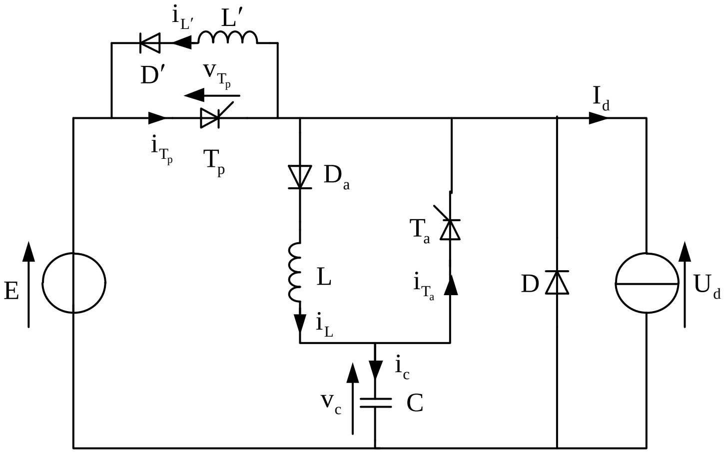
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Masters Académiques : CE + RE+ ERE
Matière: Electronique de puissance avancée

Série d'exercices n° : 2

Exercice 1 :

Le montage de la figure ci-contre est un hacheur série à commutation forcée. Son fonctionnement sur une période de fonctionnement T passe par les phases suivantes :



Phase 1; $t \in [0, t_1]$**: Conduction de** T_p **et** D_a **seulement.**

Phase 2; $t \in [t_1, \alpha T]$**: Conduction de** T_p **seul.**

Phase 3; $t \in [\alpha T, t_2]$**: Conduction de** T_a **et** D' **seulement.**

Phase 4; $t \in [t_2, T]$**: Conduction de** D **seule.**

On admet qu'initialement le montage opère en phase de roue libre et le condensateur est complètement déchargé.

1°) Analyser le fonctionnement du montage sur une période de fonctionnement T en traçant dans chaque phase le circuit actif tout en donnant dans chaque cas les expressions instantanées de $v_c(t), i_c(t), i_L(t)$ et $i_{L'}(t)$. **Calculer les instants** t_1 et t_2 **et en déduire le temps de commutation** $t_c = t_2 - \alpha T$.

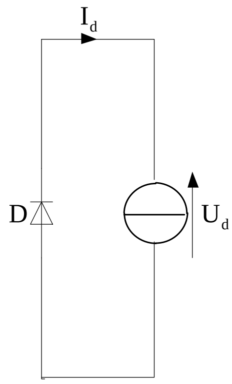
2°) Tracer les formes des tensions $v_c(t), v_{T_p}(t), v_D(t)$ et $U_d(t)$ **ainsi que celles des courants** $i_c(t), i_{T_p}(t), i_D(t)$ et $i_{D'}(t)$.

3°) Calculer le temps t_p **de polarisation inverse du thyristor** T_p **et en déduire la valeur minimale de la capacité** C **pour que** t_p **soit supérieur au temps de blocage** t_q **du thyristor.**

Solution 1 :

1) Analyse du fonctionnement du convertisseur à commutation forcée

- Phase 0 (initiale) pour $t < 0$**, D=ON**



Phase (0)

La tension aux bornes de la charge est :

$$U_d(t<0) = 0$$

Le courant traversant la diode est :

$$i_D(t<0) = I_d$$

La tension aux bornes du thyristor principal est :

$$v_{T_p}(t<0) = E > 0$$

Le thyristor principal est donc amorçable.
Le condensateur est supposé totalement déchargé, donc

$v_c(t<0)=0$

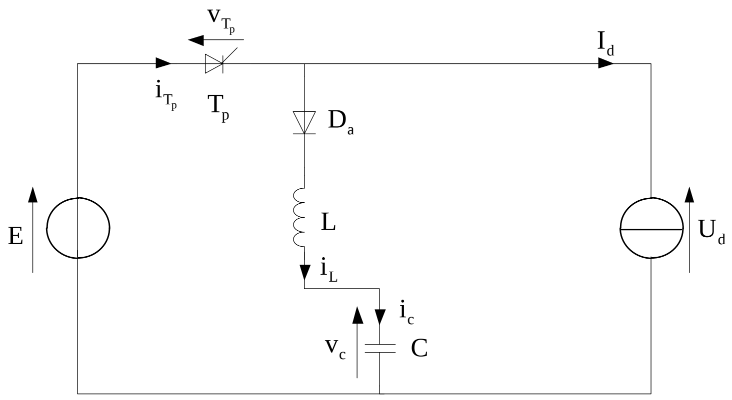
- Phase 1 : pour $t \in [0, t_1]$

A $t=0$**, on amorçe le thyristor T_p, ce qui en résulte :**

$v_D(0) = -E < 0$

Donc, la diode de roue libre se bloque immédiatement (D=OFF).

