



UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du

Diplôme de Master Académique en Génie Electrique

Spécialité : **Électrotechnique Industrielle**

THEME

Etude Comparative de La Commande d'un Onduleur Multi-niveaux de Type NPC Alimentant un Moteur Asynchrone

Présenté par :

BESSOLTANE Abdelkrim

BENTATA Med redouane

Soutenu le 28 /06/2018 devant le jury :

Président : Mr. MESKIN. S

Examineur : Mr. OMARI. H

Examineur : Mr. YOUNES. A

Encadreur : Mr. BENYAMINA. M

Promotion 2017/2018

Dédicace

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mes frères et sœurs et toute la famille : «BENTATA» sans exception.

A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu, et tous mes amis de la Promotion Génie électrique 2018.

Sans omettre mon binôme BESSOLTANE.A avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude.

En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.

B.Mohammed redouane

Dédicace

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mes frères et sœurs et toute la famille : «BESSOLTANE» sans exception.

A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu, et tous mes amis de la Promotion Génie électrique 2018.

Sans omettre mon binôme BENTATA.M avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude.

En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.

B.Abdelkrim

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant qui a bien voulu nous donner la force et le courage Pour effectuer Ce présent travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs Encouragements, leur soutien et pour les sacrifices Qu'ils ont enduré.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur "Mr. Benyamina " pour son sérieux, sa compétence et ses orientations.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département Génie Electrique qui ont contribué à notre formation.

Aussi nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et toute la promotion d'électrotechnique industrielle (2018) Qui par leur amitié et leur bonne humeur, ont créé une ambiance de travail parfaite.

SOMMAIRE

| | |
|--|---|
| Liste des symboles et abréviations | 1 |
| Introduction générale..... | 2 |

Chapitre I : étude des convertisseurs statiques et les convertisseurs multi-niveau

| | |
|---|----|
| 1.1 Introduction..... | 4 |
| 1.2 Les convertisseurs statiques | 4 |
| 1.3 Les convertisseurs multi-niveau..... | 6 |
| 1.4 Introduction aux onduleurs multiniveaux..... | 8 |
| 1.4.1 Onduleurs NPC (Neutral-Point-Clamped)..... | 8 |
| 1.4.2 Principes de base de la branche 3 niveaux..... | 8 |
| 1.4.3 Modes de fonctionnement de la branche 3 niveaux..... | 9 |
| 1.4.3.1 Génération des niveaux maximum et minimum..... | 9 |
| 1.4.3.2 Génération du niveau intermédiaire..... | 9 |
| 1.4.3.3 Existence d'un niveau indéfini..... | 10 |
| 1.4.4 Généralisation de la structure..... | 10 |
| 1.4.5 Les avantages des onduleurs multi-niveaux | 12 |
| 1.4.6 Les inconvénients des onduleurs multi-niveaux | 12 |
| 1.4.7 Le domaine d'utilisation des onduleurs multi-niveaux..... | 12 |
| 1.5 Conclusion..... | 12 |
| 1.6 Bibliographie | 13 |

Chapitre II : Topologies de base des convertisseurs multi niveaux

| | |
|--|----|
| 2.1 Introduction..... | 14 |
| 2.2 Onduleurs à cellules imbriquées (ou à Capacités Flottantes)..... | 14 |
| 2.2.1 Principes de base..... | 14 |
| 2.3 Onduleurs multiniveaux symétriques (Onduleur multiniveaux cascades.... | 16 |
| 2.3.1 Principes de base..... | 16 |
| 2.4 Onduleurs multiniveaux asymétriques (Onduleurs hybrides)..... | 17 |
| 2.5 Propriétés des principales structures..... | 19 |
| 2.5.1 Classification des topologies selon leur alimentation..... | 19 |
| 2.5.2 Nombres de composants nécessaires..... | 19 |
| 2.5.3 Classification des topologies selon leur répartition des niveaux..... | 21 |
| 2.5.4 Classification des topologies selon leurs domaines d'applications..... | 22 |
| 2.6 Conclusion..... | 23 |
| 2.7 Bibliographie du Chapitre II | 24 |

Chapitre III : Simulation de la commande d'un convertisseur multi niveaux de type NPC

| | | |
|---------|---|----|
| 3.1 | Introduction..... | 25 |
| 3.2 | Onduleur classique à deux niveaux de tension..... | 26 |
| 3.3 | Commande MLI-ST d'un onduleur usuel à deux niveaux..... | 28 |
| 3.4 | Onduleur NPC à trois niveaux de tension alimentant une charge RL..... | 31 |
| 3.4.1 | Problème de la tension du mode homopolaire ou le mode commun..... | 32 |
| 3.5 | Les différentes techniques de modulation..... | 32 |
| 3.5.1 | Commande en pleine Onde..... | 33 |
| 3.5.2 | Commande MLI Triangulo-sinusoïdale..... | 37 |
| 3.5.2.1 | Modulation sinusoïdale classique..... | 38 |
| 3.5.2.2 | Modulation sinusoïdale à triangles multiple | 42 |
| 3.5.2.3 | Modulation sinusoïdale modifiée..... | 47 |
| 3.6 | Interprétation des résultats des différentes commandes..... | 53 |
| 3.7 | Conclusion..... | 53 |
| 3.8 | Bibliographie du Chapitre III..... | 54 |

Chapitre IV : Modélisation et simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux-machine asynchrone

| | | |
|--------|---|----|
| 4.1 | Introduction..... | 55 |
| 4.2 | Généralités sur les machines asynchrones..... | 55 |
| 4.2.1 | Description et principe de fonctionnement..... | 55 |
| 4.2.2 | Hypothèse simplificatrices..... | 56 |
| 4.3 | Modèle triphasé de la machine asynchrone..... | 56 |
| 4.3.1 | Equations des tensions..... | 57 |
| 4.3.2 | Equations des flux..... | 58 |
| 4.3.3 | Equation d'état du modèle de la machine asynchrone..... | 59 |
| 4.3.4 | Expression du couple..... | 60 |
| 4.3.5 | Equation du mouvement..... | 60 |
| 4.4 | Simulation de la machine asynchrone connectée à un réseau triphasé équilibré.... | 60 |
| 4.4.a) | Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 0 \text{ Nm}$ | 62 |
| 4.4.b) | Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 80 \text{ Nm}$ | 63 |

| | |
|--|----|
| 4.4.c) Interprétation des résultats de simulation..... | 64 |
| 4.5 Simulation de la machine asynchrone à cage alimenté par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifié..... | 65 |
| 4.5.a) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifié : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$ | 66 |
| 4.5.b) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 80\text{Nm}$ | 69 |
| 4.5.c) Interprétation des résultats de simulation..... | 71 |
| 4.6 Conclusion..... | 72 |
| 4.7 Bibliographie du Chapitre IV | 72 |
| Conclusion générale..... | 73 |

Liste des symboles

| | |
|--------------------|--|
| Ac | Amplitude du signal triangulaire |
| As | Amplitude du signal de la référence |
| D_{1H}, D_{1B} | Diodes supplémentaires niveaux (haut et bas). |
| fc | Fréquence de la porteuse. |
| fs | Fréquence du réseau ou Fréquence de le référence. |
| IM | Indice de Modulation en amplitude |
| Iabc | Courants des trois phases |
| $K_{1,2,3}$ | Les signaux MLI intermédiaires. |
| $K^*_{1,2,3}$ | Les états de la phase résultante. |
| m | Le facteur de modulation. |
| ma | Le taux de modulation |
| mf | Rapport de fréquence |
| S_{jH}, S_{jB} | Interrupteurs de type transistor niveaux (haut et bas). |
| THD | Distorsion d'harmonique tota |
| Ue | Tension continue d'alimentation du convertisseur multiniveaux. |
| Us | Tension de sortie du convertisseur multiniveaux. |
| $V_{H,1}, V_{B,1}$ | Tensions niveaux (haut et bas) du convertisseur multiniveaux. |
| V_{ab} | Tension composé. |
| Vim | Tension simple entre les points ABC et M. |
| Vmc | La composante homopolaire de la tension. |
| V_{OM} | Tension entre les points O et M. |
| α | Angle de déphasage entre les tensions du réseau et ceux de l'onduleur. |
| β | Angle de déphasage |

Liste des abréviations

| | |
|------|---|
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistors. |
| IGCT | Insulated Gate Commutated Thyristors. |
| MLI | Modulation de la Largeur d'Impulsion ou (PWM) |
| NPC | Neutral-Point-Clamped. |
| PWM | Pulse Width Modulation. |
| THD | Distorsion Harmonique Totale |

Introduction générale

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable.

Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones. Un onduleur de tension est un convertisseur statique alimenté soit par une source continue soit par un réseau redressé soit par une batterie d'accumulateur pour fournir une tension ou courant alternatifs de fréquence fixe (le cas des alimentations sans interruption) ou variable (le cas des moteurs à courant alternatifs).

L'inconvénient majeur des onduleurs est l'obtention d'une tension non sinusoïdale à sa sortie, ce qui provoque une dégradation du régime de fonctionnement de certaines charges surtout les machines électriques à fréquences variables.

Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances.

Dans le cadre de la recherche des méthodes de réduction des harmoniques, plusieurs travaux ont été réalisés sur deux axes. Le premier est l'utilisation des topologies multiniveaux des onduleurs, alors que le second porte sur la commande de l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs formant l'onduleur (Modulation de largeur d'impulsion).

Dans les applications de fortes puissances, la structure à multiniveaux est plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmoniques nettement inférieur.

L'utilisation des techniques de modulation comme stratégie de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs réduit considérablement les harmoniques. La modulation hystérésis est souvent utilisable et très simple mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

La modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoiadale modifiée semble la meilleure technique de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs mais elle

nécessite la connaissance des temps de commutation à chaque instant de modulation, en plus la commande des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur doit se faire d'une manière séparée.

Pour aboutir à cette fin nous utilisons une simulation de commande de l'onduleur basé sur cette technique de modulation. Le fonctionnement de cette simulation sera testé sur un moteur asynchrone.

Il sera question aussi de déterminer le taux d'harmonique (THD) afin de prouver l'efficacité de cette simulation et par conséquent l'efficacité de la technique MLI modifiée appliquée aux onduleurs multiniveaux de tension.

Ainsi, dans le cadre de cette étude nous avons choisi de travailler avec le logiciel Powersim. Le travail présenté est organisé comme suit :

- Le premier chapitre, traitera l'étude des convertisseurs statiques et les convertisseurs multi-niveau : leurs structures, leurs avantages et leurs inconvénients.
- Le deuxième chapitre, traitera les différentes topologies de base des convertisseurs multi niveaux.
- Dans le troisième chapitre, on présente la simulation de la commande d'un convertisseur multi niveaux de type NPC alimentant une charge de type RL.
- Dans le dernier chapitre, nous allons alimenter une machine asynchrone par un convertisseur trois niveaux, puis l'application de la commande MLI modifiée sous Powersim. Les résultats obtenus seront interprétés et discutés.

Table des matières

Chapitre I : étude des convertisseurs statiques et les convertisseurs multi-niveau

| | | |
|---------|---|----|
| 1.1 | Introduction..... | 4 |
| 1.2 | Les convertisseurs statiques | 4 |
| 1.3 | Les convertisseurs multi-niveau..... | 6 |
| 1.4 | Introduction aux onduleurs multiniveaux..... | 8 |
| 1.4.1 | Onduleurs NPC (Neutral-Point-Clamped)..... | 8 |
| 1.4.2 | Principes de base de la branche 3 niveaux..... | 8 |
| 1.4.3 | Modes de fonctionnement de la branche 3 niveaux..... | 9 |
| 1.4.3.1 | Génération des niveaux maximum et minimum..... | 9 |
| 1.4.3.2 | Génération du niveau intermédiaire..... | 9 |
| 1.4.3.3 | Existence d'un niveau indéfini..... | 10 |
| 1.4.4 | Généralisation de la structure..... | 10 |
| 1.4.5 | Les avantages des onduleurs multi-niveaux | 12 |
| 1.4.6 | Les inconvénients des onduleurs multi-niveaux | 12 |
| 1.4.7 | Le domaine d'utilisation des onduleurs multi-niveaux..... | 12 |
| 1.5 | Conclusion..... | 12 |
| 1.6 | Bibliographie | 13 |

1.1 Introduction :

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement à deux raisons :

- La première est l'étendue du domaine de leurs application : systèmes d'entraînements à vitesse variable, utilisé d'interconnexions, alimentation de sécurité etc.
- La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouveaux composants permettant l'implantation de nouvelles stratégies de commande plus performantes (modulation de largeur d'impulsion)

Malgré leur nombreux avantages, les onduleurs conventionnels présentent certain inconvénient tels que :

- L'usage limité aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement
- Le problème d'harmoniques

Pour surmonter ces problèmes, un nouveau type d'onduleur a été introduit, en l'occurrence, l'onduleur multi-niveau. 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.
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grande puissance
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances

1.2 Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance.

On distingue les différents convertisseurs suivants:

❖ Les redresseurs:

C'est un convertisseur alternatif-continu. La tension de sortie est non alternative (à valeur moyenne non nulle). Cette valeur moyenne peut être réglée dans le cas d'un redresseur commandé. Ils sont utilisés principalement pour alimenter des charges fonctionnant avec une tension continue ou pour recharger des batteries (en effet, un redresseur est toujours intégré dans les chargeurs de vos PC ou vos téléphones portables).

❖ Les onduleurs:

L'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, utilisé principalement pour alimenter les charges fonctionnant avec une tension alternative lorsqu'on dispose d'une source continue (batteries par exemple) ou pour injecter l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dans le réseau. On distingue 2 types:

- Un onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas toujours besoin de réseau électrique pour fonctionner ; par exemple un convertisseur de voyage que l'on branche sur la prise allume-cigare d'une voiture utilise le 12 V continu du véhicule pour générer du 120 ou 230 V, alternatif en 50 ou 60 Hz
- Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques).

❖ Les hacheurs:

Ce sont des convertisseurs continu-continu, permettant la variation d'une tension continue pour l'adapter à la care ou pour varier la vitesse d'un moteur à courant continu ou pour régler le degré de luminosité d'une lampe. Le découpage se fait à une fréquence élevée. C'est l'analogue, pour les sources de tensions continues, du gradateur utilisé en régime alternatif.

Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck)

❖ Les gradateurs:

C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en variant leur tension d'alimentation.

❖ Les cyloconvertisseurs:

C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de fréquence et valeur efficace différentes de celles de la tension d'entrée. Les cyloconvertisseurs sont utilisés pour la varier la vitesse des moteurs alternatifs en variant la fréquence ou la valeur efficace de la tension d'alimentation.

1.3 Les convertisseurs multi-niveau :

En générale les convertisseurs de tension multi niveau peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisé d plusieurs niveaux de tension discrets.

Les principaux avantages de cette approche sont récapitulés comme suit :

- La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complications au niveau des tensions statique et dynamique (connues dans les interrupteurs connectés en série)
- Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un convertisseur multi niveau sont supérieures à celles d'un convertisseur à deux niveaux
- Les formes d'onde des grandeurs de sorties d'un convertisseur multi niveaux limitent naturellement les problèmes des surtensions dues aux réflexions sur les cables, qui peuvent endommager les enroulements du moteur et causer d'autres problèmes.
- Puisque le choix de la meilleure topologie de convertisseur multi niveau et de la meilleure stratégie de commande, pour chaque application donnée, n'est souvent clair, ces derniers font sans cesse l'objet de nombreuse publications. La figure ci-dessous représente les topologies des convertisseurs multi niveau les plus récentes

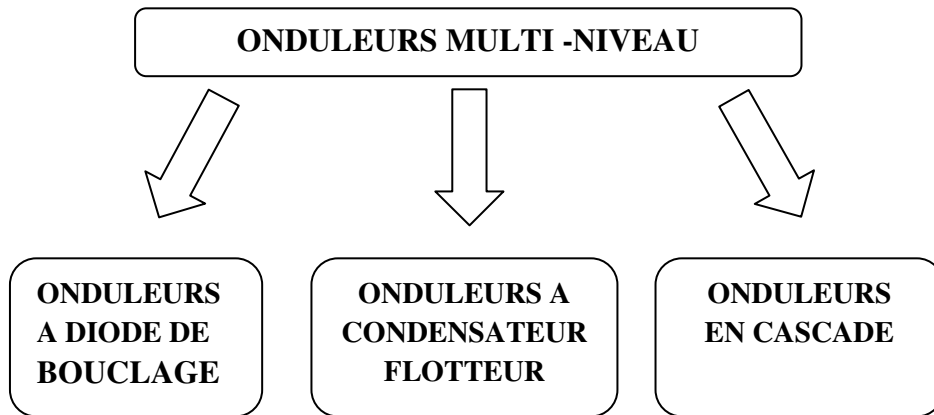


Figure 1.1 : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux

De la même façon, les stratégies de modulation et leurs diverses techniques peuvent être divisées comme il est indiqué par la figure ci-dessous :

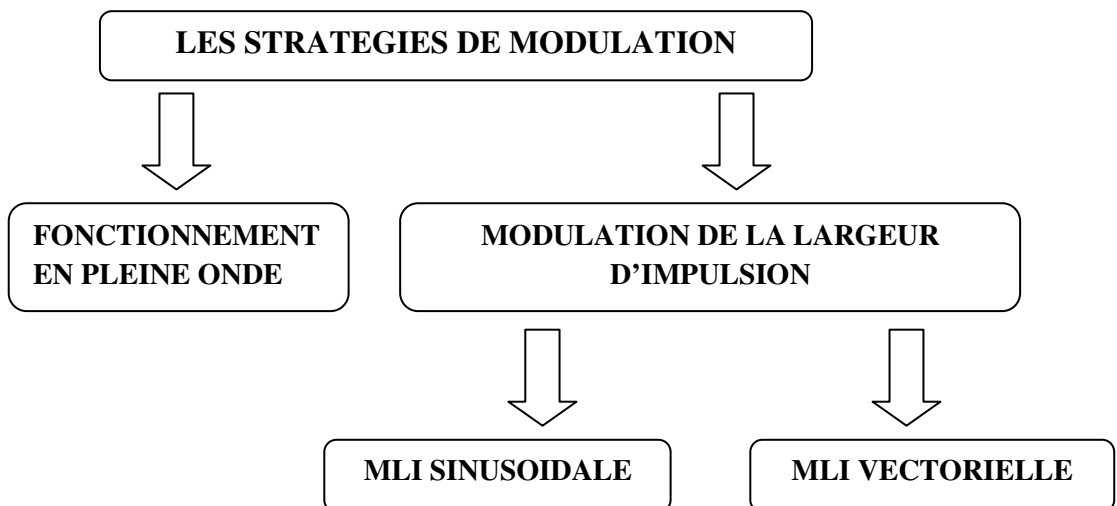


Figure 1.2 : Les différentes techniques de modulation des onduleurs multi niveau

1.4 Introduction aux onduleurs multiniveaux :

Dans cette partie, nous allons expliquer les principales topologies des onduleurs multiniveaux qui peuvent être regroupé en quatre, à savoir :

- Onduleurs NPC (Neutral-Point-Clamped).
- Onduleurs à cellules imbriquées (Capacité Flottante).
- Onduleurs symétriques (Cascade).
- Onduleurs asymétriques (hybride) ou (Pont simple)

1.4.1 Onduleurs NPC (Neutral-Point-Clamped)

Cette structure d'ondeur multiniveaux a été introduite par A. Nabae et H.Akagi en 1981 [1]. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'ondeur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

1.4.2 Principes de base de la branche 3 niveaux

Dans sa version la plus simple, chaque branche de cet ondeur comporte 4 interrupteurs contrôlables et 6 diodes, comme représenté à la figure (1.3). Ce montage est alimenté par une tension continue U_e entre les bornes V_0 et V_2 . Les 3 états de commutation possibles permettent de délivrer 3 niveaux distincts et positifs entre les bornes V_S et V_0 . Chaque branche comporte 2 étages constitués chacun de 2 interrupteurs de type transistor S_{jH} et S_{jB} avec des diodes antiparallèles. Deux diodes supplémentaires D_{1H} et D_{1B} permettent de relier les étages intermédiaires $V_{H,1}$ et $V_{B,1}$ au point milieu V_1 .

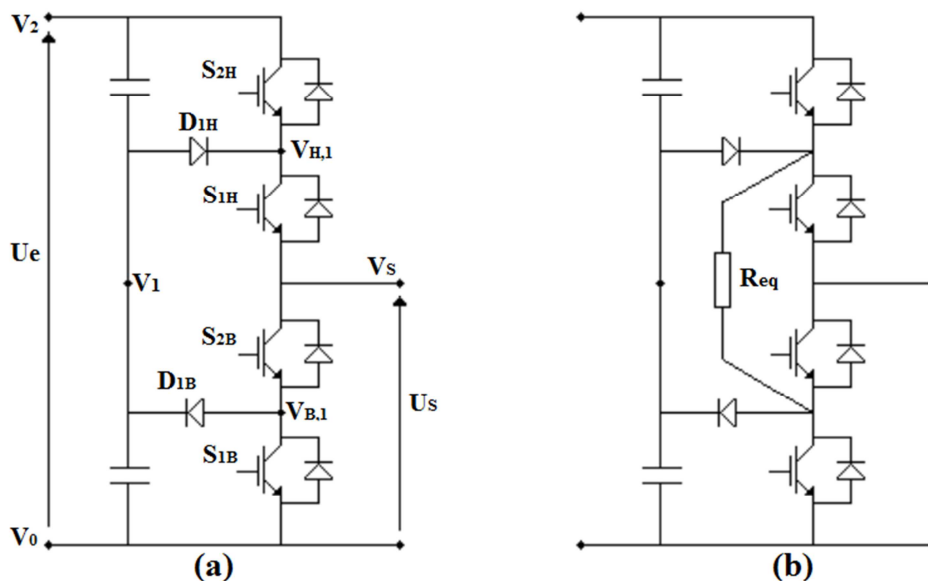
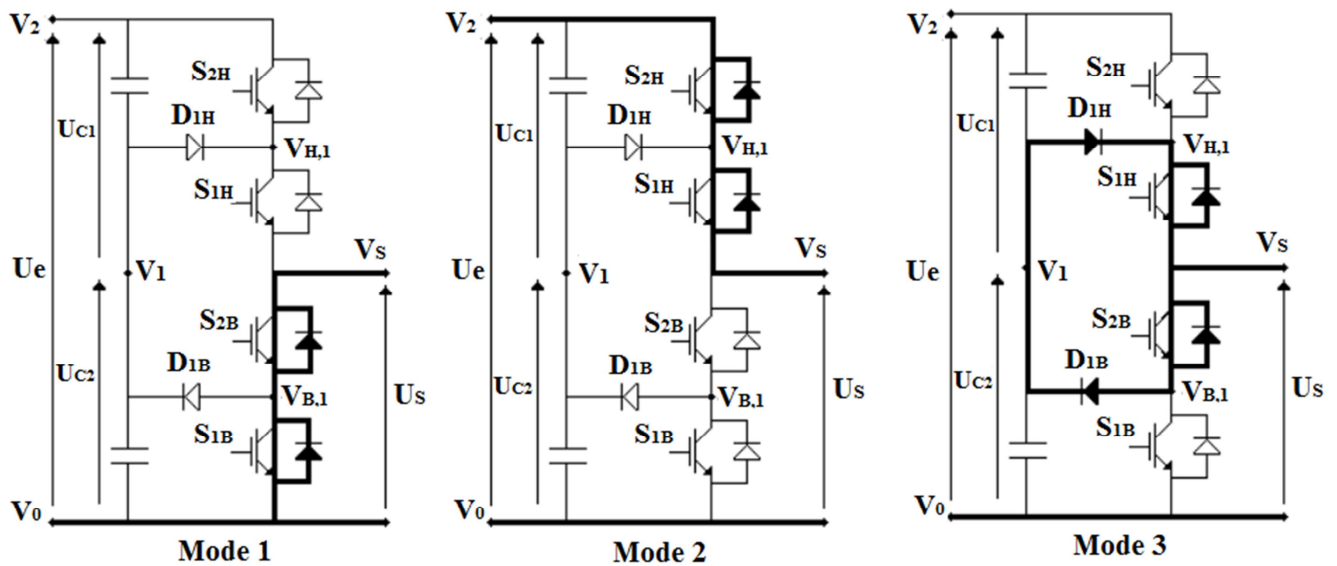


Figure 1.3 : Schéma d'une branche d'ondeur NPC à 3 niveaux (a) sans résistance d'équilibrage (b) avec résistance d'équilibrage

1.4.3 Modes de fonctionnement de la branche 3 niveaux

1.4.3.1 Génération des niveaux maximum et minimum

Lorsque les 2 étages sont commandés simultanément de la même manière, les diodes D_{1H} et D_{1B} ne conduisent pas et ce montage fonctionne alors comme une branche de pont à 2 transistors générant les niveaux 0 et U_e entre V_S et V_0 , figure (1.4) Mode 1 et 2.



$$\begin{cases} S_{1B} = 1, S_{1H} = 0 \\ S_{2B} = 1, S_{2H} = 0 \end{cases} \Rightarrow V_s = 0 \quad \begin{cases} S_{1H} = 1, S_{1B} = 0 \\ S_{2H} = 1, S_{2B} = 0 \end{cases} \Rightarrow V_s = U_e \quad \begin{cases} S_{1H} = 1, S_{2H} = 0 \\ S_{2B} = 1, S_{1B} = 0 \end{cases} \Rightarrow V_s = \frac{U_e}{2}$$

Figure 1.4 : Les modes de fonctionnement d'un onduleur 3 niveaux

1.4.3.2 Génération du niveau intermédiaire :

Lorsque S_{1H} et S_{2B} sont conducteur, et qu'en conséquence S_{1B} et S_{2H} sont bloqués, la diode D_{1H} lie le point milieu V_1 aux nœuds $V_{H,1}$ et V_S pour les courants sortants. La diode D_{1B} relie le point milieu V_1 aux nœuds $V_{B,1}$ et V_S pour les courants rentrants. Cela revient à relier le point milieu V_1 avec la sortie V_S , indépendamment du signe du courant et cela permet de générer un niveau intermédiaire $V_1 = \frac{U_e}{2}$ entre V_2 et V_0 , figure (1.4) Mode 3.

1.4.3.3 Existence d'un niveau indéfini :

La commande complémentaire de l'état intermédiaire conduit à lier la sortie V_s au niveau V_2 pour un courant rentrant et au niveau V_0 pour un courant sortant. Cet état est donc indéfini et par conséquent interdit dans le fonctionnement normal de l'onduleur. Les 3 états de commutation possibles sont résumés au tableau (1.1).

| S_{2H} | S_{1H} | S_{2B} | S_{1B} | U |
|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | U_e |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | $U_e/2$ |
| 1 | 0 | 0 | 1 | indéfini |

Tableau 1.1 : Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux

1.4.4 Généralisation de la structure

Une extension de la structure de l'onduleur NPC afin d'augmenter la tension et le nombre de niveaux a été proposé dans [2]. La figure (1.5) montre un schéma possible des branches de l'onduleur NPC constitué de m étages. Les condensateurs C_1 à C_m permettent de diviser la tension d'entrée. Les interrupteurs $S_{1,B}$ à $S_{m,B}$ font circuler les courants sortant conjointement avec les diodes D_{1B} à D_{m-1B} , alors que les interrupteurs S_{1H} à S_{mH} font circuler les courants entrant avec les diodes D_{1H} à D_{m-1H} . L'ensemble forme une cellule de commutation. L'application des règles de généralisation de la structure conduit à $m+1$ états possibles pour la commande. Ils permettent de générer $m+1$ niveaux distincts comme résumé dans le tableau (1.2) tous les autres états sont indéfinis et interdits.

