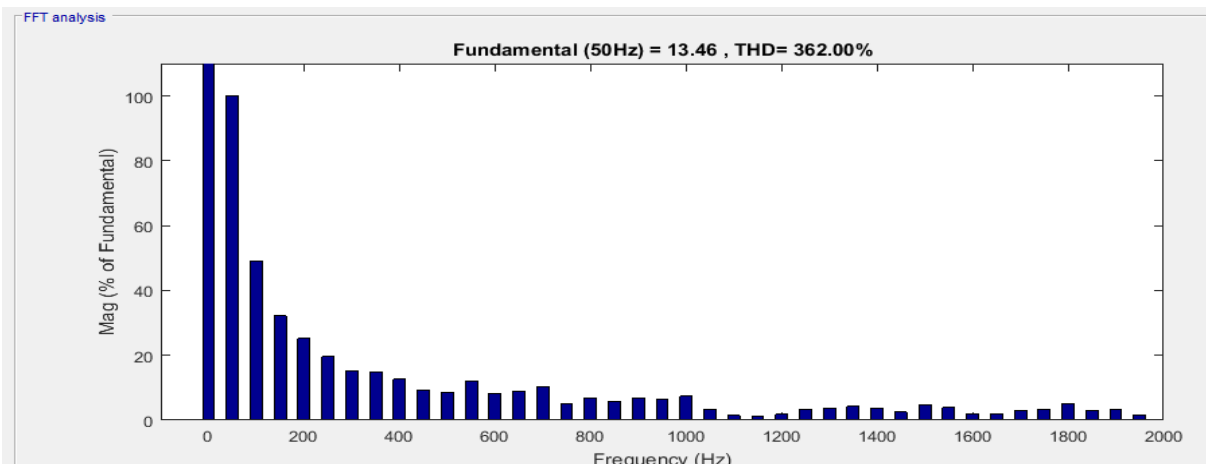


Figure II:35 Le spectre d'harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 1080$ Hz.

