

# *Chapitre II*

## *Convertisseurs continu - alternatif*

## II.1 Introduction

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet une conversion de la grandeur d'entrée continue, en grandeur de sortie alternative. Il est autonome lorsqu'il impose sa propre fréquence à la charge (fréquence est indépendante de la sortie).

Il est construit des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture:

- transistor
- thyristor avec un circuit d'extinction du courant

contrairement à l'onduleur assisté qui peut être construit de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est naturelle.

Un interrupteur électronique est généralement unidirectionnel, pour permettre au courant de circuler dans le deux sens on place une diode en *antiparallèle*.

Les onduleurs peuvent être monophasés ou triphasés suivant l'application désirée. Pour chacun d'eux, on distingue :

- **les onduleurs de courant:** la source d'entrée est une source de courant, la source de sortie est une source de tension.
- **les onduleurs de tension:** la source d'entrée est une source de tension, la source de sortie est une source de courant.

On se propose dans ce chapitre d'étudier les onduleurs autonomes. Ces derniers fixent eux-mêmes la fréquence et la valeur efficace de leur tension de sortie.

## II.2 Onduleur de tension monophasé

### II.2.1 Onduleur à point milieu (à deux interrupteurs)

#### II.2.1.1 Charge résistive

Pour obtenir une tension alternative, la tension aux bornes de la charge doit prendre successivement les valeurs  $+E$  et  $-E$  pendant des durées égales et de façon périodique. Pour cela,  $K_1$  et  $K_2$  sont commandés à la fermeture et à l'ouverture. Il existe plusieurs types de commande; (commande symétrique, commande décalée.....).

Chaque interrupteur est formé d'un transistor et une diode en antiparallèle comme le montre la figure (2.2).

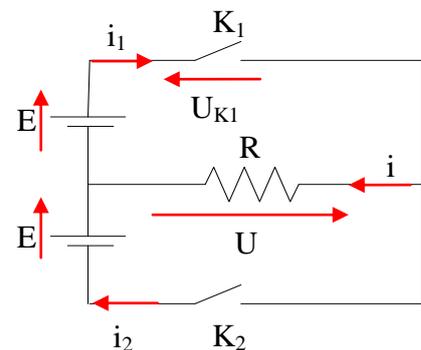


Figure 2.1: Onduleur de tension monophasé à point milieu (Charge résistive)

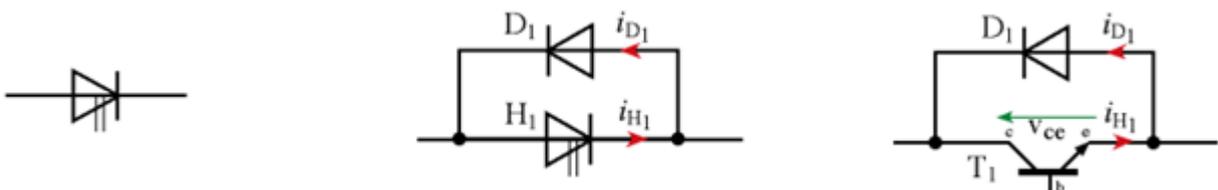


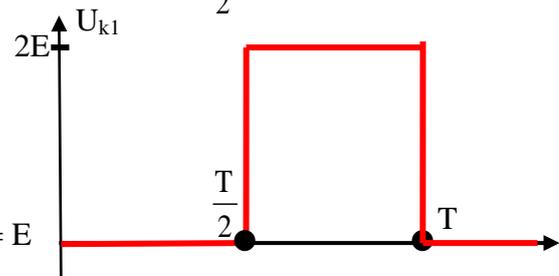
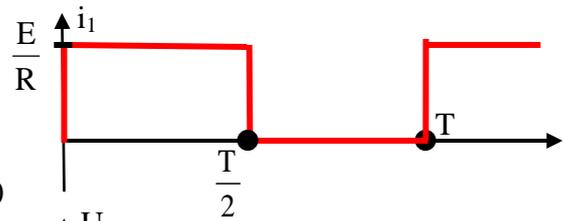
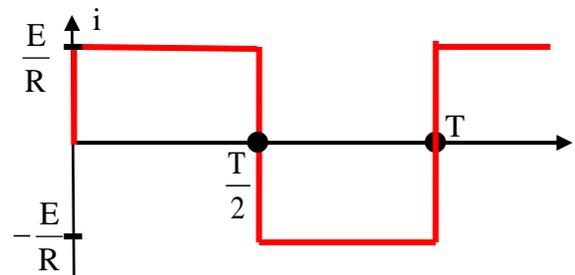
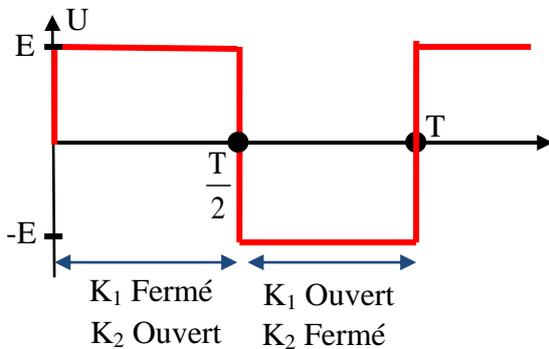
Figure 2.2: Interrupteurs électroniques

