

1 Introduction

11. Nécessité de la conversion d'énergie

L'énergie électrique est fournie à une tension et à une fréquence **fixe**, il est souvent nécessaire d'agir sur ses paramètres afin de s'adapter au récepteur, cette possibilité est obtenue par des systèmes d'électronique de puissance.

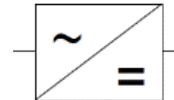
On nomme ce procédé **la modulation d'énergie**, elle est réalisée par des systèmes appelés **convertisseurs statiques**.

12. Classification des convertisseurs statiques

Tension d'entrée	Tension de sortie	Symbole	Fonction	Applications
Alternative	Continue		Redresseur à diodes Redresseur à thyristors	Variation de vitesse des MCC
	Alternative		Gradateur	Démarrage, variation de vitesse, variation éclairage, fours électriques
Continue	Alternative		Onduleur	Variation de vitesse des moteurs à courant alternatif et alimentation de sécurité.
	Continue		Hacheur	Variation de vitesse des MCC

2 Redresseurs

Les redresseurs assurent la conversion d'une tension alternative en une tension continue. Ils servent à alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.



21. Redresseurs à diodes (non commandés)

Dans ses redresseurs, l'élément commutateur utilisé est **la diode**.

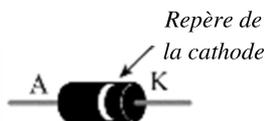
Diode

La diode est un dipôle passif polarisé.

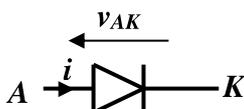
En électrotechnique, la diode est équivalente à un interrupteur unidirectionnel non commandé.

Caractéristique d'une diode parfaite

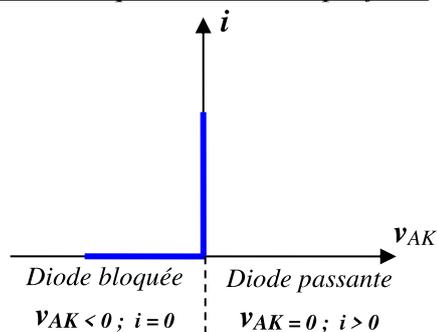
Aspect :



Symbole :



Jonction :



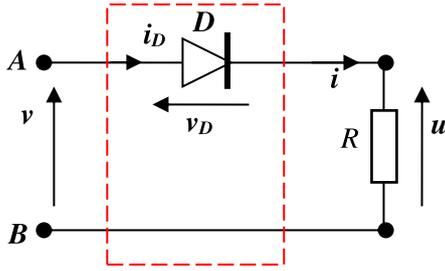
Diode se comporte comme un interrupteur **ouvert**.

Diode se comporte comme un interrupteur **fermé**.

Redressement monophasé

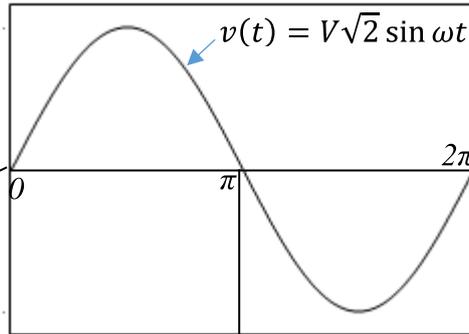
Redressement simple alternance (charge résistive)

Schéma :



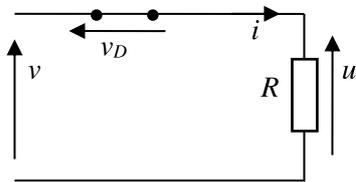
v est la tension d'entrée du pont.
 u est la tension de sortie.
 R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

D est passante (interrupteur fermé) $v_D = 0\text{ V}$

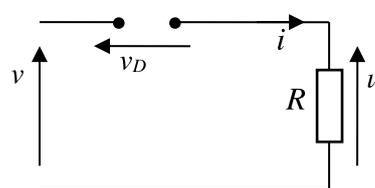


Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$ donc : $u = v$

$v_D = 0$	$i = \frac{u}{R}$
$u = v$	$i_D = i$

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

D se bloque (interrupteur ouvert) $i = 0$ et $u = 0\text{ V}$

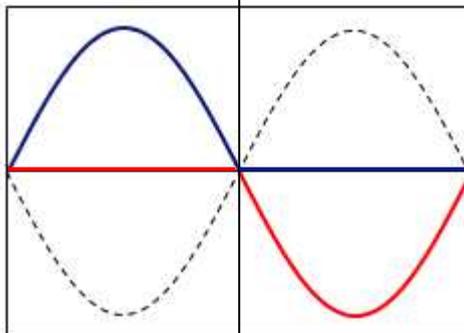


Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$ donc : $v_D = v$

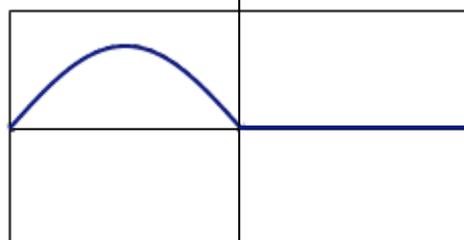
$i = 0$	$v_D = v$
$u = R \cdot i = 0$	$i_D = 0$

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en bleu
- $v_D(t)$ en rouge



Dessiner le courant $i(t)$
en bleu



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{S}{T} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi}$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = \sqrt{\frac{S^2}{T}} = \frac{V\sqrt{2}}{2}$$

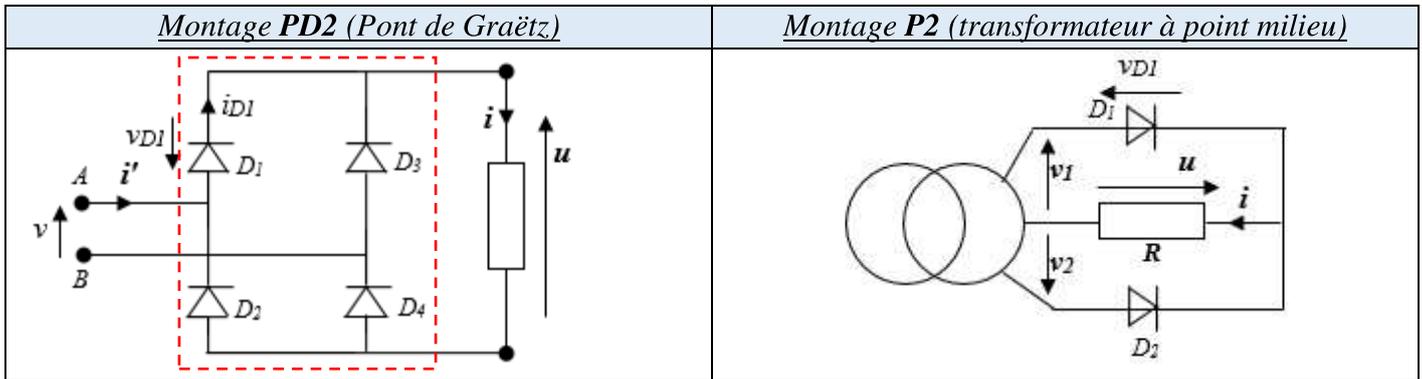
Courant moyen dans la diode :

