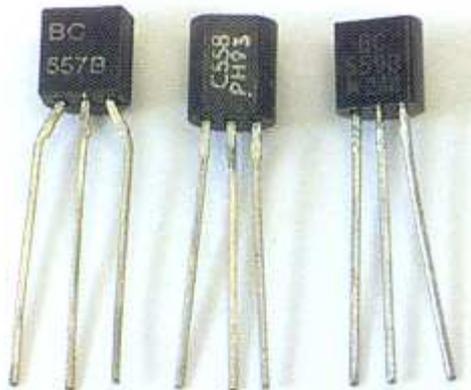


Cours d'électronique

LA THEORIE SUR L'ELECTRONIQUE

LES COMPOSANTS DE BASE



PARTIE N°5 :

LE THYRISTOR

TABLE DES MATIERES

1. Description	2
2. Fonctionnement	3
2.1. Sous une tension positive	3
2.2. Sous une tension négative	5
3. Propriétés pratiques	6
3.1. Données du fabricant	6
3.2. Le courant de gâchette	6
3.3. Durée de l'amorçage	6
3.4. Durée de blocage	6
4. Angle de retard	7
5. Modes de fonctionnement du thyristor	8
5.1. L'amorçage	8
5.2. Le blocage	9
6. Application pratique	10
6.1. Redressement commandé avec 1 thyristor	10
6.2. Redressement commandé avec 2 thyristors	13
6.3. Fonctionnement en onduleur	16
7. Page technique	17

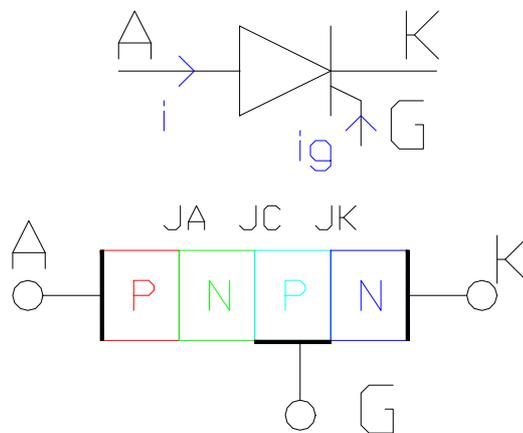
1. Description

Le thyristor n'est rien d'autre qu'une diode commandée.

Elle est constituée d'un monocristal de silicium comprenant quatre couches alternativement de types P et N.

Trois électrodes métalliques réalisent les liaisons vers l'extérieur. Il s'agit de l'anode « A », en contact avec une couche P, de la cathode « K », en contact avec une couche N et de la gâchette « G », en contact avec une couche P.

Ayant quatre couches, nous pouvons déduire qu'il y a trois jonctions. Une jonction d'anode, J_A , une jonction de cathode J_K et une jonction de commande ou centrale J_C . Je peux encore dire que J_A et J_K sera passant de A vers K et que J_C sera passant de K vers A.



Les différentes couches formant le thyristor ont leur particularité :

- couche N (entre J_A et J_C) est épaisse et peu dopée
- couche P (gâchette) est très mince
- couche N (côté cathode) est très dopée

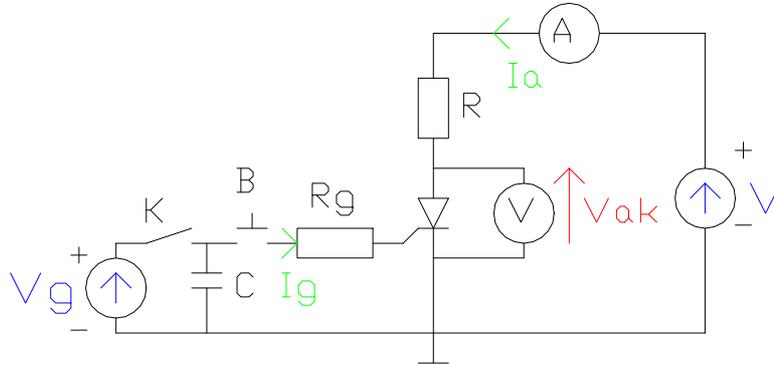
En regard au dessin ci-dessus, les couches portent les noms suivant de gauche à droite

- couche d'anode (type P)
- couche de blocage (type N)
- couche de commande (type P)
- couche de cathode (type N)

2. Fonctionnement

2.1. Sous une tension positive

Réalisons notre étude à l'aide du schéma de câblage suivant :



1° Thyristor bloqué

Lorsque $V_{AK} > 0$, les jonctions J_A et J_K sont polarisées dans le sens direct et ne supportent que des tensions faibles du essentiellement au caractéristiques du monocristal : Je peux donc dire que la tension V_{AK} est pratiquement appliquée à la jonction J_C polarisée en inverse. Le courant I_A est donc le courant inverse de cette jonction, il est très faible.