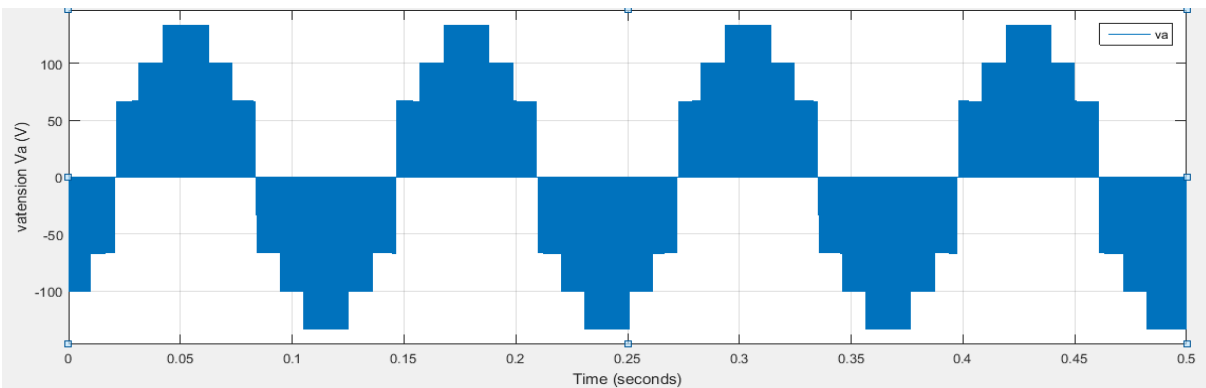


Figure II:36 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

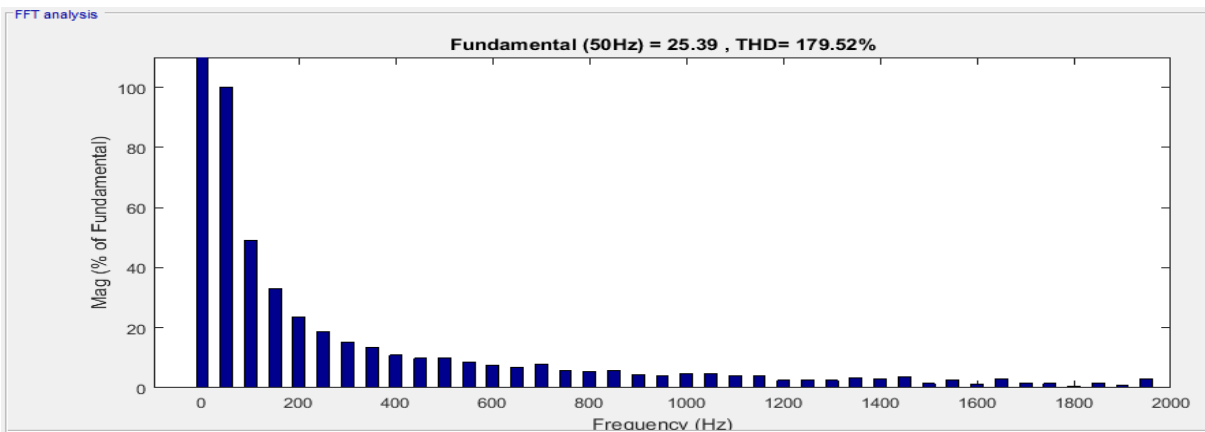
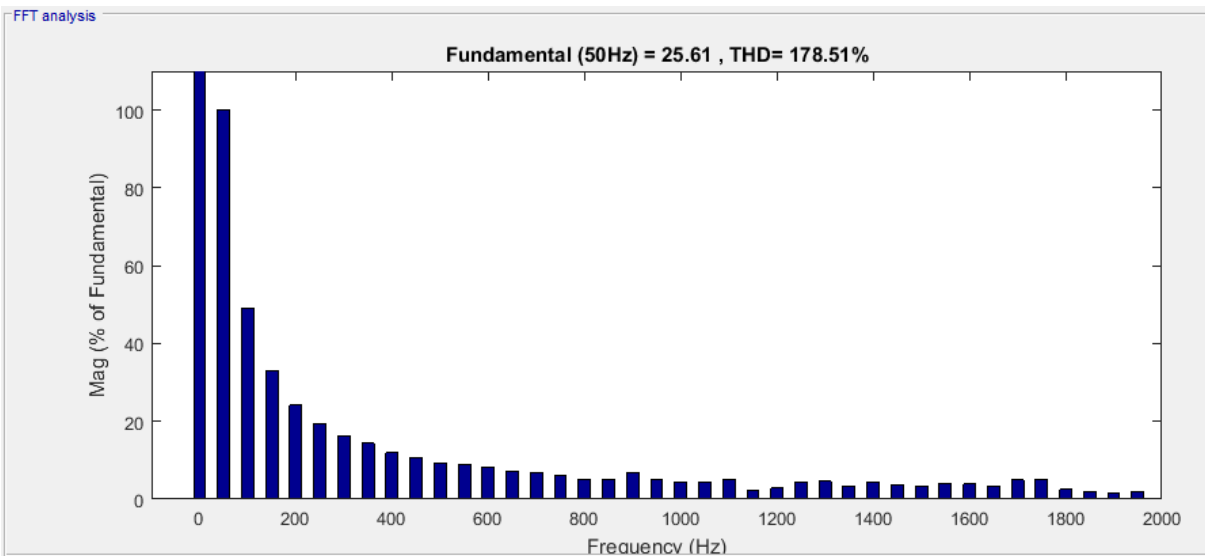


Figure II:37 Le spectre d’harmonique de tension V

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 3000$ Hz.



Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 9600$ Hz

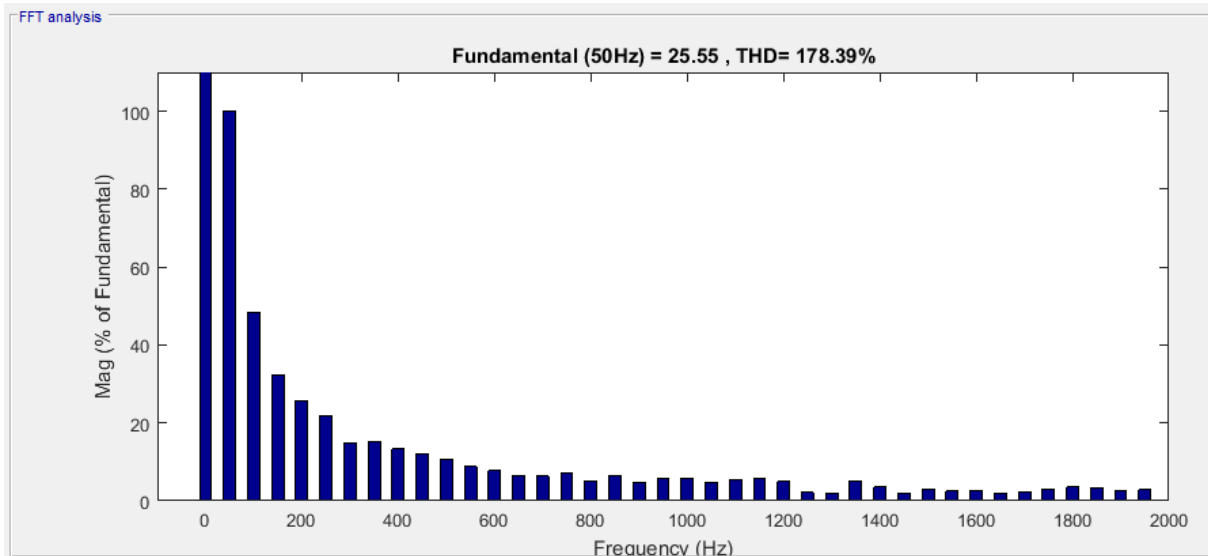


Figure II:38 Le spectre d’harmonique de tension VA

II.10 Développement d’un modèle de simulation d’onduleur NPC à 5 niveaux

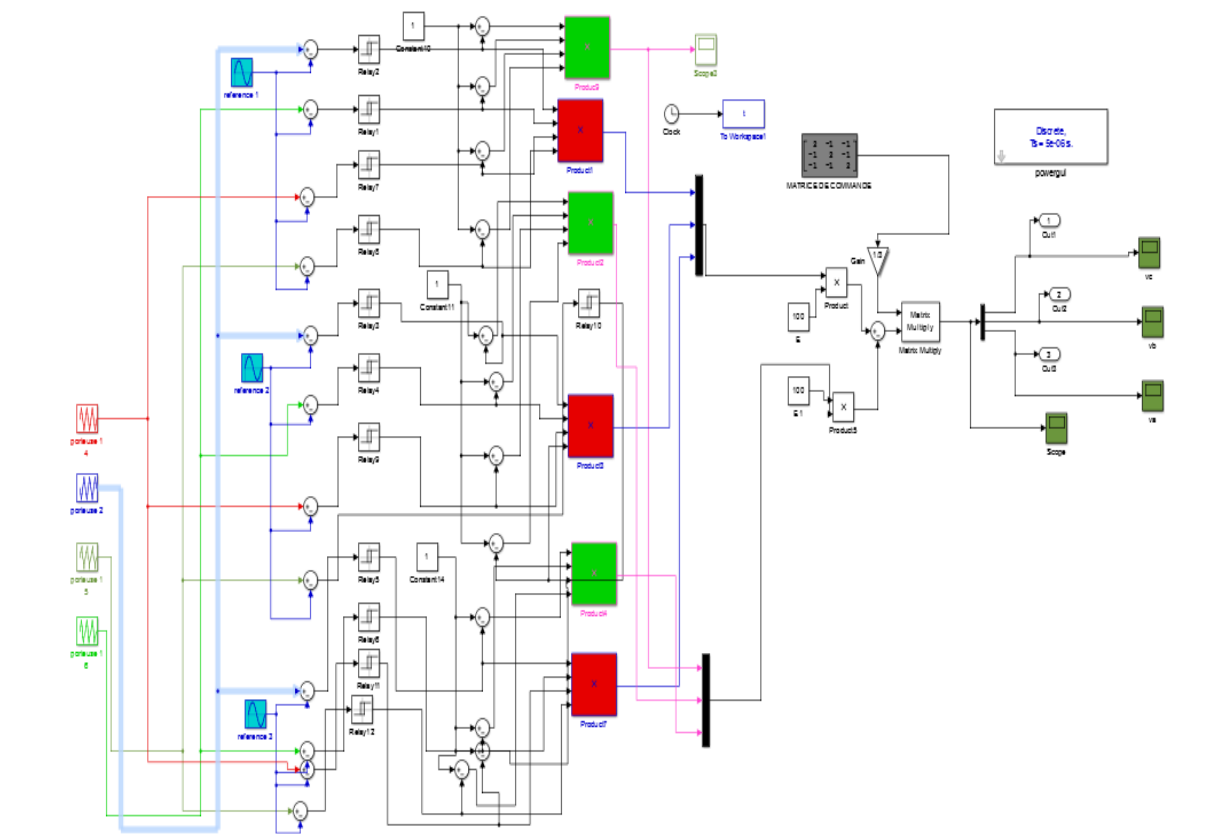


Figure II:39 Schéma du modèle de simulation de l’onduleur à cinq niveaux

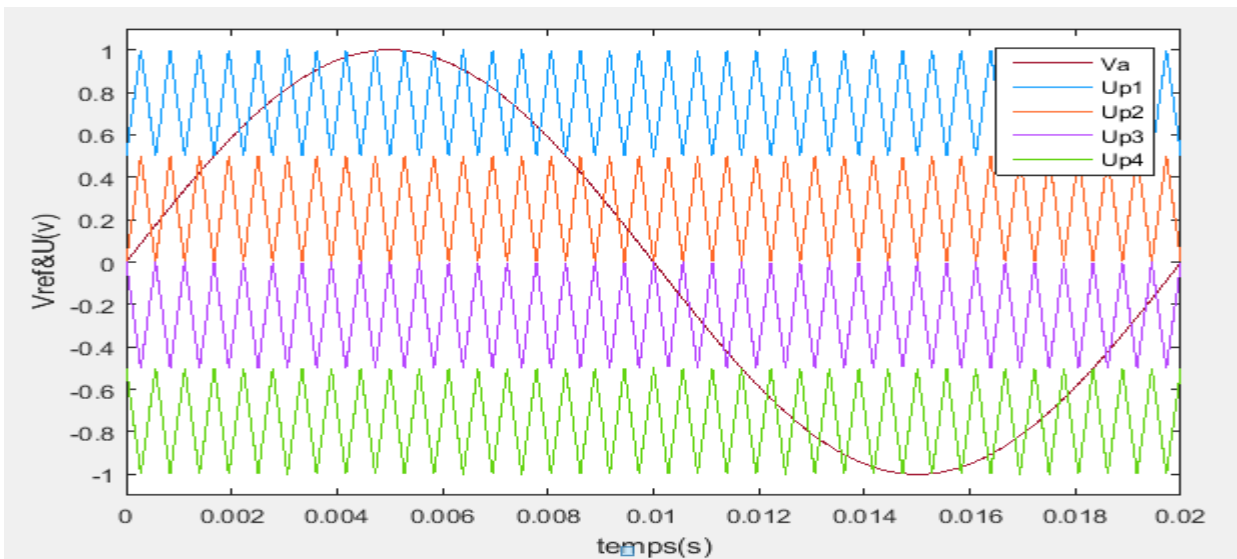


Figure II:40 Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoidale a quatre porteuses triangulaire