$$\langle i_D \rangle = \langle i \rangle$$

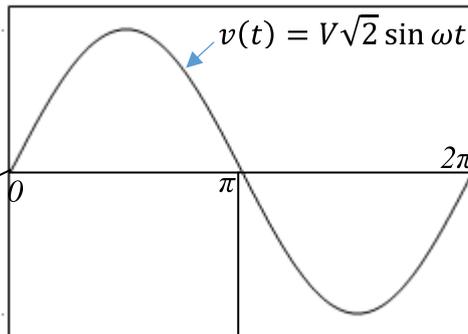
Tension maximale supportée par la diode :

$$v_{Dmax} = V\sqrt{2}$$

Redressement double alternance (charge résistive)



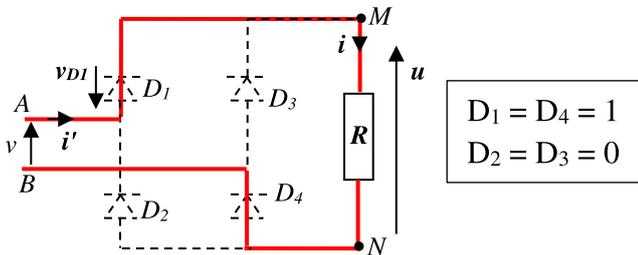
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le courant i circule la maille suivante :

$A \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow D_4 \rightarrow B$



$$u = v_M - v_N = v_A - v_B = v$$

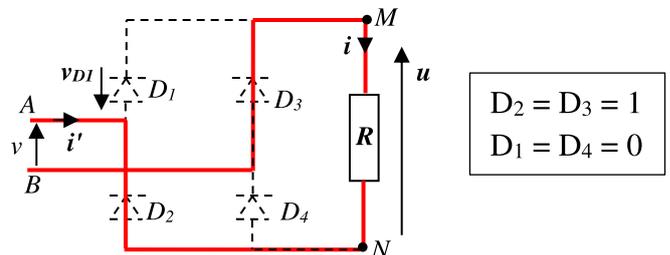
$$i = u/R = v/R \text{ et } i' = i$$

$$v_{D1} = 0 \text{ et } i_{D1} = i$$

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

Le courant i circule la maille suivante :

$B \rightarrow D_3 \rightarrow R \rightarrow D_2 \rightarrow A$



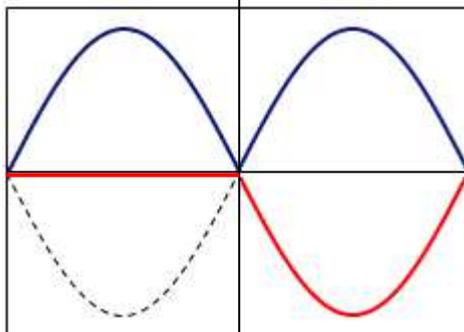
$$u = v_M - v_N = v_B - v_A = -v$$

$$i = u/R = -v/R \text{ et } i' = -i$$

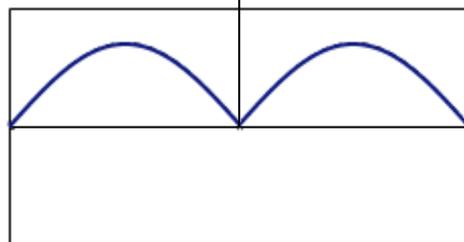
$$v_{D1} = v \text{ et } i_{D1} = 0$$

Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en bleu
- $v_{D1}(t)$ en rouge



Dessiner le courant $i(t)$
en bleu



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi}$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V$$

Courant moyen dans une diode :

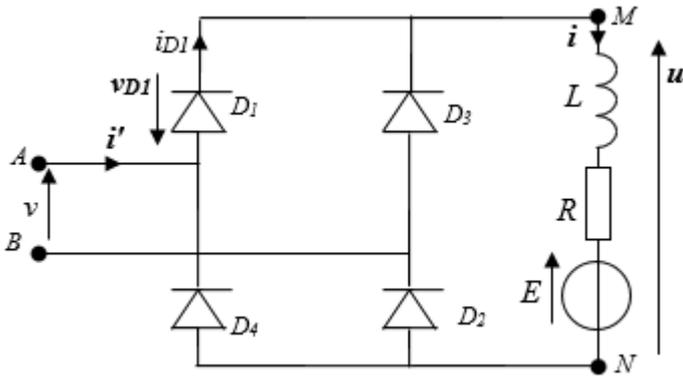
$$\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{2}$$

Tension maximale supportée par une diode :

PD2: $v_{Dmax} = V\sqrt{2}$

P2: $v_{Dmax} = 2V\sqrt{2}$

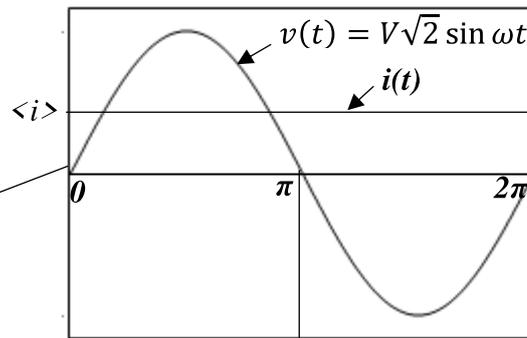
Redressement double alternance (charge R, L, E)



v : Tension d'entrée du montage.
 u : Tension de sortie.
 v_{D1} : Tension aux bornes de la diode D_1 .
 R : Résistance de la charge.
 L : Inductance de la charge.
 E : F.é.m. de la charge.
 i_{D1} : Courant traversant la diode D_1 .
 i' : courant alimentant le redresseur.

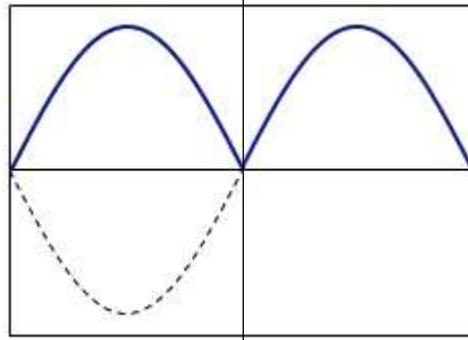
La charge R, L, E , représente un moteur à courant continu en série avec une inductance de lissage pour rendre le courant continu $i(t) = \langle i \rangle$.

