

Chapitre V

*Convertisseurs courant continu -
courant 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.....).

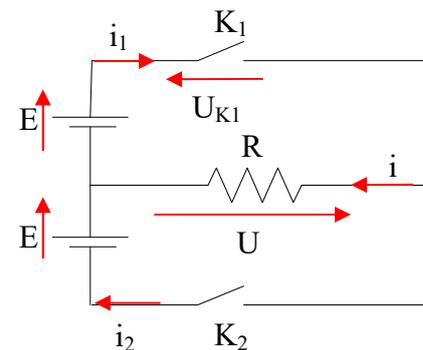


Figure 2.1: Onduleur de tension monophasé à point milieu (Charge résistive)

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

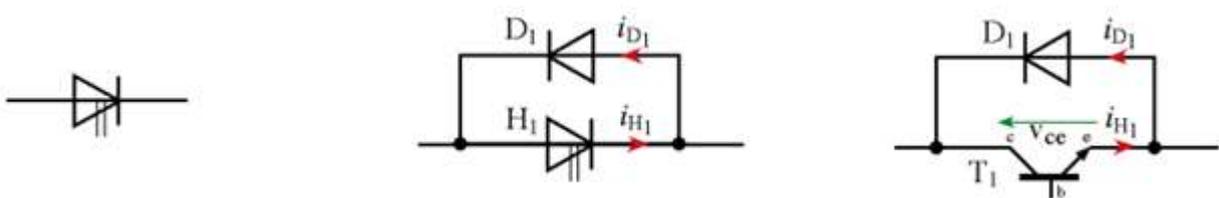


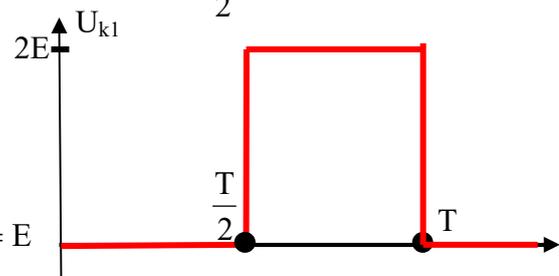
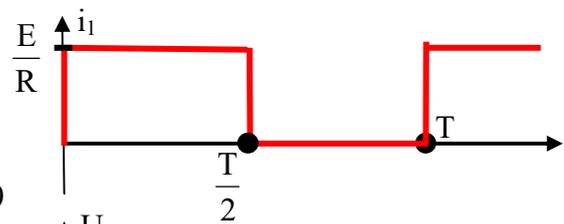
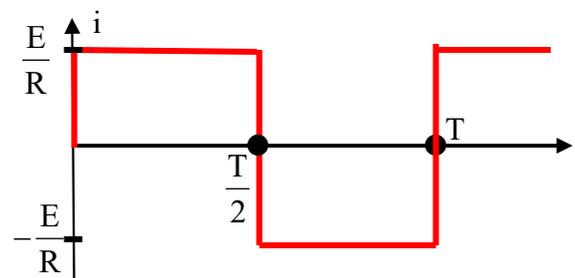
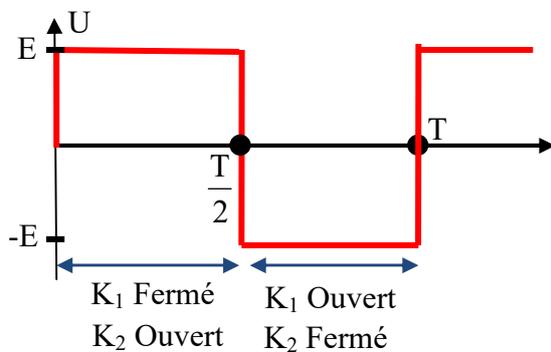
Figure 2.2: Interrupteurs électroniques

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

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

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

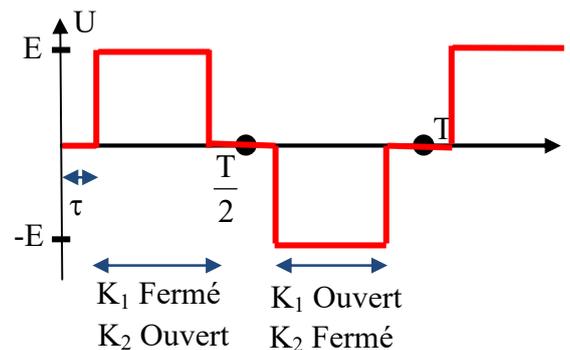
c) Valeur efficace

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

II.2.1.1.2 Commande décalée

La commande de K_1 et K_2 est décalée par τ (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).

