

Chapitre II

Modélisation et commande de l'onduleur de tension à cinq bras

II.1. Introduction

La commande de la vitesse du rotor de la MSAP5PH se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et la tension statorique. Par conséquent, pour se donner les moyens de cette action, il faut disposer d'une source d'alimentation capable de délivrer une tension d'amplitude et de fréquence réglable en valeur instantanée. Actuellement, l'onduleur est le moyen le plus adapté à réaliser cette fin.

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Son principe de fonctionnement s'exprime par le séquençage imposé aux interrupteurs statiques qui réalisent la modulation de largeur des impulsions (MLI) des tensions appliquées aux enroulements statoriques de la machine [10-11].

Ce chapitre concerne en premier lieu la modélisation de l'onduleur à deux-niveaux à cinq bras. Puis différentes techniques de modulation seront examinées.

II.2. Modélisation de l'onduleur à cinq bras

L'onduleur de tension à cinq bras est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, celui-ci est schématisé dans la figure (II.1). Il est composé de dix transistors shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération.

Pour un onduleur à cinq bras, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $S_{a, b, c, d, e} = 1$: interrupteur du demi-bras haut (a, b, c, d ou e) fermé.
- $S_{a, b, c, d, e} = 0$: interrupteur du demi-bras bas (a, b, c, d ou e) fermé.

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable,
- La charge à cinq phases; est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

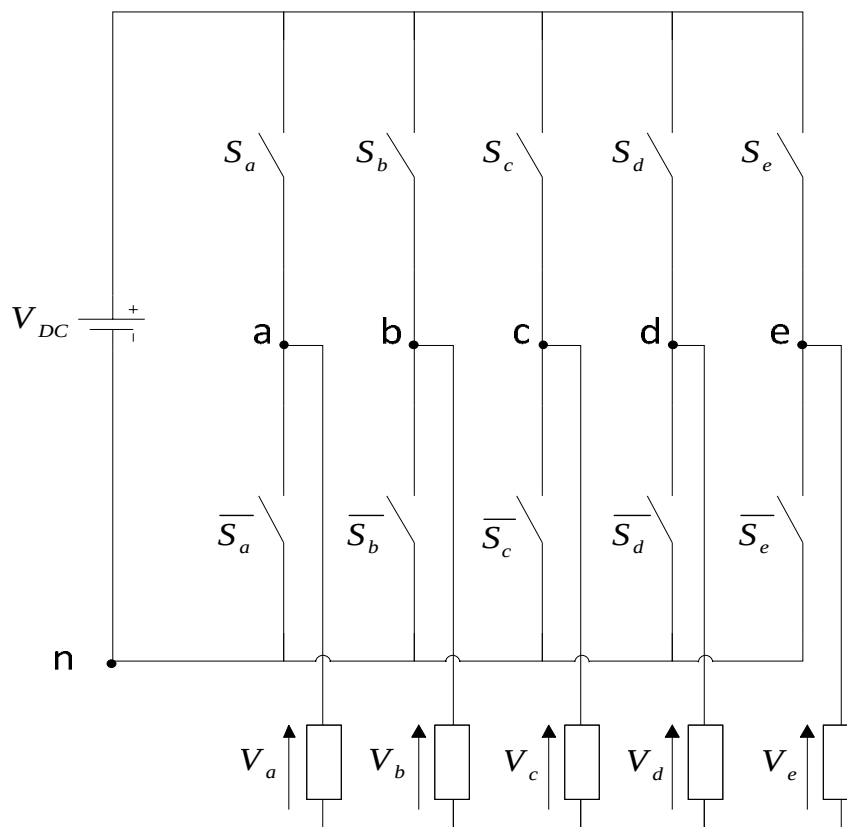


Figure (II. 1): Structure de l'onduleur à cinq bras

II.2.a. Tensions des bras

Les tensions fournées par les bras par rapport au point de référence n sont :

$$\begin{aligned}
 v_{an} &= S_a V_{DC} \\
 v_{bn} &= S_b V_{DC} \\
 v_{cn} &= S_c V_{DC} \\
 v_{dn} &= S_d V_{DC} \\
 v_{en} &= S_e V_{DC}
 \end{aligned} \tag{II.1}$$

II.2.b. Tensions composées

Les tensions composées sont calculées par :

$$\begin{aligned}
 v_{ab} &= v_{an} - v_{bn} = V_{DC} (S_a - S_b) \\
 v_{bc} &= v_{bn} - v_{cn} = V_{DC} (S_b - S_c) \\
 v_{cd} &= v_{cn} - v_{dn} = V_{DC} (S_c - S_d) \\
 v_{de} &= v_{dn} - v_{en} = V_{DC} (S_d - S_e) \\
 v_{ea} &= v_{en} - v_{an} = V_{DC} (S_e - S_a)
 \end{aligned} \tag{II.2}$$

II.2.a. Tensions simples

Le récepteur étant équilibré on peut donc passer des tensions composées aux tensions simples à l'aide de la propriété suivante :

$$v_a + v_b + v_c + v_d + v_e = 0 \tag{II.3}$$

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
 v_a &= \left(\frac{4}{5}\right)v_a - \left(\frac{1}{5}\right)(v_b + v_c + v_d + v_e) \\
 v_b &= \left(\frac{4}{5}\right)v_b - \left(\frac{1}{5}\right)(v_a + v_c + v_d + v_e) \\
 v_c &= \left(\frac{4}{5}\right)v_c - \left(\frac{1}{5}\right)(v_a + v_b + v_d + v_e) \\
 v_d &= \left(\frac{4}{5}\right)v_d - \left(\frac{1}{5}\right)(v_a + v_b + v_c + v_e) \\
 v_e &= \left(\frac{4}{5}\right)v_e - \left(\frac{1}{5}\right)(v_a + v_b + v_c + v_d)
 \end{aligned} \tag{II.4}$$

On obtient finalement :

$$\begin{aligned}
v_a &= \frac{V_{DC}}{5} (4S_a - S_b - S_c - S_d - S_e) \\
v_b &= \frac{V_{DC}}{5} (-S_a + 4S_b - S_c - S_d - S_e) \\
v_c &= \frac{V_{DC}}{5} (-S_a - S_b + 4S_c - S_d - S_e) \\
v_d &= \frac{V_{DC}}{5} (-S_a - S_b - S_c + 4S_d - S_e) \\
v_e &= \frac{V_{DC}}{5} (-S_a - S_b - S_c - S_d + 4S_e)
\end{aligned} \tag{II.5}$$

II.3. Commande de l'onduleur à cinq bras

Pour la génération des signaux logiques S_a, S_b, S_c, S_d et S_e il existe plusieurs techniques de commande.

