

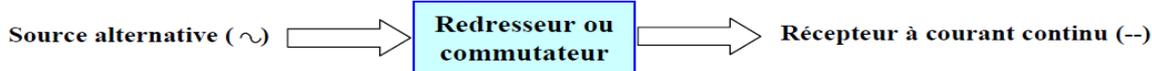
CONVERSION : ALTERNATIVE - CONTINUE

LES REDRESEURS

Redresseurs

Généralité

Le redresseur permet la conversion d'une tension alternative en une tension continue.
On utilise un convertisseur alternatif-continu pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.



Redresseurs à diodes (non commandés)

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

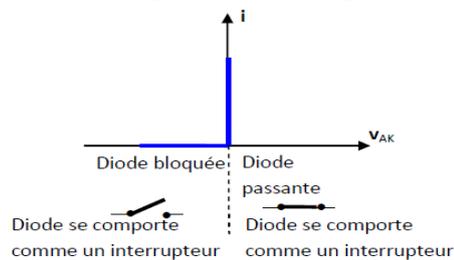


Diode

La diode est un dipôle passif polarisé.
En électrotechnique, la diode est équivalente à un interrupteur unidirectionnel non commandé.

Aspect	
Symbole	
Jonction	

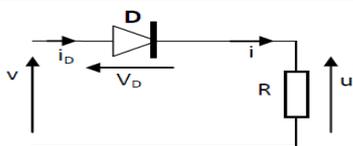
Caractéristique d'une diode parfaite



Redresseur monophasé (Charge résistive)

Redresseur simple alternance

Schéma du montage



v est la tension d'entrée du montage.
 u est la tension de sortie.
 v_D est la tension aux bornes de la diode
 R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement

La diode est parfaite

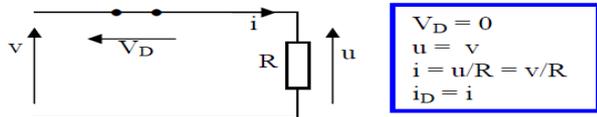
$$v(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$$

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

D est passante (interrupteur fermé) $v_D = 0$

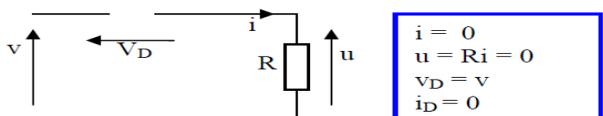
Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$

Donc : $u = v > 0$

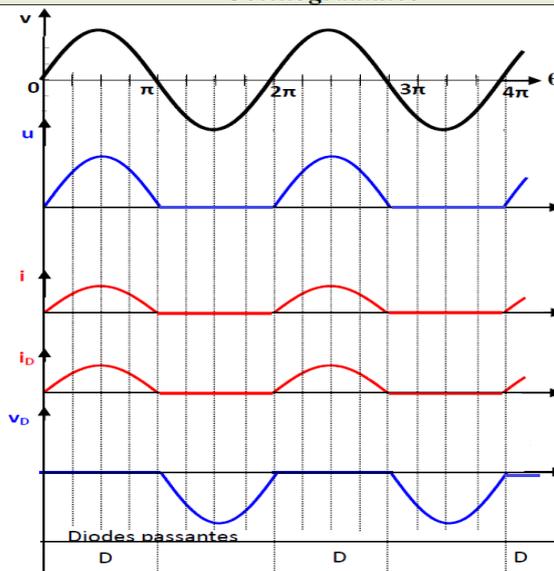


$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative

D se bloque (interrupteur ouvert) $i = 0$



Oscillogrammes



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de la tension u	Valeur efficace de la tension u	Tension maximale supportée par la diode
$\bar{u} = V\sqrt{2}/\pi$	$U = V\sqrt{2}/2$	$V_{Dmax} = V\sqrt{2}$

Question : Exprimer les valeurs moyenne et efficace de la tension u . En déduire la valeur du facteur de forme.