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

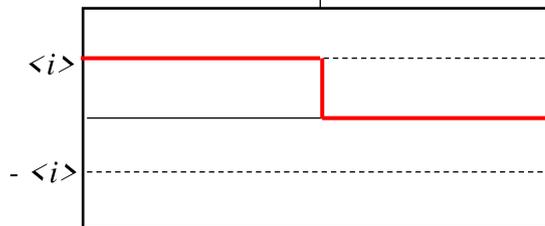


$0 < \theta < \pi$	$\pi < \theta < 2\pi$
$u = v$	$u = -v$
$i_{D1} = i = \langle i \rangle$	$i_{D1} = 0$
$i' = i = \langle i \rangle$	$i' = -i = -\langle i \rangle$

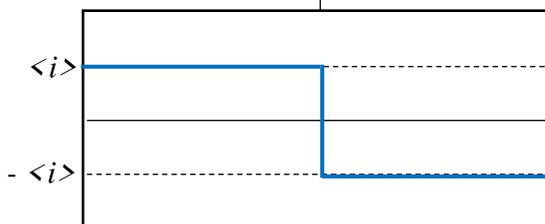
Dessiner la tension $u(t)$
en bleu



Dessiner le courant $i_{D1}(t)$
en rouge



Dessiner le courant $i'(t)$
en bleu



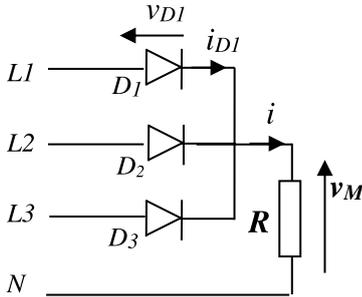
Redressement triphasé (charge résistive)

Lorsque la puissance demandée par le récepteur atteint une certaine valeur ($> 10 \text{ KW}$), il est intéressant de l'alimenter à partir du réseau triphasé.

Redressement simple alternance : Montage P3 à cathodes communes

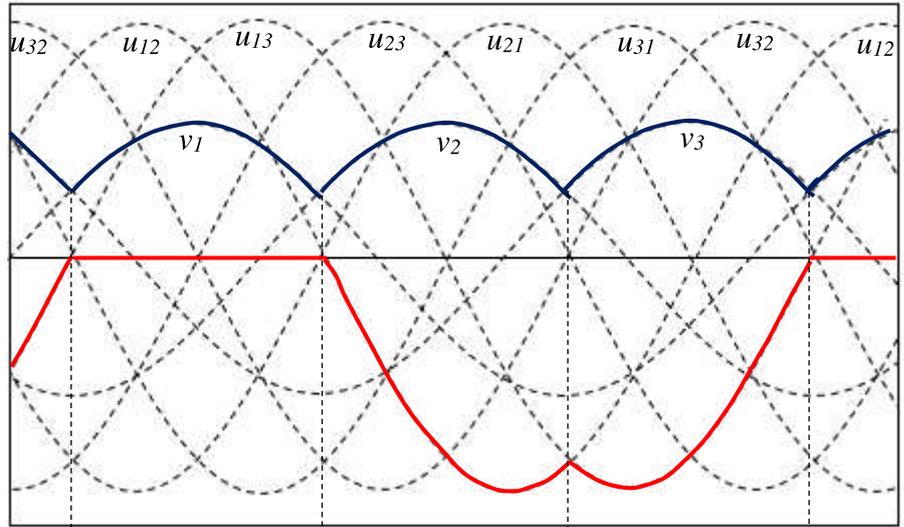
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $v_M(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



$v_M = v_1, v_2$ ou v_3 la plus positive à l'instant considéré :

v_M est constituée donc par les «calottes supérieures» des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .

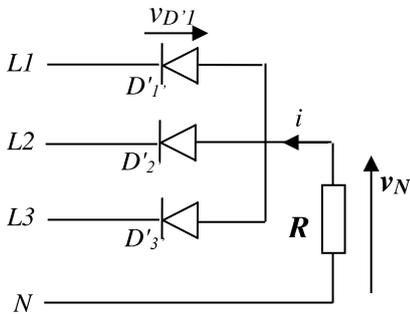


Tension v_M	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1
Diodes passantes	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1
Tension v_{D1}	u_{13}	0	$v_1 - v_2 = u_{12}$	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0

Redressement simple alternance : Montage P3 à anodes communes

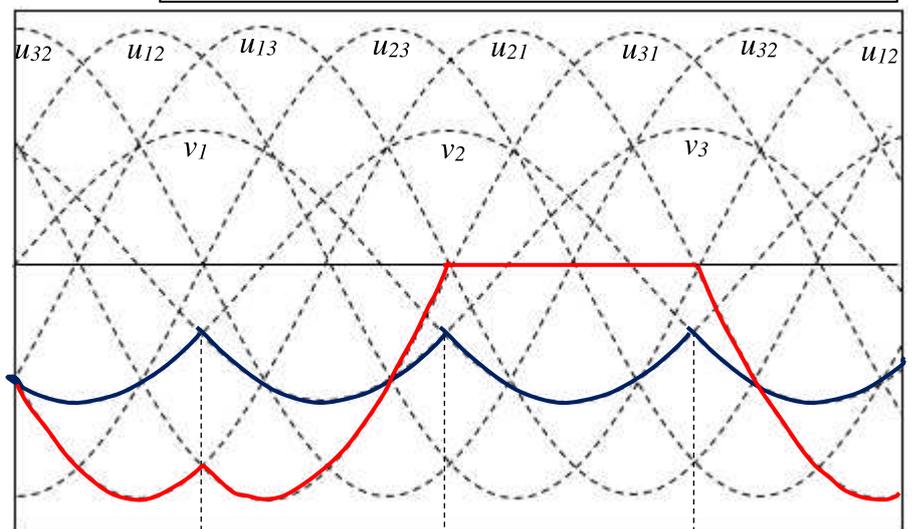
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $v_N(t)$ en bleu et $v_{D'1}(t)$ en rouge



$v_N = v_1, v_2$ ou v_3 la plus négative à l'instant considéré :

v_N est constituée donc par les «calottes inférieures» des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .



Tension v_N	v_2	v_3	v_1	v_2
Diodes passantes	D'_2	D'_3	D'_1	D'_2
Tension $v_{D'1}$	u_{21}	$v_3 - v_1 = u_{31}$	0	$v_2 - v_1 = u_{21}$

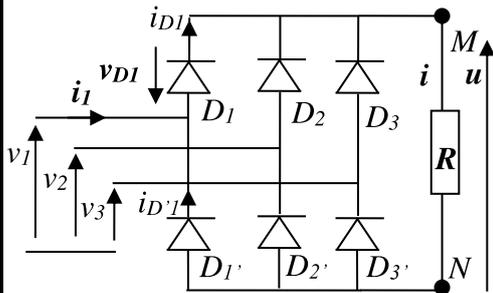
Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne des tensions v_M et v_N : $\langle v_M \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V\sqrt{2}$ $\langle v_N \rangle = -\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V\sqrt{2}$
- Courant moyen dans une diode : $\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{3}$
- Tension maximale supportée par une diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3}V\sqrt{2}$

Redressement double alternance : Montage PD3 (Pont de Graëtz triphasé)

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

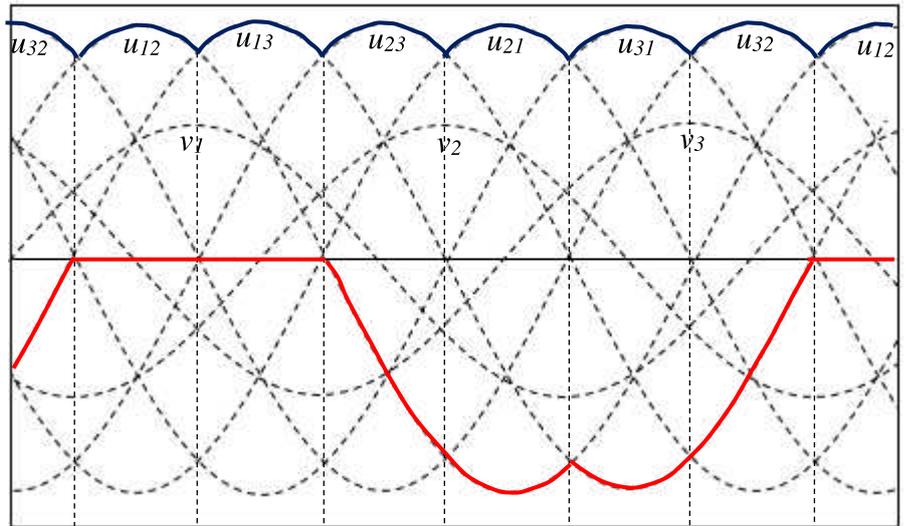
Dessiner les tensions $u(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



Le pont redresseur comporte:

- 3 diodes pour l'« aller »: D_1, D_2, D_3 ;
- 3 diodes pour le « retour »: D'_1, D'_2, D'_3 .

La tension $u = v_M - v_N$



Tension v_M	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1			
Diodes « aller »	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1			
Tension v_N	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3			
Diodes « retour »	D'_2	D'_3	D'_1	D'_2	D'_3			
Tension u	u_{32}	u_{12}	u_{13}	u_{23}	u_{21}	u_{31}	u_{32}	u_{12}
Tension v_{D1}	u_{13}	0	$v_1 - v_2 = u_{12}$	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0			

Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension $u(t)$: $\langle u \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V\sqrt{2}$
- Courant moyen dans une diode : $\langle i_D \rangle = \frac{\langle i \rangle}{3}$
- Tension maximale supportée par une diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3}V\sqrt{2}$

Remarque :

Pour une charge R, L, E , dont l'inductance L est suffisante, le courant i est considéré constant. La tension $u(t)$ a la même forme que le montage précédent (c.à.d. charge résistive).

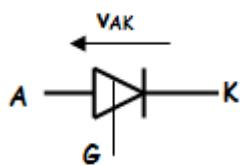
22. Redresseurs à thyristors (commandés)

L'intérêt du redressement commandé et qu'il permette de faire varier la tension moyenne en sortie du pont et donc de faire varier par exemple la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu.

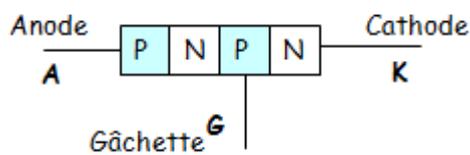


Thyristor

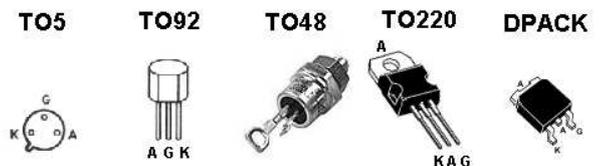
Aspect : Il comporte 3 broches. Il faut se référer à un catalogue pour connaître l'ordre du brochage.



Symbole



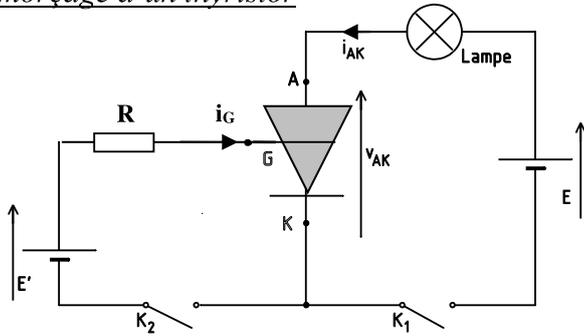
Description



Aspect

On se limite à l'étude des redresseurs commandés monophasés

Amorçage d'un thyristor



- ❶ On ferme K_1 : lampe est éteinte donc Th est bloqué.
- ❷ On ferme K_2 : lampe s'allume donc Th est passant.
- ❸ On ouvre K_2 : lampe reste allumée donc Th est passant.
- ❹ On ouvre K_1 : lampe s'éteint donc Th se bloque.
- ❺ On ferme K_1 : lampe reste éteinte donc Th est bloqué.

Conclusion :

Pour amorcer un thyristor : il faut que la tension v_{AK} soit positive et un courant de gâchette suffisant le temps que i_{AK} s'établisse. Le thyristor se comporte alors comme **un interrupteur fermé**.

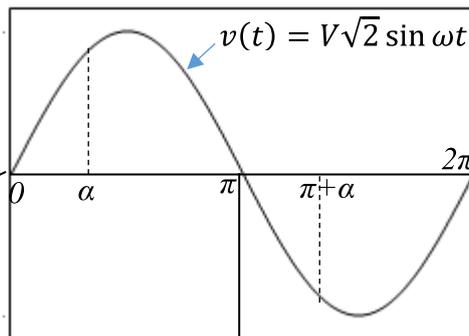
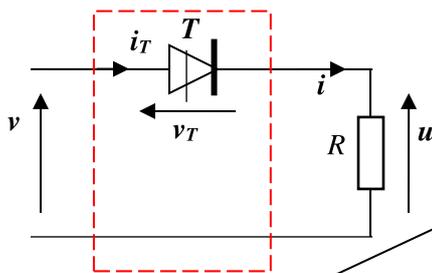
Pour bloquer le thyristor : il faut annuler le courant i_{AK} ou appliquer une tension v_{AK} négative. Le thyristor se comporte alors comme **un interrupteur ouvert**.

Retard à l'amorçage

Le thyristor est amorcé avec un angle de retard α . Cet angle est calculé par rapport au passage par zéro de la tension v .

Redressement simple alternance (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



v est la tension d'entrée du pont.
 u est la tension de sortie.
 R est la charge résistive.