II.3.1. Stratégie de commande par hystérésis de courant

Dans cette partie, on étudie la commande MLI (modulation de largeur d'impulsion) de type hystérésis de courant appliquée sur l'onduleur de tension à cinq bras.

Cette méthode consiste à maintenir le courant dans une bande de largeur de $2h$ centrée autour d'un courant de référence.

Un comparateur à hystérésis mesure la différence entre le courant de phase et sa référence.

$$\Delta I_{abcde} = i_{abcde\text{ref}} - i_{abcde} \tag{II.6}$$

1- Si $\Delta I_{abcde} \geq h$: la tension est forcée à son niveau minimal pour faire décroître le courant.

2- Si $\Delta I_{abcde} \leq -h$: la tension est forcée à son niveau maximal pour faire accroître le courant.

Détermination des fonctions logiques :

Dans chaque bras (i) de l'onduleur les bases des transistors T_i et T'_i sont reliées à un comparateur à hystérésis comme il est présenté dans la figure (II.2).

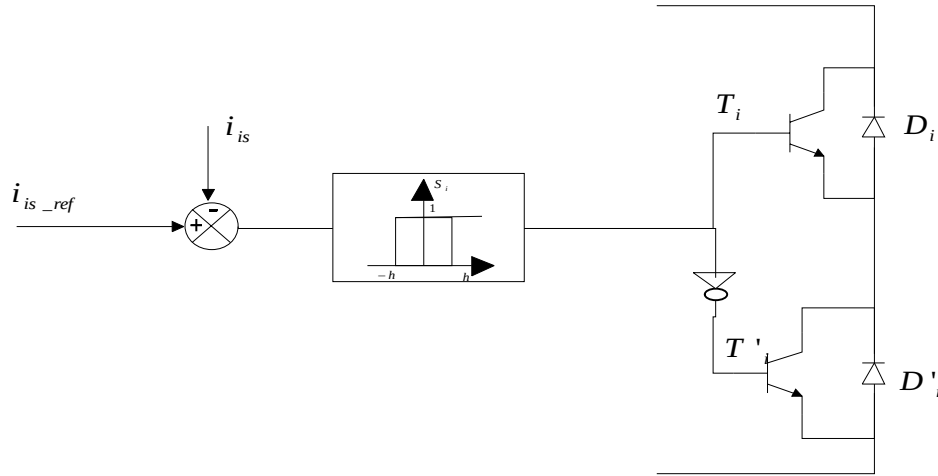


Figure (II. 2): Schéma du comparateur à hystérésis

- Si $\Delta I_{abcde} \geq h$, le comparateur à hystérésis sature T'_i qui continue à conduire tant que $\Delta I_{abcde} \in]-h, h[$
- Si $\Delta I_{abcde} \leq -h$, le comparateur à hystérésis bascule et sature T_i d'où la nature itérative de l'opération.

Ainsi, les états des interrupteurs sont commandés tel que les fonctions logiques des bras de l'onduleur seront :

$$\begin{aligned}
 S_{abcde}(k+1) &= 0 & \text{si } \Delta I_{abcde} &> h \\
 S_{abcde}(k+1) &= 1 & \text{si } \Delta I_{abcde} &< -h \\
 S_{abcde}(k+1) &= S_{abcde}(k) & \text{si } -h &< \Delta I_{abcde} < h
 \end{aligned} \tag{II.7}$$

Avec : h : Bande d'hystérésis

$S_{abcde}(k)$: Valeur de la fonction S_{abcde} à l'instant kT_s

$S_{abcde}(k+1)$: Valeur de la fonction S_{abcde} à l'instant $(k+1)T_s$

T_s : Période d'échantillonnage.

Les courants de référence sont choisis comme suit :

$$\begin{cases} i_{asref} = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t) \\ i_{bsref} = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{5}) \\ i_{csref} = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{5}) \\ i_{dsref} = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{5}) \\ i_{esref} = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{5}) \end{cases} \quad (II.8)$$

La figure (II.6) donne l'allure du courant statorique i_{as} et de la fonction logique S_a .

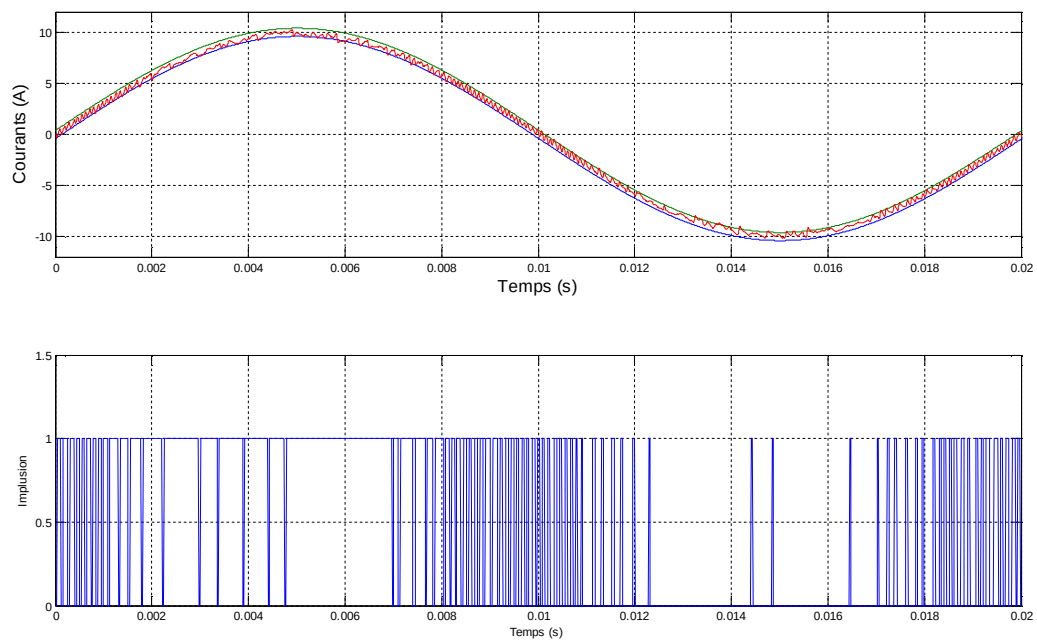
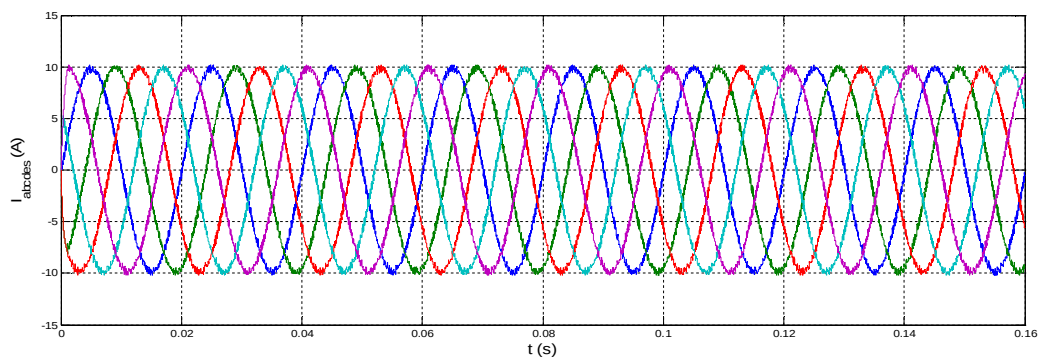


