



LES CONVERTISSEURS DC/AC: LES ONDULEURS

Objectifs :

- ▶ Savoir le principe de fonctionnement d'onduleur.
- ▶ Savoir modéliser un onduleur,
- ▶ Savoir tracer les différentes grandeurs d'entrées et de sorties d'un onduleur.
- ▶ Savoir dimensionner et calculer un onduleur dans une installation.

1. Définitions et structures

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet le réglage du transfert de puissance entre une source de courant ou de tension continue et une source de courant ou de tension alternative. Il relie une structure de tension ou de courant continu à un récepteur monophasé ou polyphasé de courant ou de tension alternatifs.

La fréquence « f » de la source alternative est :

- Soit imposé (fixe ou réglable), par une commande électronique autonome (onduleur autonome).
- Soit imposée constant par la source elle-même (onduleur assisté débité sur le réseau).
- Soit imposée, variable par la source elle-même (onduleur alimentant une machine synchrone, piloté par la fréquence de la f.é.m. de la machine).

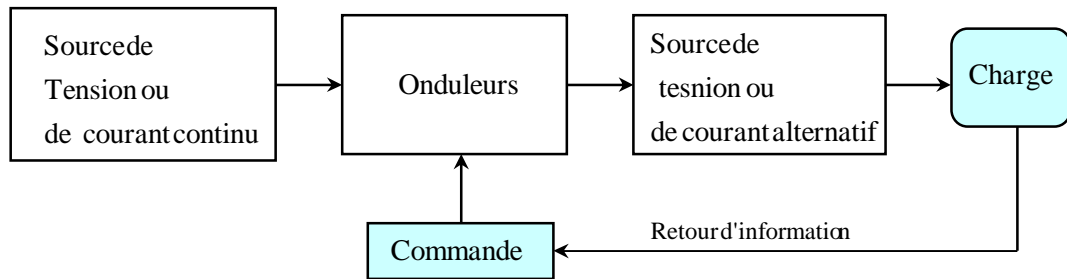


Fig.6.1 : Structure générale

La figure.6.2 montre la structure d'un onduleur triphasé qui relie une source de tension continue à un récepteur triphasé de courant.

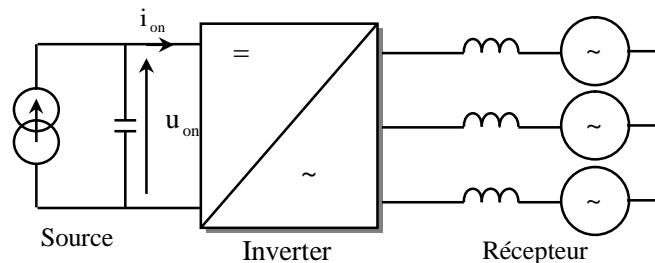


Fig.6.2: Structure d'un onduleur de tension triphasé

La figure 6.3 montre la structure d'un onduleur monophasé de courant à résonance.

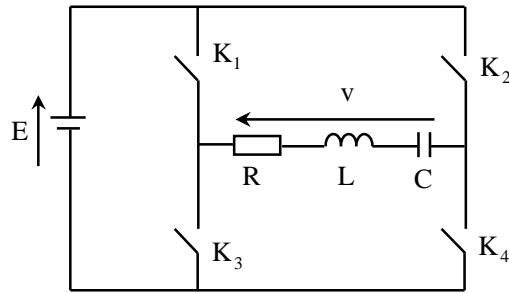


Fig.6.3: Onduleur de courant à résonance

2. Onduleur de courant et de tension

2.1. Définition

L'onduleur de courant permet le transfert de puissance entre une source de courant continu et une source de tension alternative, monophasé ou triphasé en imposant la loi d'évolution du courant alternatif $i_s(t)$.

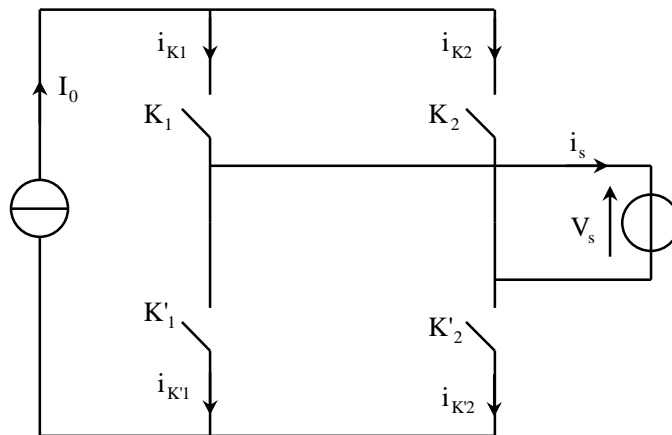


Fig.6.4: Onduleur de courant monophasé

L'onduleur de tension permet le transfert de puissance entre une source de tension continue et une source de courant alternative, monophasé ou triphasé, en imposant la loi d'évolution de la tension alternative $v_s(t)$.