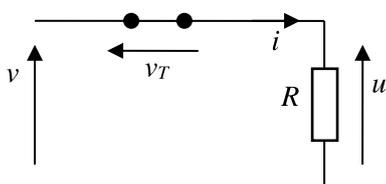
$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T est supposé parfait.

- Pas d'impulsion sur la gâchette : $u = 0$ et $i = 0$
- Loi des mailles donne : $v - v_T - u = 0$
 $\rightarrow v_T = v - u = v > 0$

Donc le thyristor est susceptible d'être amorcé. L'amorçage s'effectue avec le retard t_0 , qui correspond à l'angle $\alpha = \omega \cdot t_0$ appelé **l'angle de retard à l'amorçage**.

À $\theta = \alpha$ le thyristor est amorcé



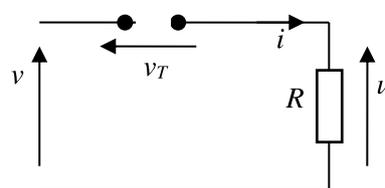
$$\begin{aligned} v_T &= 0 \\ u &= v \\ i &= u/R = v/R \end{aligned}$$

à $\theta = \pi$

Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor.

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

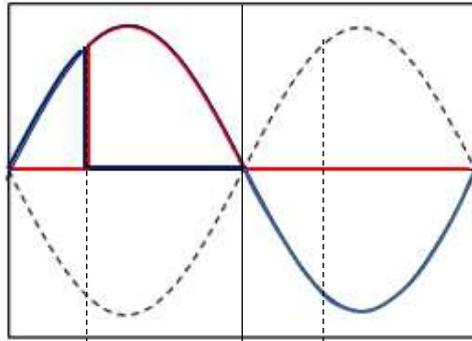
Si l'on envoie un courant de gâchette alors que la tension est négative, le thyristor reste bloqué.



$$\begin{aligned} i &= 0 \\ u &= R i = 0 \\ v_T &= v \end{aligned}$$

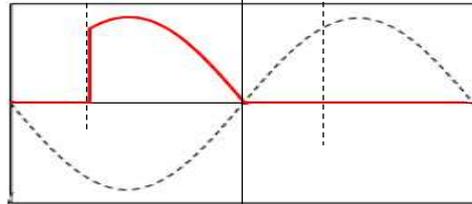
Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en rouge
- $v_T(t)$ en bleu



Dessiner les courants :

$i(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = \frac{V\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans le thyristor :

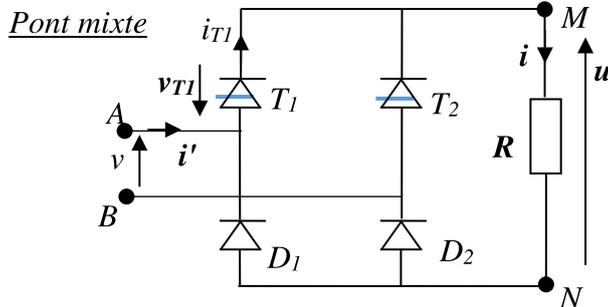
$$\langle i_T \rangle = \langle i \rangle$$

Tension maximale supportée par le thyristor :

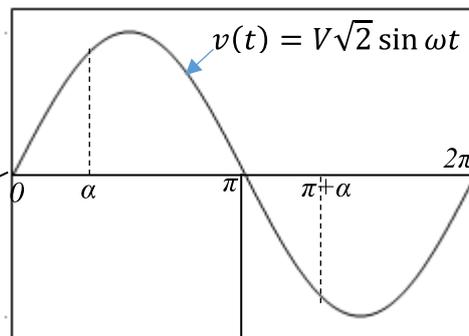
$$v_{Tmax} = V\sqrt{2}$$

Redressement double alternance (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



v : tension d'entrée alternative du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R.
 v_{T1} : tension aux bornes du thyristor T_1 .
 R : est la charge résistive.



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \alpha$.

A $\theta = \alpha$: T_1 est amorcé, le courant i circule la maille : $A \rightarrow T_1 \rightarrow$ charge $\rightarrow D_2 \rightarrow B$

$$\begin{aligned} u &= v_M - v_N = v_A - v_B = v \\ i &= u/R = v/R \\ v_{T1} &= v_{D2} = 0 \\ i_{T1} &= i_{D2} = i \end{aligned}$$

A $\theta = \pi$: Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor T_1

$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$

Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \pi + \alpha$.

A $\theta = \pi + \alpha$: T_2 est amorcé, le courant i circule la maille : $B \rightarrow T_2 \rightarrow$ charge $\rightarrow D_1 \rightarrow A$

$$\begin{aligned} u &= v_M - v_N = v_B - v_A = -v \\ i &= u/R = -v/R \\ v_{T1} &= v_{D2} = v \\ i_{T1} &= i_{D2} = 0 \end{aligned}$$

A $\theta = 2\pi$: Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor T_2

Dessiner les tensions :

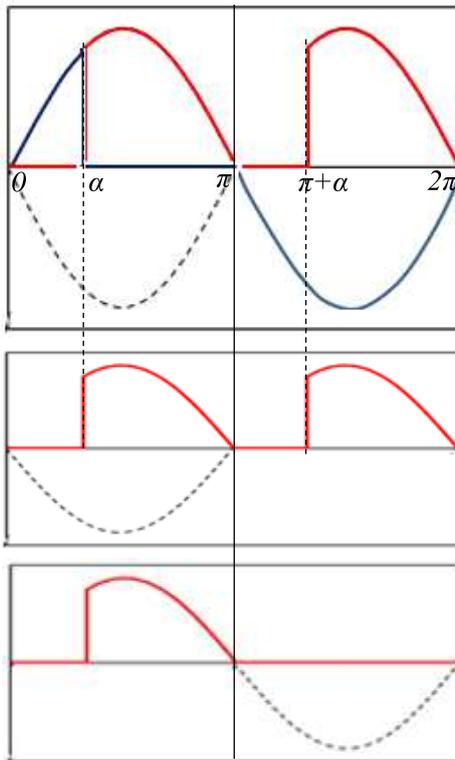
- $u(t)$ en rouge
- $v_{T1}(t)$ en bleu

Dessiner le courant

$i(t)$ en rouge

Dessiner le courant

$i_{T1}(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans un élément :

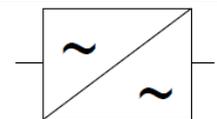
$$\langle i_D \rangle = \langle i_T \rangle = \frac{\langle i \rangle}{2}$$

Tension maximale supportée par les éléments :

$$v_{Tmax} = v_{Dmax} = V\sqrt{2}$$

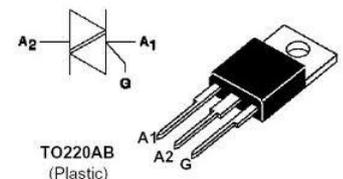
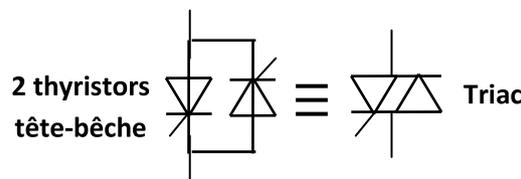
3 Gradateurs

Le gradateur est un convertisseur alternatif - alternatif, capable de faire varier la tension efficace aux bornes d'une charge.