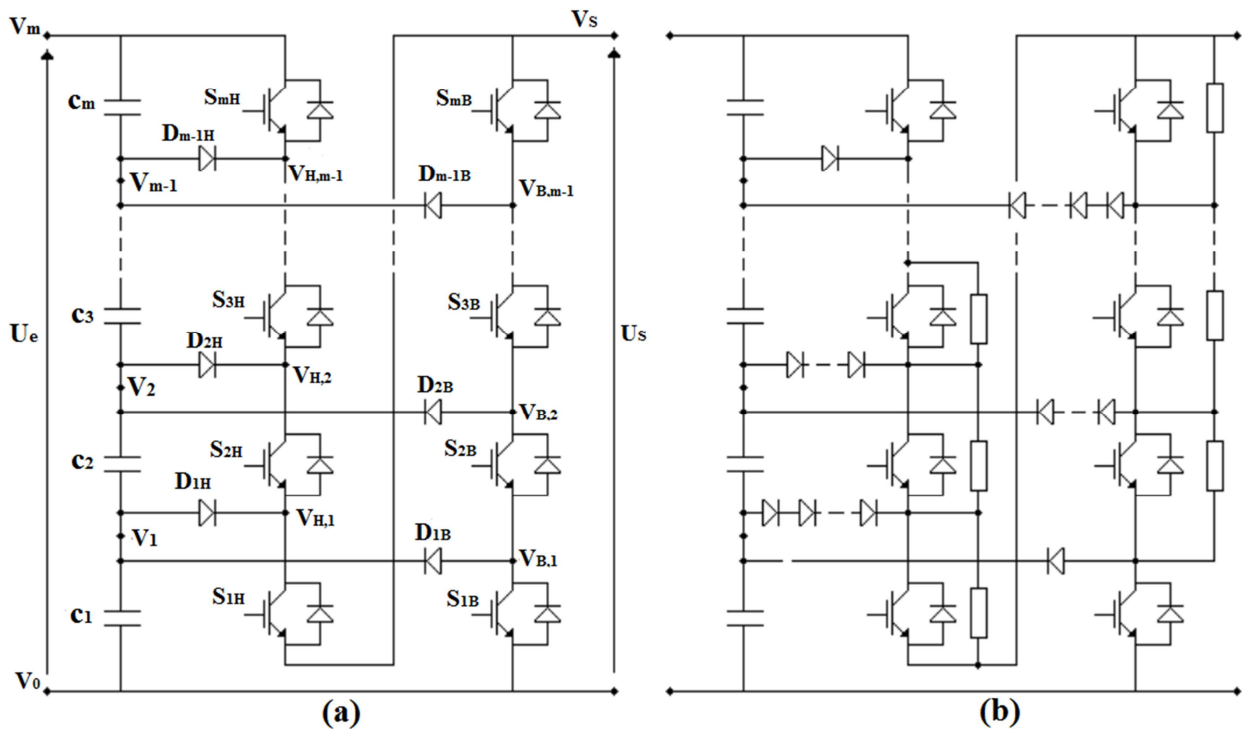


Figure 1.5 : Schéma d'une branche d'onduleur NPC à m étages (a) schéma fonctionnel, (b) schéma avec les résistances d'équilibrage statique des transistors et avec des diodes bloquant la même tension.

| S_{mH} | S_{m-1H} | --- | S_{3H} | S_{2H} | S_{1H} | U_s |
|----------|------------|-----|----------|----------|----------|------------------------------------|
| 0 | 0 | --- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | --- | 0 | 0 | 1 | ΔU |
| 0 | 0 | --- | --- | 1 | 1 | $2 \Delta U$ |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 1 | --- | 1 | 1 | 1 | $m \Delta U$ |
| 1 | 1 | --- | 1 | 1 | 1 | $(m+1) \Delta U$ |

Tableau 1.2 : Etats possibles de l'onduleur NPC à m étages avec $\Delta U = U_e/m$

Nombre de composants nécessaires

De l'étude des contraintes, nous déduisons que le nombre de diodes croît avec le carré du nombre d'étages. Pour générer $m+1$ niveaux, m étages sont nécessaires, il faut m sources de tension en série, $2 \times m$ transistors et $m^2 + m$ diodes. $2 \times m$ diodes sont généralement intégrées aux transistors, ce qui réduit à $m^2 - m$ le nombre de diodes additionnelles.

1.4.5 Les avantages des onduleurs multi-niveaux :

- ✓ L'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur fait diminuer forcément la distorsion harmonique totale.
- ✓ L'augmentation de tension de sortie permet d'augmenter la puissance de convertisseurs sans augmenter le courant.
- ✓ L'augmentation de la fréquence apparente ce qui donne une dynamique du système plus élevée.
- ✓ A conséquence de l'augmentation des niveaux, les éléments filtrages sont plus réduits et moins coûteux.

1.4.6 Les inconvénients des onduleurs multi-niveaux:

- L'augmentation des niveaux de tension grandit la structure de contrôle et devient plus complexe.
- Les problèmes de déséquilibre de tension des condensateurs.
- La réalisation des multi-niveaux nécessite de grands nombres de composants et ça coûte.

1.4.7 Le domaine d'utilisation des onduleurs multi-niveaux:

La plupart des applications des onduleurs triphasés autonome de tension se résume aux : commande des moteurs alternatifs, filtre actif, système d'alimentation sans interruption (ASI)...etc.

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons détaillé plusieurs points sur les onduleurs soit les catégories (autonome ou non autonome). Une revue des différentes structures de base d'onduleurs de tension multi-niveaux a été présentée, nous avons étudié leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que leurs domaines d'utilisation. Nous avons constaté que les nouvelles topologies dites multi-niveaux améliorent considérablement la forme d'onde et le spectre d'harmoniques des tensions de sortie avec des fréquences de commutation assez faibles, ils permettent aussi de véhiculer des puissances élevées sans que les composants qui les constituent ne subissent des contraintes considérables lors de leur commande à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture. Enfin sur les commandes associées. Le suivant chapitre sera réservé pour une étude détaillée sur les topologies de base des convertisseurs multi-niveaux.

1.6 Bibliographie du Chapitre 1

- [1] F.Z. Peng. "A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing". IEEE Transactions on Industry Applications, 37(2), pp 611–618, March-April 2001.
- [2] T. Meynard and H. Foch. "Multi-level choppers for high voltage applications". Applications, EPE Journal, 2(1), pp 45–50, 1992.

Table des matières

Chapitre II : Topologies de base des convertisseurs multi niveaux

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Introduction..... | 14 |
| 2.2 | Onduleurs à cellules imbriquées (ou à Capacités Flottantes)..... | 14 |
| 2.2.1 | Principes de base..... | 14 |
| 2.3 | Onduleurs multiniveaux symétriques (Onduleur multiniveaux cascades)..... | 16 |
| 2.3.1 | Principes de base..... | 16 |
| 2.4 | Onduleurs multiniveaux asymétriques (Onduleurs hybrides)..... | 17 |
| 2.5 | Propriétés des principales structures..... | 19 |
| 2.5.1 | Classification des topologies selon leur alimentation..... | 19 |
| 2.5.2 | Nombres de composants nécessaires..... | 19 |
| 2.5.3 | Classification des topologies selon leur répartition des niveaux..... | 21 |
| 2.5.4 | Classification des topologies selon leurs domaines d'applications..... | 22 |
| 2.6 | Conclusion..... | 23 |
| 2.7 | Bibliographie du Chapitre II | 24 |

2.1 Introduction

Par définition, l'onduleur de tension multi niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi niveaux : la topologie a diode de bouclage, la topologie au condensateur flotteur et la topologie en cascade. Bien que cette partie ne soit en aucun cas une vue complète sur les topologies des onduleurs multi niveaux mais elle couvre celle qui polarisent l'attention des chercheurs.

2.2 Onduleurs à cellules imbriquées (ou à Capacités Flottantes / flying capacitors multilevel)

Cette structure a été introduite en 1992 par T. Meynard et H. Foch . Elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multilevel inverter » dans la littérature anglo-saxonne.

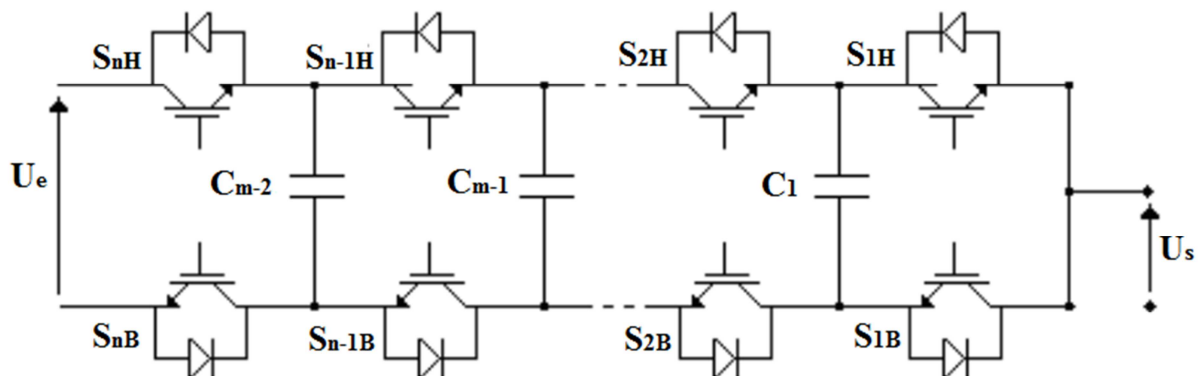


Figure 2.1 : Schéma d'une branche d'onduleur multiniveaux à cellules imbriquées (capacité flottante).

2.2.1 Principes de base

La figure (2.1) illustre le schéma de principe en échelle d'une branche d'onduleur à m cellules imbriquées. Chaque paire d'interrupteurs situés sur la même verticale forme une cellule de commutation dont les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire. Toutes les combinaisons de signaux de commande respectant cette complémentarité sont autorisées. Cet onduleur a donc 2^m états possibles pour la commande.

Dans son fonctionnement habituel, lorsque les tensions aux bornes des condensateurs sont équilibrées, la tension aux bornes du condensateur C_k vaut :

$$U_{c, k} = \frac{k}{m} U_e \quad (2.1)$$

Cela implique que chaque interrupteur doit bloquer une fraction de la tension égale au pas de l'onduleur :

$$U_{\text{blocage}} = U_{c,k} - U_{c,k-1} = \frac{U_e}{m} = \Delta U \quad (2.2)$$

En prenant des composants identiques, le nombre de condensateurs supportant une tension nominale égale au pas, croît avec le carré du nombre de cellules :

$$N_c = \frac{m^2 - m}{2} \quad (2.3)$$

Contrairement à l'onduleur NPC, cette structure assure naturellement la répartition statique de la tension bloquée aux bornes des interrupteurs. En revanche, si les condensateurs (haute tension) sont réalisés par mise en série de condensateurs identiques, ils auront besoin d'être équilibrés.

Niveaux générés

Cet onduleur est capable de générer $m+1$ niveaux distincts. Il possède par conséquent $2^m - m - 1$ états de commutation conduisant à des niveaux redondants. Pour simplifier les explications, nous dirons qu'une cellule de commutation est dans l'état bas lorsque l'interrupteur du bas est passant, et qu'elle est dans l'état haut dans le cas contraire. Quelques exemples d'états et des niveaux associés sont représentés au tableau (2.1).

| S_{mH} | S_{m-1H} | --- | S_{3H} | S_{2H} | S_{1H} | U_s |
|----------|------------|-----|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| 0 | 0 | --- | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | --- | 0 | 0 | 1 | ΔU |
| 0 | 0 | --- | --- | 1 | 0 | ΔU |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 0 | --- | 1 | 1 | 1 | $3\Delta U$ |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 1 | --- | 1 | 1 | 0 | $(m-1)\Delta U$ |
| 1 | 1 | --- | 1 | 1 | 1 | $m\Delta U$ |

Tableau (2.1) : Etats possibles de l'onduleur à cellules imbriquées à m cellules avec $\Delta U = U_e/m$

2.3 Onduleurs multiniveaux symétriques (Onduleur multiniveaux cascades / Cascade multilevel inverter).

La dénomination complète de cette topologie, introduite par Marchesoni et en 1988 [1], devrait être onduleur multiniveaux symétriques à cellules en série.

Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation «onduleurs multiniveaux cascades» ou «cascade multilevel inverter» dans la littérature anglosaxonne. Cette dénomination est imprécise, elle provient du fait que la structure n'a tout d'abord été employée qu'avec des cellules symétriques, de sorte que la précision était superflue. Cependant pour être précis, il faudrait maintenant parler d'onduleur multiniveaux cascades symétriques, l'omission de l'adjectif symétrique sous-entendant qu'il peut s'agir aussi bien d'une configuration symétrique que d'une configuration asymétrique.

2.3.1 Principes de base

Le principe assez naturel consiste à connecter en série des ponts en H, comme illustré à la figure (2.2) En ne prenant en considération que les 3 niveaux distincts générés par chacune de ses cellules, un convertisseur composé de m ponts en H connectés en série dispose de 3^m états de commutation distincts. Dans la plupart des cas, les cellules sont équivalentes et il y a autant de manières de générer un niveau, qu'il y a de permutations possibles des cellules, et de combinaisons distinctes de niveaux d'onduleur conduisant à cette valeur. A titre d'exemple, un convertisseur composé de 4 cellules possède deux combinaisons de niveaux conduisant à 2 :

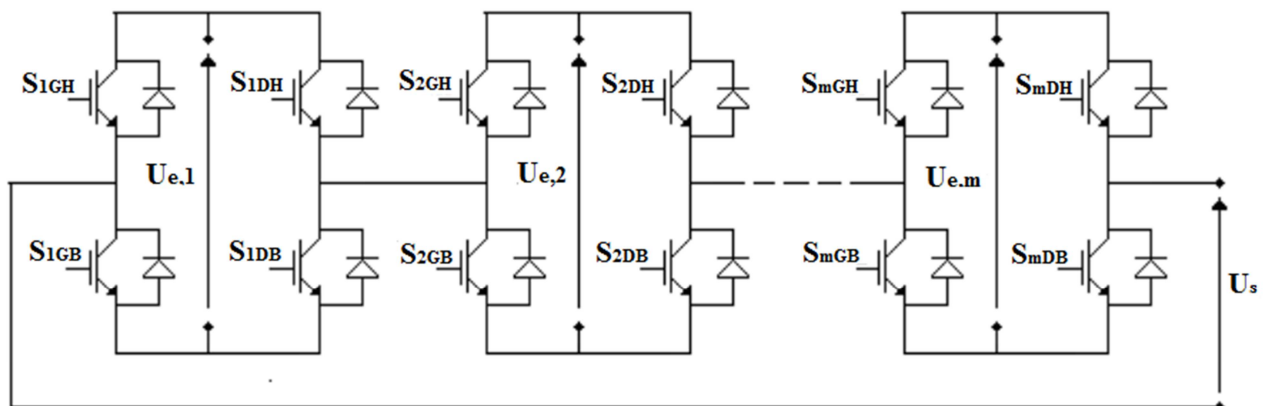


Figure (2.2) : Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau cascade,
il faut m tensions d'entrée isolées les unes des autres

| $U_{s,1}$ | $U_{s,2}$ | $U_{s,3}$ | $U_{s,4}$ | U_s |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| +1 | +1 | 0 | 0 | +2 |
| +1 | +1 | +1 | -1 | +2 |

Tableau (2.2) : Génération de niveaux de cellules

Pour la première combinaison, 6 permutations des cellules sont possibles, 4 pour la deuxième, ce qui fait un total de 10 possibilités pour générer le niveau 2 sur un total de $3^4 = 81$ états possibles. A priori, la commande doit permettre de répartir la puissance et les commutations de manière équivalente sur les cellules [2].

2.4 Onduleurs multiniveaux asymétriques (Onduleurs hybrides) :

Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « onduleur hybride ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé. Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations :

- La mise en série de pont en H alimentés avec des tensions de différentes valeurs [3] [4] .
- La mise en série d'onduleurs de topologies différentes (par exemple un onduleur NPC triphasé combiné avec des ponts en H monophasés [5] [2]).
- La mise en série de cellules de conversion de topologie et de nature différentes (par exemple pont en H et amplificateur linéaire [6]).

Comme pour la mise en série de ponts en H, la seule contrainte porte sur les alimentations des cellules qui doivent être isolées les unes des autres. Le concept peut être attribué à O.M.Mueller et J.N. Park qui ont publié le principe dans un article paru en 1994 [6]. Cet article portant sur une application de résonance magnétique. Le cahier des charges était d'obtenir un convertisseur avec une tension de service, une rapidité, un rendement et une résolution élevés dans une application de résonance magnétique. Le concepteur de cette solution assez astucieuse l'a dénommée amplificateur quasi-linéaire.

Les convertisseurs associés sont :

- ❖ une cellule onduleur de tension élevée.
- ❖ une cellule onduleur de tension trois fois plus faible.
- ❖ une cellule amplificateur linéaire avec une tension six fois plus faible.

Cette structure est illustrée à la figure (2.3). Les deux premières cellules de ce convertisseur permettent de générer 9 niveaux distincts. La dernière cellule permet de corriger l'erreur et d'obtenir une tension quasi-continue, c'est à dire une réponse quasi-linéaire entre la tension la plus basse et la plus haute. Par rapport à une solution avec amplificateur seul, les pertes sont fortement réduites, puisque l'amplificateur linéaire ne fait que corriger l'erreur qui n'est de l'ordre que d'une fraction de la tension d'alimentation. Cette structure possède toutes les caractéristiques d'un onduleur multiniveaux asymétrique et en résumé bien les sens : des convertisseurs spécialisés sont combinés de sorte que chacun remplit le rôle pour lequel il est le mieux adapté. Le concept est simple, sa mise en œuvre est nettement plus complexe, notamment pour que chacun des convertisseurs travaille de manière optimale.

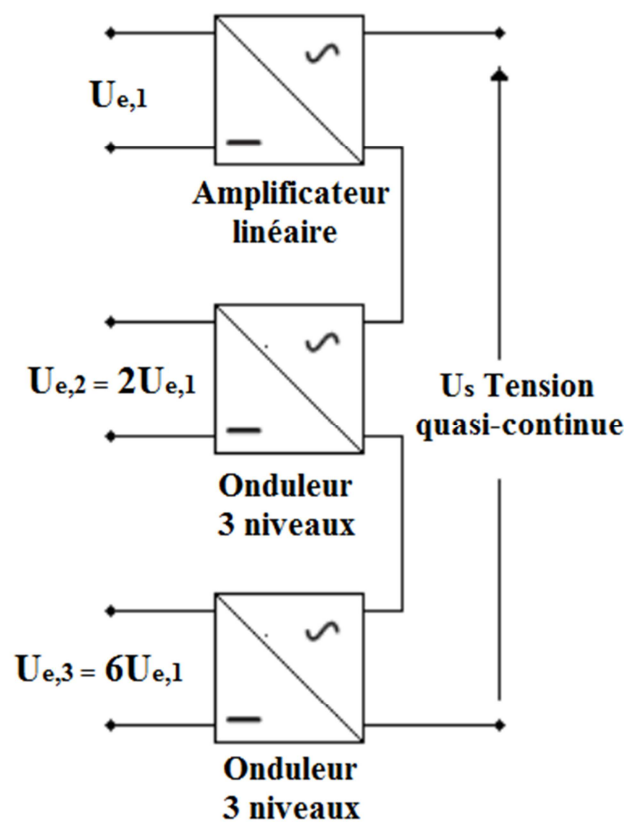


Figure 2.3 : Schéma de l'amplificateur quasi-linéaire proposé par Müller.

2.5 Propriétés des principales structures

2.5.1 Classification des topologies selon leur alimentation

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures telles que les onduleurs à cellules en série élèvent leur tension d'alimentation, la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentations; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension.

2.5.2 Nombres de composants nécessaires

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de composants nécessaires pour réaliser une branche d'onduleur, de tension de service et de nombre de niveaux donné, avec les 3 principales topologies d'onduleurs multiniveaux. Les composants sont supposés de taille identique. Tous les onduleurs sont supposés alimentés par une source de tension continue, les condensateurs intermédiaires ne sont donc pas comptabilisés pour les onduleurs en pont (Onduleur hybride). Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir 3 niveaux par branche, nous obtenons :

| Topologie | ONDULEUR 3 NIVEAUX | | | | | |
|-----------------------|--------------------|---|---|-----|---|----------------|
| | m | S | D | C | n | N _E |
| NPC | 2 | 4 | 6 | 2/b | 3 | 3 |
| Cellules Imbriquées | 3 | 4 | 4 | 1 | 3 | 4 |
| Symétrique "Cascade" | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 3 |
| Asymétrique "Hybride" | 2 | 4 | 4 | 0 | 2 | 2 |

Tableau (2.3) : Génération de niveaux de cellules

| ONDULEUR 5 NIVEAUX | | | | | | |
|---------------------------|---|---|----|-----|---|-------|
| Topologie | m | S | D | C | n | N_E |
| NPC | 4 | 8 | 20 | 4/b | 5 | 5 |
| Cellules Imbriquées | 4 | 8 | 8 | 3 | 5 | 16 |
| Symétrique "Cascade" | 4 | 8 | 8 | 2 | 5 | 9 |
| Asymétrique "Hybride" | 4 | 8 | 8 | 0 | 2 | 2 |

Tableau (2.4) : Génération de niveaux de cellules

| ONDULEUR 7 NIVEAUX | | | | | | |
|---------------------------|---|----|----|-----|---|-------|
| Topologie | m | S | D | C | n | N_E |
| NPC | 6 | 12 | 56 | 6/b | 7 | 7 |
| Cellules Imbriquées | 6 | 12 | 12 | 6 | 7 | 64 |
| Symétrique "Cascade" | 6 | 12 | 12 | 3 | 7 | 27 |
| Asymétrique "Hybride" | 6 | 12 | 12 | 0 | 2 | 2 |

Tableau (2.5) : Génération de niveaux de cellules

| ONDULEUR M+1 NIVEAUX | | | | | | |
|-----------------------------|---|----|-----------|-------------|-----|-----------|
| Topologie | m | S | D | C | n | N_E |
| NPC | m | 2m | $M^2 + m$ | 2m/b | m+1 | m+1 |
| Cellules Imbriquées | m | 2m | 2m | $(m^2+m)/2$ | m+1 | 2^m |
| Symétrique "Cascade" | m | 2m | 2m | m | m+1 | $3^{m/2}$ |
| Asymétrique "Hybride" | m | 2m | 2m | 0 | 2 | 2 |

Tableau (2.6) : Génération de niveaux de cellules

Avec :

- **m** : Le nombre d'étages ou de cellules,
- **b** : Le nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé,
- **S** : Le nombre de transistors,
- **D** : Le nombre de diodes,
- **C** : Le nombre de condensateurs,
- **n** : Nombre de niveaux obtenus,
- N_E : Nombre d'états de commutation

2.5.3 Classification des topologies selon leur répartition des niveaux

Pour les convertisseurs décrits ci-dessus, on utilise un principe d'addition de niveaux tous égaux entre eux. On appelle aussi ces circuits «convertisseurs multiniveaux à étages symétriques» comme les topologies (NPC, cellule imbriquées, et le cascade). Pour ce type de convertisseurs, ils sont représentés par la figure (2.4). En choisissant une répartition des amplitudes des cellules élémentaires de façon asymétrique pour le cas de la topologie Hybride, il devient possible de générer des valeurs supplémentaires, notamment en utilisant des valeurs de différences non nulles comme le montre la figure (2.5).

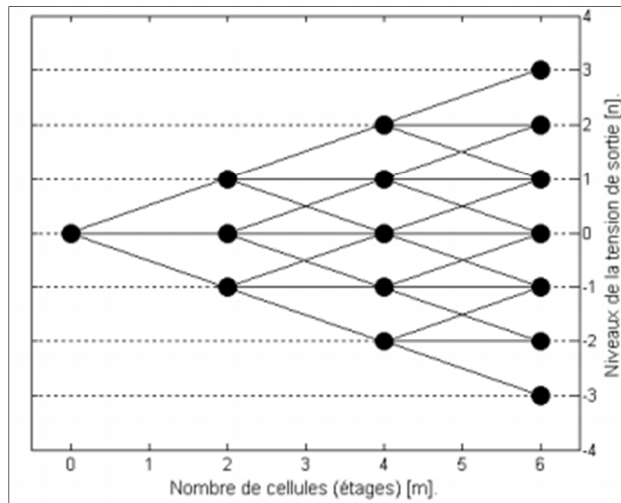


Figure (2.4) : La structure symétrique de la répartition des cellules

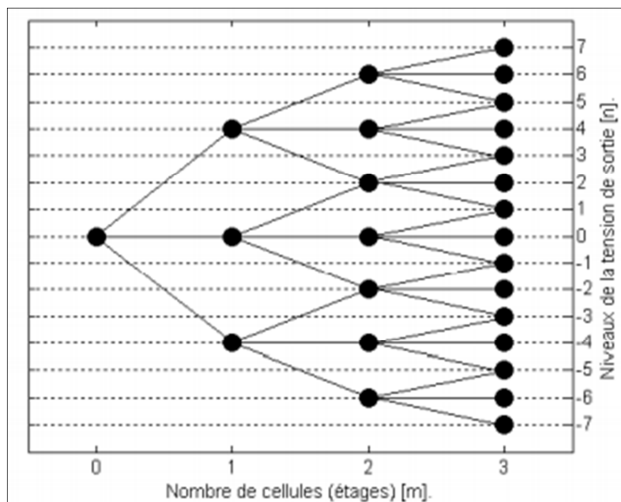


Figure (2.5) : La structure asymétrique de la répartition des cellules.

2.5.4 Classification des topologies selon leurs domaines d'applications :

Cette première comparaison basée sur le nombre de composants et la répartition des niveaux permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs.

Les onduleurs NPC :

Cette topologie permet la conversion multiniveau sans faire transiter la puissance par des convertisseurs DC-DC. Elle peut être généralisée pour les applications polyphasées en utilisant les mêmes tensions d'entrée pour les différentes phases [7]. Cela permet une meilleure répartition de la puissance. Pratiquement, cela facilite l'équilibrage des tensions intermédiaires, car seule la tension totale est connectée à une source active, tandis que les autres sources de tension sont réduites à de simples condensateurs. Il y a toutefois la possibilité d'équilibrer un peu la puissance entre les phases par la gestion de la composante homopolaire.

Les onduleurs à cellules imbriquées :

Comme l'onduleur NPC, cette topologie permet la conversion multiniveaux sans faire transiter la puissance par des convertisseurs DC-DC. En revanche la réalisation d'un convertisseur polyphasé passe par l'emploi de convertisseurs indépendants avec des sources de tension indépendantes. Le fait que le nombre de condensateurs croisse avec le carré du nombre de cellules semble constituer un des principaux inconvénients des onduleurs à cellules imbriquées.

Les onduleurs symétriques (cascade) :

La principale difficulté de cette topologie réside dans l'alimentation des ponts en H. Il faut autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules. Pour des applications ne nécessitant pas d'apport de puissance active, on peut se passer d'alimentation et se contenter d'éléments stockeurs, comme des condensateurs. C'est par exemple le cas avec la compensation statique de réactif ou d'harmoniques. Cette structure est très avantageuse pour ce type d'applications, le seul inconvénient étant que les échanges de puissance entre phases ne sont pas possibles, ce qui a pour effet d'augmenter les fluctuations de tension (par rapport à une structure permettant ces échanges).

Les onduleurs asymétriques (Hybride) :

Tout comme pour les onduleurs multiniveaux symétriques, la principale difficulté des onduleurs multiniveaux asymétriques réside dans la réalisation d'une alimentation performante [8], 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.

2.6 Conclusion :

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminé ou permettant d'atteindre des performances recherchées. Dans ce chapitre, on a présenté les différentes structures de base d'onduleurs de tension multi niveaux, Et nous pouvons conclure que dans le domaine de la compensation de puissance et dans l'entraînement électrique, l'utilisation la plus fréquente de nos jours est les convertisseurs de type multi niveaux. Toutefois, les onduleurs de type NPC multiniveaux occupent la plus grande part du marché, utilisant des IGBT à refroidissement forcé. Ces onduleurs feront l'objet de notre étude par la suite.

Le chapitre suivant sera consacré à la Simulation de la commande d'un convertisseur multi niveaux de type NPC. L'étude d'un cas d'onduleur triphasé à deux et trois niveaux de type NPC sera exposé.

2.7 Bibliographie du Chapitre II

- [1] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli, and S. Tenconi. "A non conventional power converter for plasma stabilization". PESC'88, 1, pp 122–129, 1988.
- [2] Mamadou Baldém, Comparative "Study of NPC and Cascaded Converters Topologies", International Conference on Renewable Energies and Power Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011
- [3] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, E. Cengelci, and P.N. Enjeti. "Multilevel inverter by cascading industrial VSI". IEEE Transactions on Power Electronics, 49(4), pp 832–837, august 2002.
- [4] Nikolaus Schibli. "Symmetrical multilevel converters with two quadrant DC-DC feeding". PhD thesis, EPFL, 2000.
- [5] M. Veenstra. "Investigation and Control of a Hybrid Asymmetric Multi-Level Inverter for Medium-Voltage Applications". PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (CH), 2003.
- [6] Benghanem M. " Etude et Commande Numérique d'un STATCOM à base d'onduleurs Multi-niveaux", Phd Thèse 2006, USTOra
- [7] "Les onduleurs multiniveaux: évolution de la recherche et applications futures", articles spécialisés, Bulletin SEV/AES 3/2006.
- [8] Dr. Keith Corzine "Operation and Design of Multilevel Inverters", Revised June 2005

Table des matières

Chapitre III : Simulation de la commande d'un convertisseur multi niveaux de type NPC

| | | |
|---------|---|----|
| 3.1 | Introduction..... | 25 |
| 3.2 | Onduleur classique à deux niveaux de tension..... | 26 |
| 3.3 | Commande MLI-ST d'un onduleur usuel à deux niveaux..... | 28 |
| 3.4 | Onduleur NPC à trois niveaux de tension alimentant une charge RL..... | 31 |
| 3.4.1 | Problème de la tension du mode homopolaire ou le mode commun..... | 32 |
| 3.5 | Les différentes techniques de modulation..... | 32 |
| 3.5.1 | Commande en pleine Onde..... | 33 |
| 3.5.2 | Commande MLI Triangulo-sinusoïdale..... | 37 |
| 3.5.2.1 | Modulation sinusoïdale classique..... | 38 |
| 3.5.2.2 | Modulation sinusoïdale à triangles multiple | 42 |
| 3.5.2.3 | Modulation sinusoïdale modifiée..... | 47 |
| 3.6 | Interprétation des résultats des différentes commandes..... | 53 |
| 3.7 | Conclusion..... | 53 |
| 3.8 | Bibliographie du Chapitre III..... | 54 |

3.1 Introduction :

Les performances et en particulier la rentabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes de production des énergies renouvelables au réseau électrique de distribution sont des éléments-clés qui influencent fortement la qualité de l'énergie produite et le rendement de l'installation entière. De ce fait, leurs améliorations est, et sera toujours, un objectif recherché.

Les onduleurs sont constitués en grande partie par des interrupteurs. Ces derniers sont soumis, dans la majorité des cas, à de fortes contraintes thermiques puisqu'ils sont appelés à bloquer la pleine tension imposée par la source continu, étant donné que le phénomène est répétitif, le rendement et la durée de vie des composants sont réellement affectés.