#### II.2.1.1.1 Commande symétrique

Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  durant des intervalles de temps réguliers.

a) Analyse du fonctionnement

	$\left(0 \rightarrow \frac{T}{2}\right)$	$\left(\frac{T}{2} \rightarrow T\right)$
$K_1$	Fermé	Ouvert
$K_2$	Ouvert	Fermé
$U$	$E$	$-E$
$U_{K1}$	$0$	$2E$
$I$	$\frac{E}{R}$	$-\frac{E}{R}$
$i_{K1}$	$\frac{E}{R}$	$0$



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T -E dt = 0$$

$$i_{\text{moy}} = 0$$

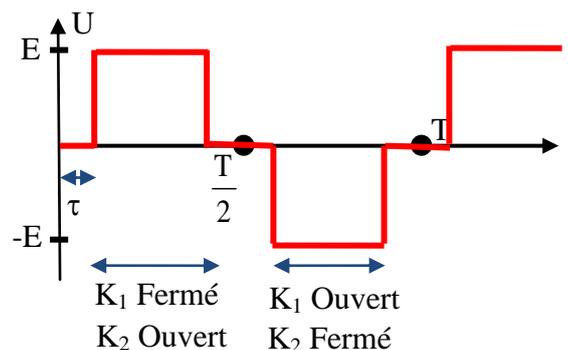
c) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T E^2 dt} = E$$

II.2.1.1.2 Commande décalée

La commande de  $K_1$  et  $K_2$  est décalée par  $\tau$  (par rapport à la commande précédente).

L'idéal serait d'obtenir une tension de sortie  $U$  de forme sinusoïdale. La commande décalée fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que la commande précédente.



a) Analyse du fonctionnement

	$(0 \rightarrow \tau)$	$(\tau \rightarrow \frac{T}{2} - \tau)$	$(\frac{T}{2} - \tau \rightarrow \frac{T}{2} + \tau)$	$(\frac{T}{2} + \tau \rightarrow T - \tau)$
$K_1$	Ouvert	Fermé	Ouvert	Ouvert
$K_2$	Ouvert	Ouvert	Ouvert	Fermé
$U$	0	E	0	-E

b) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\frac{T}{2}-\tau} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}+\tau}^{T-\tau} E^2 dt} = E \sqrt{1 - \frac{2\tau}{T}}$$

II.2.1.2 Charge résistive et inductive

II.2.1.2.1 Commande symétrique

La charge résistive est remplacée par une charge à caractère inductif composée d'une résistance R et d'une inductance L, figure (2.3).

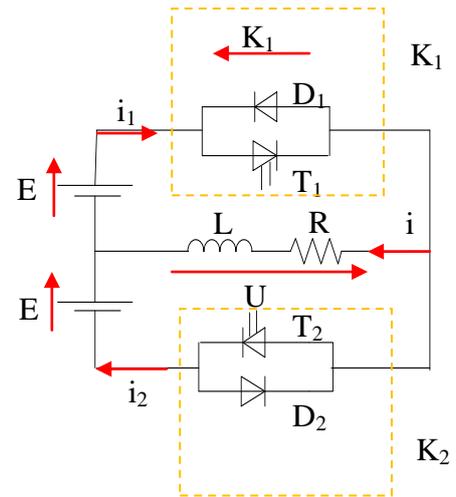
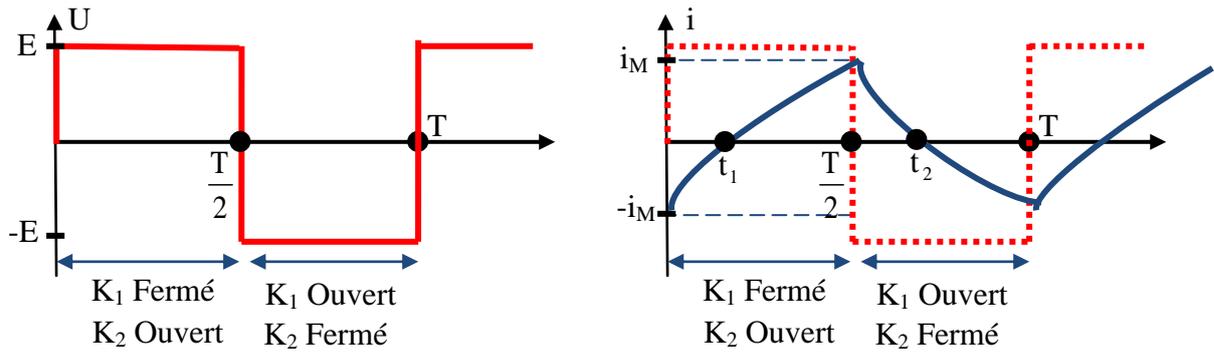