II.10.1 Résultats de simulation

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 1080$ Hz

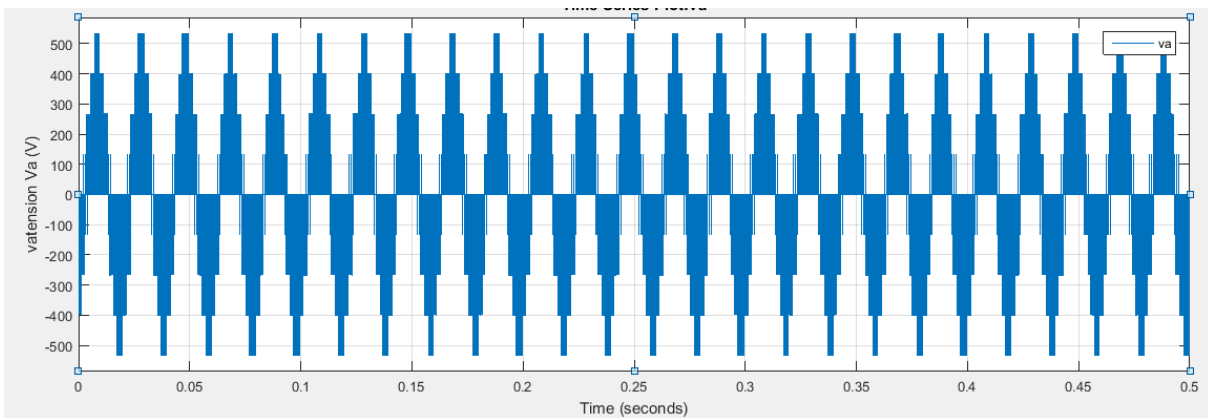


Figure II:41 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l'onduleur

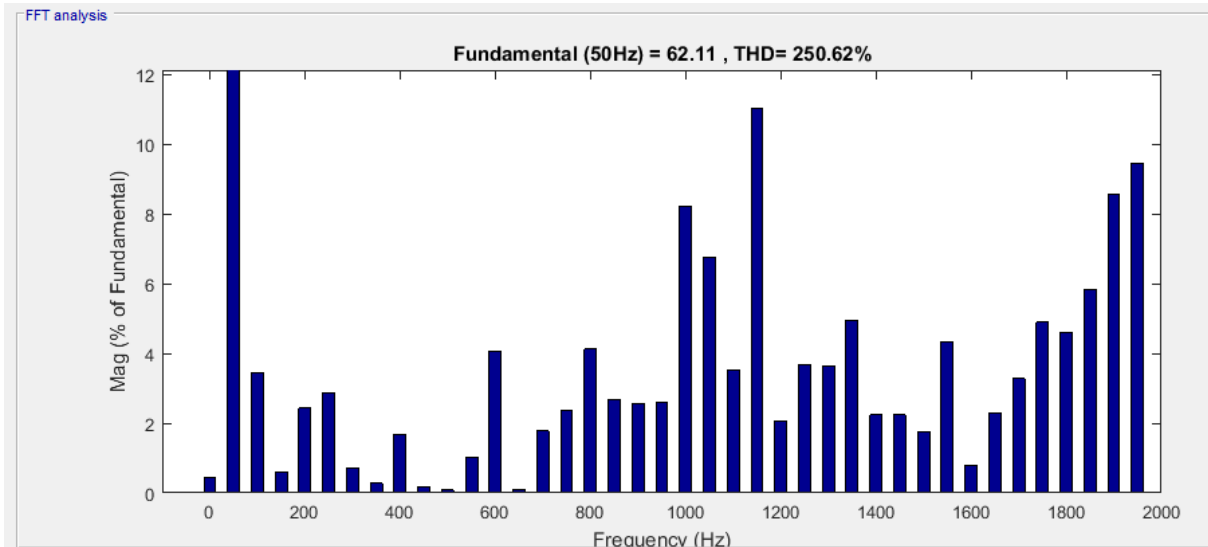


Figure II:42 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 3000$ Hz.

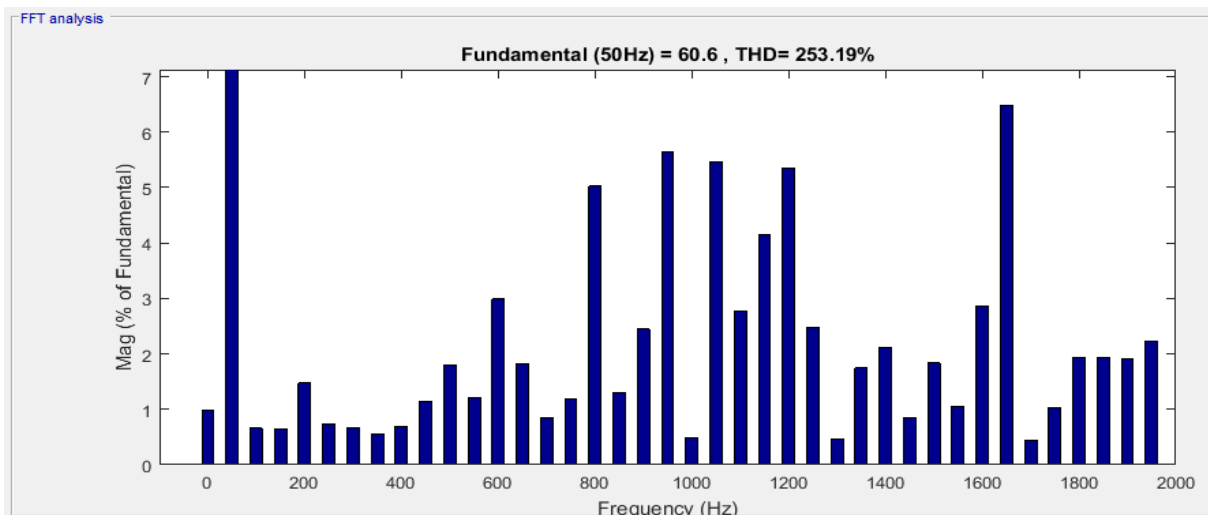


Figure II:43 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.25$ et $F_c = 9600$ Hz.