La structure des onduleurs multi-niveaux, trois-niveaux et plus, permettent de pallier cette problématique. L'utilisation de ce type d'architecture aide à la limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs en fractionnant la tension continue à l'entrée d'onduleur. L'association d'une architecture de type multi-niveau à une commande judicieuse des interrupteurs de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques et par conséquent, d'améliorer le contenu spectral des signaux de sortie (tension et courant). Toutefois, le choix d'un nombre élevé de niveaux et par suite l'utilisation de plus de composants rendra le système plus encombrant donc la structure trois-niveaux semble la mieux adaptée aux exigences spécifiées.

Dans le but d'étudier les différentes techniques de la commande de l'onduleur multi niveaux de tension de type NPC, une étude comparative, par simulation dans l'environnement PSIM est présentée.

Ce chapitre traite deux structures d'onduleurs triphasés ; l'onduleur usuel à deux niveaux ; et l'onduleur NPC à trois niveaux (Neutral Point Clamped). La première topologie sera commandée par la MLI-ST et la topologies trois niveaux sera commandée par les différentes modulations de largeur d'impulsions MLI-ST et la commande en plein onde. Enfin, des simulations sont effectuées pour relever les formes d'ondes et les THD des tensions de sorties.

3.2 Onduleur classique à deux niveaux de tension :

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure (3.2). Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui fonctionnent 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

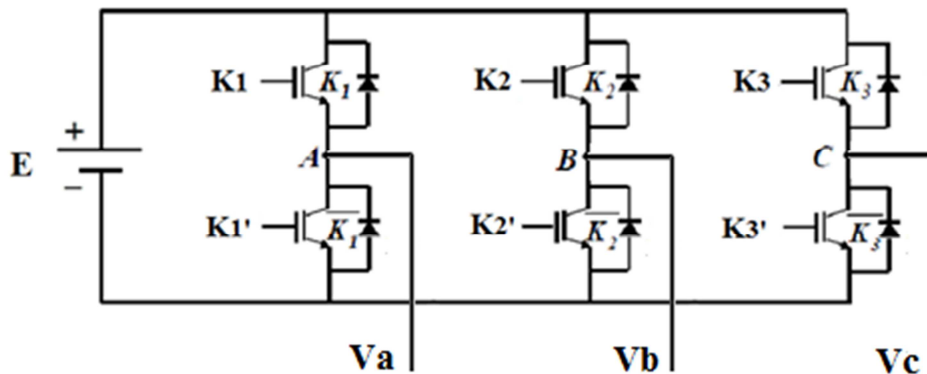


Figure 3.1 : Schéma d'un onduleur usuel à deux niveaux

Pour un convertisseur à deux-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions

Les deux états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau :

| K1 | K1' | Va |
|----|-----|----|
| 1 | 0 | E |
| 0 | 1 | 0 |

Tableau 3.1 : États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux

❖ 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 (3.3-a). La tension de sortie V_a est: $V_a = +E$.

La tension inverse appliquée à l'interrupteur $K_{1'}$ vaut: $V_{K_{1'}} = +E$.

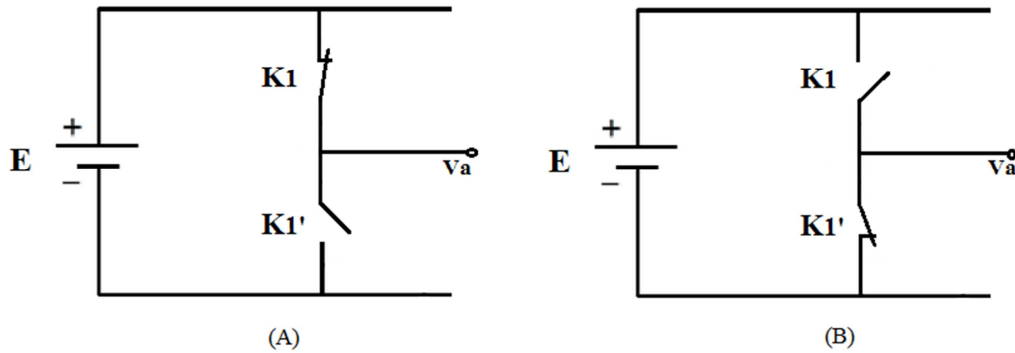


Figure 3.3 : bras de l'onduleur à deux niveaux

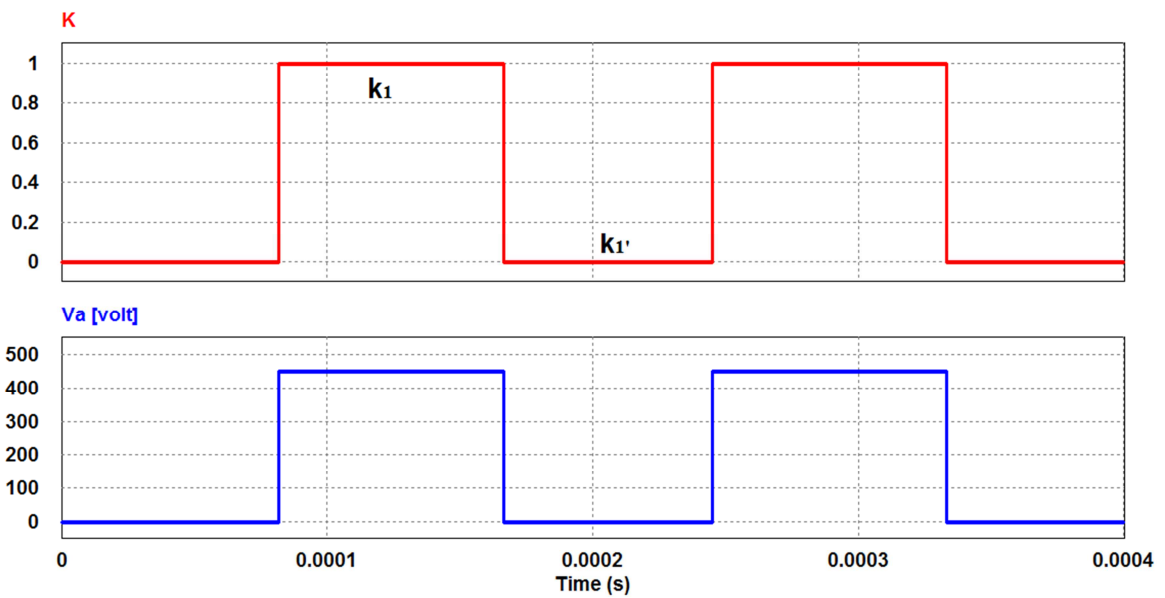


Figure 3.4 : Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

➤ **Séquences 2** : Génération du niveau minimum :

Dans ce cas, l'interrupteur K_1 est bloqué et K_1' est passant comme le montre la figure (3.3-b).

La tension de sortie V_a est: $V_a = 0$.

La tension inverse appliquée à l'interrupteur K_1 vaut: $V_{K1} = +E$.

3.3 Commande MLI-ST (Triangulo-sinusoidale) d'un onduleur usuel à deux niveaux :

Pour générer les impulsions de commande MLI-ST du convertisseur à deux-niveaux de tensions, une porteuse triangulaire d'amplitude U_r et de fréquence F_r est nécessaire figure (3.5). 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 K_1 et K_2 sont complémentaires.

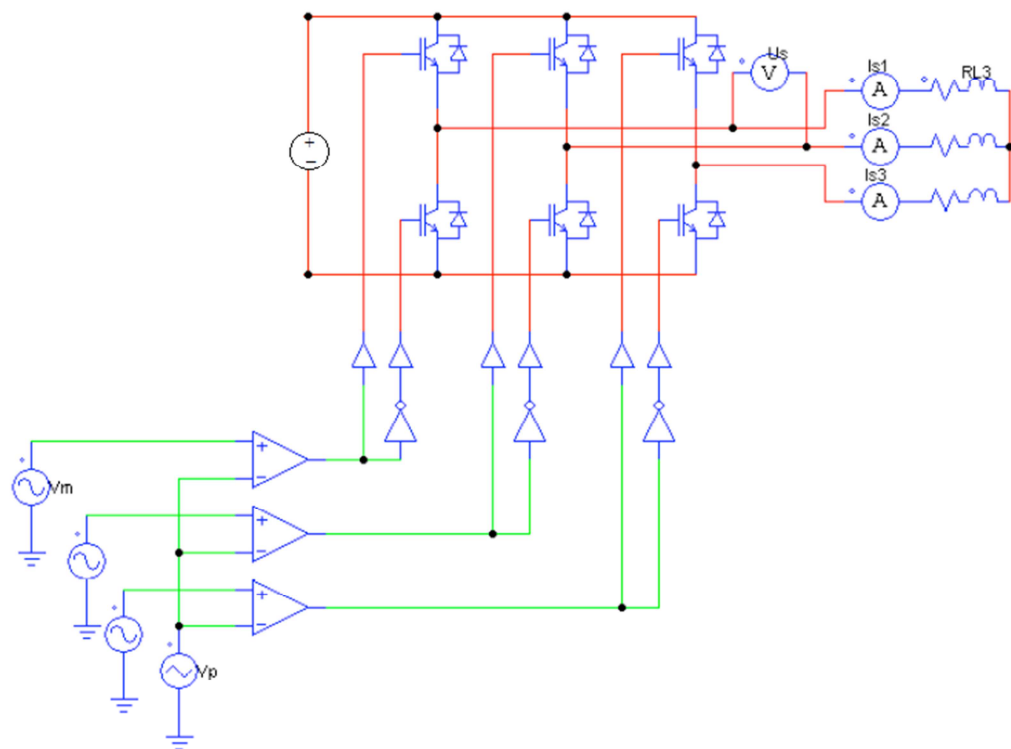


Figure 3.5 : Génération des Signaux de commande MLI-ST d'un onduleur usuel à deux Niveaux

Les figure (3.6.a-b) montre les signaux et les impulsions des interrupteurs de la commande MLI-ST pour un onduleur usuel à deux- niveaux.

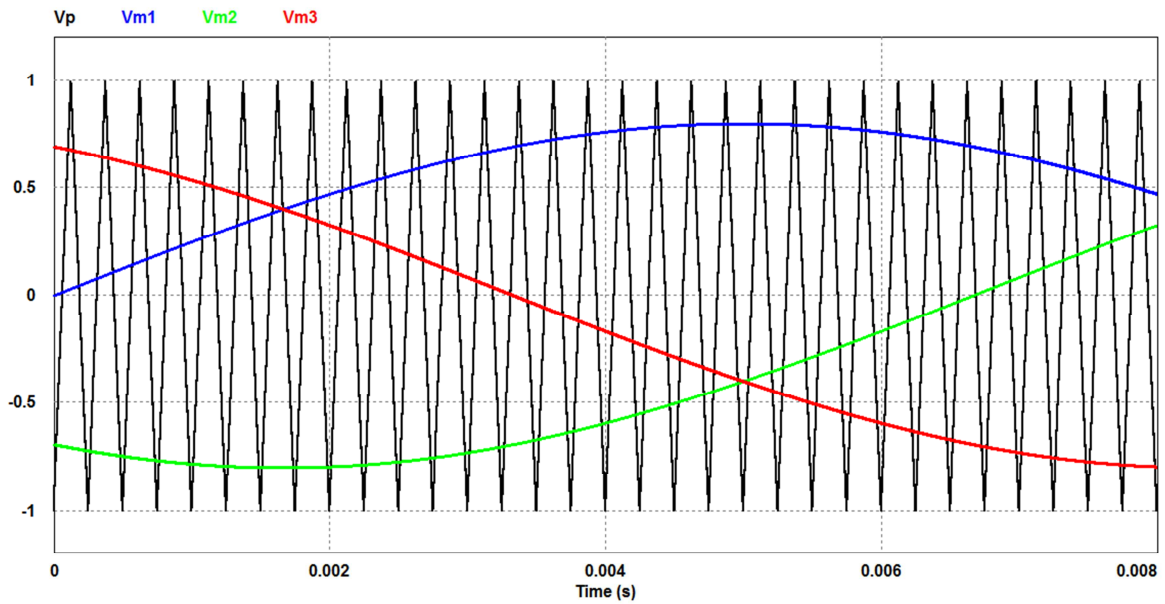


Figure 3.6.a : Signaux de commande MLI-ST d'un onduleur usuel à deux Niveau

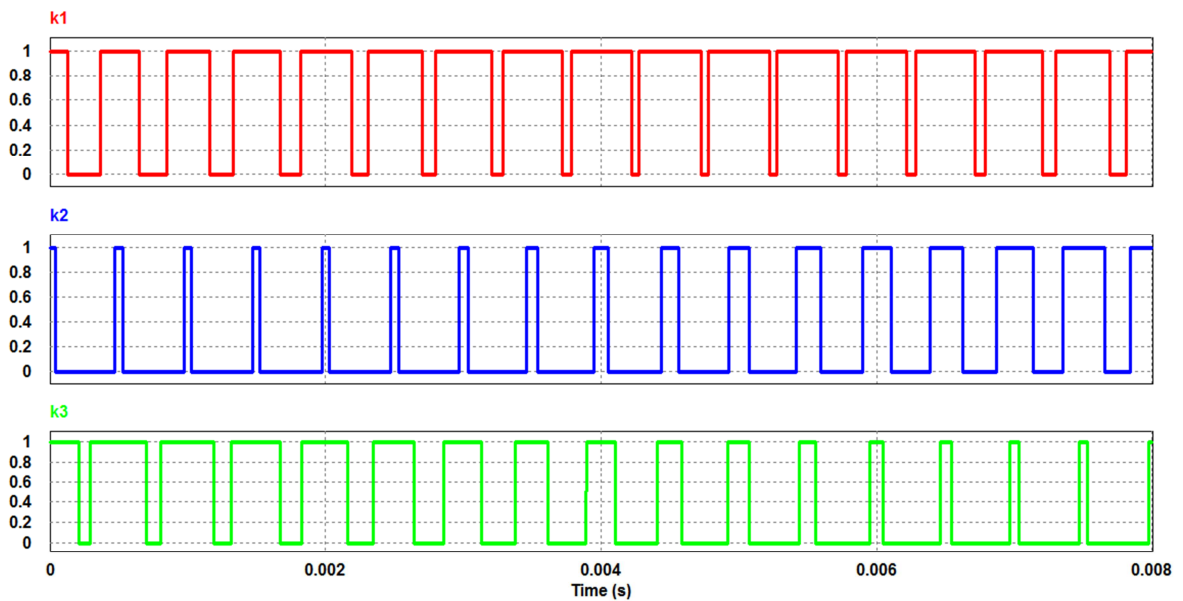


Figure 3.6.b : Les trois impulsions de commande MLI-ST d'un onduleur usuel à deux Niveau

Résultat de simulation :

Les figures ci-dessous montrent les formes d'ondes et les spectres harmoniques de la tension entre phase (U_s) et les courants obtenus à la sortie de l'onduleur usuel triphasé à deux niveaux pour la commande MLI-ST

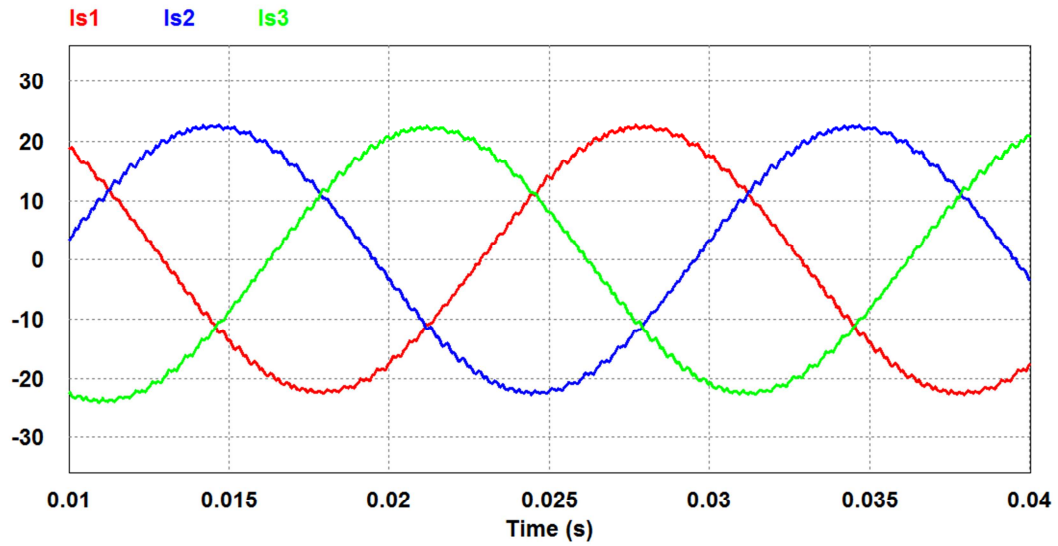


Figure 3.7.a : Les courants obtenus à la sortie de l'onduleur pour la commande MLI-ST

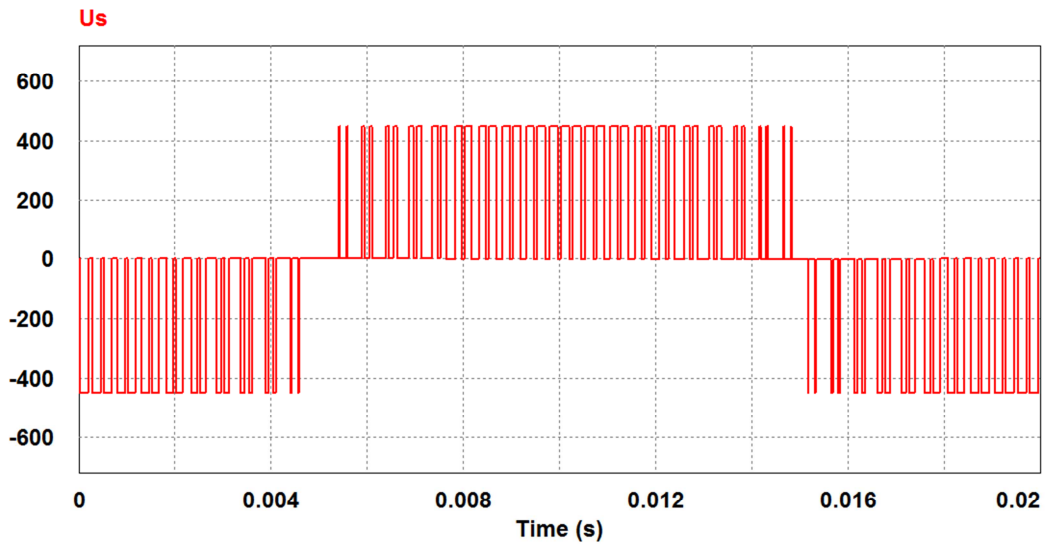


Figure 3.7.b : Les formes d'ondes de la tension entre phase pour la commande MLI-ST

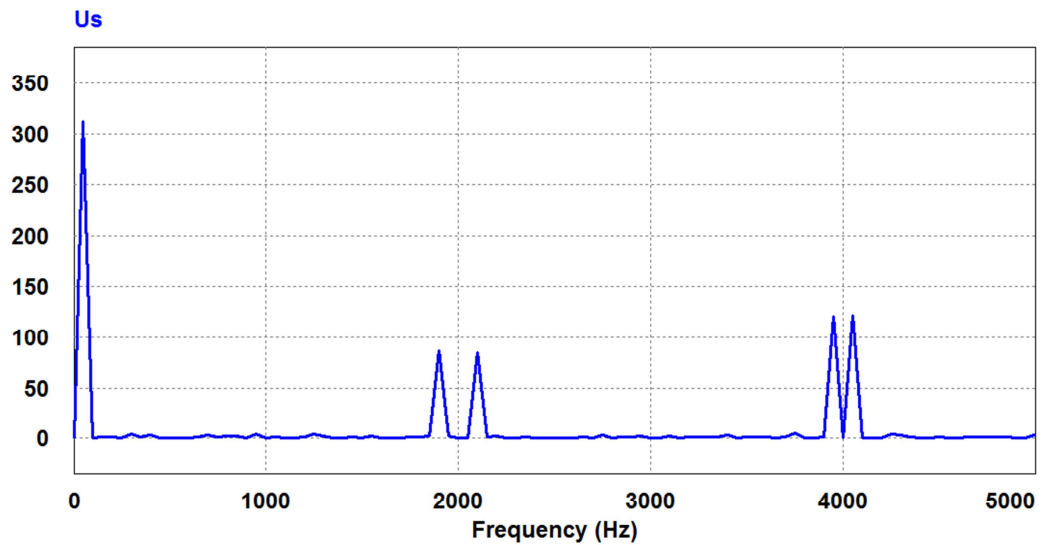


Figure 3.7.c : Le spectre harmonique de la tension entre phase pour la commande MLI-ST

3.4 Onduleur NPC à 3 niveaux de tension alimentant une charge RL :

La structure de l'onduleur à trois niveaux de type NPC est donnée par la figure (3.8). Cette structure se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série et deux autres en parallèles, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension V . Chaque interrupteur est composé d'un interrupteur bicommandable et d'une diode montée en tête bêche.

On peut prendre la tension simple V_1 entre la première borne (A) de la charge et le point neutre O, cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs S_{1H} , S_{2H} , S_{1B} et S_{2B} d'un bras de l'onduleur. La figure (3.8) montre la structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC connecté à une charge RL en étoile.

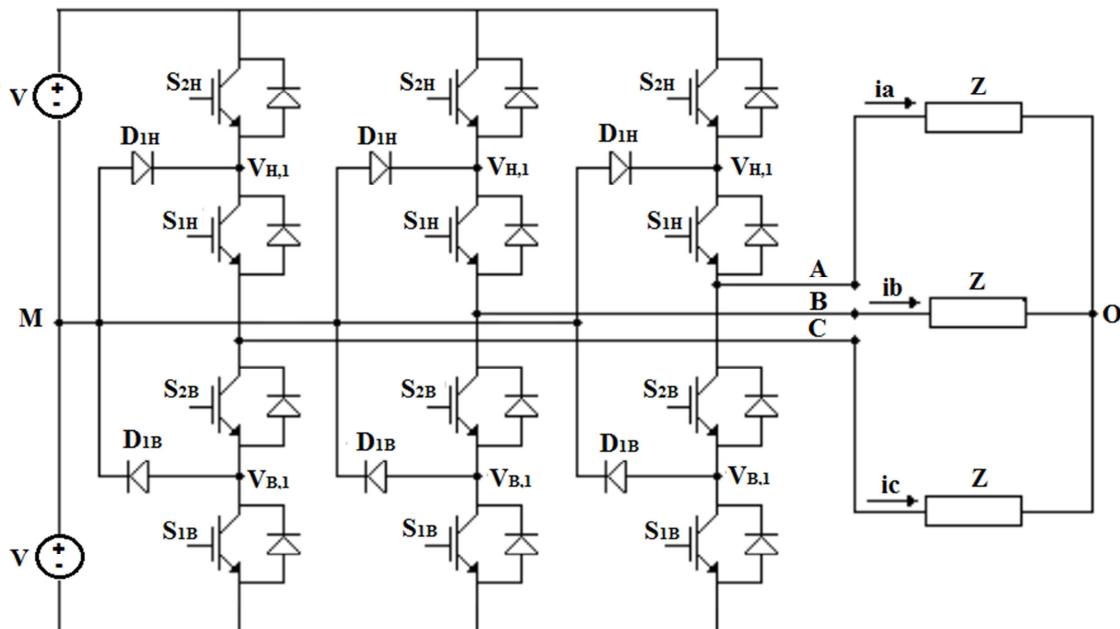


Figure 3.8 : Onduleur triphasé à trois niveaux connecté à une charge en étoile

L'onduleur est connecté à une charge triphasé en étoile à travers les pôles A, B, C dont le point neutre O n'est pas relié au point M. Les tensions V_{am} , V_{bm} , V_{cm} sont déphasées l'une par rapport à l'autre de $1/3$ de la période. Les tensions par phase de l'onduleur forme un système équilibré, dans le quelle les harmoniques impaires multiples de trois sont nuls. Les tensions de phase sont déterminées par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{am} + V_{mo} \Leftrightarrow V_{ao} = V_{am} - V_{om} \\ V_{bo} = V_{bm} + V_{mo} \Leftrightarrow V_{bo} = V_{bm} - V_{om} \\ V_{co} = V_{cm} + V_{mo} \Leftrightarrow V_{co} = V_{cm} - V_{om} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.4.1 Problème de la tension du mode homopolaire ou le mode commun :

Dans les charges alimentées par des onduleurs de tensions à MLI, les formes d'ondes des courants des trois phases sont pratiquement sinusoïdales et forment un système équilibré. Ceci permet éventuellement d'écrire l'équation suivante :

$$i_a + i_b + i_c \approx 0 \quad (3.2)$$

La composante homopolaire de la tension V_{mc} est obtenue en sommant les trois tensions V_{am} , V_{bm} et V_{cm} :

$$V_{mc} = \frac{V_{am} + V_{bm} + V_{cm}}{3} \quad (3.3)$$

En effet, lorsqu'une charge triphasée connectée en étoile est alimentée par un onduleur de tension à MLI, La valeur instantanée de la tension V_{mc} au point neutre par rapport à la terre n'est pas nulle, et la forme d'onde de V_{mc} dépend de la stratégie de commande utilisée [1]. Les courants du mode commun générés par le déséquilibre des tensions du mode commun ont des effets indésirables sur les charges. Ils seront explorés en détail dans les sections suivantes de ce chapitre

3.5 Les différentes techniques de modulation :

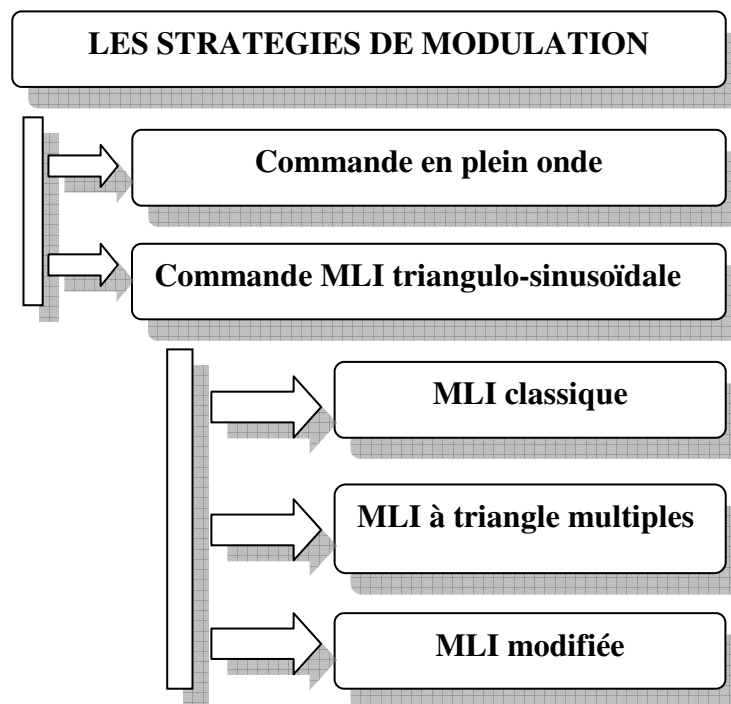


Figure 3.1 : Les stratégies de modulation

Les objectifs communs aux techniques de commutation dans ce cas sont :

- Régulation en fréquence et en amplitude de la tension ou du courant générées par le convertisseur
- La minimisation du taux d'harmonique de la tension ou du courant généré.
- Equilibrage de la tension aux bornes des capacités
- Elimination du mode homopolaire (mode commun) de la tension et du courant.

3.5.1 Commande en pleine Onde :

Le principe de la commande en pleine onde se repose sur le déphasage entre les tensions et l'angle β , elle est déduite des séquences illustrée sur les relations

$$\begin{cases} S_{1B} = 0, S_{1H} = 1 \\ S_{2B} = 1, S_{2H} = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{iM} = 0 \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} S_{1B} = 0, S_{1H} = 1 \\ S_{2B} = 0, S_{2H} = 1 \end{cases} \Rightarrow V_{iM} = v \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} S_{1B} = 1, S_{1H} = 0 \\ S_{2B} = 1, S_{2H} = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{iM} = -v \quad (3.6)$$

L'enchaînement des séquences se fait de la manière suivante pour obtenir la tension de phase V_{am} :

- L'intervalle $[0, \beta]$ \Rightarrow première séquence $\Rightarrow V_{am} = 0$
- L'intervalle $[\beta, 180^\circ - \beta]$ \Rightarrow deuxième séquence $\Rightarrow V_{am} = V$
- L'intervalle $[180^\circ - \beta, 180^\circ]$ \Rightarrow première séquence $\Rightarrow V_{am} = 0$
- L'intervalle $[180^\circ, 180^\circ + \beta]$ \Rightarrow première séquence $\Rightarrow V_{am} = 0$
- L'intervalle $[180^\circ + \beta, 360^\circ - \beta]$ \Rightarrow troisième séquence $\Rightarrow V_{am} = -V$
- L'intervalle $[360^\circ - \beta, 360^\circ]$ \Rightarrow première séquence $\Rightarrow V_{am} = 0$

Première séquence \Rightarrow deuxième séquence \Rightarrow première séquence \Rightarrow première séquence \Rightarrow troisième séquence \Rightarrow première séquence.....etc.