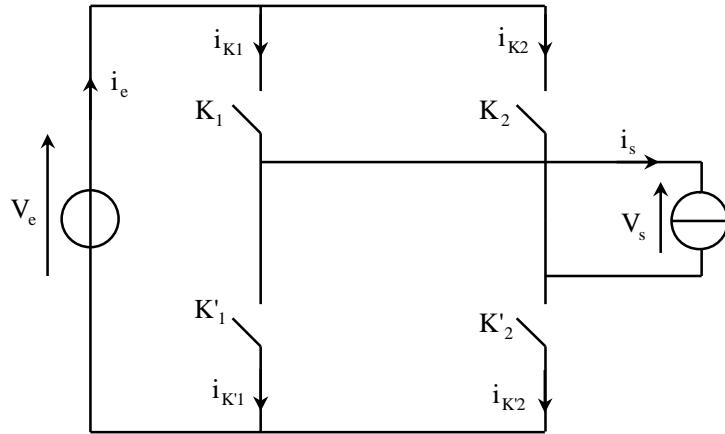


Fig.6.5: Onduleur de tension monophasé

2.2. Commande de l'onduleur monophasé de tension en demi pont

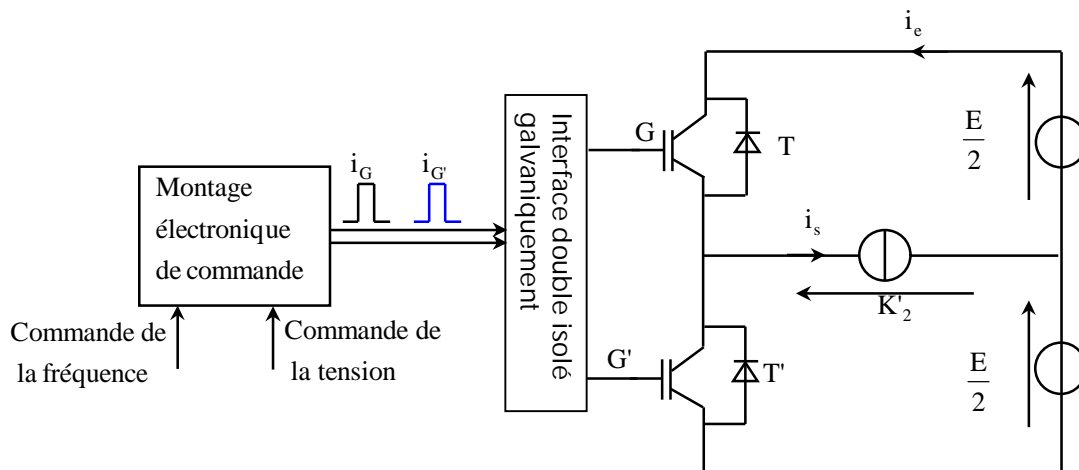


Fig.6.6: Onduleur monophasé de tension en demi-pont

2.3. Commande de l'onduleur monophasé de tension en pont

La commande revient à traiter le pont complet comme équivalent à deux demi ponts. Elle utilise le schéma de principe suivant.

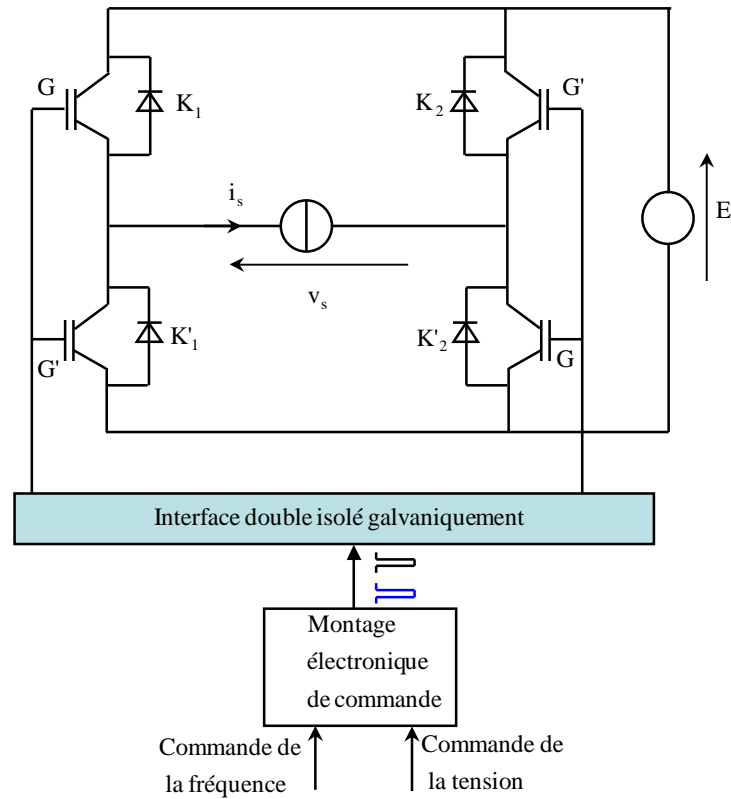


Fig.6.7 : Onduleur monophasé de tension en pont

3. Onduleur de tension monophasé en commande simple ou décalé

3.1. Commande simple (ou pleine onde)

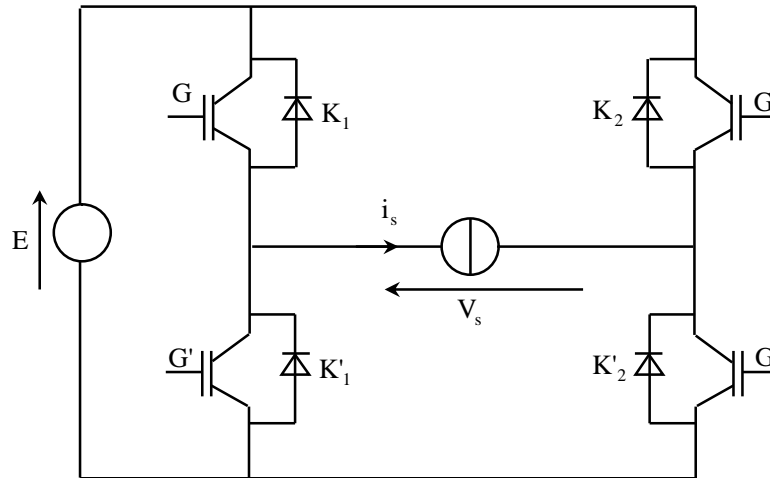


Fig.6.8 : Onduleur monophasé de tension en pont

❖ Simulation de quelques grandeurs de l'onduleur monophasé sous Matlab :

