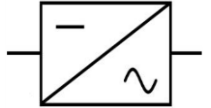


## Chapitre 3 : Les onduleurs autonomes :

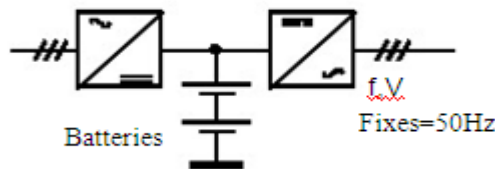
### I-Introduction générale :

Un onduleur est un convertisseur statique de type continu-alternatif (DC/AC); il permet d'alimenter une charge en courant alternatif à partir d'une source continue. On distingue deux types d'onduleurs : onduleur de tension et onduleur de courant.

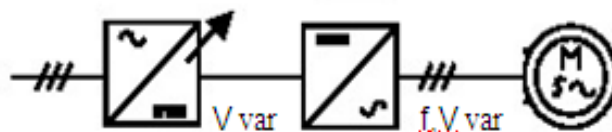


Onduleur	Interrupteurs électroniques	Source continue d'alimentation	Charge alimentée en alternatif
de tension	Bidirectionnels en courant	Source de tension.	La tension est imposée, le courant dépend de la charge.
de courant	Unidirectionnels en courant	Source de courant.	Le courant est imposé, la tension dépend de la charge

- Si l'onduleur impose sa propre fréquence à la charge on parle **d'un onduleur autonome**.
- Si la fréquence est imposée par la charge (exemple : onduleur débitant sur le réseau) on parle **d'un onduleur assisté**.
- ✓ **Utilisations des onduleurs : Les alimentations sans coupure (ASI)** : en présence de la tension réseau, la batterie se charge à travers un redresseur, en cas de défaut (manque de tension réseau) l'énergie est fournie par la batterie vers l'installation via un onduleur. Exemple d'utilisation : alimentation des agences commerciales (banques).
- ✓ **Exemples d'utilisation : Alimentation des agences commerciales (banques).**



- Les variateurs de vitesse pour machines synchrones et asynchrones : dans ce cas l'onduleur est autonome, de fréquence et tension variables :

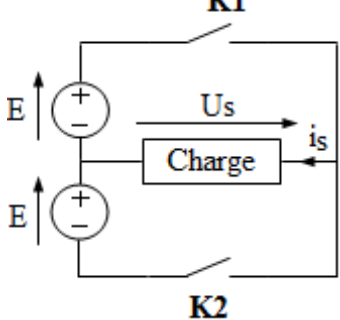
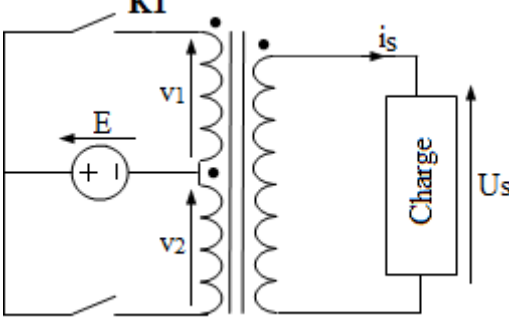
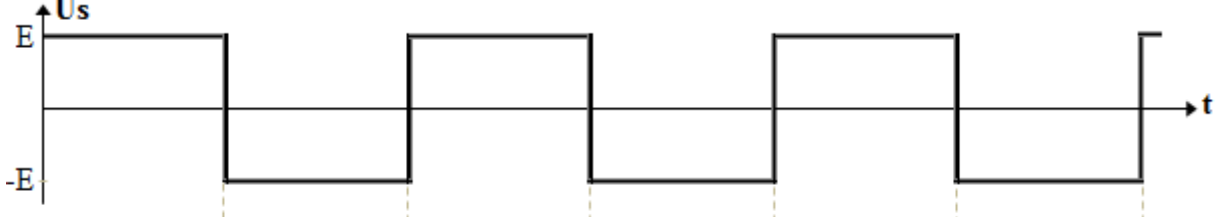


- Alimentation des fours : dans ce cas les onduleurs sont de type : onduleurs à résonance. (Fréquence fixe mais valeur efficace de tension variable).

**Remarque :** Dans ce chapitre on limite l'étude aux onduleurs de tension autonomes

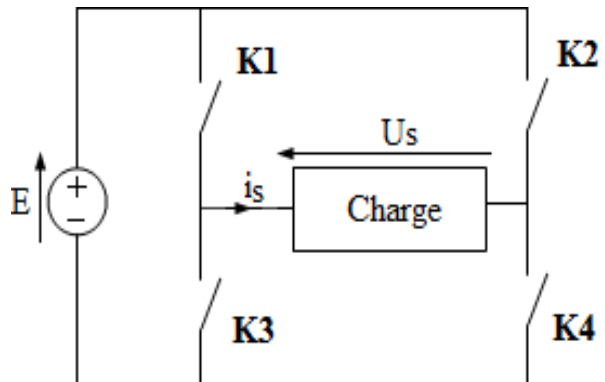
### II- Les onduleurs monophasés :

- a- **Principe :** Le principe de base consiste à connecter, alternativement dans un sens puis dans l'autre, une source de tension continue à une charge de manière à lui imposer une alimentation en tension alternative (périodique mais non sinusoïdale)
- b- **Structure à deux interrupteurs :** Dans ce type des onduleurs : pour imposer +E à la charge : K1 est fermé (passant) alors K2 est ouvert (Bloqué), pour imposer -E à la charge K1 est bloqué alors K2 est ouvert : la commande de K1 et K2 est complémentaire :  $K1 = \neg K2$

Structure en demi -pont	Structure à transformateur point milieu						
							
<p><b>Avantage :</b> structure simple et économique, un seul interrupteur passant (chute de tension réduite).</p> <p><b>Inconvénient :</b> la tension de blocage des interrupteurs est 2E, nécessite deux sources de tension.</p>	<p><b>Avantage :</b> structure simple et économique, un seul interrupteur passant (chute de tension réduite), le transformateur permet une isolation galvanique.</p> <p><b>Inconvénient :</b> à chaque instant, un seul demi-primaire est utilisé ce qui oblige à surdimensionner le transformateur, les harmoniques de la tension induisent des pertes supplémentaires dans le fer.</p>						
 <table border="1" data-bbox="220 1079 1327 1146"> <tr> <td>K1 fermé K2 ouvert</td> <td>K1 ouvert K2 fermé</td> <td>K1 fermé K2 ouvert</td> <td>K1 ouvert K2 fermé</td> <td>K1 fermé K2 ouvert</td> <td>K1 ouvert K2 fermé</td> </tr> </table>		K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé	K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé	K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé
K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé	K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé	K1 fermé K2 ouvert	K1 ouvert K2 fermé		

c- **Structure en pont :** En passant de deux à quatre interrupteurs, la figure suivante représente le schéma avec interrupteurs mécaniques.

- ✓ **Avantages :** la tension de blocage de chaque interrupteur est égale à la tension maximale aux bornes de la charge. une seule source de tension suffit.
- ✓ **inconvénients :** nécessite quatre interrupteurs commandés. La charge est alimentée à travers deux interrupteurs en série ce qui crée une chute de tension.



Pour que la source de tension E ne soit pas mise en court-circuit et que le récepteur de courant (en général charge active : inductive ou capacitive) ne soit pas mis en circuit ouvert : il faut que K1 et K3 d'une part, K2 et K4 d'autre part soient complémentaires.