Je peux donc conclure que le thyristor est bloqué.

$$I_a \approx 0 \Rightarrow V_{AK} = -R \cdot I_a + V \approx V$$

2° Amorçage sans courant de gâchette

Augmentons progressivement la valeur de V . Je peux dire que les jonctions J_A et J_K ne vont toujours supporter que de faibles tensions et que dès lors la tension appliquée en sens inverse sur la jonction J_C croît, si bien que le champ électrique correspondant augmente. Nous pouvons donc comprendre que si nous continuons à augmenter la valeur de V , nous finirons par nous retrouver dans une situation où le champ électrique sera tel que sous l'action de ce dernier, les minoritaires qui traversent la jonction J_C seront capables de faire entrer cette jonction en régime d'avalanche. A ce moment, le potentiel V_{AK} devient très faible.

$$V_{AK} \ll V \Rightarrow V \approx R \cdot I_a$$

Comme on le voit, le courant I_a n'est limité que par la résistance R . En réalisant une analogie avec le transistor en régime de saturation, ce courant constitue à la fois le courant de collecteur et le courant de base.

Noter que dans ce type de fonctionnement, la conduction du thyristor est très mal contrôlé. Les pertes sont importante au sein du thyristor et pourraient entraîner la destruction de ce dernier.

3° Amorçage par courant de gâchette

A l'aide de l'interrupteur K, réalisons la charge du condensateur. Une fois ce dernier chargé, ouvrons K et à l'aide de B appliquons le potentiel de charge du condensateur entre la gâchette et la cathode du thyristor. Il est clair que nous aurons appliqué un potentiel V positif entre l'anode et la cathode afin de polariser les jonctions J_A et J_K . Nous allons donc avoir circulation d'un courant I_g dans le sens direct de la jonction J_K . Si ce courant est suffisant, le thyristor s'amorce.

$$V_{AK} \approx 1,5V \Rightarrow I_a \approx \frac{V}{R}$$

En raison du dopage important de la couche N de cathode, le courant I_g se caractérise par un flux d'électron allant de K vers G. Comme la distance entre la jonction J_K et J_C est très faible, de nombreux électrons atteignent cette jonction J_C . Or sous l'action du champ électrique dû à la polarisation inverse de cette jonction face à V , les électrons deviennent très énergétiques et dès que leur nombre est suffisant une avalanche locale s'établit en un point particulier de la jonction J_C . Le courant I_a de grande densité s'engouffre dans cette région et si le courant reste supérieur à une valeur dite d'accrochage, les porteurs seront suffisamment nombreux pour que l'avalanche s'étende de proche en proche sur toute la jonction.

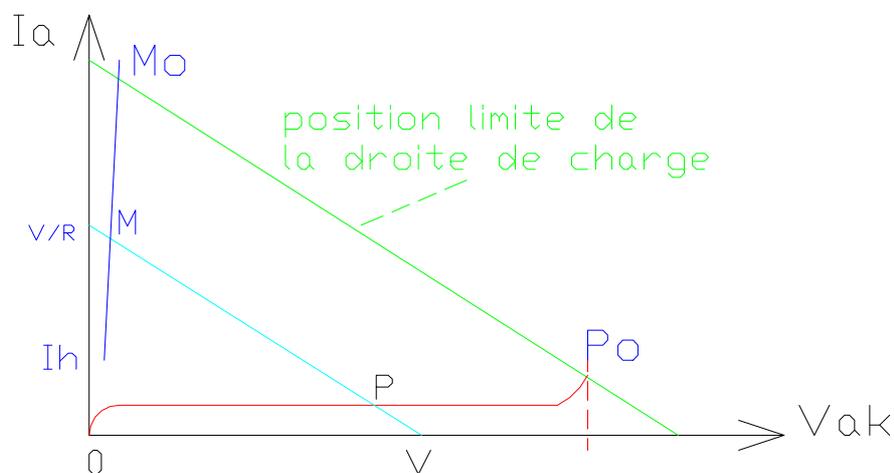
Je peux encore dire que le courant I_a va continuer à croître durant toute la durée

d'avalanche de la jonction et une fois cette dernière terminée, le courant $I_a \approx \frac{V}{R}$. Il va

sans dire que cette situation persistera même après la disparition du courant de gâchette et que seule une inversion de polarité de V ou la disparition de V ou une diminution de V tel que le courant I_a devienne trop faible pour maintenir l'accrochage pourra éteindre le thyristor.

4° Thyristor en régime de conduction

Après l'amorçage, l'équation devient : $V_{AK} = -R \cdot I_a + V$. Si nous faisons varier la tension V , la droite de charge subit une translation horizontale. Le point M décrit la caractéristique quasi verticale du thyristor.



Po est le point d'amorçage correspondant une tension V suffisante que pour amorcer le thyristor sans courant de gâchette. La tension correspondante sur l'axe des abscisses est la tension inverse limite au droit de la jonction J_C . Lors de l'amorçage, le point passe de la position Po vers la position Mo. La tension inverse diminue puisque la jonction conduit et le courant croît puisque les porteurs traversent la jonctions.

Le point M est le point de fonctionnement du thyristor en conduction, on remarque également que si nous augmentons le potentiel V , la courbe va se translater et l'ensemble des points de fonctionnement M formera la droite de fonctionnement du thyristor. Noter encore que le thyristor avant l'impulsion de gâchette se trouve au point P et que dès l'avalanche, ce point se déplace vers M.

2.2. Sous une tension négative

Lorsque le thyristor conduit et que l'on réduit la tension V (soit volontairement soit parce que V est une tension alternative), le point M se déplace vers le bas de la caractéristique et le courant I_a diminue. Lorsque ce dernier devient inférieur à I_h appelé courant de maintien le thyristor se bloque.