Figure 2.3: Onduleur de tension monophasé à point milieu (Charge résistive et inductive)

a) Analyse du fonctionnement

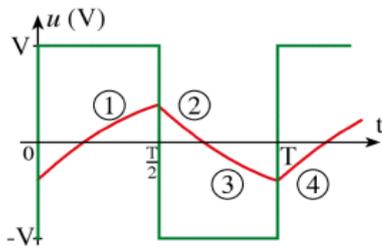
	$(0 \rightarrow t_1)$	$(t_1 \rightarrow \frac{T}{2})$	$(\frac{T}{2} \rightarrow t_2)$	$(t_2 \rightarrow T)$
$K_1$	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
$K_2$	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé
$T_1$	Bloqué	passant	bloqué	bloqué
$D_1$	Passante	bloquée	bloquée	bloquée
$T_2$	Bloqué	bloqué	bloqué	passant
$D_2$	Bloquée	bloquée	passante	bloquée
$U$	E	E	-E	-E
$I$	$E = Ri + \frac{Ldi}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R}$ $i = \left(-i_M - \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R}$		$-E = Ri + \frac{Ldi}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E}{R}$ $i = \left(i_M + \frac{E}{R}e^{\frac{T}{2\tau}}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{E}{R}$	

On suppose à  $t=0$ ,  $i(0)=-i_M$  et  $t=\frac{T}{2}$ ,  $i(\frac{T}{2})=i_M$



On constate un échange d'énergie entre la source et la charge dans les deux sens. En effet, une partie de l'énergie fourni à la charge est stockée dans l'inductance puis restituée à la source : on dit qu'il y a récupération d'énergie.

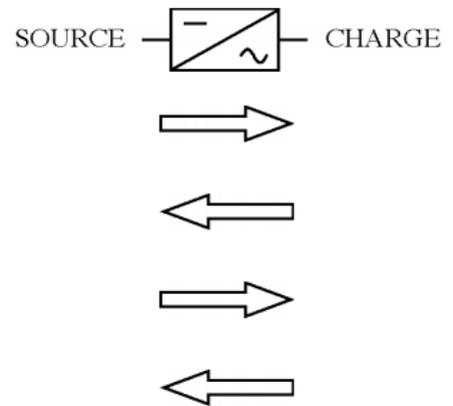
**Chronogrammes :**



**Analyse :**

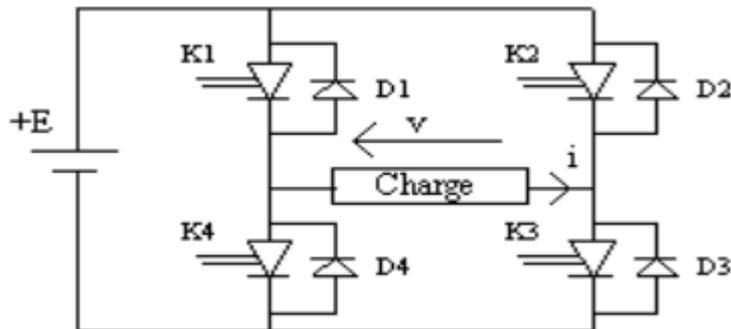
- ①  $u > 0$   
 $i > 0$
- ②  $u < 0$   
 $i > 0$
- ③  $u < 0$   
 $i < 0$
- ④  $u > 0$   
 $i < 0$

**Sens du transfert d'énergie :**

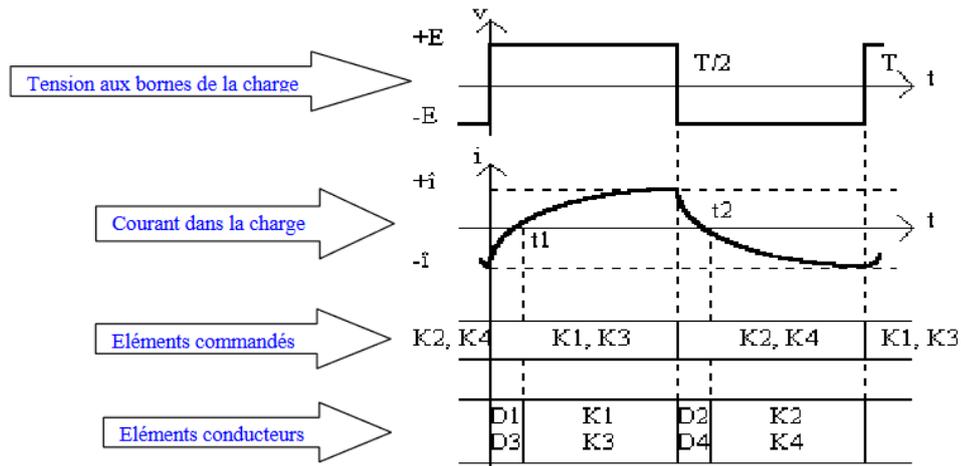


**II.2.2 Onduleur en pont (4 interrupteurs)**

L'onduleur en pont est formé de quatre interrupteurs montés en pont de Grätz. Les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. Chaque interrupteur est formé d'un composant commandable et d'une diode en antiparallèle.