**III - Stratégie de commande des onduleurs monophasés :** On limite l'étude aux onduleurs monophasés en pont : principe : Si :

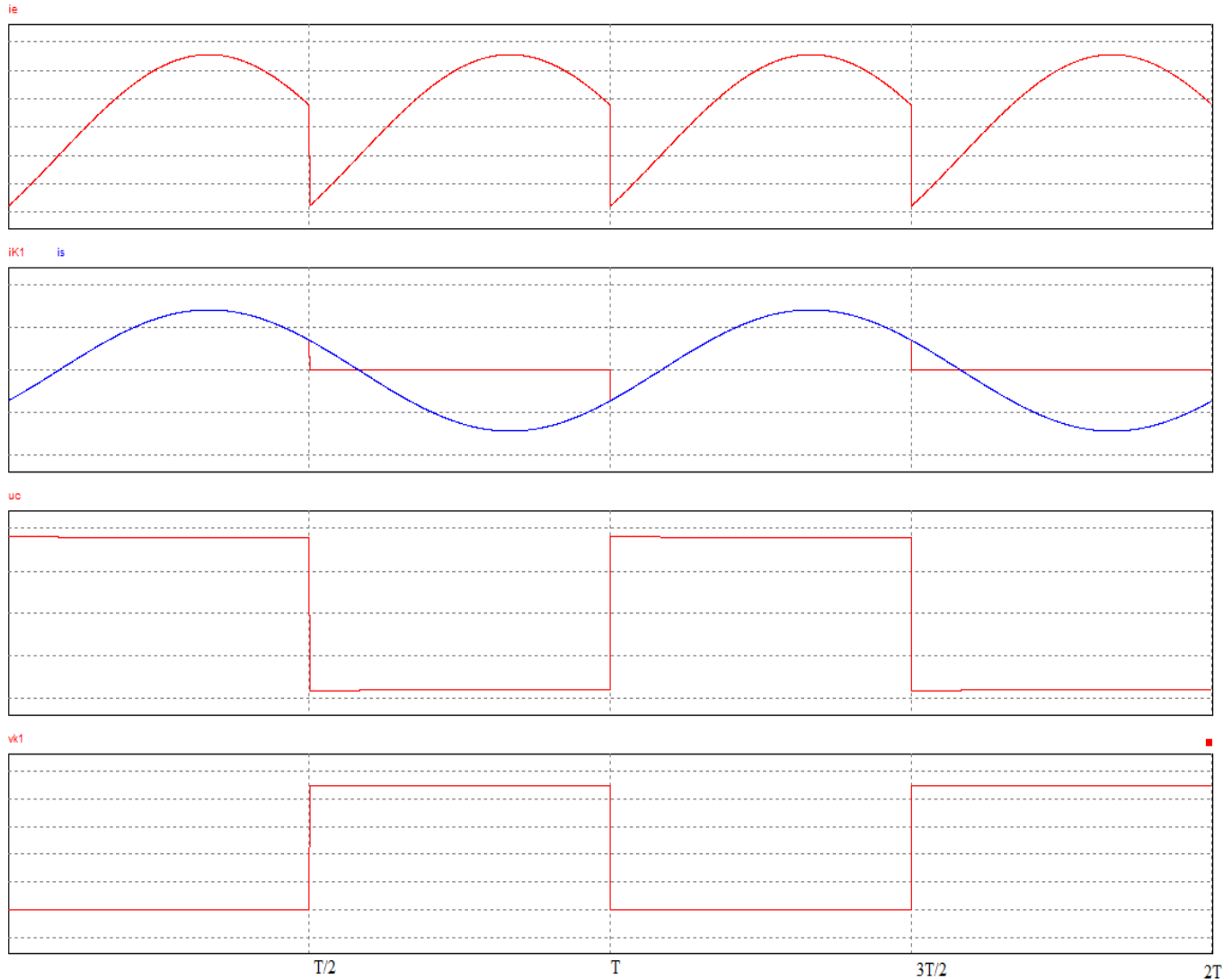
- K1 et K4 sont fermés :  $us(t) = +E$ .
- K2 et K3 sont fermés :  $us(t) = -E$

**3.1 : Commande Simultanée (à 2 niveaux de tension ou pleine onde ou symétrique ou adjacente) :**

**a- Principe :** pendant une alternance (demi-période) on ferme K1 et K4 : soit  $us(t) = +E$

Pendant l'autre alternance K2 et K3 sont fermés :  $us(t) = -E$

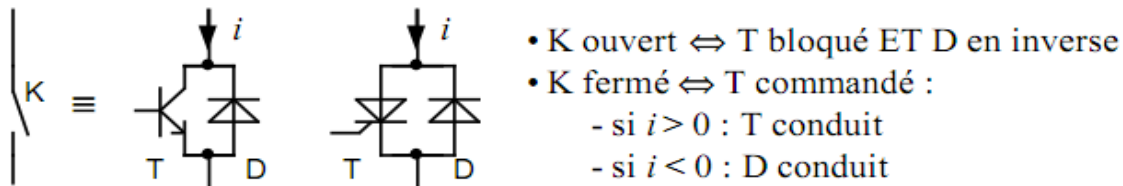
**b- Formes d'ondes : Cas d'une charge inductive :**



**b-1 :Semi-conducteurs à utiliser :**

Chaque interrupteur, devant écouler  $+i_s$  ou  $-i_s$  pendant la moitié de la période : il doit donc être bidirectionnel en courant. De plus la tension à ses bornes est positive (à l'état bloqué) ou nulle (à l'état passant) : chaque interrupteur  $K_i$  doit être formé d'un semi-conducteur commandé avec une diode montée en parallèle inverse à ses bornes :

Interrupteurs : à transistor NPN (ou thyristor si grande puissance), en parallèle avec diode de récupération

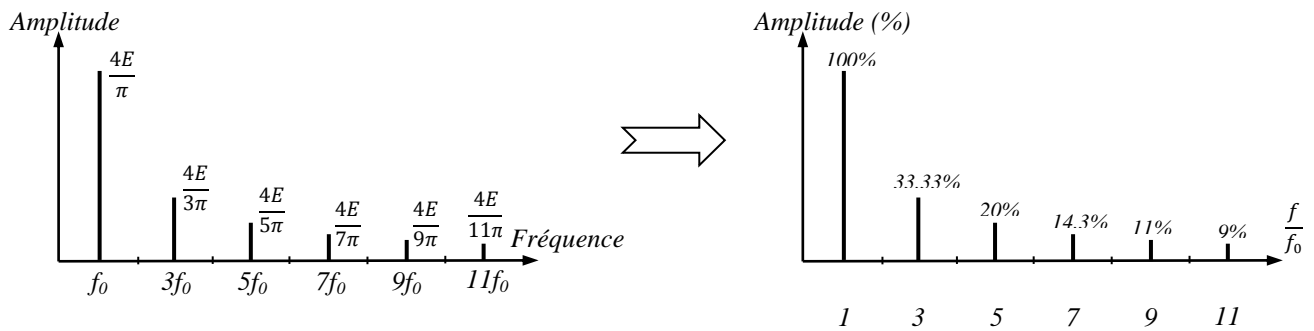


**b-2 : Caractéristiques du signal de sortie :**

➤ **Valeur moyenne de :  $u_s(t)$  :**  $u_s(t)$  est alternative (mais non sinusoïdale) sa valeur moyenne :  $U_{smoy}=0$

➤ **Valeur efficace de :  $u_s(t)$  :** 
$$U_{Seff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_s(t))^2 dt} = E$$

➤ **Spectre de signal**  $us(t)$  :  $us(t) = \frac{4E}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin((2k+1)\omega t)$  On pose  $f_0=1/T$



➤ **Taux d'harmonique** : Il est très mauvais :  $THD=0.48$  soit :  $THD\% \approx 48$  .

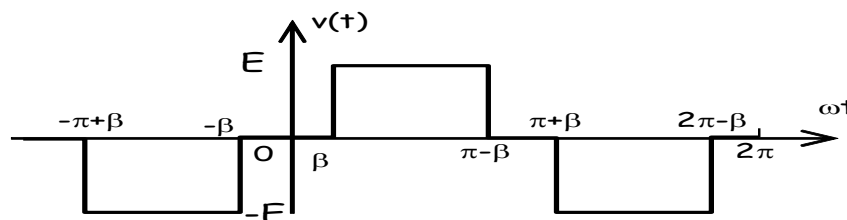
**3-2 : Commande décalée (en créneaux ou à 3 niveaux) :**

**a- principe** : On désigne par  $\beta$  l'angle de décalage des commandes ( $\omega$  pulsation du fondamental  $\omega T=2\pi$ ) :

On ferme  $K1$  de  $0$  à  $\pi$  donc  $K3$  de  $\pi$  à  $2\pi$  (Pour assurer que  $K1=K3$ )

On ferme  $K4$  de  $\beta$  à  $\pi - \beta$  donc  $K2$  de  $\pi + \beta$  à  $2\pi - \beta$

**b- Caractéristiques du signal de sortie :**



**c- Caractéristiques :**

✓ **Valeur moyenne de** :  $us(t)$  : est alternative (mais non sinusoïdale) sa valeur moyenne :  $Us_{moy}=0$

✓ **Valeur efficace de** :  $us(t)$  : on pose :  $\beta=\tau/2$

$$Us_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (Us(t))^2 dt} = E \sqrt{1 - \frac{\tau}{\pi}}$$