Les porteurs mobiles qui avaient envahi les quatre couches de cristal disparaissent par recombinaison et aussi parce qu'ils sont déplacés par une tension V_{AK} négative.

Les jonctions J_A et J_K deviennent très vite bloquantes et capables de supporter une tension inverse.

La jonction J_C cesse d'être en régime d'avalanche un peu plus tard, l'évacuation des porteurs y étant plus lente.

Le blocage d'un thyristor n'est donc pas instantané. De plus il est réversible, ce qui sous-entend que tant que le blocage n'est terminé, la seule apparition d'une tension V_{AK} positive permet de rétablir un courant d'anode.

Lorsque le blocage est terminé, la jonction J_C est dans le sens direct alors que les jonctions J_A et J_K sont dans le sens inverse. Ce sont ces deux dernières qui supportent la tension V_{AK} . Le courant inverse est alors très faible.

Si nous envoyons un courant de gâchette dans cette situation, les jonctions J_A et J_K ne peuvent se mettre en régime d'avalanche et le thyristor ne s'amorce pas.

Si la tension V est rendue de plus en plus négative, les jonctions J_A et J_K se mettent en régime d'avalanche pour une certaine valeur de V_{AK} mais aucun amorçage ne se produit. La tension aux bornes du thyristor reste pratiquement égale à la tension de claquage (très élevée).

3. Propriétés pratiques

3.1. Données du fabricant

Les données sont dépendantes du type de thyristor et des fonctions que ces derniers devront accomplir.

- Intensité moyenne maximale I_m : elle est donnée par un courant mono alternance
- Tension maximale inverse U_{ip}
- Courant de maintien I_h
- Chute de tension δ_u
- Intensité du courant de gâchette produisant à coup sûr l'amorçage I_{gm}
- Durée de désamorçage

3.2. Le courant de gâchette

Le courant de gâchette nécessaire à l'amorçage varie évidemment avec le type de thyristor. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, ce courant varie aussi d'un thyristor à l'autre, à l'intérieur d'une même série de thyristors dits « identiques ». Un équipement comportant des thyristors doit fonctionner sans défaillance et par conséquent, il ne peut être toléré qu'un thyristor présente des ratés d'allumage et reste bloqué alors qu'il doit conduire. Pour ces raisons, le fabricant précise, pour chaque type de thyristor, l'intensité I_{gm} du courant de gâchette qui produit à coup sûr l'amorçage pour n'importe quel élément de la série et ce, quelle que soit la valeur positive ($\geq 1,5V$) de la tension V_{AK} appliquée entre A et K.

3.3. Durée de l'amorçage

Ce temps caractérise la période nécessaire à l'établissement du courant principal (entre l'anode et la cathode) après injection d'un courant de gâchette à front raide. Cela sous-entend une impulsion faisant passer, par exemple, le courant de gâchette de 0 à 100mA en une microseconde. Ce temps est de l'ordre de 10us.

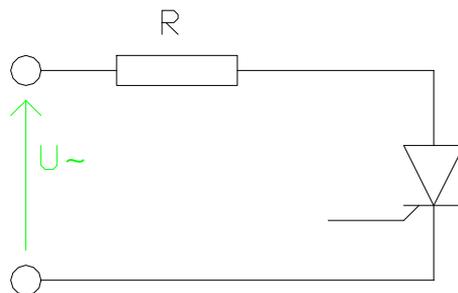
3.4. Durée de blocage

Après disparition du courant de gâchette, ce temps caractérise la période au bout duquel le thyristor supporte à nouveau, sans s'amorcer, une tension directe. Ce temps est de l'ordre de quelques dizaines de micro-secondes.

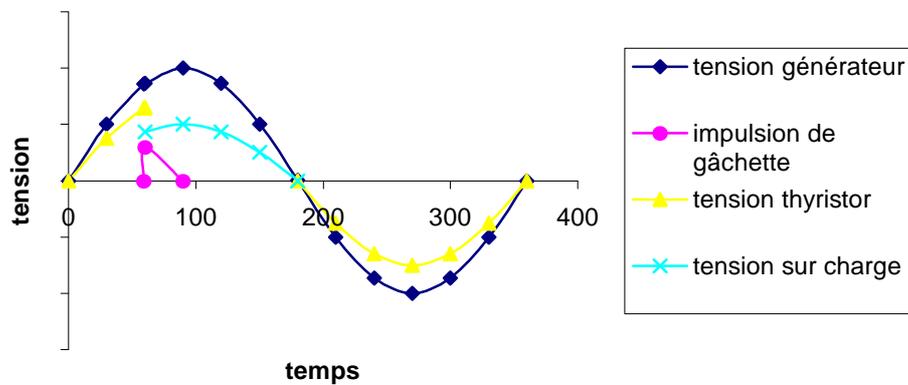
4. Angle de retard

Nous savons à présent que le thyristor pour pouvoir se mettre en conduction doit vérifier deux points important, avoir une tension direct aux bornes du thyristor (anode et cathode) et recevoir une impulsion de gâchette. Si dans le cas d'une diode, la conduction se réalisait à la seule condition que la tension soit direct, dans notre cas cela peut ne pas être le cas.

En pratique, je dois donc placer un générateur d'impulsion afin de commander cycliquement la gâchette du thyristor. Analysons pour le schéma ci-dessous l'allure des tensions.



