

III. Introduction

La technologie de conversion de l'énergie continu-alternatif, en utilisant les convertisseurs statiques tel que les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance en pleine croissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courants alternatif, utilité d'interconnexion, alimentation de sécurité...etc.

La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement de composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robuste et rapides, et d'autre par sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion, [31].

Cela permet d'adapter pour chaque application la structure de l'onduleur et la stratégie de commande qui lui conviennent le mieux.

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs conventionnels présentent certains inconvénients tels que :

- L'usage limité aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement.
- La détérioration prématurée des roulements causés par l'apparition des tensions homopolaire à l'arbre du moteur.

Pour surmonter ces problèmes, un nouveau type d'onduleur à été introduit en l'occurrence, l'onduleur multi-niveaux, ce type d'onduleur présente plusieurs avantages, parmi les plus importants on mentionne, [32]:

- Il peut générer des tensions très proche de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale.
- Il réduit les tensions du mode homopolaire.
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

Dans ce chapitre nous allons commencer par l'étude de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC. Avec sa stratégie de commande en procédant bien sûr aux simulations

III.1 Modélisation du convertisseur

Le convertisseur qui assure l'alimentation de l'MADA est constitué de trois étages, un redresseur connecté au réseau, un filtre qui permet de réduire les ondulations du courant et de la tension, et un onduleur qui permet d'alimenter la machine par un système de tensions alternatives à fréquences variables.

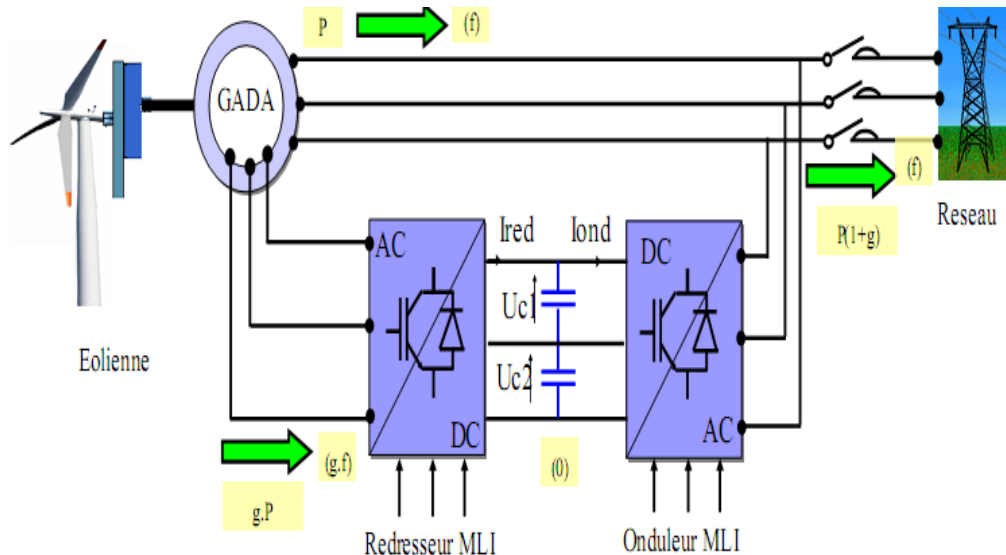


Figure III-1 : Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

III.2 Définition des onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Les premières topologies multi-niveaux ont été introduites au début des années quatre-vingt Nabae, Takahachi 1981 [35]. La valeur limitée de la tension de blocage des interrupteurs réalisables jusqu'à présent est à la base du développement des onduleurs multi-niveaux. Cette valeur limite est repoussée au fil de l'amélioration des techniques de réalisation, mais elle est toujours inférieure à une dizaine de kV, et ne devrait franchir cette limite qu'avec l'avènement de nouvelles technologies. Cette tension est inférieure à la tension de service des équipements haute tension. La réalisation d'un convertisseur multi-niveau consiste à employer un convertisseur de topologie plus complexe. Leur commande nécessite davantage de signaux, mais le convertisseur résultant présente de meilleures performances. En plus de permettre d'obtenir une tension de service plus élevée.

III.3 Intérêt des onduleurs multi-niveaux

Les convertisseurs multi niveaux présentent quelques avantages :

D'une part, les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé.

D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en MLI, le recours à ce type de convertisseur, associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques

En utilisant les convertisseurs multi niveaux, la fréquence de pulsation de chacun des interrupteurs est plus basse que la fréquence apparente de la tension appliquée à la charge.