✓ **Spectre de signal  $us(t)$**  : La décomposition en série de Fourier de signal  $us(t)$  donne :

La valeur efficace du fondamental :  $Us1_{eff} = \frac{2E}{\pi} \cdot \cos(\beta) \cdot \sqrt{2}$

La valeur efficace de l'harmonique de rang  $K$

$$Vsk = \frac{E}{K} \cdot \frac{[2\sqrt{2}]}{\pi} \cdot \cos(K \cdot \beta) \quad \text{si } k \text{ est impair}$$

$$Vsk = 0 \quad \text{si } k \text{ est pair}$$

Soit : la décomposition en série de Fourier de  $vs(t)$  est :

$$vs(t) = \frac{4E}{\pi} \cdot [\cos(\beta) \sin(\omega t) + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{2p+1} \cdot \cos((2p+1)\beta) \cdot \sin((2p+1)\omega t)]$$

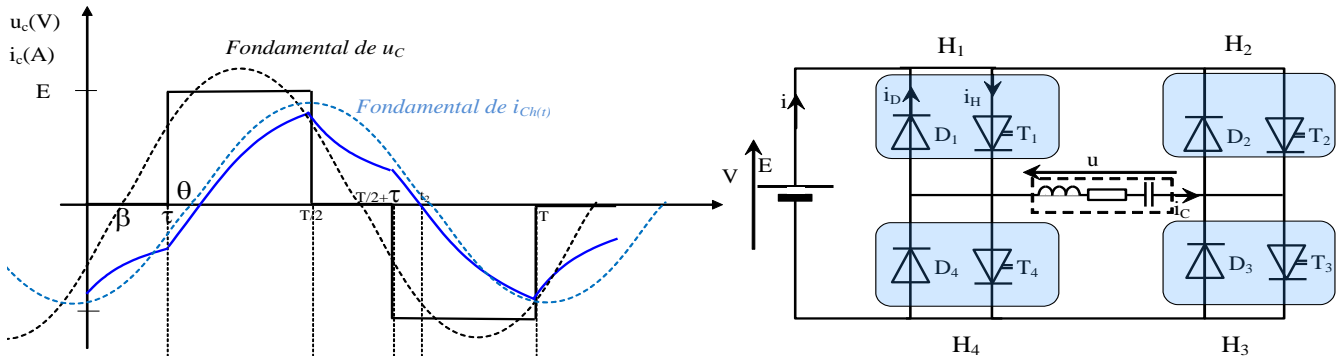
✚ Si on prend  $\beta=60$  degré  $=\pi/3$  rad tous les termes impaires multiples de 3 s'annulent.

**Conclusion** : Généralement on règle  $\beta=60^\circ$ , on montre qu'il y a disparition de l'harmonique 3 (et des harmoniques dont le rang est un multiple de 3)

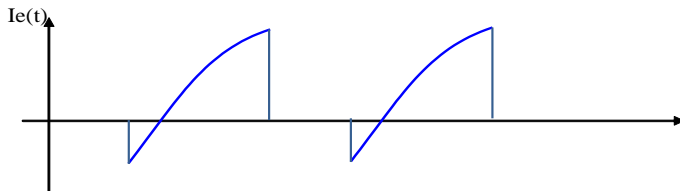
**Avantages** : la tension de blocage de chaque interrupteur est égale à la tension maximale aux bornes de la charge. Cette structure permet l'élimination des harmoniques avec d'autres types de commande avancé (MLI : Modulation de largeur d'impulsion).

**Inconvénients** : nécessite quatre interrupteurs commandés. La charge est alimentée à travers deux interrupteurs en série ce qui crée une chute de tension.

**d- allures des courants : cas d'une charge R-L :**



H <sub>1</sub>		H <sub>4</sub>		Eléments commandés	
H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>		H <sub>2</sub>		signe de la puissance reçue par la charge
0	-	+	0	-	
D <sub>1</sub> T <sub>2</sub>	D <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	T <sub>1</sub> T <sub>3</sub>	D <sub>4</sub> T <sub>3</sub>	D <sub>4</sub> D <sub>2</sub>	T <sub>4</sub> T <sub>2</sub>
Eléments passants					



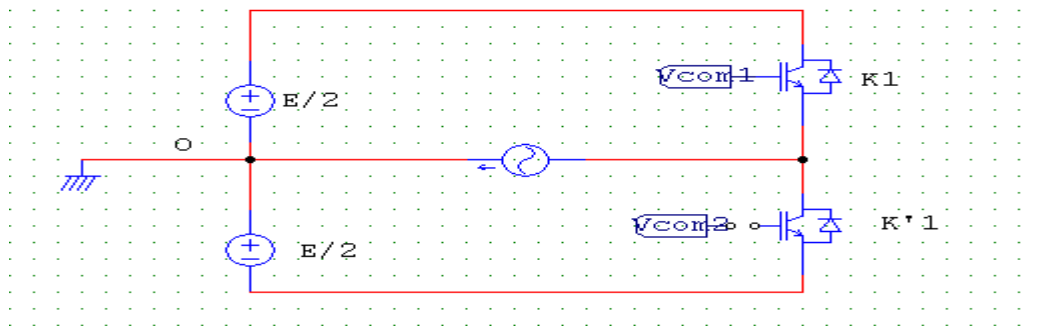
La valeur moyenne de :  $i$  est  $\langle i \rangle = \frac{I\sqrt{2}}{\pi} (\cos \tau - \cos(\theta - \tau))$

La puissance fournie par la source est  $P = E \langle i \rangle = \frac{EI\sqrt{2}}{\pi} (\cos \tau - \cos(\theta - \tau))$  : la source doit être réversible en courant .

**3.3 : Commande MLI :** Le filtrage de la tension ou de courant de sortie d'un onduleur ne délivrant qu'un créneau par alternance (cas des commandes vues avant) est difficile et onéreux car le premier harmonique à éliminer [harmonique de rang 3 ou 5] à une fréquence très voisine de celle du fondamental. **Pour éviter ce problème** on utilise la commande dite : modulation de largeur d'impulsion [MLI ou en anglais : **PMW : Pulse Width Modulation**] qui consiste à former chaque alternance de la tension de sortie par plusieurs créneaux rectangulaires de largeurs convenables.

**3.3.1 : Modulation MLI Sinus-Triangle :**

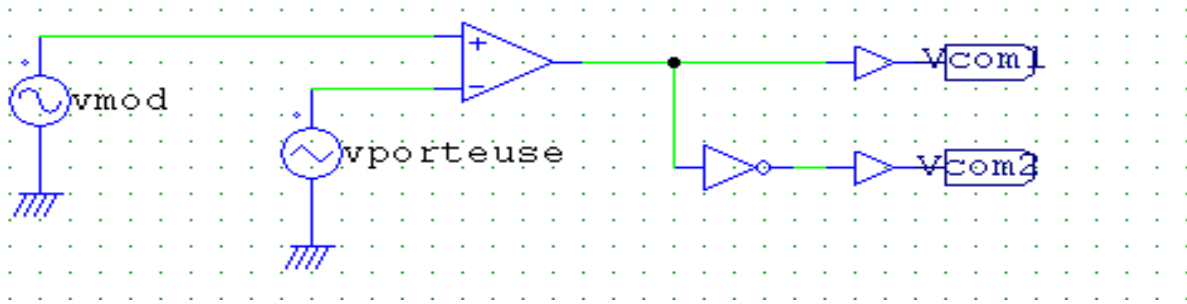
**a- Principe de la commande :** Prenons le cas d'un onduleur demi-point :



