Chapitre 2

Mécanismes de commutation dans les convertisseurs à thyristors

Contenu

1- Notion de commutations naturelle et forcée

Les techniques de commutation des thyristors sont classées en deux types: Commutation naturelle et Commutation forcée.

Commutation naturelle

La commutation naturelle ou par la ligne (dite aussi assistée par le réseau) est une technique de commutation dans laquelle un thyristor idéal est désamorcé en raison du passage naturel de son courant direct à zéro suivie d'une polarisation inverse de la tension à ses bornes. Dans ce cas le thyristor est désamorcé naturellement sans utiliser de circuits externes. C'est la source d'alimentation qui prend part de cette commutation.

Applications : Redresseurs, gradateurs et cycloconvertisseurs.

Commutation forcée

Dans ce cas, le thyristor doit être forcé à se bloquer à l'aide d'un circuit externe dit cellule d'extinction[1] dont le rôle est de polariser le thyristor en inverse ou d'annuler son courant direct. Le circuit externe utilisé pour le processus de commutation forcée est appelé aussi circuit de commutation et ses éléments sont appelés éléments de commutation. A noter que dans ce cas de figure la source d'alimentation n'intervient pas dans la commutation.

Applications : Hacheurs et onduleurs à thyristors.

[1] Cellule d'extinction est un circuit auxiliaire capable de bloquer un thyristor.

Les circuits d'ouverture forcée d'un thyristor sont nombreux; les plus utilisés sont :

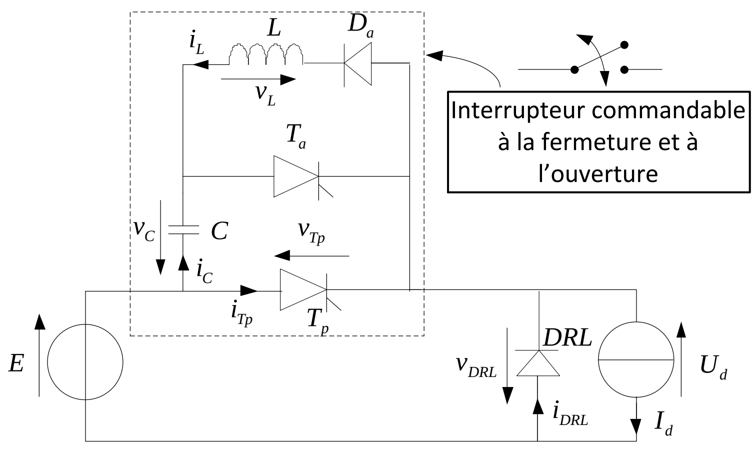
- Circuits à blocage en tension

- Circuits à blocage en courant

2- Circuit à blocage en tension

Hypothèse

Le courant de charge est supposé constant pendant la commutation.



Hacheur série à thyristors

Dans le montage ci-contre :

T_p : Désigne le thyristor principal

T_a : Désigne le thyristor auxiliaire

D_a : Désigne la diode auxiliaire

DRL : Désigne la diode de roue libre

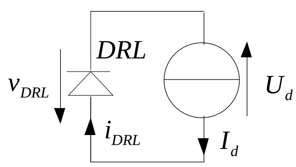
Analyse du fonctionnement

Séquence 0 : Phase de roue libre

A $t < t_0$, on admet que :

1- La diode DRL est passante seule et conduit le courant I_d . Donc :

- $U_d = 0$
- $i_{DRL} = I_d$



2- Le condensateur de capacité *C* est chargé et soumis à une tension $v_c(t \le t_0) = v_0 > 0$ (à calculer).

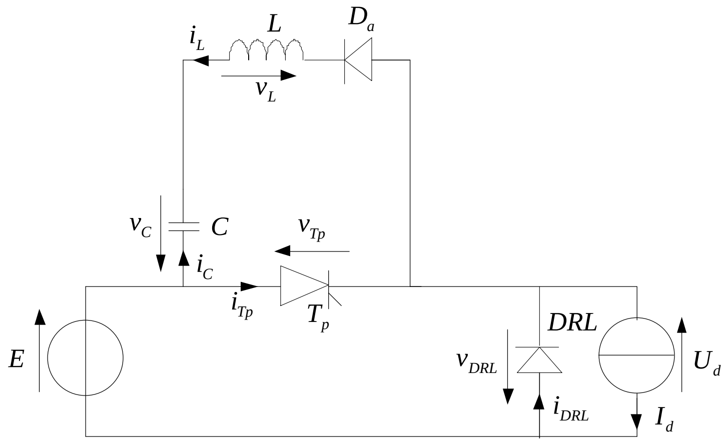
Durant cette phase, $v_{TP}(t \le t_0) = E > 0$, le thyristor principal est amorçage.

Séquence 1 : Fermeture du hacheur

A $t = t_0$, on amorce T_p, ce qui en résulte :

- $v_{TP} = 0$

- $v_{DRL} = -E < 0$, la DRL se bloque



- T_a reste bloqué (absence du signal de commande)

- $v_{Da}(t_0) = v_C(t_0) - v_L(t_0) \simeq v_C(t_0) \simeq v_0 > 0,$ la diode D_a entre donc en conduction

Nous avons

$$v_C = v_L = L\frac{di_L}{dt} \text{ or } i_L = -i_C = -C\frac{dv_C}{dt} \text{ ce qui donne } v_C = -LC\frac{d^2v_C}{dt^2} \text{ donc } LC\frac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$$

avec les conditions initiales suivantes $v_C(t_0) = v_0$ et $\frac{dv_C(t_0)}{dt} = -\frac{1}{C}i_L(t_0) = 0$

La solution de l'équation différentielle donnant la tension aux bornes du condensateur peut être mise sous la forme suivante :

$$v_C(t) = A\cos(\omega(t-t_0)) + B\sin(\omega(t-t_0)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes *A* et *B* sont à calculer en appliquant les conditions initiales suivantes.

- $v_C(t_0) = v_0 = A$

- $\frac{dv_C(t_0)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t) = v_0\cos(\omega(t-t_0))$

Ce qui en résulte : $i_L(t) = -i_C(t) = v_0C\omega\sin(\omega(t-t_0))$ et $i_{TP}(t) = I_d + i_L(t) = I_d + v_0C\omega\sin(\omega(t-t_0))$

L'intensité $i_L(t)$ s'annule à l'instant $t = t_1$ calculé par :

$i_L(t_1) = 0 \Rightarrow \sin(\omega(t_1 - t_0)) = 0$, ce qui donne $\omega(t_1 - t_0) = \pi \Rightarrow t_1 - t_0 = \frac{\pi}{\omega}$

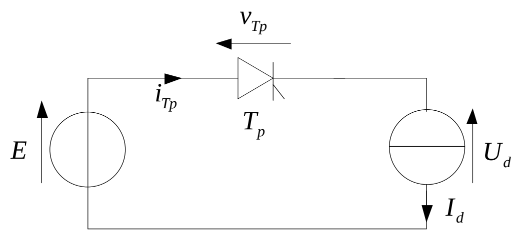
A cet instant, la diode cesse de conduire et sa tension devient :

$v_C(t_1) = -v_0$

Séquence 2 : hacheur fermé

A $t > t_1$:

- Le thyristor principal T_p conduit le courant de charge I_d : $i_{Tp} = I_d$



- La tension aux bornes de la charge : $U_d = E$

- Le condensateur est chargé sous une tension $v_C = -v_0$

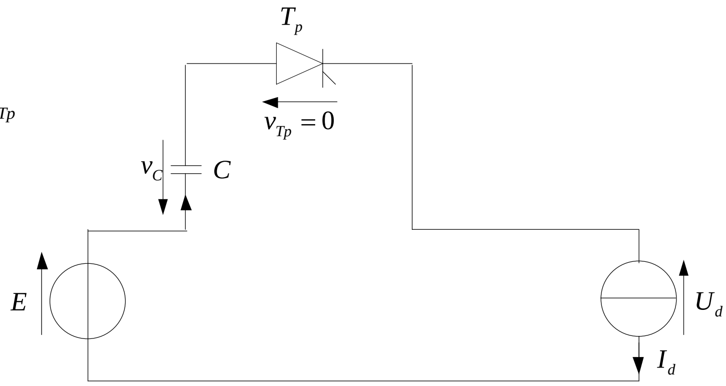
- La diode de roue libre est polarisée en inverse : $v_{DRL} = -E < 0$

- Le thyristor auxiliaire est amorçable : $v_{Ta} = -v_C = v_0 > 0$

Le hacheur reste fermé jusqu'à l'instant $t_2 = \alpha T + t_0$ où il est possible de l'ouvrir.

Séquence 3 : Début de la phase d'ouverture du hacheur

A $t = t_2$, on amorce le thyristor T_a, ce qui en résulte : $v_{Ta} = 0$ et $v_{Tp} = v_C = -v_0 < 0$, ce qui conduit au blocage du thyristor T_p. Le courant de charge circule maintenant à travers le condensateur *C* et le thyristor T_a. Ce qui donne :



$$i_C = I_d = C\frac{dv_C}{dt} > 0 \Rightarrow v_C(t) = \frac{I_d}{C}(t - t_2) - v_0 = v_{Tp}$$

La capacité se charge sous un courant constant.

La diode *DRL* reste bloquée du fait que : $v_{DRL} = v_C - E = -v_0 - E < 0$

La tension aux bornes de la charge est : $U_d(t) = E - v_C(t) = E - \frac{I_d}{C}(t - t_2) + v_0 = -v_{DRL}$

La tension U_d, de pente négative, diminue et s'annule à l'instant $t = t_3$ tel que $U_d(t_3) = 0$, ce qui implique: $\frac{I_d}{C}(t_3 - t_2) = E + v_0$, donc $t_3 - t_2 = \frac{C}{I_d}(E + v_0)$

A cet instant :

- la diode *DRL* entre en conduction

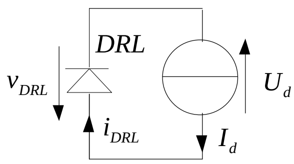
- la tension aux bornes du condensateur est $v_C(t_3) = E$

- le thyristor auxiliaire se bloque

Séquence 4 : Phase de roue libre

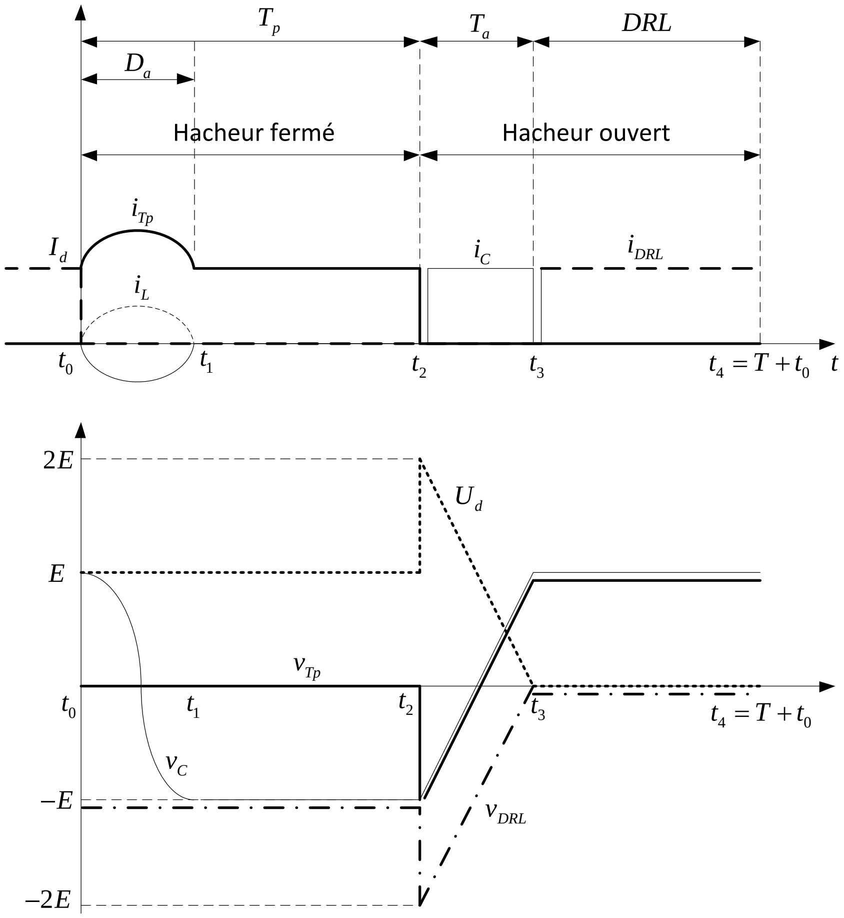
A $t > t_3$, la diode *DRL* est passante seule et conduit le courant de charge.

- $U_d = 0$
- $i_{DRL} = I_d$
- $v_C = E$



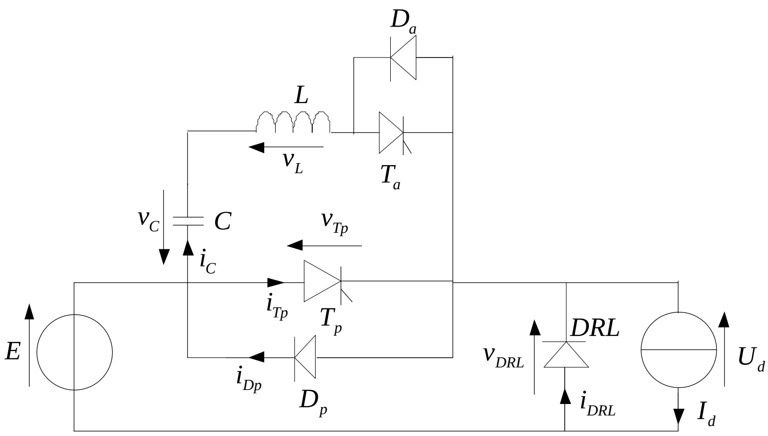
Durant cette phase le condensateur est chargé sous une tension $v_C = E$. C'est une phase identique à celle que nous avons décrit pour $t < t_0$. En faisant la comparaison, nous déduisons que : $v_0 = E$.

Les allures des différentes grandeurs sont illustrées sur la figure ci-dessous.



Le circuit de blocage en tension impose à la charge et la DRL une surtension importante.

3- Circuit à blocage en courant



Soit le hacheur série à thyristors de la figure ci-contre.