Réponse :

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} V\sqrt{2} \cos\theta \, d\theta = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} [\sin\theta] = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} [2] = \frac{V\sqrt{2}}{\pi}$$

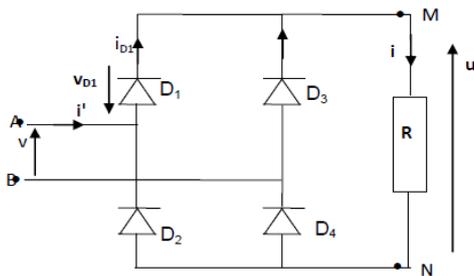
$$U^2_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (V\sqrt{2})^2 \cos^2\theta \, d\theta \quad \text{d'où } U_{\text{eff}} = \frac{V\sqrt{2}}{2}$$

$$\text{Facteur de forme : } F = \frac{U_{\text{eff}}}{U_{\text{moy}}} = \frac{\pi}{2}$$

$$\text{d'où le taux d'ondulation } \beta = \sqrt{F^2 - 1} = 121\%$$

Redresseur double alternance PD2 (Pont de Graëtz)

Schéma du montage



v est la tension d'entrée du montage.

u est la tension de sortie.

v_{D1} est la tension aux bornes de la diode D_1

R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement

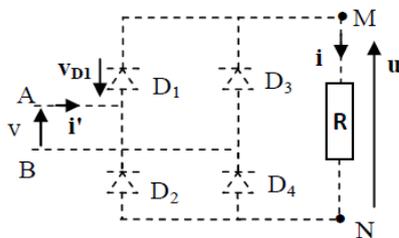
$0 < \theta < \pi \quad v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

D_1 et D_4 sont passantes $\Rightarrow v_{D1} = 0$ et $v_{D4} = 0$

(Interrupteurs fermés)

Le courant i circule la maille suivante :

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



$$\begin{aligned} u &= v_M - v_N = v_A - v_B = v \\ i &= u / R = v / R \quad \text{et} \quad i' = i \\ v_{D1} &= v_{D4} = 0 \quad \text{et} \quad v_{D3} = v_{D2} = -v \end{aligned}$$

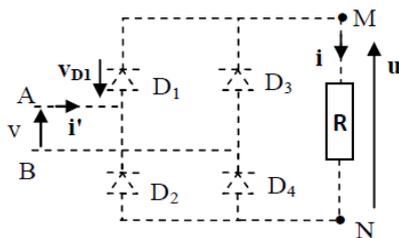
$\pi < \theta < 2\pi \quad v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

D_2 et D_3 sont passantes $\Rightarrow v_{D2} = 0$ et $v_{D3} = 0$

(Interrupteurs fermés)

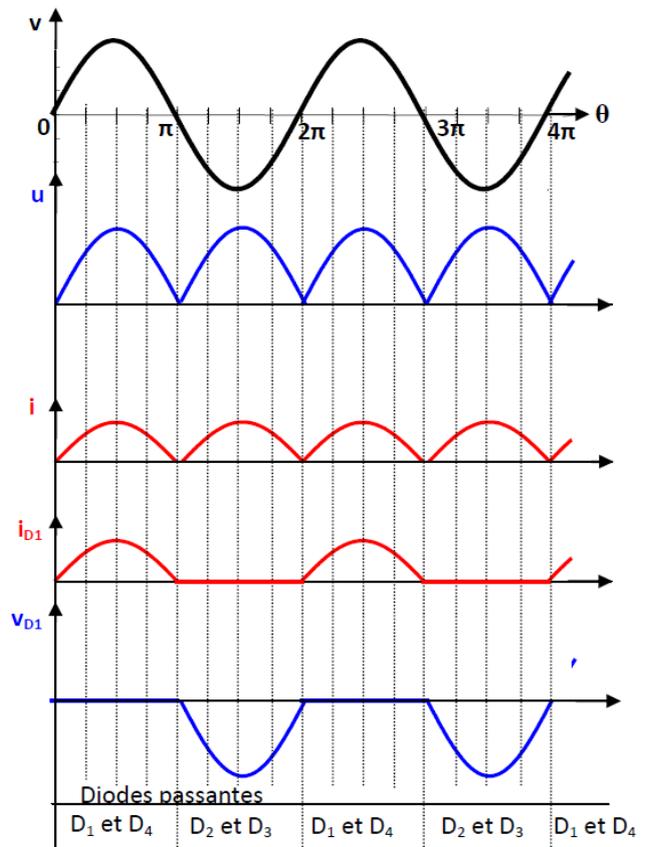
Le courant i circule la maille suivante :

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



$$\begin{aligned} u &= v_M - v_N = v_B - v_A = -v \\ i &= u / R = -v / R \quad \text{et} \quad i' = -i \\ v_{D2} &= v_{D3} = 0 \quad \text{et} \quad v_{D1} = v_{D4} = v \end{aligned}$$

Oscillogrammes



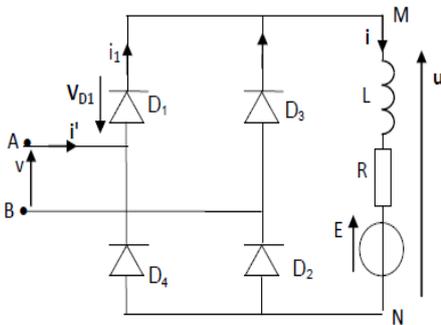
Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de la tension u	Valeur efficace de la tension u	Tension maximale supportée par la diode
$\bar{u} = 2V\sqrt{2}/\pi$	$U = V$	$V_{D_{max}} = V\sqrt{2}$

Redresseur monophasé (Charge R.L.E.)