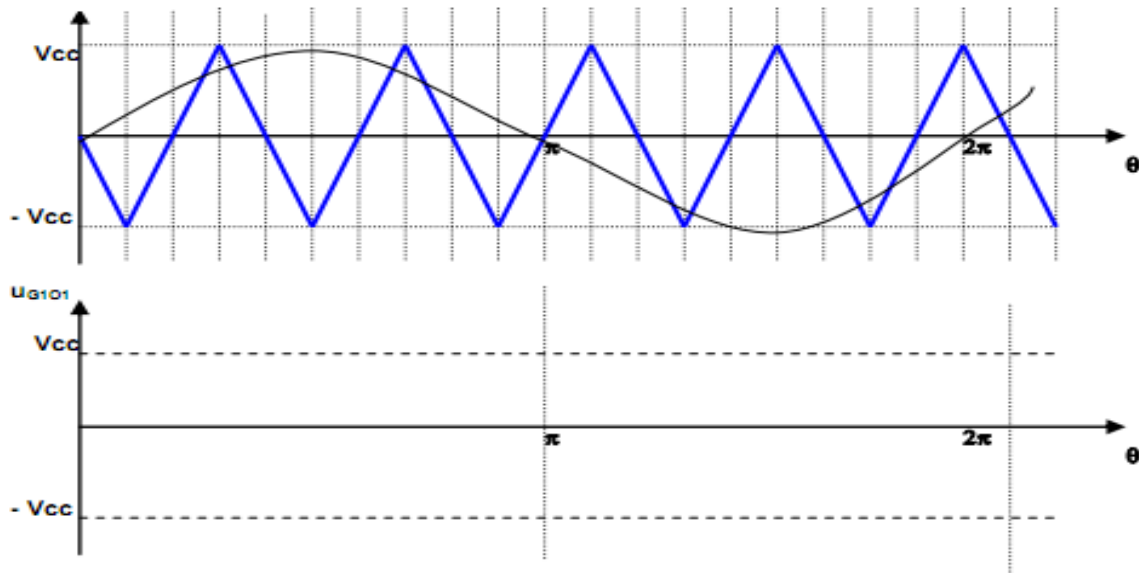
On rappelle que la commande de K1 et K'1 est complémentaire.

Les instants de fermeture et d'ouverture de K1 et K'1 sont déterminés par un circuit de commande dont le principe est de créer des intersections entre :

- Une onde de référence  $v_r(t)$  : signal sinusoïdal (modulante) : représente la forme du signal souhaité en sortie (sinusoïdal) et de fréquence  $f$  égal à celle de  $v_s(t)$ .
- Une onde de modulation ou porteuse  $v_p(t)$ , de fréquence  $f_p$  nettement supérieur à  $f$  et triangulaire.



**b-Formes des ondes :**



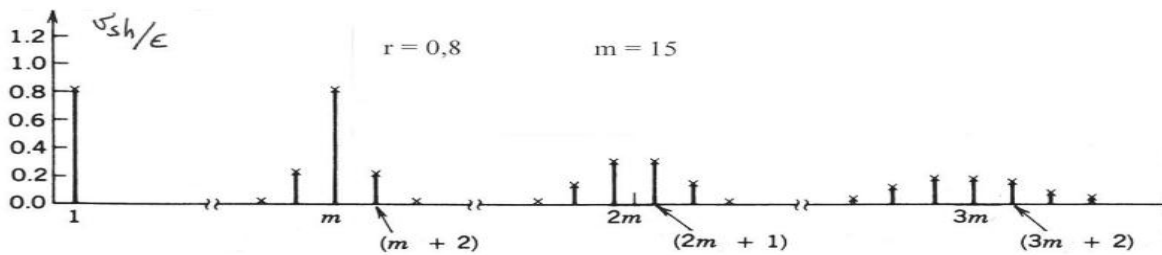
**On note :**

- $m$  : indice de modulation et  $r$  : coefficient de réglage ou bien profondeur de modulation avec :
- $m = \frac{f_p}{f}$  et  $r = \frac{V_{réfmax}}{V_{pmax}}$
- **Caractéristiques du signal de sortie  $v_s(t)$  :**

**Valeurs efficace et moyenne :** On démontre que si  $m$  est suffisant grand ( $m > 6$ ) le fondamental de  $v_s(t)$  est pratiquement semblable à  $v_{réf}(t)$  c'est à dire une sinusoïde de fréquence  $f$  soit :

- Si  $m \geq 6$   $v_{s1}(t) = v_{sfond}(t) = r \cdot E \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$
- Et :  $V_{smoy} = 0 ; V_{seff} = E$  .
- A : E donnée, la MLI permet de faire varier la valeur efficace du  $v_{s1}(t)$  qui presque  $v_s(t)$  si on néglige les autres harmoniques.

**Spectre de  $v_s(t)$  :** Le signal de sortie, très découpé, peut se décomposer en série de Fourier en un terme fondamental (de valeur maximale :  $r.E$  et de fréquence  $f$ ) suivi d'harmoniques centrés autour de la fréquence de découpage ( $m.f$ ) et de ses multiples ( $k.m$ ) : exemple :  $r=0.8$  et  $m=15$  :  $V_{sh}=V_{skmax}$



**Le taux d'harmonique :**

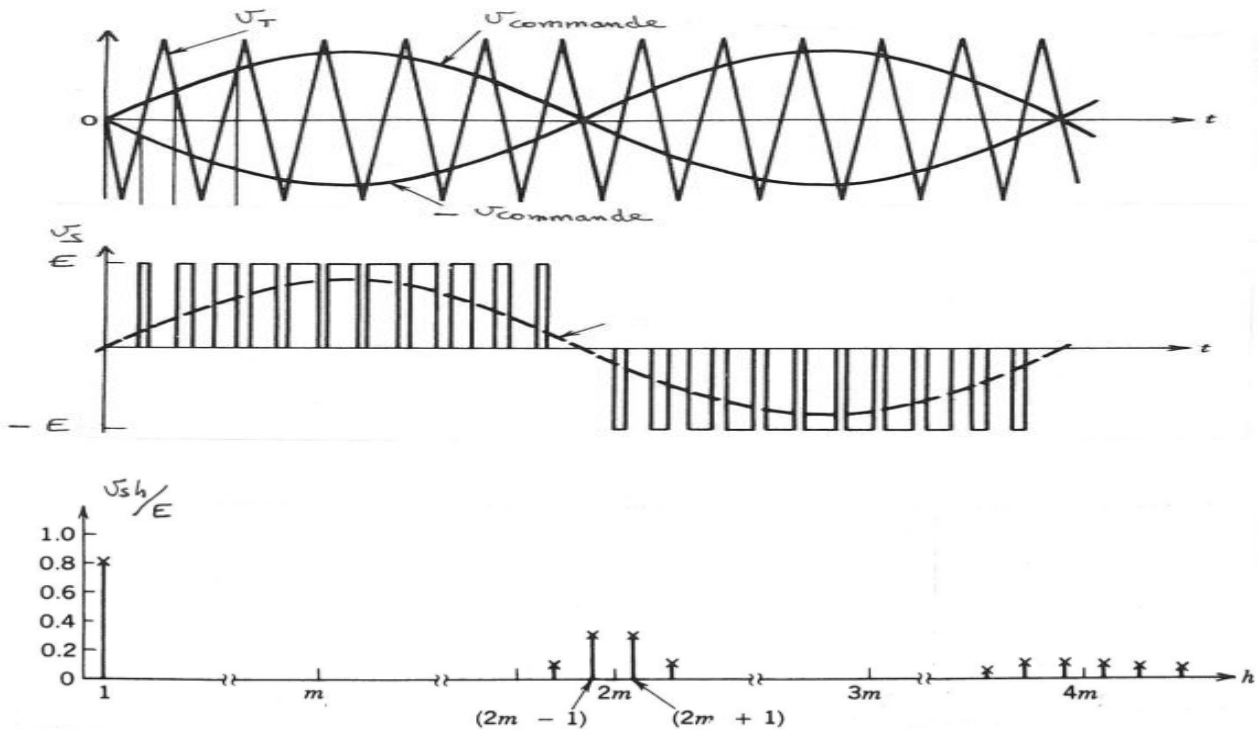
$$\tau_h = THD = \sqrt{\frac{2}{r^2} - 1}$$

Le THD ne dépend pas de rapport des fréquences  $m$ , mais il dépend que de  $r$ .

**Conclusion :** L'augmentation de la fréquence  $f_p$  (et de rapport  $m$ ) permet de repousser les harmoniques en haute fréquence ce qui facilite le filtrage : dans la pratique avec cette stratégie de commande les signaux de sortie sont proche des sinusoïdes. (Voir simulation) : c'est le principe des commandes utilisées dans les variateurs de vitesse des machines à courant alternatif (voir fin des cours machine synchrone et asynchrone).