évolution de la tension de redressement



Précisons que pour une meilleure visibilité, la tension du générateur à été amplifiée par un facteur 2, que la tension thyristor à été amplifiée d'un facteur 1,5 et que les autres tensions sont à l'échelle 1/1.

On remarque clairement que durant la conduction, la tension du thyristor est inexistante. Lors de cette même conduction, le tension apparaît aux bornes de la charge puisque nous avons circulation d'un courant. Le cas dessiné montre que l'impulsion de gâchette à été donnée 60° après le passage en positif de la tension générateur. On voit dès lors que le thyristor ne conduira que 120°. La tension aux bornes de la charge sera donc fonction de ce temps de conduction.

Le temps « t1 » est donc le retard à l'allumage du thyristor par rapport au passage en positif de la tension générateur. L'angle correspondant à $\alpha = \omega.t1$ est l'angle de retard. Il peut être réglé (théoriquement) entre 0 et 180°.

5. Modes de fonctionnement du thyristor

Les circuits de commande des thyristors sont , en général, des circuits permettant de délivrer des impulsions de tension dont on sait régler la fréquence et l'amplitude du signal de sortie.

Au niveau du type de tension d'alimentation, le thyristor peut être soumis à :

- une tension alternative. Dans ce cas, le thyristor se bloque de lui-même à la fin de chaque alternance.
- Une tension continue. Dans ce cas, le circuit de commande d'amorçage du thyristor doit être complété par un circuit de blocage du thyristor.

Au niveau de la tension de gâchette, deux cas peuvent se présenter :

- La tension de commande reste présente pendant tout le temps de conduction du thyristor. Dans ce cas, le circuit de commande peut être complété par un dispositif qui réduit ou supprime le courant de commande avant et après l'amorçage du thyristor, de façon à éviter les pertes au niveau du circuit de gâchette.
- La tension de commande se présente sous forme d'impulsion de tension. C'est ce mode de commande qui est utilisée dans la plupart des cas. Les avantages sont les suivants :
 - Faible puissance dissipée dans le circuit de gâchette, même avec des impulsions largement dimensionnées.
 - Evite les amorçages intempestifs. La gâchette peut être maintenue au potentiel de la cathode entre deux impulsions de commande.
 - Séparation électrique entre le circuit de commande et le circuit de puissance. Dans ce cas, les impulsions sont transmises à la gâchette par l'intermédiaire d'un condensateur ou d'un transformateur.

5.1. L'amorçage

C'est le passage de l'état bloqué à l'état passant lorsque le thyristor est alimenté sous tension directe. On emploie également l'expression : déclenchement du thyristor. L'amorçage est obtenu par application d'un courant de gâchette.

Tant que l'impulsion est insuffisante en intensité et en durée, la conduction du thyristor est rapide, précise et sûre. Noter que une impulsion de gâchette trop faible ou trop courte peut provoquer l'autodestruction du thyristor. Dans ce cas de figure, la portion de jonction qui s'ouvre sous l'influence du courant de gâchette est trop petite et le passage du courant de l'anode vers la cathode crée lors du passage un échauffement thermique entraînant la fusion du semi conducteur.

Une autre situation peut encore se présenter et expliquer l'amorçage d'un thyristor polarisé en direct mais à un potentiel bien en deçà du seuil d'amorçage par retournement et sans courant de gâchette.

Il se fait que la jonction J_C , comme toute autre, possède une capacité parasite C_p . Cette capacité illustre le fait que la jonction de commande n'est pas parfaitement bloquante.

C'est cette capacité qui, sous l'action d'une variation brusque de la tension anode-cathode, se charge et fait en sorte d'être le siège d'un courant ayant le même sens que le courant de gâchette.

Il est aisé de comprendre que cette situation n'est pas à exploiter pour éviter les déclenchements intempestifs.

Si la puissance thermique dissipée par le thyristor est supérieure à celle que peut évacuer son système de refroidissement, la température des jonctions va augmenter. Or on sait que le courant inverse d'une jonction augmente avec la température. Dès lors, si pour une raison ou l'autre, la température des jonctions vient à monter, le courant de fuite de cette jonction augmente et peut être suffisant pour amorcer le thyristor. Noter que le seuil de tension de retournement diminue en fonction de l'élévation de température.

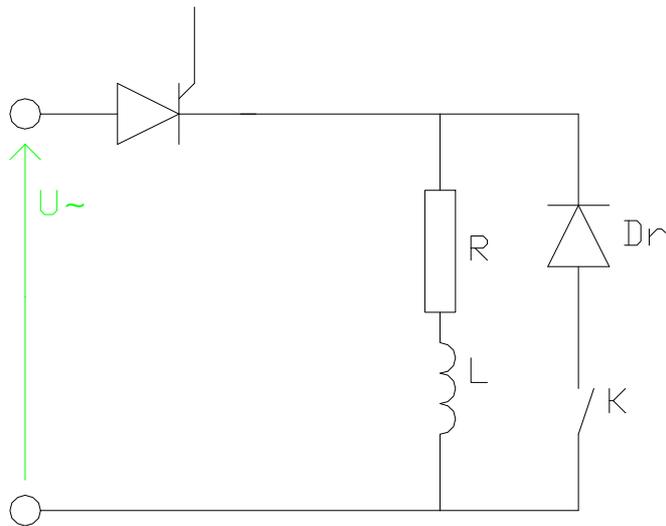
5.2. Le blocage

C'est la passage de l'état passant à l'état bloqué lorsque le thyristor est sous tension directe.