Redresseur double alternance PD2 (Pont de Graëtz)

Schéma du montage



v est la tension d'entrée du montage.
 u est la tension de sortie.
 v_{D1} est la tension aux bornes de la diode D_1 .
 R est la résistance de la charge.
 L est l'inductance de la charge.
 E est la f.é.m. de la charge

Analyse du fonctionnement

En électronique de puissance, pour de forts débits de courant, le lissage se fait par une inductance.

L'ondulation du courant alors diminue.

Le courant ne passe plus par zéro.

C'est le régime **de conduction ininterrompue ou continue.**

Si l'inductance est assez grande, on peut considérer le lissage comme parfait : le courant i est constant.

La tension u est imposée par le réseau, à travers le transformateur et le pont de Graëtz.

Le courant i est lissé par la bobine d'inductance L .

Son intensité est imposée par la charge R, E .

Pour les autres grandeurs :

Alternance positive

$$i_{D1} = i$$

$$i' = i$$

$$v_{D1} = 0$$

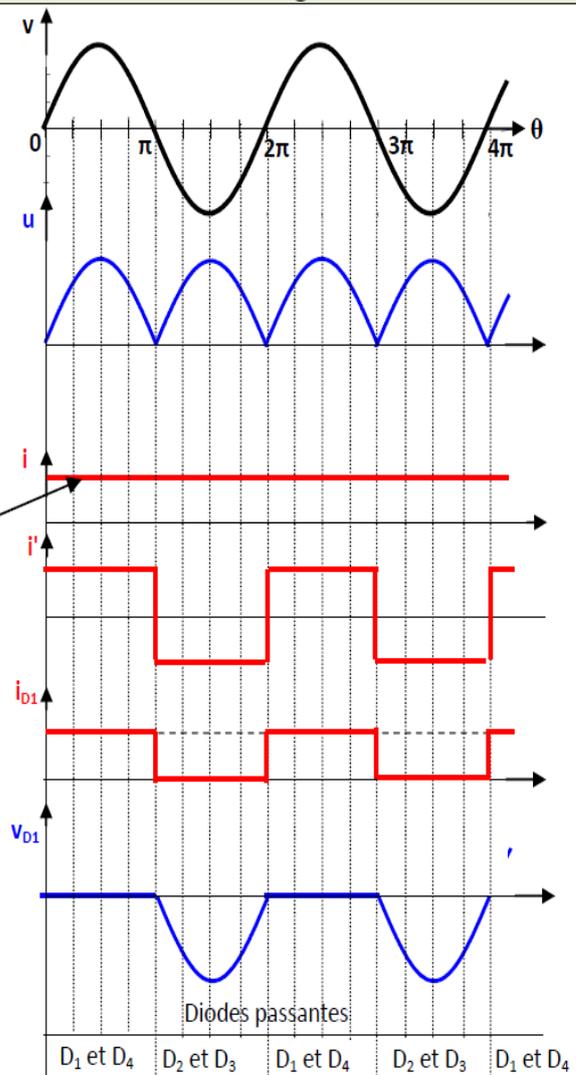
Alternance négative

$$i_{D1} = 0$$

$$v_{D1} = -u = v$$

$$i' = -i$$

Oscillogrammes



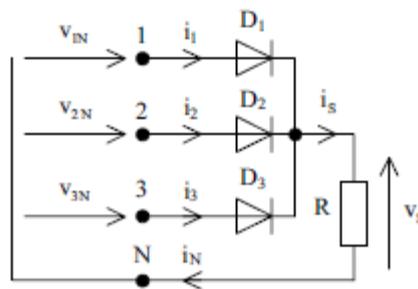
REDRESSEMENT TRIPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE

Charge résistive

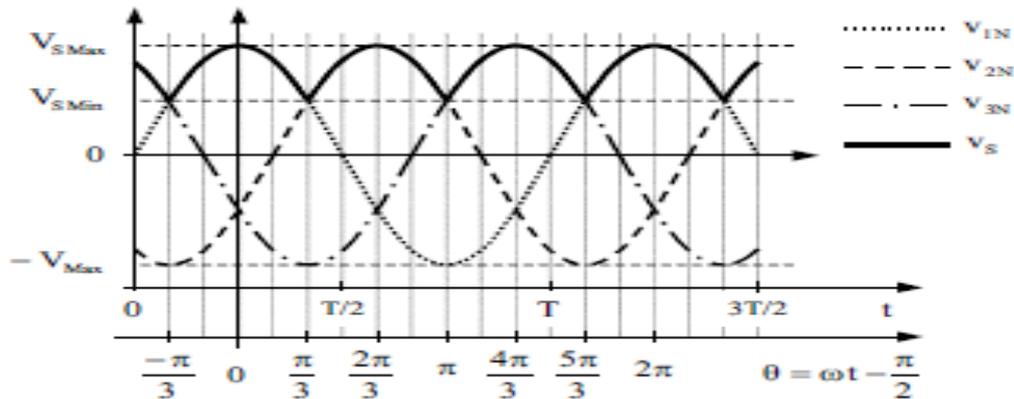
Le montage redresse les courants entre les phases et le neutre. Pour les tensions d'entrées simples v_{1N} , v_{2N} et v_{3N}

Angle de conduction : θ modulo 2π (rad)	Diode conductrice	Tension v_S
$-\pi/3 \leq \theta \leq \pi/3$	D_1	$v_S = v_{1N} = V_{Max} \cos \theta$
$\pi/3 \leq \theta \leq \pi$	D_2	$v_S = v_{2N} = V_{Max} \cos(\theta - 2\pi/3)$
$\pi \leq \theta \leq 5\pi/3$	D_3	$v_S = v_{3N} = V_{Max} \cos(\theta - 4\pi/3)$

Montage



Chronogramme



Question : Exprimer les valeurs moyenne et efficace de la tension v_S . En déduire la valeur du facteur de forme.

Réponse :

$$V_{S \text{ Moy}} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} V_{S \text{ Max}} \cos \theta \, d\theta \quad \text{D'où : } V_{S \text{ Moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{S \text{ Max}}$$

$$V_{S \text{ Eff}}^2 = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} V_{S \text{ Max}}^2 \cos^2 \theta \, d\theta \quad \text{D'où : } V_{S \text{ Eff}} = V_{S \text{ Max}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}}$$

Soient : $V_{S \text{ Moy}} \approx 0,83 V_{S \text{ Max}}$ et $V_{S \text{ Eff}} \approx 0,84 V_{S \text{ Max}}$

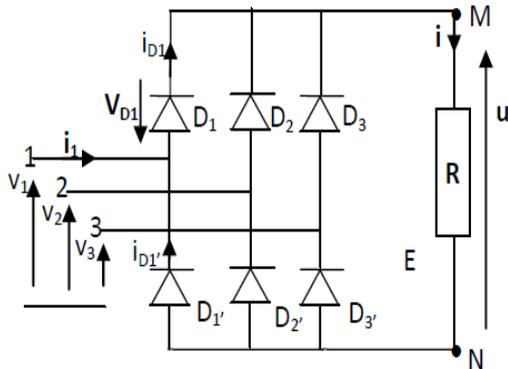
$$F = \frac{V_{S \text{ Eff}}}{|V_{S \text{ Moy}}|} = \sqrt{\frac{2\pi^2}{27} + \frac{\pi}{6\sqrt{3}}} \approx 1,017 \Rightarrow \beta = \sqrt{F^2 - 1} \approx 18,3 \%$$

Redresseur 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.

Redresseur triphasé PD3

Schéma de montage



Le pont redresseur comporte:

- 3 diodes pour l'aller: D_1, D_2, D_3 ,
- 3 diodes pour le retour: $D_{1'}, D_{2'}, D_{3'}$,

Les diodes sont parfaites

Analyse du fonctionnement

$v_M = v_1, v_2$ ou v_3 la plus positive à l'instant considéré :
 v_M est constitué donc par les «calottes supérieures»
 des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .

$v_N = v_1, v_2$ ou v_3 la plus négative à l'instant considéré :
 v_N est constitué donc par les «calottes inférieures»
 des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .

La tension $u = v_M - v_N$. Elle est périodique, de
 période $\pi/3$ en θ . Soit de fréquence :
 $f' = 6 \times 50 = 300 \text{ Hz}$. (Si la fréquence du réseau est 50 Hz)

$$\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$v_M = v_1 = V\sqrt{2} \sin \theta$$

$$v_N = v_2 = V\sqrt{2} \sin (\theta - 2\pi/3)$$

Le courant i circule la maille suivante :

$$1 \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow D_{2'} \rightarrow 2$$

D'où :

$$u = v_M - v_N = V\sqrt{2}\sqrt{3} \sin (\theta + \pi/6)$$

Le courant dans la charge :

$$i = u/R$$

Le courant dans une diode :

Le courant dans les diodes est égal à :

- i lorsque la diode considérée est passante
- 0 si la diode est bloquée.