### 3.3.2 : Types de modulation :

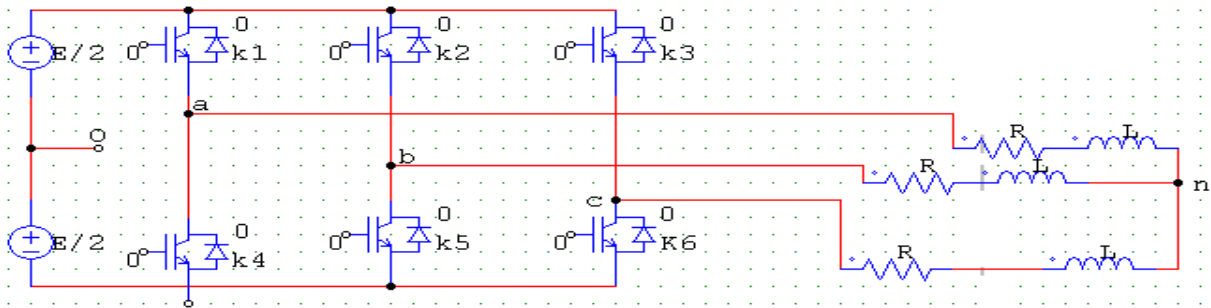
- ✓ **La modulation bipolaire :** (ou pleine onde) : est celle présentée précédemment : le signal de sortie vaut  $\pm E$  sans périodes à zéro. Cette modulation est la seule possible pour un onduleur à point milieu.
- ✓ **La modulation unipolaire :** (ou demi-onde) : s'obtient en utilisant la configuration  $(0, +E)$  pour  $0$  à  $T/2$  puis  $(0, -E)$  pour la demi période  $T/2$  à  $T$  par comparaison du triangle avec l'opposé de la référence.



## IV-Les Onduleurs de Tension Triphasés :

**Objectif :** Transformer la tension continue  $E$  en trois tensions qui forment un système triphasé équilibré (STE).

**Principe :** La commande de chaque interrupteur  $K_i$  est complémentaire avec celle de  $K_{i+3}$ . Le déphasage entre deux interrupteurs de même bras est  $\Pi$  (180 degré). La commande de  $K_i$  et  $K_{i+1}$  est déphasée de 120 degré. **Schéma d'étude :**



Le point 'O' est fictif permet la facilité de l'étude. On a :

➤ Tensions simples

$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$  : Système triphasé équilibré (STE) et charge triphasée équilibrée.

Donc :  $v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \gg v_{no} = \frac{1}{3}[v_{ao} + v_{bo} + v_{co}]$  de plus :

$$v_{ao} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } K1 \text{ fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ si } K4 \text{ fermé} \\ 0 \text{ si } K1 \text{ et } K4 \text{ ouverts} \end{cases} \quad v_{bo} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } K2 \text{ fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ si } K5 \text{ fermé} \\ 0 \text{ si } K2 \text{ et } K5 \text{ ouverts} \end{cases} \quad v_{co} = \begin{cases} \frac{E}{2} \text{ si } K3 \text{ fermé} \\ -\frac{E}{2} \text{ si } K6 \text{ fermé} \\ 0 \text{ si } K3 \text{ et } K6 \text{ ouverts} \end{cases}$$

➤ Tensions composées :

$u_{ab} = v_{K2} - v_{K1}$  ;  $u_{bc} = v_{K3} - v_{K2}$  Et  $u_{ca} = v_{K1} - v_{K3}$  ces équations peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{matrix} u_{ab} & -1 & 1 & 0 \\ u_{bc} & 0 & -1 & 1 & v_{k1} & v_{k2} & v_{k3} \\ u_{ca} & 1 & 0 & -1 \end{matrix}$$

Avec :  $v_{Ki} = \begin{cases} 0 \text{ si } K_i \text{ fermé} \\ E \text{ si } K(i+3) \text{ fermé} \\ \frac{E}{2} \text{ si } K_i \text{ et } K(i+3) \text{ ouverts} \end{cases}$

➤ **Relation entre tensions simples et composées :** Si le récepteur est équilibré on passe aux tensions simples par les relations :

$$\begin{cases} v_{an} = v'A = \frac{1}{3}[u_{ab} - u_{ca}] \\ v_{bn} = v'B = \frac{1}{3}[u_{bc} - u_{ab}] \\ v_{cn} = v'C = \frac{1}{3}[u_{ca} - u_{bc}] \end{cases}$$

➤ Etude des courants :

La loi des nœuds :  $i_{k1} = i_a + i_{k4}$  ;  $i_{k2} = i_b + i_{k5}$  ;  $i_{k3} = i_c + i_{k6}$  et  $i_e = i_{k1} + i_{k2} + i_{k3}$

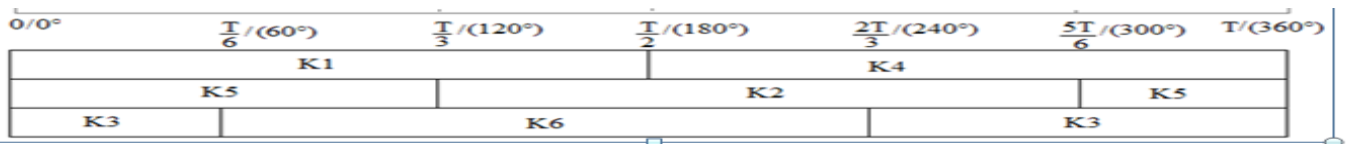
**4.1 : Commandes classiques :**

**4.1-a : Commande 180 degré (Commande adjacente)**

➤ **Commande des interrupteurs :** Chaque interrupteur est commandé pendant 180°.

Les commandes des interrupteurs d'une même branche (bras) sont adjacentes. Les commandes des interrupteurs de deux branches différentes sont décalées de 120°.





➤ **Expressions et formes d'ondes :**

L'ouverture et la fermeture des six interrupteurs détermine six intervalles distincts durant chaque périodes des grandeurs de sortie :

- **Pour :  $0 < wt < \frac{\pi}{3}$  :** K1 ,K5 et K3 sont fermés donc :
  - ✓  $v_{K1}=v_{K3}=v_{K5}= 0$  et  $v_{K4}=v_{K2}=v_{K6}=E$
  - ✓  $u_{ab} = +E , u_{bc} = -E , u_{ca} = 0$
  - ✓  $v_{an} = \frac{E}{3} , v_{bn} = -\frac{2}{3}E , v_{cn} = \frac{E}{3}$
  - ✓  $ik_1 = ia , ik_5 = -ib , ik_3 = +ic ; ik_2 = ik_4 = ik_6 = 0$  et  $ie = ia + ic = -ib$
- **Pour :  $\frac{\pi}{3} < wt < \frac{2\pi}{3}$  :** K1 ,K5 et K6 sont fermés : donc :
  - ✓  $v_{K1}=v_{K6}=v_{K5}= 0$  et  $v_{K4}=v_{K2}=v_{K3}=E$
  - ✓  $u_{ab} = +E , u_{bc} = 0 , u_{ca} = -E$
  - ✓  $v_{an} = 2 * \frac{E}{3} , v_{bn} = -\frac{1}{3}E , v_{cn} = -\frac{E}{3}$
  - ✓  $ik_1 = ia , ik_5 = -ib , ik_6 = -ic ; ik_2 = ik_4 = ik_3 = 0$  et  $ie = ia$

**(Courbes : Voir page suivante) :**

➤ **Caractéristiques des tensions de sortie :**

- **Tensions simples : Valeur moyenne : nulle**

**Valeur efficace ;** les trois tensions sont identiques en forme (décalées de 120 degré)

soit :  $V_{seff}=V_{aneff}=V_{bneff}=V_{cneff}=V$

Avec:  $V^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v^2 an(\theta). d\theta$  avec  $\theta = wt$  et  $T = \frac{1}{f}$

$$\text{soit } V^2 = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\pi/3} \left(\frac{2E}{3}\right)^2 d\theta + 2 \cdot \int_0^{\pi/3} \left(\frac{E}{3}\right)^2 \cdot d\theta \right]$$

Finalement :  $V = \frac{1}{3} E \sqrt{2}$

- ✓ **Spectre des tensions simples :** Les tensions simples sont : des fonctions impaires, les termes cosinus=0 La décomposition en série de Fourier est donc :

Le fondamental de  $v_s(t)$  a pour valeur efficace :