Le blocage se produit lorsque le courant anode-cathode s'annule de façon naturelle ou forcée ou lorsque la tension anode-cathode s'annule.

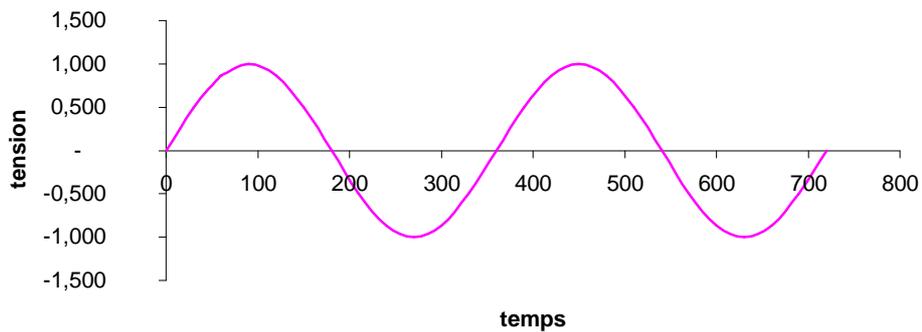
6. Application pratique

6.1. Redressement commandé avec 1 thyristor



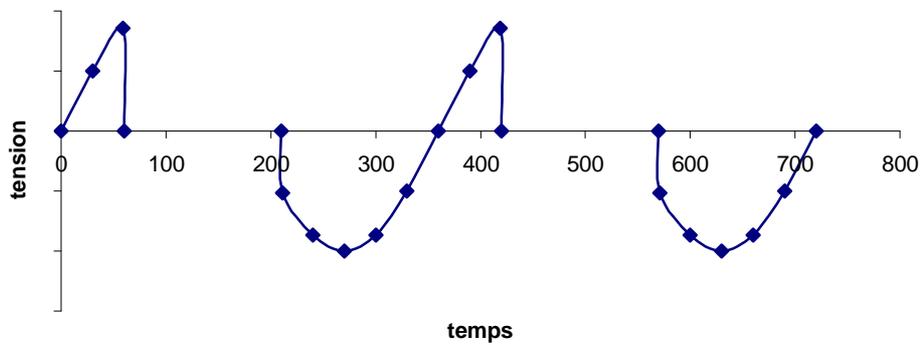
Les allures des tensions aux bornes de la charge et du thyristor nous donne :