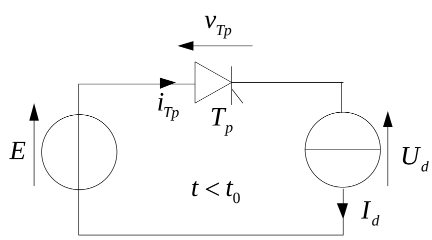
Analyse de fonctionnement

Séquence 0

A $t < t_0$: on admet que :

- Le thyristor principal T_p conduit le courant de charge : $v_{Tp}(t < t_0) = 0,\ i_{Tp} = I_d$

- Tous les autres éléments sont bloqués



Dans cette phase, nous avons :

- La tension aux bornes de la charge est: $U_d = E$

- Le condensateur est chargé sous une tension: $v_C(t_0) = -v_0$

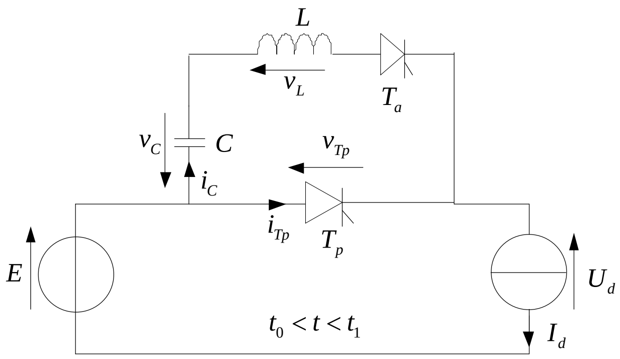
- La tension aux bornes du thyristor auxiliaire: $v_{Ta}(t_0) = v_0$

Séquence 1 : Début de la phase de blocage du thyristor principal

A $t = t_0$, on amorce le thyristor T_a

- La loi des nœuds donne : $i_{Tp} + i_C = I_d$

- La loi des mailles donne : $v_C + v_L = 0$



Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$

Avec $v_C(t_0) = -v_0$ et $\dfrac{dv_C(t_0)}{dt} = \dfrac{\overset{0}{i_C(t_0)}}{C} = 0$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = A\cos(\omega(t - t_0)) + B\sin(\omega(t - t_0)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes *A* et *B* sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_0) = -v_0 = A$
- $\dfrac{dv_C(t_0)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t) = -v_0\cos(\omega(t - t_0))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = Cv_0\omega\sin(\omega(t - t_0)) = v_0\sqrt{\dfrac{C}{L}}\sin(\omega(t - t_0))$

$$i_{Tp}(t) = I_d - i_C(t) = I_d - v_0\sqrt{\frac{C}{L}}\sin(\omega(t - t_0))$$

Le thyristor T_p se bloque à l'instant $t = t_1$ définit par :

$$i_{Tp}(t_1) = 0 \Rightarrow v_0\sqrt{\frac{C}{L}}\sin(\omega(t_1 - t_0)) = I_d \Rightarrow t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega}\arcsin\Big(\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}}\Big) = \sqrt{LC}\arcsin\Big(\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}}\Big)$$

A cet instant on a:

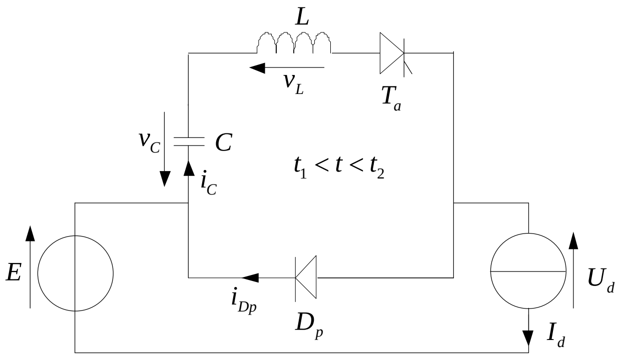
- La tension aux bornes du condensateur : $v_C(t_1) = -v_0\cos\Big(\arcsin\Big(\dfrac{I_d}{v_0}\sqrt{\dfrac{L}{C}}\Big)\Big) = -v_0\sqrt{1 - \Big(\dfrac{I_d}{v_0}\sqrt{\dfrac{L}{C}}\Big)^2} = v_{c1} < 0$

- La diode parallèle D_p entre en conduction.

- La tension aux bornes de la charge est $U_d = E$.

Séquence 2, $t > t_1$

Cette phase, durant laquelle T_a et D_p sont conducteurs, est identique à la phase précédente du fait que la conduction de la diode n'a aucune influence sur la maille d'évolution de $i_C(t)$ et $v_C(t)$. Donc :



$$v_C(t) = -v_0 \cos(\omega(t - t_0))$$

$$i_C(t) = v_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega(t - t_0))$$

$$i_{Dp}(t) = i_C(t) - I_d = v_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega(t - t_0)) - I_d$$

Le courant dans la diode D_p s'annule à l'instant t_2 définit par : $i_{Dp}(t_2) = 0$, ce qui en découle :

$$\sin(\omega(t_2 - t_0)) = \frac{I_d}{v_0} \sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow t_2 - t_0 = \frac{1}{\omega}(\pi - \arcsin(\frac{I_d}{v_0} \sqrt{\frac{L}{C}}))$$

A ce moment, la diode D_p se bloque et la tension aux bornes du condensateur ainsi que le courant qui la traverse deviennent :

$$v_C(t_2) = -v_0 \cos(\pi - \arcsin(\frac{I_d}{v_0} \sqrt{\frac{L}{C}})) = v_0 \sqrt{1 - (\frac{I_d}{v_0} \sqrt{\frac{L}{C}})^2} = v_{c2} = -v_{c1} > 0$$

$$i_C(t_2) = v_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\pi - \arcsin(\frac{I_d}{v_0} \sqrt{\frac{L}{C}})) = I_d$$

La tension aux bornes de la diode :

$$v_{DRL}(t_2) \simeq v_{C2} - E$$

Si $v_{C2} < E$, la DRL reste bloquer et T_a conduit seul à partir de l'instant t_2 ;

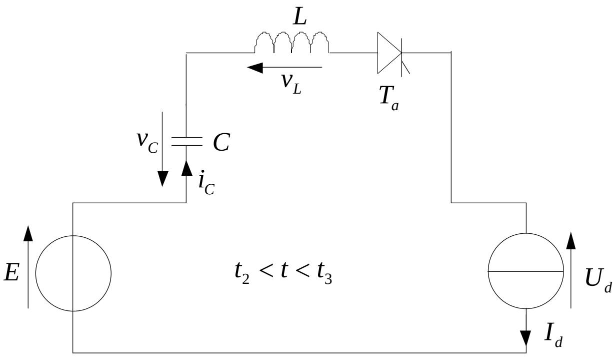
Si $v_{C2} > E$, la DRL entre en conduction à partir de l'instant t_2 .

Séquence 3 (avec $v_{C2} < E$)

Durant cette phase le thyristor auxiliaire conduit seul.