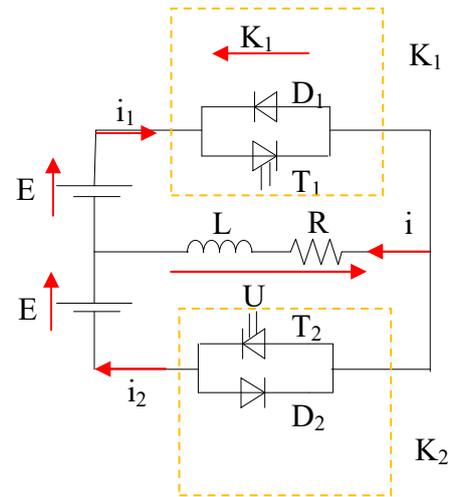
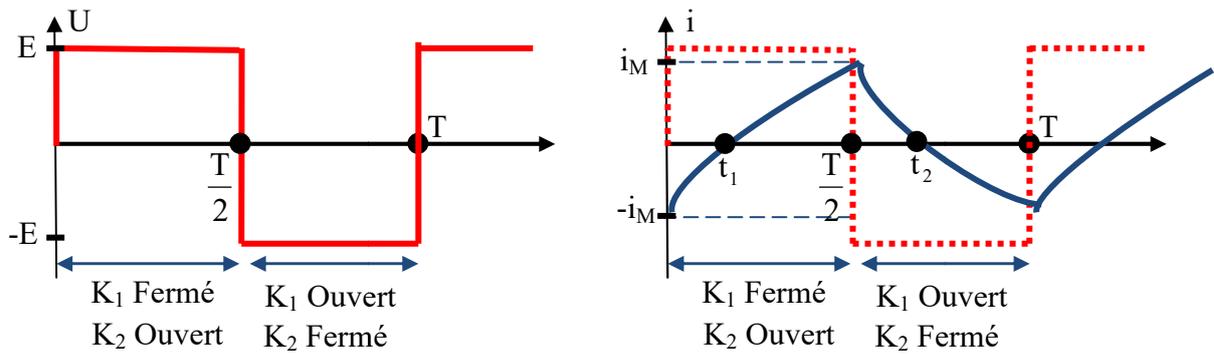


Figure 2.3: Onduleur de tension monophasé à point milieu (Charge résistive et inductive)

a) Analyse du fonctionnement

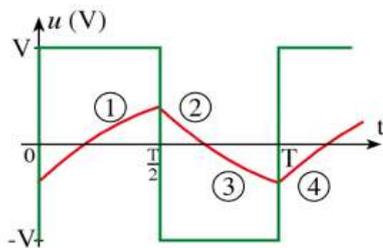
	$(0 \rightarrow t_1)$	$(t_1 \rightarrow \frac{T}{2})$	$(\frac{T}{2} \rightarrow t_2)$	$(t_2 \rightarrow T)$
K_1	Fermé	Fermé	Ouvert	Ouvert
K_2	Ouvert	Ouvert	Fermé	Fermé
T_1	Bloqué	passant	bloqué	bloqué
D_1	Passante	bloquée	bloquée	bloquée
T_2	Bloqué	bloqué	bloqué	passant
D_2	Bloquée	bloquée	passante	bloquée
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.

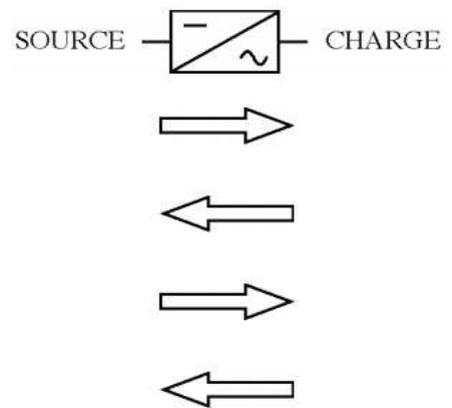
Chronogrammes :



Analyse :