Tension générateur

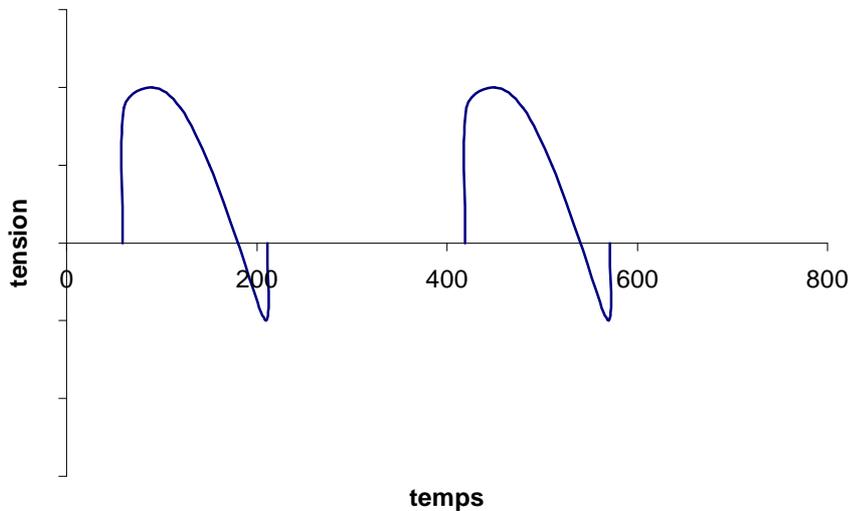


Sans diode de roue libre

Tension A-K thyristor



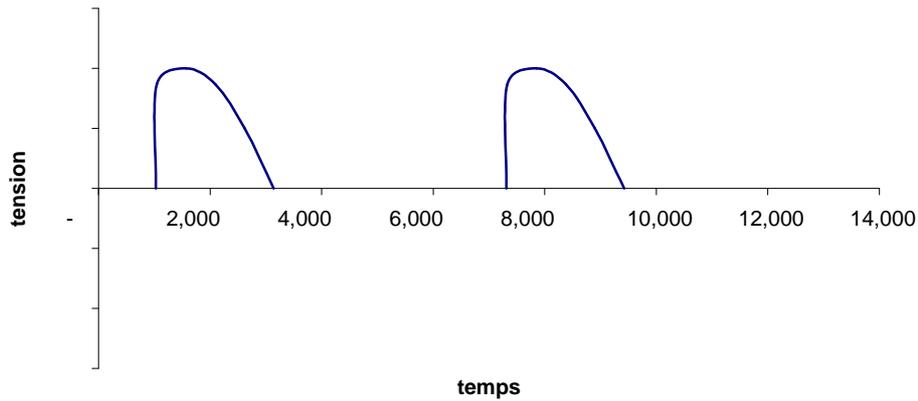
Tension aux bornes de la charge



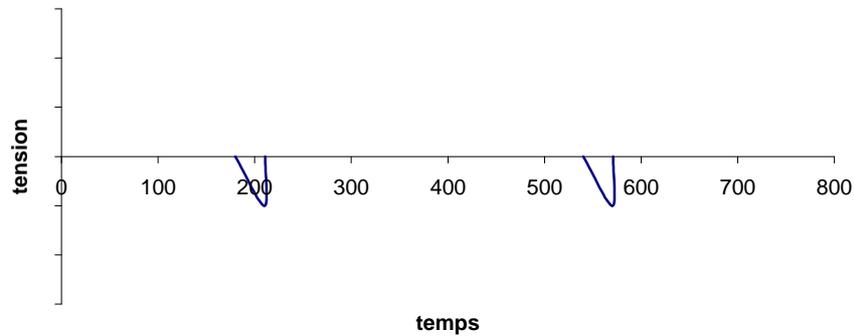
Les courbes nous montre que le thyristor deviens passant après un angle de retard. Ce retard passé, nous appliquons un courant de gâchette et amorçons le thyristor. Ce dernier sera passant jusqu'au changement de polarité à ces bornes. Nous pourrions croire que ce point de basculement correspondra au passage par zéro de la tension du générateur. Les courbes nous montre que le thyristor continue à conduire malgré le passage en négatif de la tension du générateur. En effet, nous avons bien dit que le thyristor conduirait tant que le potentiel à ces bornes resterait positif. Hors nous venons de voir que le potentiel côté anode était devenu négatif. Cela veut dire que le potentiel côté cathode doit donc être plus négatif qu'à l'anode pour expliquer la conduction du thyristor. En réalité, nous nous trouvons dans cette situation car la charge ayant emmagasinée de l'énergie magnétique, elle va pouvoir maintenir un potentiel à ces bornes et ce potentiel va permettre au thyristor de conduire jusqu'à évacuation de cette énergie. Si cette situation ne nous pose aucun problème dans notre cas, il est d'autre cas ou nous pourrions avoir des problèmes. Imaginez-vous deux thyristors placés pour réaliser un redressement bi-alternance, que se passerait-il si le premier thyristor n'est pas éteint lorsque le second se mettra en conduction ? Nous aurons un court-circuit entre phase avec claquage des composants. Pour pallier à cela, nous devons forcer l'arrêt du thyristor en utilisant un artifice qui permettra d'évacuer l'énergie emmagasinée par la charge. Pour ce faire, nous utiliserons une diode de roue libre.

Avec diode de roue libre

Tension A-K thyristor

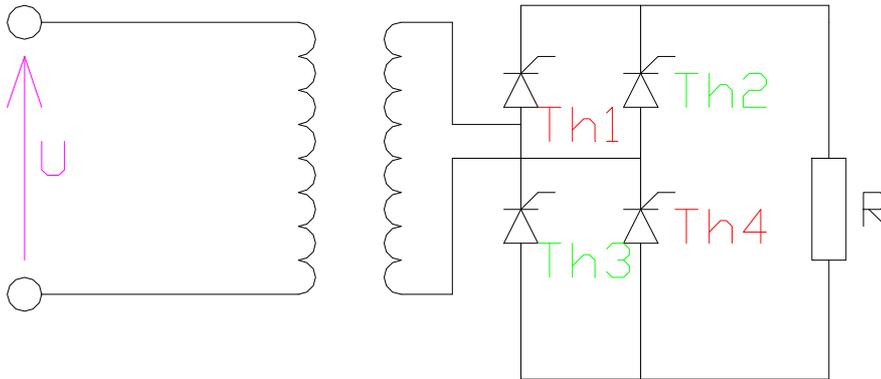


Tension aux bornes diode de roue libre



Je peux remarquer que la diode de roue libre permet un blocage du thyristor dès la mise en conduction de cette dernière. La conduction de cette diode sera donc réalisée lorsque son potentiel la rendra passante, autrement dit lorsque la tension du générateur passera dans son alternance négative. La diode de roue libre va donc réaliser un bypass permettant à la charge d'évacuer son énergie tout en faisant circuler un courant. Une fois cette énergie évacuée, la diode se bloquera à nouveau. Je rappelle que dans un premier temps, lors de la conduction du thyristor la charge est un récepteur mais lorsque la diode de roue libre conduit, la charge est un générateur. Ne perdez pas de vue que le courant lui circule toujours dans le même sens.

6.2. Redressement commandé avec 2 thyristors

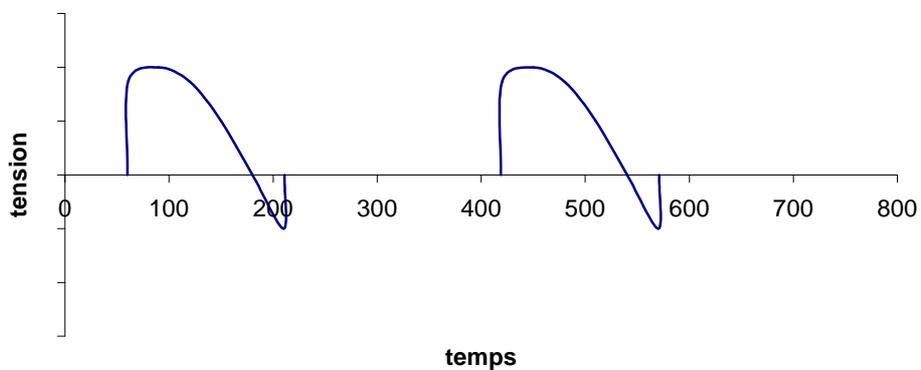


Voici le cas industriel sans aucun doute le plus souvent utilisé en industrie. Le système triphasé fonctionne exactement de la même façon.