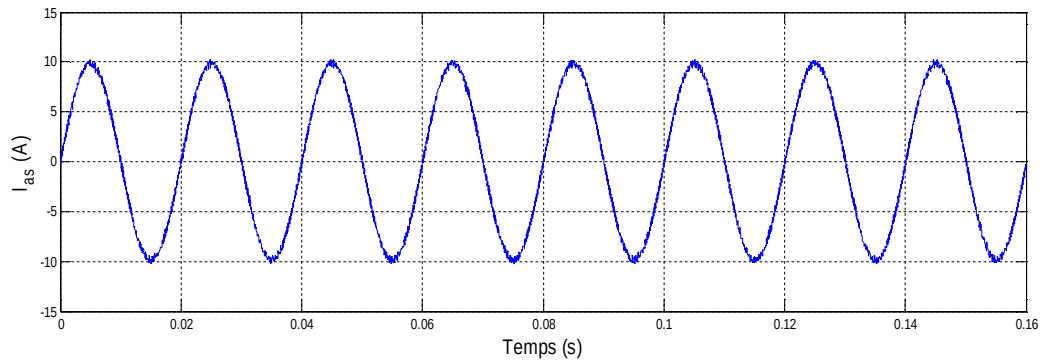
Figure (II. 3):Principe de la MLI à hystérésis

II.3.2. Résultats de simulation

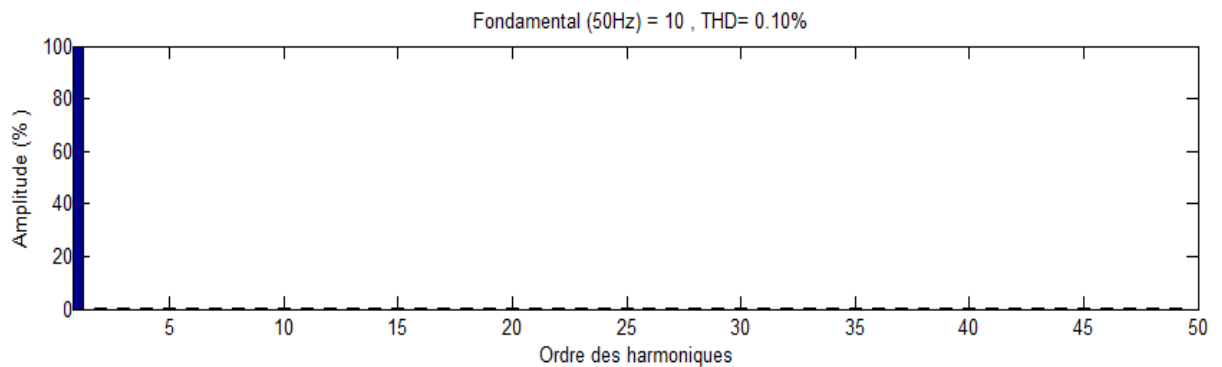
La figure (II. 4) présente les résultats de simulation obtenus pour $h=0.4$ A.



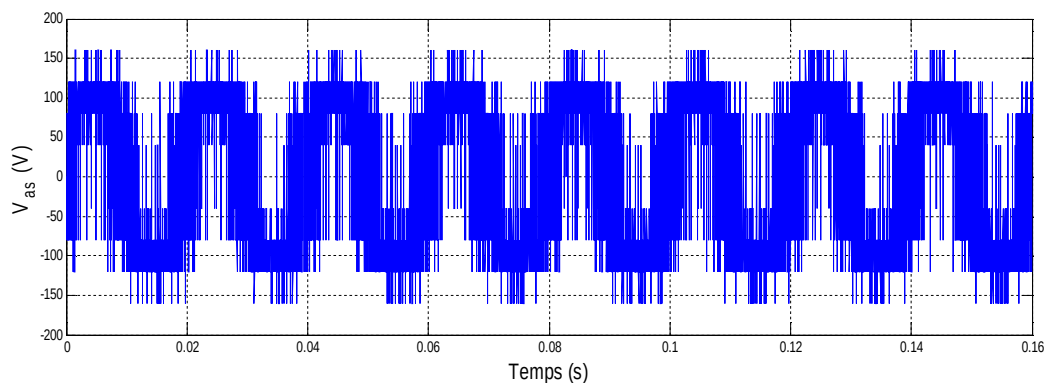
(a) : Courants des cinq phases



(b) : Courant de la première phase



(c) : Spectre harmonique du courant de la première phase



(d) : Tension de la première phase

Figure (II. 4): Résultats de simulation de l'onduleur à cinq bras contrôlé par la technique d'hystérésis

Les résultats de simulation de l'onduleur à cinq bras contrôlé par la technique MLI à hystérésis montrent que cette technique permet d'imposer des courants sinusoïdaux à faible taux de distorsion harmonique. Toutefois, cette technique est connue par sa fréquence de commutation variable.

II.3.3. Stratégie de commande par MLI sinusoïdale

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique MLI sinusoïdale. Cette dernière consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale et une tension de modulation triangulaire [12].