Le condensateur est traversé par le courant de charge : $i_c = I_d = C\dfrac{dv_C}{dt}$ avec $v_C(t_2) = v_{C2}$, ce qui en résulte :

$$v_C(t) = v_{C2} + \frac{I_d}{C}(t - t_2)$$



La tension aux bornes de la charge est:

$$U_d = E - v_C = E - v_{C2} - \frac{I_d}{C}(t - t_2)$$

La tension aux bornes de la diode *DRL* est

$$v_{DRL} = -U_d$$

La diode *DRL* entre en conduction à $t = t_3$; le moment où la tension U_d s'annule. Cet instant est définit par : $U_d(t_3) = 0$, donc :

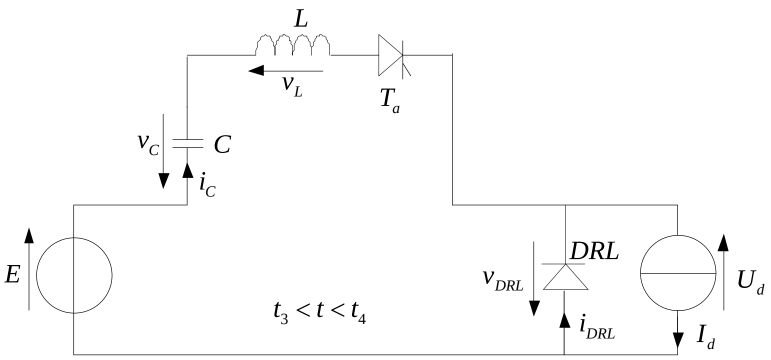
$$E - v_{C2} - \frac{I_d}{C}(t_3 - t_2) = 0 \Rightarrow t_3 - t_2 = \frac{C}{I_d}(E - v_{C2})$$

A cet instant, on a :

$$v_C(t_3) = E$$

Séquence 4 (avec $v_{C2} < E$)

Durant cette phase T_a et *DRL* conduisent simultanément. Ce qui nous permet d'écrire :



- $U_d = 0$
- $I_d = i_C + i_{DRL}$
- $v_C + v_L = E$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt}$

$$\Rightarrow v_L = LC\frac{d^2v_C}{dt^2}$$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = E$

Avec $v_C(t_3) = E$ et $\dfrac{dv_C(t_3)}{dt} = \dfrac{i_C(t_3)}{C} = \dfrac{I_d}{C}$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = E + A\cos(\omega(t-t_3)) + B\sin(\omega(t-t_3)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes A et B sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_3) = E = E + A \Rightarrow A = 0$
- $\frac{dv_C(t_3)}{dt} = B\omega = \frac{I_d}{C} \Rightarrow B = \frac{I_d}{C\omega}$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t) = E + \frac{I_d}{C\omega}\sin(\omega(t-t_3))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = I_d\cos(\omega(t-t_3))$

Le courant dans la *DRL* est : $i_{DRL}(t) = I_d - i_C = I_d(1-\cos(\omega(t-t_3)))$

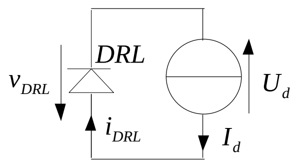
Lorsque le courant i_C s'annule, le thyristor T_a se bloque à l'instant t_4 tel que : $i_C(t_4) = 0$, donc :

$$\cos(\omega(t_4-t_3)) = 0 \Rightarrow t_4 - t_3 = \frac{\pi}{2\omega}$$

A cet instant, on a donc :

$$v_C(t_4) = E + \frac{I_d}{C\omega} = v_{C4} > 0$$

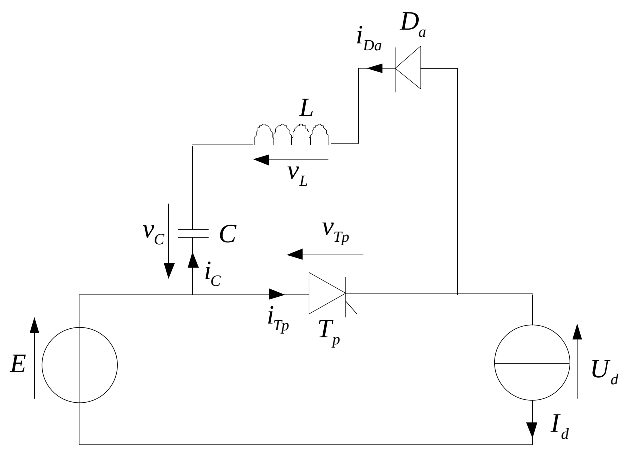
Séquence 5 (avec $v_{C2} < E$)



Durant cette phase, la diode DRL est passante seule. Dans ce cas, nous avons :

- $U_d = 0$
- $I_{DRL} = I_d$
- $v_C = E + \frac{I_d}{C\omega} = v_{C4}$

Séquence 6 (avec $v_{C2} < E$)



C'est la phase de déclenchement du hacheur.

A $t = t_5 = T$ on amorce T_p, ce qui conduit à :

- Conduction de T_p : $v_{Tp} = 0$

- Conduction de la diode D_a ($v_{Da}(t_5) \simeq v_C(t_5) = v_C(t_4) > 0$)

- Tension aux bornes de la charge : $U_d = E$

- La loi des nœuds : $i_{Tp} = i_{Da} + I_d = I_d - i_C$

- La loi des mailles : $v_C + v_L = 0$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$

Avec $v_C(t_5) = v_{C4}$ et $\dfrac{dv_C(t_5)}{dt} = \dfrac{\overset{0}{i_C(t_5)}}{C} = 0$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$v_C(t) = A\cos(\omega(t-t_5)) + B\sin(\omega(t-t_5))$; avec $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$

Les constantes *A* et *B* sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_5) = v_{C4} = A$
- $\dfrac{dv_C(t_5)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où l'expression de la tension aux bornes du condensateur $v_C(t)$: $v_C(t) = v_{C4}\cos(\omega(t-t_5))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = -C\omega v_{C4}\sin(\omega(t-t_5)) = -i_{Da}(t)$

Le courant du thyristor T_p : $i_{Tp}(t) = I_d + C\omega v_{C4}\sin(\omega(t-t_5))$

La diode D_a se bloque au moment où le courant i_{Da} s'annule à t_6 définit par : $i_{Da}(t_6) = 0$

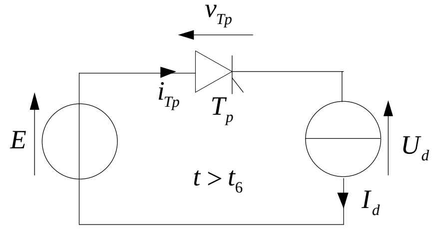
$\sin(\omega(t_6-t_5)) = 0 \Rightarrow t_6 - t_5 = \dfrac{\pi}{\omega} = \pi\sqrt{LC}$

A cet instant

$v_C(t_6) = -v_{C4}$

Séquence 7 (avec $v_{C2} < E$)

Durant cette phase, le thyristor principal conduit seul le courant de charge. Nous avons :