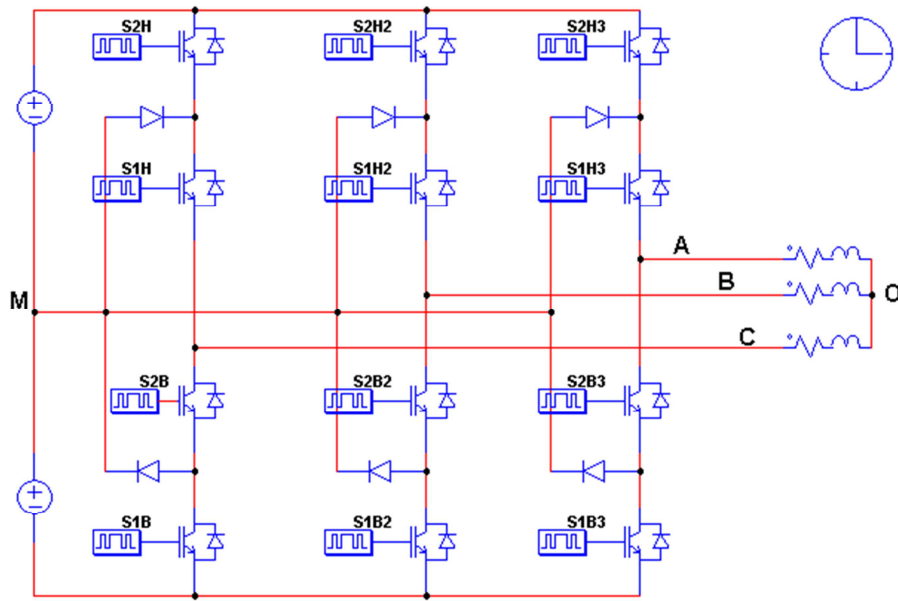


Figure 3.9 : Schéma électrique de simulation d'une commande plein onde d'un onduleur NPC à trois Niveaux

La figure (3.10) montre les signaux d'attaques des 4 interrupteurs d'un bras de l'onduleur. Les tensions V_{bm} et V_{cm} sont obtenues avec un décalage par rapport à la tension V_{am} de 120° et 240° respectivement. La tension V_{ab} est déduite des tensions simples (V_{am} , V_{bm}) comme il est montré dans la relation suivant :

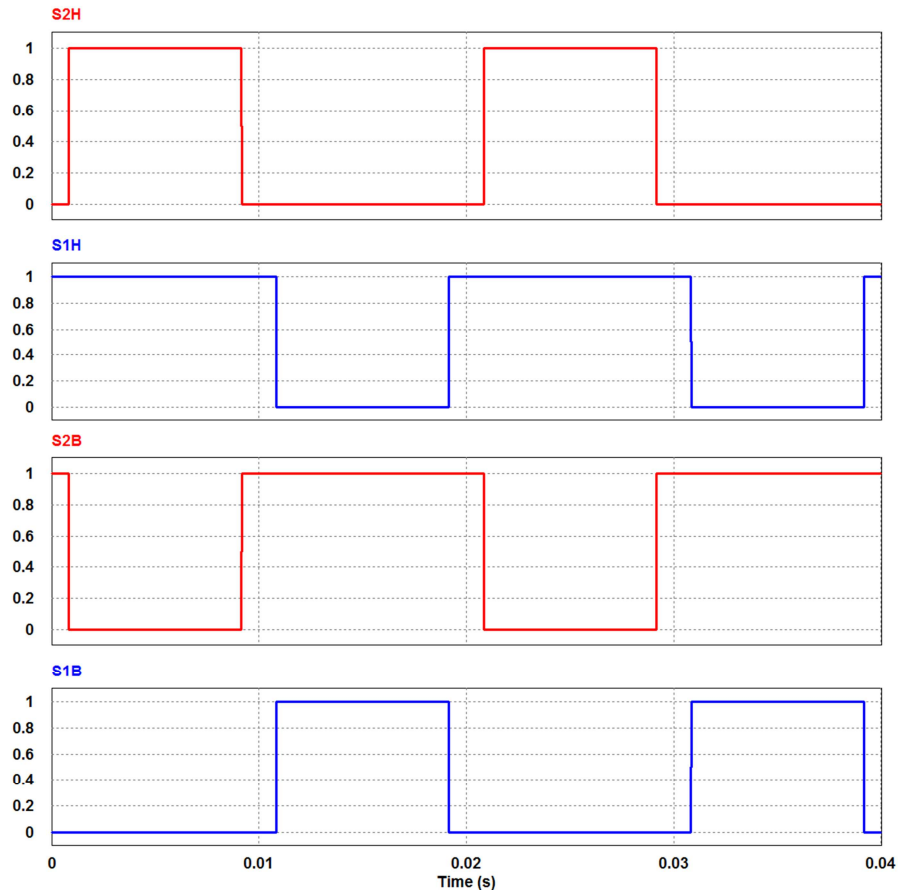
$$V_{ab} = V_{am} + V_{mb} \Leftrightarrow V_{ab} = V_{am} - V_{bm} \quad (3.7)$$


Figure 3.10 : les signaux d'attaques des 4 interrupteurs d'un bras de l'onduleur

Donc avec cette commande, on génère un système de tensions dont les fondamentales constituent un système triphasé équilibré [2][3].

➤ **Résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux contrôlé par la commande en pleine onde :**

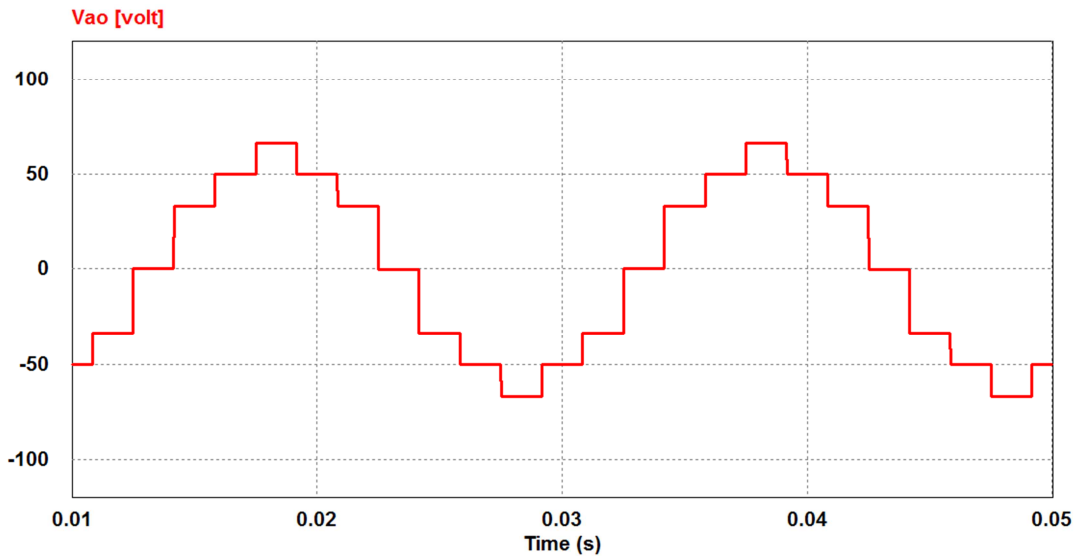


Figure 3.11 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ao}

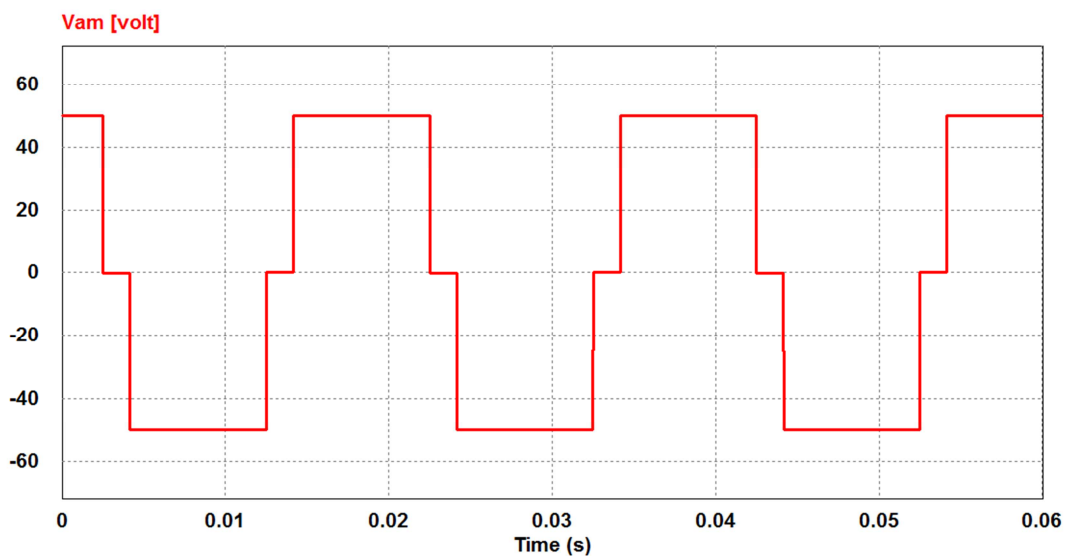


Figure 3.12 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point M V_{am}

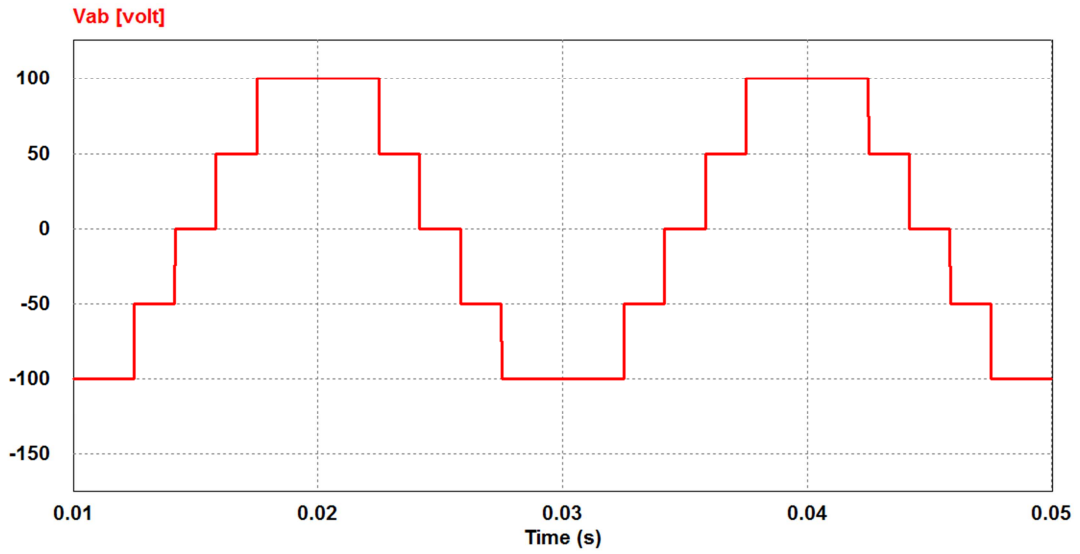


Figure 3.13 : Tension entre phases de l'onduleur V_{ab}

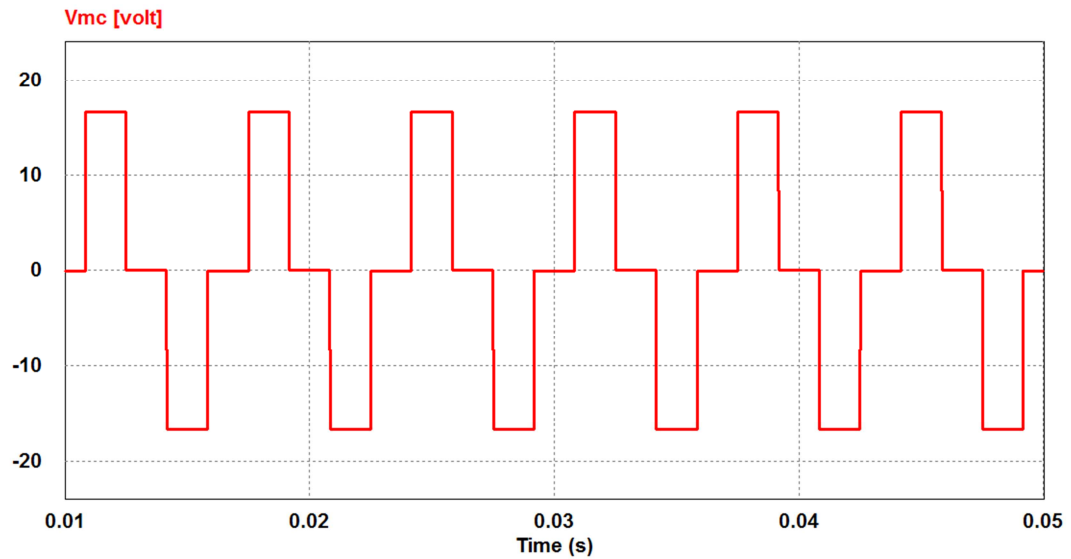


Figure 3.14 : Tension du mode commun V_{mc}

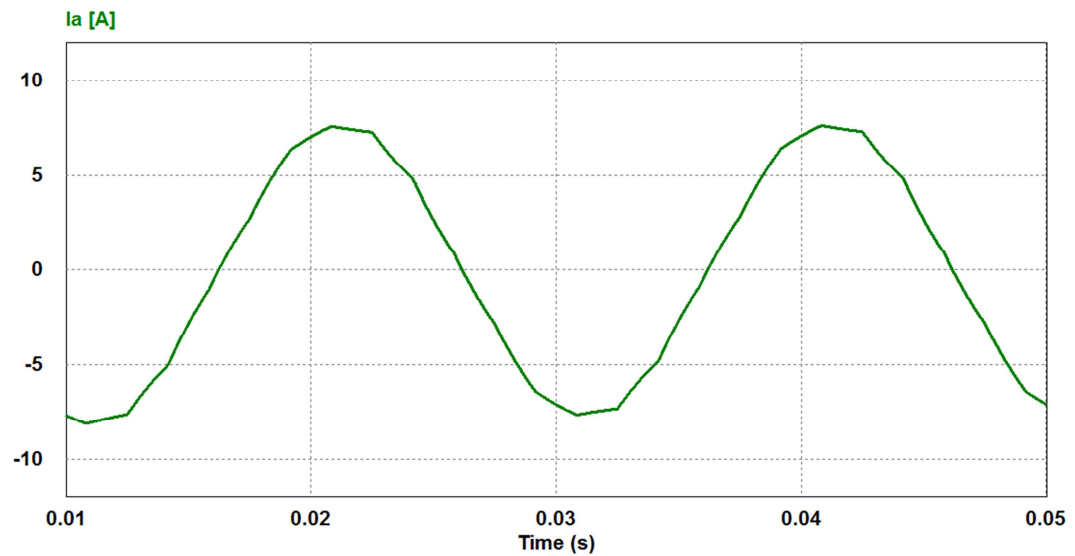


Figure 3.15 : Le courant de la phase I_a

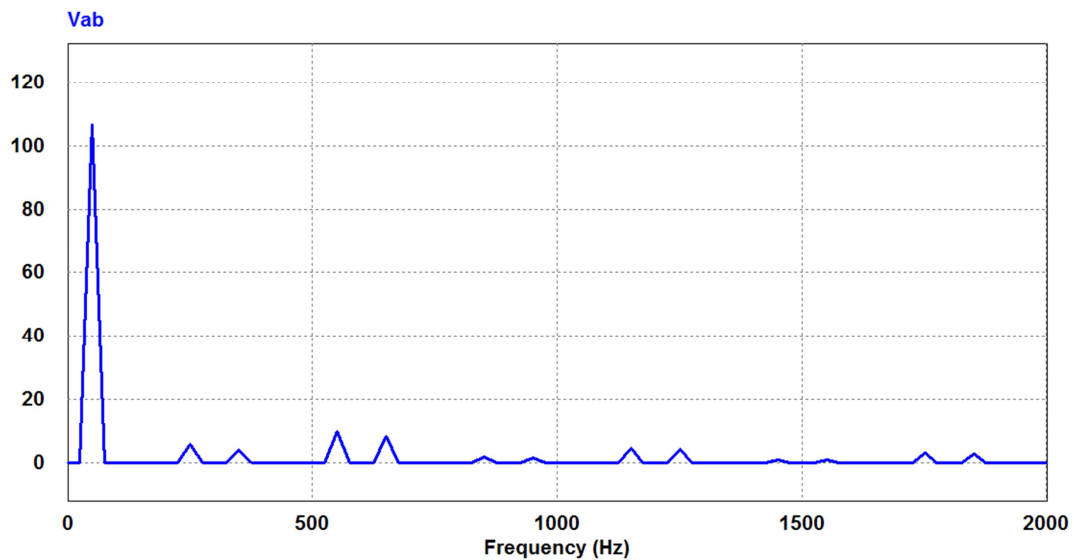


Figure 3.16 : Le spectre d'harmoniques pour la tension entre phases V_{ab} , THD=16.31%

Interprétation des résultats :

Les figures (3.11 – 3.16) présentent les résultats de simulation avec un angle β optimal de $\pi/12$. On remarque les trois niveaux de la tension entre phases sur la figure (3.13) et son spectre d'harmoniques sur la figure (3.16). On en déduit que seuls les harmoniques impaires de rangs $6n \pm 1$ (n entier) existent et sont très faibles en comparaison avec ceux de l'onduleur triphasé à deux niveaux. L'inconvénient de cette méthode de commande réside dans l'existence de la tension du mode commun, comme le montre la figure (3.14). Nous observons les 7 niveaux de la tension simple sur la figure (3.11) par rapport aux 5 niveaux dans le cas de l'onduleur deux niveaux.

3.5.2 Commande MLI Triangulo-sinusoidale :

La modulation de la largeur d'impulsion (PWM) est une technique très utilisée dans l'industrie. Son principe de base est la génération de signaux de commutation d'interrupteurs suite à une comparaison de l'amplitude de signaux en dent de scie nommés porteuses et un signal sinusoidal nommé référence. Les impulsions de commutations ainsi obtenues permettent la commande des interrupteurs du convertisseur.

Dans cette section, on analyse trois stratégies de modulation à MLI [4] :

- Modulation sinusoidale classique.
- Modulation à triangles multiples
- Modulation modifiée.

Il s'agit de déterminer, pour un onduleur trois niveaux de type NPC, le signal de commande généré par chacune des trois techniques. L'onduleur NPC 3 niveaux est simulé avec les trois techniques de modulation. Toutes les simulations sont réalisées avec un taux de modulation $IM = 0.8$ et un rapport de fréquence $mf = 20$. Les résultats de simulation sont présentés respectivement pour chaque technique dans les sections suivantes.

3.5.2.1 Modulation sinusoïdale classique :

comme pour le cas des onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence f_s et d'amplitude A_s , avec un signal triangulaire d'amplitude A_c et de fréquence f_c , très supérieure à f_s .

La figure (3.17-a) montre les signaux de référence de forme sinusoïdale avec un signal triangulaire (la porteuse), qui génèrent les signaux de commande figure (3.17-b) des interrupteurs. S_{2H} , S_{1H} , S_{2B} et S_{1B} représentent les signaux de commande des interrupteurs pour la phase "A". D'une façon similaire, on génère les signaux de commande des interrupteurs pour les phases "B" et "C" déphasées de 120° et 240° respectivement de la phase "A".

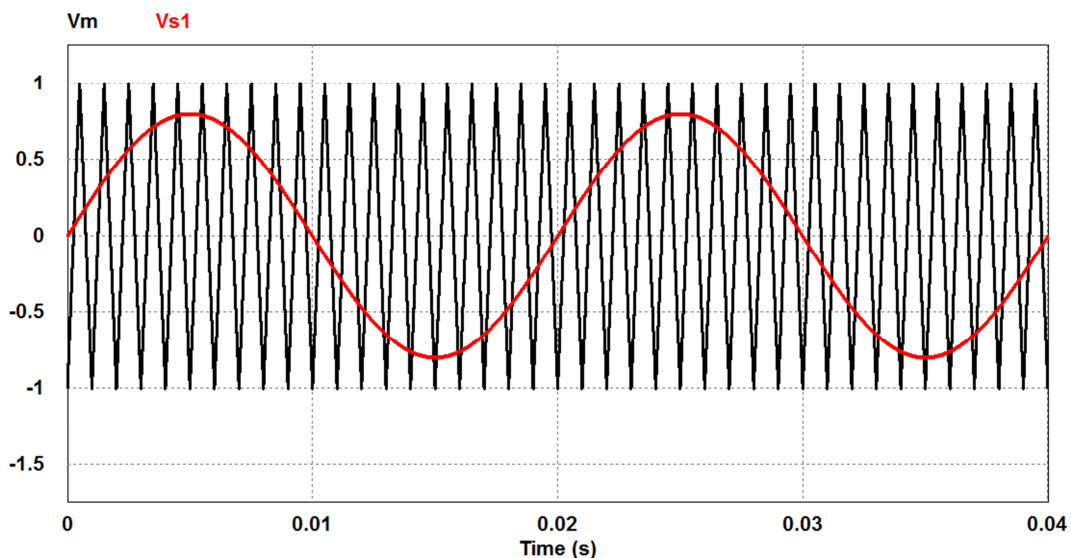


Figure 3.17-a : les signaux d'entrée de l'onduleur NPC à 3 niveaux

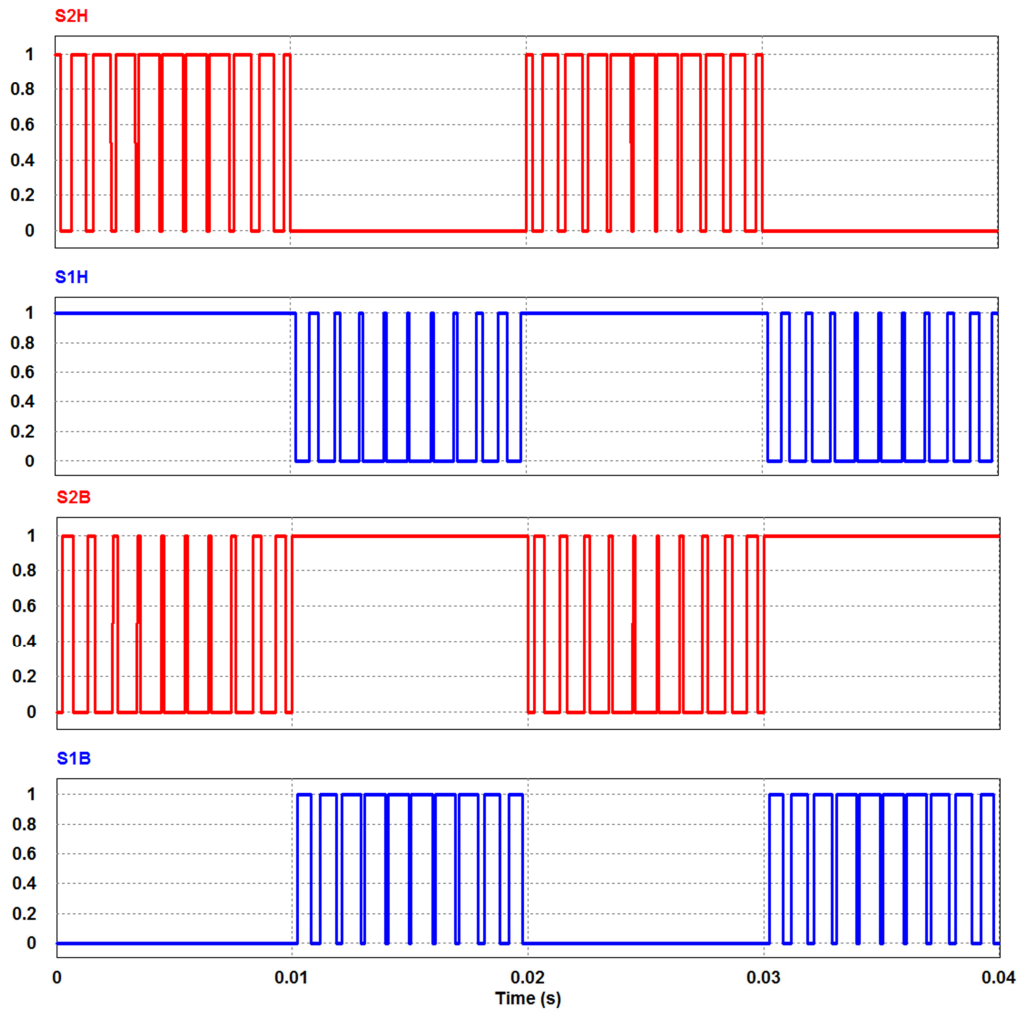


Figure 3.17-b : Génération des signaux de commande par la modulation sinusoidale classique (Onduleur NPC à 3 niveaux)

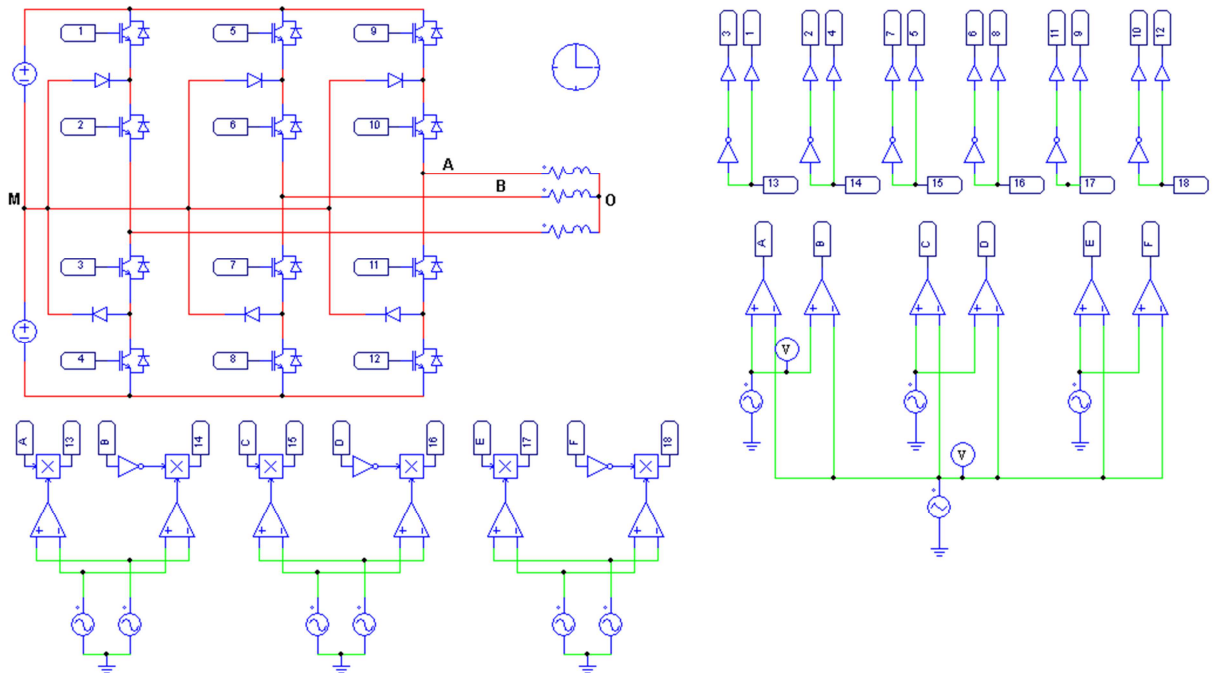


Figure 3.18 : schéma de simulation d'une commande MLI-ST classique d'un onduleur NPC à trois Niveaux

➤ **Résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la modulation sinusoïdale classique**

Nous présentons dans cette partie les résultats de simulations relatifs à la commande par la modulation sinusoïdale classique d'onduleur trois niveaux.

