

CHAPITRE II

STRATEGIES DE COMMANDE DE REDRESSEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX

II.1. INTRODUCTION

Après avoir fait la modélisation de notre convertisseur, nous allons maintenant nous intéresser à la commande des interrupteurs supposés idéals (temps de commutation nul, pertes négligeables). Plusieurs auteurs ont proposé de différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion chacune d'elles doit obéir à un algorithme bien défini, mais toutes sont conçues pour générer une source de tension d'entrée de redresseur à trois niveaux la plus sinusoïdale possible.

L'idée de mettre en évidence ces stratégies est venue après extrapolation de la méthodologie conçus pour les convertisseurs à deux niveaux

Toujours avec le même objectif que pour les convertisseurs classiques (tension, fréquence variables avec un minimum d'harmonique), nous allons étudier quelques stratégies.

Ce chapitre est composé de quatre parties :

- Commande par hystérésis en courant
- Commande triangulo- sinusoïdale :
 - ü À une seule porteuse(unipolaire , bipolaire)
 - ü À deux porteuses bipolaires en dents de scie
- Modulation vectorielle type 2
- Modulation calculée

II.2. STRATEGIES DE COMMANDES DU REDRESSEUR

II. 2.1. Commande par hystérésis en courant:

a. Principe

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références. [1]

b. Algorithme de la commande

Pour le redresseur triphasé à trois niveaux, l'algorithme de la commande par hystérésis en courant se résume pour une phase k ($k = \{1,2,3\}$) par le système (II.1) ci dessous

Soit ε_k l'écart entre le courant réel et le courant de référence défini par : $\varepsilon_k = i_k - I_{refk}$, la commande des interrupteurs sont déterminés alors comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta i \leq |\varepsilon_k| \leq 2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \\ \varepsilon_k > 2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ \varepsilon_k < -2.\Delta i &\Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \end{aligned} \quad (II.1)$$

Les courant de référence pour alimenter le redresseur sont donnés par le système (II.2)

$$\begin{aligned} I_{ref1} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega.t) \\ I_{ref2} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega.t - 2\pi/3) \\ I_{ref3} &= I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega.t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (II.2)$$

Figure (II .1.1) représente les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V=220V$, $f=50Hz$, $R_{res}=25\Omega$, $L_{res}=0.001H$) commandé par la stratégie hystérésis avec $I_{ref}=18A$ et $\Delta i = 0.01$.

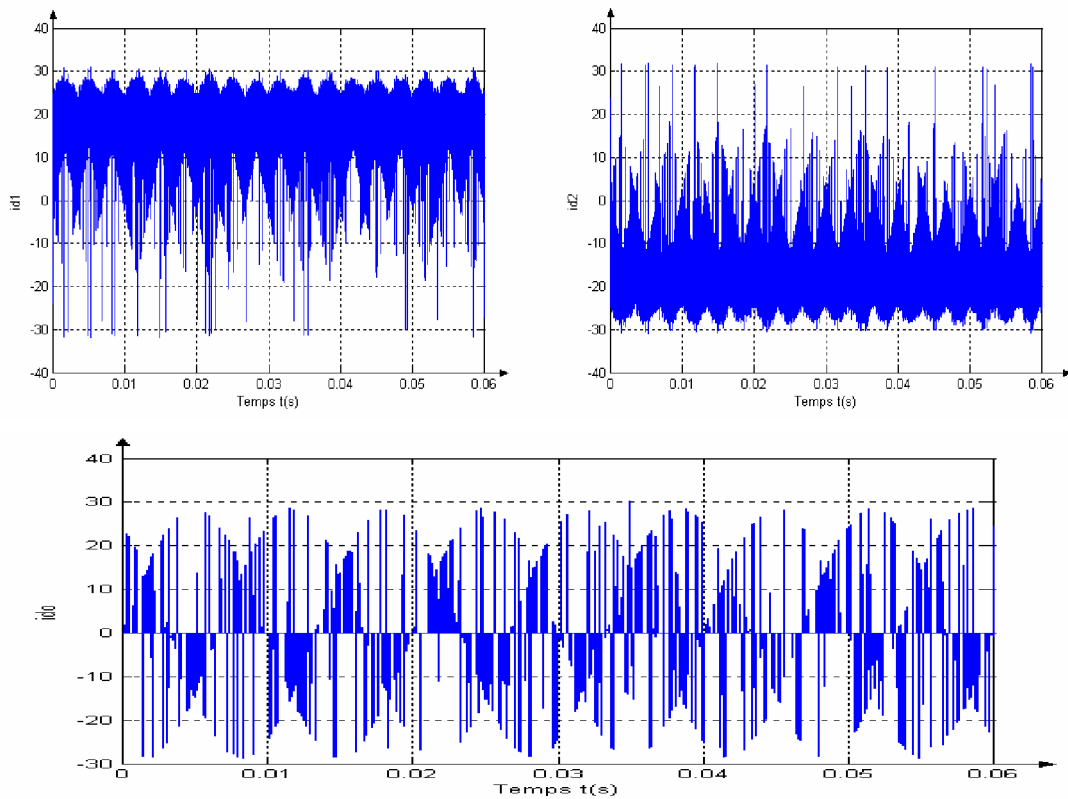


Fig.(II.1.1) les courants redressés Ired1, Ired2 et Ired0

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V = 220V$, $f = 50 \text{ Hz}$, $R_{res} = 0.25\Omega$, $L_{res} = 0.01H$). Les

Capacités de filtre $C_1=C_2=0.02F$) commandé par la stratégie hystérésis avec $\Delta i = 0.01A$ et $I_{ref} = 24 A$ qui alimente les charges suivants :

- § $R_{ch} = 25 \Omega$ résistance pure.
- § $R_1=R_2= R_{ch}/2 = 12.5 \Omega$ charge résistive à point milieu

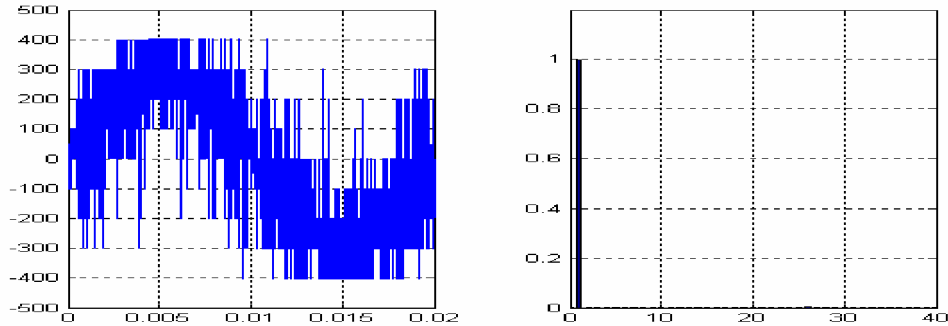


Fig.II.1.2. Tension V_1 de la première phase de redresseur triphasé à trois niveaux et son spectre harmonique.

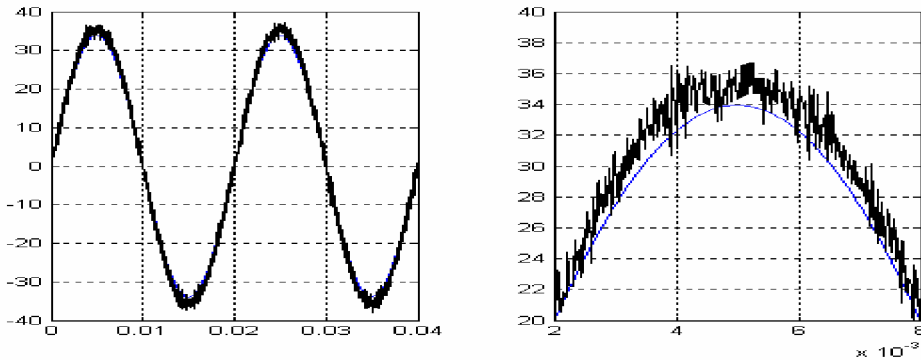


Fig.II.1.3. courant de réseau de la première phase et son courant de référence

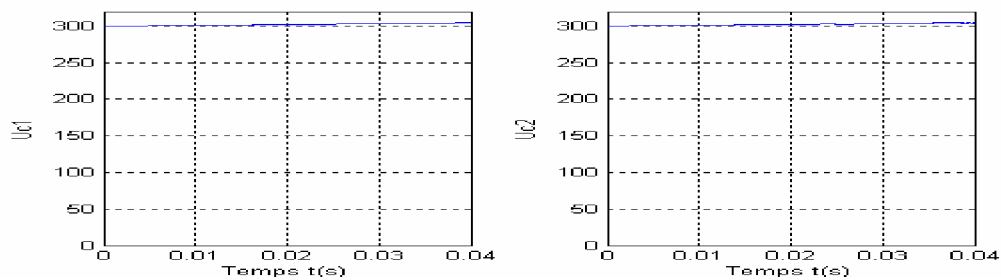


Fig.II.1.4. Tensions de sortie de redresseur alimentant une charge résistive à point milieu

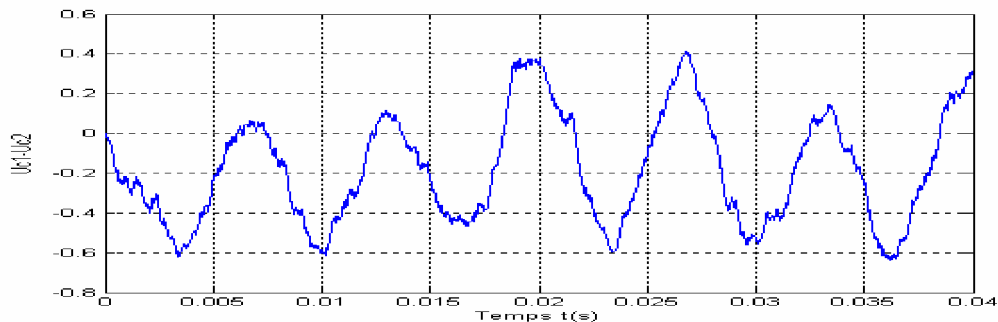


Fig.II.1.5. différence entre les deux tensions de sortie du redresseur alimentant une charge résistive à point milieu

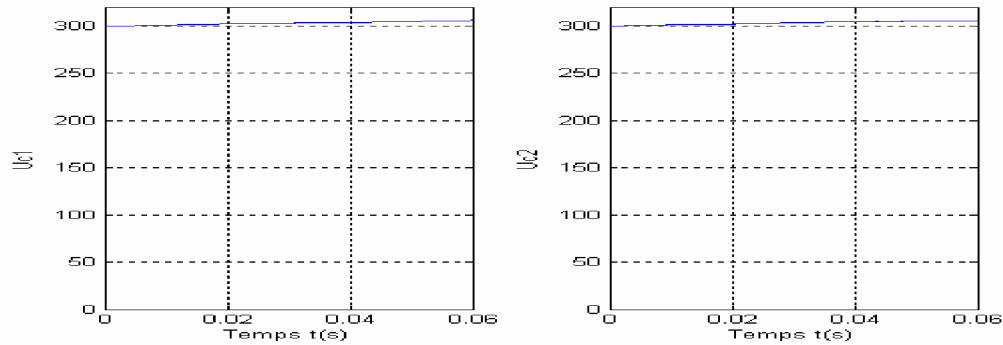


Fig.II.1.6. Tensions de sortie de redresseur alimentant une charge résistive pure

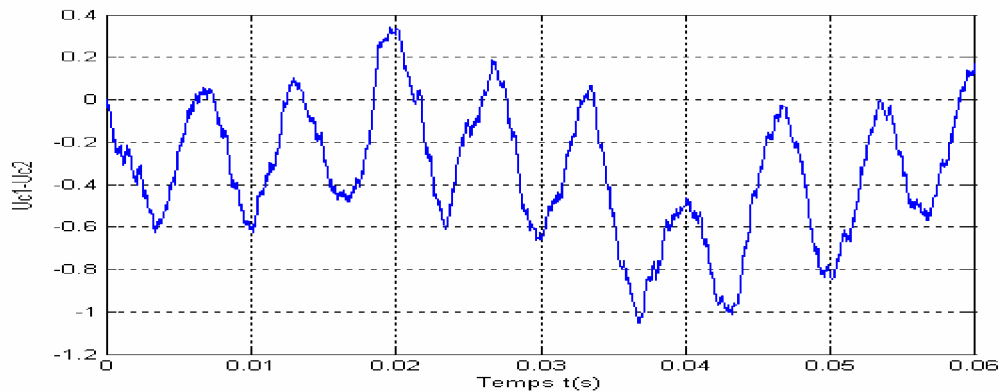


Fig.II.1.7. différence entre les deux tensions de sortie de redresseur alimentant une charge résistive pure

c. Commentaires :

On remarque que les courants **Ired1** et **Ired2** figure (II.1.1), ont la même forme mais ils sont inversés l'un par rapport à l'autre. Le courant **Ired0** a une forme périodique et sa valeur moyenne pratiquement nulle.