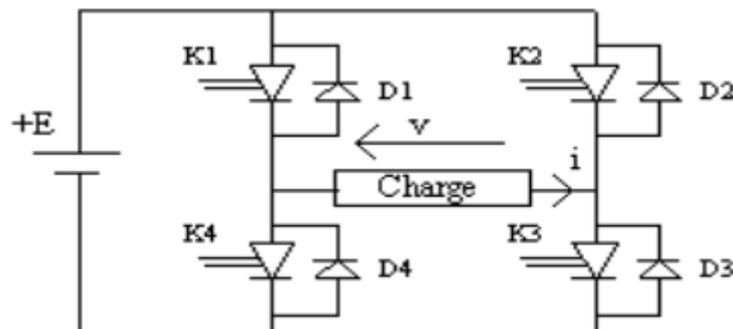
- ① $u > 0$
 $i > 0$
- ② $u < 0$
 $i > 0$
- ③ $u < 0$
 $i < 0$
- ④ $u > 0$
 $i < 0$

Sens du transfert d'énergie :

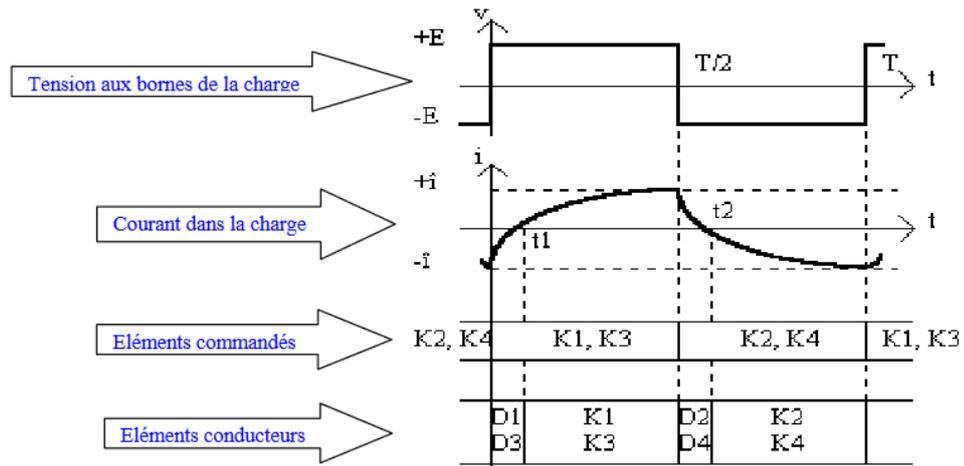


II.2.2 Onduleur en pont (4 interrupteurs)