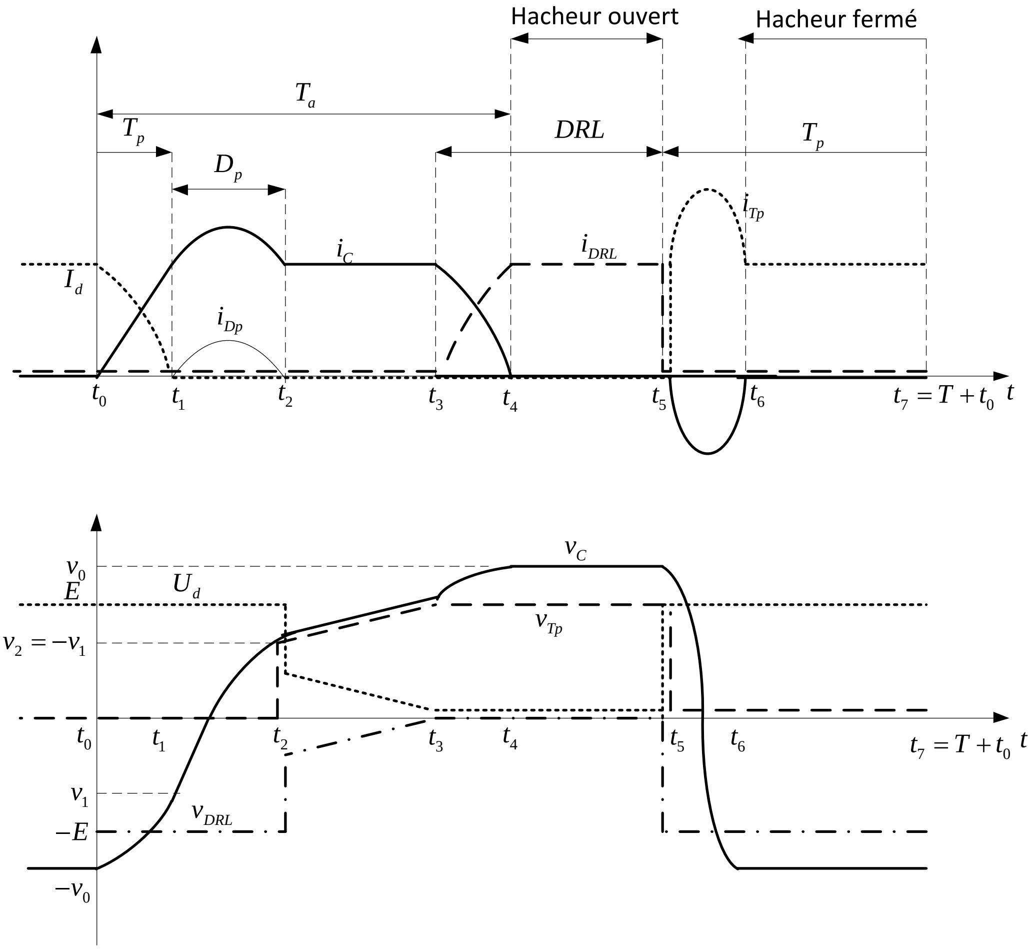


- $U_d = E$
- $I_{Tp} = I_d$
- $v_C = -v_{C4}$
- $v_{Ta} = v_{C4}$, le thyristor auxiliaire est amorçable.

Cette phase est identique à celle décrite pour $t < t_0$. Par identification, on peut en déduire la valeur de v_0. En effet :

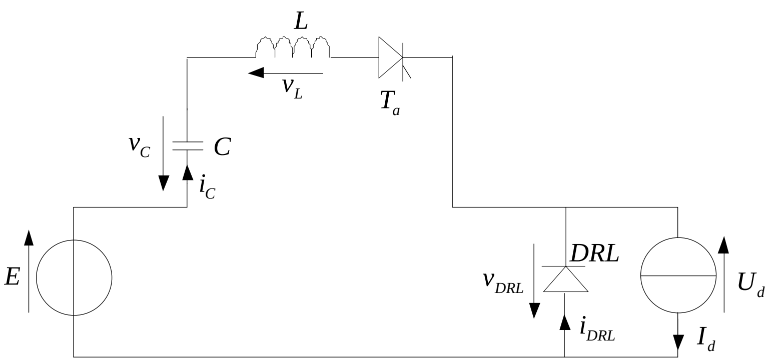
$v_0 = v_{C4}$

Les formes des différents tensions et courants pour $v_{C2} < E$ sont présentées sur la figure ci-dessous.



Séquence 3 (avec $v_{C2} > E$)

Durant cette phase le thyristor auxiliaire et la diode de roue libre conduisent simultanément.



Ce qui nous permet d'écrire :

- $U_d = 0$
- $I_d = i_C + i_{DRL}$
- $v_C + v_L = E$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2 v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}+v_C=E$

Avec $v_C(t_2)=v_{C2}$ et $\dfrac{dv_C(t_2)}{dt}=\dfrac{i_C(t_2)}{C}=\dfrac{I_d}{C}$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$v_C(t)=E+A\cos(\omega(t-t_2))+B\sin(\omega(t-t_2))$; avec $\omega=\dfrac{1}{\sqrt{LC}}$

Les constantes A et B sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_2)=v_{C2}=E+A \Rightarrow A=v_{C2}-E$
- $\dfrac{dv_C(t_2)}{dt}=B\omega=\dfrac{I_d}{C}\Rightarrow B=\dfrac{I_d}{C\omega}$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t)=E+(v_{C2}-E)\cos(\omega(t-t_2))+\dfrac{I_d}{C\omega}\sin(\omega(t-t_2))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t)=-C\omega(v_{C2}-E)\sin(\omega(t-t_2))+I_d\cos(\omega(t-t_2))$

Le thyristor T_a se bloque à l'instant $t=t_3$, tel que $i_C(t_3)=0$. Donc :

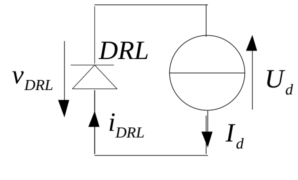
$$\tan((\omega(t_3-t_2))=\frac{I_d}{C\omega(v_{C2}-E)}\Rightarrow t_3-t_2=\frac{1}{\omega}\arctan(\frac{I_d}{C\omega(v_{C2}-E)})=\sqrt{LC}\arctan(\sqrt{\frac{L}{C}}\frac{I_d}{(v_{C2}-E)})$$

A cet instant, on a :

$$\begin{aligned} v_C(t_3)&=E+(v_{C2}-E)\cos(\omega(t_3-t_2))+\frac{I_d}{C\omega}\sin(\omega(t_3-t_2))\\ &=E+\sqrt{(v_{C2}-E)^2+(\frac{I_d}{C\omega})^2}\cos(\omega(t_3-t_2)-\varphi);\quad \varphi=\arctan(\frac{I_d}{C\omega(v_{C2}-E)})\\ &=E+\sqrt{(v_{C2}-E)^2+(\frac{I_d}{C\omega})^2}=v_{C3}>0\end{aligned}$$

Séquence 4 (avec $v_{C2}>E$)

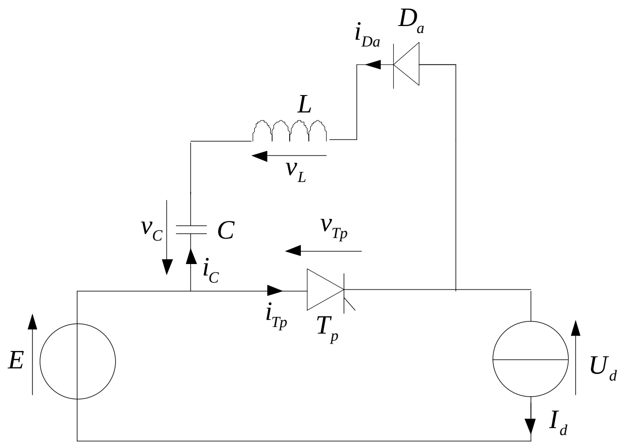
Durant cette phase, la diode DRL conduit la totalité du courant de la charge. Dans ce cas, nous avons :



- $U_d=0$
- $I_{DRL}=I_d$
- $v_C=E+\sqrt{(v_{C1}-E)^2+(\dfrac{I_d}{C\omega})^2}=v_{C3}$
- $v_{Tp}=E>0$, le thyristor principal est amorçable.