La figure (II.1.2) montre que les harmoniques de la tension sont pratiquement négligeables par rapport au fondamentale, c'est là un des points positifs des redresseurs à trois niveaux triphasés, et la figure (II.1.3) montre que les courants de réseau suivent bien leurs références ; ils sont pratiquement sinusoïdaux.

Les tensions **Uc1** et **Uc2**, dans les deux cas (soit **R_{ch}=25Ω** pure (figure (II.1.6)) ou **R₁=R₂=12.5Ω** résistance à point milieu (figure (II.1.4))) sont bien lissées. Les figures (II.1.5) et (II.1.7) montrent que la différence **Uc1-Uc2** existe mais elle est pratiquement négligeable.

Pour la charge résistive à point milieu la différence **Uc1-Uc2** est plus améliorée que pour une charge résistive pure, c'est à cause du courant **i_{ch1}-i_{ch2}** qui compense le courant **i_{d0}**.

Remarque :

Dans certains cas et pour certaines valeurs de **Δi**, le redresseur de courant à trois niveaux fonctionne plus en deux niveaux qu'en trois niveaux.

II. 2.2. Commande triangulo-sinusoidale:

II. 2.2.1 Commande triangulo-sinusoidale à échantillonnage naturel avec une seule porteuse :

a. Principe [1]

Le principe général de cette stratégie est de comparer une tension de référence à une porteuse triangulaire ou en dent de scie. Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation **m** et le taux de modulation **r**.

L'indice de modulation **m** est le rapport de la fréquence **f_p** de la porteuse à la fréquence **f** de la tension de référence $\left(m = \frac{f_p}{f} \right)$.

Le taux de modulation **r** est le rapport de l'amplitude **V_m** de la tension de référence à l'amplitude **U_{pm}** de la porteuse $\left(r = \frac{V_m}{U_{pm}} \right)$.

Lorsque **m** est entier, la modulation est **synchrone** et **asynchrone** dans le cas contraire.

Les tensions de référence permettant de générer un système de tensions triphasé équilibré direct elles sont définies par le système (II.3) :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ V_{ref2} = V_m \cdot r \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_m \cdot r \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II.3)$$

L'algorithme de la commande triangulo- sinusoidale se résume pour un bras **k** de redresseur comme suit (II.4):

$$\begin{cases} (|V_{refk}| \leq U_p) \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \\ (|V_{refk}| > U_p) \& (V_{refk} > 0) \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ (|V_{refk}| > U_p) \& (V_{refk} < 0) \Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \end{cases} \quad (.II.4):$$

Avec cet algorithme et pour les tensions de référence du système (II.3) on a pour la phase une par exemple :

Pour $0 < \omega \cdot t \leq \pi$, on a **B₁₁ = 1**, Ou module la tension d'entrée du redresseur en jouant sur **B₁₂**.

Pour $\pi < \omega \cdot t \leq 2\pi$, on a **B₁₂ = 0**, Ou module la tension d'entrée du redresseur en jouant sur **B₁₁**.

Les figures (II.2.1.a) et (II.2.1.b) représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V=220V$, $f=50Hz$, $R_{res} = 25\Omega$, $L_{res} = 0.01H$) commandé par cette stratégie avec $m=21$ et $r=0.8$.

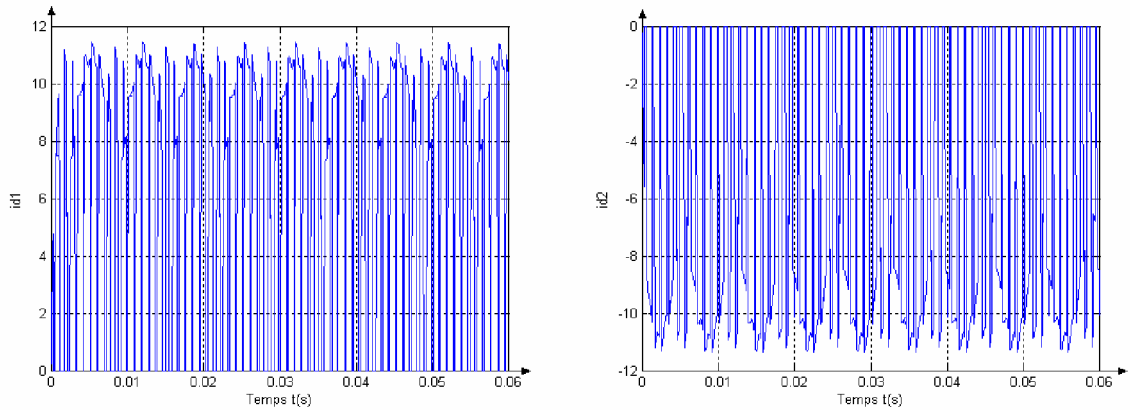


Fig.(II.2.1.a) les courants redressés Ired1 et Ired2

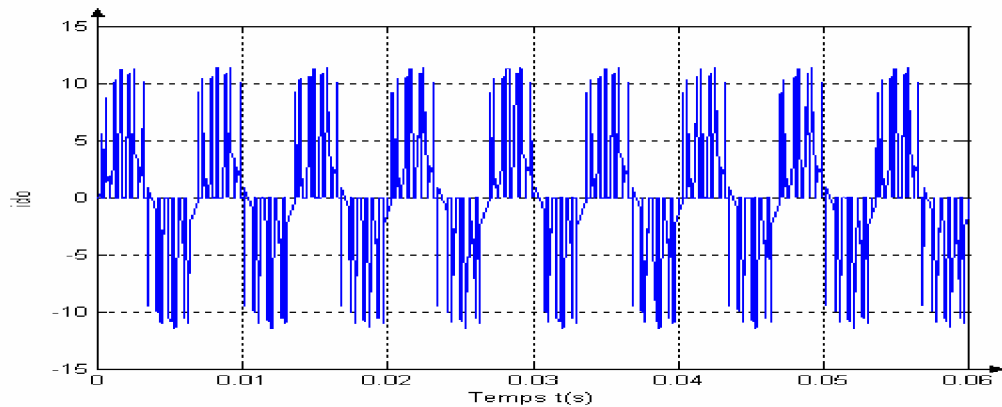


Fig.(II.2.1.b) le courant redressé du point milieu Ired0

v La porteuse unipolaire :

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux avec un réseau triphasé ($V_{eff}= 220V$, $f = 50\text{ Hz}$, $L_{res1} = 0.01\text{ H}$, $R_{res1} = 0.25\Omega$, des capacités $C_1 = C_2 = 20mF$ (puis $C_1=C_2 = 2mF$) et avec une charge résistive à point milieu $R_1 = R_2 = 12.5\Omega$.

Nous présentons la porteuse unipolaire et les tensions de références de la stratégie triangulo- sinusoïdale pour $m=12$ ($m=9$ et $m=36$), $r=0.8$.

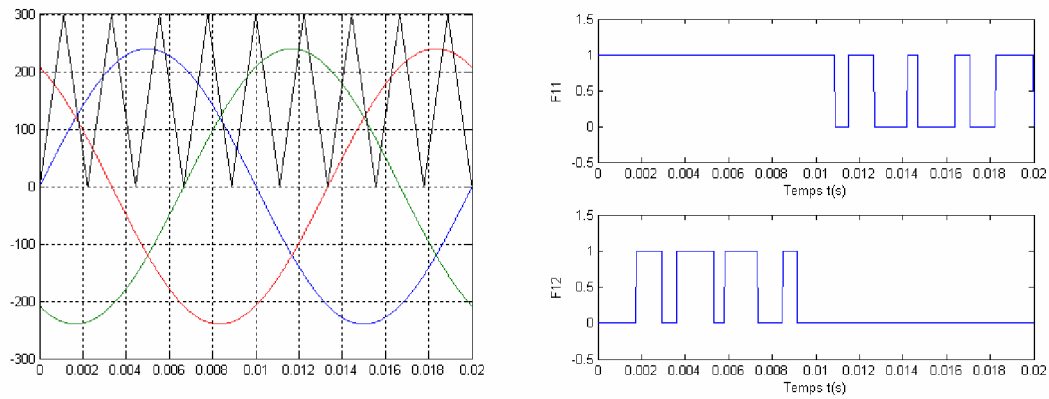


Fig.II.2.2. la porteuse unipolaire, les tensions de référence et la commande des interrupteurs pour ($m = 9$, $r=0.8$)

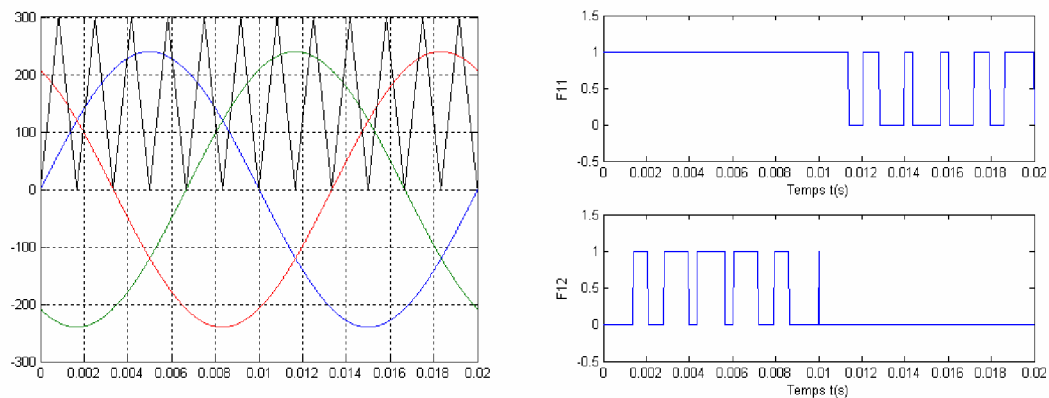


Fig.II.2.3. la porteuse unipolaire, les tensions de référence la commande des interrupteurs pour ($m = 12$, $r = 0.8$)

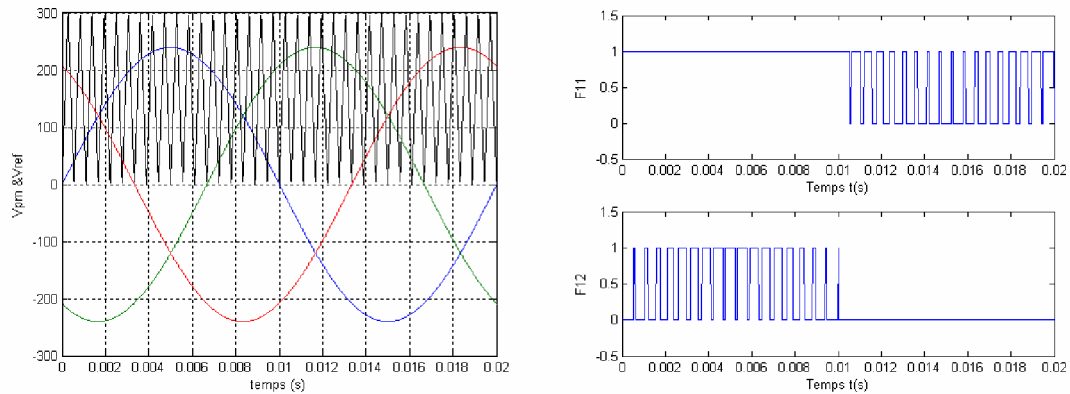


Fig.II.2.4. la porteuse unipolaire, les tensions de référence et la commande des interrupteurs pour ($m = 36$, $r=0.8$)

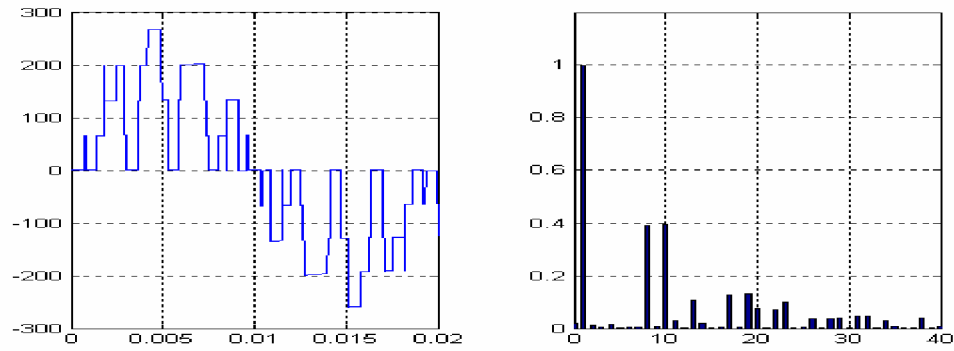


Fig.II.2.5. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=9, r=0.8$).