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

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

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

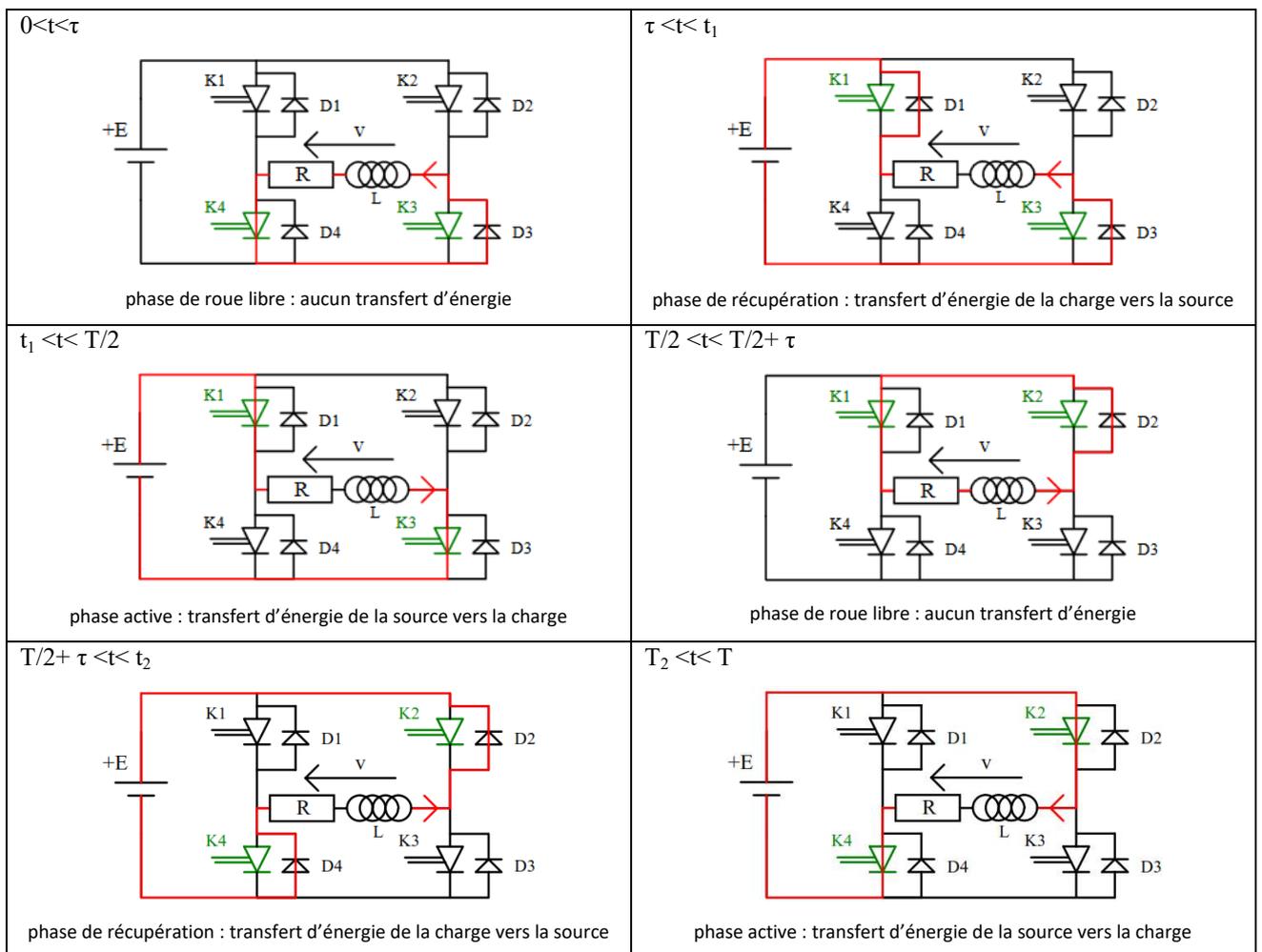
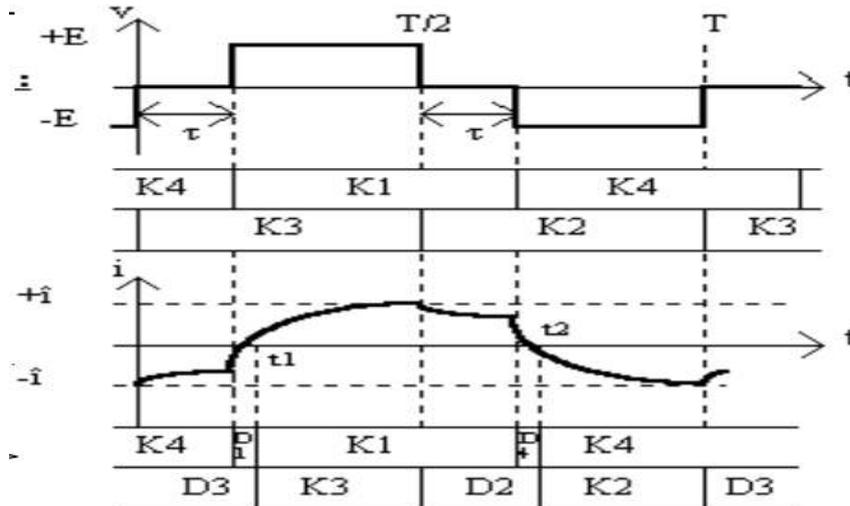
b) Valeur efficace

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

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

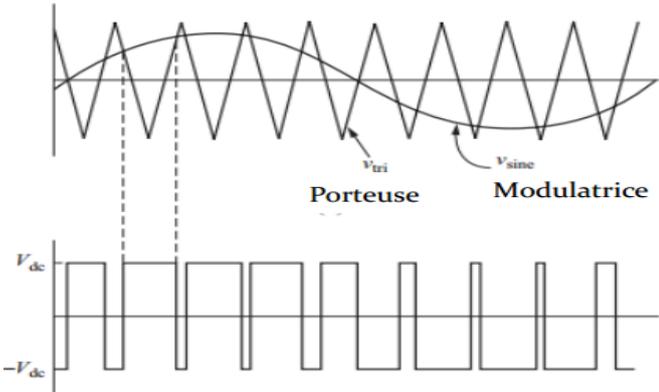
On suppose à $t=0$, $i(0)=-i_M$ et $t=\frac{T}{2}$, $i(\frac{T}{2})=i_M$

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.