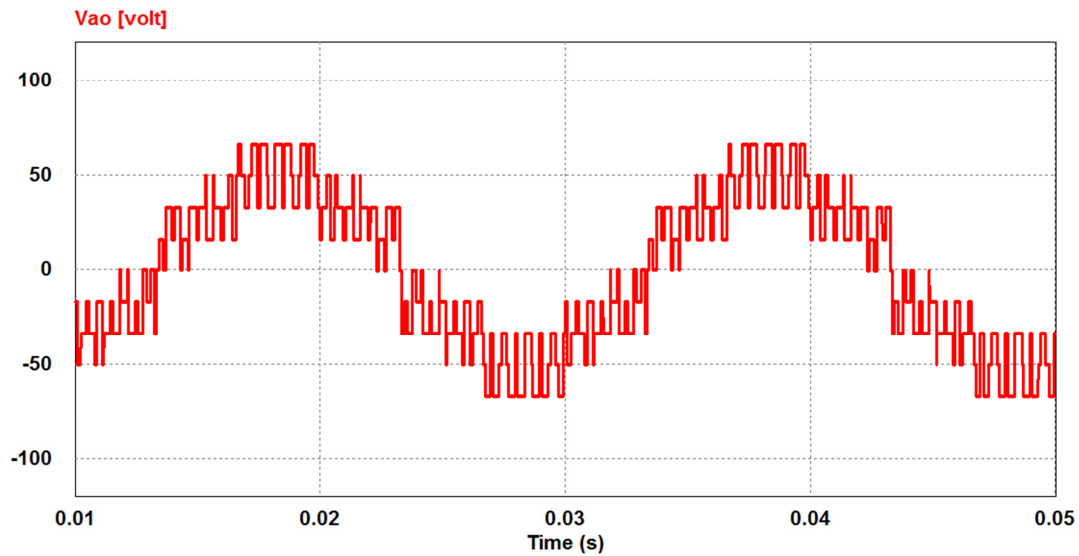


Figure 3.19 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ao}

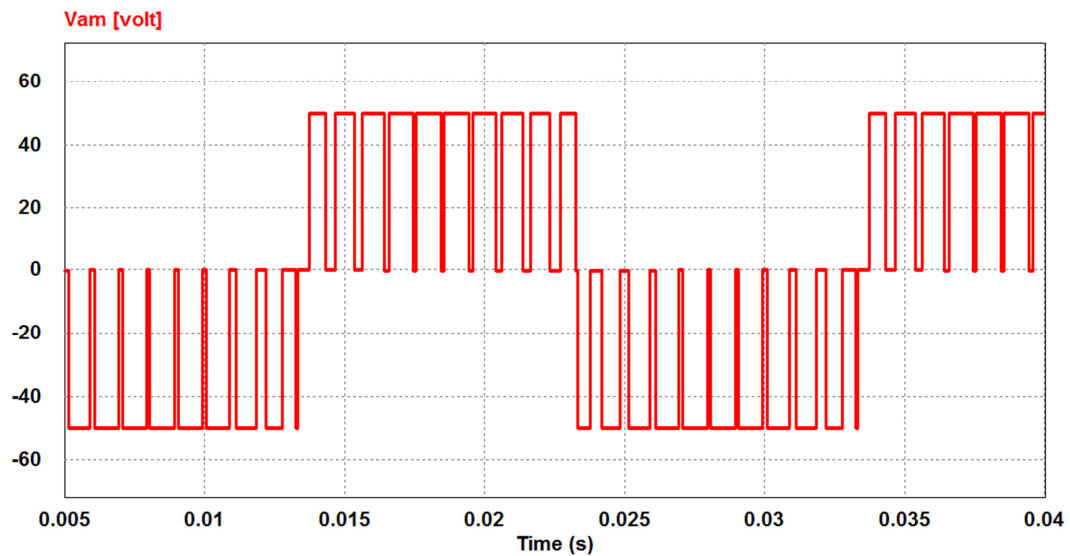


Figure 3.20 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{am}

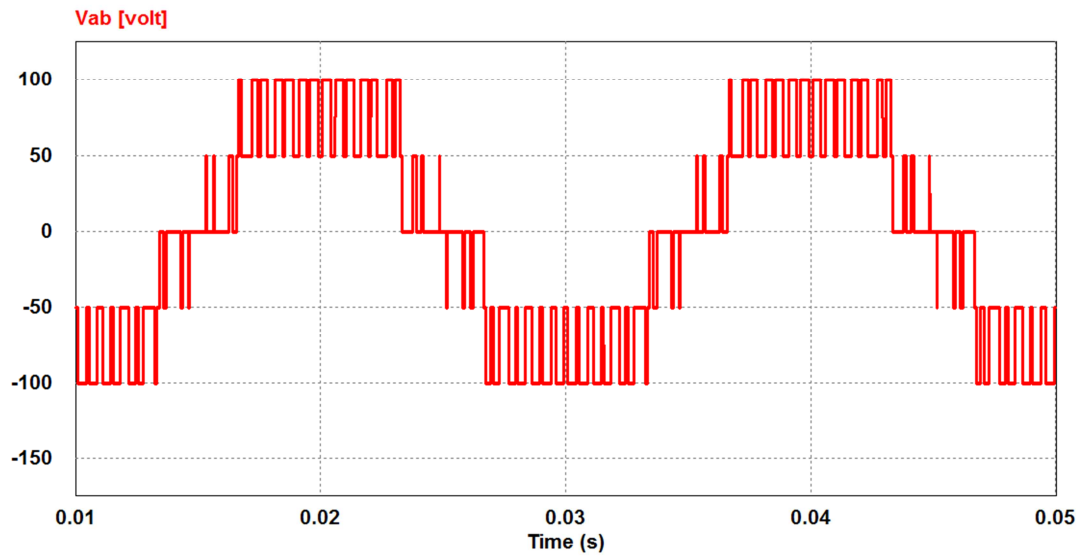


Figure 3.21 : tension entre phase de l'onduleur V_{ab}

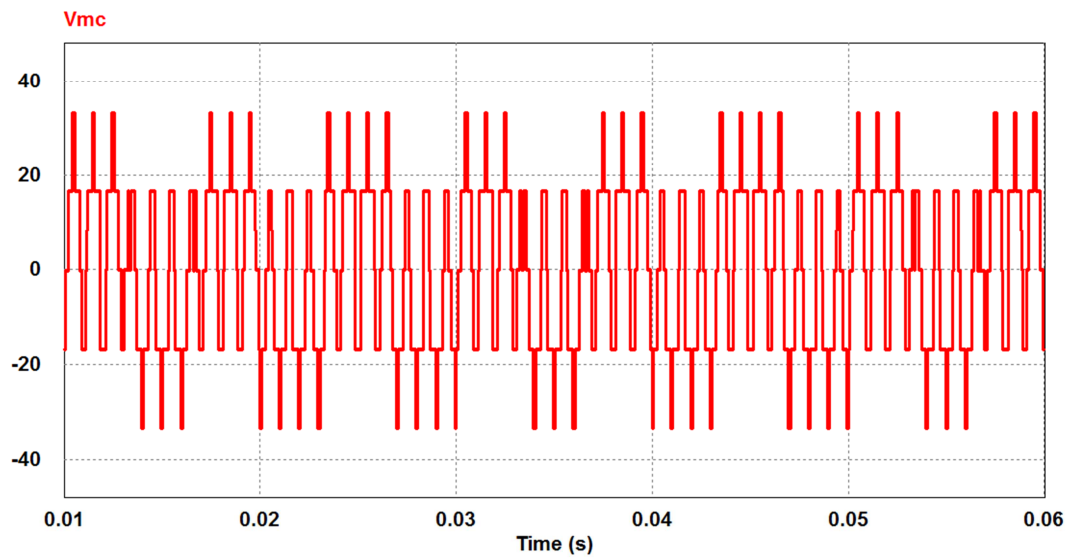


Figure 3.22 : tension du mode commun V_{mc} .

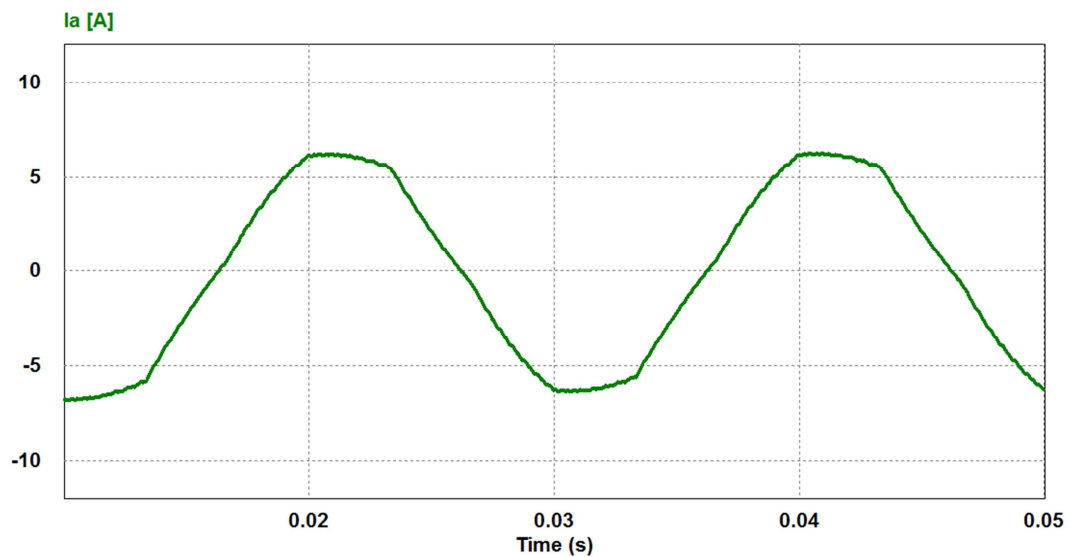


Figure 3.23 : courant de la phase Ia.

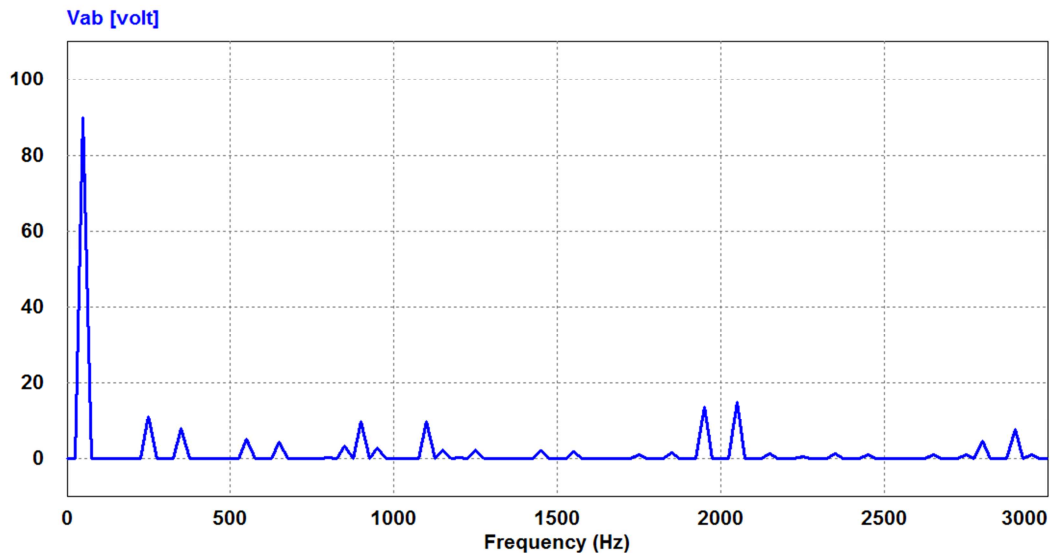


Figure 3.24 : spectre d'harmoniques de la tension composée V_{ab} , THD = 36.34 %

Interprétation des résultats :

Les formes d'ondes des tensions de sortie de l'onduleur sont représentées dans les figures (3.19), (3.20) et (3.21). La figure (3.22) montre la présence de la tension du mode commun tandis que le spectre de la tension composée générée par l'onduleur commandée par la modulation sinusoïdale classique est présenté par la figure (3.24). Le courant de la phase "A" est montré par la figure (3.23). Cette stratégie de commande permet d'augmenter la fréquence des premières harmoniques et donc facilite le filtrage.

3.5.2.2 Modulation sinusoïdale à triangles multiple :

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_c et de même amplitude A_c (crête à crête). Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_s et de fréquence f_s . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux m supérieur à trois, la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite $(m-1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_c et de même amplitude A_c .

Le taux de modulation m_a et le rapport de fréquence m_f sont donnés respectivement par les expressions suivantes :

$$m_a = \frac{A_s}{A_c(m-1)} \quad (3.8)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_s} \quad (3.9)$$

La figure (3.25) représente le principe de la modulation sinusoïdale à double triangle. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence figure (3.25-a) , qui génèrent les signaux de commande des interrupteurs. S_{2H} , S_{1H} , S_{2B} et S_{1B} représentent les signaux de commande des interrupteurs pour la phase "A" figure (3.25-b) . D'une façon similaire, on génère les signaux de commande des interrupteurs pour les phases "B" et "C".

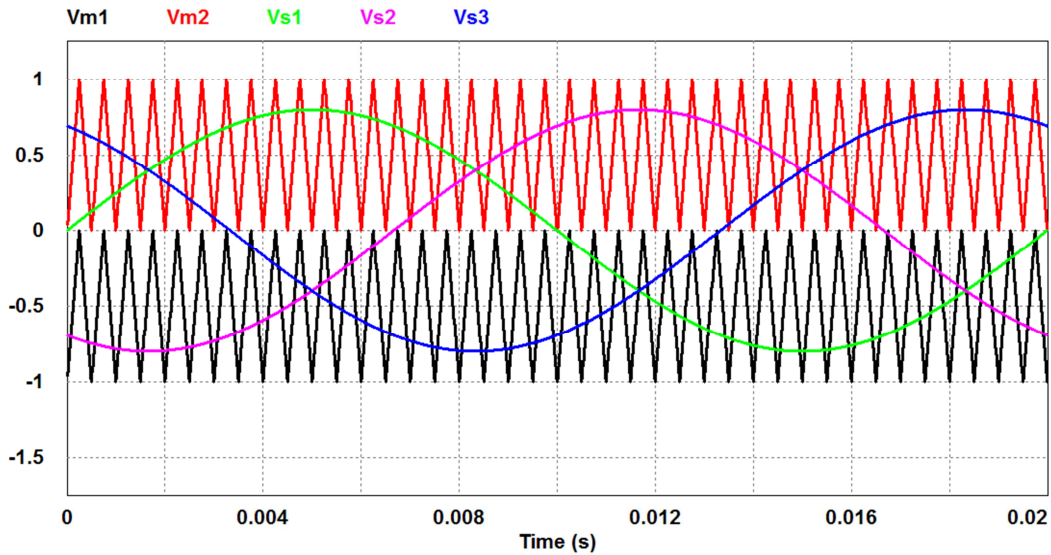


Figure 3.25-a : les signaux d'entrées pour la modulation sinusoïdale à triangles multiples (Onduleur NPC à 3 niveaux)

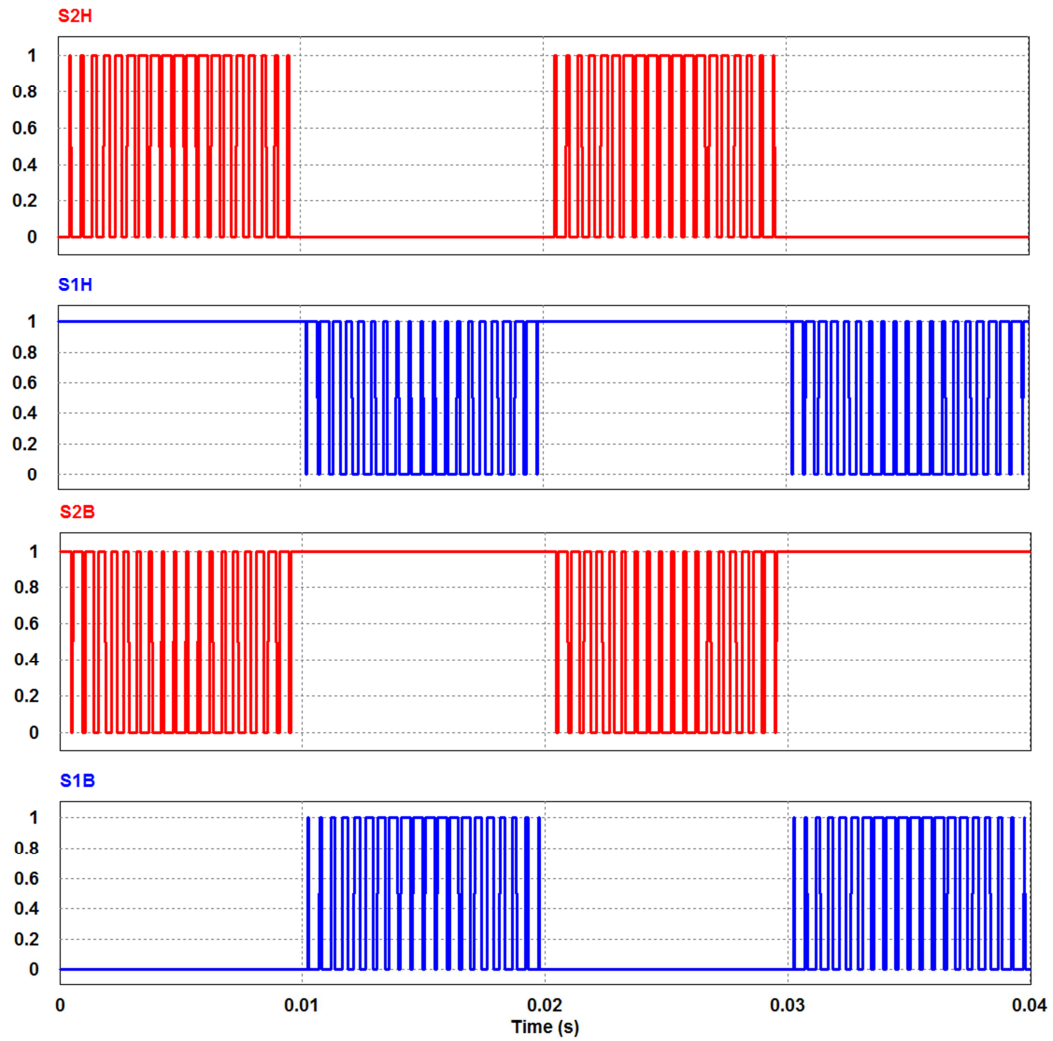


Figure 3.25-b : Génération des signaux de commande par la modulation sinusoïdale à triangles multiples (Onduleur NPC à 3 niveaux)

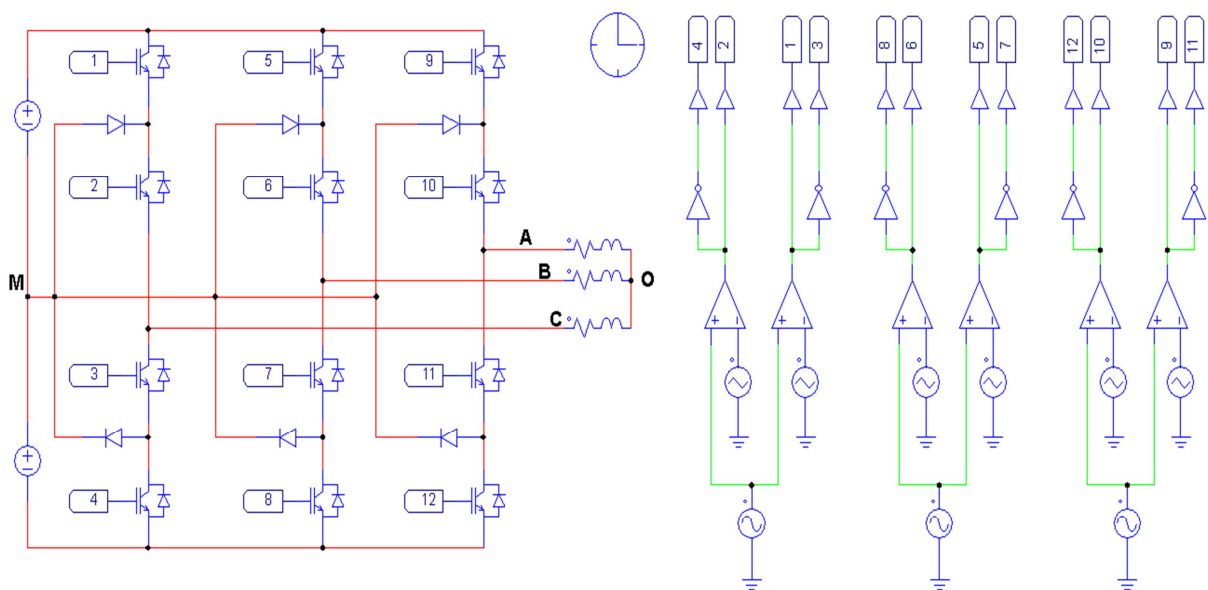


Figure 3.26 : schéma de simulation d'une commande MLI à triangle multiple d'un onduleur NPC à trois Niveaux

➤ Résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples

Les résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples sont illustrés dans les figures (3.27 – 3.32)

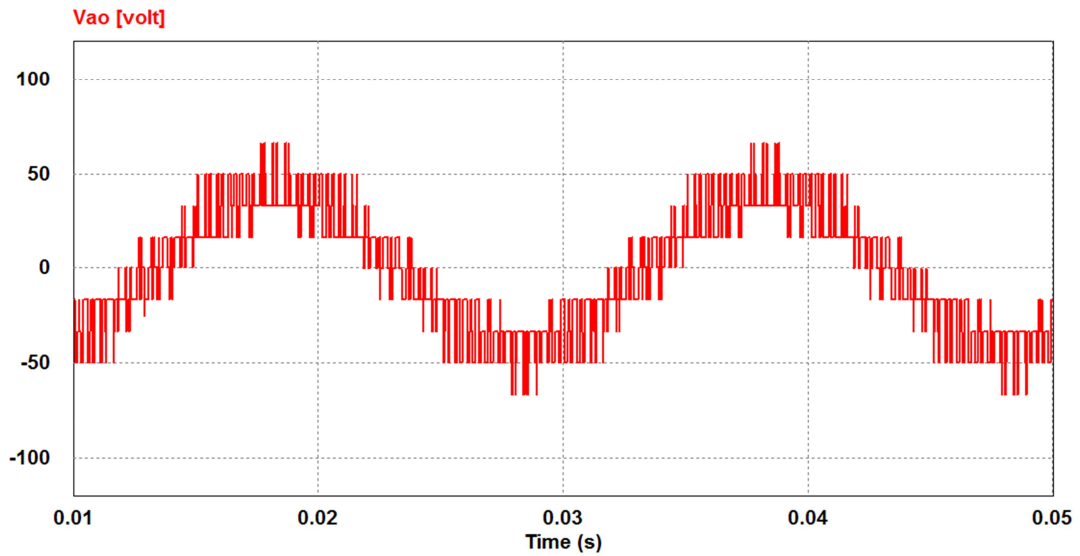


Figure 3.27 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ao}

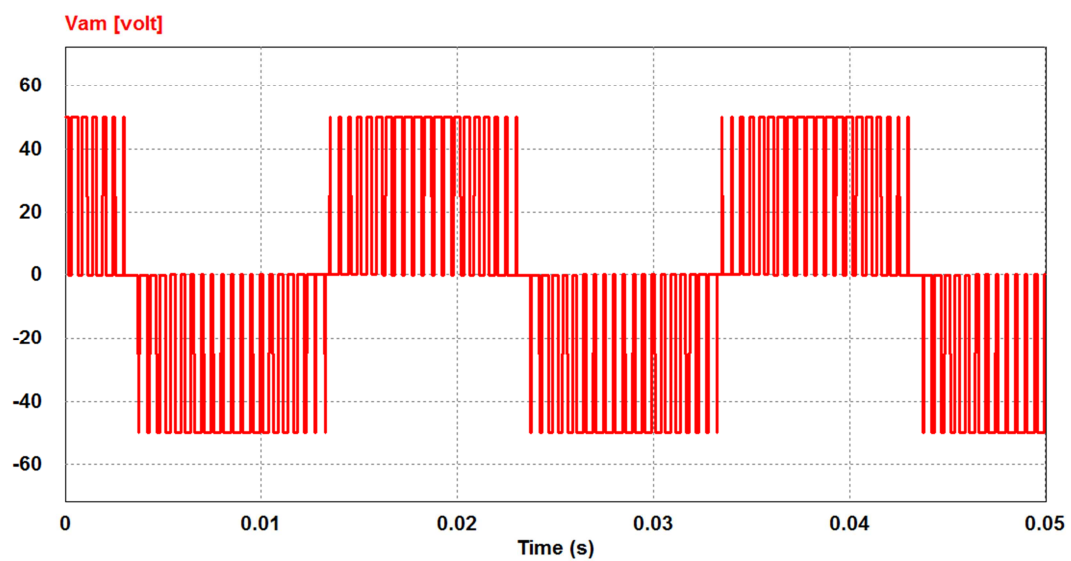


Figure 3.28 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{am}

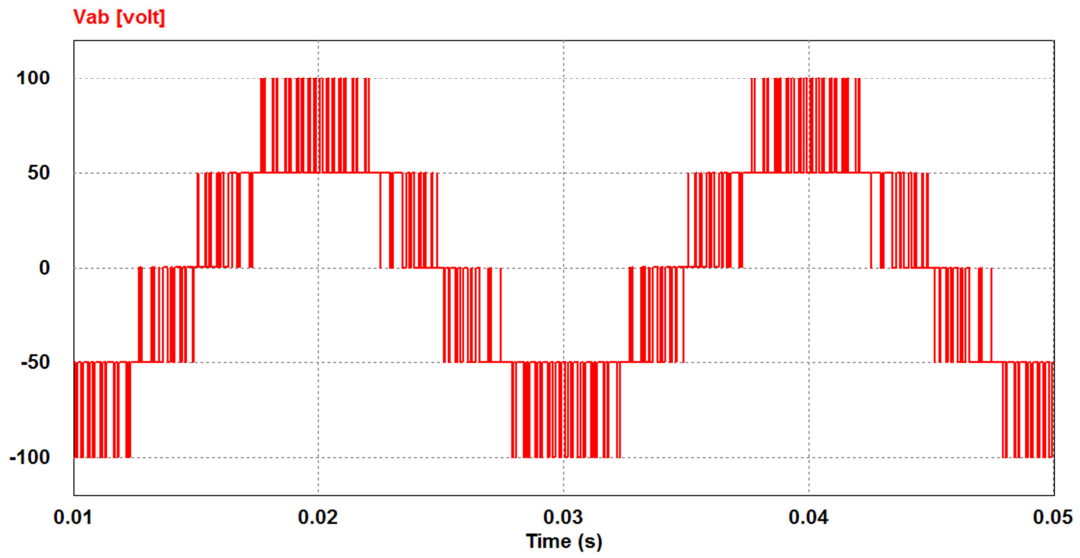


Figure 3.29 : Tension entre phase de l'onduleur V_{ab}

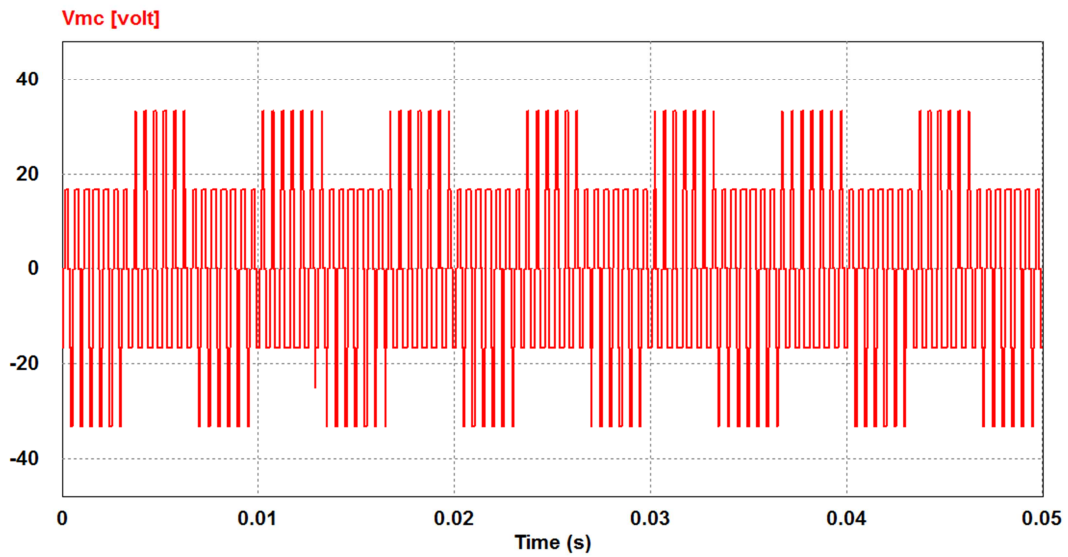


Figure 3.30 : Tension du mode commun V_{mc} .

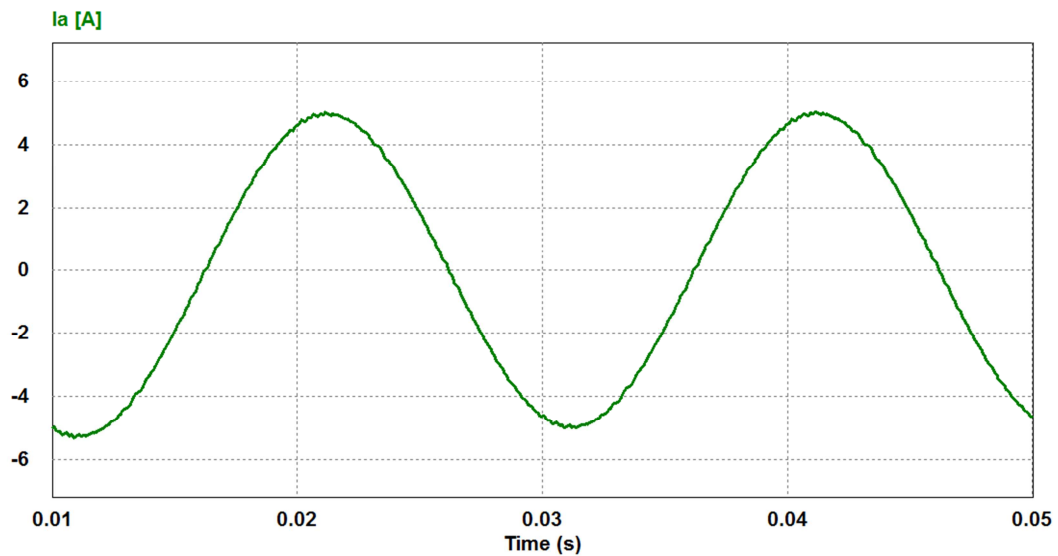


Figure 3.31 : courant de la phase I_a .