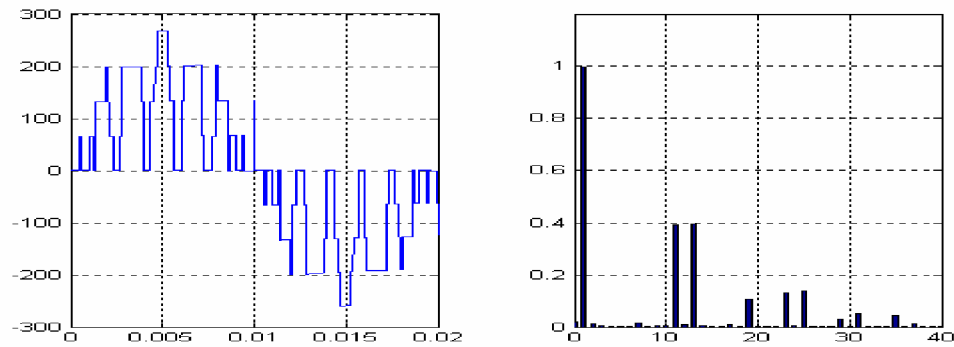


Fig.II.2.6. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=12, r=0.8$).

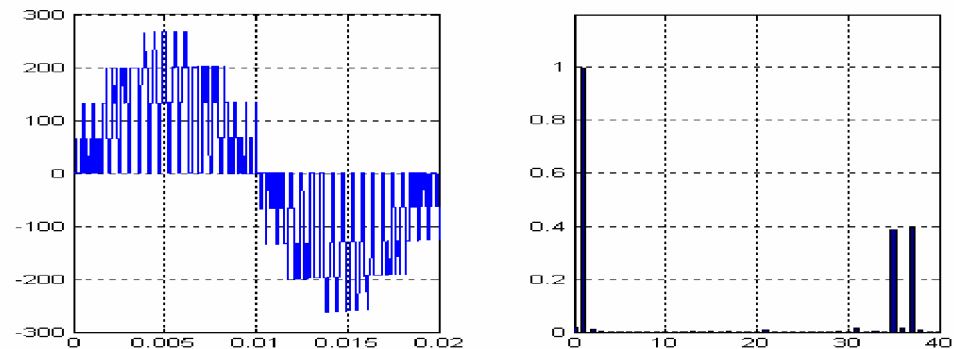


Fig.II.2.7. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=36, r=0.8$).

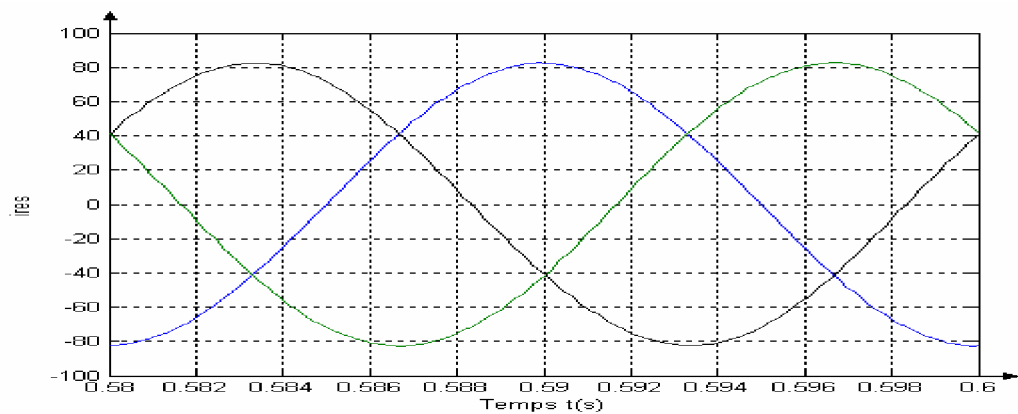


Fig.II.2.8. les courants du réseau ($m=36, r=0.8$).

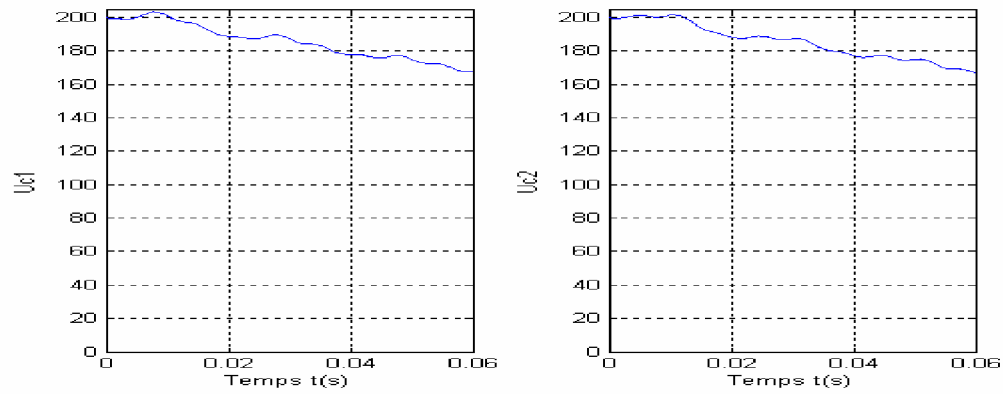


Fig.II.2.9. Tensions de sortie de redresseur avec $C_1 = C_2 = 20\text{mF}$ ($m=36, r=0.8$).

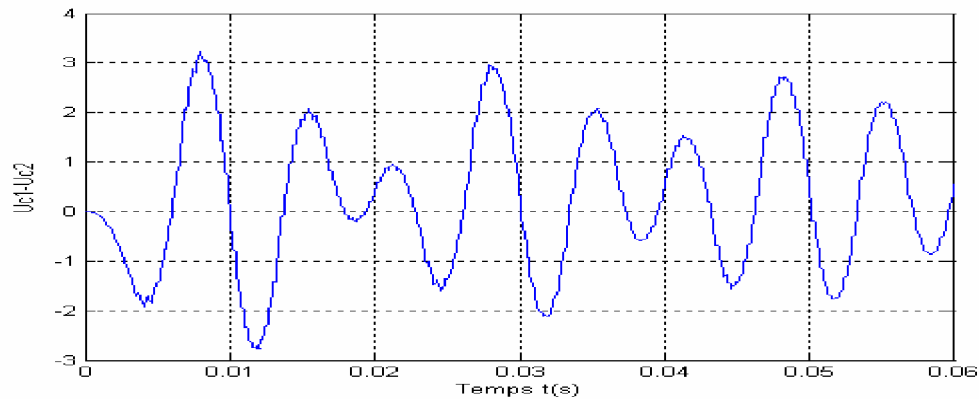


Fig.II.2.10. Différence entre les deux tensions de sortie de redresseur avec $C_1 = C_2 = 20\text{mF}$ ($m=36, r=0.8$).

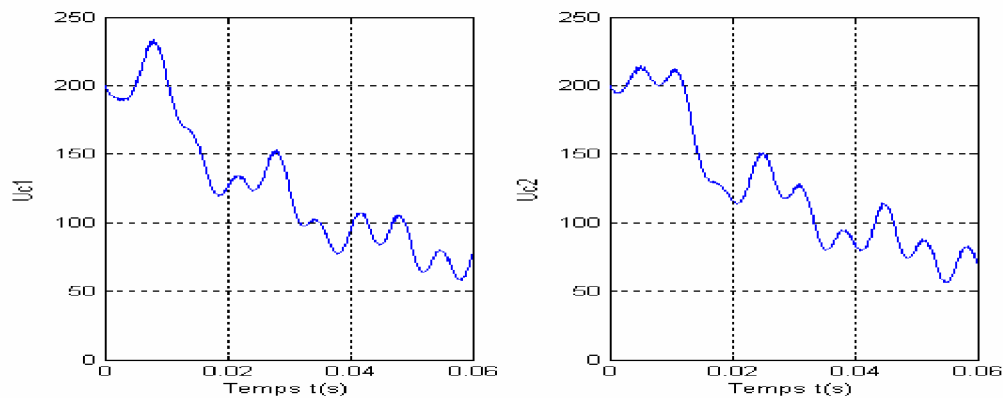


Fig.II.2.11. Tensions de sortie de redresseur avec $C_1 = C_2 = 2\text{mF}$ ($m=36, r=0.8$).

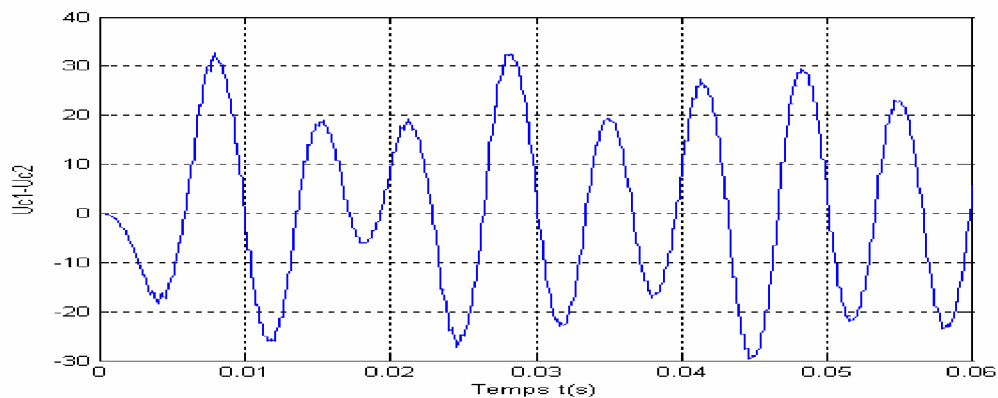


Fig.II.2.12. Différence entre les deux tensions de sortie de redresseur avec $C_1 = C_2 = 2\text{mF}$ ($m=36, r=0.8$).

b. Commentaires :

On remarque que les courants **Ired1** et **Ired2**, figure ((II.2.1)) ont la même forme mais ils sont inversés l'un par rapport à l'autre. Le courant **Ired0** a une forme périodique et sa valeur moyenne pratiquement nulle

Les figures (II.2.2, II.2.3 et II.2.4.) montrent la porteuse unipolaire, les tensions de référence et la génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras **k**, pour (**m=9, 12 et 36**), ou nous pouvons dire que le nombre d'impulsions **p** de la tension d'entrée du redresseur par alternance vaut :

$$\begin{aligned} p &= (m/2) - 1 & \text{si } m \text{ est pair} \\ p &= (m-1)/2 & \text{si } m \text{ est impair} \end{aligned}$$

Le nombre de commutation par période d'un interrupteur de redresseur à trois niveaux est **2.p**.

Les figures (II.2.5 II.2.6 et II.2.7) montrent la tension simple de l'entrée d'un bras du redresseur pour différentes valeurs de **m=9,12 et 36**, nous remarquons toujours la présence des harmoniques paire pour des valeurs impaire de **m** ; et pour **m = 12** les harmoniques 3 et 7 sont faibles et que les harmoniques multiples de trois sont nulle.

Nous constatons que les harmoniques de tensions se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de celle de la porteuse **f_p = m.f**, donc en augmentant **m** nous facilitons le filtrage des harmoniques de courant.

La figure (II.2.8) représente les trois courants du réseau **i_{res1}**, **i_{res2}** et **i_{res3}**.

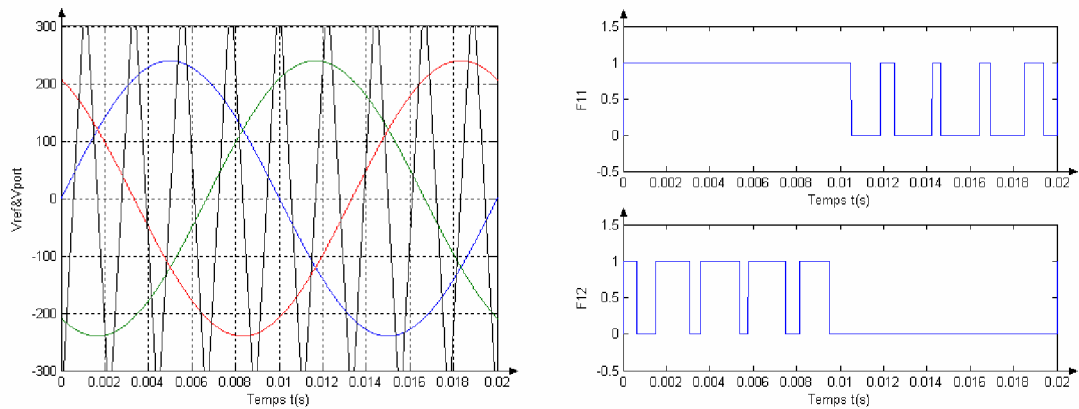
Les figures (II.2.9, II.2.11.) montrent les tensions de sortie de redresseur pour les deux cas ou **C₁ = C₂ = 20mF** et **C₁ = C₂ = 2 mF**. Nous remarquons que plus la valeur de **C₁** (ou **C₂**) de la capacité augmente plus les deux tensions de sortie devient plus lissées. Nous avons une nette amélioration sur **U_{c1}** (**ou U_{c2}**) car, plus **C** croît plus le temps de décharge des capacités augmente et l'amplitude des ondulations sera plus faible.

v Porteuse bipolaire

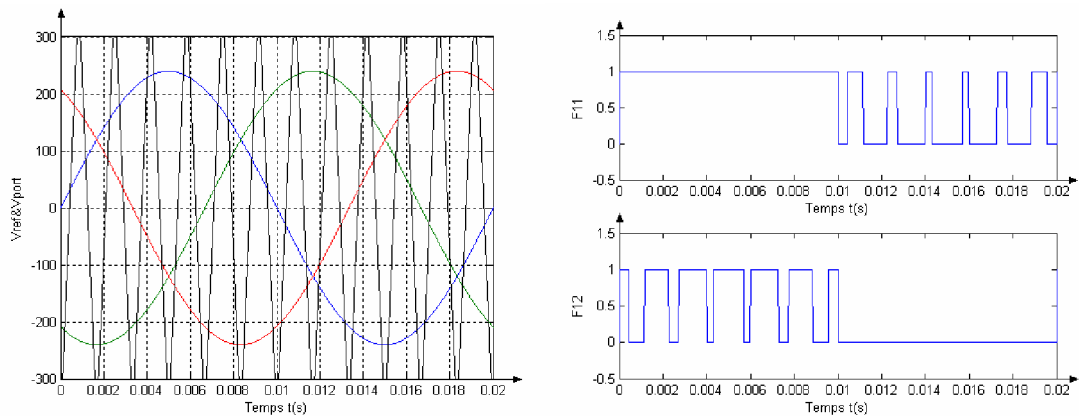
Les figures (II.2.13 II.2.14 et II.2.15) montrent la porteuse bipolaire, les tensions de référence et la génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras **k** pour **m =9, 12,36** et **r =0.8**.