L'attrait des convertisseurs multi niveaux est toutefois limité par quelques inconvénients :

La commande est beaucoup plus complexe et les techniques sont encore peu répandues dans l'industrie.

III.4 Principe de l'onduleur multi niveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multi niveaux. La figure III-2 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multi-niveaux., dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc1} . Sur la figure III-2.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1} + V_{dc2}$ [33].

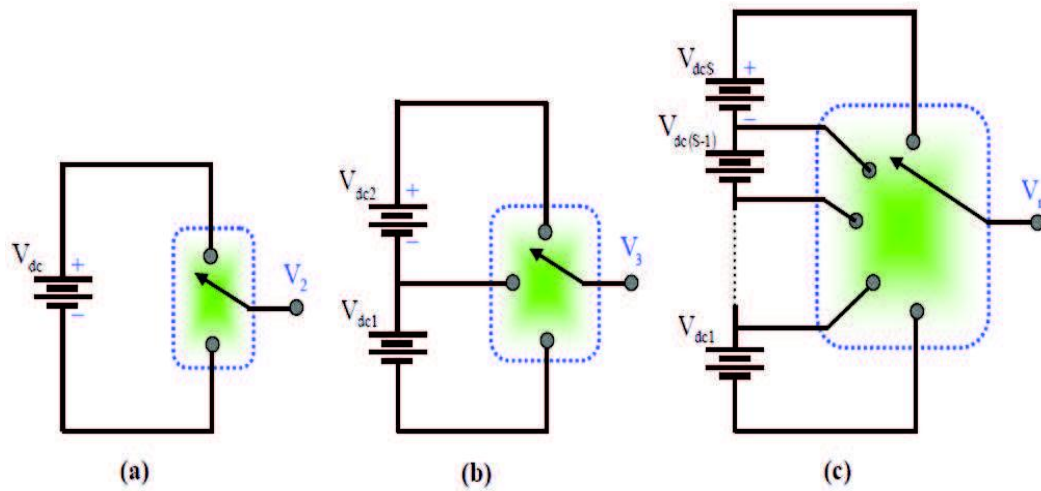


Figure III-2 : Onduleur à niveaux multiples à deux (a), à trois (b) et à m niveaux (c)

En général, les convertisseurs multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée à partir de plusieurs niveaux de tension discrets.

III.5 Différents stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux

Afin de générer une tension la plus sinusoïdal que possible, des techniques d'élimination des harmoniques et de commutation d'onduleurs ont été l'objet de recherche. Les stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux sont en générale une adaptation de celles appliquées aux convertisseurs à deux niveaux. Dans cette partie, nous présentons quelques techniques de commande.

III.5.1 Classification des stratégies de modulation

Les méthodes de modulation utilisée dans les onduleurs multi niveaux peuvent être classées en fonction de la fréquence de commutation. La méthode la plus populaire dans les applications industrielles est celle à MLI à porteuse sinusoïdale (SPWM) qui utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge.

III.5.1.1 Commande par modulation de largeur d'impulsions

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de

commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant. Selon la stratégie adoptée, ce dernier peut être échantillonné en synchronisme avec la porteuse triangulaire, ou comparé directement à celle-ci. Chaque interrupteur commute à une fréquence imposée par celle de la porteuse.

Dans cette partie, on analyse trois stratégies de modulation à MLI sinusoïdale: classique, à double triangle et modifiée. Il s'agit de déterminer, pour un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC, le signal de commande généré par chacune des trois techniques. [38] cette méthode de commande permet:

- de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie.
- de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

a. Modulation sinusoïdale classique

Comme pour les onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence f_{ref} et d'amplitude A_{ref} , avec un signal triangulaire d'amplitude A_p et de fréquence f_p , très supérieure à f_{ref} .

b. Modulation sinusoïdal triangles multiples

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_p et de même amplitude A_p . Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_{ref} et de fréquence f_{ref} . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux N 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 $(N-1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p . Le taux de modulation d'amplitude m_a et le rapport de fréquence ou bien le taux de modulation de fréquence m_f sont donnés respectivement par les expressions (3.1) et (3.2) :

$$m_a = A_{ref} / (N-1) A_p \quad (3.1)$$

$$m_f = f_p / f_{ref} \quad (3.2)$$

C. modulation sinusoïdale modifiée

Selon la caractéristique de la MLI sinusoïdale, les largeurs des impulsions s'approchent de l'amplitude maximale de l'onde sinusoïdale à un point a pas changer significativement avec la variation de l'indice de modulation.