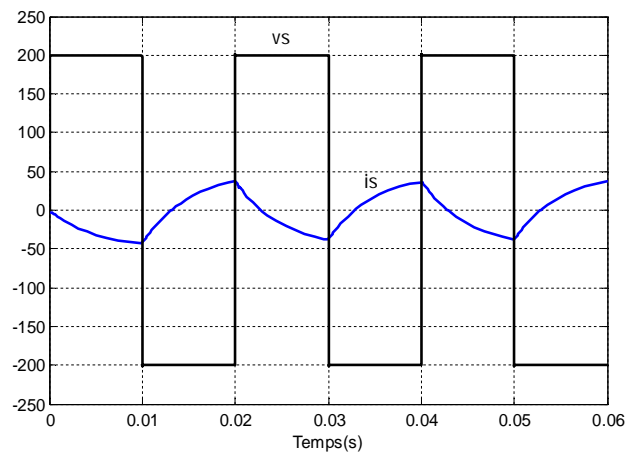


Fig.6.9: Allures des grandeurs $v_s(t)$ et $i_s(t)$

❖ Expression du courant $i_s(t)$:

$$i_s(t) = \begin{cases} (I_{\min} - \frac{E}{R}).e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} & ; 0 < t < \frac{T}{2} \\ (I_{\max} + \frac{E}{R}).e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{\tau}} - \frac{E}{R} & ; \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

Le développement en série de Fourier de $v_s(\theta) = \frac{4.E}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin[(2k+1)\theta]}{2k+1}$

3.2. Commande décalée

❖ Simulation de quelques grandeurs de l'onduleur monophasé sur Matlab:

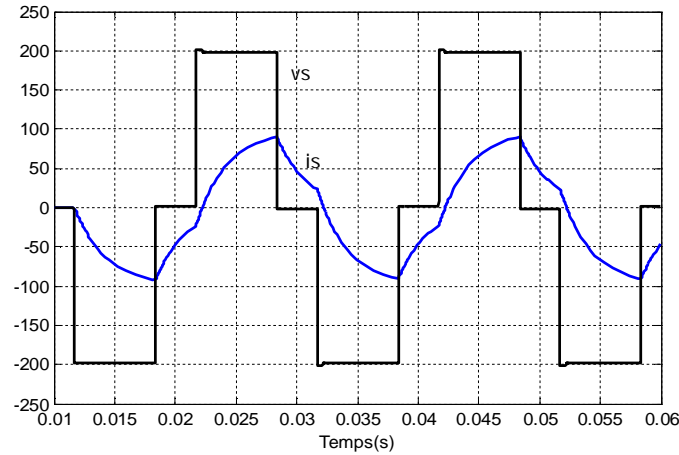


Fig.6.10: Allures des grandeurs $v_s(t)$ et $i_s(t)$

Le développement en série de Fourier de $v_s(\theta) = \frac{4E}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos[(2k+1).\beta]}{2k+1} \cdot \sin[(2k+1).\theta]$

❖ Amplitudes des premières harmoniques en fonction de β :

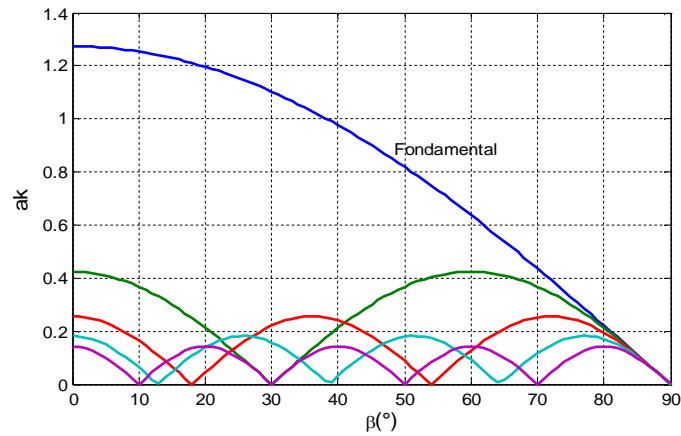


Fig.6.11: Amplitudes des harmoniques en fonction de β

4. Onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension est constitué de trois bras, comme le montre la figure suivante.

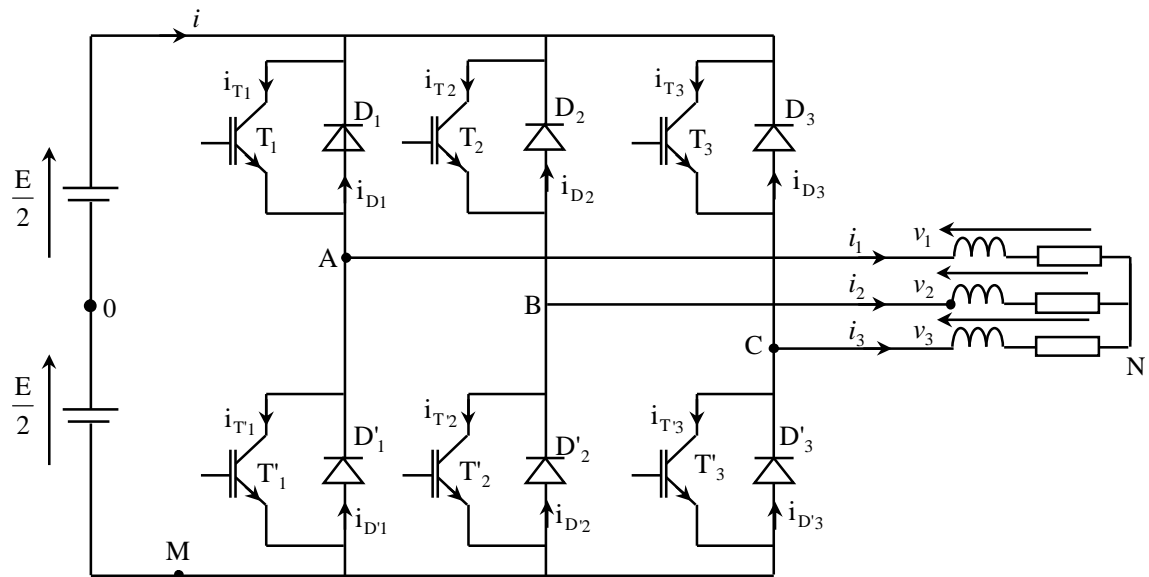


Fig.6.12: Schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé

❖ Pour un système équilibré :