Séquence 5 (avec $v_{C2} > E$)

A $t = t_4 = T$ on amorce T_p, ce qui conduit à :



- Conduction de T_p : $v_{Tp} = 0$

- Conduction de la diode D_a ($v_{Da}(t_4) \simeq v_C(t_4) > 0$) :
$v_{D_a} = 0$

- Tension aux bornes de la charge : $U_d = E$

- La loi des nœuds donne : $i_{Tp} = i_{Da} + I_d = I_d - i_C$

- La loi des mailles donne : $v_C + v_L = 0$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D’où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$

Avec $v_C(t_4) = v_{C3}$ et $\dfrac{dv_C(t_4)}{dt} = \dfrac{\overset{0}{i_C(t_4)}}{C} = 0$

La solution de l’équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = A\cos(\omega(t - t_4)) + B\sin(\omega(t - t_4)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes *A* et *B* sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_4) = v_{C3} = A$
- $\dfrac{dv_C(t_4)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D’où l’expression de la tension aux bornes du condensateur $v_C(t)$: $v_C(t) = v_{C3}\cos(\omega(t - t_4))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = -C\omega v_{C3}\sin(\omega(t - t_3)) = -i_{Da}(t)$

Le courant du thyristor T_p : $i_{Tp}(t) = I_d + C\omega v_{C3}\sin(\omega(t - t_4))$

La diode D_a se bloque au moment où le courant i_{Da} s’annule à t_5 définit par : $i_{Da}(t_5) = 0$

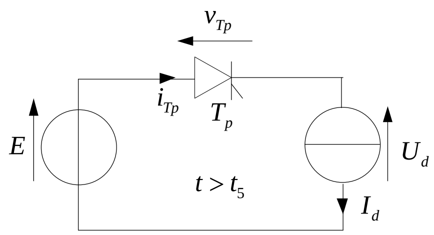
$$\sin(\omega(t_5 - t_4)) = 0 \Rightarrow t_5 - t_4 = \frac{\pi}{\omega} = \pi\sqrt{LC}$$

A cet instant, on a :

$v_C(t_5) = -v_{C3}$

Séquence 6 (avec $v_{C2} > E$)

Durant cette phase, le thyristor principal conduit seul le courant de charge. Nous avons :

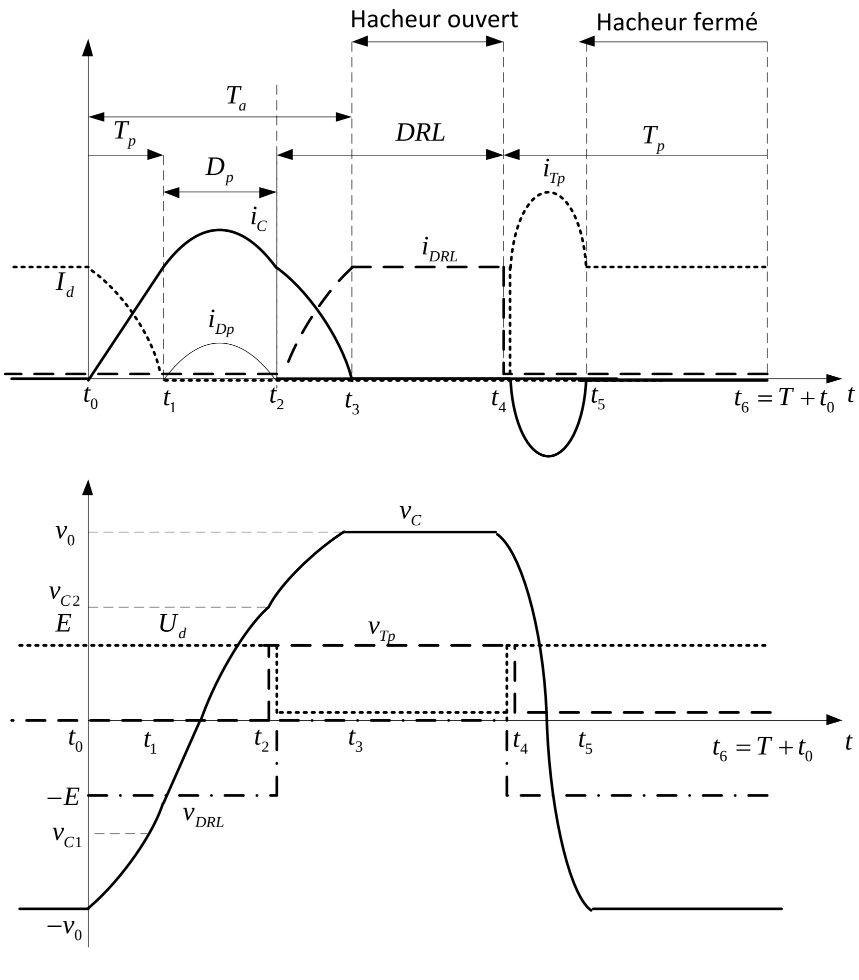


- $U_d = E$
- $I_{Tp} = I_d$
- $v_C = -v_{C4}$
- $v_{Ta} = v_{C4}$, le thyristor auxiliaire est amorçable.

Cette phase est identique à celle décrite pour $t < t_0$. Par identification, on peut en déduire la valeur de v_0. En effet :

$v_0 = v_{C4}$

Les formes des différents tensions et courants pour $v_{C2} > E$ sont présentées sur la figure ci-dessous.

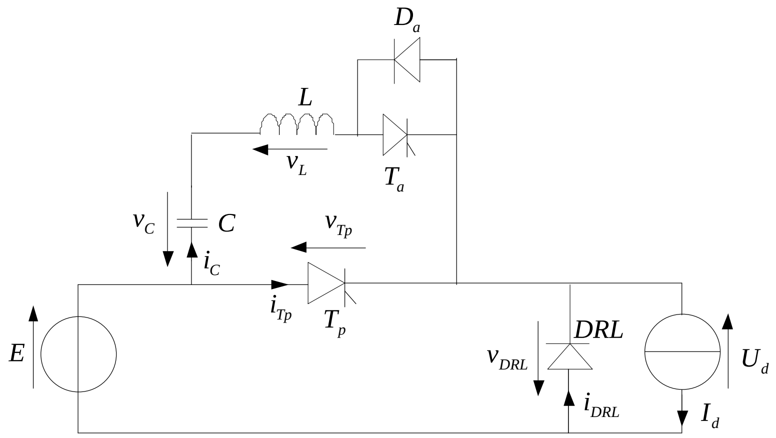


Exemple :

- Analyser le fonctionnement du montage ci-dessous tout en admettons que dans la phase initiale le thyristor principal conduit seul le courant de charge et le condensateur est supposé chargé sous une tension $v_C(0) = -v_0$.

- Tracer les formes d'ondes des courants $i_C(t)$, $v_{Tp}(t)$, $v_{DRL}(t)$, ainsi que celles des tensions $v_C(t)$, $v_{Tp}(t)$, $U_d(t)$.