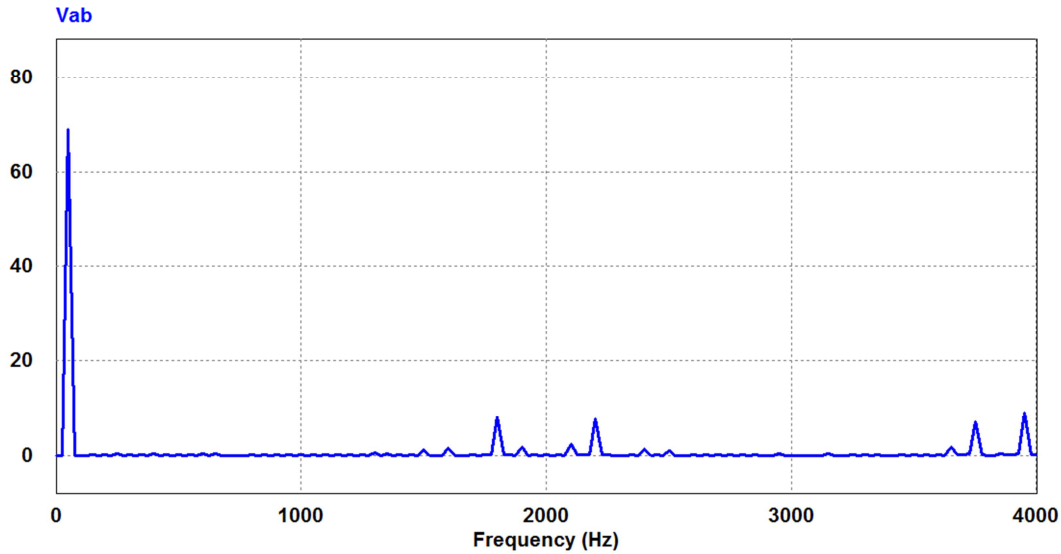


Figure 3.32 : spectre d'harmoniques de la tension composée V_{ab} , THD = 36.45 %

Interprétation de résultats :

D'après l'analyse des figures (3.27), (3.28) et (3.29) qui montrent les tensions simples et la tension composée, nous constatons que les tensions sont constituées de petits créneaux plus le m_f est augmenté, le nombre de créneaux augmente. A partir de l'analyse de la figure (3.32) qui représente le spectre d'harmonique de la tension composée, nous constatons une nette amélioration du spectre par rapport à la commande précédente (commande sinusoïdale classique), cette amélioration est due à l'atténuation des harmoniques, et nous remarquons l'amélioration de la forme du courant I_a de charge sur la figure (3.31).

Nous constatons la présence de la tension du mode homopolaire (mode commun) sur la figure (3.30), qui est due à cette technique de commande.

3.5.2.3 Modulation sinusoïdale modifiée :

Dans le but d'éliminer la tension homopolaire générée par les techniques de commande de l'onduleur présentées ci-dessus, il est recommandé d'utiliser une nouvelle technique à MLI. C'est la modulation sinusoïdale modifiée [5] [6].

Cette méthode utilise trois signaux de références, de forme sinusoïdale d'amplitudes V_{s1} , V_{s2} et V_{s3} décalés entre eux de $2\pi/3$, avec un seul signal triangulaire comme illustré sur la figure (3.34-a). En première étape, des signaux MLI intermédiaires $K1$, $K2$ et $K3$ sont obtenus par la comparaison de la porteuse avec les trois références V_{s1} , V_{s2} et V_{s3} comme le montre la figure (3.34-b), En seconde

étape la figure (3.34-c) montre la forme d'onde des états de la première phase $K1^*$ résultante qui est obtenue par l'équation suivante :

$$K1^* = (K1 - K2)/2 \quad (3.10)$$

Le même algorithme est appliqué pour les autres phases, en utilisant les équations suivantes :

$$K2^* = (K2 - K3)/2 \quad (3.11)$$

$$K3^* = (K3 - K1)/2 \quad (3.12)$$

Ainsi les états des interrupteurs de l'onduleur sont déterminés par les règles suivantes :

si $K1^* = 1$ alors $S_{2H} = 1$, et $S_{1H} = 1$

si $K1^* = 0$ alors $S_{2H} = 0$, et $S_{1H} = 1$

si $K1^* = -1$ alors $S_{2H} = 0$, et $S_{1H} = 0$

On note d'après la figure (3.34-d) que ($S_{2B} = \overline{S_{2H}}$ et $S_{1B} = \overline{S_{1H}}$), car les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

Généralisation de la technique de modulation sinusoïdale modifiée

Le principe de cette technique a été présenté pour l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC. Elle utilise une seule porteuse (signal triangulaire) pour la génération des signaux de commande. Afin de généraliser cette technique aux onduleurs de niveaux supérieurs à trois, on doit être en mesure de déterminer le nombre de porteuses requise pour chaque ordre d'onduleur. Après une étude de plusieurs cas avec différents niveaux, tous supérieurs à trois, on a réussi à établir une relation qui permet, selon le nombre de niveaux de l'onduleur m , de déterminer avec exactitude le nombre de porteuses nécessaires. Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Nombre de porteuses} = (m - 1)/ 2 \quad (3.13)$$

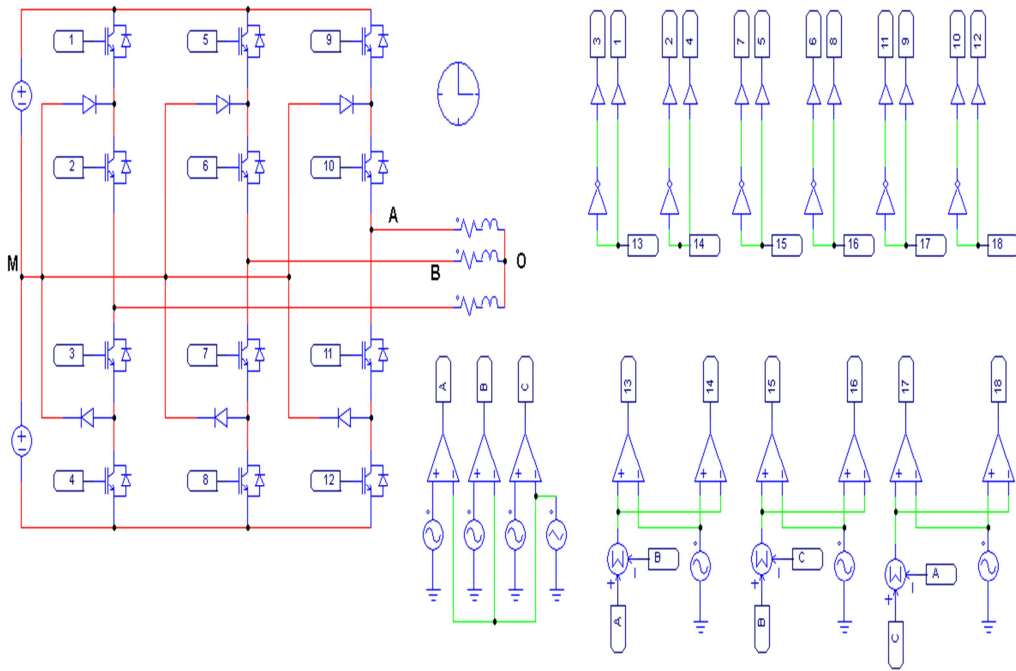


Figure 3.33 : Schéma de simulation d'une commande MLI-ST modifiée Pour un onduleur NPC à trois Niveaux

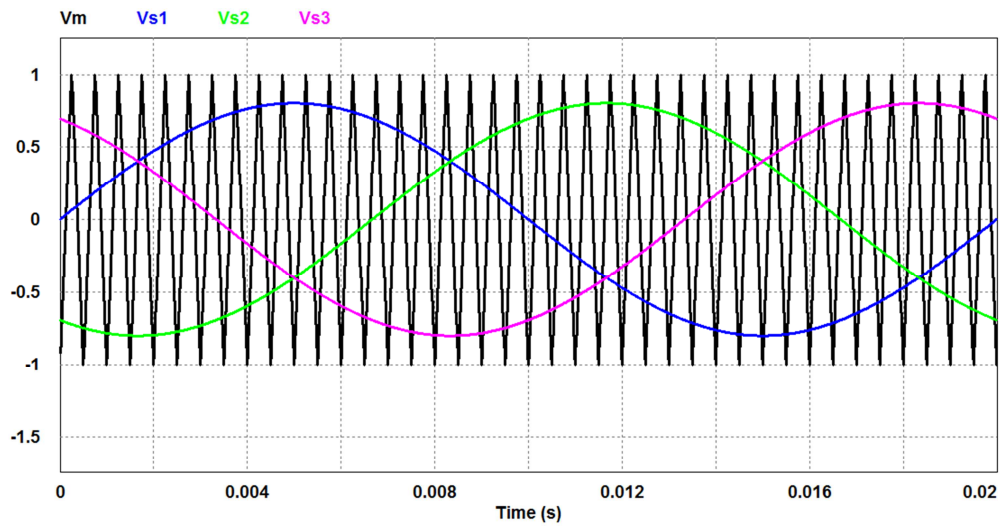


Figure 3.34-a : les signaux d'entrés

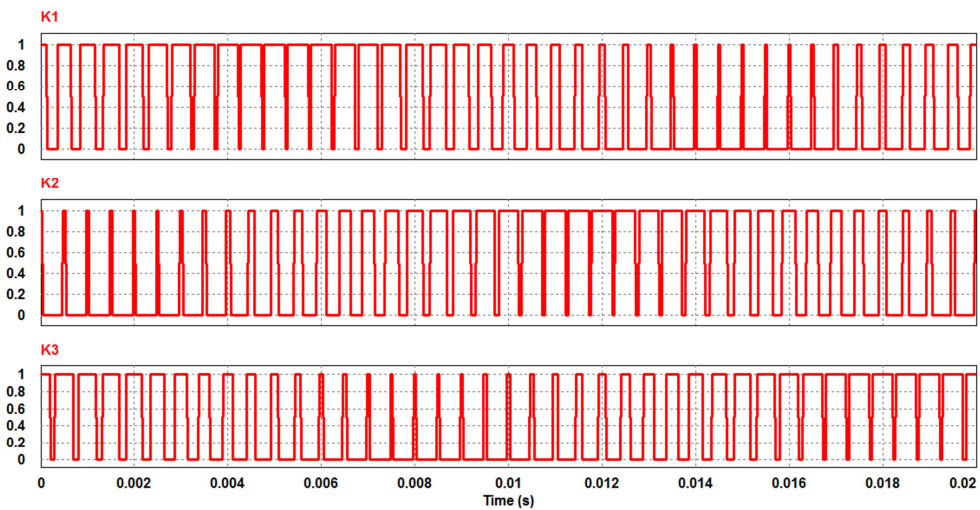


Figure 3.34-b : Les signaux intermédiaires

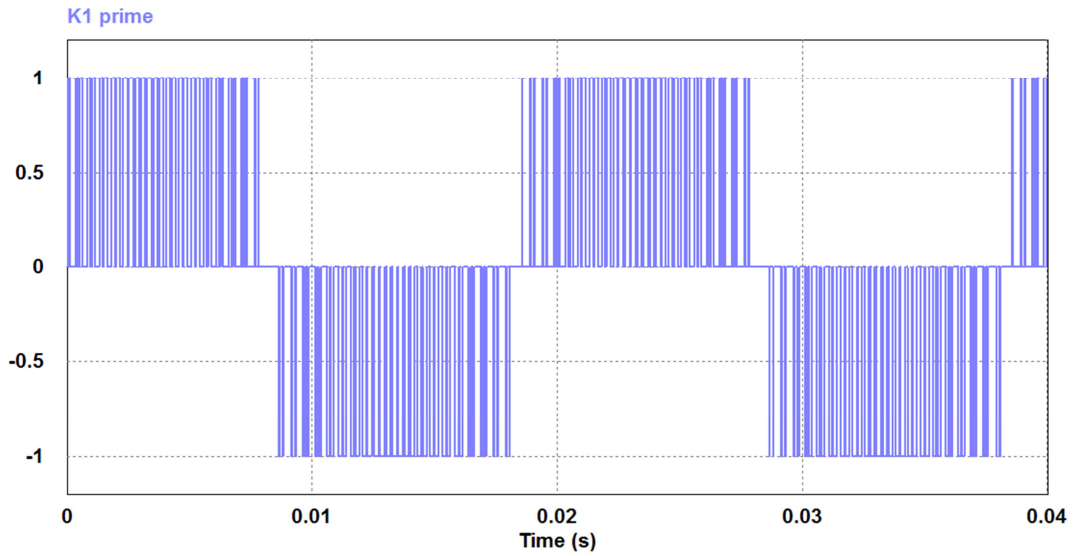


Figure 3.34-c : la forme d'onde des états de la première phase

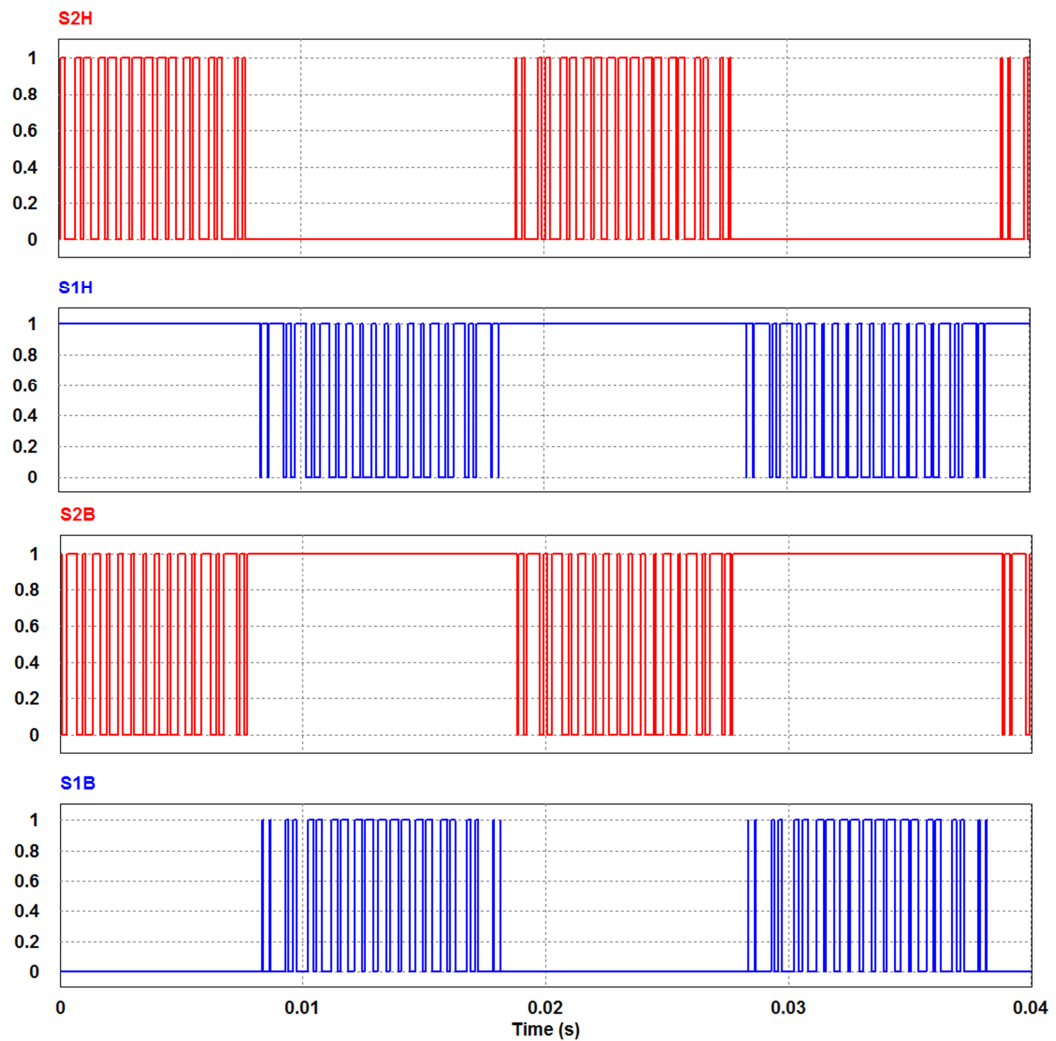


Figure 3.34-d : Génération des signaux de commande par la modulation sinusoïdale modifiée (Onduleur NPC à 3 niveaux)

➤ Les résultats de simulation de l'onduleur trois niveaux commandés par la Modulation sinusoïdale modifiée sont présentés dans les figures (3.34) ÷ (3.39) :

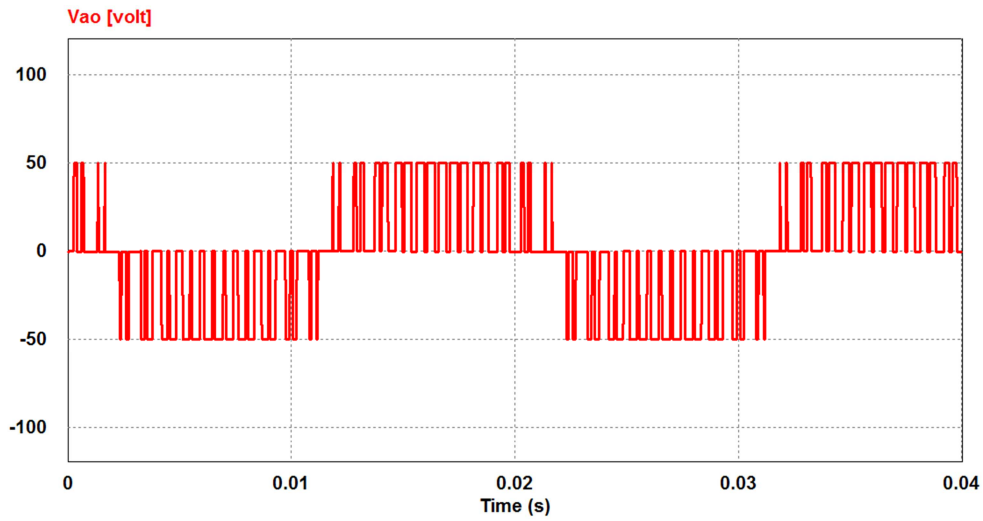


Figure 3.35 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ab}

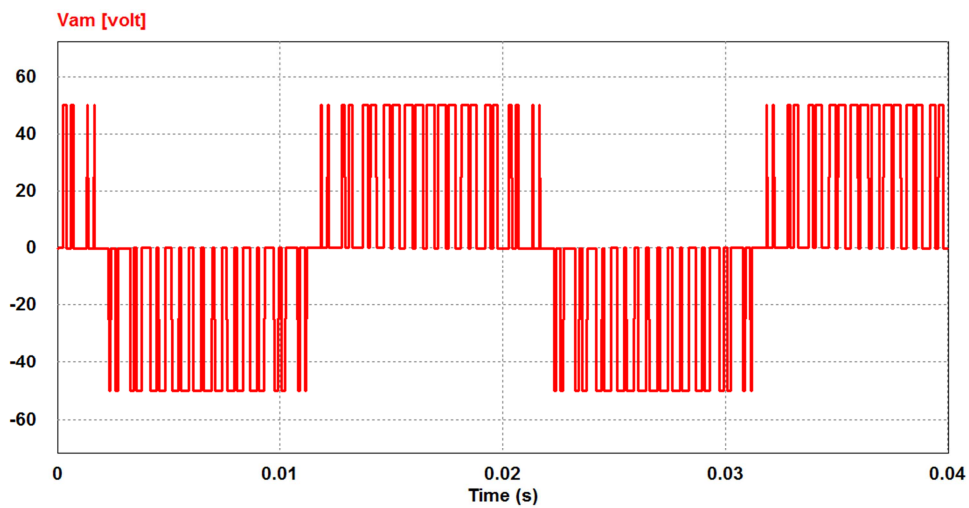


Figure 3.36 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{am}

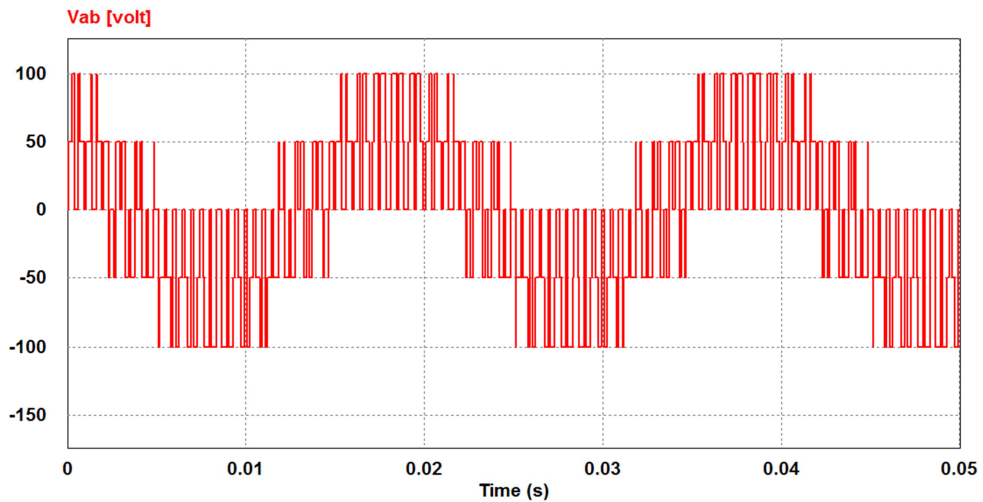


Figure 3.37 : Tension entre phase de l'onduleur V_{ab}

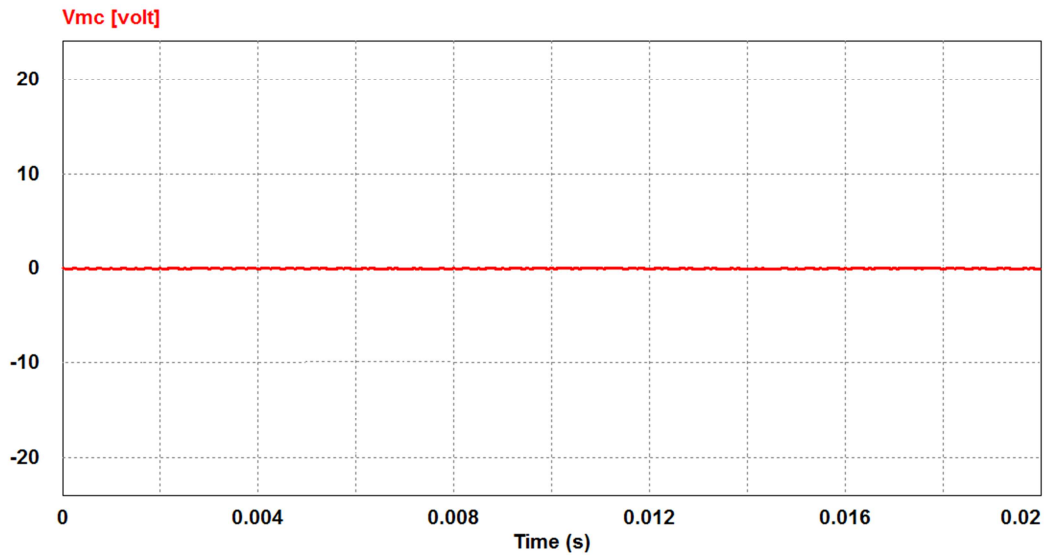


Figure 3.38 : Tension du mode commun V_{mc} .

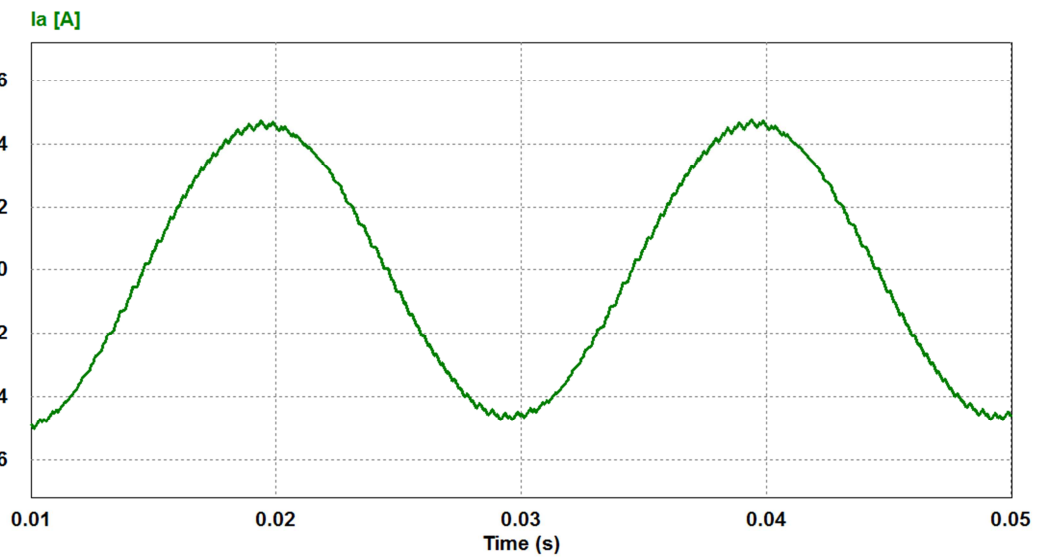


Figure 3.39 : Le courant de la phase I_a

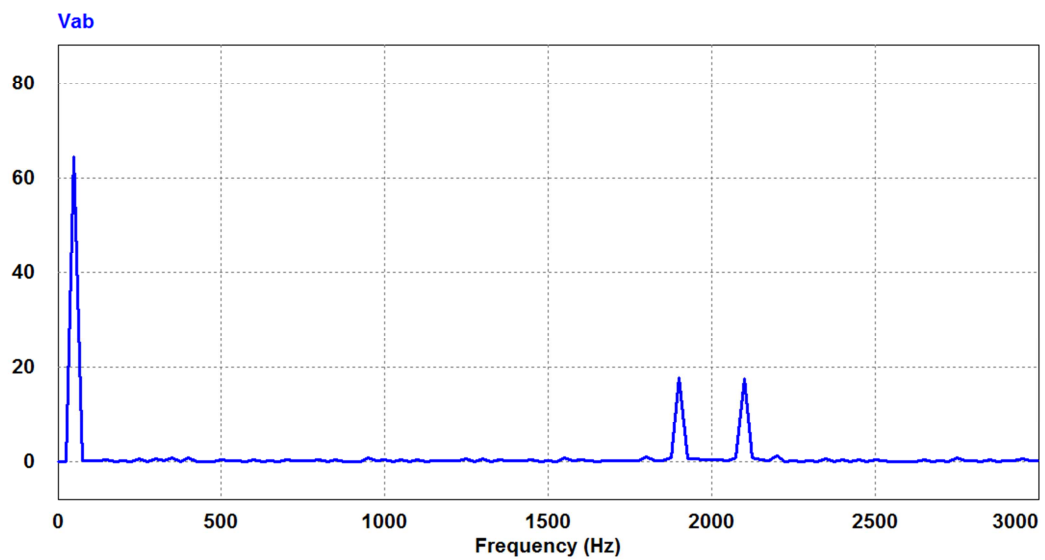


Figure 3.40 : Le spectre d'harmoniques de la tension composée V_{ab} , THD = 46.16 %

Interprétation des résultats :

La simulation de l'onduleur NPC à trois niveaux commandé par la technique de modulation sinusoïdale modifiée donne les résultats présentés ci-dessus. On y représente les tensions de sortie de l'onduleur V_{ao} , V_{am} et V_{ab} ainsi que la tension du mode homopolaire V_{mc} , sur les figures (3.35), (3.36), (3.37) et (3.38) respectivement. L'avantage de cette commande est dans l'atténuation de la tension du mode homopolaire, et l'annulation des harmoniques d'ordre inférieure. La figure (3.39) montre l'amélioration du courant de charge.

3.6 Interprétation des résultats des différentes commandes :

L'analyse des courbes représentant la tension homopolaire est à la base de la comparaison des quatre techniques de modulation utilisées pour la commande de l'onduleur NPC à trois niveaux. Les résultats présentés ci-dessus montrent l'importance de la tension homopolaire V_{mc} pour les stratégies de modulation (en pleine onde, classique, triangle multiple et modifiée). Par contre la modulation sinusoïdale modifiée, la tension du mode commun est annulée par cette commande. La modulation sinusoïdale modifiée, élimine complètement toutes les harmoniques, à l'exception de celles autour de l'ordre de la fréquence de commutation. Donc, les résultats de simulation démontrent que cette technique améliore la qualité de la tension de sortie et réduit considérablement la tension du mode homopolaire.

3.7 Conclusion :

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacune correspond à un type d'application déterminé où permettant d'atteindre des performances recherchées. nous avons étudié les différentes stratégies de commande de l'onduleur trois niveaux de type NPC :

- ✓ La première stratégie de commande était la commande pleine onde, qui représente des avantages par rapport à celle d'un onduleur à deux niveaux, le spectre d'harmonique de la tension composée est amélioré.
- ✓ La deuxième stratégie de commande est la commande MLI triangulo-sinusoïdale avec ces trois techniques (classique, triangle multiple et modifiée). Les résultats de simulation obtenus montrent la supériorité de la technique de commande à MLI modifiée dans l'annulation des harmoniques sauf de celles autour de l'ordre de la fréquence de commutation.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux-machine asynchrone

3.8 Bibliographie du Chapitre III :

- [1] Arnaud Videt, " Variateur de vitesse à impact électromagnétique réduit : onduleur multiniveaux et nouvelles stratégies de modulation", Ph.D Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2008.
- [2] M.Benghanem, "Etude et Analyse D'un Onduleur à Trois Niveaux Utilisé Comme Compensateur Statique D'énergie Réactive", USTOMB, Thèse De Magister 2001.
- [3] B. Suh, G. Sinha, M Manjrekar, T. Lipo, "Multilevel Power Conversion - An Overview of Topologies And Modulation Strategies", 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments (OPTIM'98). Vol. 2, pp. AD11-AD24, 1998.
- [4] H. D. Lee and S.-K. Sul, "A Common Mode Voltage Reduction in Boost Rectifier/Inverter System by Shifting Active Voltage Vector in a Control Period", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, November 2000.
- [5] A. L. Julian, G. Oriti and T. A. Lipo, "Elimination of Common-Mode Voltage in ThreePhase Sinusoidal Power Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 14, No. 5, Sep
- [6] Y. V. Siva Reddy, " A New Space Vector Pulse width Modulation for Reduction of Common Mode Voltage in Direct Torque Controlled Induction Motor Drive", Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 07, N°. 01, pp.34-38 Winter-Spring 2008.