Les figures (II.2.16, II.2.17 et II.2.18) montrent la tension d'entrée de la première phase du redresseur pour différentes valeur de **m** avec **r=0.8**, pour les cas ou **m** est pair **m=9,12** et **m=36** on remarque que seul les harmoniques impairs sont présent. Ainsi, les harmoniques de **rang 5** et **7** pour le cas **m=36** sont plus faibles dans les autres cas. C'est-à-

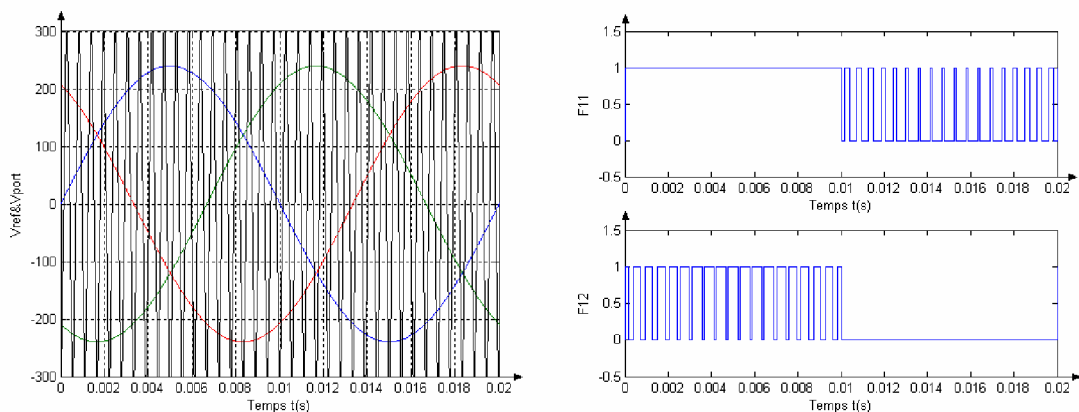
dire l'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrés.



**Fig.II.2.13. la porteuse unipolaire, les tensions de référence
Et la commande des interrupteurs pour ($m = 9$, $r=0.8$)**



**Fig.II.2.14. la porteuse unipolaire , les tensions de référence
et la commande des interrupteurs pour ($m = 12$, $r=0.8$)**



**Fig.II.2.15. la porteuse unipolaire , les tensions de référence
Et la commande des interrupteurs pour ($m = 36$, $r=0.8$)**

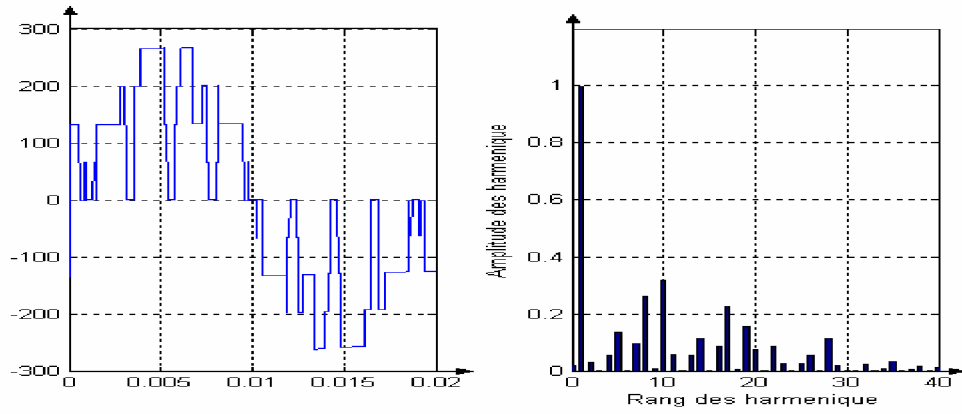


Fig.II.2.16. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=9, r=0.8$).

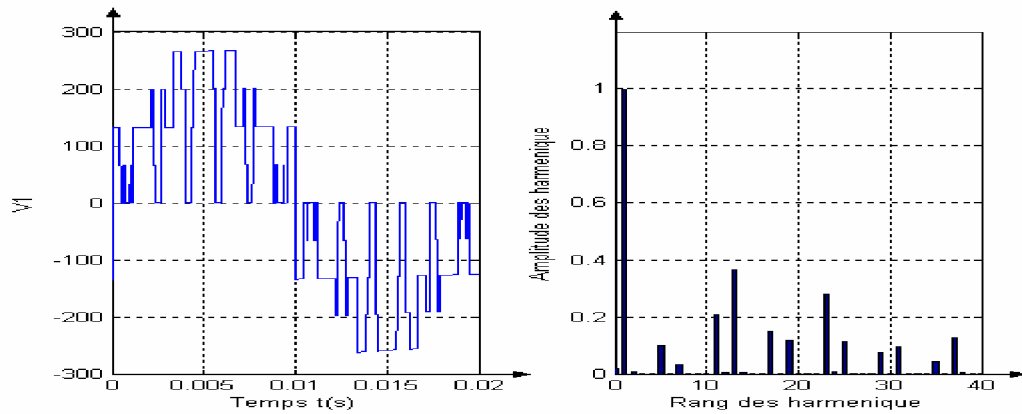


Fig.II.2.17. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=12, r=0.8$).

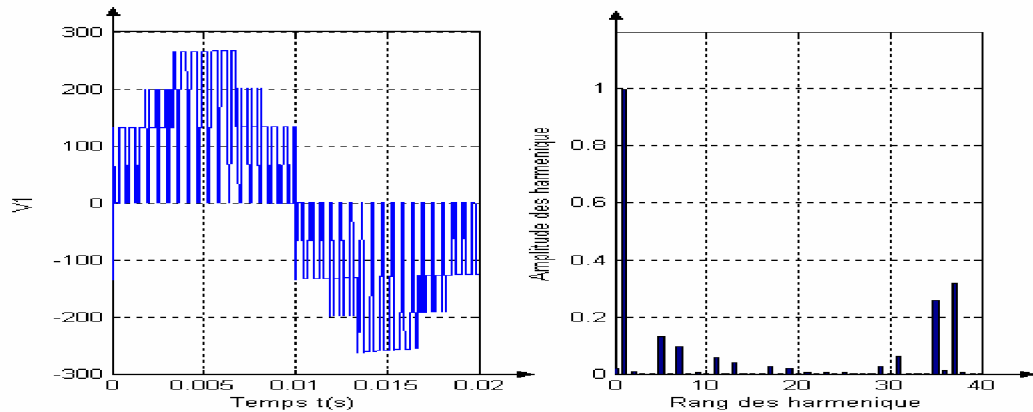


Fig.II.2.18. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=36, r=0.8$).

II. 2.2.2 Commande triangulo-sinusoïdale à échantillonnage naturel avec deux porteuses bipolaires en dents de scie:

a. Principe [1]

Pour les redresseurs à trois niveaux, nous pouvons utiliser deux porteuses identiques, déphasées d'une demi-période de hachage ($T_p/2$) l'une de l'autre afin d'améliorer le taux d'harmoniques des tensions de sortie. Différentes porteuses sont possibles :

- Porteuse triangulaire unipolaire
- Porteuse en dent de scie unipolaire ou bipolaire

La porteuse en dent scie bipolaire permet d'avoir un taux d'harmoniques le plus faible mais avec des harmoniques pairs et impairs. Les porteuses triangulaires permettent des tensions de sortie ayant la symétrie par rapport au quart et à la demi- période. Dans cette partie, nous présenterons le cas de deux porteuses en dents scie bipolaires.

La stratégie est résumée dans deux étapes suivantes :

Etape 1 : détermination des signaux intermédiaires V_{k1} , V_{k0}

$$\begin{aligned} (V_{\text{refk}} \geq U_{p1}) &\Rightarrow V_{k1} = U_{p1} & (V_{\text{refk}} \geq U_{p2}) &\Rightarrow V_{k0} = 0 \\ (V_{\text{refk}} < U_{p1}) &\Rightarrow V_{k1} = 0 & (V_{\text{refk}} \geq U_{p2}) &\Rightarrow V_{k0} = -U_{p2} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Etape 2 : détermination du signal V_{k2} et des ordres de commande B_{ks} des interrupteur

$$\begin{aligned} V_{k2} = U_{p1} &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 0 & V_{k2} &= V_{k1} + V_{k0} \\ V_{k2} = -U_{p2} &\Rightarrow B_{k1} = 0 ; B_{k2} = 0 & \text{avec} & B_{k3} = \overline{B_{k2}} \\ V_{k2} = 0 &\Rightarrow B_{k1} = 1 ; B_{k2} = 0 & & B_{k4} = \overline{B_{k1}} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Comme la stratégie triangulo- sinusoïde à une porteuse, cette stratégie est caractérisée aussi par l'indice de modulation m et le taux de modulation r , un système de référence de tensions est toujours défini par les équations (II.3).

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux. Avec un réseau triphasé ($V_{\text{eff}} = 220\text{V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $L_{\text{res1}} = 0.01\text{ H}$, $R_{\text{res1}} = 0.25\Omega$) et des capacités $C_1 = C_2 = 20\text{mF}$ et avec une charge résistive à point milieu $R_1 = R_2 = 12.5\Omega$. Nous présentons la porteuse bipolaire en dents scie et les tensions de références de la stratégie triangulo -sinusoïdale pour ($m=12m=9$ et $m=36$), $r=0.8$.

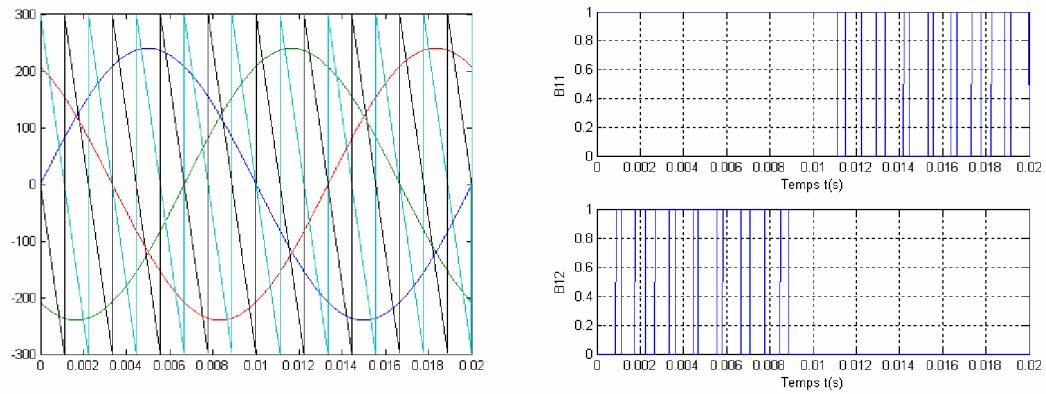


Fig.II.2.19. Les deux porteuses bipolaire, les tensions de référence et la commande des interrupteurs Pour ($m = 9, r=0.8$)