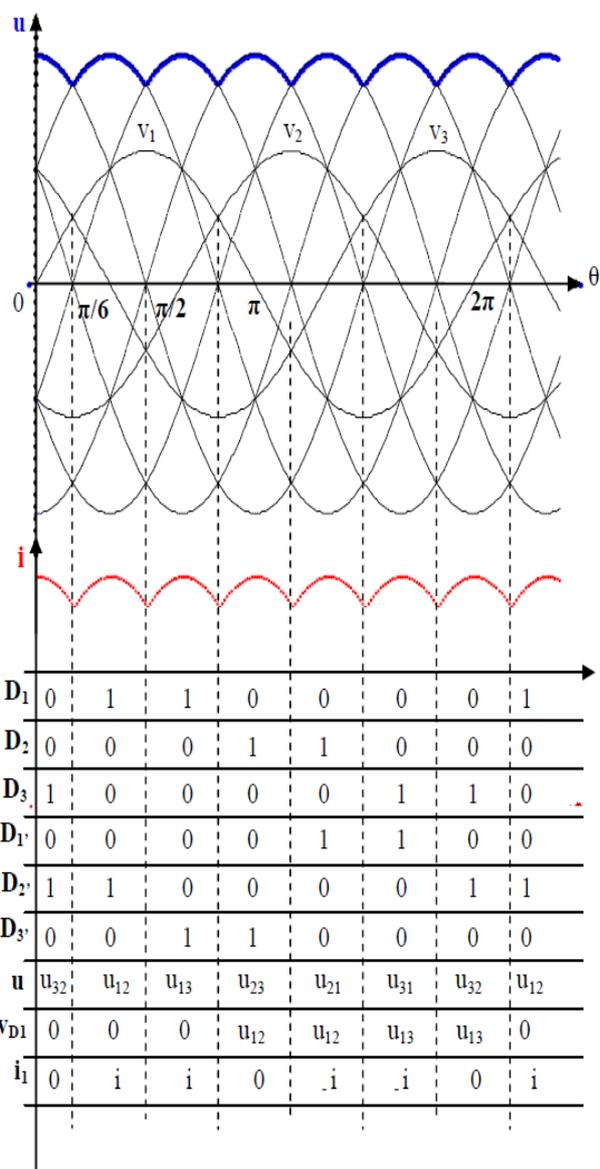
$$i_{D1} = i \text{ lorsque } D_1 \text{ conduit}$$

Le courant demandé par la source triphasée :

$$i_1 = i_{D1} - i_{D1'} \text{ (loi des nœuds)}$$

- Lorsque $\pi/6 < \theta < 5\pi/6$ $i_1 = i$
- Lorsque $7\pi/6 < \theta < 11\pi/6$ $i_1 = -i$

Oscillogrammes



Grandeurs caractéristique

Valeur moyenne de la tension u	Valeur moyenne du courant i_D	Tension maximale supportée par la diode
$\bar{u} = \frac{3\sqrt{3} V\sqrt{2}}{\pi}$	$\bar{i}_D = \bar{i} / 3$	$V_{Dmax} = V\sqrt{3}\sqrt{2}$

Redresseur triphasé (Charge R.L.E.)

Redresseur triphasé PD3

Schéma de montage	Analyse du fonctionnement
	<p>L'inductance L est suffisante pour que le courant i soit considéré constant.</p> <p>La tension u a la même forme que le montage précédent (c.à.d. charge résistive).</p>

Grandeurs caractéristique

Valeur moyenne de la tension u	Valeur moyenne du courant i_D	Tension maximale supportée par la diode
$\bar{u} = \frac{3\sqrt{3} V\sqrt{2}}{\pi}$	$\bar{i}_D = \bar{i} / 3$	$V_{Dmax} = V\sqrt{3}\sqrt{2}$

Redresseurs à thyristors (commandés)

L'intérêt du redressement commandé est 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

En électrotechnique, le thyristor est équivalent à un interrupteur unidirectionnel commandé à la fermeture.