On adonc

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ v_1 + v_2 + v_3 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{AB} = v_1 - v_2 = v_{AM} - v_{BM} \\ u_{BC} = v_2 - v_3 = v_{BM} - v_{CM} \\ u_{CA} = v_3 - v_1 = v_{CM} - v_{AM} \end{cases} \quad (2)$$

En effectuant un petit mélange entre les équations (1) et (2), on obtient une nouvelle équation (3) :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{3}(u_{AB} - u_{CA}) \\ v_2 = \frac{1}{3}(u_{BC} - u_{AB}) \\ v_3 = \frac{1}{3}(u_{CA} - u_{BC}) \end{cases} \quad (3)$$

❖ Chronogrammes des tensions des demi-bas de l'onduleur (v_{AM} , v_{BM} et v_{CM}):

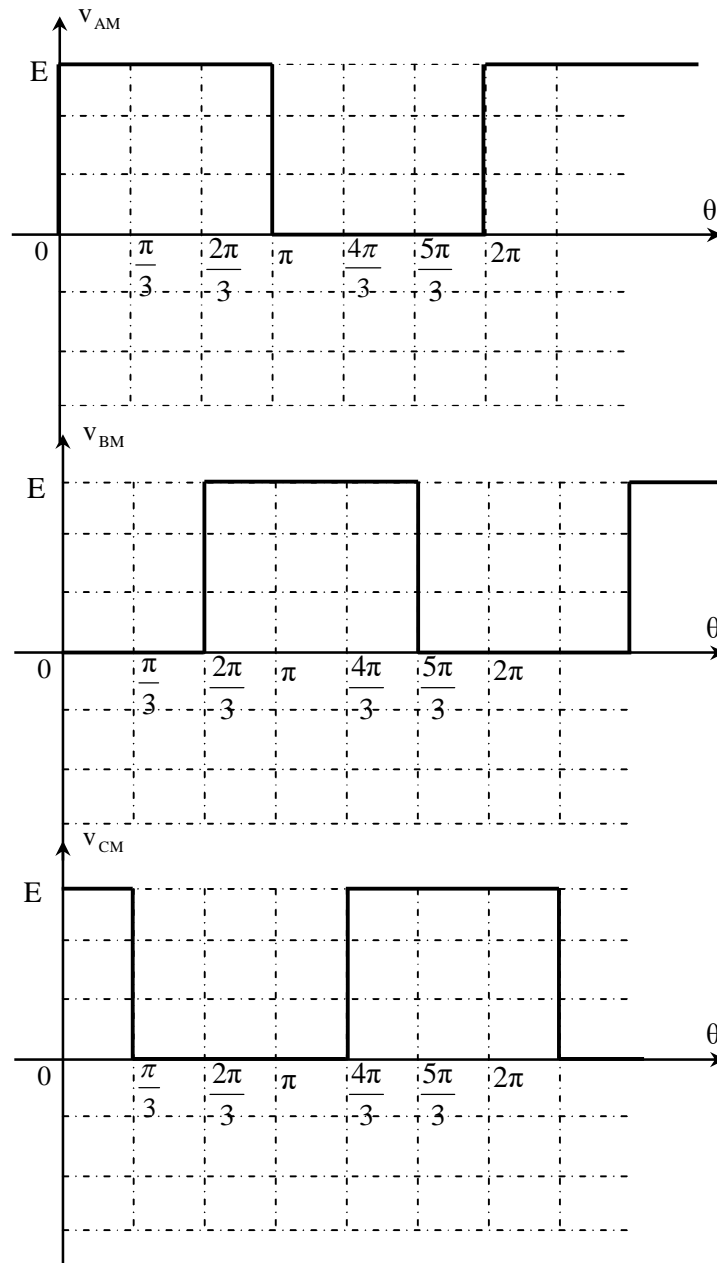


Fig.6.13: Allures des tensions (v_{AM} , v_{BM} et v_{CM})

❖ Chronogrammes des tensions composées de l'onduleur (u_{AB} , u_{BC} et u_{CA})