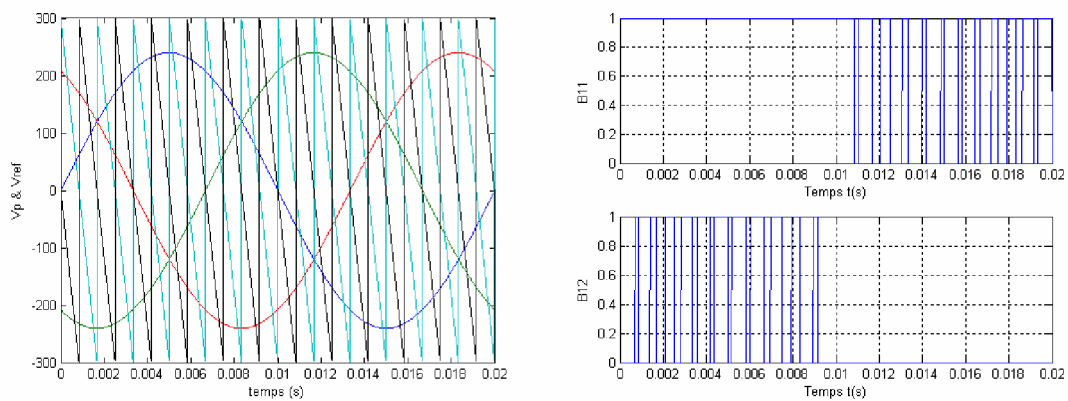


Fig.II.2.20. Les deux porteuses bipolaire, les tensions de référence et la commande des interrupteurs Pour ($m = 12, r=0.8$)

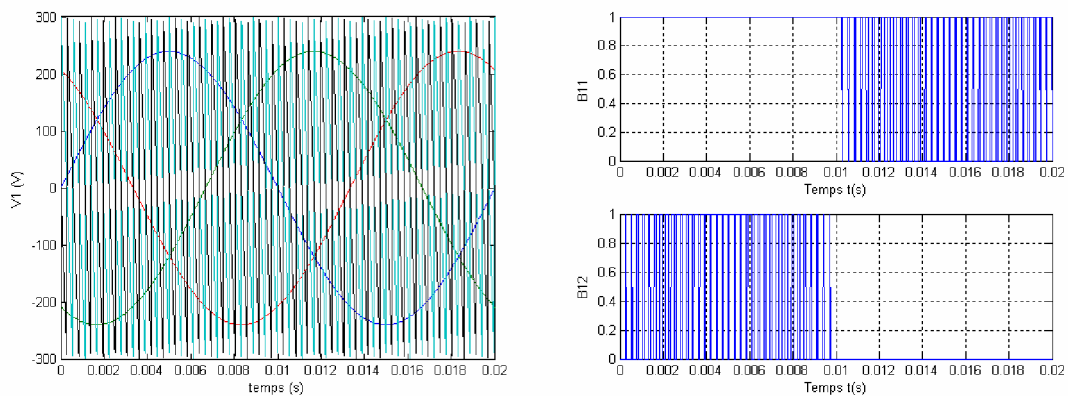


Fig.II.2.21. les deux porteuses bipolaire, les tensions de référence et la commande des interrupteurs Pour ($m = 36, r=0.8$)

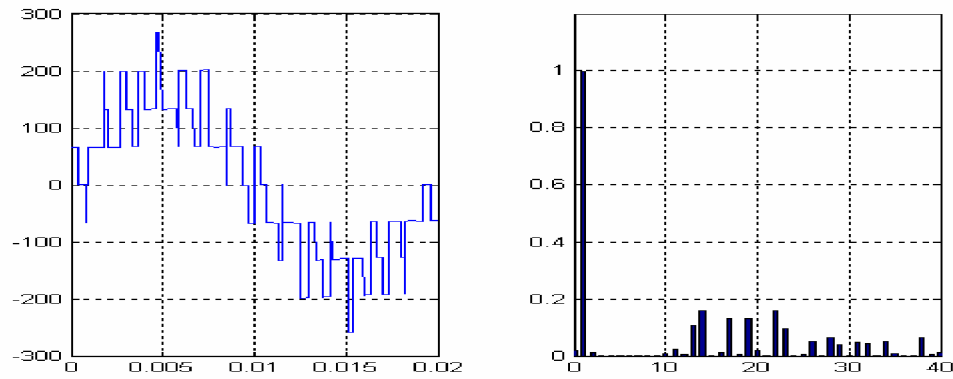


Fig.II.2.22. La tension simple V_1 et son spectre harmonique ($m=9, r=0.8$).

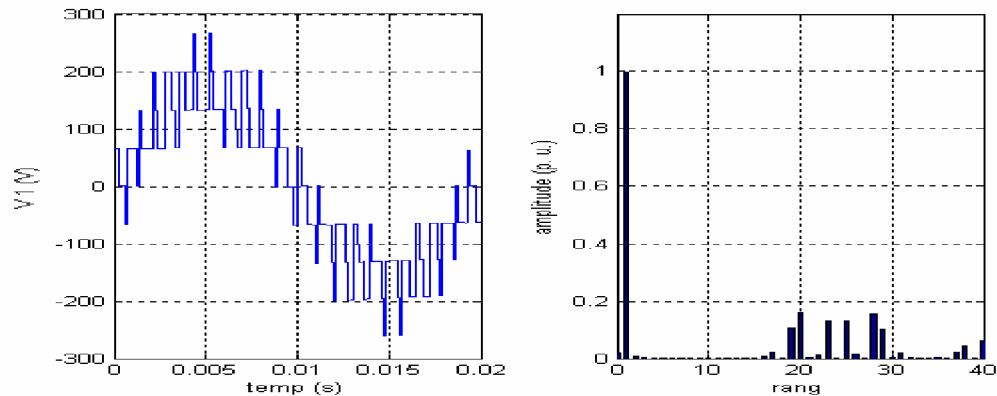


Fig.II.2.23. La tension simple V_1 et son spectre harmonique ($m=12, r=0.8$).

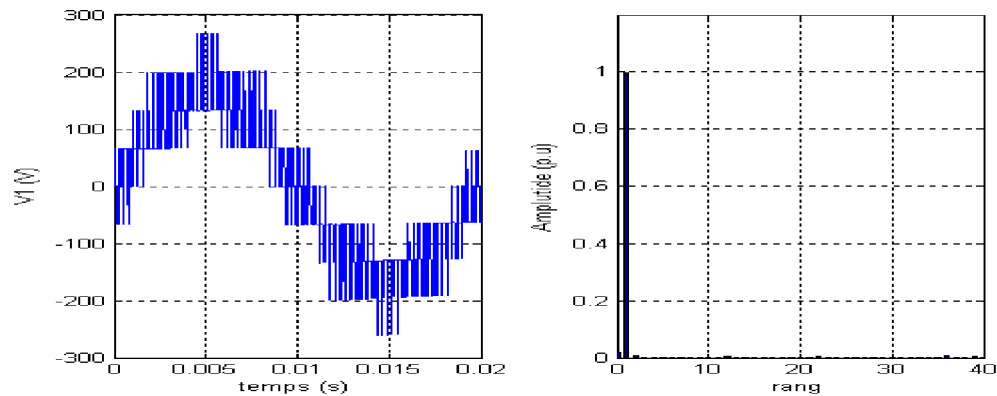


Fig.II.2.24. La tension simple V_1 et son spectre harmonique ($m=36, r=0.8$).

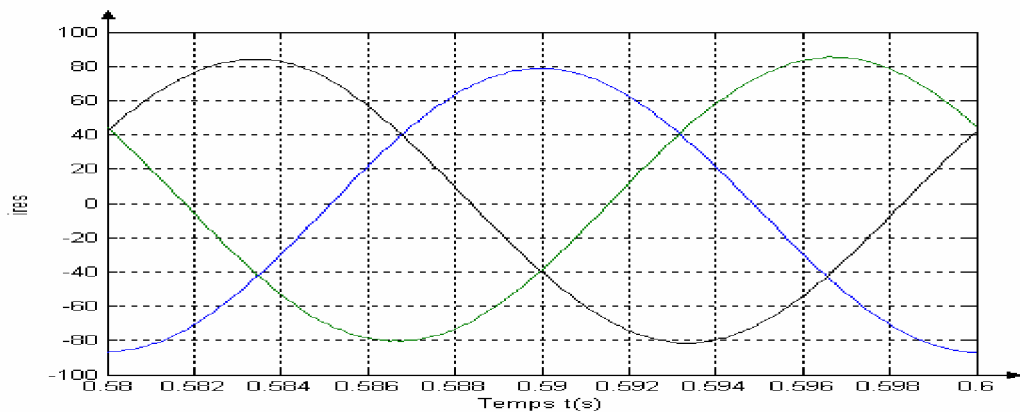


Fig. II.2.25. Les courants du réseau ($m=36, r=0.8$).

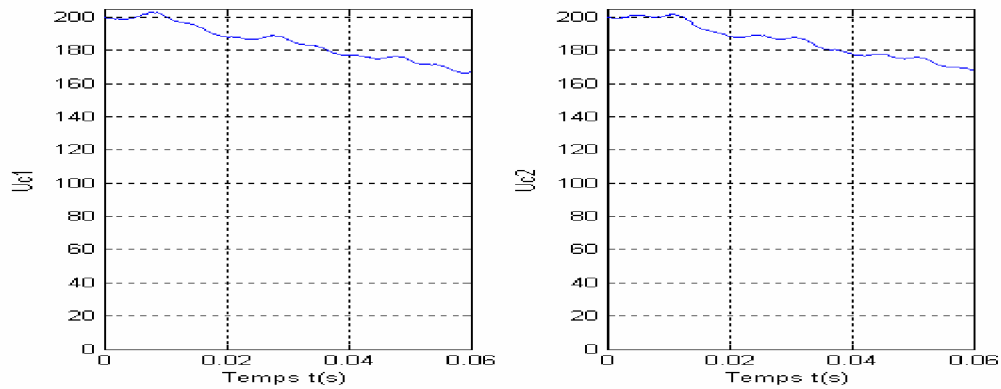


Fig.II.2.26. Tensions de sortie de redresseur avec ($m=9, r=0.8$).

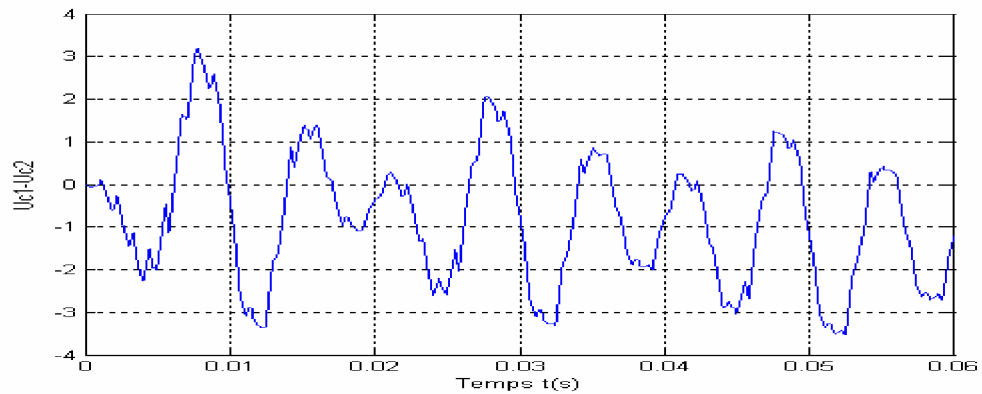


Fig.II.2.27. différence entre les deux Tensions de sortie de redresseur avec ($m=9, r=0.8$).

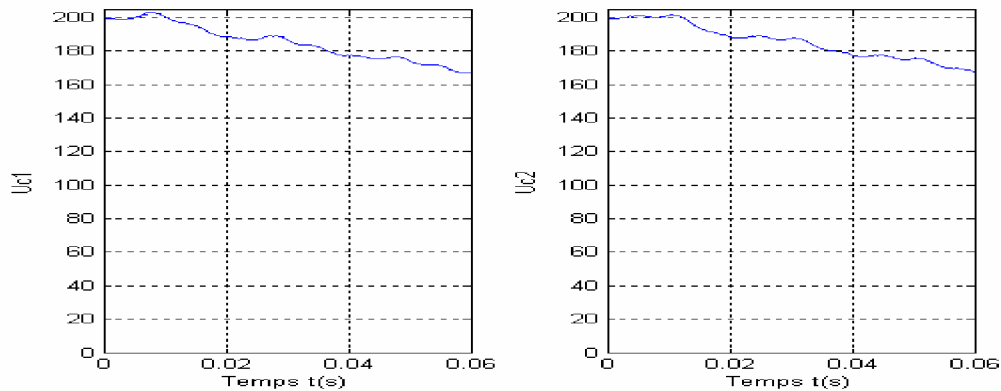


Fig.II.2.28. Tensions de sortie de redresseur avec ($m=12, r=0.8$).

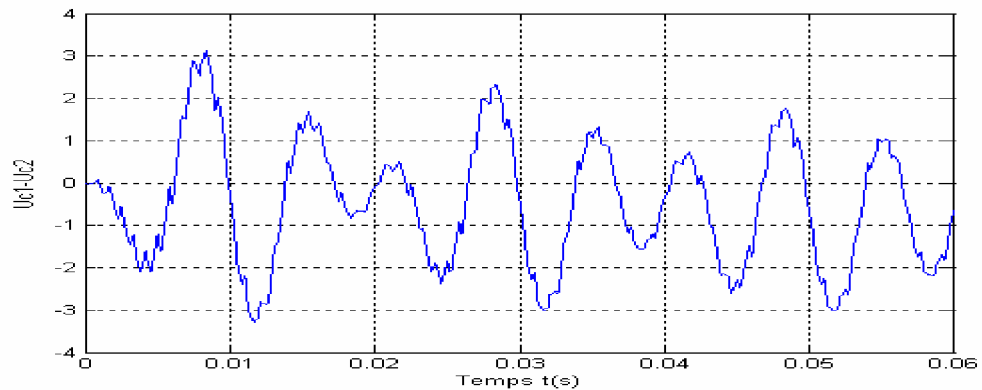


Fig.II.2.29. différence entre les deux Tensions de sortie de redresseur avec ($m=12, r=0.8$).