Cela est dû à la caractéristique d'une onde sinusoïdale et la technique de MLI sinusoïdale peut être modifiée en appliquant l'onde sinusoïdale durant le début et la fin d'un intervalle de 60° par demi-cycle; c'est à dire 0 à 60° et de 120° à 180° .

Ce type de modulation est connu sous le nom de MLI sinusoïdale modifiée. La composante fondamentale est ainsi augmentée et les caractéristiques des harmoniques sont améliorées [31].

III.5.1.2 modulation vectorielle

A la différence de la MLI intersective, dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et Les temps d'application de ces vecteurs afin d'obtenir en valeur moyenne une tension de référence à partir des états de commutation de l'onduleur sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques.

Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. En général, la valeur moyenne du vecteur de référence peut être calculée en utilisant plus d'un vecteur par cycle de modulation, par l'approximation MLI valeur moyenne. Si l'on sélectionne les vecteurs adéquats et si l'on les applique dans l'ordre correct il est possible d'obtenir une fréquence de commutation à la sortie relativement élevée avec une fréquence de commutation réduite au niveau de composante.

La modulation vectorielle diffère, entre autres, des techniques intersectives par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps [36].

III.6 Topologie des onduleurs multi-niveaux

L'apparition des interrupteurs de puissances entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture (tels que MOSFET, GTO et IGBT..) a permis la conception des convertisseurs à plusieurs niveaux. Les onduleurs multi niveaux sont utilisés pour alimenter en moyenne et

haute tension (2à13KV) et pour le contrôle des machines électriques puissantes et améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Les onduleurs multi-niveaux comme tous équipements électriques présentent certains inconvénients.

- Leur topologie contient un nombre élevé d'interrupteurs statiques;
- Leur contrôle est difficile ;
- Ils exigent plusieurs sources de tension continue, généralement relevées aux bornes des condensateurs, qui ne donnent pas toujours la même valeur de tension.

Malgré ces inconvénients, les onduleurs multi-niveaux délivrent une onde de tension avec un taux d'harmonique réduit.

III.7 Onduleur à trois niveaux type NPC

L'idée de base de l'onduleur NPC (Neutral Point Clamping), est l'obtention d'une tension de sortie délivre trois niveaux de tension (+Uc, 0, -Uc) par la superposition de deux interrupteurs supplémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte, FigureIII-4. Les avantages de cette nouvelle génération d'onduleurs sont :

- La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complications au niveau des tensions statique et dynamique (les interrupteurs sont connectés en série).
- Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multiniveaux sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.
- Les formes d'ondes des grandeurs de sorties d'un onduleur multiniveaux limitent naturellement les problèmes des surtensions.