La diode D' **est bloquée, ce qui implique que :** $i_{L'}(t)=0$



Phase (1)

D'un autre côté, nous avons :

$v_{D_a}(0) = E - \cancel{v_c(0)} - \cancel{v_L(0)} > 0$

La diode auxiliaire D_a est donc passante (D_a=ON).
Dans ce cas, nous avons :

- $i_L = i_c$
- $v_c + v_L = E$

avec $v_L = L\dfrac{di_c}{dt}$ **et** $i_c = C\dfrac{dv_c}{dt}$

Donc :

$$v_L = LC\frac{dv_c^2}{dt}$$

Ce qui en résulte :

$$LC\frac{dv_c^2}{dt} + v_c = E$$

Avec les deux conditions initiales suivantes :

$v_c(0)=0$

$\dfrac{dv_c(0)}{dt}=0$

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

$v_c(t) = A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t) + E$ **avec** $\omega = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ **: la pulsation propre du circuit LC**

- Calcul des constantes A et B

$v_c(0) = A + E = 0 \Rightarrow A = -E$

$\dfrac{dv_c(t)}{dt} = -A\omega\sin(\omega t) + B\omega\cos(\omega t)$

$\dfrac{dv_c(0)}{dt} = B\omega = 0 \Rightarrow B = 0$

D'où la tension aux bornes du condensateur est exprimée par :

$v_c(t) = -E\cos(\omega t) + E = E(1-\cos(\omega t))$

L'expression du courant $i_c(t)$ **est donc :**

$$i_c(t) = \frac{dv_c(t)}{dt} \Rightarrow i_c(t) = EC\omega\sin(\omega t) = i_L(t)$$

Le courant dans le transistor $i_{Tp}(t)$ **est calculé par la loi des nœuds :**

$i_{Tp}(t) = i_c(t) + I_d = EC\omega\sin(\omega t) + I_d$

La diode D_a se bloque à $t = t_1$ défini par $i_c(t_1) = 0$ ce qui revient à écrire :

$$EC\omega\sin(\omega t_1) = 0 \Rightarrow \omega t_1 = \pi \Rightarrow t_1 = \frac{\pi}{\omega}$$

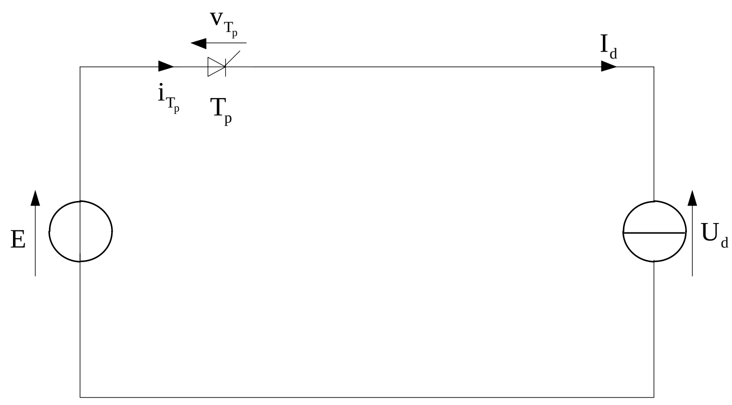
A cet instant, on a :

$v_c(t) = 2E$

$i_{Tp}(t) = I_d$

- Phase 2 : pour $t \in [t_1, \alpha T]$**,** $T_p = ON$

Durant cette phase, le thyristor T_p est le seul semi-conducteur passant. Il vient donc :



Phase (2)

$U_d(t) = E$

$i_{Tp}(t) = I_d$

$v_c(t) = 2E$

$i_c(t) = 0$

$i_L(t) = 0$

$i_{L'}(t) = 0$

La tension aux bornes du thyristor auxiliaire est :

$v_{Ta}(t) = v_c - E = E > 0$

Donc, le thyristor T_a est amorçable.