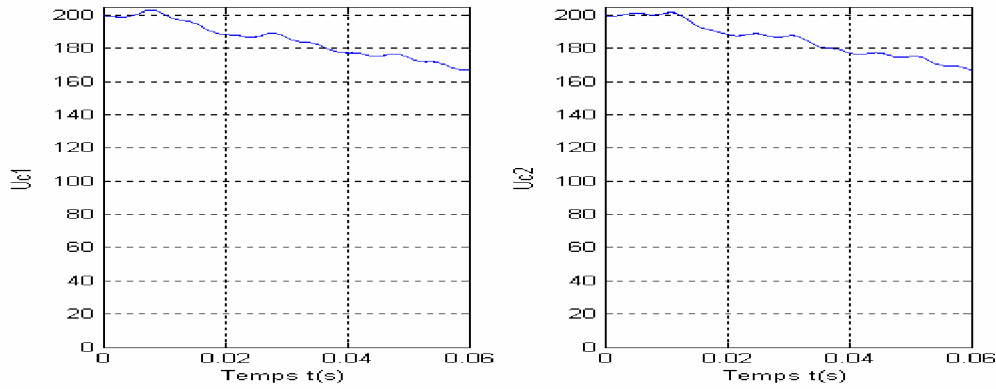


Fig.II.2.30. Tensions de sortie de redresseur avec ($m=36, r=0.8$).

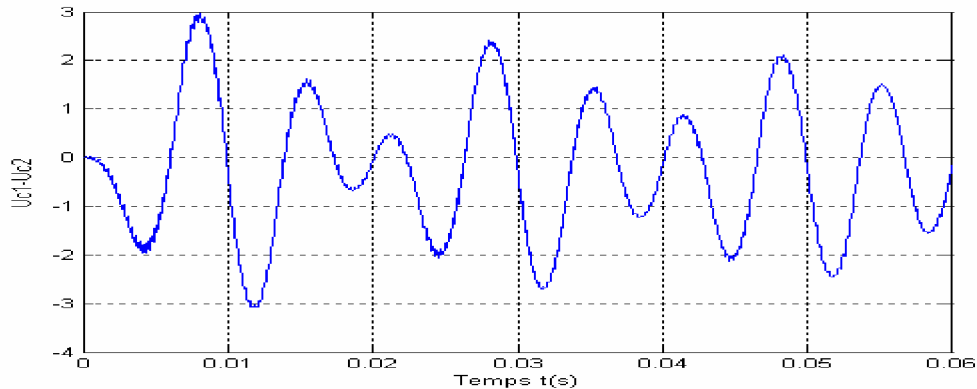


Fig.II.2.31. différence entre les deux Tensions de sortie de redresseur avec ($m=36, r=0.8$).

b. Commentaires :

Les figures (II.2.19), (II.2.20) et (II.2.21) montrent les deux porteuses bipolaires en dent de scie de cette stratégie, les tensions de référence et les impulsions de commande des interrupteurs du bras **k**. Pour $m=9, 12$ et 36 , le nombre d'impulsions **p** de la tension d'entrée du redresseur par alternance vaut : $p = m-1$ et le nombre de commutation par période d'un interrupteur de redresseur à trois niveaux est $2.p$

Les figures (II.2.22), (II.2.23) et (II.2.24) montrent la tension de l'entrée de la première phase de redresseur respectivement pour $m=9, 12$ et 36 . On remarque bien la présence des harmoniques pairs soit pour des valeurs paires de m ou bien impaires, Ainsi, si m augmente les harmoniques deviennent très faible par rapport au fondamental.

La figure (II.2.25) représente les courants du réseau i_{res1} , i_{res2} et i_{res3} .

Les figures (II.2.26), (II.2.27) et (II.2.28) représentent les tensions **Uc1** et **Uc2** pour $m=9, 12$ et 36 qui contiennent, les figures (II.2.29) (II.2.30) (II.2.31) montrent que la différence **Uc1-Uc2** existe mais elle est pratiquement négligeable devant **Uc1**.

II. 2.3 : Modulation vectorielle type 2

a. Principe : [1]

On définit à partir du vecteur de référence $\mathbf{V}_{sref}$, $\mathbf{V}_{sref} = (V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3})^t$ pour triphasé, deux nouveaux vecteurs de référence $\mathbf{V}_{sref1}$ et $\mathbf{V}_{sref0}$.

Les composantes du vecteur de référence $\mathbf{V}_{sref}$ sont définies par le système d'équation (II.3)

Ces nouveaux vecteurs de référence sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} V_{sref1}[i] &= V_{sref}[i] + V_0 \\ V_{sref0}[i] &= V_{sref}[i] - V_0 \end{aligned} \quad (II.8)$$

Avec $i=1, 2, 3$ pour triphasé. la tension V_0 est donnée par l'expression (II.9) ci-dessous.

$$V_0 = -\frac{\{\max(V_{sref}) + \min(V_{sref})\}}{2} \quad (II.9)$$

L'algorithme de la génération des ordres de commande des interrupteurs avec cette stratégie se résume aux deux étapes suivantes :

Etape 1 : détermination des tensions intermédiaires $\mathbf{V}_{1M}[i]$ et $\mathbf{V}_{0M}[i]$ (images des tensions d'entre de redresseur) :

$$\begin{cases} V_{sref1}[i] \geq Up_1 \Rightarrow V_{1M}[i] = \frac{E}{2} \\ V_{sref1}[i] < Up_1 \Rightarrow V_{1M}[i] = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{sref0}[i] \geq Up_1 \Rightarrow V_{1M}[i] = 0 \\ V_{sref0}[i] < Up_1 \Rightarrow V_{1M}[i] = -\frac{E}{2} \end{cases} \quad (II.10)$$

Etape 2 : détermination des tensions intermédiaires $\mathbf{V}_{2M}[i]$, image de la tension de l'entre de redresseur à trois niveaux, et des ordres de commande :

$$V_{2M}[i] = V_{1M}[i] + V_{0M}[i] \quad (II.11)$$

$$\begin{cases} V_{2M}[i] = 0 \Rightarrow B_{i1} = 1, B_{i2} = 0 \\ V_{2M}[i] = \frac{E}{2} \Rightarrow B_{i1} = 1, B_{i2} = 1 \\ V_{2M}[i] = -\frac{E}{2} \Rightarrow B_{i1} = 0, B_{i2} = 0 \end{cases} \quad (II.12)$$

Avec $i=1, 2, 3$ pour le triphasé. Up_1, Up_2 sont les deux porteuses en dents de scie (voir Fig(II.2.19)).

Les figures (II .3.1) représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V=220V$, $f=50Hz$, $R_{res} = 25\Omega$, $L_{res} = 0.01H$) commandé par cet stratégie avec $m = 21$ et $r = 0.8$.

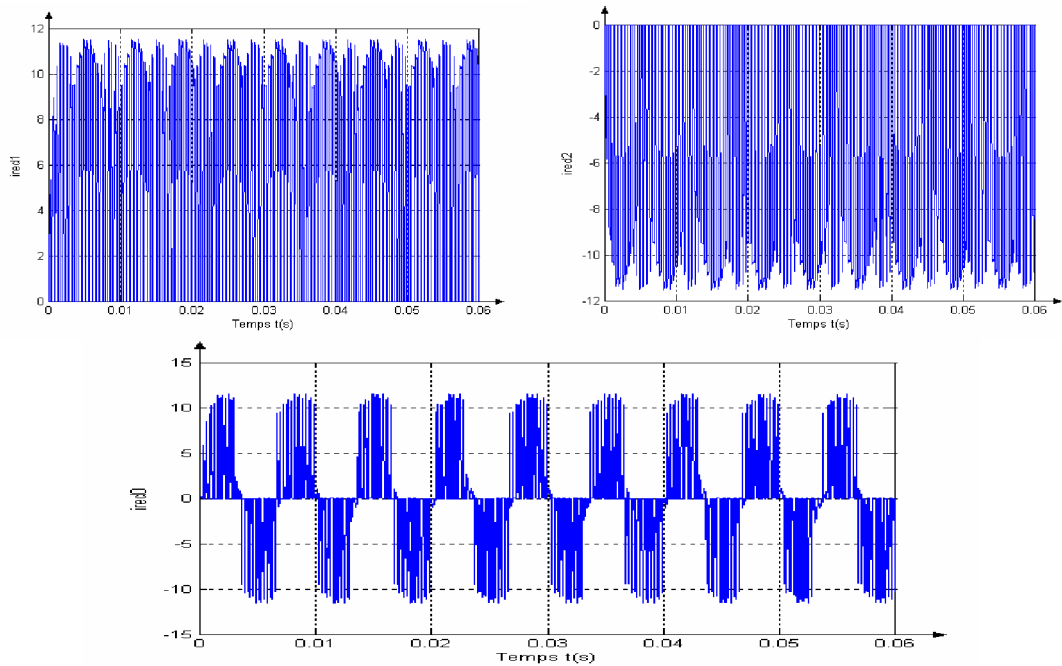


Fig.(II.3.1) les courants redressée Ired1, Ired2 et Id0

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux avec un réseau triphasé ($V_{eff} = 220V$, $f = 50 Hz$, $L_{res1} = 0.01 H$, $R_{res1} = 0.25\Omega$) et des capacités $C_1 = C_2 = 2mF$ et avec une charge résistive à point milieu $R_1 = R_2 = 12.5 \Omega$.

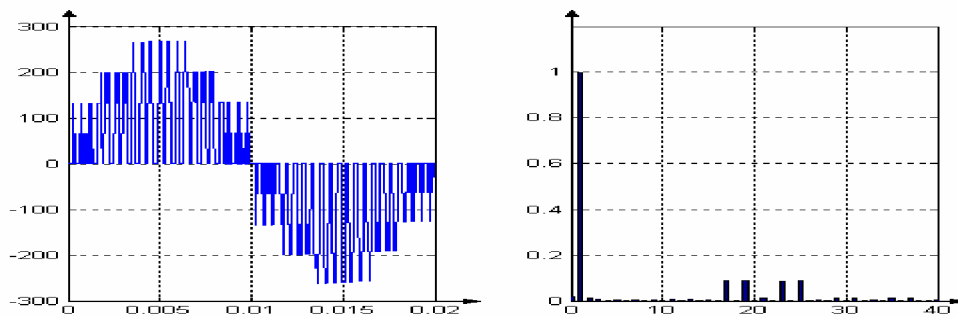


Fig.II.3.2. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=21, r=0.8$).

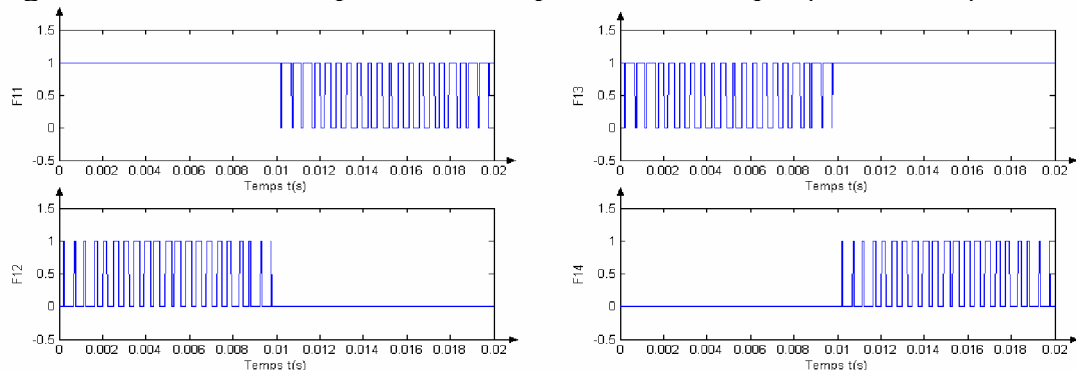


Fig.II.3.3. la commande des interrupteurs pour ($m = 21, r = 0.8$)

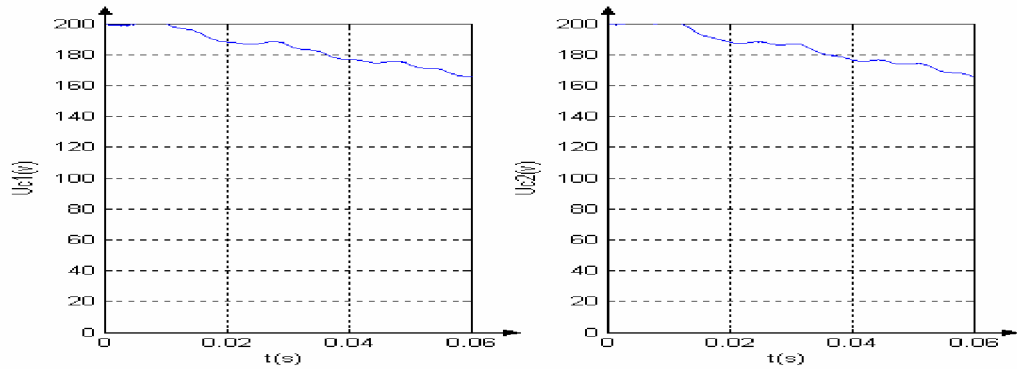


Fig.II.3.4. Tensions de sortie de redresseur avec ($m=21, r=0.8$).