Les cinq tensions de références sont exprimées par l'équation suivante :

$$V_{xref} = V_{refm} \sin \left(2\pi ft - (k-1) \frac{2\pi}{5} \right) \quad (II.9)$$

Avec : $x=a, b, c, d, e$ et $k=1, 2, 3, 4, 5$

f : la fréquence de la tension de référence

L'équation de la porteuse est donnée par:

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left(4 \frac{t}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left(-4 \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II.10)$$

Ou :

T_p : La période de la porteuse

V_p : La valeur maximale de la porteuse

La technique MLI sinusoïdale est caractérisée par les deux paramètres suivants :

L'indice de modulation "m" égale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence, tel que :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (II.11)$$

Avec :

f_p : La fréquence de la porteuse.

Le coefficient de réglage en tension "r" égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation, tel que :

$$r = \frac{V_{ref_m}}{V_{pm}} \quad (II.12)$$

La génération des signaux de commande est basée sur l'algorithme suivant :

$$\text{Si } V_{xref} \geq V_p(t) \quad S_x = 1, \quad \text{sinon } S_x = 0 \quad (II.13)$$

Ou : x=a, b, c, d, e

Le principe de MLI sinusoidale est illustré par la figure (II.5) pour m=9 et r=0.8.

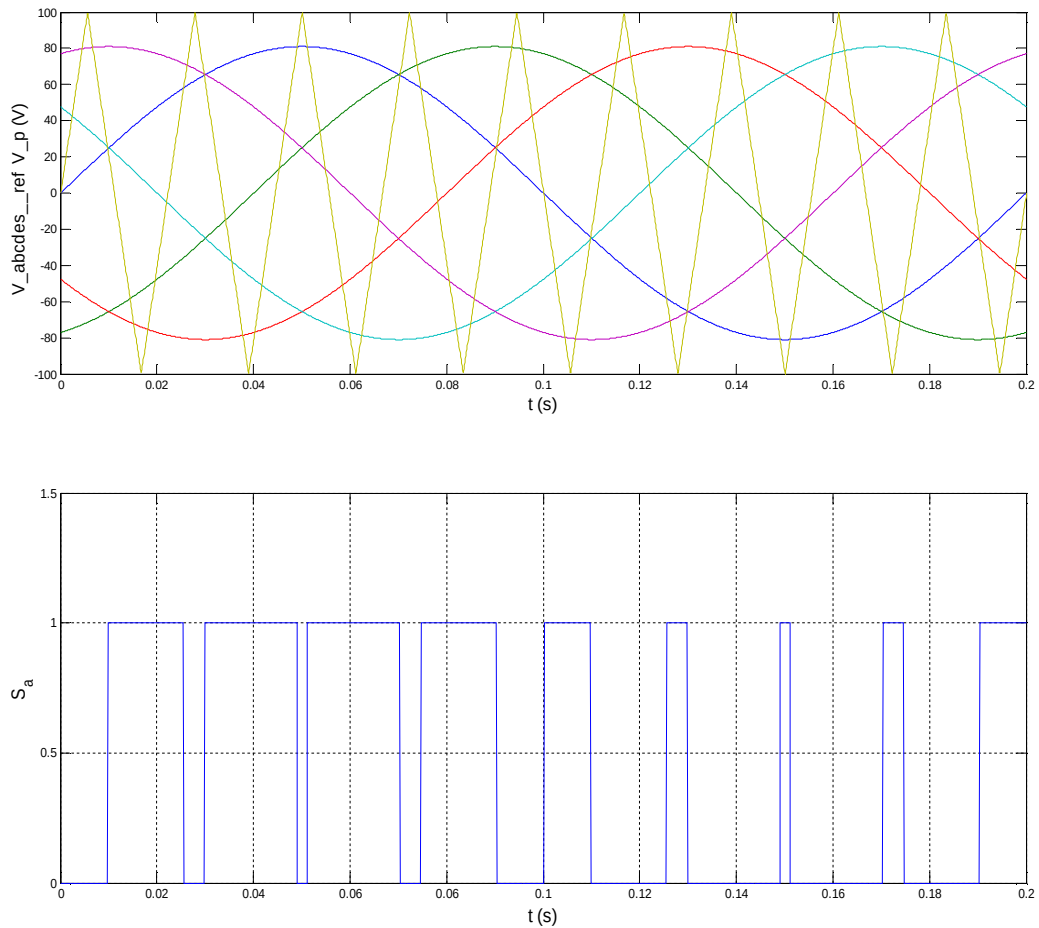
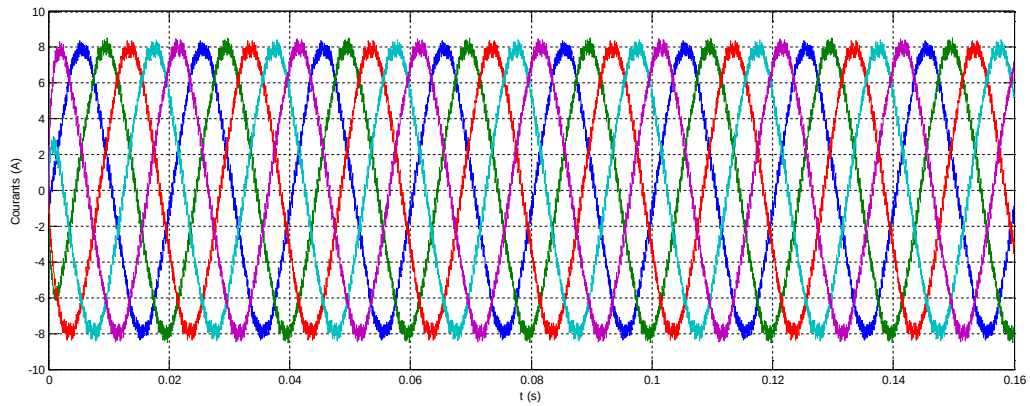