TD Onduleurs**Exercice 1**

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

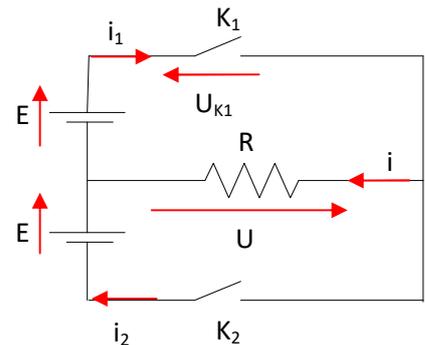
$E = 127 \text{ V}$. K_1 et K_2 sont des interrupteurs parfaits.

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 $U(t)$?

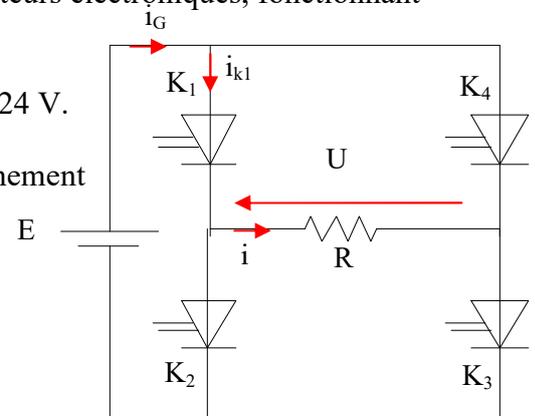
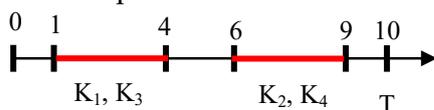
**Exercice 2**

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 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.

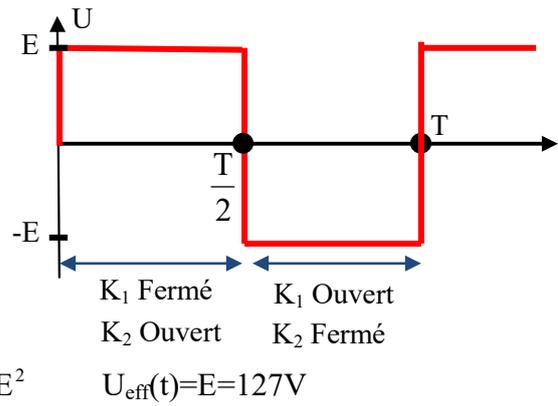
3. Calculer la valeur moyenne du courant débité par le générateur.

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

TD Onduleurs corrigé

Corrigé 1

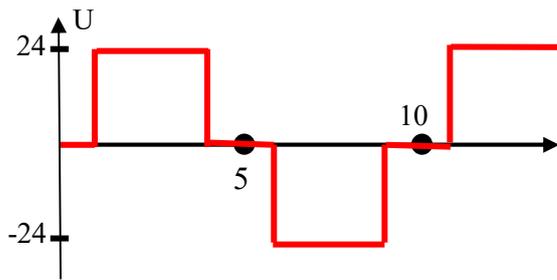
- 1) continu-alternatif
- 2) $U(t)=E$
- 3) $U(t)=-E$
- 4) $U(t)$
- 5) Valeur efficace



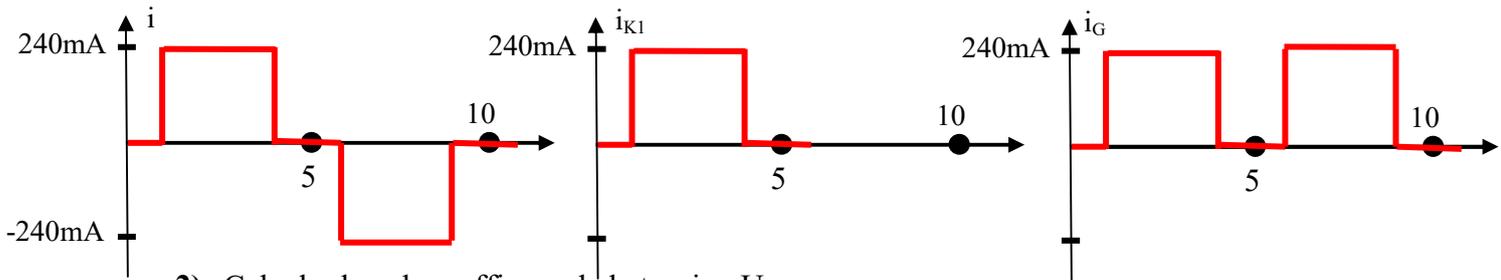
$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E^2 dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T E^2 dt = E^2$$

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

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

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

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

Rendement : 100%

- Commentaire ?

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