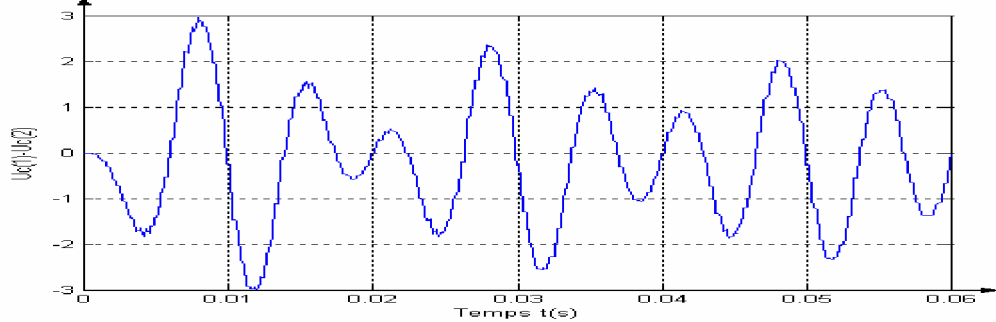


Fig.II.3.5. différence entre les deux Tensions de sortie de redresseur avec ($m=21, r=0.8$).

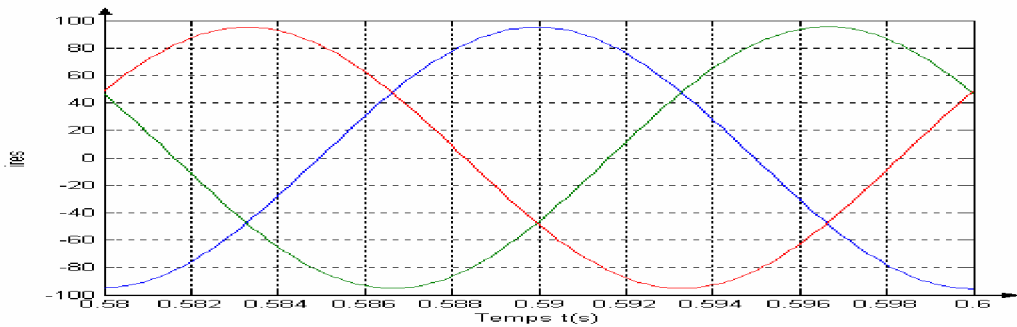


Fig.II.3.6. les trois courants de réseau ($m=21, r=0.8$).

c. Commentaires :

On remarque que les courants **Ired1** et **Ired2**, (figure (II.3.1)) ont la même forme mais ils sont inversés l'un par rapport à l'autre. Le courant **Ired0** a une forme périodique et sa valeur moyenne pratiquement nulle.

La figure (II.3.2) montre la tension de l'entrée de la première phase de redresseur pour $m=21$. On remarque que seul les harmoniques impairs qui sont présents. Ainsi, si m augmente les harmoniques deviennent très faible par rapport au fondamental.

La figure (II.3.3), montre la génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras **k**.

La figure (II.3.4) représente les tensions **Uc1** et **Uc2** pour $m=21$. La figure (II.3.5) montrent que la différence **Uc1-Uc2** existe mais elle est pratiquement négligeable.

La figure (II.3.6), représente les courants de trois phases du réseau i_{res1} , i_{res2} et i_{res3} .

II-2-4. Modulation calculée utilisant les modèles de commande des redresseurs à trois niveaux : [1]

Les différentes stratégies de sous oscillation présentées précédemment et utilisant une ou deux porteuses peuvent être réalisées numériquement en échantillonnant les tensions de référence (Échantillonnage régulier symétrique ou asymétrique).

Dans cette partie, on se contentera de présenter seulement deux algorithmes de commande des redresseurs à trois niveaux, destinés à une réalisation numérique, et utilisant les modèles de commande de ces convertisseurs présentés dans le chapitre précédent.

L'organigramme général d'une stratégie de commande utilisant ces modèles de commande est présenté à la figure (II.4.1).

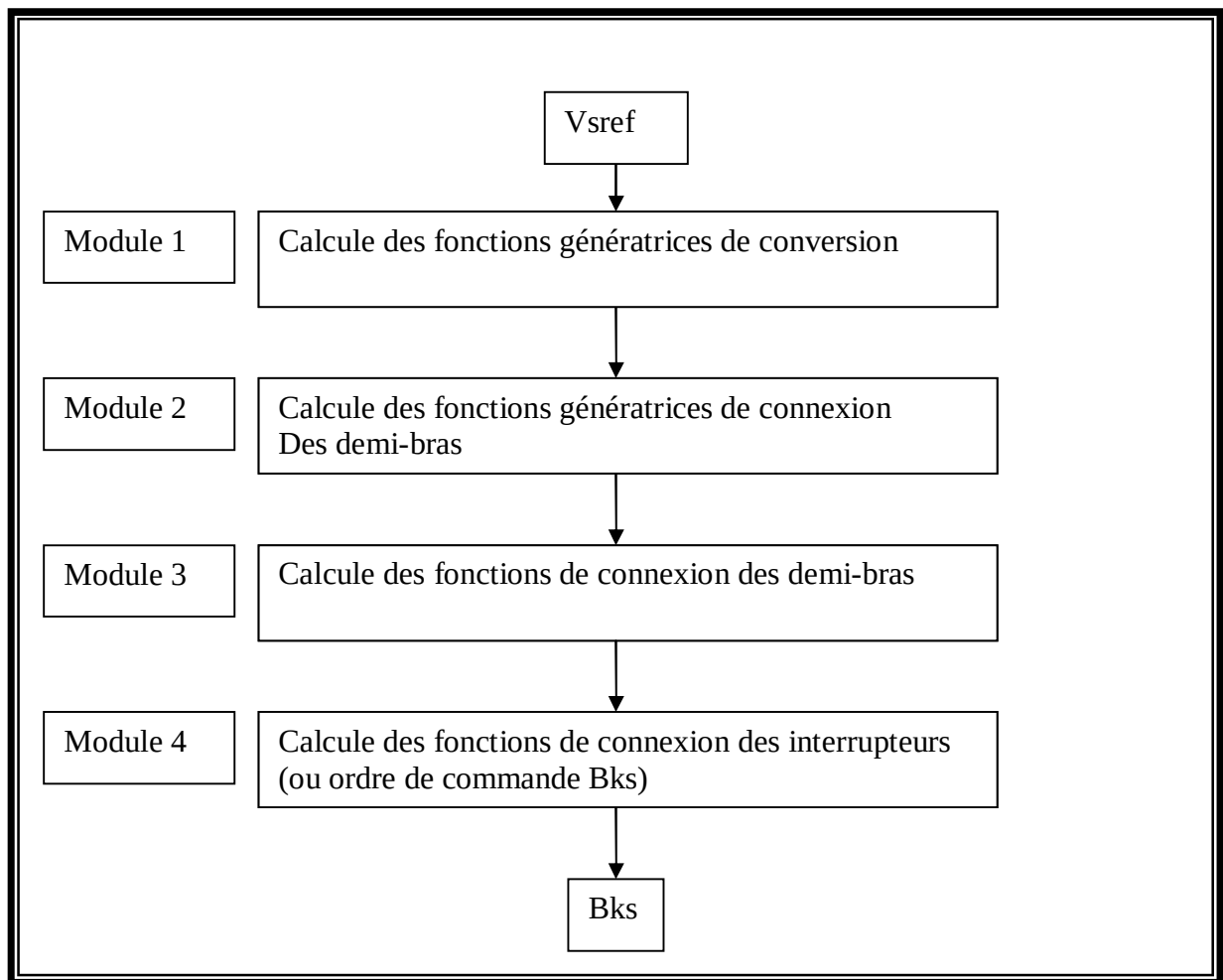


Fig (II.4.1) organigramme d'une modulation calculée utilisant les modèles de commande des redresseurs à trois niveaux

Le module 4 de cet organigramme est commun à toutes les modulations de ce type. Il se résume aux deux étapes suivantes :

a- déduire les fonctions de connexion des interrupteurs (Fks) à partir de celles des demi-bras (F_{kn}^b) :

$$\begin{cases} ((F_{K1}^b = 1) \& (F_{K0}^b = 1) \text{ or } (F_{K1}^b = 0) \& (F_{K0}^b = 0)) \Rightarrow F_{K1} = 1, F_{K2} = 0 \\ (F_{K1}^b = 1) \& (F_{K0}^b = 0) \Rightarrow F_{K1} = 1, F_{K2} = 1 \\ (F_{K1}^b = 0) \& (F_{K0}^b = 1) \Rightarrow F_{K1} = 0, F_{K2} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

b- déduire les fonctions de connexion des semi-conducteurs :

$$\begin{cases} F_{KS} = 1 \Leftrightarrow B_{KS} = 1 \\ F_{KS} = 0 \Leftrightarrow B_{KS} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Pour toute cette partie, on a :

- **k=1, 2,3** pour un redresseur triphasé. **s=1, 2,3** ou **4** désigne le numéro des semi-conducteurs et **n=1** ou **0** désigne respectivement le demi-bras du haut et du bas de redresseur à trois niveaux.
- Le vecteur de référence $\mathbf{V}_{\text{sref}}$ est $\mathbf{V}_{\text{sref}} = (\mathbf{V}_{\text{ref } 1}, \mathbf{V}_{\text{ref } 2}, \mathbf{V}_{\text{ref } 3})^t$. ce composant du vecteur de référence se définit par le système d'équation (II.3).
- L'indice de modulation **m**, la période **Th** et le taux de modulation **r** sont définis comme pour les stratégies précédentes.

II-2-5.1 Algorithme n°1 :

a. Principe [1]

Pour faciliter l'implémentation de la modulation vectorielle type 2 présentée précédemment et utilisant une seule porteuse, nous proposons cet algorithme n° 1 utilisant les modèles de commande de redresseur triphasé à trois niveaux.

Les différents modules de l'organigramme de la figure (II.5.1) se résument pour cet algorithme comme suit :

Module1 : calcul des fonctions génératrices de conversion simple $\mathbf{n}_{gk}$:

$$n_{gk} = \frac{V_{sref}[k]}{\frac{E}{2}} \quad (II.15)$$

Module 2 : calcul des fonctions génératrices de connexion des demi-bras F_{kng}^b

$$F_{k1g}^b = ngk + a_0 \quad \text{et} \quad F_{0g}^b = ngk - a_0 \quad (II.16)$$

Avec $a_0 = -\frac{\{\max(ng) + \min(ng)\}}{2}$, $ng = (ng_1, ng_2, ng_3)^t$ pour triphasé, a_0 est l'image de la

tension V_0 utilisée dans la modulation vectorielle type 2.

Module 3 : calcul des fonctions de connexion des demi-bras F_{kn}^b :

On commence par définir les variables suivantes :

$$\begin{cases} T_{k1}^1 = \frac{Th}{4}(1 + F_{k1g}^b) \\ T_{k2}^1 = \frac{Th}{4}(3 - F_{k1g}^b) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} T_{k1}^0 = \frac{Th}{4}(1 + F_{k0g}^b) \\ T_{k2}^0 = \frac{Th}{4}(3 - F_{k0g}^b) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} T_{k1} = Th - (T_{k2}^1 - T_{k1}^1) \\ T_{k0} = Th - (T_{k2}^0 - T_{k1}^0) \end{cases} \quad (II.17)$$

Le passage des fonctions génératrices de connexion des demi-bars F_{kng}^b à leurs fonctions instantanées F_{km}^b est effectué en utilisant l'algorithme suivant qui permet en outre de centrer les impulsions sur une période de commutation **Th**.

$$\begin{cases} \frac{Th}{2} - \frac{T_{k1}}{2} \leq t \leq \frac{Th}{2} + \frac{T_{k1}}{2} \Rightarrow F_{k1}^b = 1 \\ \left(t < \frac{Th}{2} - \frac{T_{k1}}{2} \right) \text{ ou } \left(t > \frac{Th}{2} + \frac{T_{k1}}{2} \right) \Rightarrow F_{k1}^b = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \frac{Th}{2} - \frac{T_{k0}}{2} \leq t \leq \frac{Th}{2} + \frac{T_{k0}}{2} \Rightarrow F_{k0}^b = 0 \\ \left(t < \frac{Th}{2} - \frac{T_{k0}}{2} \right) \text{ ou } \left(t > \frac{Th}{2} + \frac{T_{k0}}{2} \right) \Rightarrow F_{k0}^b = 1 \end{cases} \quad (II.18)$$

Dans cet algorithme, la variable **t** est réinitialisée à chaque fin de la période **Th**.