- Phase 3 : pour $t \in [\alpha T, t_2]$

A $t = \alpha T$, on amorçe le thyristor T_a.

La conduction de T_a impose une tension négative sur D_a, donc D_a=OFF et $i_L(t) = 0$**.**

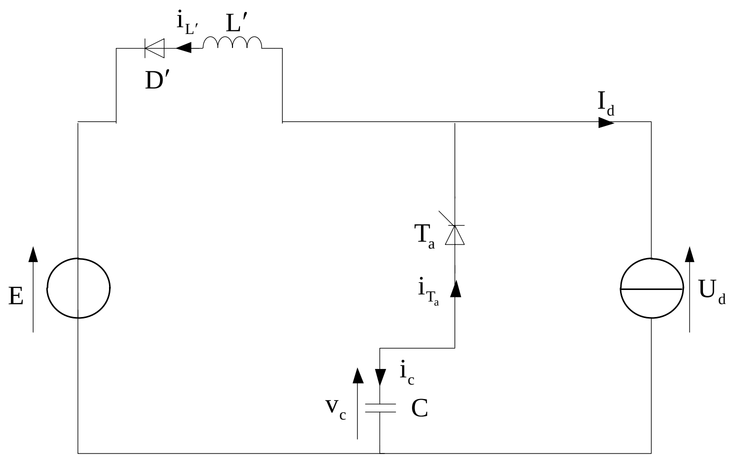
$v_{Tp}(\alpha T) = E - v_c(\alpha T) = -E < 0$**, ce qui entraine le blocage de T_p.**

$v_{D'}(\alpha T) = v_c(\alpha T) - E = E > 0$**, donc la diode D' est passante.**

Il en résulte :

$U_d(t) = v_c(t)$

Dans ce cas, nous avons :



Phase (3)

- $i_{L'} = -i_c - I_d$
- $v_c - v_{L'} = E$

avec $v_{L'} = L'\frac{di_{L'}}{dt} = -L'\frac{di_c}{dt}$ **et** $i_c = C\frac{dv_c}{dt}$

Donc :

$$v_{L'} = -L'C\frac{dv_c^2}{dt}$$

Ce qui en résulte :

$$L'C\frac{dv_c^2}{dt} + v_c = E$$

Avec :

$v_c(\alpha T) = 2E$

$$\frac{dv_c(\alpha T)}{dt} = -\frac{I_d}{C}$$

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

$v_c(t) = A'\cos(\omega'(t-\alpha T)) + B'\sin(\omega'(t-\alpha T)) + E$ **avec** $\omega' = \frac{1}{\sqrt{L'C}}$ **: la pulsation propre du circuit L'C**

- Calcul des constantes A' **et** B'

$$v_c(\alpha T) = A' + E = 2E \Rightarrow A' = E$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = -A'\omega'\sin(\omega'(t-\alpha T)) + B'\omega'\cos(\omega'(t-\alpha T))$$

$$\frac{dv_c(\alpha T)}{dt} = B'\omega' = -\frac{I_d}{C} \Rightarrow B' = -\frac{I_d}{C\omega'}$$

D'où la tension aux bornes du condensateur est exprimée par :

$$v_c(t) = E\cos(\omega'(t-\alpha T)) - \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t-\alpha T)) + E = E(1+\cos(\omega'(t-\alpha T))) - \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t-\alpha T))$$

L'expression du courant traversant le condensateur $i_c(t)$ **est donc :**

$$i_c(t) = \frac{dv_c(t)}{dt} \Rightarrow i_c(t) = -EC\omega'\sin(\omega'(t-\alpha T)) - I_d\cos(\omega'(t-\alpha T))$$

Le courant dans l'inductance L' **est exprimé par :**

$$i_{L'}(t) = -i_c(t) - I_d = EC\omega'\sin(\omega'(t-\alpha T)) + I_d\cos(\omega'(t-\alpha T)) - I_d = EC\omega'\sin(\omega'(t-\alpha T)) - I_d(1-\cos(\omega'(t-\alpha T)))$$