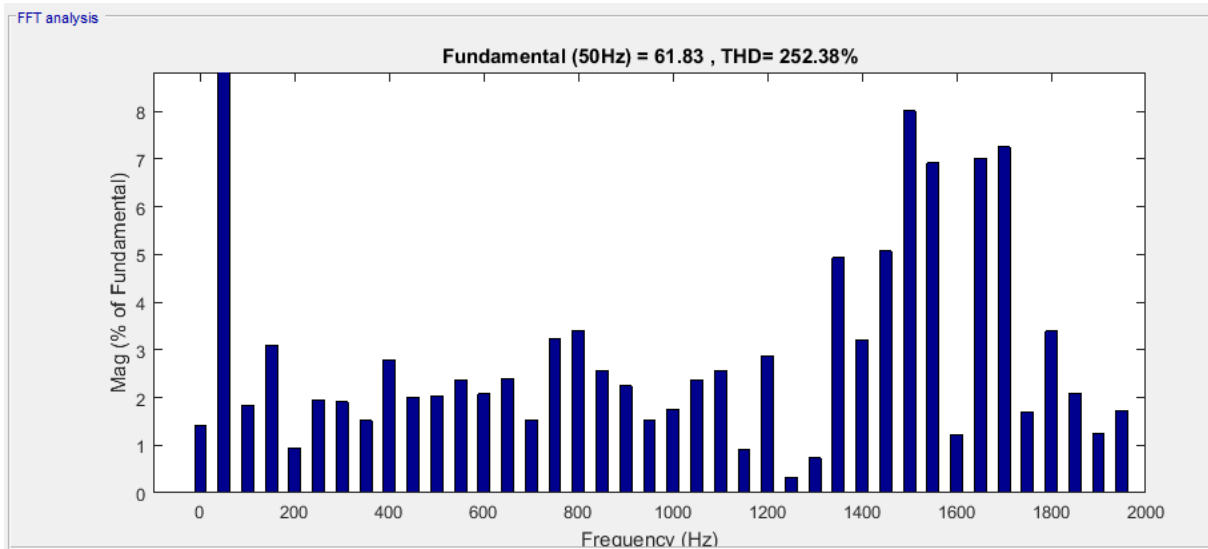


Figure II:44 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 1080$ Hz.

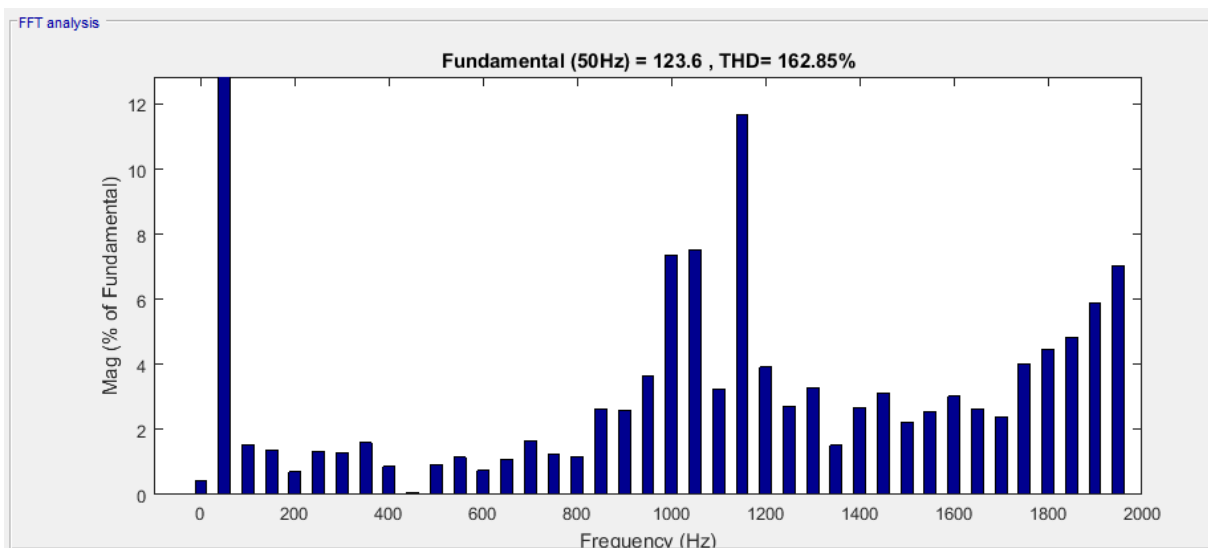


Figure II:45 le spectre d’harmonique de tension Voa

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 3000$ Hz.