II-2-5.2 Algorithme n°2 :

a-Principe [1]

Cet algorithme est basé sur la commande triangulo-sinusoidale à deux porteuses qu'on a déjà présentée dans ce chapitre. Les différents modules de l'organigramme de la figure (II.4.1) s'expriment pour cet algorithme comme suit :

Module1 : calcul des fonctions génératrices de conversion simple n_{gk} :

$$n_{gk} = \frac{V_{sref}[k]}{\frac{E}{2}} \quad (II.19)$$

Module 2 : calcul des fonctions génératrices de connexion des demi-bras F_{kng}^b

$$F_{1g}^b = \frac{ngk}{2} \text{ et } F_{0g}^b = -\frac{ngk}{2} \quad (II.20)$$

Module 3 : calcul des fonctions de connexion des demi-bras F_{kn}^b :

On définit dans cet algorithme, les variables temporelles suivantes :

$$\begin{cases} T_{k1} = Th \left\{ 1 - |F_{k1g}^b| \right\} \\ T_{k0} = Th \left\{ \frac{1}{2} - |F_{k0g}^b| \right\} \end{cases} \quad (II.21)$$

Le passage des fonctions génératrices de connexion des demi-bars F_{kng}^b à leurs fonctions instantanées F_{km}^b est effectué selon l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} \left(T_{k0} \leq t \leq \frac{Th}{2} \right) \text{ or } (T_{k1} \leq t \leq Th) \Rightarrow a_k = 1 \\ \left(t < T_{k0} \right) \text{ or } \left(\frac{Th}{2} < t < T_{k1} \right) \Rightarrow a_k = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} F_{k1g}^b > 0 \Rightarrow (F_{k1}^b = a_k) \& (F_{k0}^b = 0) \\ F_{k1g}^b \leq 0 \Rightarrow (F_{k1}^b = 0) \& (F_{k0}^b = a_k) \end{cases} \quad (II.22)$$

Dans cet algorithme, la variable t est réinitialisée à chaque fin de la période Th .

La figure (II .4.2) représente les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux alimenté par un réseau ($V=220V$, $f=50Hz$, $R_{res} = 25\Omega$, $L_{res} = 0.01H$) commandé par cette stratégie (algorithme 02) avec $m = 21$ et $r = 0.8$.

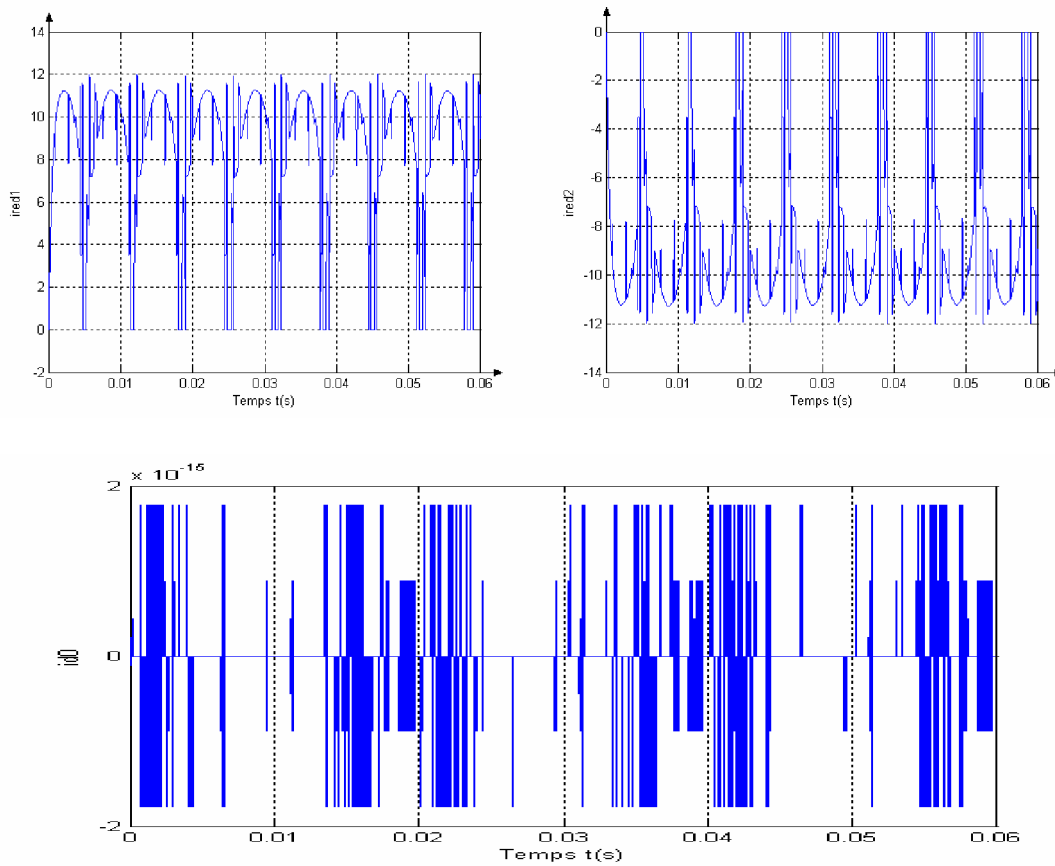
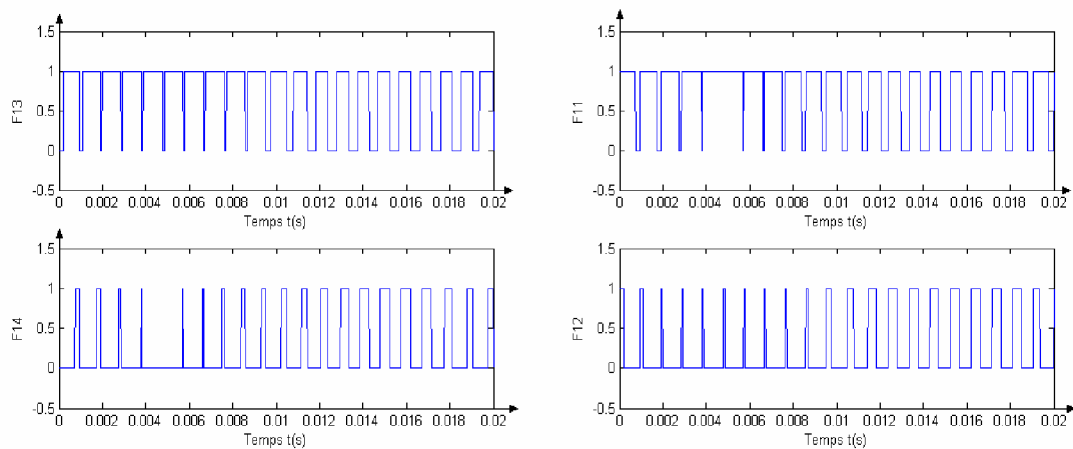


Fig.(II.4.2) les courants redressée Ired1, Ired1 et Id0

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus d'un redresseur triphasé à trois niveaux avec un réseau triphasé ($V_{\text{eff}} = 220\text{V}$, $f = 50\text{ Hz}$, $L_{\text{res1}} = 0.01\text{ H}$, $R_{\text{res1}} = 0.25\Omega$), et des capacités $C_1 = C_2 = 20\text{mF}$ et avec une charge résistive à point milieu $R_1 = R_2 = 12.5\Omega$ et $m=21$, $r=0.8$.

Fig.II.4.3.a la commande des interrupteurs pour ($m = 21$, $r=0.8$)

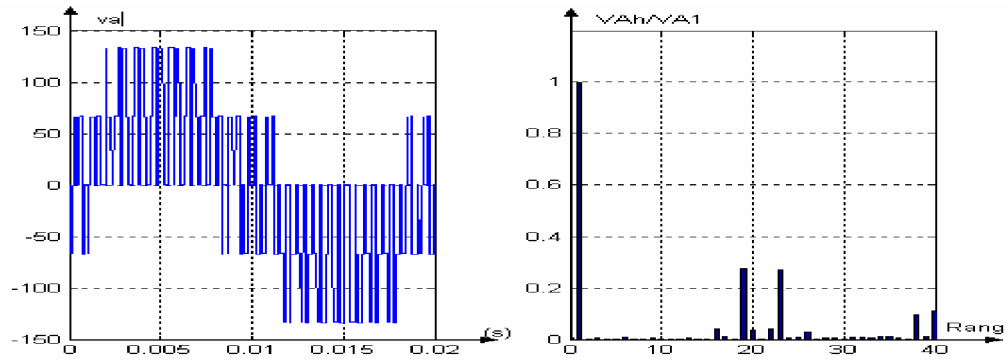


Fig.II.4.4. La tension simple V_1 , et son spectre harmonique ($m=21, r=0.8$).

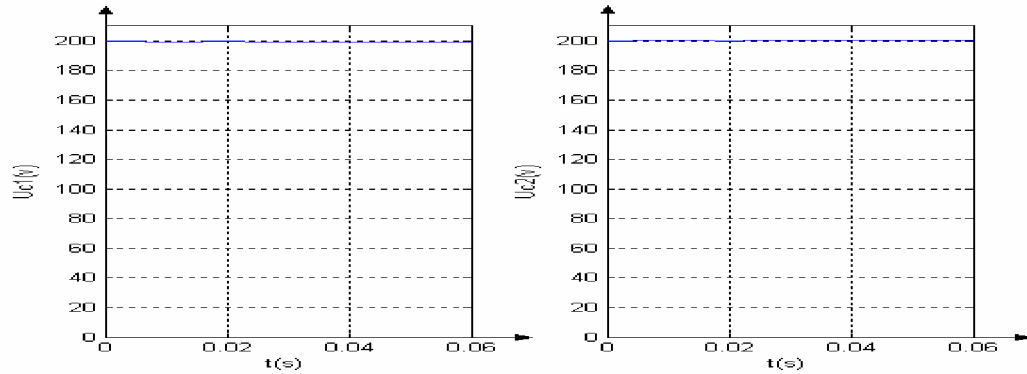


Fig.II.4.5. Tensions de sortie de redresseur avec ($m=21, r=0.8$).

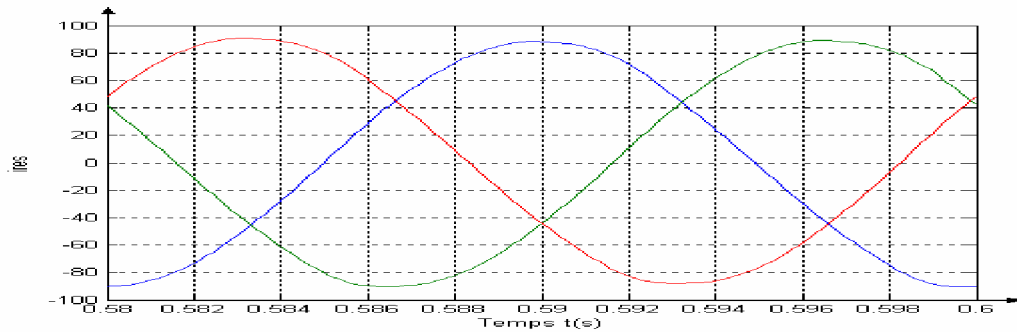


Fig.II.4.6. les trois courants de réseau ($m=21, r=0.8$).

b-Commentaires :

On remarque que les courants I_{red1} et I_{red2} , (figure. (II.4.2)) ont la même forme mais ils sont inversés l'un par rapport à l'autre. Le courant I_{red0} a une forme périodique et sa valeur moyenne pratiquement nulle.

Les figures (II.4.3.a), (II.4.3.b)) montrent la génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras k .

Les figures (II.4.4) montrent la tension de l'entrée de la première phase de redresseur pour $m=21$. On remarque bien la présence des harmoniques pairs et impaires, Ainsi, si m augmente les harmoniques deviennent très faibles par rapport au fondamental.

La figure (II.4.5.) représente les tensions U_{c1} et U_{c2} pour $m=21$. Elle sont contenues, est presque égales.

La figure (II.4.6), représente les courants de trois phases du réseau i_{res1} , i_{res2} et i_{res3} .

II.3.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié différentes stratégies de commande du redresseur à trois niveaux qui sont adaptées à une utilisation dans des asservissements.

Nous pouvant déduire que ces quatre stratégies ont comme but de générer une source de tension d'entrée du redresseur la plus sinusoïdal possible sans se préoccuper de l'allure du courant ou des tensions de sortie. La commande par hystérésis en courant donne des résultats plus au moins meilleurs surtout qu'elle assure un courant en phase avec la tension du réseau.

Dans les chapitres suivants (III) et (IV), on étudiera les différentes cascades possibles avec l'utilisation de ces stratégies de commandes.

.