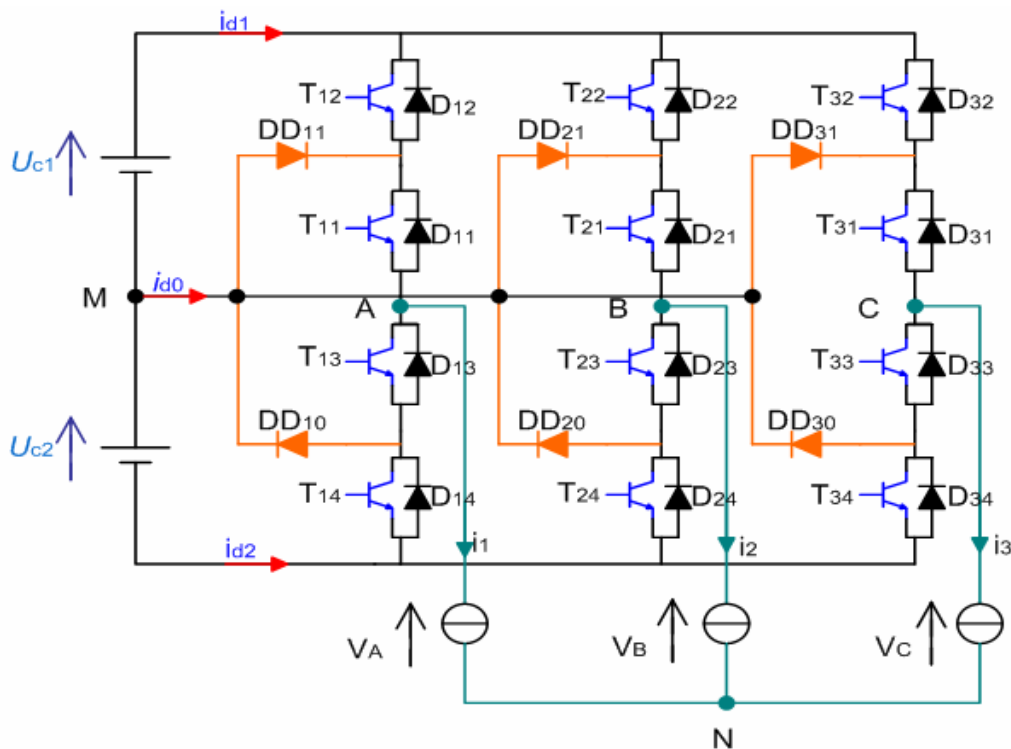


Figure III-3: Onduleur triphasé à trois niveaux.

Représentation schématique de cet onduleur est donnée par la figure (II-3); ou:

- Les tensions continues U_{c1} , U_{c2} sont les tensions d'entrée,
- Les tensions alternatives V_A , V_B , V_C sont les tensions de sortie,
- Les courants i_1 , i_2 , i_3 sont les courants de sortie.

III.8 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

La symétrie des onduleurs à trois niveaux permet leur modélisation par bras sans à priori sur la commande. On montra ensuite comment déduire celui d'un onduleur complet.

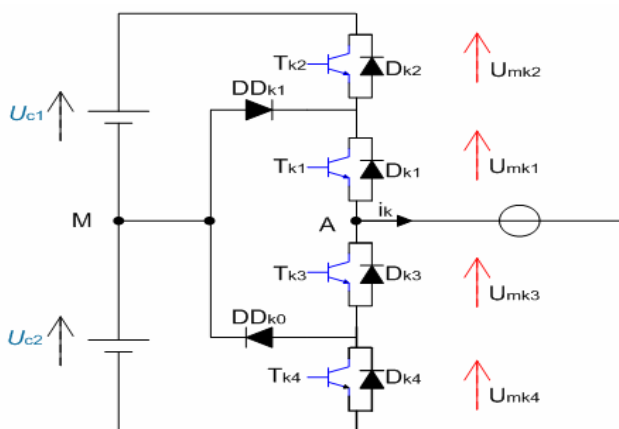


Figure III-4: structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur multiniveaux, on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel TD_{ks} (figure II.5), et vue la symétrie de sa structure, on fait le raisonnement sur un seul bras.

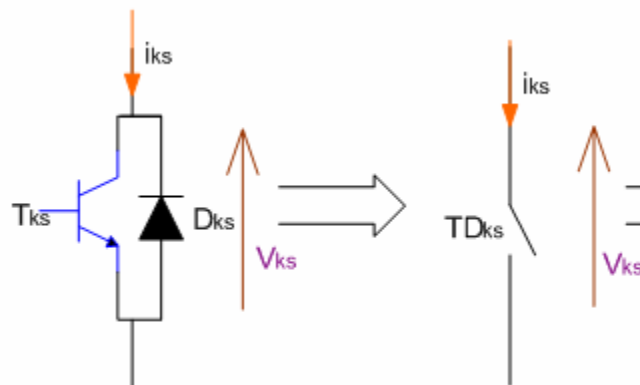


Figure III.5 : Interrupteur bidirectionnel d'équivalent de la paire transistor-diode.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de :

- La commande externe B_{ks} (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs bicommandables T_{ks}).
- Une commande interne définie par les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.

III.8.1. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, Chaque bras est équivalent à un interrupteur à trois positions permettant d'obtenir en sortie trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$. La structure de cet onduleur de tension consiste à créer un point sur l'étage de tension continue tel que $U_{c1} + U_{c2} = E$, permettant de générer des créneaux d'amplitudes $-E/2$, 0 et $E/2$ dont la combinaison de ces niveaux permet d'avoir un fondamental plus proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique à deux niveaux. Le bras d'un onduleur présente cinq configurations possibles, comme le montre la figure III-8. Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau III-1 (V_k potentiel au nœud k par rapport à l'origine des potentiels M).