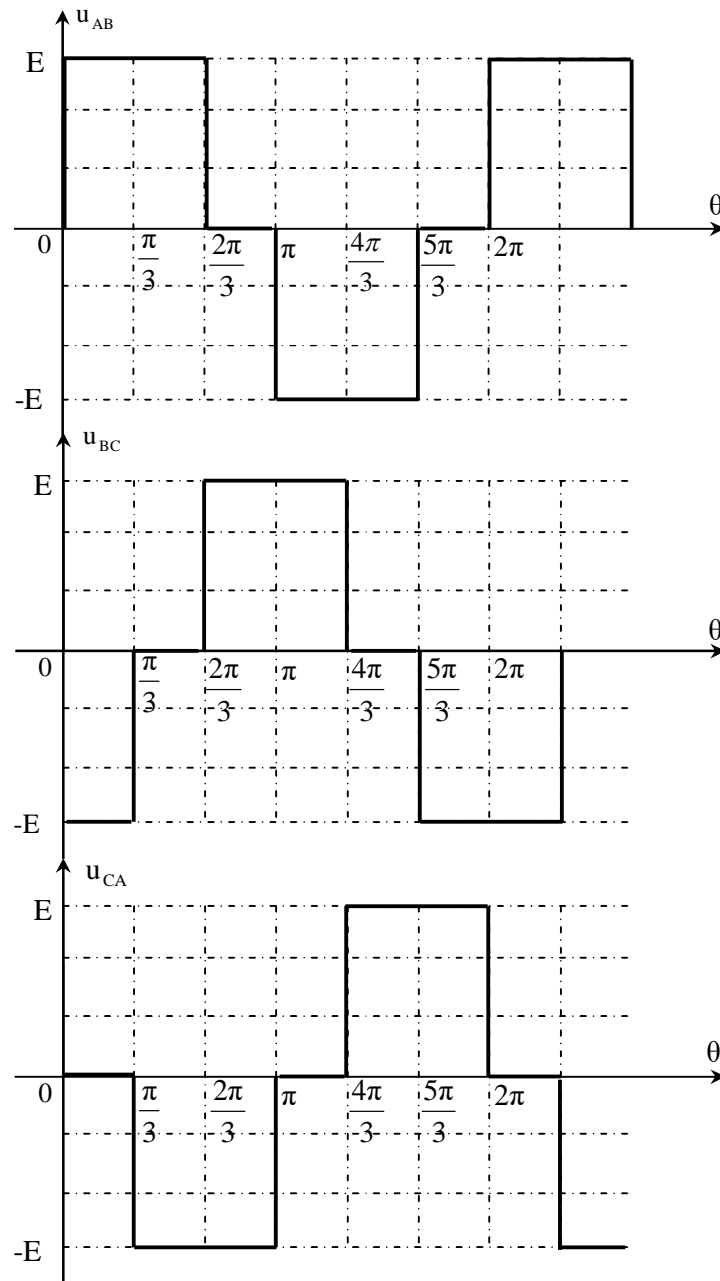


Fig.6.14: Allures des tensions u_{AB} , u_{BC} et u_{CA}

❖ Chronogrammes des tensions simples de l'onduleur (v_1 , v_2 et v_3):

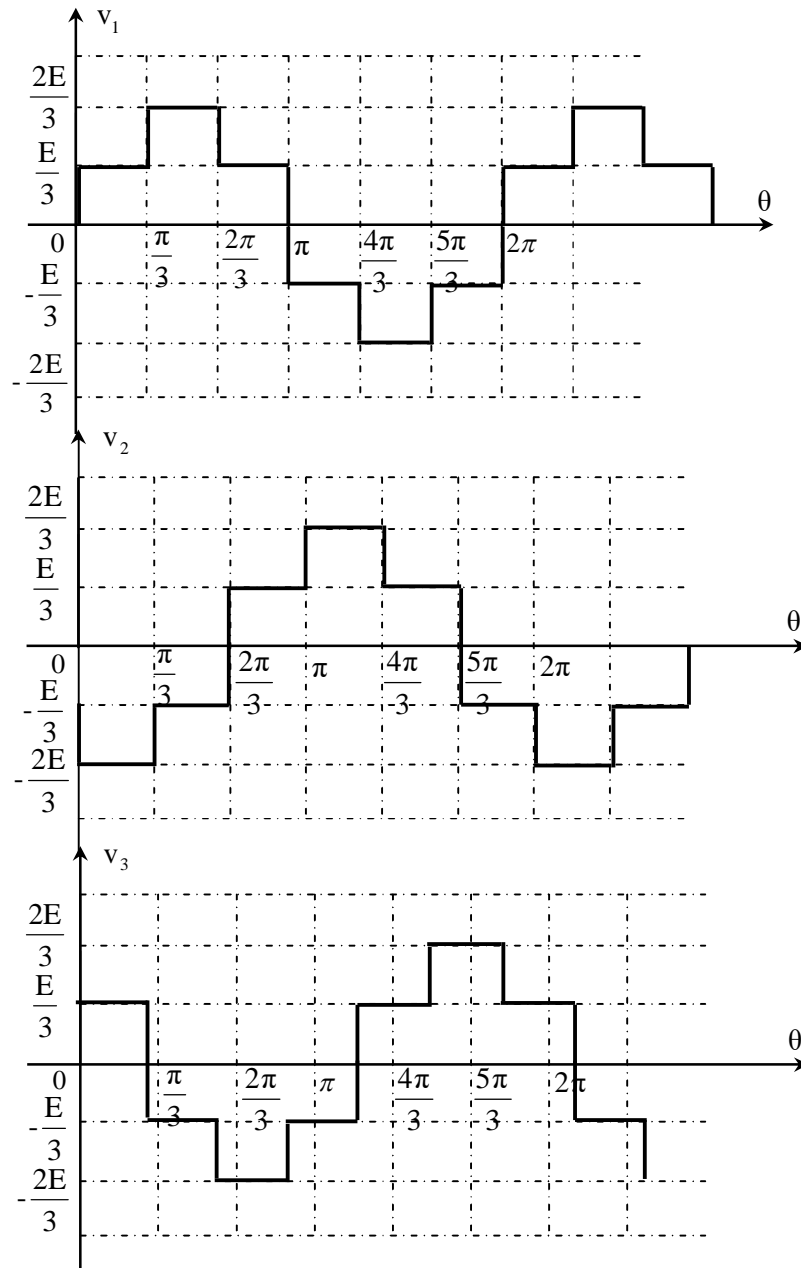


Fig.6.15: Allures des tensions v_1 , v_2 et v_3

❖ Simulation de quelques grandeurs de l'onduleur triphasé sous Matlab:

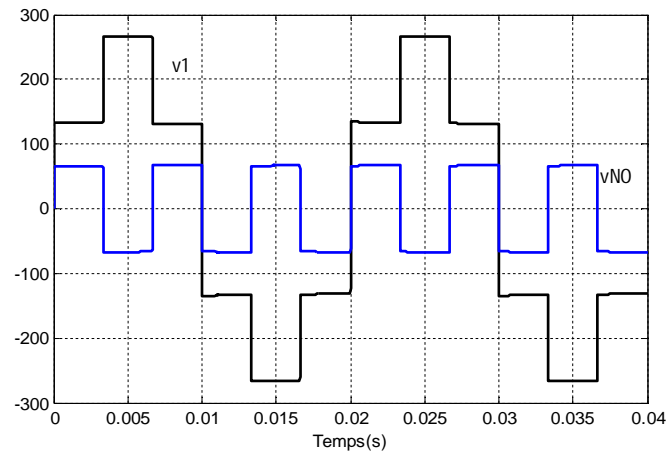


Fig.6.16 : Allures des tensions v_1 , v_{NO}

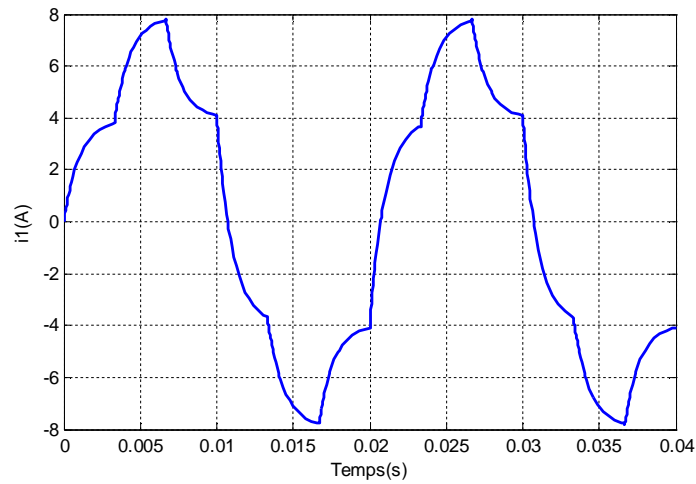


Fig. 6.17: Allure du courant « i_1 » dans la phase1

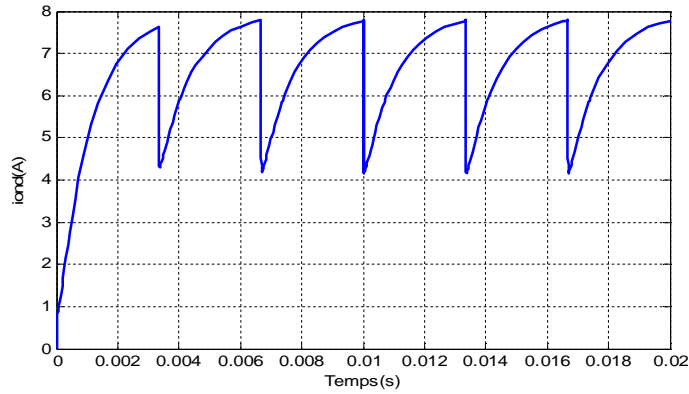


Fig.6.18: Chronogrammes du courant d'entrée « i » du l'onduleur

❖ Valeurs caractéristiques :

- **Tensions moyennes :** $(v_{AM})_{\text{moy}} = \frac{E}{2}$; $(u_{AB})_{\text{moy}} = 0$; $(v_1)_{\text{moy}} = 0$
- **Tensions efficaces :** $(v_{AM})_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$; $(u_{AB})_{\text{eff}} = E \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$; $(v_1)_{\text{eff}} = \frac{E}{3} \cdot \sqrt{2}$
- **Développement en série de Fourier :**

$$v_{AM}(\theta) = \frac{E}{2} + \frac{2E}{\pi} \cdot \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin[(2k+1) \cdot \theta]}{2k+1},$$

$$u_{AB}(\theta) = \frac{4E}{\pi} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin[(2k+1) \frac{\pi}{3}]}{2k+1} \cdot \cos[(2k+1) \cdot (\theta - \frac{\pi}{3})],$$

$$v_1(\theta) = \frac{8E}{3\pi} \cdot \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\sin^2[(2k+1) \frac{\pi}{3}]}{2k+1} \sin[(2k+1) \cdot \theta].$$

5. Onduleur MLI intersective (sinus/triangle)

5.1. Modélisation et commande de l'onduleur monophasé

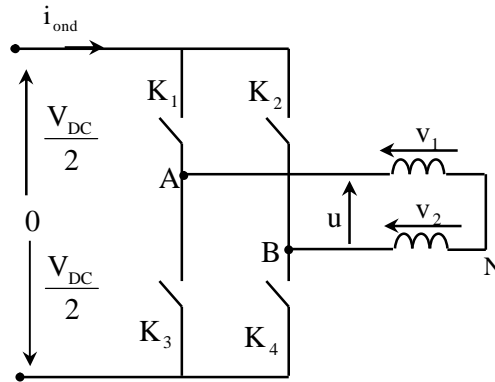


Fig.6.19 : Schéma de principe d'onduleur monophasé

L'onduleur monophasé est formé par deux bras, dont chacun comporte deux interrupteurs de puissance bidirectionnelle en courant. Les clés de commande des interrupteurs de puissances sont notées par C_1 et C_2 .

❖ Modèle de l'onduleur monophasé :

On démontre que les deux tensions de sortie de l'onduleur sont données sous forme

matricielle par :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$$

La fonction $f_1(u)$ est donnée par $f_1(u) = \frac{V_{DC}}{2} \cdot (C_1 - C_2)$.