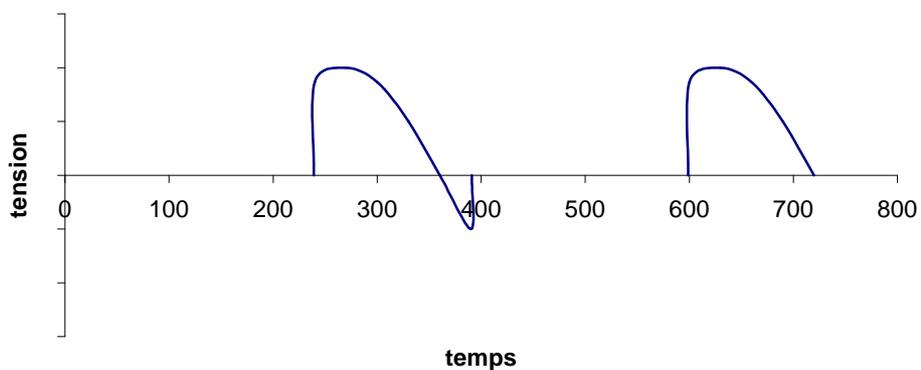
Nous savons dans ce cas de figure que deux thyristors fonctionneront ensemble en mode passant pendant que les deux autres seront en mode bloqué. Ce que nous venons de voir dans la situation précédente va ce confirmer sur cette application.

Analysons l'allure des courbes de tension.