La tension aux bornes du thyristor principal bloqué T_p est :

$$v_{Tp}(t) = E - v_c(t) = E - E(1+\cos(\omega'(t-\alpha T))) + \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t-\alpha T))$$

$$= -E\cos(\omega'(t-\alpha T)) + \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t-\alpha T))$$

La diode D entre en conduction à $t = t_2$ **tel que** $v_D(t_2) \geq 0$**, à la limite** $v_D(t_2) = 0$**, ce qui implique que:**

$v_D(t_2) = -v_C(t_2) = -U_d(t_2) = 0$**, donc :**

$$E(1+\cos(\omega'(t_2-\alpha T))) - \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t_2-\alpha T)) = 0$$

Ou encore :

$$\frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t_2-\alpha T)) - E\cos(\omega'(t_2-\alpha T)) = E$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$\sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}\,\sin(\omega'(t_2-\alpha T) - \varphi) = E$$

Avec

$$\left.\begin{array}{l}\sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}\,\cos(\varphi) = \frac{I_d}{C\omega'} \\ \sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}\,\sin(\varphi) = E\end{array}\right. \Rightarrow \tan(\varphi) = \frac{EC\omega'}{I_d}$$

L'instant t_2 **est calculé par la solution de l'équation suivante :**

$$\sin(\omega'(t_2-\alpha T) - \varphi) = \frac{E}{\sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}} = \frac{E}{V_{cm}} \quad \text{avec} \quad V_{cm} = \sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}$$

Donc :

$$t_2 - \alpha T = \frac{1}{\omega'}\arcsin(\frac{E}{V_{cm}}) + \varphi$$

A cet instant, la diode D devient passante et prend le courant de charge, entrainant le blocage du thyristor auxiliaire. Nous avons également $v_C(t_2) = 0$**. Le condensateur est complètement déchargé. On peut donc le court-circuité par la diode D.**

A cet instant aussi, le courant dans l'inductance L' est :

$$i_{L'}(t_2) = EC\omega'\sin(\omega'(t_2-\alpha T)) + I_d\cos(\omega'(t_2-\alpha T)) - I_d$$
$$= I_{L'm}\cos(\omega'(t_2-\alpha T)-\varphi) - I_d$$

Avec :

$$I_{L'm} = \sqrt{(EC\omega')^2+(I_d)^2} = C\omega'\sqrt{E^2+(\frac{I_d}{C\omega'})^2} = C\omega' V_{cm}$$

$$\begin{matrix} C\omega' V_{cm}\cos(\varphi) = I_d \\ C\omega' V_{cm}\sin(\varphi) = EC\omega' \end{matrix} \Rightarrow \tan(\varphi) = \frac{EC\omega'}{I_d}$$

Avec

$t_2 - \alpha T = \frac{1}{\omega'}\arcsin(\frac{E}{V_{cm}}) + \varphi$ **, il vient :**

$$i_{L'}(t_2) = I_{L'm}\cos(\arcsin(\frac{E}{V_{cm}})) - I_d = C\omega' V_{cm}\sqrt{1-(\frac{E}{V_{cm}})^2} - I_d = C\omega'\sqrt{(V_{cm})^2-E^2} - I_d$$

Or $\sqrt{(V_{cm})^2-E^2} = \frac{I_d}{C\omega'}$ **, ce qui en résulte :**

$$i_{L'}(t_2) = I = C\omega'\frac{I_d}{C\omega'} - I_d = 0$$

Pour cette raison, la diode D' se bloque aussi à instant t_2 .
A noter que le courant du condensateur à cet instant est calculé par :

$$i_c(t_2) = -i_{L'}(t_2) - I_d = -I_d$$

- Calcul du temps de commutation

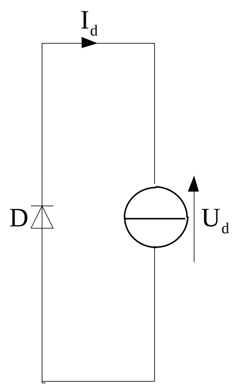
Le temps de commutation t_c est défini comme étant l'intervalle de temps séparant l'amorçage du thyristor auxiliaire T_a et la conduction de la diode D.