- Calculer la valeur de la capacité nécessaire pour assurer le blocage du thyristor principal.

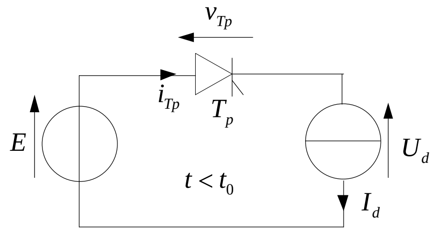


Solution :

- Analyse du fonctionnement du montage sur une période

Séquence 0 :

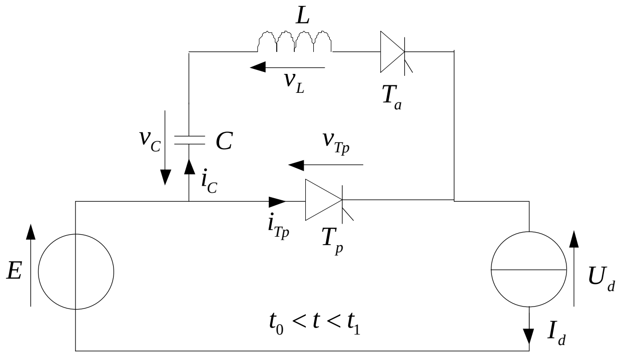
Durant cette phase, le thyristor principal conduit seul le courant de charge. Nous avons :



- $U_d = E$
- $I_{Tp} = I_d$
- $v_C = -v_0$
- $v_{Ta} = v_0 > 0$, le thyristor auxiliaire est amorçable.

Séquence 1 :

A $t = t_0$, on amorce le thyristor T_a



- La loi des nœuds donne : $i_{Tp} + i_C = I_d$

- La loi des mailles donne : $v_C + v_L = 0$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$

Avec $v_C(t_0) = -v_0$ et $\dfrac{dv_C(t_0)}{dt} = \dfrac{\overset{0}{i_C(t_0)}}{C} = 0$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = A\cos(\omega(t-t_0)) + B\sin(\omega(t-t_0)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes A et B sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_0) = -v_0 = A$

- $\frac{dv_C(t_0)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t) = -v_0 \cos(\omega(t - t_0))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = Cv_0\omega \sin(\omega(t - t_0)) = v_0\sqrt{\frac{C}{L}}\sin(\omega(t - t_0))$

$$i_{Tp}(t) = I_d - i_C(t) = I_d - v_0\sqrt{\frac{C}{L}}\sin(\omega(t - t_0))$$

Le thyristor T_p se bloque à l'instant $t = t_1$ définit par :

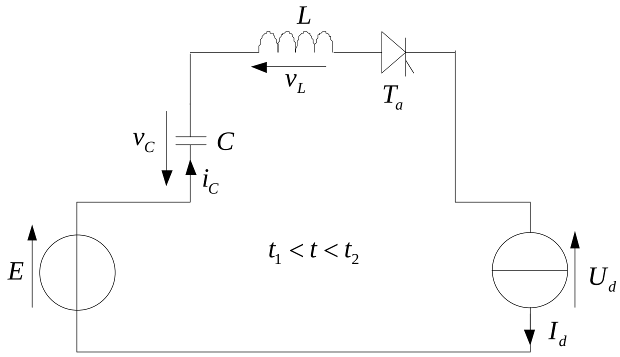
$i_{Tp}(t_1) = 0 \Rightarrow \sin(\omega(t_1 - t_0)) = \frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}}$, ce qui donne $\Rightarrow t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega}\arcsin(\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}})$

A cet instant, la tension aux bornes du condensateur devient :

$$v_C(t_1) = -v_0 \cos(\arcsin(\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}})) = -v_0\sqrt{1 - (\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}})^2} = v_{C1} < 0$$

Séquence 2 :

Le condensateur est traversé par le courant de charge : $i_c = I_d = C\frac{dv_C}{dt}$ avec $v_C(t_1) = v_{C1}$, ce qui en résulte :



$$v_C(t) = v_{C1} + \frac{I_d}{C}(t - t_1)$$

La tension aux bornes de la charge est:

$$U_d(t) = E - v_C = E - v_{C1} - \frac{I_d}{C}(t - t_1)$$

La tension aux bornes de la diode *DRL* est :

$$v_{DRL} = -U_d$$

La diode *DRL* entre en conduction à $t = t_2$; le moment où la tension U_d s'annule. Cet instant est définit par : $U_d(t_2) = 0$, donc :

$$E - v_{C1} - \frac{I_d}{C}(t_2 - t_1) = 0 \Rightarrow t_2 - t_1 = \frac{C}{I_d}(E - v_{C1})$$

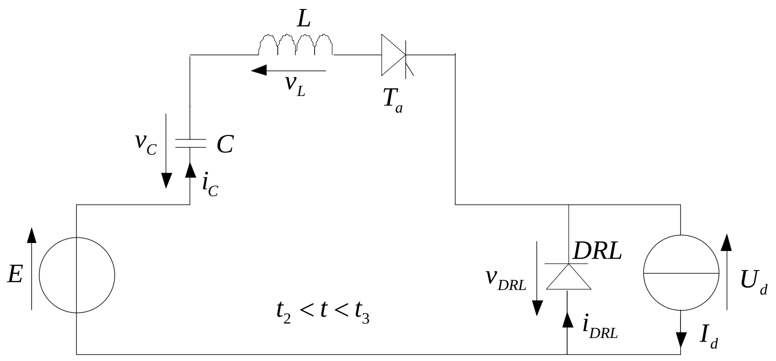
A cet instant :

$$v_C(t_2) = E$$

Séquence 3 :

Durant cette phase T_a et *DRL* conduisent simultanément. Ce qui nous permet d'écrire :

- $U_d = 0$
- $I_d = i_C + i_{DRL}$
- $v_C + v_L = E$



Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt}$

$\Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = E$

Avec $v_C(t_2) = E$ et $\dfrac{dv_C(t_2)}{dt} = \dfrac{I_d}{C}$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = E + A\cos(\omega(t-t_2)) + B\sin(\omega(t-t_2)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes *A* et *B* sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_2) = E = E + A \Rightarrow A = 0$
- $\dfrac{dv_C(t_2)}{dt} = B\omega = \dfrac{I_d}{C} \Rightarrow B = \dfrac{I_d}{C\omega}$

D'où l'expression de la tension $v_C(t)$: $v_C(t) = E + \dfrac{I_d}{C\omega}\sin(\omega(t-t_2))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = I_d\cos(\omega(t-t_2))$

Le courant dans la *DRL* est : $i_{DRL}(t) = I_d - i_C = I_d(1-\cos(\omega(t-t_2)))$

Lorsque le courant i_C s'annule, le thyristor T_a se bloque à l'instant t_3 tel que : $i_C(t_3) = 0$, donc :

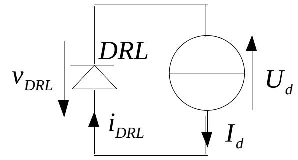
$$\cos(\omega(t_3-t_2)) = 0 \Rightarrow t_3 - t_2 = \frac{\pi}{2\omega}$$