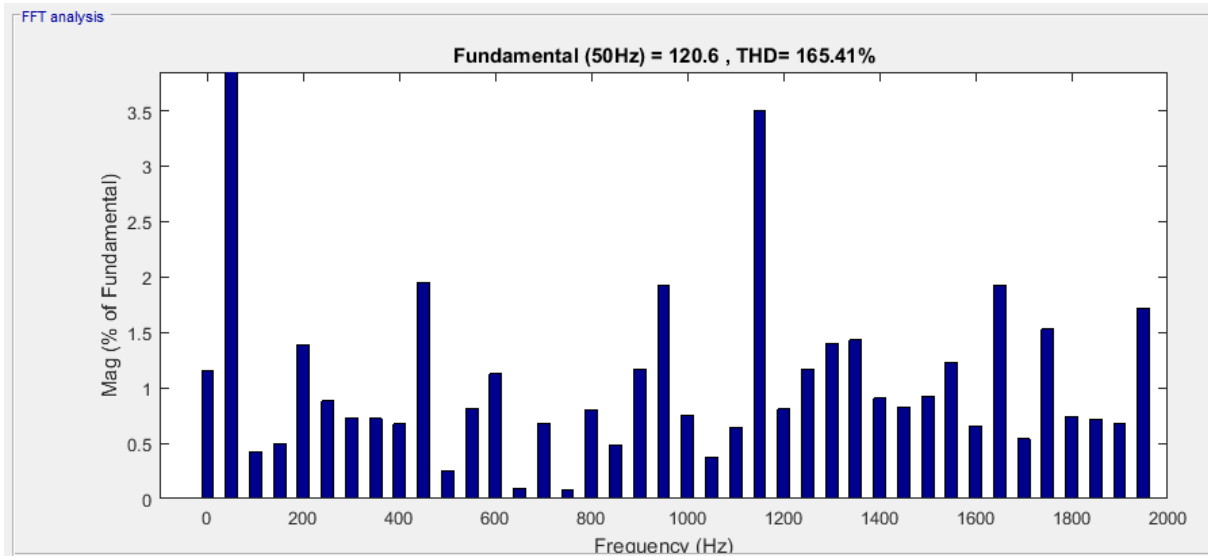


Figure II:46 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.50$ et $F_c = 9600$ Hz.