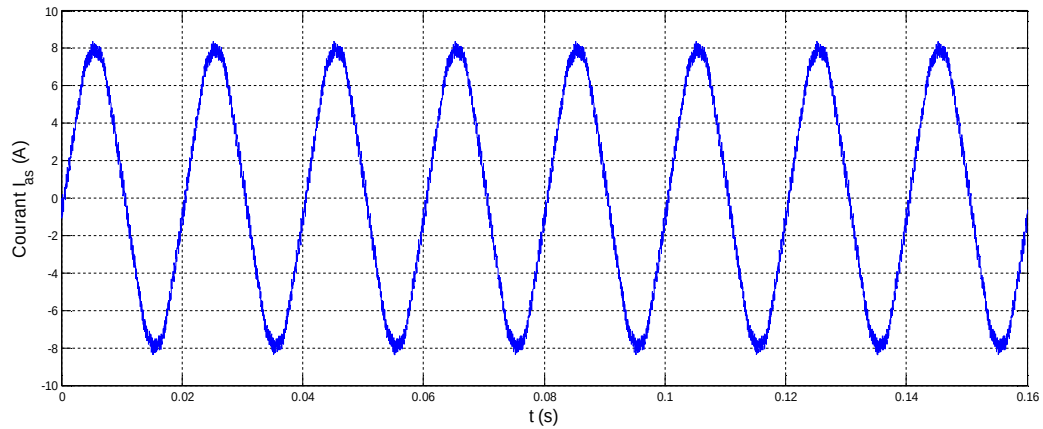
Figure (II. 5): Principe de la MLI sinusoidale

II.3.4. Résultats de simulation

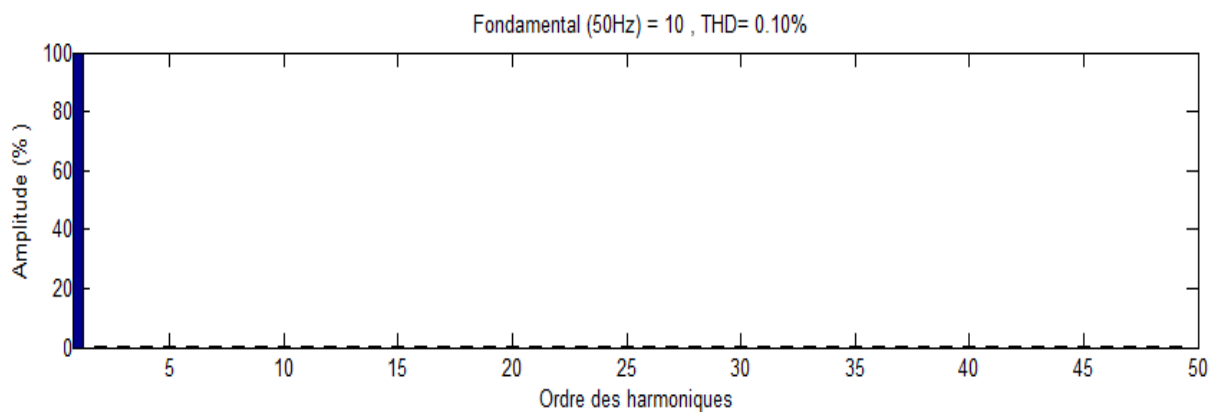
La figure (II. 9) présente les résultats de simulation effectués pour $m=71$ et $r=0,8$.



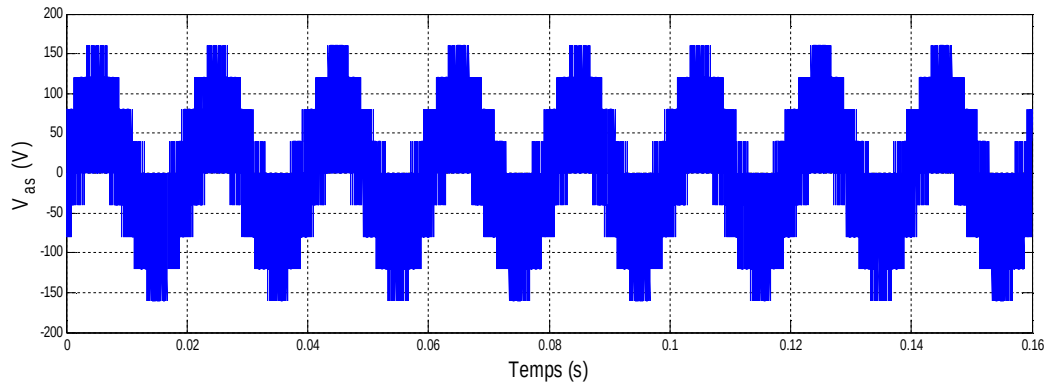
(a) : Courants des phases



(b) : Courant de la première phase



(c) : Spectre harmonique du courant de la première phase



(d) : Tension de la première phase

Figure (II. 6): Résultats de simulation d'onduleur à cinq phases contrôlé par la technique MLI sinusoïdale

L'avantage majeur de la technique de modulation sinusoïdale est sa capacité de repousser les harmoniques indésirables vers les fréquences les plus élevées ce qui va faciliter leur filtrage et minimiser ainsi les ondulations de vitesse, de couple et de courant. Cependant, cette technique présente l'inconvénient de générer des impulsions dissymétriques par rapport à une période de la porteuse. Ainsi, les instants de commutation ne peuvent être exprimés sous forme analytique simple; ce qui rend délicate sa mise en œuvre dans les applications numériques.

II.3.5. Stratégie de commande par modulation vectorielle

Dans un onduleur de tension à cinq bras, la représentation vectorielle consiste à associer aux cinq tensions moyennes appliquées aux phases de la machine un vecteur de tension (Figure II.7) dont l'extrémité décrit une trajectoire circulaire si les tensions sont sinusoïdales.

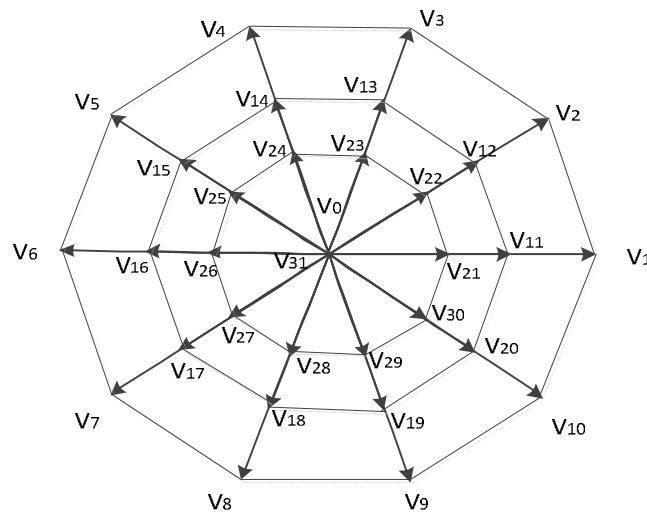


Figure (II. 7): Vecteurs de tension possibles d'un onduleur à cinq phases

Les vecteurs de tension de l'onduleur à cinq bras sont regroupées dans le tableau II.1.