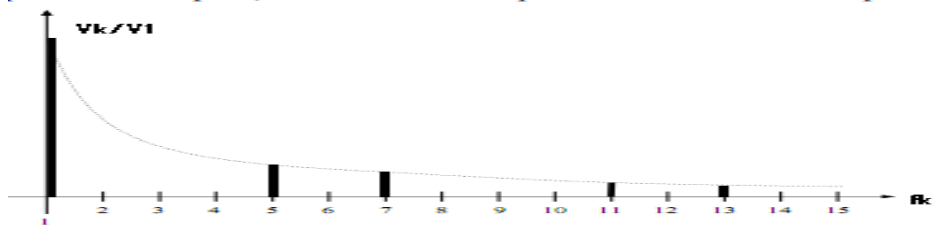
$$V_{an1}=V_1=V_{an-fond}=\frac{1}{\pi} * E \cdot \sqrt{2} \quad \text{Les termes de rang } k :$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ank} = V_k = 0 \text{ si } k \text{ pair .} \\ V_{ank} = \frac{1}{k} * \frac{1}{\pi} * E \cdot \sqrt{2} \text{ Si } k \text{ impair sauf pour les rangs 3 et multiple de 3} \end{array} \right.$$

**Soit :**

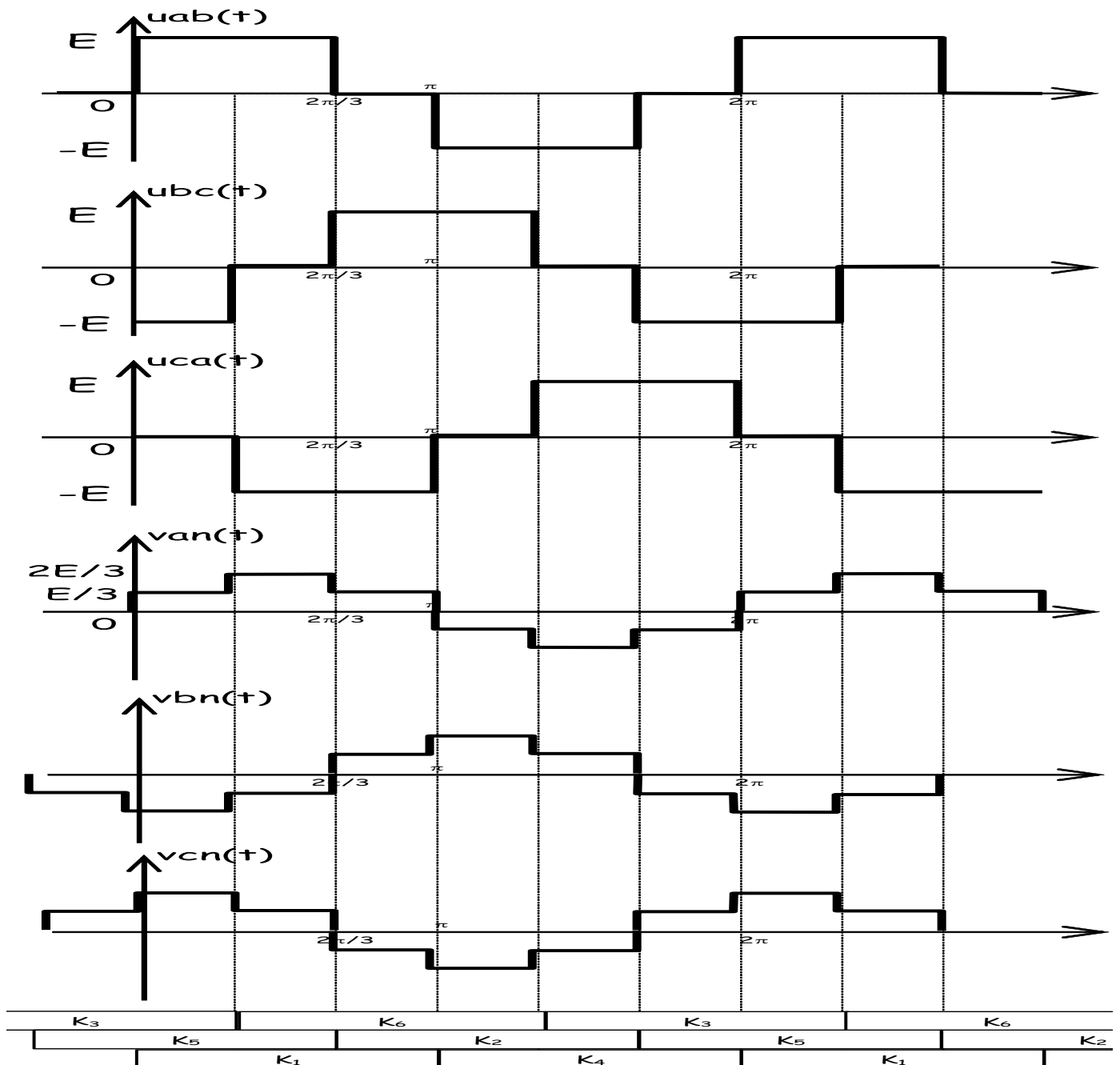
$$v_{an}(t) = \frac{2E}{\pi} \left[ \sin(wt) + \frac{1}{5} \sin(5wt) + \frac{1}{7} \sin(7wt) + \frac{1}{11} \sin(11wt) \dots \right].$$

Ce qui donne le spectre suivant :

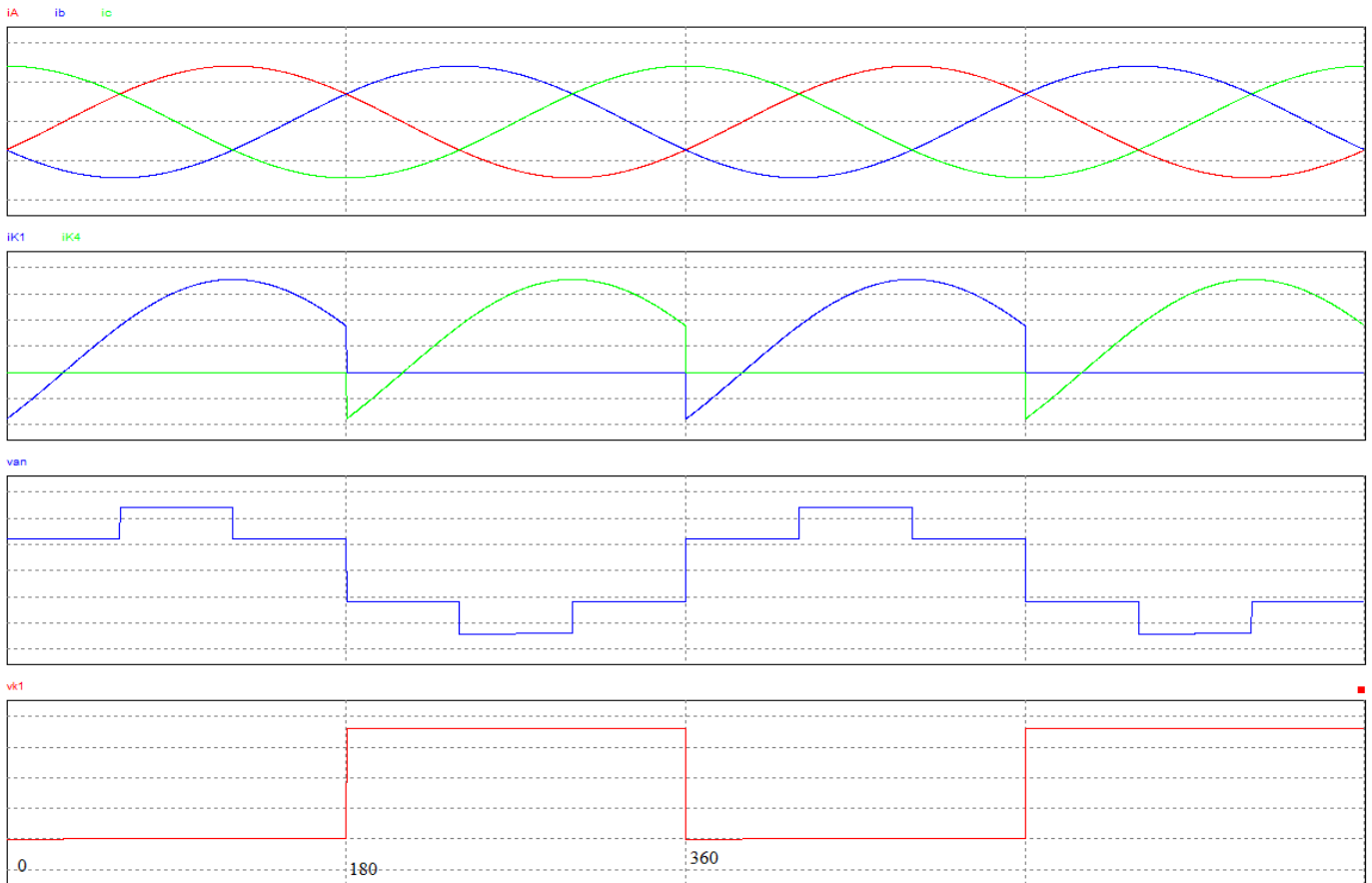


Le taux d'harmoniques :  $THD=0.311$  soit  $THD\% = 31.1$

Tensions composées : Valeur moyenne nulle ; Valeur efficace :  $U_{eff} = U = E * \sqrt{\frac{2}{3}}$



**Remarque : allures des courants :**



**4.1. b : Commande disjointe : 120 degré :**

➤ **Commande des interrupteurs :** Chaque interrupteur est commandé pendant 120°. Les commandes des interrupteurs d'une même branche (bras) sont complémentaires. Les commandes des interrupteurs de deux branches différentes sont décalées de 120°.