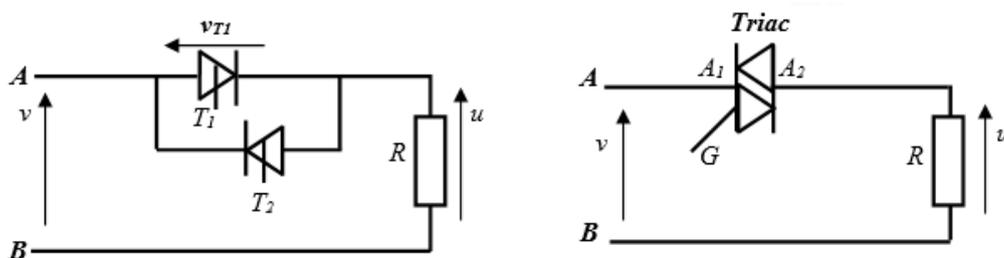
41. Interrupteurs électroniques

L'interrupteur est constitué par deux thyristors tête-bêche.
 Pour les faibles puissances, les deux thyristors sont remplacés par un triac.



42. Gradateur monophasé (charge résistive)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

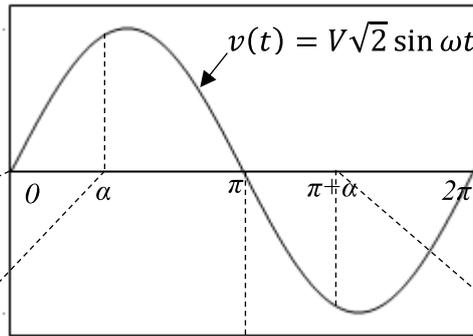


Deux modes de commande de l'énergie transférée à la source sont possibles :

Commande par la phase

Les deux thyristors doivent être commandés avec le même angle de retard α pour obtenir une tension u alternative (valeur moyenne nulle).

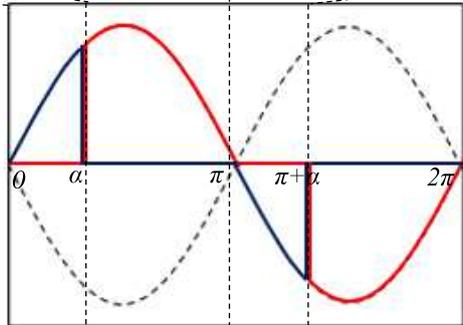
La variation de la valeur efficace U est obtenue en agissant sur l'angle de retard α .



$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive $\rightarrow v_A > v_B$		$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative $\rightarrow v_B > v_A$	
<p>$0 < \theta < \alpha$</p> <p>T_1 et T_2 sont bloqués (aucune commande)</p> <p>Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé car $v_{T1} = v$ et $v > 0$</p> <p>$u = 0$ $i = 0$ $i_{T1} = 0$</p>	<p>$\alpha < \theta < \pi$</p> <p>$A \theta = \alpha$ T_1 est amorcé, le courant i circule la maille $A \rightarrow T_1 \rightarrow R \rightarrow B$</p> <p>$v_{T1} = 0$ $u = v$ $i = u/R = v/R$ et $i_{T1} = i$</p> <p>T_1 se bloque naturellement en $\theta = \pi$ ($i = 0$).</p>	<p>$\pi < \theta < \pi + \alpha$</p> <p>$T_1$ et T_2 sont bloqués (aucune commande)</p> <p>Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé car $v_{T2} = -v_{T1} = v$ et $v < 0$</p> <p>$u = 0$ $i = 0$ $i_{T1} = 0$</p>	<p>$\pi + \alpha < \theta < 2\pi$</p> <p>$A \theta = \pi + \alpha$ T_2 est amorcé, le courant i circule la maille : $B \rightarrow R \rightarrow T_2 \rightarrow A$</p> <p>$v_{T1} = 0$ $u = v$ $i = u/R = v/R$ et $i_{T1} = i$</p> <p>T_2 se bloque naturellement en $\theta = 2\pi$ ($i = 0$).</p>

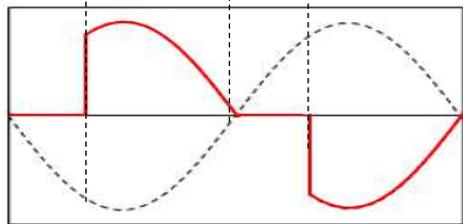
Dessiner les tensions :

- $u(t)$ en rouge
- $v_{T1}(t)$ en bleu



Dessiner les courants :

- $i(t)$ en rouge



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de $u(t)$:

$$\langle u \rangle = 0$$

Valeur efficace de $u(t)$:

$$U = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Courant moyen dans un élément :

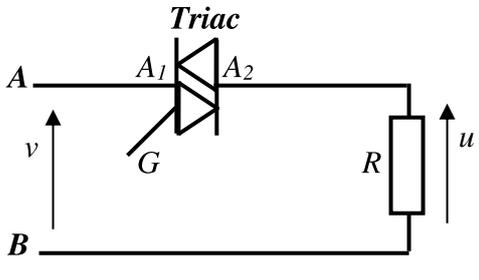
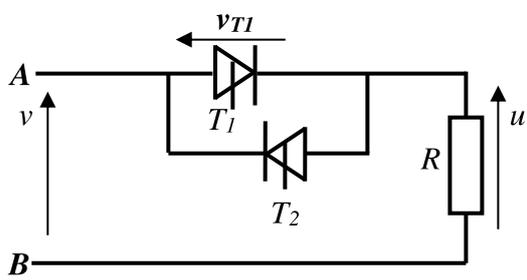
$$\langle i_{T1} \rangle = \langle i_{T2} \rangle = \frac{I\sqrt{2}}{\pi}$$

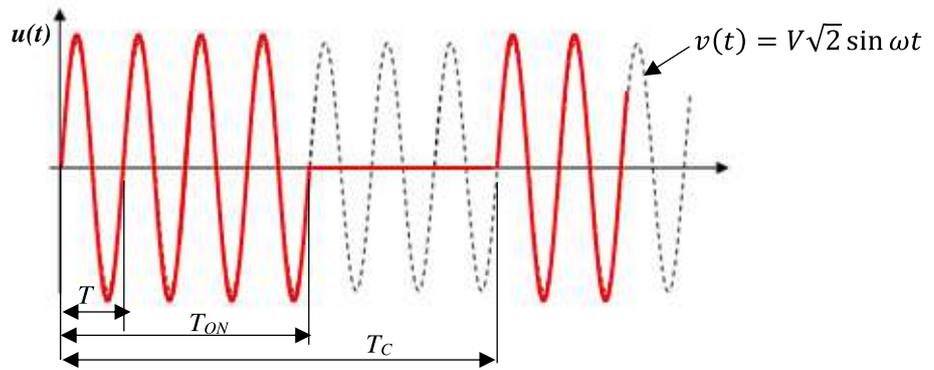
Tension maximale supportée par les thyristors :

$$v_{T1max} = v_{T2max} = V\sqrt{2}$$

Commande par train d'ondes

Dans ce type de gradateur, le signal envoyé sur l'entrée de commande du gradateur est de type TOR.