Aspect	<p>TO5 TO92 TO48 TO220 DPACK</p>
Symbole	
Jonction	

Amorçage d'un thyristor

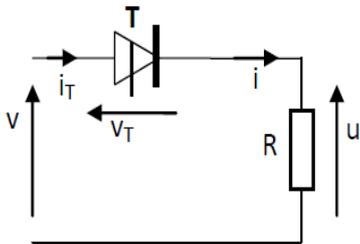
Montage	Conclusion
	<p>Pour amorcer un thyristor : il faut que la tension v_{AK} soit positive et un courant de gâchette suffisant le temps que i_{AK} s'établisse. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur fermé.</p> <p>Pour bloquer le thyristor : il faut annuler le courant i_{AK} ou appliquer une tension v_{AK} négative. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur ouvert.</p>

- 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.

Redresseur monophasé à thyristors (Charge résistive)

Redresseur simple alternance

Schéma du montage



v : est la tension d'entrée du montage.
 u : est la tension de sortie.
 v_T : est la tension aux bornes du thyristor
 R : est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement

Le thyristor est supposé parfait.

$$v(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$$

$$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$$

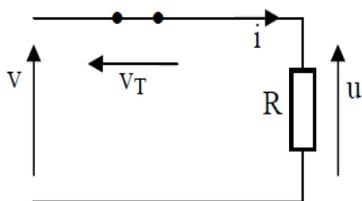
- Pas d'impulsion sur la gâchette : $u = 0$ et $i = 0$
- Loi des mailles donne : $v - v_{AK} - u = 0$
 $\rightarrow v_{AK} = v - u = v > 0$

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*,

après chaque début de période T .

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



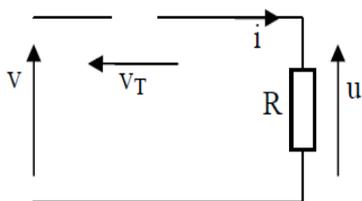
$$\begin{aligned} v_T &= 0 \\ u &= v \\ i &= u/R = v/R \end{aligned}$$

à $\theta = \pi$

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

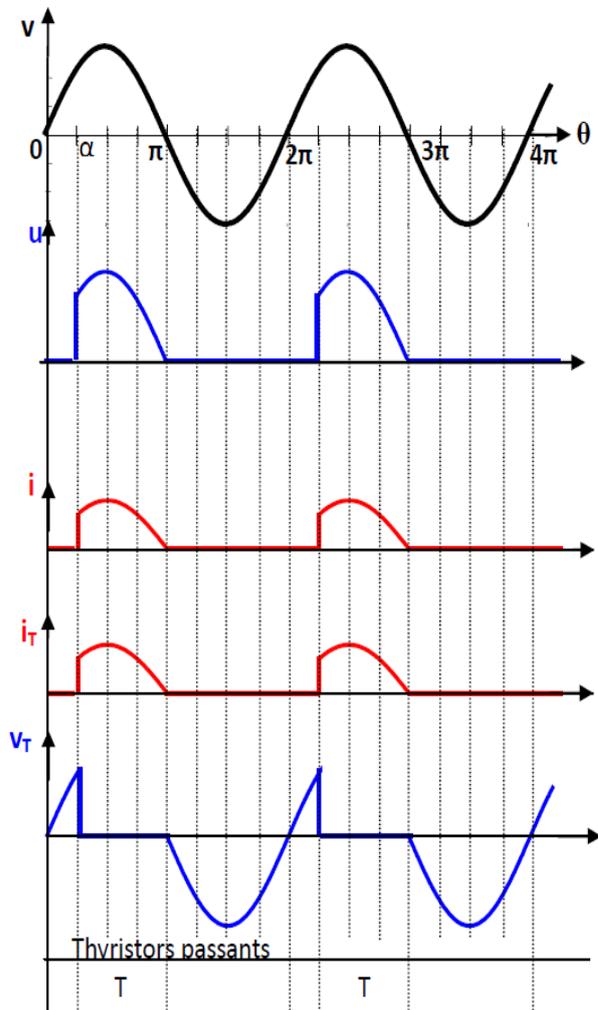
$$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$$

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



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

Oscillogrammes

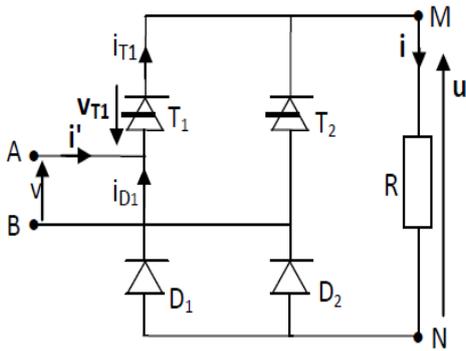


Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de la tension u	Valeur efficace de la tension u	Tension maximale supportée par le thyristor
$\bar{u} = V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$	$U = V\sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$	$v_{Tmax} = V\sqrt{2}$

Redresseur mixte double alternance PD2 (Pont de Graëtz)

Schéma du montage



v est la tension d'entrée du montage.

u est la tension de sortie.

v_{T1} est la tension aux bornes du thyristor T_1

R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement

$\theta = \alpha$: $v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé.