$$t_c = t_2 - \alpha T = \frac{1}{\omega'}\arcsin(\frac{E}{V_{cm}}) + \varphi$$

- Phase 4 : pour $t \in [t_2, T]$**,** $D = ON$

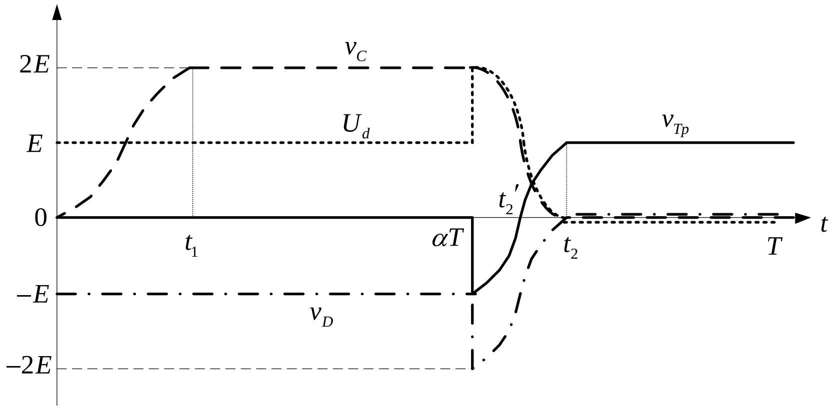
Durant cette phase, la diode D est passante seule. Il vient donc :

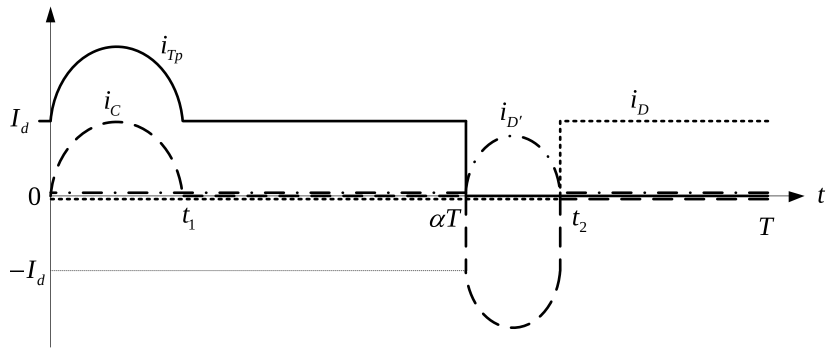
$$U_d(t) = 0$$
$$i_D(t) = I_d$$
$$v_c(t) = 0$$
$$i_c(t) = 0$$
$$i_L(t) = 0$$
$$i_{L'}(t) = 0$$



Phase (4)

2°) Formes des tensions et des courants





3°) – Calcul du temps de polarisation inverse du thyristor principal

Durant la commutation (conduction de T_a), la tension aux bornes du thyristor T_p est :

$$v_{Tp}(t) = E - v_c(t) = -E\cos(\omega'(t-\alpha T)) + \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t-\alpha T))$$

Cette tension commence par une valeur négative égale à –E à $t = \alpha T$ **puis elle croit pour s'annuler à** $t = t_2'$ **défini par :**

$$v_{Tp}(t_2') = 0 \Rightarrow -E\cos(\omega'(t_2'-\alpha T)) + \frac{I_d}{C\omega'}\sin(\omega'(t_2'-\alpha T)) = 0$$

$$v_{Tp}(t_2') = 0 \Rightarrow \sqrt{E^2 + (\frac{I_d}{C\omega'})^2}\,\sin(\omega'(t_2'-\alpha T) - \varphi) = 0$$

Ce qui donne :

$$\omega'(t_2'-\alpha T) - \varphi = 0 \Rightarrow t_2' - \alpha T = \frac{\varphi}{\omega'}$$

Le temps de polarisation est la durée durant laquelle le thyristor est soumis à une tension négative.

$$t_p = t_2' - \alpha T = \frac{\varphi}{\omega'} = \frac{\arctan(\frac{EC\omega'}{I_d})}{\omega'}$$

- Calcul de la valeur minimale de la capacité C

En tenant compte de la condition suivante :

$$t_p > t_q \Rightarrow \frac{\arctan(\frac{EC\omega'}{I_d})}{\omega'} > t_q \Rightarrow \arctan(\frac{EC\omega'}{I_d}) > t_q\omega'$$