La configuration	La grandeur électrique qui la caractérise
E0	$i_k = 0$
E1	$v_k = UC1 = UC$
E2	$V_k = 0$
E3	$v_k = -UC2 = -UC$
E4	$V_k = 0$

Tableau III-1 : Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

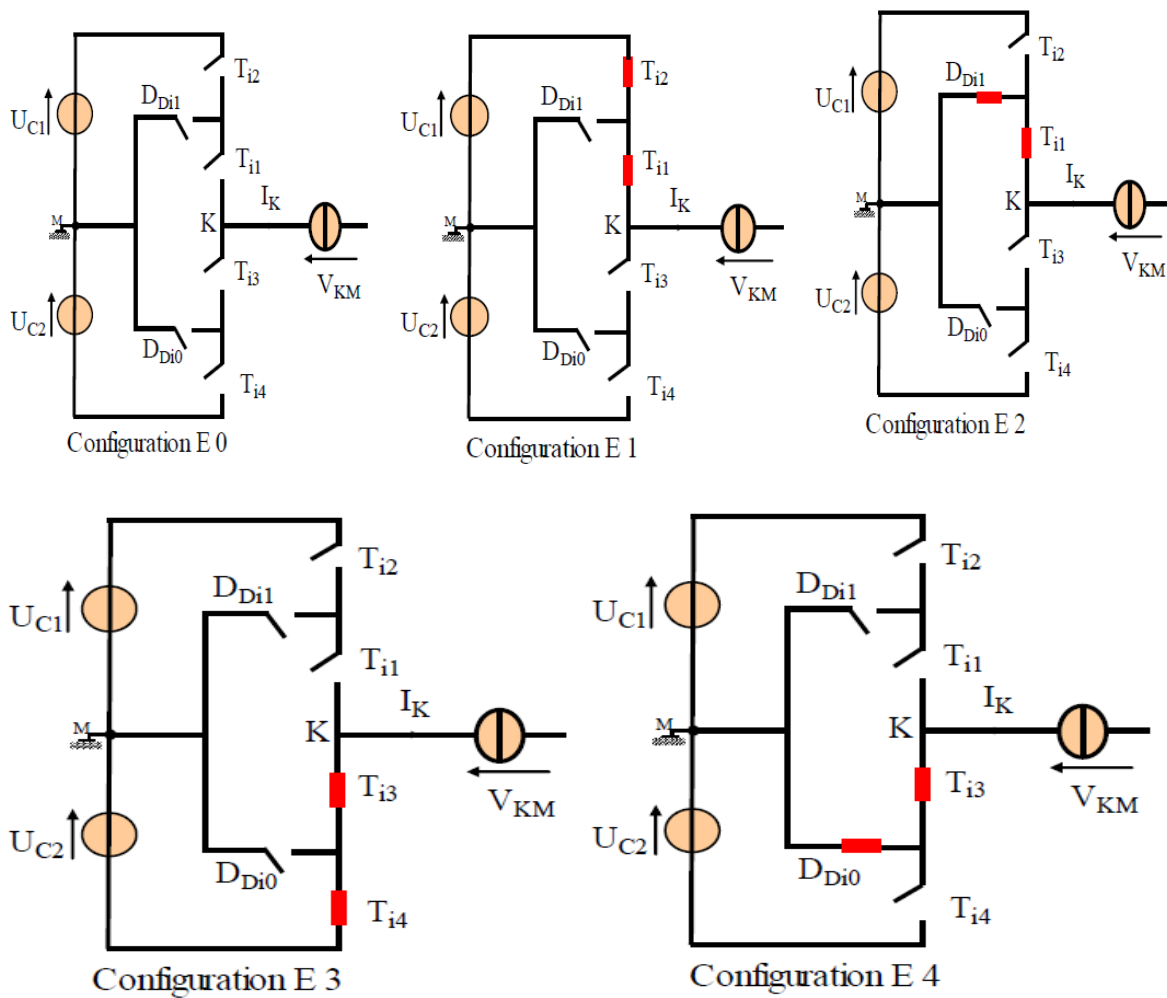


Figure III-6: Les différentes configurations possibles pour un bras d'onduleur à trois niveaux

1	1	0	0	E/2
0	1	1	0	0
0	0	1	1	-E/2

Tableau. III-2: *Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux*

III.8.2 Hypothèse

Les tensions d'entrée de l'onduleur sont supposées parfaites. En pratique, cela se traduit par le fait que, quel que soit le courant i_k , délivré par cette alimentation, la tension à ses bornes reste constante $U_{C1}=U_{C2}$. La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts.

III.9 Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur.

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus des commandes internes (grandeurs électriques), mais uniquement des commandes des transistors (commande externe). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante.