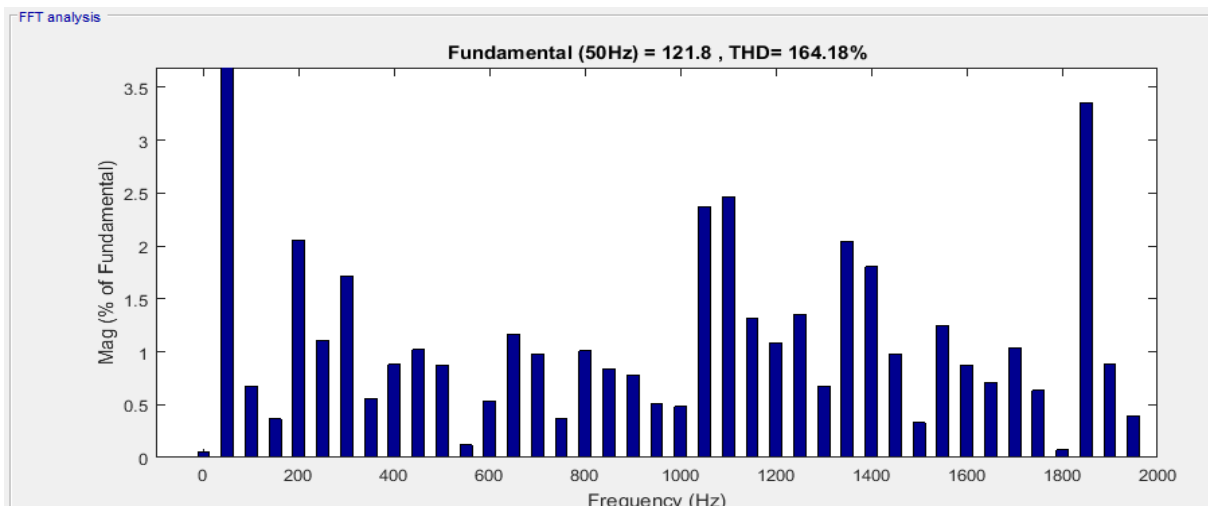


Figure II:47 Le spectre d’harmonique de tension VA

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 1080$ Hz

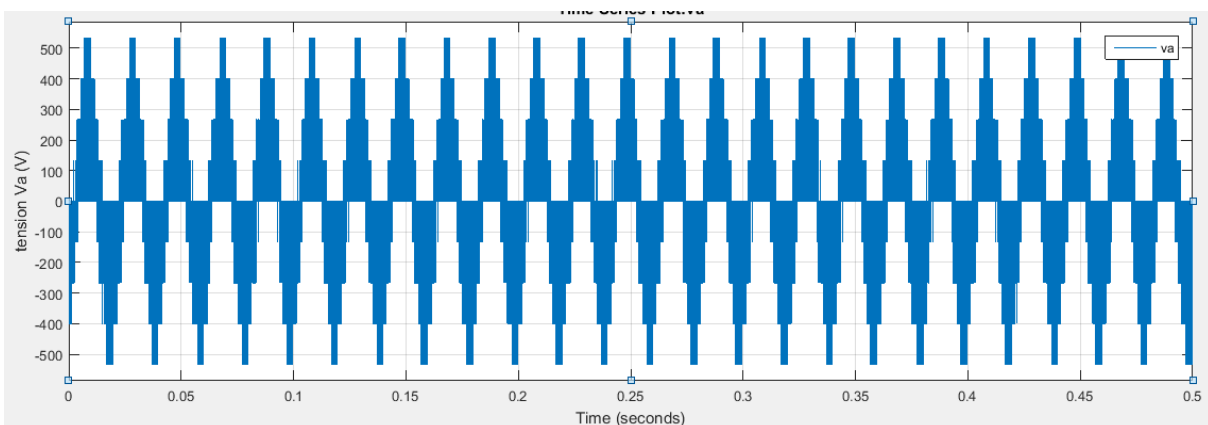


Figure II:48 La courbe de tension composée (VA) de sortie de l’onduleur

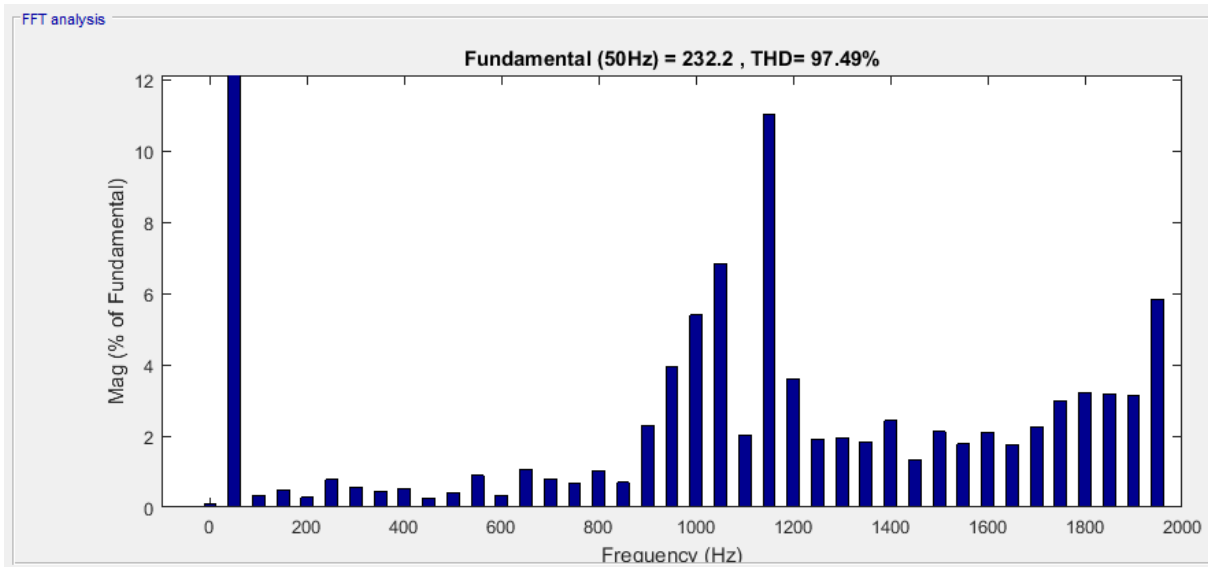


Figure II:49 Le spectre d’harmonique de tension Voa

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 3000$ Hz

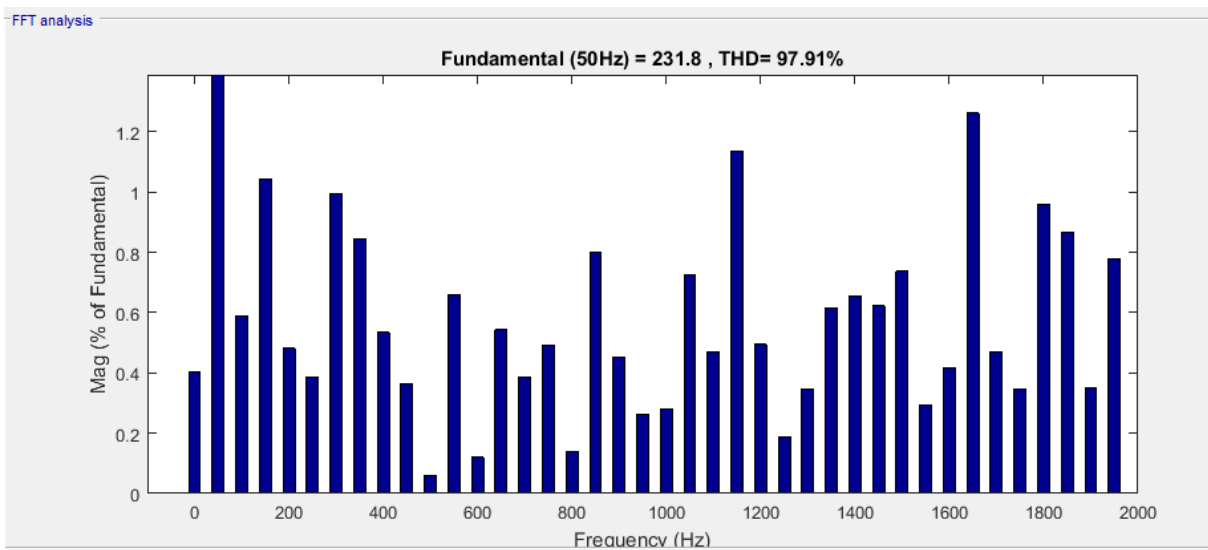


Figure II:50 Le spectre d’harmonique de tension Voa

Pour : $m = 0.95$ et $F_c = 9600$ Hz.