T : période du réseau
 T_{ON} : Durée du train d'ondes, (Temps de conduction)
 T_c : Temps de cycle du

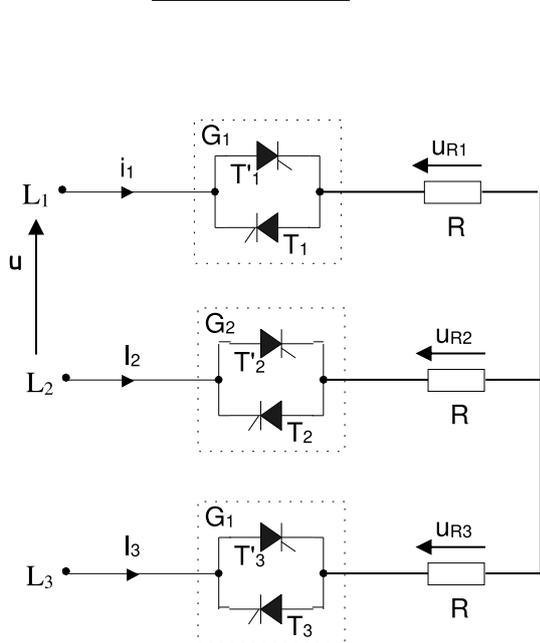
Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$ (tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V\sqrt{\alpha}$ avec α (rapport cyclique) = T_{ON}/T_c
- Tension maximale supportée par les éléments : $v_{T1max} = v_{T2max} = V\sqrt{2}$

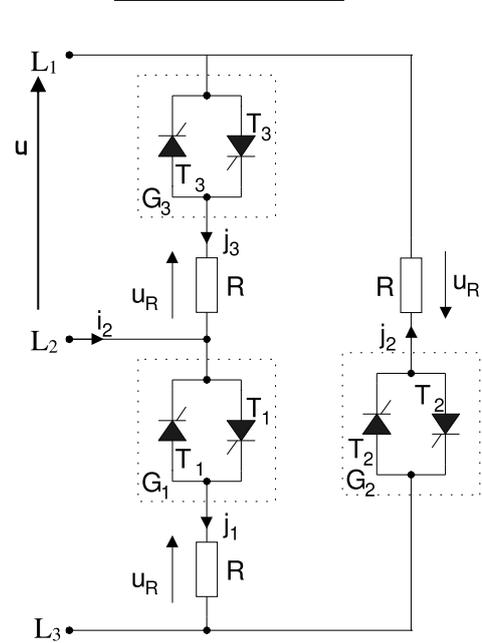
43. Gradateur triphasé

Il existe deux montages de gradateur triphasé :

Montage étoile



Montage triangle



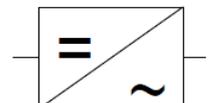
Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne de la tension u_R : $\langle u_R \rangle = \dots$ (Tension alternative)

	Montage étoile :	Montage triangle :
Valeur efficace de la tension u_R :	$U_R = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$	$U_R = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$
Tension maximale supportée par les éléments :	$v_{Tmax} = V\sqrt{2}$	$v_{Tmax} = U\sqrt{2}$

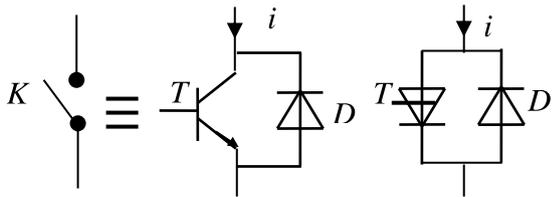
4 Onduleurs autonomes

Un onduleur est un convertisseur continu - alternatif
 Il est autonome lorsqu'il impose sa propre fréquence à la charge.



31. Interrupteurs électroniques

L'interrupteur peut être à transistor (ou thyristor si grande puissance), plus une diode de récupération (indispensable si la charge est inductive).



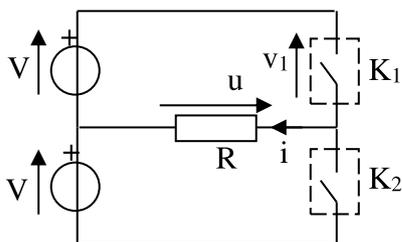
- K ouvert $\leftrightarrow T$ bloqué et D en inverse
- K fermé $\leftrightarrow T$ commandé :
 - si $i > 0$: T conduit
 - si $i < 0$: D conduit

32. Commandes

La commande dans un onduleur peut être : *symétrique*, *décalée* ou *MLI* (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Onduleur monophasé en demi-pont (à 2 interrupteurs)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

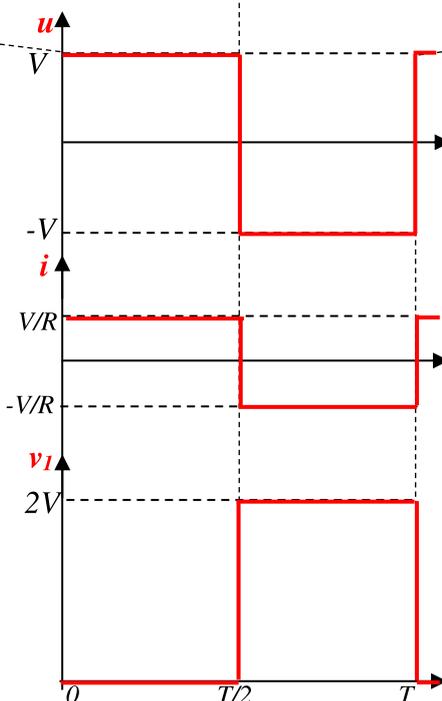


V : tension continue d'entrée du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R .
 v_1 : tension aux bornes de l'interrupteur K_1 .
 R : charge résistive.