Table des matières

Chapitre IV : Modélisation et simulation de l'ensemble onduleur multiniveaux-machine asynchrone

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction..... | 55 |
| 4.2 Généralités sur les machines asynchrones..... | 55 |
| 4.2.1 Description et principe de fonctionnement..... | 55 |
| 4.2.2 Hypothèse simplificatrices..... | 56 |
| 4.3 Modèle triphasé de la machine asynchrone..... | 56 |
| 4.3.1 Equations des tensions..... | 57 |
| 4.3.2 Equations des flux..... | 58 |
| 4.3.3 Equation d'état du modèle de la machine asynchrone..... | 59 |
| 4.3.4 Expression du couple..... | 60 |
| 4.3.5 Equation du mouvement..... | 60 |
| 4.4 Simulation de la machine asynchrone connectée à un réseau triphasé équilibré.... | 60 |
| 4.4.a) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$ | 62 |
| 4.4.b) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 80\text{ Nm}$ | 63 |
| 4.4.c) Interprétation des résultats de simulation..... | 64 |
| 4.5 Simulation de la machine asynchrone à cage alimenté par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifié..... | 65 |
| 4.5.a) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifié : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$ | 66 |
| 4.5.b) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 80\text{Nm}$ | 69 |
| 4.5.c) Interprétation des résultats de simulation..... | 71 |
| 4.6 Conclusion..... | 72 |
| 4.7 Bibliographie du chapitre IV..... | 72 |

4.1 Introduction:

La modélisation de la machine asynchrone est une phase indispensable. Il est donc évident que cette étape est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse.

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Vérifier sa validité.

Dans ce chapitre, sera présentée la simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée

4.2 Généralités sur les machines asynchrones

4.2.1 Description et principe de fonctionnement:

Le moteur asynchrone comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator (primaire), portant un bobinage triphasé logé dans les encoches, relié à la source d'alimentation, et l'autre mobile ou rotor (secondaire) qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer. Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction :

- La machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le secondaire (rotor) est en court-circuit.
- La vitesse de rotation Ω_s du champ tournant d'origine statorique, rigidement liée à la fréquence f_s de tension triphasée d'alimentation.

$$\Omega = 60 \cdot f_s / np \quad (tr/min) \quad (4.01)$$

On désigne par "np" le nombre de paires de pôles de chacune des enroulements des phases statoriques.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse Ω_m , différente de Ω_r (asynchrone), l'application de la loi de Faraday aux enroulements rotoriques montre que ceux-ci deviennent le siège d'un système de forces électromotrices triphasées, engendrant elles-mêmes trois courants rotoriques, d'après la loi de LENZ ces derniers s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire la vitesse relative de l'induction tournante statorique par rapport au rotor. Ceci va entraîner le rotor vers la poursuite du champ et essayer de le faire tourner à la même vitesse Ω_s ($\Omega_s = \omega_s / p$), cette vitesse ne peut être atteinte ; car il n'y aurait plus de courants induits, donc plus de force, et le rotor tourne à

une vitesse Ω_r ($\Omega_r = \omega_r / np$) inférieure à Ω_s , il n'est pas au synchronisme du champ : la machine est dite asynchrone.

De ce fait, selon que Ω_r est inférieure (hypo-synchrone) ou supérieure (hyper synchrone) à Ω_s , la machine développe respectivement un couple moteur tendant à accroître Ω_r , ou un couple résistant tendant à réduire Ω_r , de toute évidence le couple électromagnétique s'annule à l'égalité de vitesse. L'échange énergétique avec le réseau donne le signe de l'écart ($\Omega_s - \Omega_r$). On caractérise ainsi le fonctionnement asynchrone par le glissement g défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (4.02)$$

Dans les conditions nominales de fonctionnement de la machine en moteur, le glissement exprimé en pourcent est de quelques unités. Une augmentation de la charge mécanique provoque une augmentation du glissement et des pertes joules dans les enroulements statoriques et rotoriques.

4.2.2 Hypothèse simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [1]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet de plus que les forces magnétomotrices f.m.m créées par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

4.3 Modèle triphasé de la MAS :

Pour avoir le modèle simplifié de la machine on utilise les hypothèses précédentes :

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une machine asynchrone nous facilite largement son étude pour sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. Les axes rotoriques tournent avec Ω par rapport aux axes statoriques fixes comme le montre la Figure (4.01)

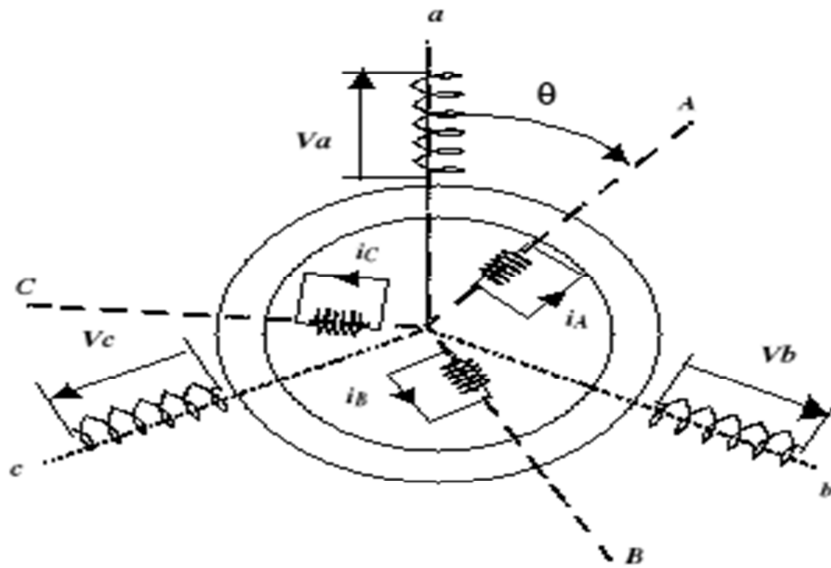


Figure 4.01 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

4.3.1 Equations des tensions :

En partant de la Figure (4.01), les équations électriques du modèle de la machine asynchrone triphasée s'écrivent respectivement par rapport au stator avec l'indice (s) et par rapport au rotor avec l'indice (r) comme suit :

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.04)$$

Ou sous la forme compacte comme suit :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s]$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.05)$$

Ou sous la forme compacte comme suit :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r]$$

Avec :

ra, rb,rc : trois phases du rotor.

sa, sb, sc : trois phases du stator.

4.3.2 Equations des flux

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

Pour le stator :

$$[\Phi_s] = [L_{cs}].[I_s] + [M_{sr}].[I_r]$$

Où :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_{cs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.06)$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_r] = [L_{cr}].[I_r] + [M_{rs}].[I_s]$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.07)$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

avec:

$$L_{cs} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \quad (4.08)$$

$$L_{cr} = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad (4.09)$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\theta \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Avec :

θ : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases «as» et «ar» pris comme axes des références.

M : valeur maximale de l'inductance mutuelle lorsque les deux axes (ar et as) se coïncident.

4.3.3 Equation d'état du modèle de la MAS :

La représentation du modèle de la machine dépend du référentielle choisi. On choisit le repère liée au stator (α, β) ce qui ne permet d'obtenir des grandeurs instantanées, considérons les courants ($I_{s\alpha}, I_{s\beta}$) les flux rotorique ($\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$) et la vitesse mécanique comme variable d'état, les tensions ($V_{s\alpha}, V_{s\beta}$).

$$\begin{cases} dI_{s\alpha} dt = -\frac{R_t}{\sigma L_s} I_{s\alpha} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{r\alpha} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \Phi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{s\alpha} \\ dI_{s\beta} dt = -\frac{R_t}{\sigma L_s} I_{s\beta} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \Phi_{r\beta} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \Phi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{s\beta} \\ \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} = \frac{M}{v} I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Phi_{r\alpha} - \omega \Phi_{r\beta} \\ \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} = \frac{M}{v} I_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Phi_{r\beta} + \omega \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (4.11)$$

Où :

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ est la coefficient de dispersion.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ est la constate de temps rotorique

$R_t = R_s + \frac{M^2}{L_r}$ est la résistance totale ramenée au stator.

En identifiant le système (I-27) à la forme $dX dt = AX + BU$, on aura :

Le vecteur d'états $X = [I_{s\alpha}, I_{s\beta}, \Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}]^t$, A la matrice dynamique du système, le vecteur de commande $U = [v_{s\alpha}, v_{s\beta}]^t$, et B la matrice d'application de commande, donc :

$$X = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} ; U = \begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_t}{\sigma L_s} & 0 & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \\ 0 & -\frac{R_t}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}$$

4.3.4 Expression du couple:

Pour le couple électromécanique :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\Phi_{r\alpha}.I_{s\beta} - \Phi_{s\beta}.I_{r\alpha}) \quad (4.13)$$

4.3.5 Equation du mouvement :

L'étude du comportement de la machine asynchrone aux différents régimes de fonctionnement en particulier le régime transitoire, met en évidence l'équation du mouvement définie comme suit [2] :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (4.14)$$

4.4 Simulation de la machine asynchrone connectée à un réseau triphasé équilibré

On utilise le logiciel de simulation de circuits électriques PSIM pour analyser les grandeurs électriques (tension, courant, puissances) en amont d'un moteur asynchrone connecté en direct à un réseau triphasé.

Application support de la simulation :

Un moteur asynchrone triphasé est connecté en direct au réseau 400 V. Il entraîne une charge dont le couple est indépendant de la vitesse (treuil).

- La puissance nominale du moteur est : $P_N = 15 \text{ kW}$;
- Le nombre de pôles est : $P = 6$.

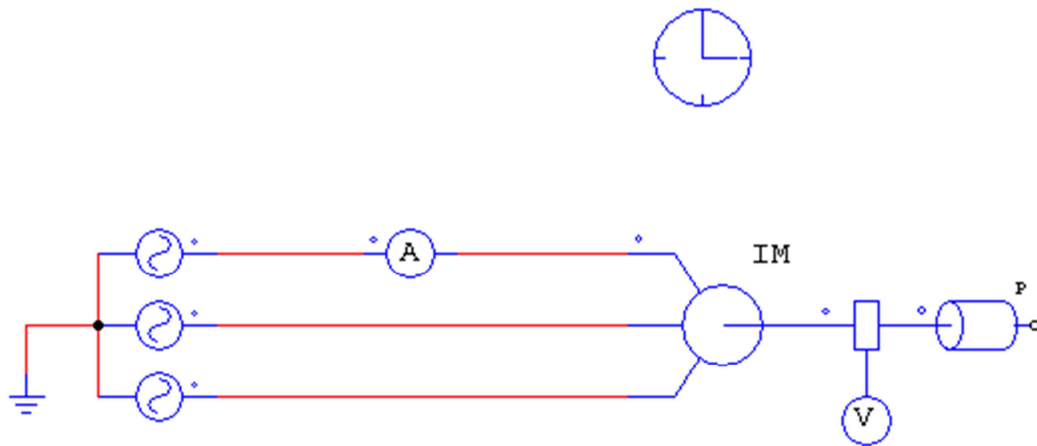


Figure 4.02: Schéma de simulation d'un moteur asynchrone connecté en direct à un réseau triphasé

Dans le logiciel PSIM, le moteur est modélisé par son schéma équivalent. Les valeurs numériques des éléments du schéma équivalent sont données ci-dessous :

| <i>Paramètre du moteur asynchrone</i> | <i>Valeur</i> |
|---|-----------------------------|
| • Résistance du stator | $R_s = 0,4 \Omega$ |
| • Inductance de fuite du | $L_s = 0$ |
| • Résistance du rotor | $R_r = 0,28 \Omega$ |
| • Inductance du rotor | $L_r = 5,5$ |
| • Inductance magnétisante | $L_m = 50 \text{ mH}$ |
| • Moment d'inertie du rotor $J_r = 0,19 \text{ kg.m}^2$ | $J_r = 0,19 \text{ kg.m}^2$ |

Tableau 4.01: Les valeurs numériques des éléments du schéma

4.4.a) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 0\text{Nm}$

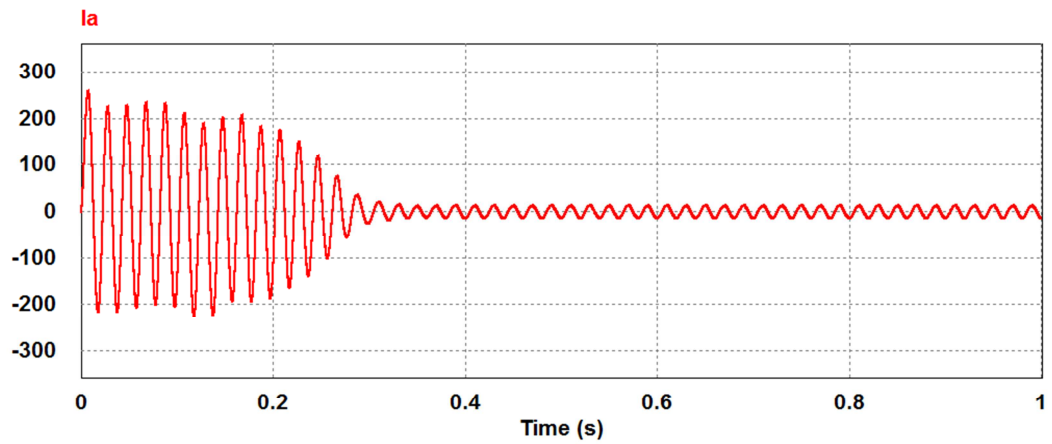


Figure 4.03: Courants de charge $I_a(t)$

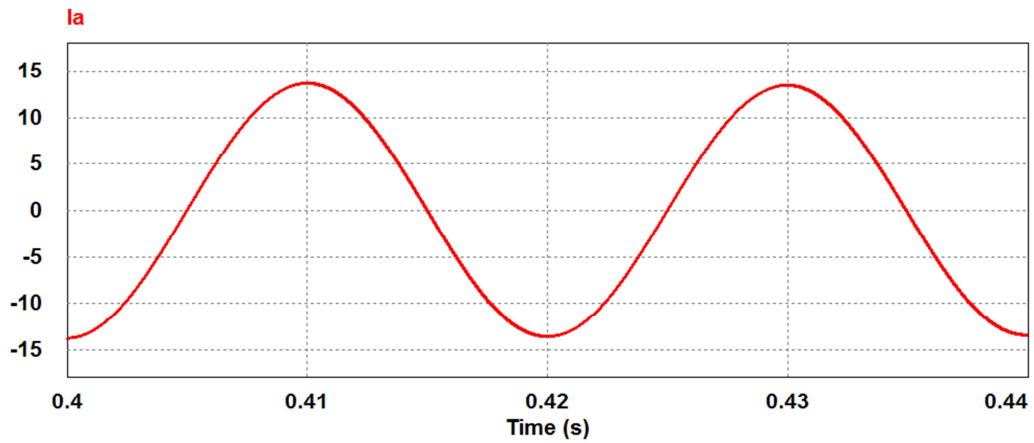


Figure 4.04: Courants de charge $I_a(t)$ dans le régime permanent

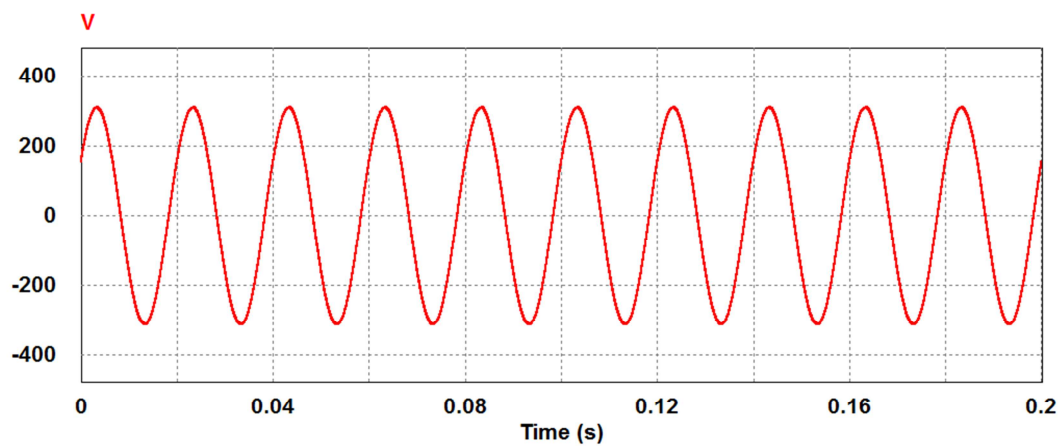


Figure 4.05: Tension de charge $V(t)$

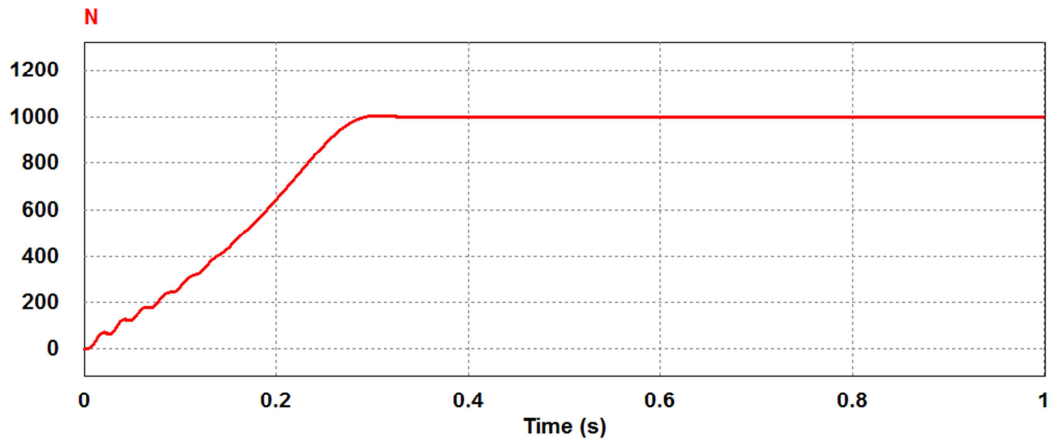


Figure 4.06 : La vitesse de rotation.

4.4.b) Résultats de la simulation : pour un couple résistant $C_r = 80$ Nm

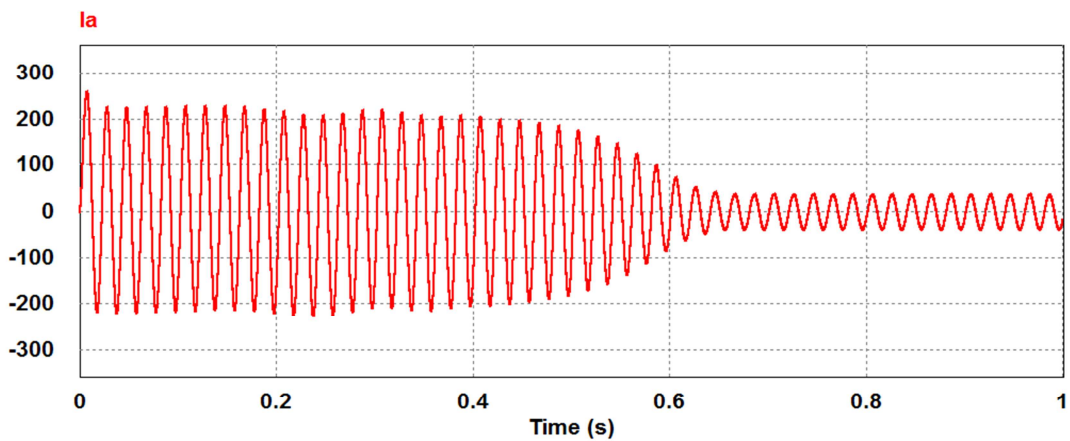


Figure 4.07: Courants de charge $I_a(t)$ pour $C_r = 80$ Nm

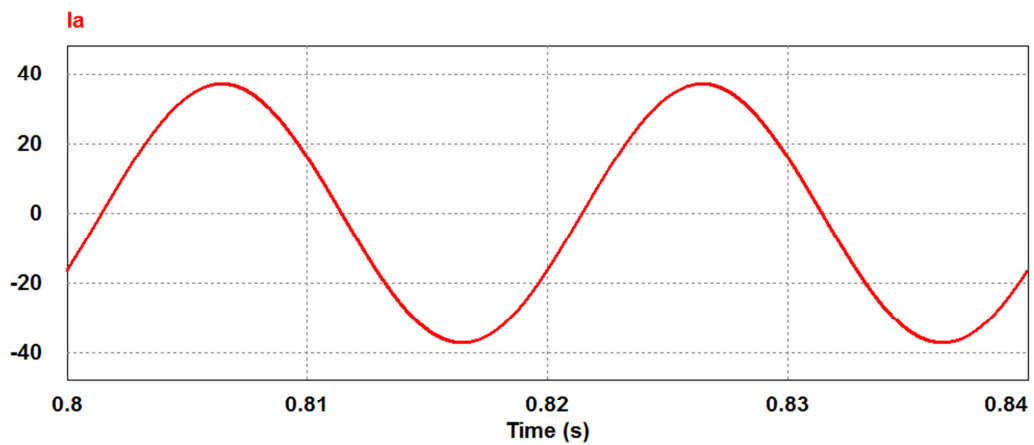


Figure 4.08: Courants de charge $I_a(t)$ dans le régime permanent pour $C_r = 80$ Nm

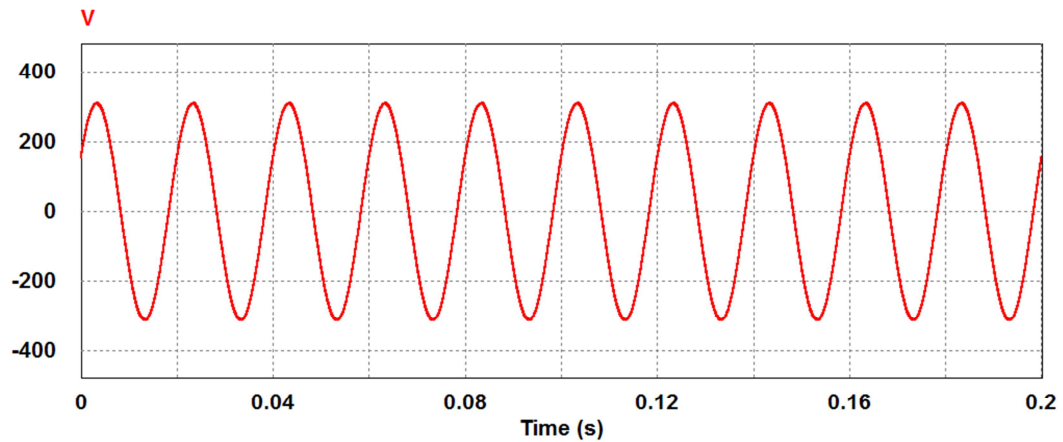


Figure 4.09: Tension de charge $V(t)$

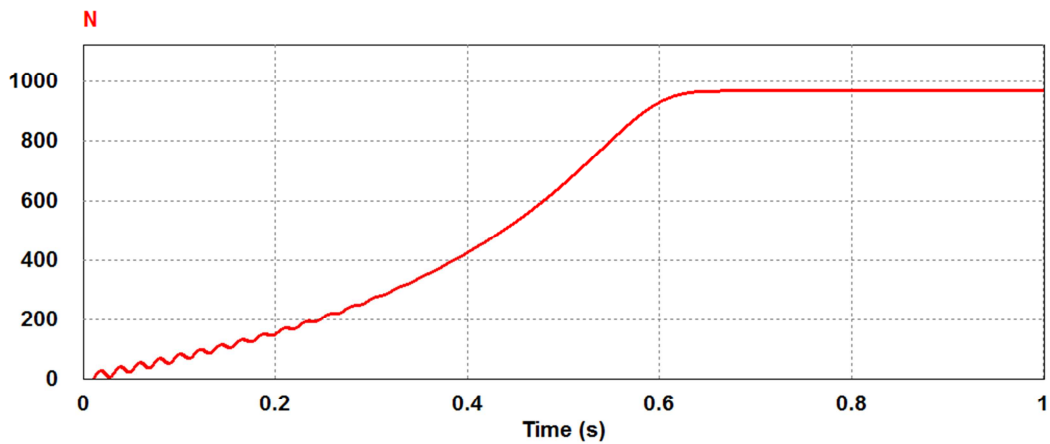


Figure 4.10: La vitesse N de rotation de la MAS

4.4.c) Interprétation des résultats:

Lors du démarrage, on constate des pics de courant importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.

La vitesse : En régime transitoire, on remarque un croisement linéaire de vitesse, avec une tendance à osciller à cause de l'inertie des masses tournantes et du coefficient d'amortissement du aux faibles valeurs des flux.

L'augmentation de la charge à 80 Nm fait une augmentation du courant à une valeur qui peut attendre la valeur de 38 A.

4.5 Simulation de la machine asynchrone à cage alimenté par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée:

Le schéma de simulation est présenté par la figure (4.11)

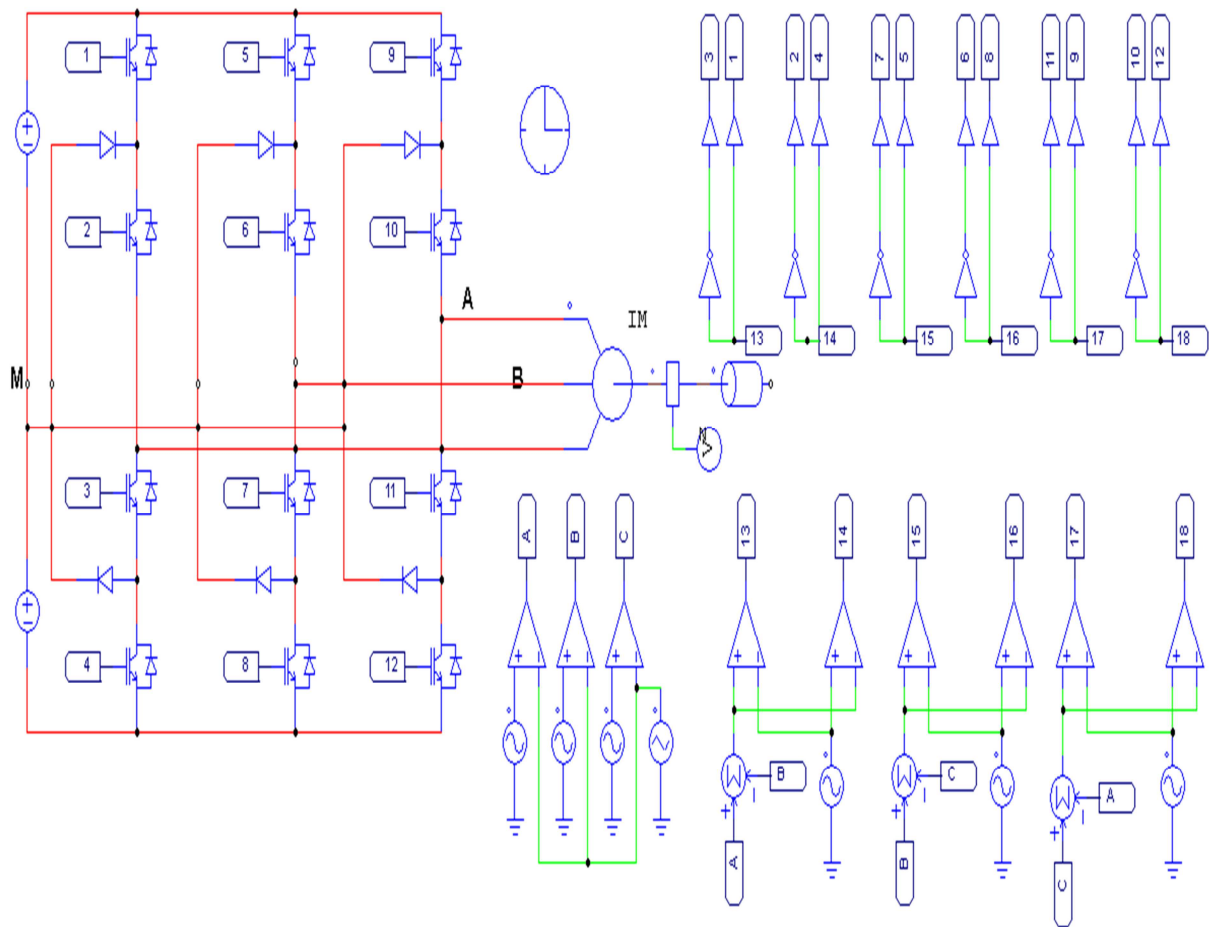


Figure 4.11 : Schéma de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur de 3 niveaux commandé par La MLI modifiée.