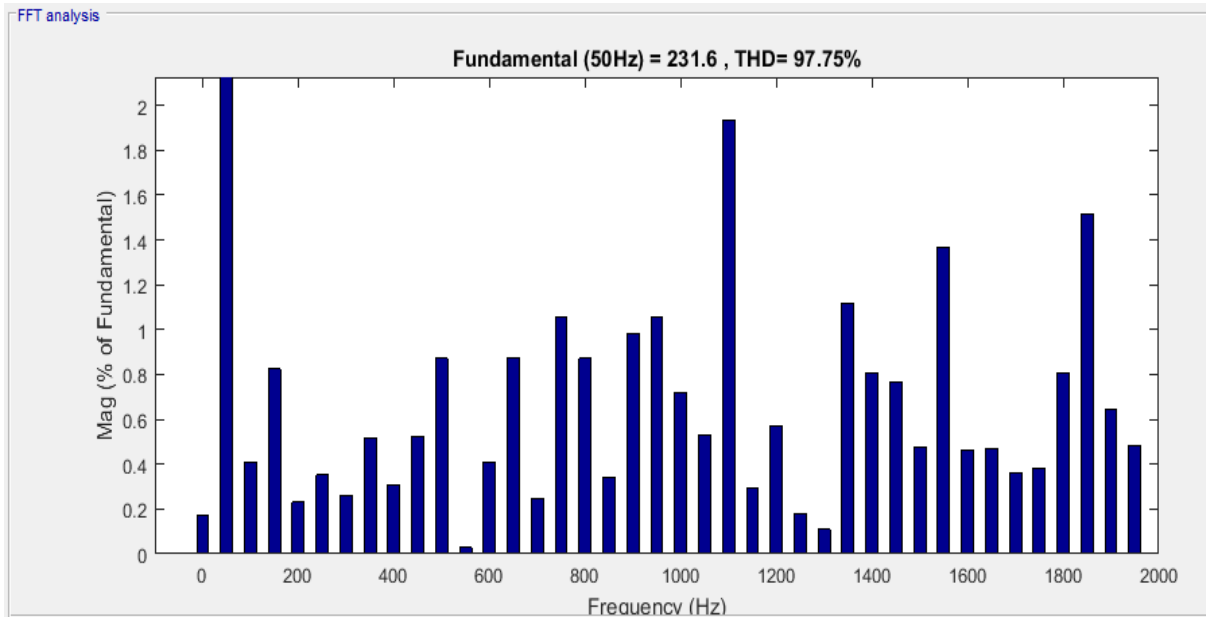


Figure II:51 Le spectre d'harmonique de tension Voa

II.11 Tableau de l'étude comparative entre deux onduleurs deux, trois et cinq niveaux

Pour le coefficient de modulation de 0.25

Fréquence de la porteuse (Hz)	Modèle d'onduleur	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	Le taux de distorsion d'harmoniques THD (%)
1080	Onduleur 2 niveaux	3.384	709.51
	Onduleur 3 niveaux	6.698	587.28
	Onduleur 5 niveaux	62.11	250.62
3000	Onduleur 2 niveaux	3.43	701.07
	Onduleur 3 niveaux	6.754	583.31
	Onduleur 5 niveaux	60.6	253.19
9600	Onduleur 2 niveaux	3.423	694.33
	Onduleur 3 niveaux	6.681	584.41
	Onduleur 5 niveaux	61.83	252.38

Tableau II:5 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.25$

Pour le coefficient de modulation de 0.5

Fréquence de la porteuse (Hz)	Modèle d'onduleur	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	Le taux de distorsion d'harmoniques THD (%)
1080	Onduleur 2 niveaux	6.808	458.08
	Onduleur 3 niveaux	13.45	363.68
	Onduleur 5 niveaux	123.6	162.85
3000	Onduleur 2 niveaux	6.627	464.77
	Onduleur 3 niveaux	13.33	365.25
	Onduleur 5 niveaux	120.6	165.41
9600	Onduleur 2 niveaux	6.669	462.37
	Onduleur 3 niveaux	13.46	362.00
	Onduleur 5 niveaux	121.8	164.18

Tableau II.6 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.5$

Pour le coefficient de modulation de 0.95

Fréquence de la porteuse (Hz)	Modèle d'onduleur	Valeur crête de la composante fondamentale de la tension (V)	Le taux de distorsion d'harmoniques THD (%)
1080	Onduleur 2 niveaux	12.68	275.3
	Onduleur 3 niveaux	25.39	179.52
	Onduleur 5 niveaux	232.2	97.49
3000	Onduleur 2 niveaux	12.78	270.45
	Onduleur 3 niveaux	25.61	187.51
	Onduleur 5 niveaux	231.8	97.91
9600	Onduleur 2 niveaux	12.66	272.6
	Onduleur 3 niveaux	25.55	178.39
	Onduleur 5 niveaux	231.6	97.75

Tableau II.7 Résultats de simulation des deux modèles d'onduleur pour $m = 0.95$

II.12 Conclusion

L'analyse des différentes topologies montrent que les onduleurs multiniveaux possèdent beaucoup d'avantages sur l'onduleur traditionnel à deux niveaux. En effet pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux les onduleurs NPC sont intéressants car les condensateurs sont partagés par les différentes branches ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases.

Avec les onduleurs à cinq niveaux nous avons des signaux de qualité avec moins de composants électriques et une facilité de commande ce qui est un bon compromis entre qualité et coût.