Il est amorcé, le courant i circule la maille :

$A \rightarrow T_1 \rightarrow \text{charge} \rightarrow D_2 \rightarrow B$

On en déduit que :

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

$$i = u / R = v / R$$

$$i' = i$$

$$v_{T1} = v_{D2} = 0$$

$$v_{T2} = v_{D1} = -v$$

Lorsque θ franchit π $v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé

mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \pi + \alpha$.

Par contre D_2 se met à conduire dès que $\theta > \pi$

Ainsi ($\pi < \theta < \pi + \alpha$), la charge est court-circuitée

par T_1 et D_2 d'où $u = 0$

$\theta = \pi + \alpha$: $v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

T_2 est amorcé, le courant i circule la maille :

$B \rightarrow T_2 \rightarrow \text{charge} \rightarrow D_1 \rightarrow A$

On en déduit que :

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

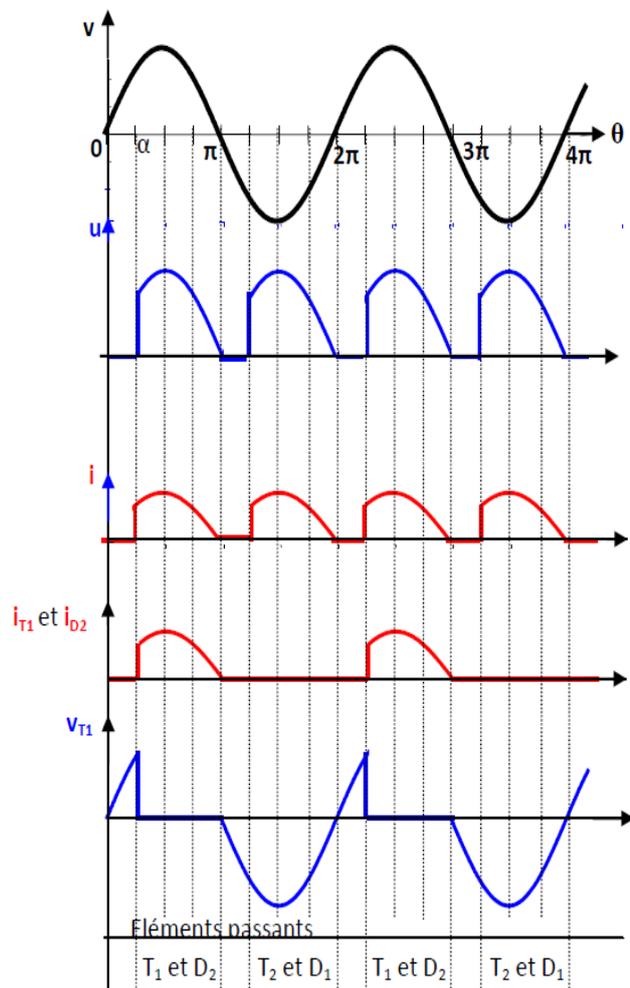
$$i = u / R = -v / R$$

$$i' = -i$$

$$v_{T2} = v_{D1} = 0$$

$$v_{T1} = v_{D2} = v$$

Oscillogrammes



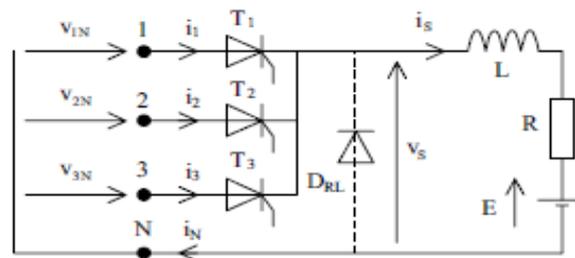
Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de la tension u	Valeur efficace de la tension u	Tension maximale supportée par les éléments
$\bar{u} = 2V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$	$U = V\sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$	$v_{T\max} = V\sqrt{2}$ $v_{D\max} = V\sqrt{2}$