K1			K4		K1	
K5		K2		K5		K2
	K6		K3		K6	

**Expressions et formes d'ondes :** Pour :  $0 < \omega t < \frac{\pi}{3}$  : K1, K5 sont fermés ; les autres sont ouverts donc :  $v_{K1}=v_{K5}=0$  et  $v_{K4}=v_{K2}=+E$  et  $v_{K3}=v_{K6}=E/2$

✓  $v_{ao} = \frac{E}{2}$  ,  $v_{bo} = -\frac{E}{2}$  ,  $v_{co} = 0$  soit  $v_{no} = 0$  et  $v_{ao} = v_{an}$  ,  $v_{bo} = v_{bn}$  et  $v_{co} = v_{cn}$

✓  $u_{ab} = +E$  ,  $u_{bc} = -\frac{E}{2}$  ,  $u_{ca} = -\frac{E}{2}$

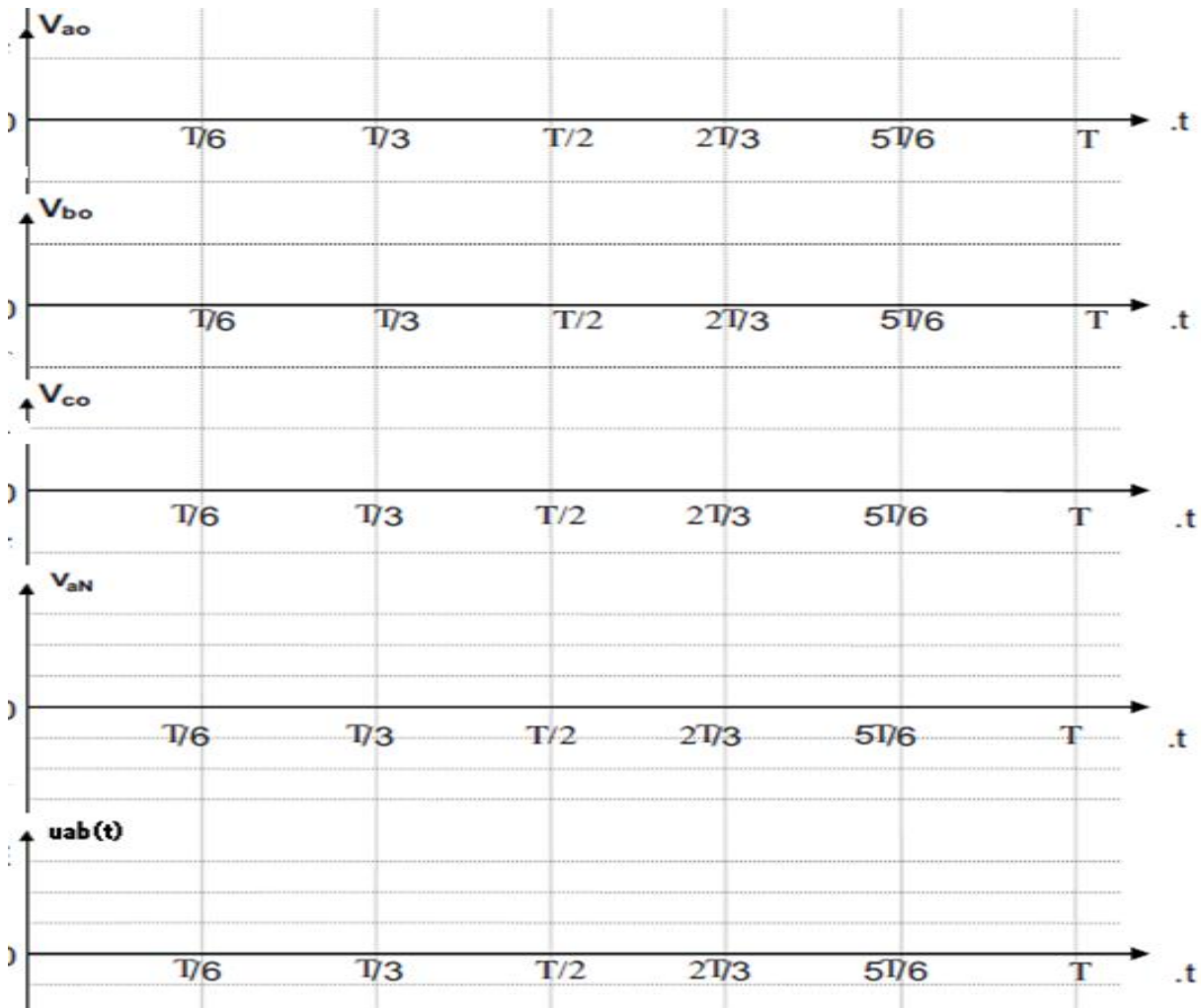
✓  $ik_1 = ia$  ,  $ik_2 = ik_3 = ik_6 = ik_4 = 0$  ,  $ik_5 = -ib$  et  $ie = ia$

✓ **Pour :  $\frac{\pi}{3} < \omega t < 2\frac{\pi}{3}$  :** K1 et K6 passants les autres bloqués :  $v_{K1}=v_{K6}=0$   $v_{K4}=v_{K3}=+E$  et  $v_{K2}=v_{K5}=E/2$

✓  $v_{ao} = \frac{E}{2}$  ,  $v_{bo} = 0$  ,  $v_{co} = -\frac{E}{2}$  soit  $v_{no} = 0$  et  $v_{ao} = v_{an}$  ,  $v_{bo} = v_{bn}$  et  $v_{co} = v_{cn}$

✓  $u_{ab} = +\frac{E}{2}$  ,  $u_{bc} = +\frac{E}{2}$  ,  $u_{ca} = -E$

✓  $ik_1 = ia(t)$  ,  $ik_2 = ik_3 = ik_4 = ik_5 = 0$  et  $ik_6 = -ic(t)$  alors  $ie = ia$



➤ **Caractéristiques des tensions de sortie :**

✓ **Tensions simples :**

- **Valeur moyenne :** nulle
- **Valeur efficace :** trois tensions identiques décalée de  $2\pi/3$  :  

$$V_{eff} = E/\sqrt{6}$$
- **Spectre :** Voir TD-COLLE

✓ **Tensions composées :**

- Valeur moyenne nulle
- Valeur efficace :  $U_{eff} = U = E/\sqrt{2}$
- Spectre : Voir TD+ Colles

La commande disjointe permet d'avoir des courbes plus voisines de la sinusoïde. Ce choix simplifie le problème de filtrage mais complique la commande (enclenchement et déclenchement d'interrupteurs tous les  $30^\circ$ ).