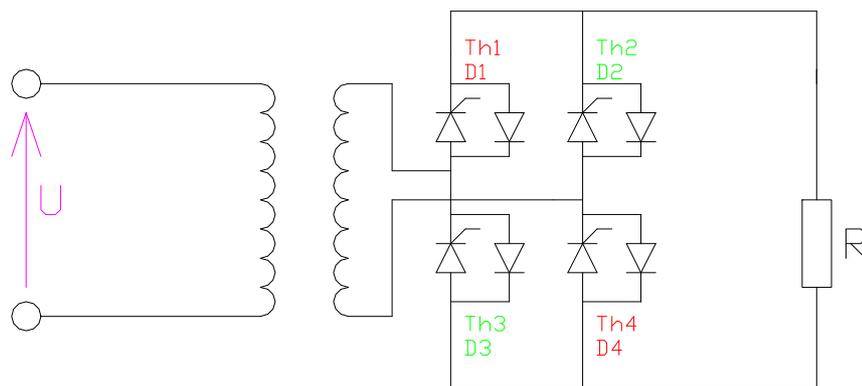
Tension redressée par Th1 et Th4



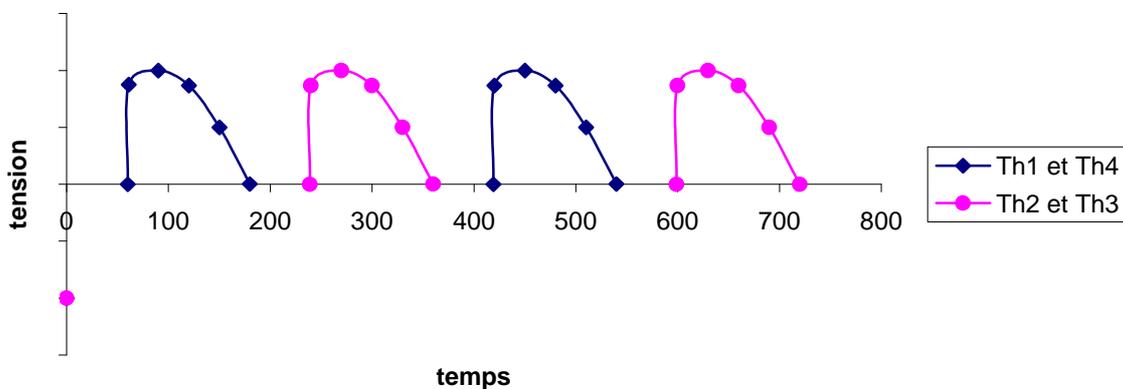
Tension redressée par Th2 et Th3

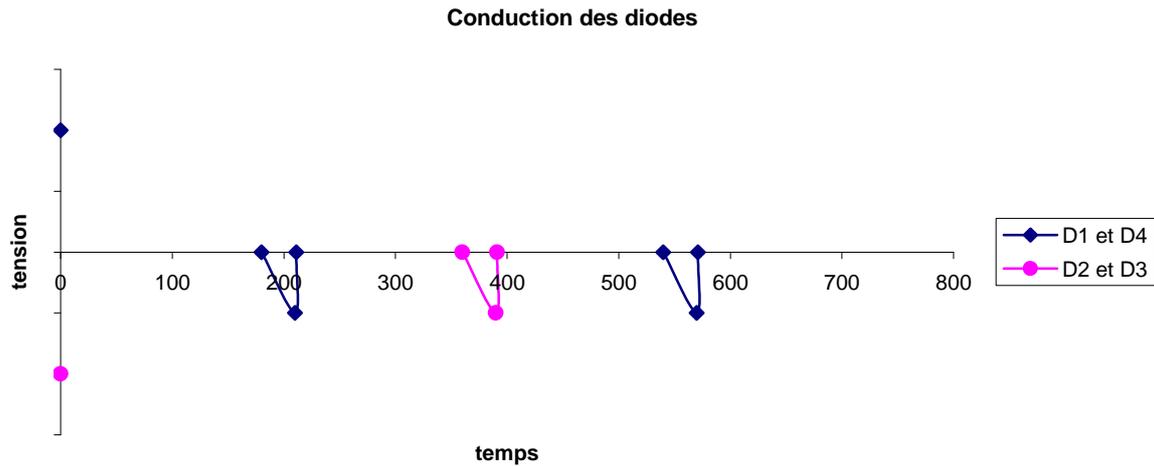


Tout comme pour le redressement par diode, nous remarquons que deux thyristors étant polarisé en direct de façon simultanée, ils seront deux à conduire et ce pendant une demi alternance. La seconde demi alternance mettra en conduction les deux autres thyristors. Nous pouvons encore remarquer que les thyristors conduisent pendant un certain sous tension négative. Etant donné que l'angle de retard est plus important que le temps de blocage du thyristor, nous n'avons pas de problème. Cette méthode nous permettra donc une régulation de $t_1 > \text{temps de mise en repos d'un thyristor et } 180^\circ$. Pour certain thyristor, cette période de réglage est petite. Comme l'utilisation la plus classique de ce type de pont à thyristor est la commande de moteur courant continu avec variation de la vitesse par action sur la tension d'alimentation, nous comprendrons que notre plage de réglage sera d'autant plus réduite que l'angle de retard sera grand. Nous pouvons donc améliorer le système en plaçant en parallèle sur chaque thyristor une diode ou un autre thyristor qui aura pour rôle de ce mettre en conduction et ainsi de forcer le blocage du thyristor. Le schéma devient alors le suivant et les courbes correspondante nous montre la possibilité de réaliser une régulation avec un angle de retard presque nul.



Tension redressée (retard de 60°)





La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge vaudra :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{T/2+t_0} V_M \cdot \sin(\omega t) dt$$

Ce qui donne après changement de variable $V_{moy} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_M \cdot \sin(\omega t) d\omega t$

Ce qui donne $V_{moy} = \frac{2 \cdot V_M}{\pi} \cdot \cos \alpha = 0,636 \cdot V_M \cdot \cos \alpha$ alpha étant l'angle de retard de lancement des impulsions de tension sur les gâchettes des thyristors.

6.3. Fonctionnement en onduleur

Si certaine application exige de réaliser un redressement pour l'attaque de moteur courant continu, d'autre application devront réaliser un réglage de vitesse en jouant sur une tension variable. L'électronique de puissance peut nous aider également dans ce cas de figure. Nous allons reformer un signal alternatif au départ d'un signal continu en réalisant un hachage. Ce dernier sous entend la conduction à un moment précis et durant un temps précis des thyristors.

Pour réaliser ce type de fonctionnement, nous utiliserons des doubles pont de thyristor. La synchronisation des impulsions de gâchette seront très important. En pratique, le changement de consigne de l'angle de retard commun à l'ensemble du système sera réalisé par l'intermédiaire d'un potentiomètre. Pendant la formation de la première alternance de notre signal alternatif, seul deux thyristors réaliseront la conduction et deux autres placé en parallèle permettront de les bloquer. Nous pourrions ici exploiter le fait que le thyristor s'il n'est pas complètement bloqué peut s'amorcer à nouveau instantanément.

7. Page technique

I_{TRMS} : valeur efficace du courant

I_{TAV} : valeur moyenne du courant

I_{GT} : courant d'amorçage par la gâchette

V_{DRM} : tension de pointe répétitive à l'état bloqué

V_{TM} : tension de crête à l'état passant

$\frac{di}{dt}$: vitesse de croissance du courant à l'état passant

$\frac{dv}{dt}$: vitesse de croissance de la tension à l'état bloqué

t_q : temps de désamorçage

Thyristors ordinaires

Type	I_{TRMS} (A)	I_{TAV} (A)	V_{TM} (V)	V_{DRM} (V)	I_{GT} (mA)	$\frac{di}{dt}$ (A/us)	$\frac{dv}{dt}$ (V/us)	t_q (us)
TYN 806	8	3,8	1,6	600	15	50	50	
TBW 48-800	50	32	1,8	800	60	100	200	
TN 933-14	1900	1210	1,35	1400	200		300	

Thyristors rapides

Type	I_{TRMS} (A)	I_{TAV} (A)	V_{TM} (V)	V_{DRM} (V)	I_{GT} (mA)	$\frac{di}{dt}$ (A/us)	$\frac{dv}{dt}$ (V/us)	t_q (us)
BT 153	6	4		500	40	200	200	
TLF 4006	3	2	2,2	400	50	100	100	
TF 915 14(Z)	1560	955	1,75	1400	200	800	300	