A cet instant

$$v_C(t_3) = E + \frac{I_d}{C\omega} = v_{C3}$$

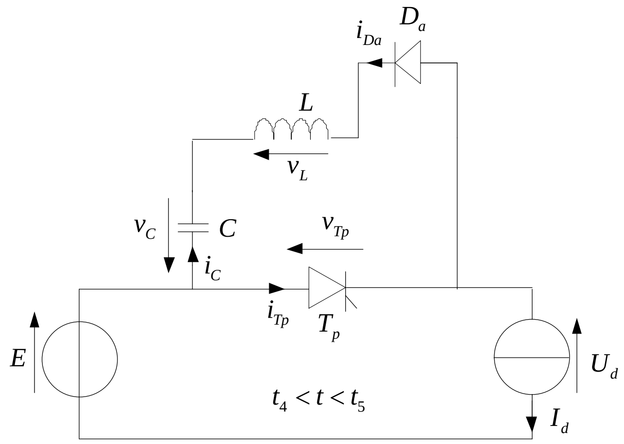
Séquence 4:

Durant cette phase, la diode DRL est passante seule. Dans ce cas, nous avons :



- $U_d = 0$
- $I_{DRL} = I_d$
- $v_C = E + \dfrac{I_d}{C\omega}$

Séquence 5:



A $t = t_4$ on amorce T_p, ce qui conduit à :

- Conduction de T_p : $v_{Tp} = 0$

- Conduction de la diode D_a : $v_{D_4} = 0$

- Tension aux bornes de la charge : $U_d = E$

- La loi des nœuds : $i_{Tp} = i_c + I_d$

- La loi des mailles : $v_C + v_L = 0$

Or $v_L = L\dfrac{di_C}{dt}$ et $i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} \Rightarrow v_L = LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2}$

D'où : $LC\dfrac{d^2v_C}{dt^2} + v_C = 0$

Avec $v_C(t_4) = v_{C3}$ et $\dfrac{dv_C(t_4)}{dt} = \dfrac{i_C(t_4)}{C} = 0$

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v_C(t) = A\cos(\omega(t - t_4)) + B\sin(\omega(t - t_4)); \text{ avec } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Les constantes A et B sont à calculer en appliquant les conditions initiales.

- $v_C(t_4) = v_{C3} = A$

- $\dfrac{dv_C(t_4)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où l'expression de la tension aux bornes du condensateur $v_C(t)$: $v_C(t) = v_{C3}\cos(\omega(t - t_4))$

Le courant dans le condensateur est : $i_C(t) = -C\omega v_{C3}\sin(\omega(t - t_4))$

Le courant du thyristor T_p : $i_{Tp}(t) = I_d + C\omega v_{C3}\sin(\omega(t - t_4))$

La diode D_a se bloque au moment où le courant i_{Da} s'annule à t_5 définit par : $i_{Da}(t_5) = -i_C(t_5) = 0$

$$\sin(\omega(t_5 - t_4)) = 0 \Rightarrow t_5 - t_4 = \frac{\pi}{\omega} = \pi\sqrt{LC}$$

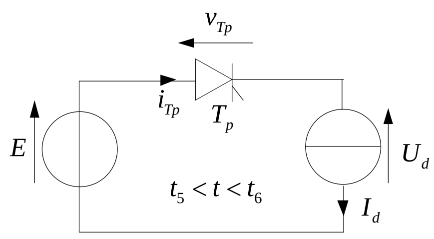
A cet instant on a:

$v_C(t_5) = -v_{C3}$

Séquence 6:

Durant cette phase, le thyristor principal conduit seul le courant de charge. Nous avons donc:

- $U_d = E$
- $I_{Tp} = I_d$
- $v_C = -v_{C3}$
- $v_{Ta} = v_{C4}$, le thyristor auxiliaire est amorçable.



Cette phase est identique à celle décrite pour $t < t_0$. Par identification, on peut en déduire la valeur de v_0. En effet :

$$v_0 = v_{C3} = E + I_d\sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Tracé des formes d'ondes

Voir la figure ci-dessous.

- Calcul de la valeur de la capacité

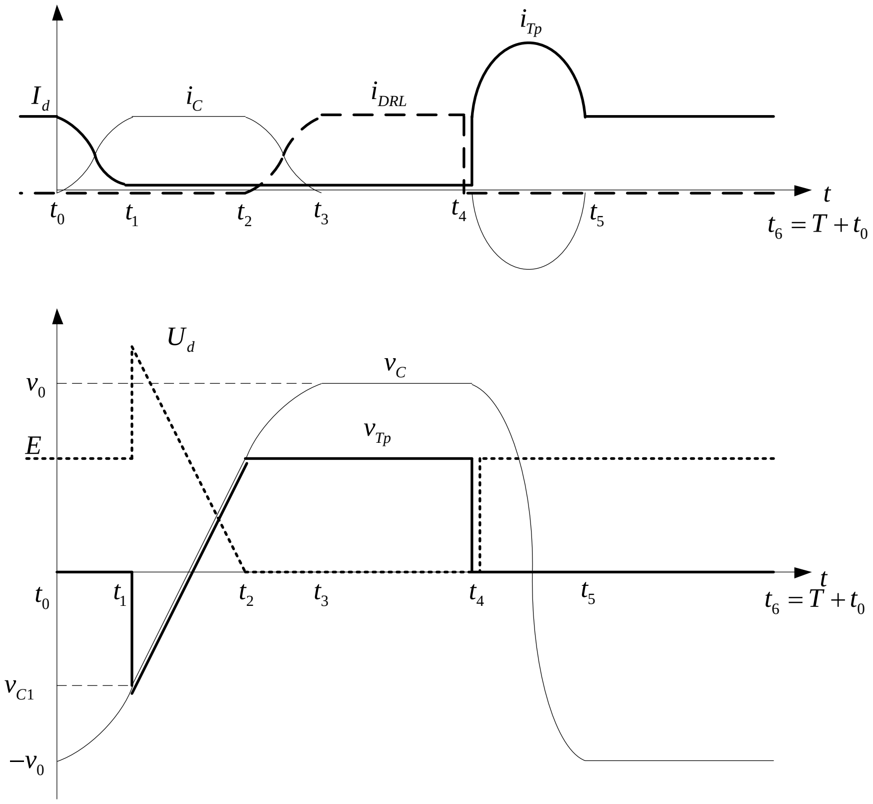
La valeur de la capacité est choisie de telle sorte que le temps d'application de la tension inverse aux bornes de T_p soit supérieur au temps de désamorçage t_q. La condition est donc :

$t_1' - t_1 > t_q$ où t_1' est définit par $v_{Tp}(t_1) = v_C(t_1) = 0$

$\frac{I_d}{C}(t_1' - t_1) + v_{C1} = 0 \Rightarrow t_1' - t_1 = -\frac{Cv_{C1}}{I_d} > t_q$ ce qui donne :

$$C > -\frac{I_d}{v_{C1}}t_q = \frac{t_q I_d}{v_0\sqrt{1-(\frac{I_d}{v_0}\sqrt{\frac{L}{C}})^2}}$$

Les formes des courants et des tensions dans ce convertisseur sont illustrées sur la figure ci-dessous.


i_{Tp}
I_d
i_C
i_{DRL}
t
t_0
t_1
t_2
t_3
t_4
t_5
$t_6 = T + t_0$
U_d
v_C
v_0
v_{Tp}
E
v_{C1}
$-v_0$