REDRESSEMENT TRIPHASÉ SIMPLE ALTERNANCE

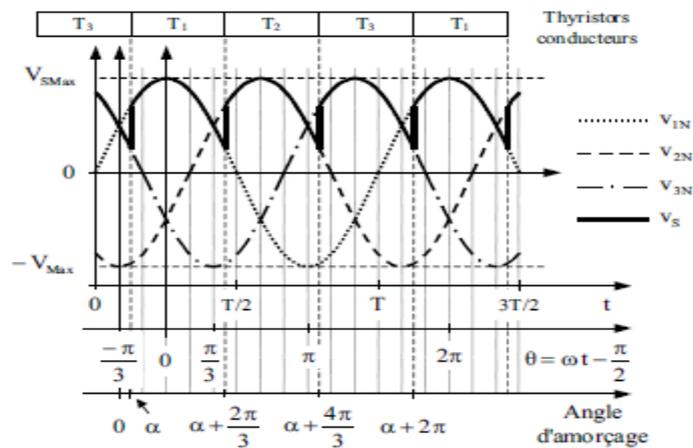
Le montage suivant redresse les courants entre les phases et le neutre. Les tensions d'entrées simples v_{1N} , v_{2N} et v_{3N}

Montage



Redresseur sans diode de roue libre

Charge résistive



Question : Exprimer la valeur moyenne de la tension v_s pour une conduction ininterrompue du courant i_s .

Réponse :

$$V_{S \text{ Moy}} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\pi/3 + \alpha}^{\pi/3 + \alpha} V_{S \text{ Max}} \cos \theta \, d\theta$$

D'où :

$$V_{S \text{ Moy}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{S \text{ Max}} \cos \alpha$$

FACTEUR DE PUISSANCE D'UN REDRESSEUR

Le facteur de puissance en entrée du redresseur f_p est le rapport de la puissance active (ou moyenne) d'entrée PE sur la puissance apparente d'entrée SE .

Question : Exprimer le facteur de puissance en entrée du pont tout thyristors de redressement monophasé double alternance sur charge résistive

Réponse : D'une part, $P_E = P_S$ (pas de perte) et $u_S = Ri_S$. D'où :

$$P_E = P_S = \frac{U_{S\text{ Eff}}^2}{R} = \frac{U_{S\text{ Max}}^2}{2R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right) \quad (\text{voir § 32.2.1a})$$

D'autre part, $i_E = i_S = u_S/R$ pour $0 \leq \theta \leq \pi$ et $i_E = -i_S = -u_S/R$ pour $\pi \leq \theta \leq 2\pi$. En conséquence, $I_{E\text{ Eff}} = I_{S\text{ Eff}} = U_{S\text{ Eff}}/R$. D'où :

$$S_E = U_{E\text{ Eff}} I_{E\text{ Eff}} = \frac{U_{S\text{ Max}}}{\sqrt{2}} \frac{U_{S\text{ Eff}}}{R} \quad \text{car} \quad U_{E\text{ Max}} = U_{S\text{ Max}}$$

Soit :

$$S_E = \frac{U_{S\text{ Max}}^2}{2R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Finalement :

$$f_{P E} = \frac{P_E}{S_E} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Si $\alpha = 0$ (redressement non commandé) alors $f_{P E} = 1$

CRITÈRES DE CHOIX

- Réversibilité : Les ponts tout thyristors sans diode de roue libre sont réversibles. Les ponts tout thyristors avec diode de roue libre et les ponts mixtes ne sont pas réversibles.
- Facteur de puissance : À situation comparable (réseau monophasé ou triphasé, redressement double alternance, puissance de sortie et courant de sortie continu donnés), les ponts mixtes ont un facteur de puissance plus élevé que les ponts tous thyristors.
- Période tension de sortie sur période tension d'entrée (TS/TE) : Plus ce rapport est élevé, et plus l'éventuelle inductance de lissage sera grande.
- Nombre de thyristors : Le nombre de circuits de commande augmente avec le nombre de thyristors du montage.
- Chute de tension : La chute de tension est proportionnelle au nombre de redresseurs (thyristors et diodes) en série et diminue le rendement. C'est l'unique raison qui peut faire préférer des montages où un seul redresseur est en série (simple alternance, ou double alternance avec transformateur à point milieu) lorsque la tension de sortie moyenne est petite.
En général, le choix est fonction de l'alimentation.
- Réseau monophasé : Si le convertisseur doit être réversible, alors on utilise le pont tout thyristors sans diode de roue libre, sinon on utilise le pont mixte.
- Réseau triphasé : On utilise surtout le pont tout thyristors sans diode de roue libre pour les faibles et moyennes puissances, que le convertisseur doive être ou pas réversible. On utilise le pont mixte que pour les très faibles puissances à cause des harmoniques générés.