4.5.a) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 0Nm$

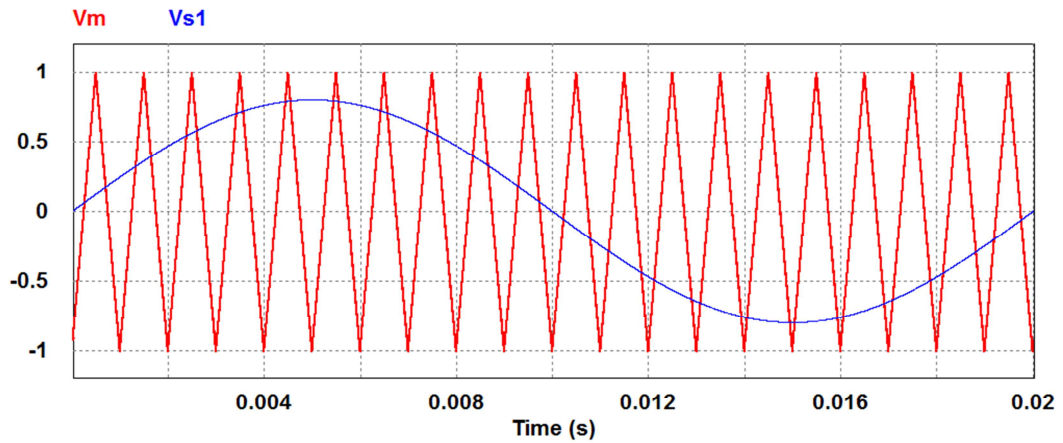


Figure 4.12 : Les signaux de commande de l' Onduleur

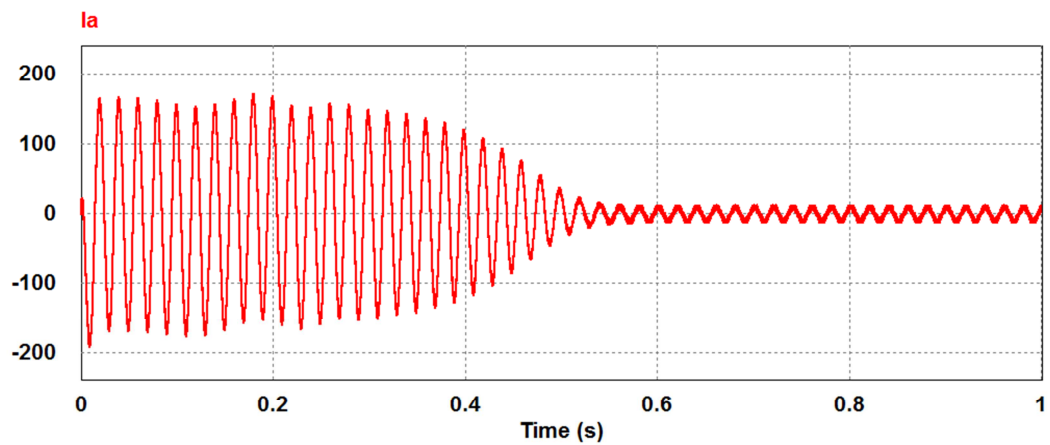


Figure 4.13 : Le courant de la phase I_a

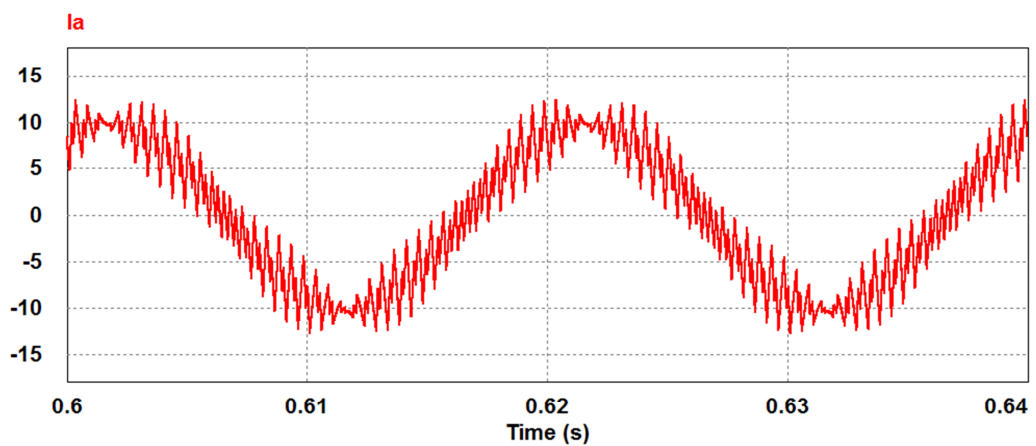


Figure 4.14: Courant de charge $I_a(t)$ dans le régime permanent

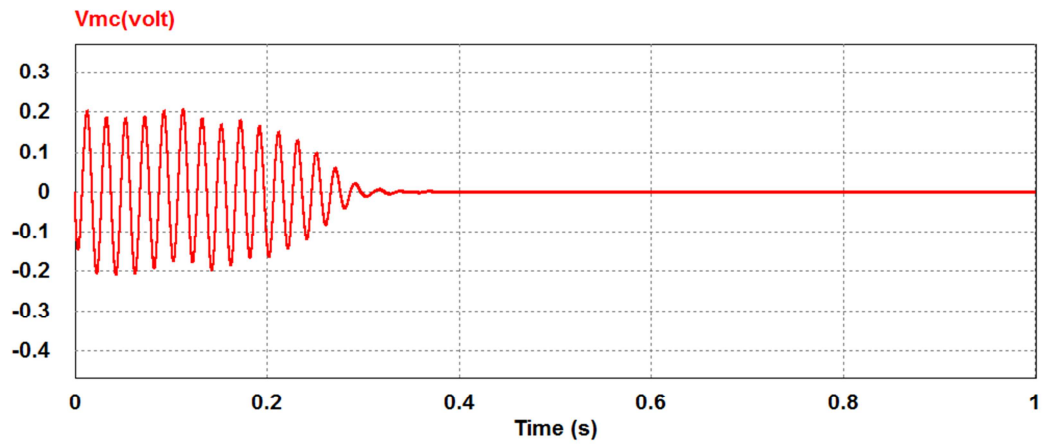


Figure 4.15 : Tension du mode commun $V_{mc}(t)$.

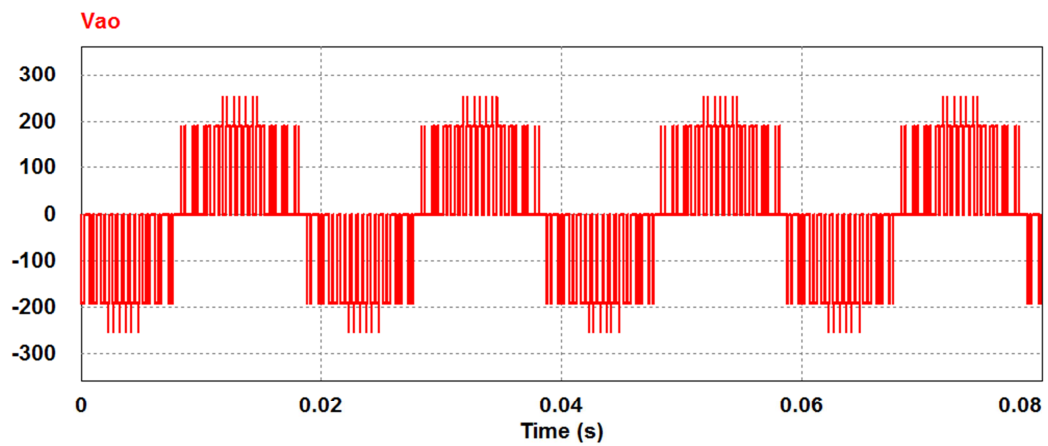


Figure 4.16 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ao}

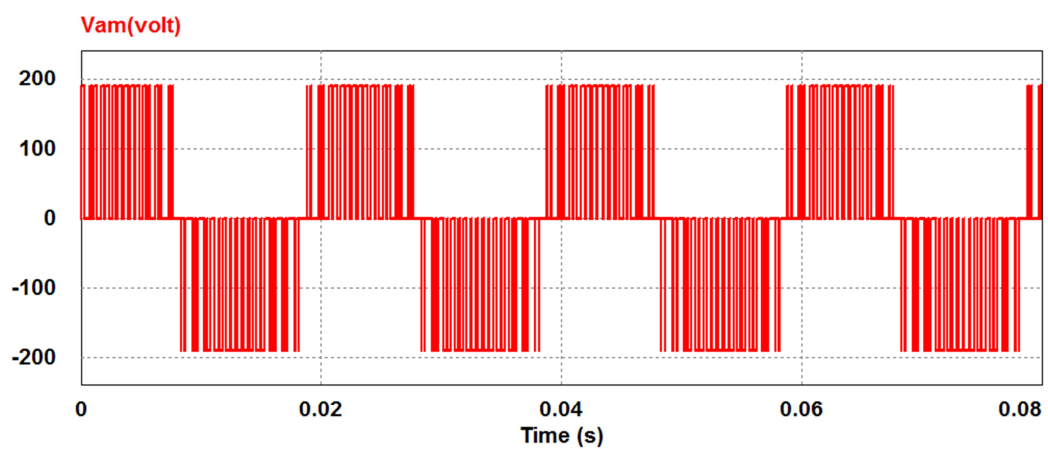


Figure 4.17 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{am}

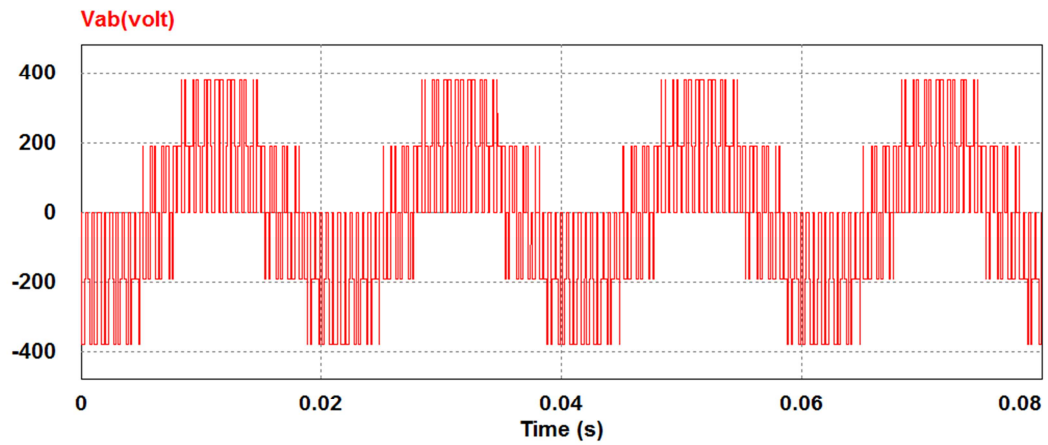


Figure 4.18 : Tension composée de l'onduleur V_{ab}

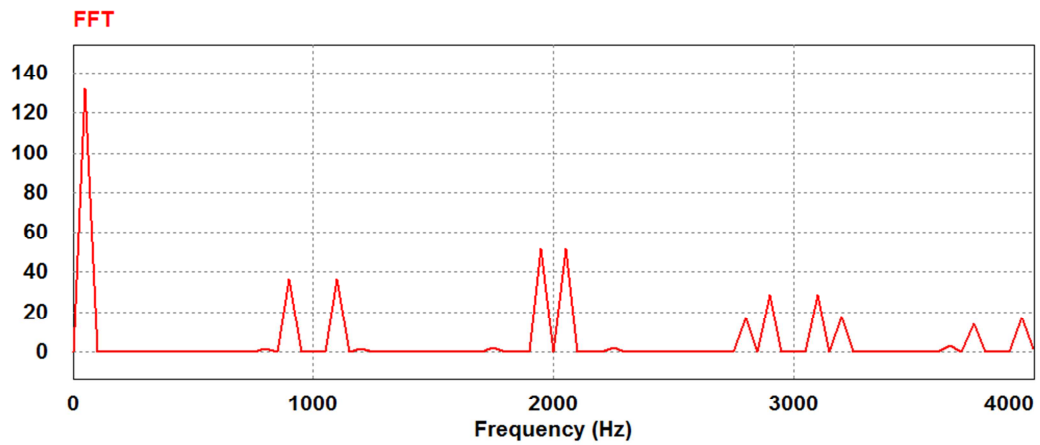


Figure 4.19 : Spectre d'harmoniques de la tension composée V_{ab} , THD = 31.42 %

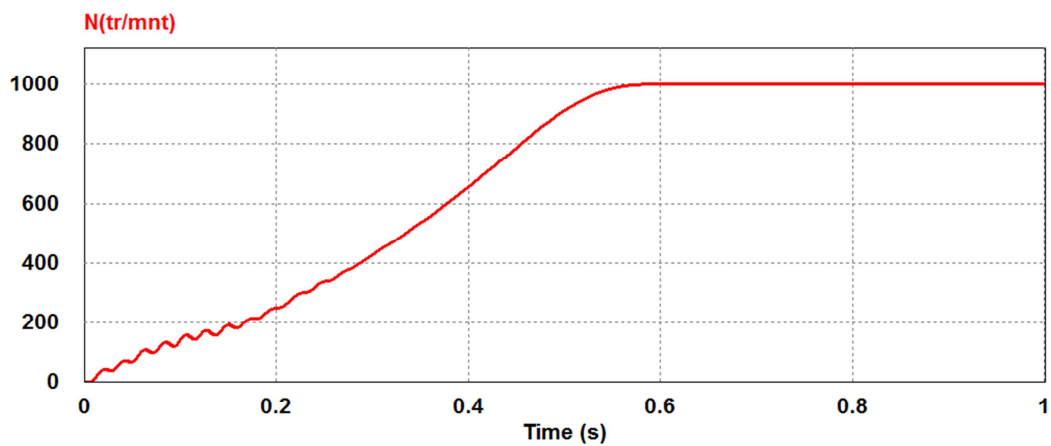


Figure 4.20 : La vitesse de rotation de la machine N

4.5.b) Résultat de simulation d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur à 3 niveaux commandé par La MLI modifiée : pour un couple résistant $C_r = 80\text{Nm}$

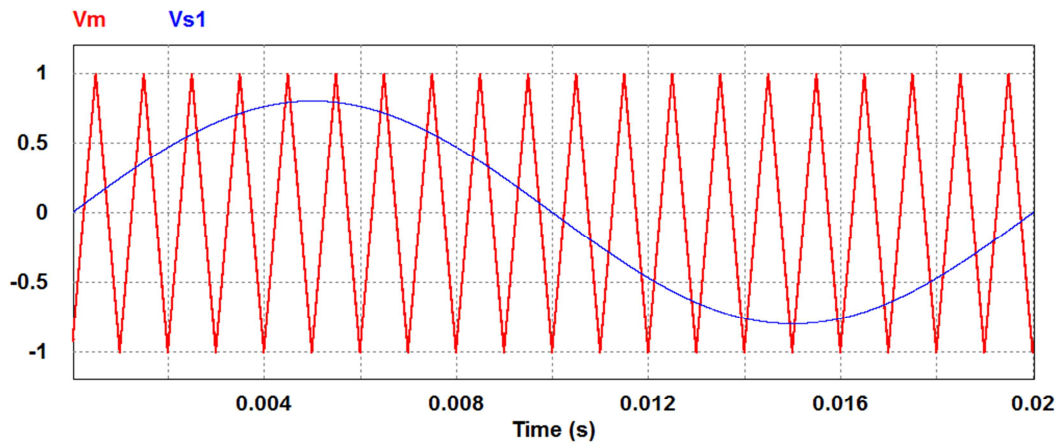


Figure 4.21 : Les signaux de commande de l'Onduleur

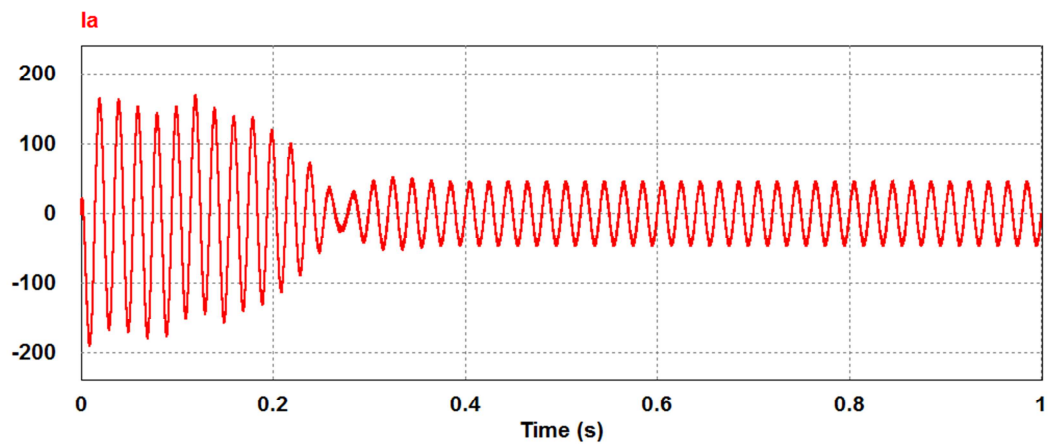


Figure 4.22 : Le courant de la phase I_a

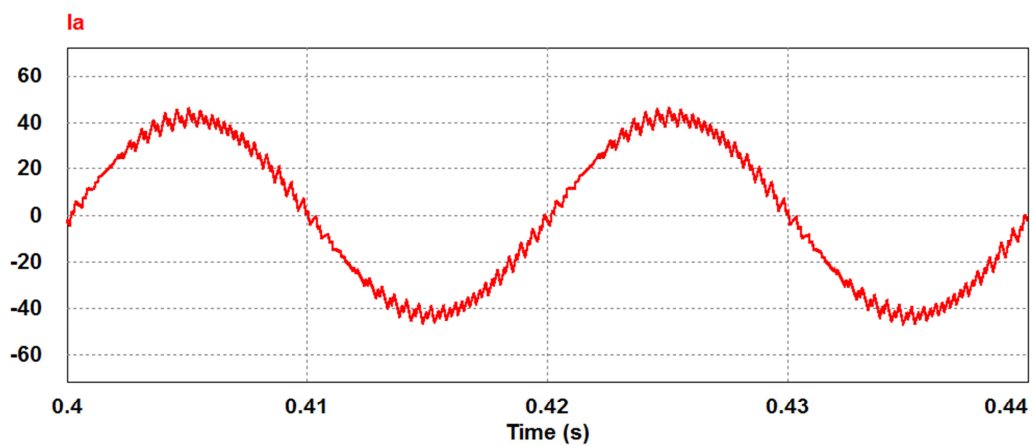


Figure 4.23: Courants de charge $I_a(t)$ dans le régime permanent

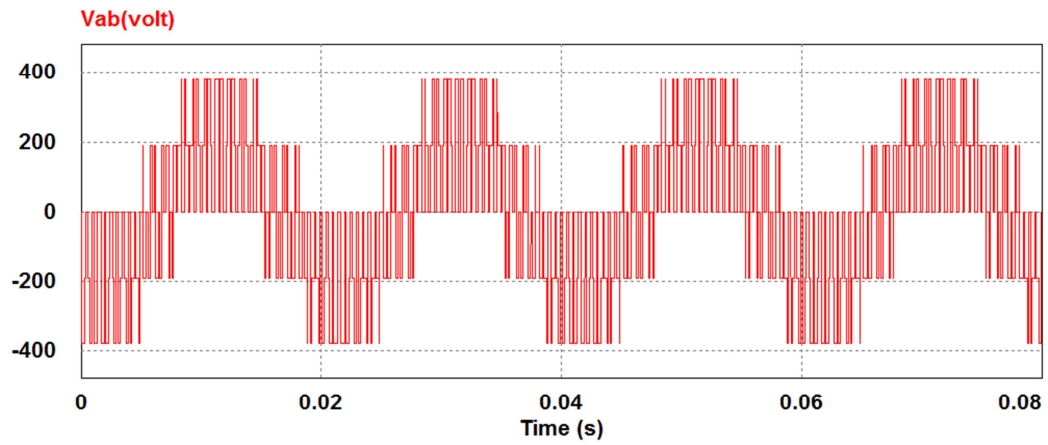


Figure 4.24 : Tension d'une phase de l'onduleur V_{ab}

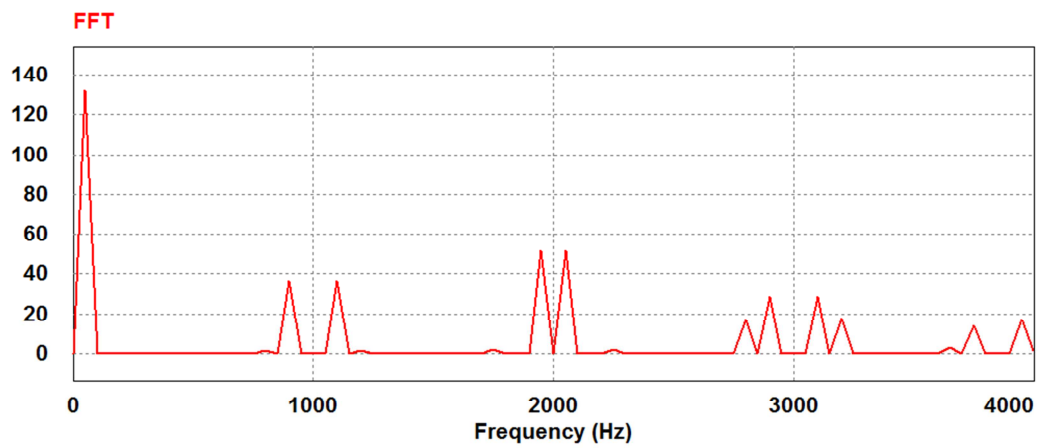


Figure 4.25 : Spectre d'harmoniques de la tension composée V_{ab} , THD = 32.14 %

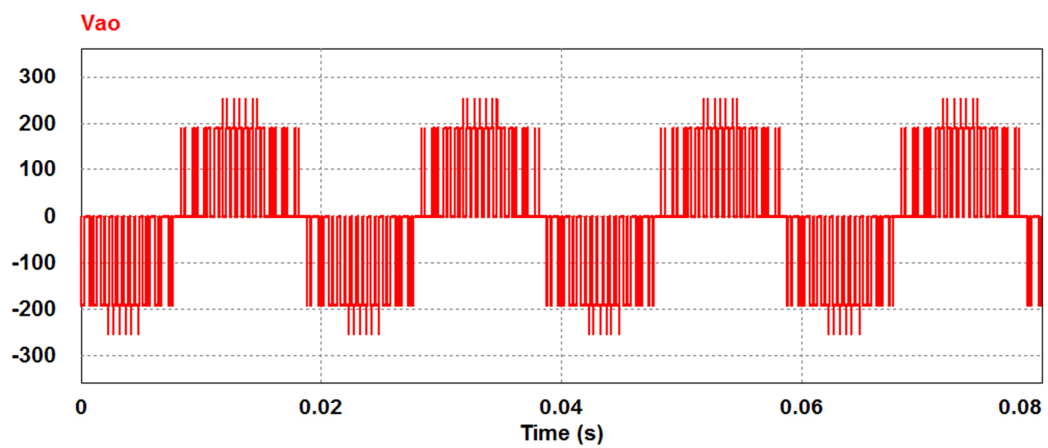


Figure 4.26: Tension d'une phase de l'onduleur V_{ao}

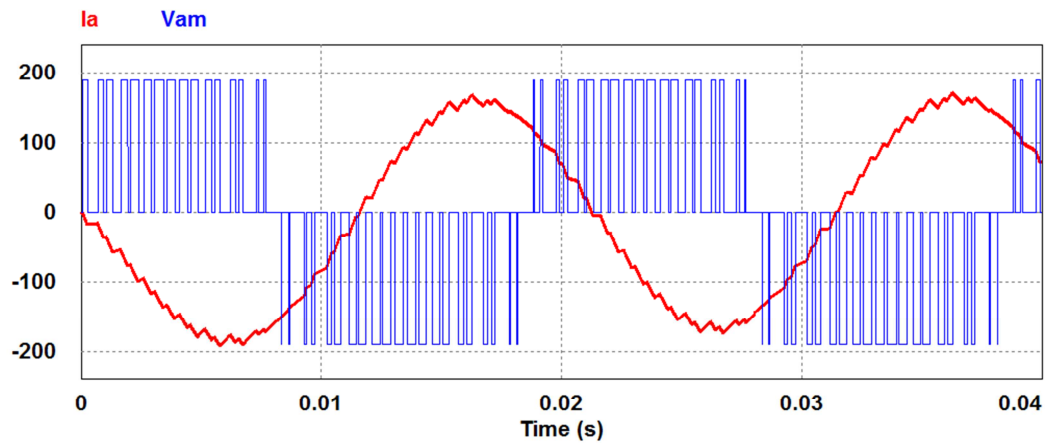


Figure 4.27 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{am} et le courant de charge I_a

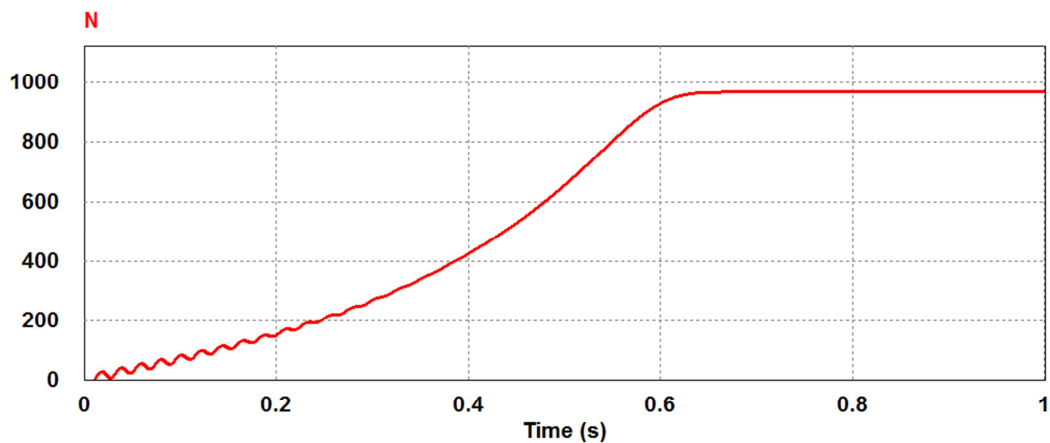


Figure4.28 : La vitesse de rotation N de la MAS

4.5.c) Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation de l'onduleur associé à la machine asynchrone qui ont montrés que la vitesse en régime permanent se stabilise à une valeur proche de la vitesse du synchronisme, exactement comme dans le cas de la MAS alimentée directement par le réseau triphasé.

La forme du courant est presque la même que celle dans le cas sans onduleur sauf Qu'ici les valeurs maximales ont diminué

4.6 Conclusion:

La modélisation et la simulation de l'association onduleur multiniveaux–moteur asynchrone, confirme et valide les résultats obtenus avec l'onduleur NPC seul. Dans notre cas, l'onduleur NPC à trois niveaux et la technique MLI sinusoïdale modifiée sont encore la solution optimale pour l'élimination de la tension du mode commun ou la tension homopolaire.

On peut conclure que la modulation sinusoïdale modifiée réduit efficacement la tension à l'arbre du moteur et par conséquent diminue le courant de fuite dans les enroulements. Elle est donc plus avantageuse par rapport aux autres techniques.

4.7 Bibliographie:

[1]: **Mr. MOKHTARI Raouf:** Étude et simulation d'un moteur asynchrone. M'sila2004/2005 ingénieur d'état en génie électrotechnique

[2]: **Jean-Paul Louis:** Modélisation des machines électriques en vue de leur commande

Conclusion générale

Depuis l'onduleur multiniveaux de type NPC (Neutral Point Clamped), ces dernières années de nombreuses structures sont apparues ayant des propriétés assez intéressantes telles que les convertisseurs multicellulaires séries ou superposées. Toutes ces structures peuvent être classées en fonction du mode utilisé pour la conversion et le moyen pour avoir en sortie une tension sur différents niveaux.

Dans le présent travail, Nous avons constaté que les nouvelles topologies dites multiniveaux de type NPC améliorent considérablement la forme d'onde, ils permettent aussi de véhiculer des puissances élevées sans que les composants qui les constituent ne subissent des contraintes considérables lors de leur commande à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture, pour le quel on a étudié quatre types de commande, une commande en pleine onde, et une commande en MLI triangulo-sinusoïdale à modulation (classique, triangle multiple et modifiée).

La commande en pleine onde présentée est optimisée afin de déduire un angle qui réduit le THD à une valeur minimale. On a aussi optimisé les commandes triangulo-sinusoïdale à modulation (classique, triangle multiple et modifiée) afin de déduire l'indice de modulation en fréquence qui permet d'éliminer les harmoniques multiple. D'après les résultats obtenus par ces quatre commandes, on a constaté qu'en augmentant le rapport de fréquence les harmoniques se repoussent vers les hautes fréquences. En comparant les quatre commandes proposées dans ce document, on a constaté que la commande triangulo-sinusoïdale modifiée est mieux adaptée à la réduction des perturbations de mode commun générées par les onduleurs multiniveaux de type NPC

Donc les résultats obtenus après plusieurs essais de simulation sous PSIM, nous montrent l'efficacité de la commande à MLI modifiée. Et nous dirons que cette dernière s'adopte mieux aux entraînements à vitesse variable le cas des moteurs asynchrones, car elle s'intègre de façon naturelle dans le système de régulation.

Ce travail nous a permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de l'électronique de puissance, tel que : Le comportement des semi-conducteurs, les différentes topologies des convertisseurs multi-niveaux, les différentes stratégies de commande des convertisseurs ainsi que la maîtrise de l'outil de simulation Powersim.