Tableau (II. 1) : Vecteurs de tension de l'onduleur à cinq bras associés à leurs états de commutation

Modes	Vecteur Tension	Etat de commutation	V_a	V_b	V_c	V_d	V_e
1	V_1	11001	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2/5V_{DC}/5$
2	V_2	11000	$3V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
3	V_3	11100	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$
4	V_4	01100	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
5	V_5	01110	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$
6	V_6	00110	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
7	V_7	00111	$-3V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$
8	V_8	00011	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$
9	V_9	10010	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$
10	V_{10}	10001	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$
11	V_{11}	10000	$4V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$
12	V_{12}	11101	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$-4V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$
13	V_{13}	01000	$-V_{DC}/5$	$4V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$
14	V_{14}	11110	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$-4V_{DC}/5$
15	V_{15}	00100	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$4V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$
16	V_{16}	01111	$-4V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$
17	V_{17}	00010	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$4V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$
18	V_{18}	10111	$V_{DC}/5$	$-4V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$
19	V_{19}	00001	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$-V_{DC}/5$	$4V_{DC}/5$
20	V_{20}	11011	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$-4V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$	$V_{DC}/5$
21	V_{21}	10110	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$
22	V_{22}	10010	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
23	V_{23}	11010	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$

24	V_{24}	01010	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
25	V_{25}	01011	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$
26	V_{26}	01001	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$
27	V_{27}	01101	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$
28	V_{28}	00101	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$
29	V_{29}	10101	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$	$-3V_{DC}/5$	$2V_{DC}/5$
30	V_{30}	10100	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$3V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$	$-2V_{DC}/5$
31	V_0	00000	0	0	0	0	0
32	V_{31}	11111	0	0	0	0	0

Dans la technique MLI vectorielle appliqué sur l'onduleur à cinq bras, il est possible de se limiter à dix vecteurs non nuls et à deux vecteurs nuls comme le montre la figure (II.8) présent.

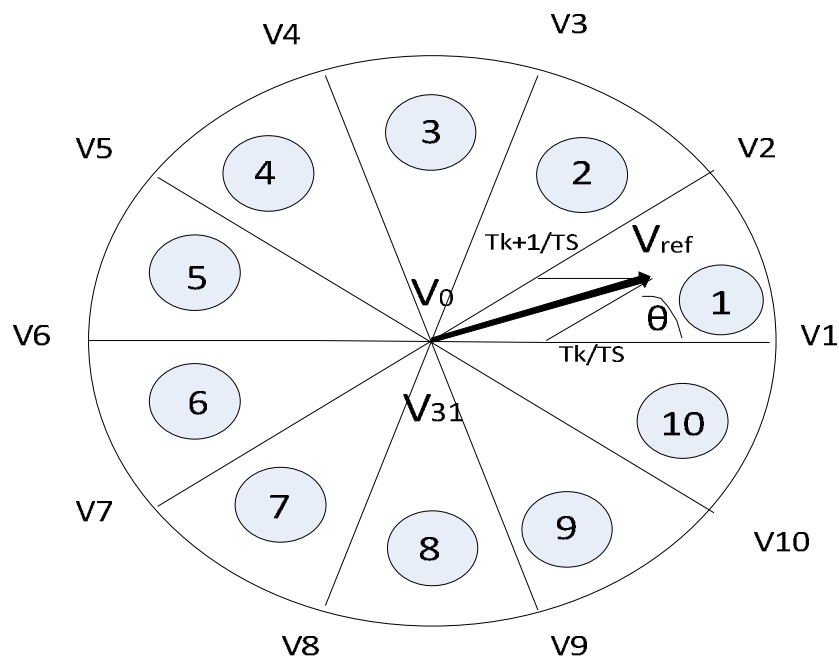


Figure (II. 8): Vecteurs de commutation nuls et externes de l'onduleur à cinq bras

II.3.5.a. Calcul des temps de fermeture et ouverture des interrupteurs

Dans le repère α - β la reconstruction des tensions $V_{\alpha ref}$ et $V_{\beta ref}$ à partir des vecteurs adjacents dans le secteur k conduit à :

$$\begin{aligned} V_{\alpha ref} &= \frac{T_k}{T_s} V_{k\alpha} + \frac{T_{k+1}}{T_s} V_{(k+1)\alpha} \\ V_{\beta ref} &= \frac{T_k}{T_s} V_{k\beta} + \frac{T_{k+1}}{T_s} V_{(k+1)\beta} \end{aligned} \quad (II.14)$$

A partir du system (II.14), on peut en déduire T_k et T_{k+1} comme suit :

$$\begin{aligned} T_k &= \frac{V_{(k+1)\beta} V_{\alpha ref} - V_{(k+1)\alpha} V_{\beta ref}}{V_{k\alpha} V_{(k+1)\beta} - V_{(k+1)\alpha} V_{k\beta}} \\ T_{k+1} &= \frac{V_{k\alpha} V_{\beta ref} - V_{k\beta} V_{\alpha ref}}{V_{k\alpha} V_{(k+1)\beta} - V_{(k+1)\alpha} V_{k\beta}} \end{aligned} \quad (II.15)$$

L'équation (II.15) peut être réécrite sous la forme suivante :