**II.2.2.1 Commande symétrique sur charge R, L**



a) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T -E dt = 0$$

$$i_{\text{moy}} = 0$$

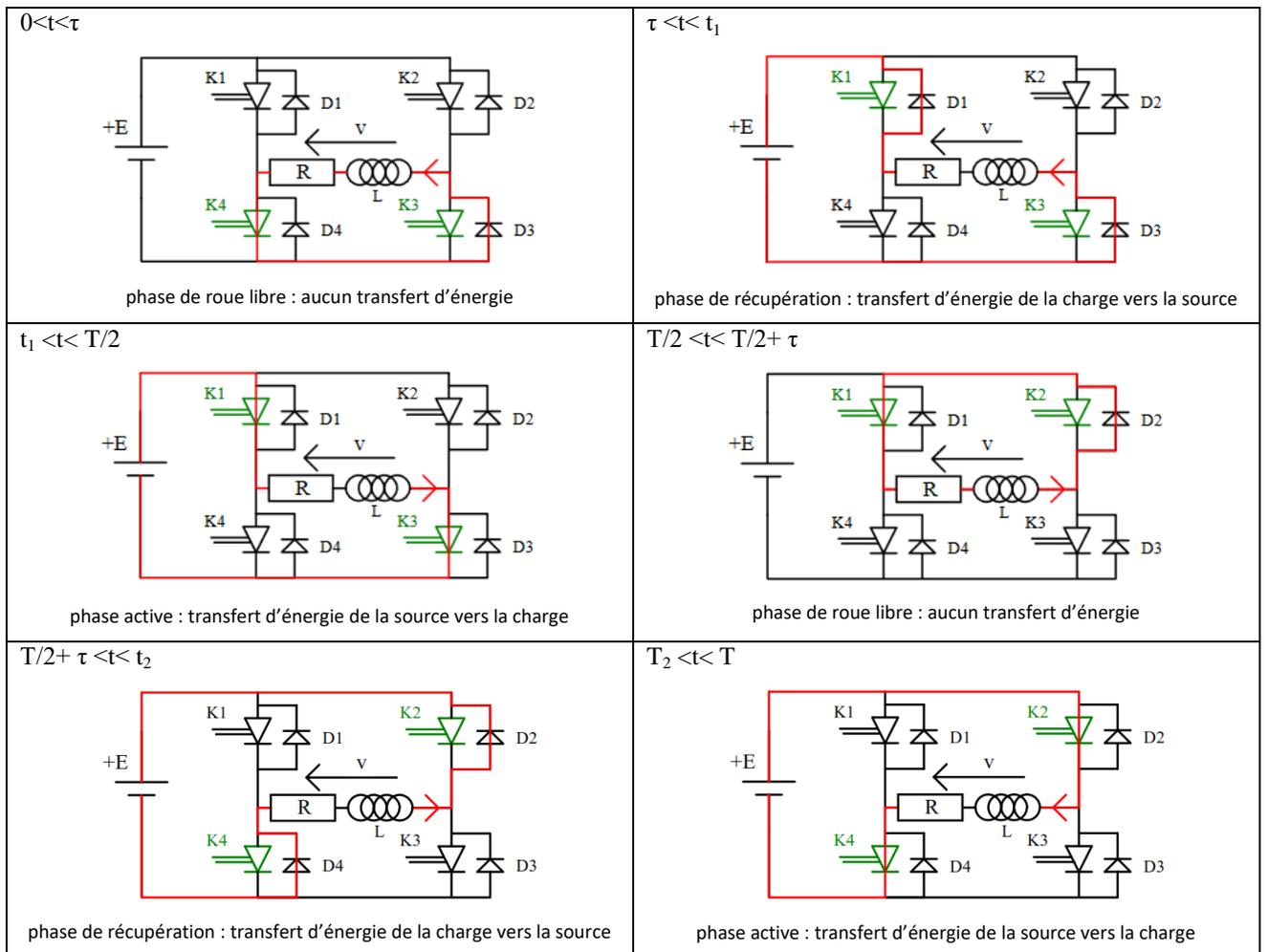
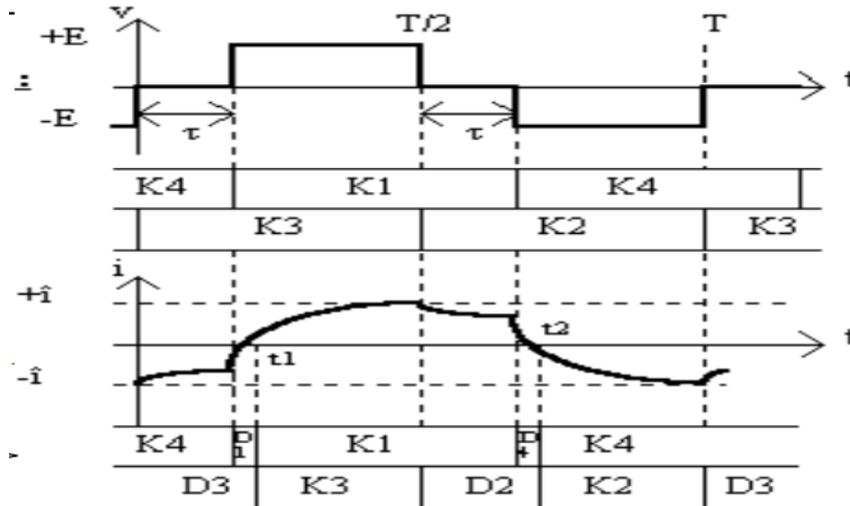
b) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T E^2 dt} = E$$