**Remarque : Allures des courants :**

- Si la charge est de types RL, la charge va jouer le rôle d'un filtre passe-bas ce qui filtre de plus les harmoniques d'ordre (5, 7, 11,13....) le courant sera considéré comme une sinusoïde [en réalité se sont des charges et décharge exponentielles], les fondamentales de  $i_{s1}$ ,  $i_{s2}(t)$  et  $i_{s3}(t)$  forme un système triphasé équilibré de valeur efficace :  $I_{s1}=I_{s2}=I_{s3}=I$  avec :

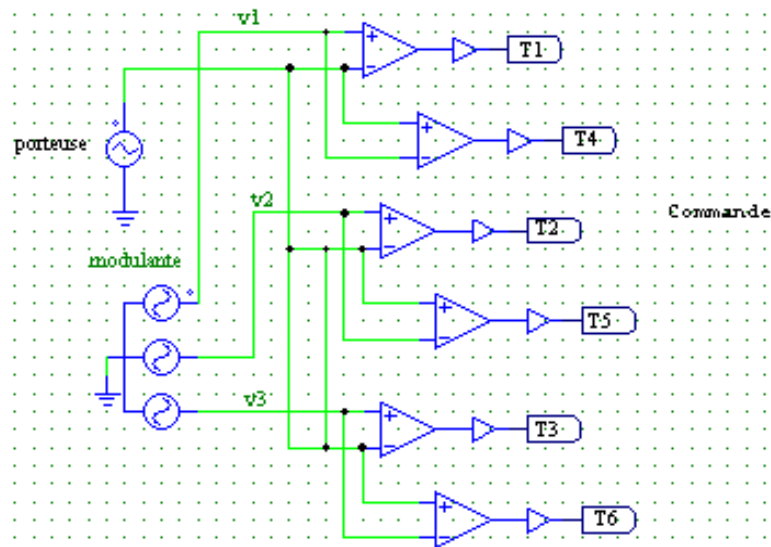
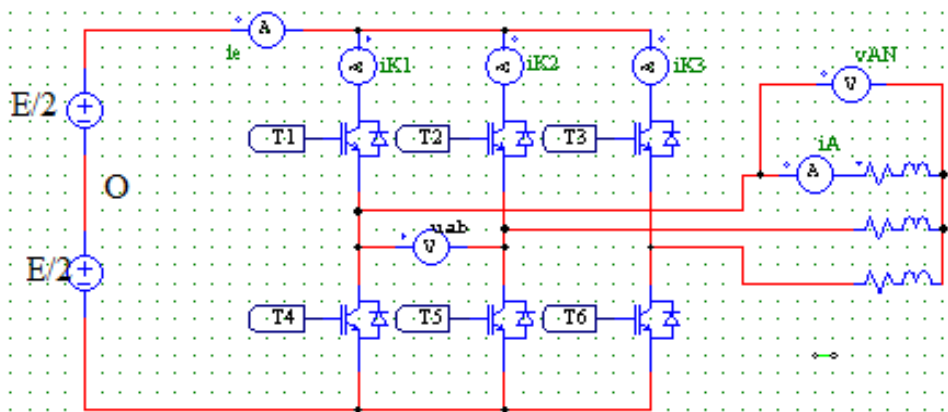
$$I = \frac{V_1}{\sqrt{R^2+(L\omega)^2}}$$

- Pour trouver les allures des courants dans chaque élément  $T_i$  et  $D_i$  : il faut faire attention au sens de courant et à son signe : exemple : T1-D1 : T1 conduit si K1 est actif et de plus  $i_{s1}(t)$  positif alors D1 conduit si K1 actif et  $i_{s1}(t)$  est négatif.

**4.2 : Onduleur de Tension Triphasé : Commande MLI :**

**4.2.a : Principe : modulation sinus-triangle :** Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont déterminés par un circuit de commande dont le principe est de créer des intersections entre :

- Une onde de référence : pour la phase 1 :  $v_{r1}=v_{aw}$ ,  $v_{r2}=v_{bw}$ ,  $v_{r3}=v_{cw}$  : avec  $v_{r1}$ ,  $v_{r2}$ ,  $v_{r3}$  forme un système triphasé équilibré de fréquence  $f$  égal à celle de signal de sortie.
- Une onde de modulation ou porteuse  $v_p(t)$ , de fréquence  $f_p$  nettement supérieur à  $f$  et triangulaire.



✓ **Circuit de puissance et de commande :**

Le point 'O' est fictif. la charge est supposée équilibrée. Si le récepteur est équilibré on passe aux tensions simples par les relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{an} = v'A = \frac{1}{3}[u_{ab} - u_{ca}] \\ v_{bn} = v'B = \frac{1}{3}[u_{bc} - u_{ab}] \\ v_{cn} = v'C = \frac{1}{3}[u_{ca} - u_{bc}] \end{array} \right.$$

(Voir page 8)

Les courants dans les interrupteurs se déduisent des courants de sortie :  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$

$i_{k1}=i_a$  quand  $k_1$  est fermé,  $i_{k'1}=-i_a$  quand  $K'1$  est fermé .....

- Forme des signaux (voir page suivante : Ces courbes pour  $m=fp/f=6$ ) :

**Tensions de sortie :**

Si m est suffisant (m>6) le fondamental de chaque tension simple a pour valeur efficace :

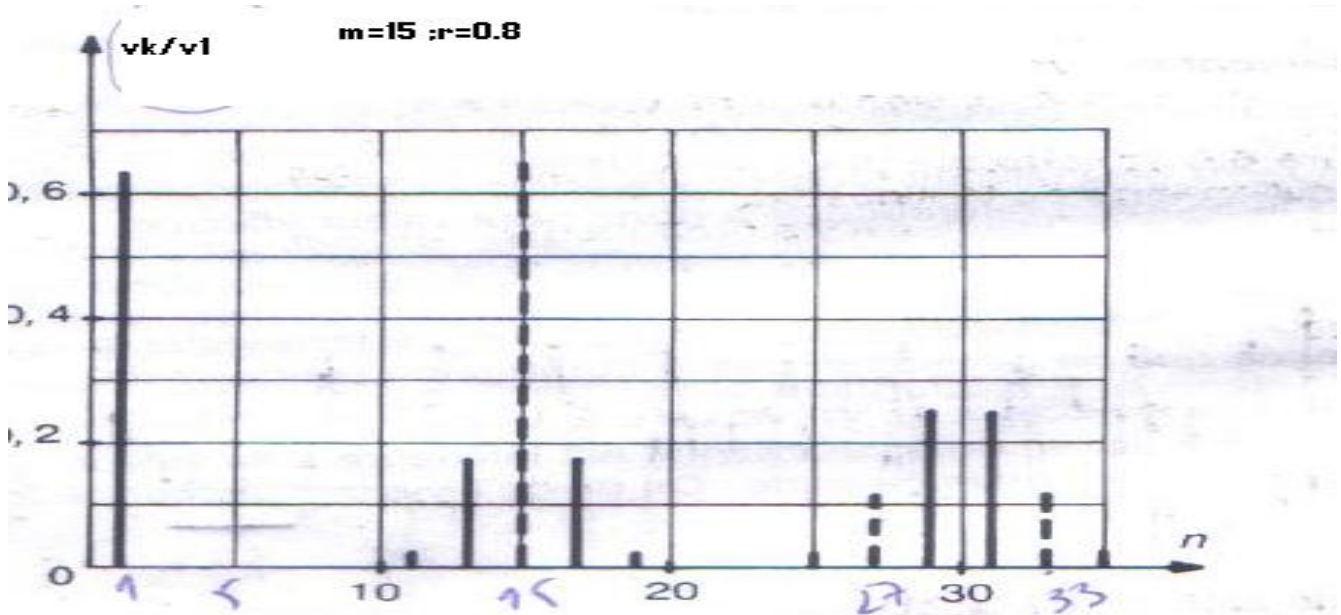
$$V_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot r \cdot \frac{E}{2}$$

Avec :

$$r = \frac{V_{réfmax}}{V_{pmax}}$$

A tension d'alimentation E donnée la MLI permet la variation de la valeur efficace de la tension de sortie, ce qui pas le cas en commande pleine onde.

**Spectre des tensions simples :**



**Il comporte 3 familles :**

- La première famille : concentrée sur m.F est comprend : mF ;(m-2) F, (m+2) F, (m+4) F et (m-4)F
- La seconde famille : concentrée sur 2mF comprend : 2m+-1 ,2m+-3 ...
- La troisième famille : concentrée sur 3mF comprend : 3m+-2, 3m+-4 ...

**Remarque :**

Ce type de commande facilite le filtrage des tensions, mais les interrupteurs doivent supporter la fréquence de commutation.

**Modulation calculée :** Au lieu de déterminer les angles de commutation à temps réel, on peut les calculer au préalable les mémoriser et commander ensuite les interrupteurs par un système basé sur un microprocesseur ou microcontrôleur. [C'est le cas des variateurs industriels exemple : ALTIVAR]

Pour le calcul des valeurs efficaces des tensions simples et composées il faut connaître les angles de commutation : Exemple voir TD-ONDULEUR

**Pour les courbes : les interrupteurs K4-K5-K6 notés K1'-K2'-K3'**



Courbes pour : m=6