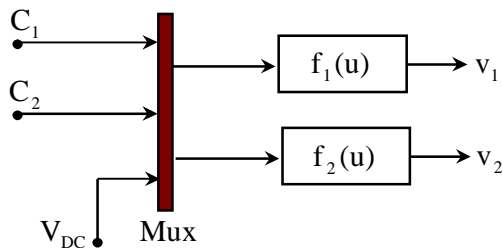


Fig.6.20: Modèle de l'onduleur monophasé

❖ Modèle de la commande:

Les tensions modulantes de référence (a et b) représentent les tensions images de système de tensions simples diphasées. La porteuse $p(t)$ est signal triangulaire dont la fréquence ($f_p \gg f_m$).

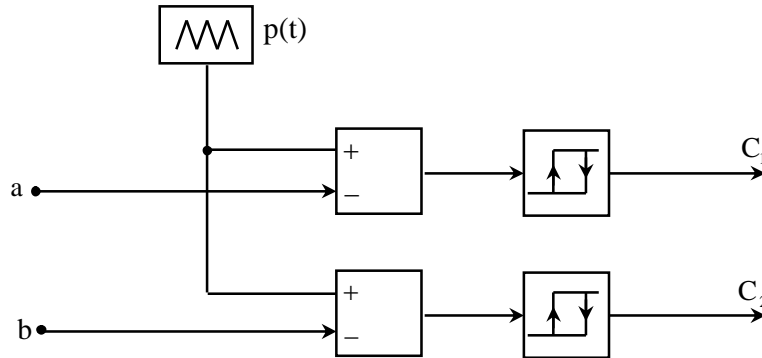


Fig.6.21: Modèle de la commande d'un onduleur monophasé

❖ Principe :

Les instants de commutation des interrupteurs complémentaires (K_1 et K_2 par exemple) sont déterminés par les intersections :

- D'une onde de référence $a(t)$ de fréquence f_m et d'amplitude V_m , représentant la tension de sortie désirée u de l'onduleur. Cette tension de référence est en général sinusoïdale.
- Et d'une onde de modulation ou porteuse $p(t)$, de fréquence f_p supérieure à f_m , triangulaire d'amplitude V_p .

❖ Caractéristique de la commande:

- Indice de modulation: $m = \frac{f_p}{f_m}$.
- Coefficient de réglage en tension : $r = \frac{V_m}{V_p}$

❖ **Simulation de quelques grandeurs de l'onduleur MLI monophasé sous Matlab:**

• **Commande unipolaire:**

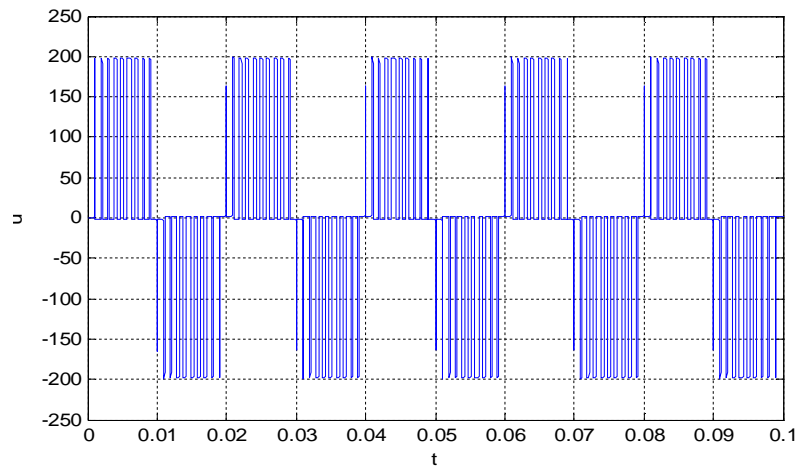


Fig.6.22: Tension de sortie $u(t)$

• **Commande bipolaire:**

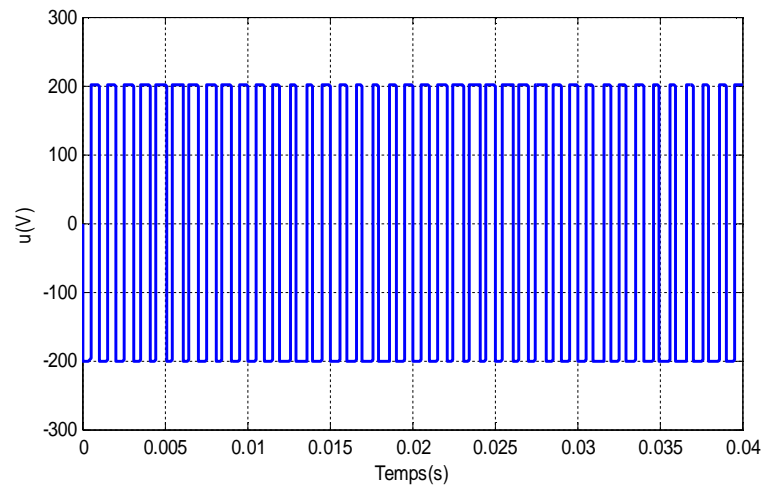


Fig.6.23: Tension de sortie $u(t)$

Remarques :

La structure des onduleurs est identique à celle des onduleurs vus précédemment, seule la commande des interrupteurs est modifiée.

La multiplication du nombre des impulsions, permet de repousser vers les fréquences plus élevées d'harmoniques en sortie. Leur filtrage opéré soit par la charge elle-même (ou par un filtre), est ainsi rendu plus aisé. Dans ces conditions, tout se passe comme si la charge n'était soumise qu'à une tension sinusoïdale correspondant à la composante fondamentale $u_1(t)$ de $u(t)$.

Par l'intermédiaire de la commande, on peut faire varier aisément la valeur efficace et la fréquence du signal de sortie (possibilité de fonctionner à $V/f=Cte$).

Pour un onduleur MLI (P.W.M: Pulse Width Modulation » en anglais), la grandeur de sortie $u(t)$ est constituée d'un certain nombre de créneaux de largeurs différentes comme l'indique la figure 6.22.

Il existe d'autres types de commande, notamment les commandes numériques, où les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont programmés (commande:MLI précalculées).