Commande symétrique

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

$0 < t < T/2$	$T/2 < t < T$
<p>K_1 est fermé et K_2 est ouvert</p> <p>$\Rightarrow v_1 = 0$ d'où $u = V$ et $i = V/R$</p>	<p>K_1 est ouvert et K_2 est fermé</p> <p>$\Rightarrow u = -V$; $i = -V/R$ et $v_1 = V - u = 2V$</p>

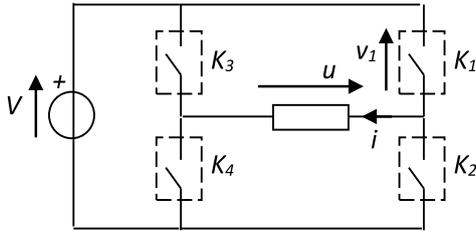


Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $u = 0$.
- Valeur efficace de la tension u : $U = V$.
- Tension maximale supportée par les interrupteurs : $v_1 = 2V$

Onduleur monophasé en pont (à 4 interrupteurs)

Schéma de montage, analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



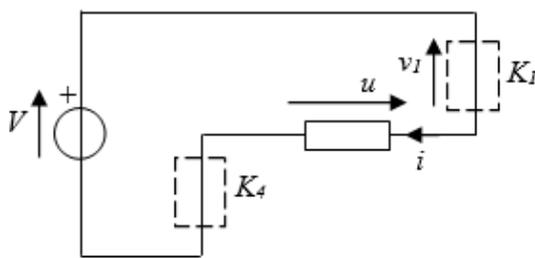
V : tension continue d'entrée du montage.
 u : tension de sortie aux bornes de R .
 v_1 : tension aux bornes de l'interrupteur K_1 .
 R : charge résistive.

Commande symétrique

Principe : Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K_1 ; K_4 et K_2 ; K_3 durant des intervalles de temps réguliers. La fermeture des interrupteurs des deux bras est symétrique :

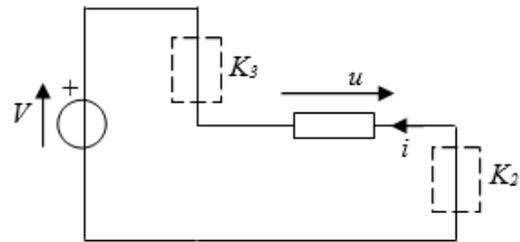
Bras 1	K_1 fermé	K_2 fermé
Bras 2	K_4 fermé	K_3 fermé

$0 < t < T/2$

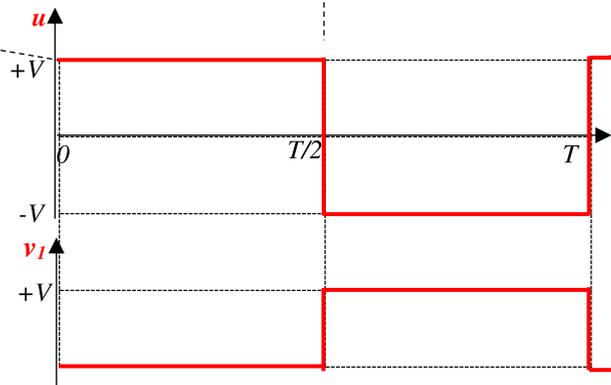


K_1, K_4 sont fermés et K_2, K_3 sont ouverts.
 $\Rightarrow v_1 = v_4 = 0$ donc $V - u = 0$ d'où $u = V$ et $i = V/R$

$T/2 < t < T$



K_2, K_3 sont fermés et K_1, K_4 sont ouverts.
 $\Rightarrow v_2 = v_3 = 0$ donc $V + u = 0$ d'où $u = -V$ et $i = -V/R$



Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$.
- Valeur efficace de la tension u : $U = V$.
- Tension maximale supportée par les interrupteurs : V .

Commande décalée (onduleur en pont)

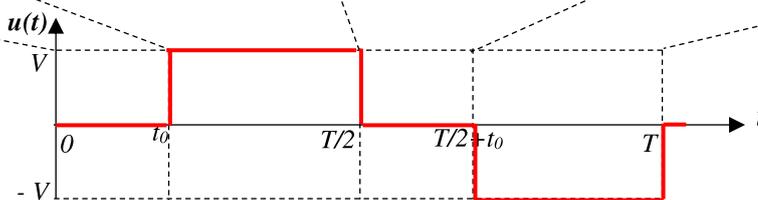
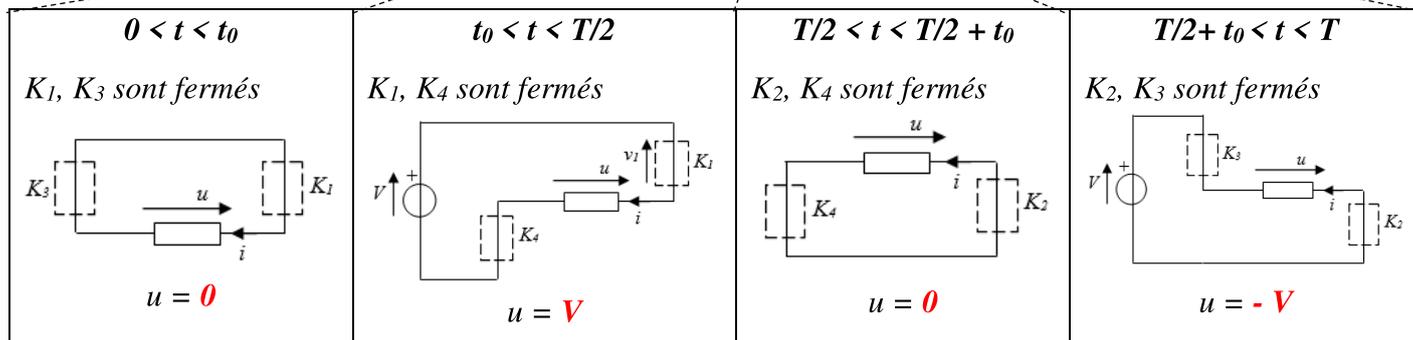
Dans la commande précédente la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires ...).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur.

Principe : La fermeture des interrupteurs d'un bras est décalée de l'angle $\alpha = \omega t_0$:

Bras 1	K_1 fermé	K_2 fermé	
Bras 2	K_3	K_4 fermé	K_3 fermé

0 t_0 $T/2$ $T/2+t_0$ T



Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\langle u \rangle = 0$.
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$
- Tension maximale supportée par les interrupteurs : V

Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI ou PWM (Pulse Width Modulation) en anglais

La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive). Cette fragmentation permet si elle est savamment calculée d'éliminer les harmoniques gênants. L'allure de la tension MLI permet de se rendre compte du principe de cette commande.

Pour obtenir la tension de commande des transistors, on compare un signal triangulaire appelé porteuse au signal modulant sinusoïdal de fréquence beaucoup plus faible.

Principe de commande MLI du bras K1 – K2 :

L'onde modulante, est comparée à l'onde porteuse et à la sortie du comparateur on obtient la tension de commande U_s .