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec B_{ks} la commande du transistor T_{ps} du bras k

III.9.1. fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur TDks comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci :

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 & \text{Si } T_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks} = 0 & \text{Si } T_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3.3)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k, on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (3.4)$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} & F_{21} = 1 - F_{24} & F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{12} = 1 - F_{13} & F_{22} = 1 - F_{23} & F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases} \quad (3.5)$$

III.9.2 Fonctions de connexion des demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{km}^b .

Où k= le numéro du bras.

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas constitué de } T_{k3} \text{ et } T_{k4} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut constitué de } T_{k1} \text{ et } T_{k2} \end{cases}$$

II.9.3 Fonction de conversion

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

- VA, VB, VC: Tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge.
- VAM, VBM, VCM: Tensions de chaque phase de l'onduleur par rapport au point milieu « M » de l'alimentation continue de l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (3.6)$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on aura :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_{C1} - F_{20}^b \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Les tensions composées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (3.8)$$

D'où le système matriciel suivant exprimant ces tensions composées au moyen des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{C2} \right\} \quad (3.9)$$

Les tensions simples sont déduites comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{C2} \right\} \quad (3.10)$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de charge i_1 , i_2 et i_3 par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad (3.11)$$

D'où

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (3.12)$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas.

Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (3.13)$$

Des relations (III.39) et (III.48), on déduit que i_{d0} s'écrit sous la forme :

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad (3.14)$$

D'où

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot i_3 \quad (3.15)$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, le vecteur des grandeurs d'état est $[UC1 \ UC2 \ i_1 \ i_2 \ i_3]^T$ et ses entrées internes sont $[V_A \ V_B \ V_C \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$ ou

$$[UAB \ UBC \ UCA \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$$

On définit la matrice de conversion simple qui nous permet de déduire le vecteur des grandeurs internes en fonction du vecteur d'état :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \cdot \begin{bmatrix} UC1 \\ UC2 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Avec

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & -\frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & -\frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b}{3} & -\frac{-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1-F_{11}^b - F_{10}^b) & (1-F_{21}^b - F_{20}^b) & (1-F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

De même, on définit la matrice de conversion composée comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ id1 \\ id2 \\ id0 \end{bmatrix} = [M(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i1 \\ i2 \\ i3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1-F_{11}^b - F_{10}^b) & (1-F_{21}^b - F_{20}^b) & (1-F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

La **figure (III-7)** représente le modèle de connaissance globale de l'onduleur triphasé à trois niveaux en mode commandable associé à une charge triphasée et une source de tension continue à point milieu. Ce qui permet de distinguer deux parties.

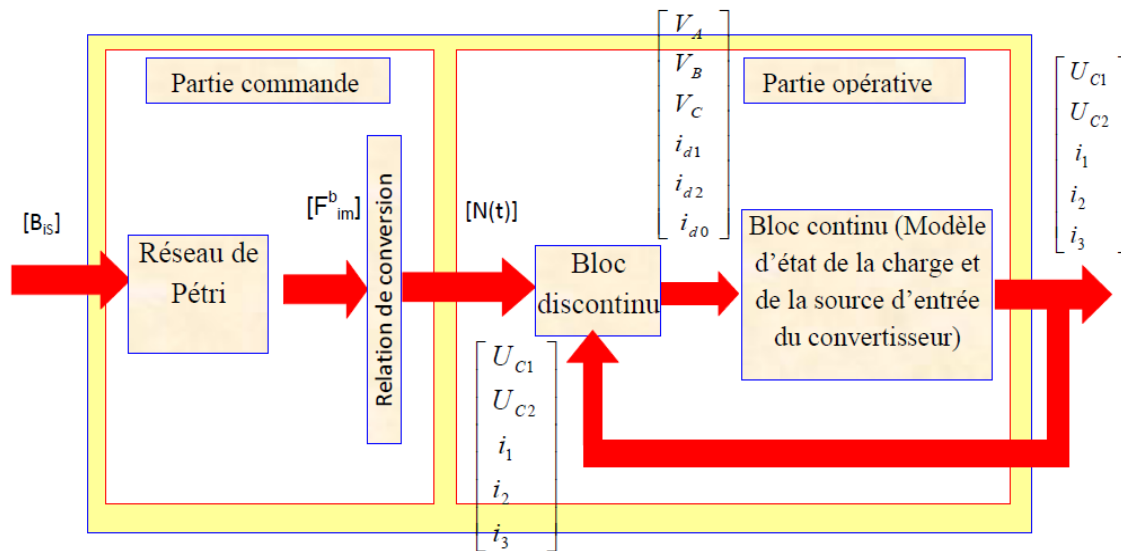


Figure III-7: Modèle de connaissance globale de l'onduleur triphasé à trois niveaux

La partie commande: représentée par les équations qui définissent le fonctionnement de l'onduleur triphasé en mode commandable. Cette partie génère la matrice de conversion $[N(t)]$.