	$(0 \rightarrow t_1)$	$(t_1 \rightarrow \frac{T}{2})$	$(\frac{T}{2} \rightarrow t_2)$	$(t_2 \rightarrow T)$
K <sub>1</sub> et K <sub>3</sub>	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
K <sub>2</sub> et K <sub>4</sub>	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé
T <sub>1</sub> et T <sub>3</sub>	bloqué	passant	bloqué	bloqué
D <sub>1</sub> et D <sub>3</sub>	passante	bloquée	bloquée	bloquée
T <sub>2</sub> et T <sub>4</sub>	bloqué	bloqué	bloqué	passant
D <sub>2</sub> et D <sub>4</sub>	bloquée	bloquée	passante	bloquée
U	E	E	-E	-E
I	$E = Ri + \frac{L di}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R}$ $i = \left(-i_M - \frac{E}{R}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R}$		$-E = Ri + \frac{L di}{dt} \Rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E}{R}$ $i = \left(i_M + \frac{E}{R}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{E}{R}$	

On suppose à  $t=0$ ,  $i(0)=-i_M$  et  $t=\frac{T}{2}$ ,  $i(\frac{T}{2})=i_M$

II.2.2.2 Commande décalée sur charge R, L

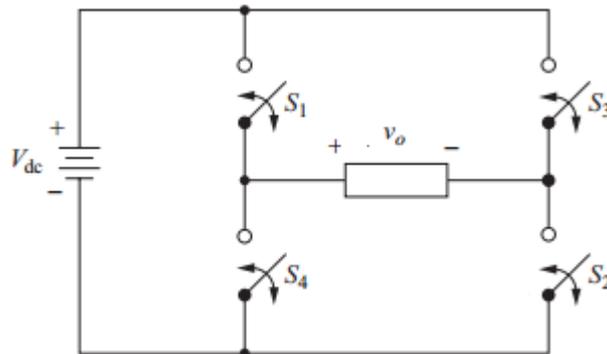


II.2.2.3 Commande MLI

La technique de la MLI naturelle repose sur la comparaison entre deux signaux :  
 une onde sinusoïdale dite onde de modulation ou référence et une onde triangulaire de haute fréquence dite porteuse.

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de réduire le taux de distorsion harmonique (abrégé THD, total harmonic distortion en anglais)

Dans l'étude des onduleurs, l'analyse des Harmoniques qui consiste à exprimer la tension de sortie et le courant de charge en termes d'une série de Fourier, est très utile.

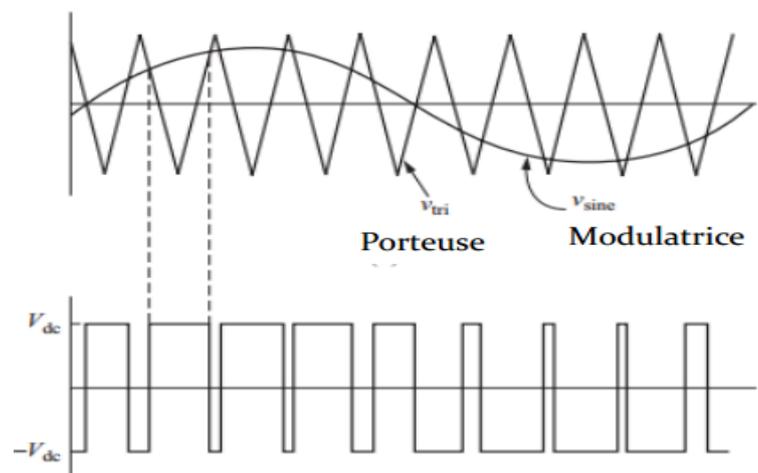


### MLI sinus-triangulaire bipolaire

La tension de sortie de l'onduleur est donnée par:

$$\text{si } v_{\text{sine}} > v_{\text{tri}} \quad v_o = +V_{\text{dc}}$$

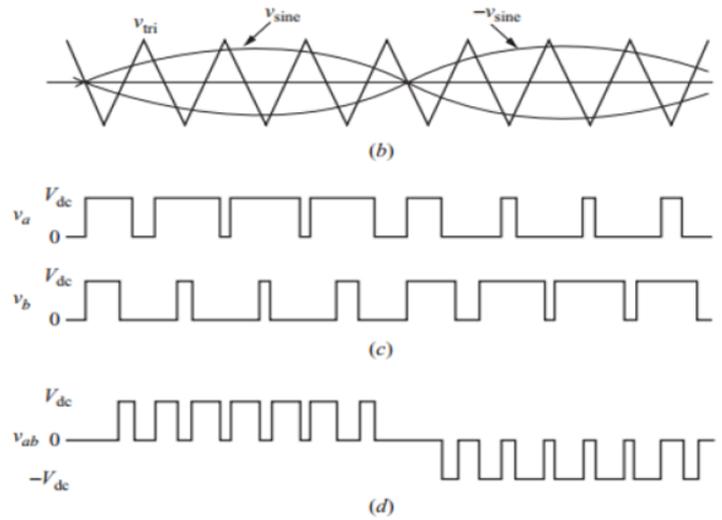
$$\text{si } v_{\text{sine}} < v_{\text{tri}} \quad v_o = -V_{\text{dc}}$$



### MLI sinus-triangle unipolaire

La tension de sortie dans ce cas prend les valeurs zéro et  $+V_{\text{dc}}$  pendant l'alternance positive et zéro  $-V_{\text{dc}}$  pendant l'alternance négative. Les états des interrupteurs sont donnés comme suit:

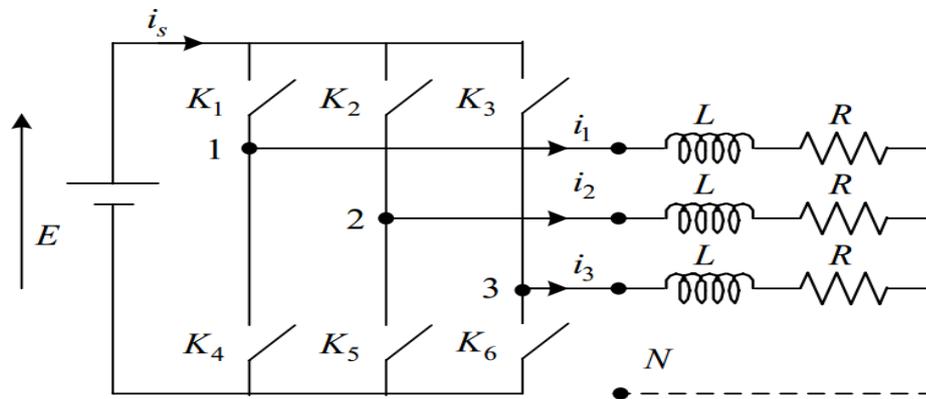
Interrupteurs ON	comparaison
S1	$V_{sine} > V_{tri}$
S2	$-V_{sine} < V_{tri}$
S3	$-V_{sine} > V_{tri}$
S4	$V_{sine} < V_{tri}$



### II.3 Onduleur de tension triphasé

Un onduleur triphasé autonome est composé de trois bras, il peut alimenter des charges triphasées équilibrées qui sont groupées en étoile ou en triangle. Il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. Les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires.

La figure ci-après montre le schéma d'un onduleur triphasé avec sa charge:



Chaque interrupteur de puissance est en réalité réalisé par un transistor en antiparallèle avec une diode. Pour des puissances plus élevées, on peut remplacer les six transistors par des thyristors nécessitant des circuits d'extinction de courant.

**Types de commande:** Commande 180°, Commande 120°, Commande MLI

**Commande 180°:** Chaque interrupteur conduit pendant 180 °.

Il y'a 6 séquences différentes dont la durée de chacune est 60° pendant une période

À chaque instant trois interrupteurs sont à l'état ON

La tension composée prend les valeurs  $\pm E$  ou la valeur zéro

La tension simple prend les valeurs  $\pm 2E/3$  ou  $\pm E/3$

Les tensions composées s'écrivent :

$$\begin{cases} U_{12} = V_1 - V_2 \\ U_{23} = V_2 - V_3 \\ U_{31} = V_3 - V_1 \end{cases}$$

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors :

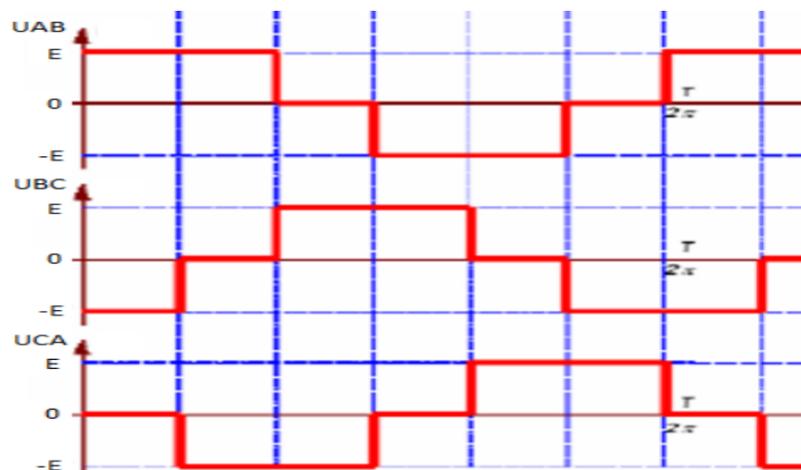
$$V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