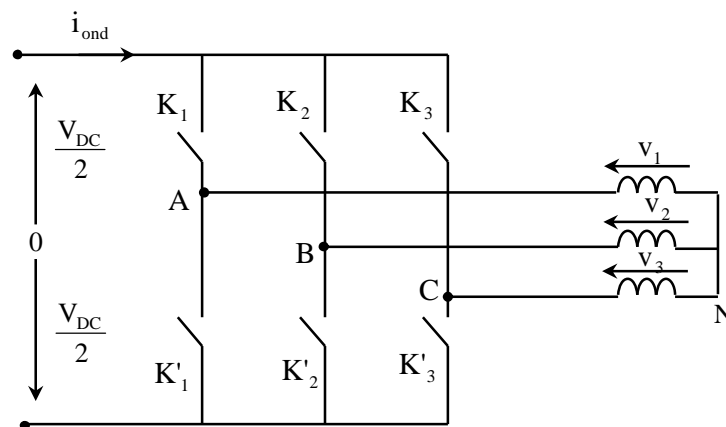
5.2. Modélisation et commande de l'onduleur triphasé

Fig.6.24: Schéma de principe d'un onduleur 3~

L'onduleur triphasé est formé par trois bras, dont chacun comporte deux interrupteurs de puissance bidirectionnelle en courant. Les clés de commande des interrupteurs de puissances sont notées par C_1, C_2 et C_3 .

❖ **Modèle de l'onduleur triphasé:**

On démontre que les trois tensions de sortie de l'onduleur sont données sous forme matricielle

$$\text{par : } \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

La fonction $f_1(u)$ est donnée par $f_1(u) = \frac{V_{DC}}{3} \cdot (2 \cdot C_1 - C_2 - C_3)$.

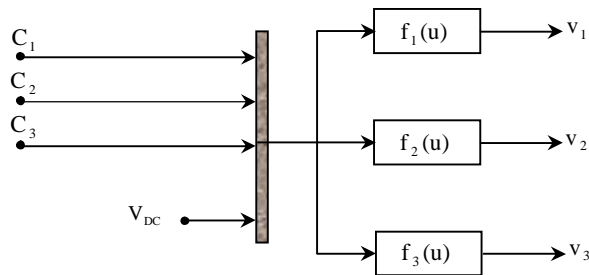


Fig.6.25 : Modèle de l'onduleur triphasé

❖ **Modèle de la commande:**

Les tensions (a, b et c) représentent les tensions images de système des tensions triphasés simples. La porteuse $p(t)$ est un signal triangulaire dont la fréquence ($f_p \gg f_a$).

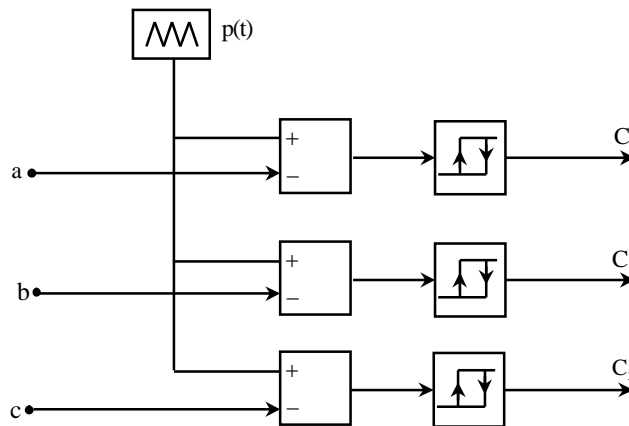


Fig.6.26: Modèle de la commande d'un onduleur triphasé

❖ Simulation de quelques grandeurs de l'onduleur MLI triphasé sous Matlab:

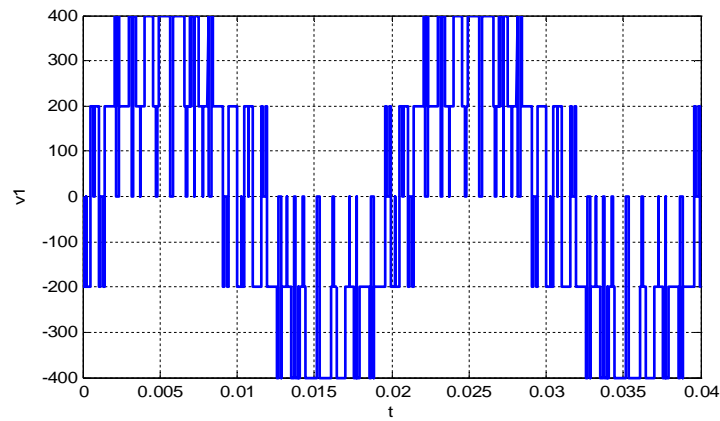


Fig.6.25: Allures de la tension tensions v_1

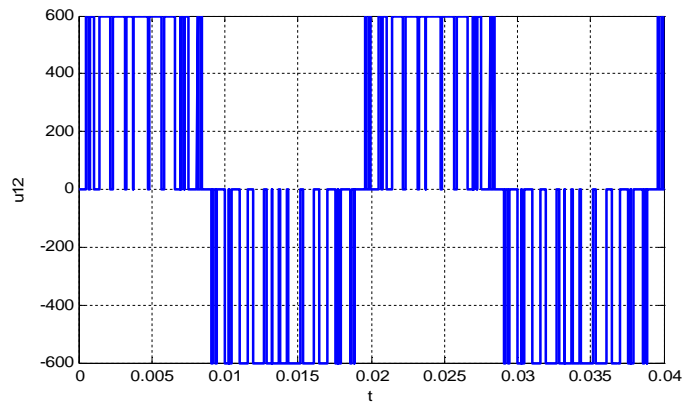


Fig.6.26: Allures de la tension tensions u_{12}