Elle met en évidence les conditions d'ouverture et de fermeture des semi-conducteurs. Ces conditions dépendent à la fois des commandes externes appliquées aux semi-conducteurs (amorçage, blocage) ainsi que des commandes internes liées à l'évolution temporelle des grandeurs tension et courant de chaque semi-conducteur.

La partie opérative: constituée d'un bloc continu et d'un bloc discontinu:

Le bloc discontinu: décrit l'effet des connexions sur la conversion des grandeurs électriques (que l'on nommera par la suite grandeurs modulées). Cette conversion électrique est quantifiée par une matrice de conversion notée $N(t)$.

Le bloc continu : représente le modèle de la charge de l'onduleur et de la source de tension d'entrée.

Les tensions de référence, de l'onduleur triphasé à trois niveaux, permettant de générer un système de tension triphasé équilibré sont définies par le système d'équation (3.20).

$$V_{Aref} = Vm.\sin(\omega.t)$$

$$V_{Bref} = Vm.\sin(\omega.t - 2\pi/3) \quad (3.20)$$

$$V_{Cref} = Vm.\sin(\omega.t - 4\pi/3)$$

L'utilité de la variable 'marche' permet à l'onduleur triphasé commandé par cette technique un fonctionnement dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

III.10 Les différentes stratégies de l'onduleur à trois niveaux

Dans cette partie, nous élaborons quelques stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux qui permettent de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible et qui sont:

- La commande en pleine onde.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- Commande triangulo-sinusoïdal à n porteuses.

III.10.1 Commande à pleine onde :

-Principe :

La commande en pleine onde est une commande classique souvent utilisé pour la commande des onduleurs. Plusieurs cas qui se différencient par les manières d'élaborer la séquence de commande des interrupteurs et de régler la valeur de la tension à la sortie de l'onduleur pour alimenter la machine asynchrone.

Plusieurs commandes pleines ondes sont possibles pour cet onduleur. Cette stratégie consiste à générer un système de tension dans les fondamentaux constituent un système triphasés équilibré.

III.10.2 Commande triangulo-sinusoïdal à n porteuses

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante V_{ref} de forme sinusoïdal avec le signal de n porteuses V_{pde} de forme triangulaire, cette comparaison compte sur les intersections.

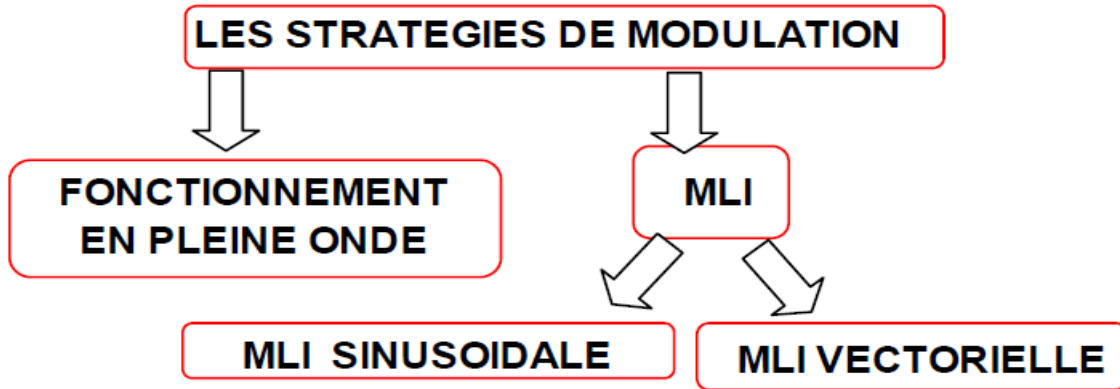


Figure III-8: Structures des différentes stratégies MLI.