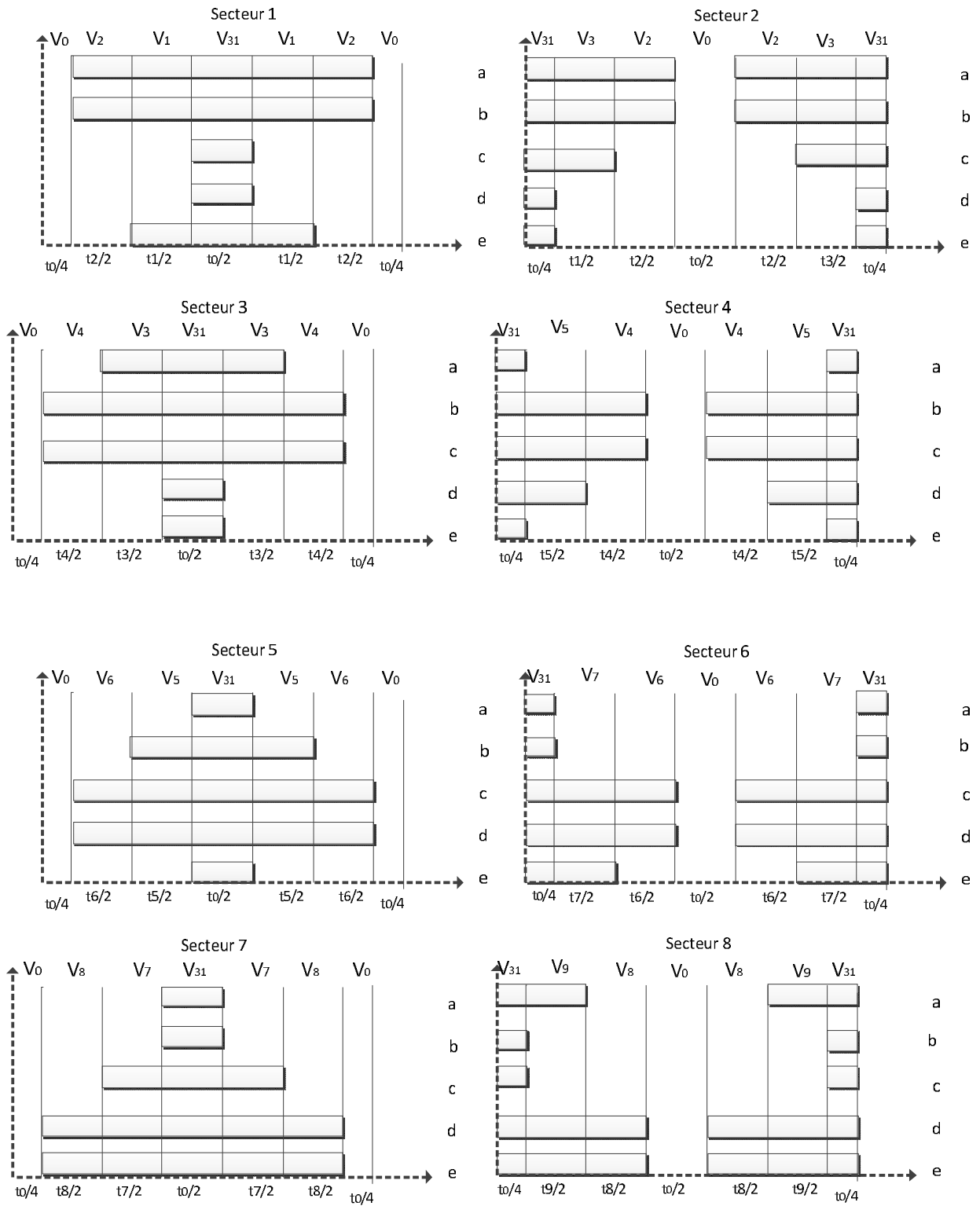
$$\begin{aligned} T_k &= \frac{V_{ref} \sin(k\alpha - \theta)}{V_{max} \sin \alpha} T_s \\ T_{k+1} &= \frac{V_{ref} \sin(\theta - (k-1)\alpha)}{V_{max} \sin \alpha} T_s \end{aligned} \quad (II.16)$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{\pi}{5}$$

k est le numéro de secteur où le vecteur de référence est situé. La plage valide de k allant de 1 à 10 du fait que les dix vecteurs divisent le plan α - β en dix zones. L'angle θ est défini comme étant l'angle du vecteur de tension par rapport à l'axe α . Le temps des vecteurs nuls est calculé par :

$$t_0 = T_s - t_k - t_{k+1} \quad (II.17)$$

La répartition des vecteurs dans une période de commutation pour les différents secteurs est illustrée par la figure (II.9)



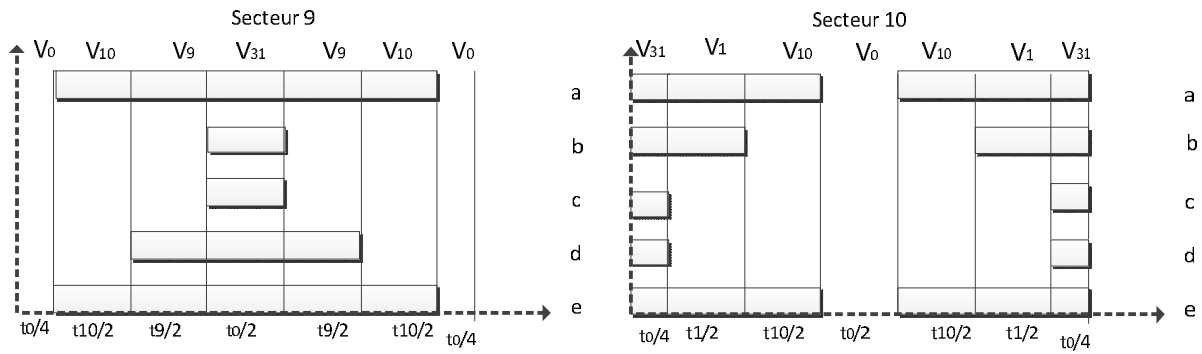
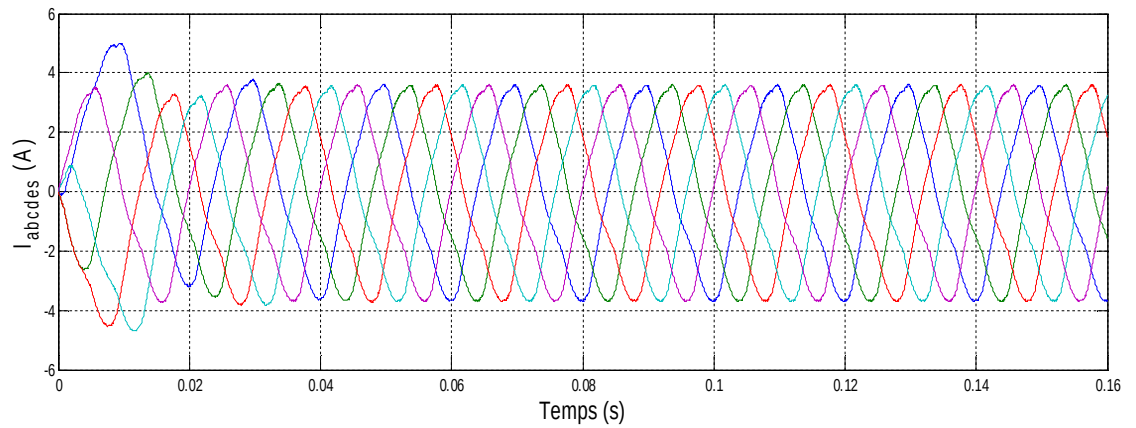