Alors, on peut déduire les tensions simples comme suit :

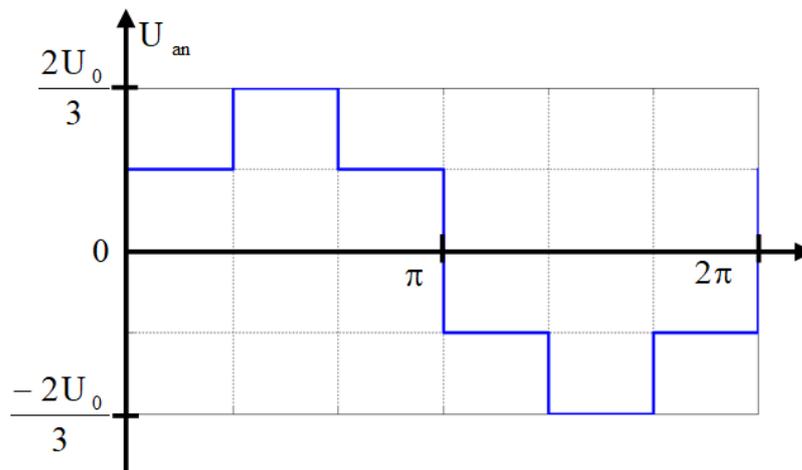
$$\begin{cases} V_1 = \frac{U_{12} - U_{31}}{3} \\ V_2 = \frac{U_{23} - U_{12}}{3} \\ V_3 = \frac{U_{31} - U_{23}}{3} \end{cases}$$

On va se limiter à l'étude seulement de la commande en pleine onde ( $180^\circ$ ), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit:

- ✓  $K_1$  est fermé pour:  $0 < \omega t < \pi$  et  $K_4$  est fermé pour:  $\pi < \omega t < 2\pi$ ,
- ✓  $K_2$  est fermé pour:  $\frac{2\pi}{3} < \omega t < \frac{2\pi}{3} + \pi$  et  $K_5$  est fermé pour:  $\frac{2\pi}{3} + \pi < \omega t < \frac{2\pi}{3} + 2\pi$ ,
- ✓  $K_3$  est fermé pour:  $\frac{4\pi}{3} < \omega t < \frac{4\pi}{3} + \pi$  et  $K_6$  est fermé pour:  $\frac{4\pi}{3} + \pi < \omega t < \frac{4\pi}{3} + 2\pi$ .



À partir des tensions composées, on trace les tensions simples



La valeur moyenne :  $U_{an} = 0$

La valeur efficace :  $U_{an} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_0$

**TD 2****Exercice 1**

Le schéma suivant représente le modèle simplifié d'une partie de l'onduleur :

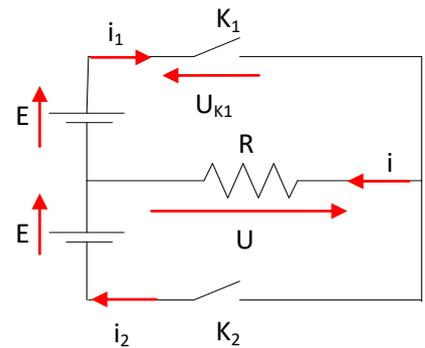
$E = 127 \text{ V}$ .  $K_1$  et  $K_2$  sont des interrupteurs parfaits.

Entre 0 et  $T/2$  :  $K_1$  fermé et  $K_2$  ouvert.

Entre  $T/2$  et  $T$  :  $K_1$  ouvert et  $K_2$  fermé.

La charge est résistive.  $T$  désigne la période de fonctionnement des interrupteurs.

1. Quel type de conversion de l'énergie électrique effectue un onduleur ?
2. Quelle est la valeur de  $U(t)$  quand  $K_1$  est fermé et que  $K_2$  est ouvert ?
3. Quelle est la valeur de  $U(t)$  quand  $K_2$  est fermé et que  $K_1$  est ouvert ?
4. Représenter l'évolution de la tension  $U(t)$ .
5. Quelle est la valeur efficace de  $U(t)$  ?

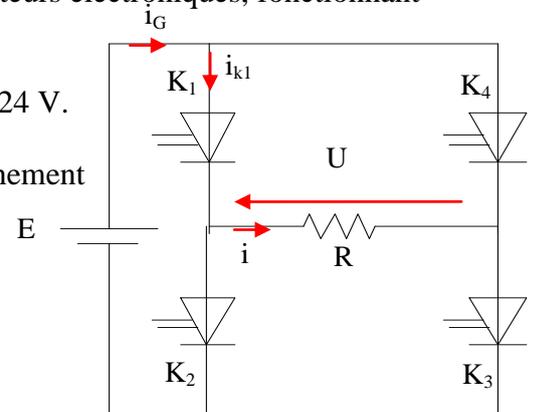
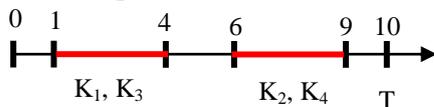
**Exercice 2**

On réalise le montage suivant en utilisant quatre interrupteurs électroniques, fonctionnant deux par deux :

Le générateur de tension continue a une f.e.m.  $E$  égale à  $24 \text{ V}$ .