II.10 Résultats de simulation et interprétations

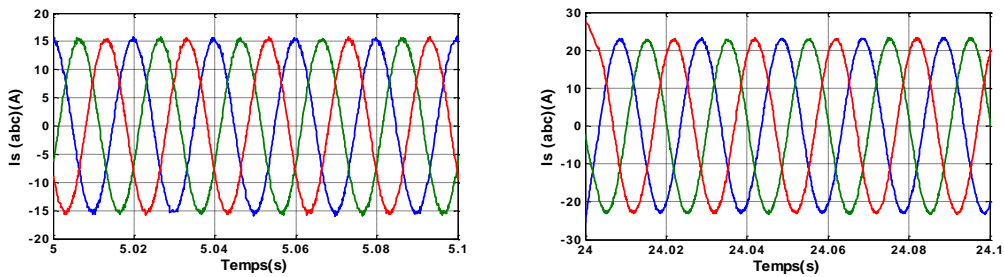


Figure III.9 : Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

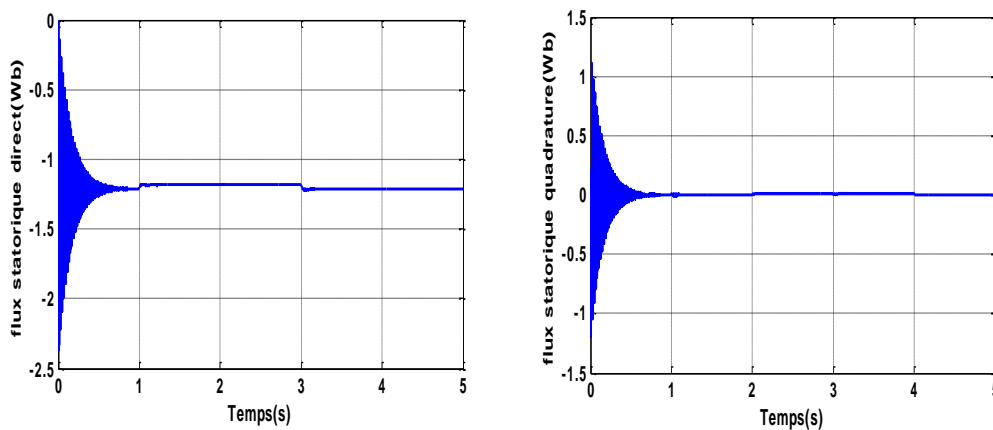


Figure II-10 : Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance.

Les figure III-10 présentent les allures des puissances statorique active et réactive avec leurs références la bonne régulation des courants rotoriques qui sont image des puissances a permet un bon suivi des grandeurs mesurées avec leurs références.

En conséquence l'allure du couple électromagnétique sur la figure III-10 montre un couple électromagnétique négatif qui permet de dire la MADA fonctionne en mode générateur.

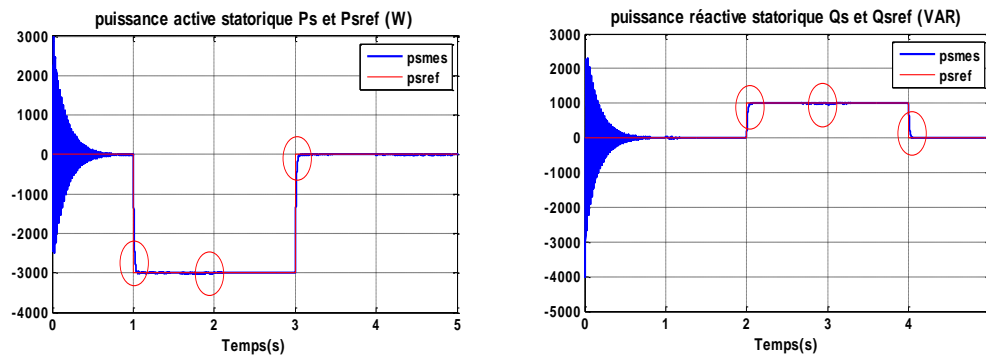


Figure III-11: La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance.

Les figure III-11 présentent les allures des puissances statorique active et réactive avec leurs références la bonne régulation des courants rotoriques qui sont image des puissances a permet un bon suivi des grandeurs mesurées avec leurs références.

En conséquence l'allure du couple électromagnétique sur la figure III-11 montre un couple électromagnétique négatif qui permet de dire la MADA fonctionne en mode générateur

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une nouvelle structure des onduleurs à trois niveaux de type NPC, ainsi que leurs principes de fonctionnement avec une évaluation par simulation numérique des performances de ces types d'onduleurs associés à une machine asynchrone.