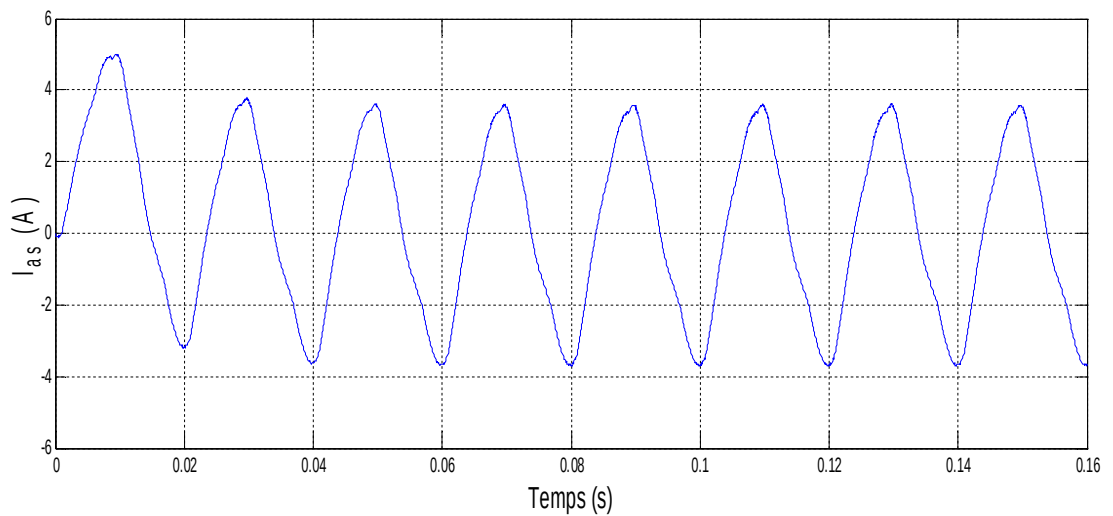
Figure (II. 9): Application des vecteurs actifs et nuls dans les différents secteurs

II.3.5.b. Résultats de simulation

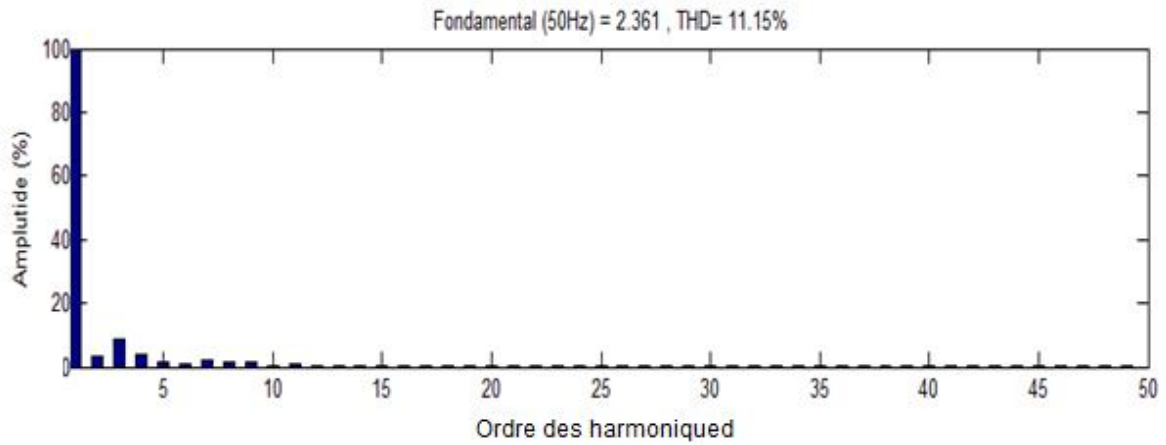
La figure (II. 10) présente les résultats de simulation de l'onduleur à cinq phases contrôlé par la technique de modulation vectorielle pour une fréquence de commutation de 5 kHz.



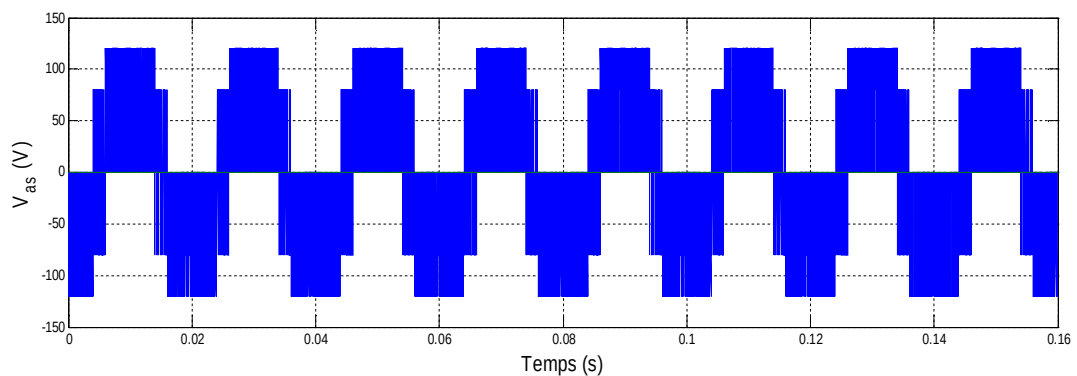
(a) : Courants des phases



(b) : Courant de la première phase



(c) : Spectre harmonique du courant de la première phase



(d) : Tension de la première phase

Figure (II. 10): Résultats de simulation d'onduleur cinq bras contrôlé par la MLI vectorielle

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de l'onduleur de tension à deux niveaux à cinq bras.

Nous avons présenté également trois stratégies de commande de l'onduleur à cinq bras à savoir la stratégie de commande par hystérésis de courant, la MLI sinusoïdale et la modulation vectorielle.

Pour les modulations sinusoïdale et vectorielle, connues par leur fréquence de commutation fixe, permettent d'éliminer les harmoniques de rangs plus faibles et les repousser vers les fréquences les plus élevées ce qui se répercute sur la facilité de filtrage. Tandis que la commande par hystérésis de courant offrant la possibilité de contrôler les courants de lignes avec une dynamique appréciable souffre de la variation de la fréquence de commutation.