La charge est une résistance de valeur  $R = 100 \Omega$ . Le fonctionnement

des interrupteurs est résumé sur le diagramme ci-dessous :



Les interrupteurs sont supposés parfaits.

1. Représenter les chronogrammes:
  - de la tension  $U$  aux bornes de la charge, des courants  $i$ ,  $i_{K1}$  et  $i_G$ .
2. Calculer la valeur efficace de la tension  $U(t)$ .

En déduire la valeur efficace du courant  $i$  et la puissance reçue par la charge.

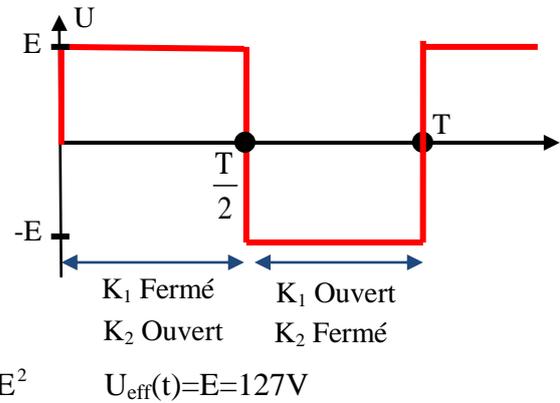
3. Calculer la valeur moyenne du courant débité par le générateur.

En déduire la puissance fournie par le générateur et le rendement de l'onduleur. Commentaire ?

**TD 2 corrigé**

**Corrigé 1**

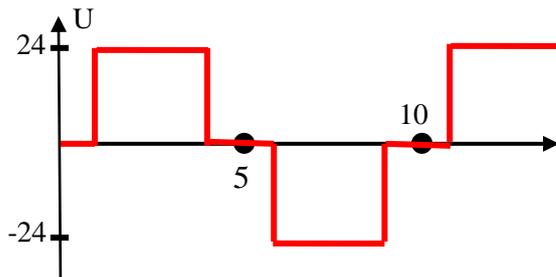
- 1) continu-alternatif
- 2)  $U(t)=E$
- 3)  $U(t)=-E$
- 4)  $U(t)$
- 5) Valeur efficace



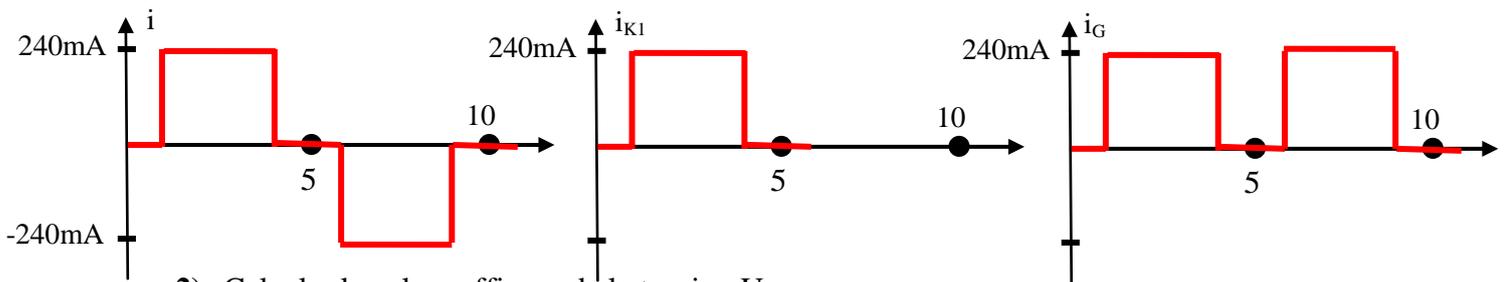
$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T E^2 dt = E^2$$

**Corrigé 2**

- 1) Représenter les chronogrammes:
  - de la tension  $U$  aux bornes de la charge



- des courants  $i$ ,  $i_{K1}$  et  $i_G$ .



- 2) Calculer la valeur efficace de la tension  $U$

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\tau}^{\frac{T}{2}-\tau} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}+\tau}^{T-\tau} E^2 dt} = E \sqrt{1 - \frac{2\tau}{T}} = 24 \sqrt{1 - \frac{2}{5}} = 18.6V$$

- En déduire la valeur efficace du courant  $i$  et la puissance reçue par la charge

$$i_{\text{eff}} = \frac{U}{R} = 186mA \Rightarrow Ri_{\text{eff}}^2 = 3.46W$$

3) Calculer la valeur moyenne du courant débité par le générateur

$$i_{Gmoy} = \frac{240 * 3}{5} = 144 \text{mA}$$

- En déduire la puissance fournie par le générateur et le rendement de l'onduleur

$$E * i_{Gmoy} = 3.46 \text{W}$$

Rendement : 100%

- Commentaire ?

Le rendement est de 100 % car les interrupteurs sont supposés parfaits (ce qui n'est évidemment pas le cas en pratique).