Donc :

$$\frac{EC\omega'}{I_d} > \tan(t_q\omega') \Rightarrow C > \frac{I_d\tan(t_q\omega')}{E\omega'} \Rightarrow C_{min} = \frac{I_d\tan(t_q\omega')}{E\omega'}$$

Exercice 2

Soit le hacheur à commutation forcée de la figure (2). On veut examiner le fonctionnement du montage à partir de l'instant où T_p conduit seul le courant de charge supposé constant; tous les autres semi-conducteurs sont bloqués. Le condensateur est initialement chargé sous une tension négative $v_c(0) = -V_{c0}$. En désire analyser le fonctionnement du hacheur dans les sept phases suivantes:

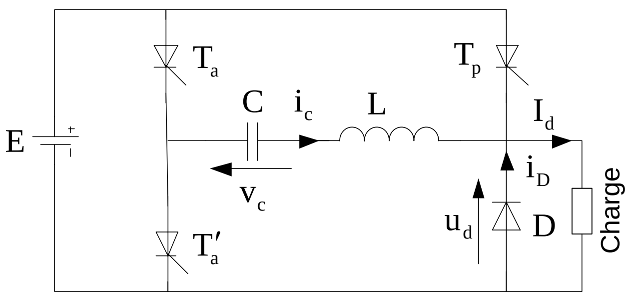


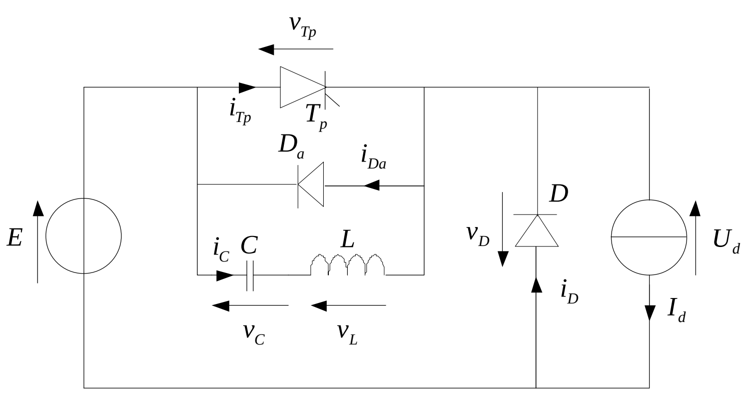
Figure (2)

- Phase 1 : Les thyristors T_p et T_a conduisent simultanément.
- Phase 2 : Le thyristor T_a conduit seul.
- Phase 3 : Le thyristor T_a et la diode D conduisent simultanément.
- Phase 4: La diode D conduit seule.
- Phase 5 : Le thyristor T'_a et la diode D conduisent simultanément.
- Phase 6: La diode D conduit seule.
- Phase 7 : Le thyristor T_p conduit seul.

Dans chaque phase de fonctionnement :
1°) Tracer le circuit électrique correspondant à chaque phase
2°) Donner les expressions des tensions $v_c(t)$ et $u_d(t)$ celles des courants $i_c(t)$ et $i_D(t)$.
3°) Donner les formes des tensions $v_c(t)$ et $u_d(t)$ celles des courants $i_c(t)$ et $i_D(t)$.

Exercice 3

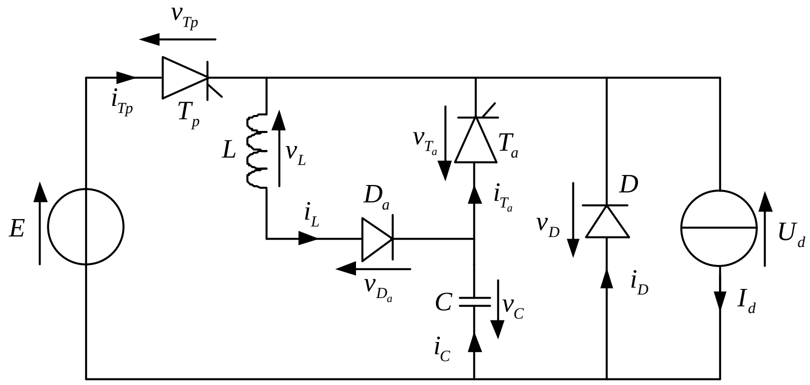
On propose d'analyser le fonctionnement du hacheur à commutation forcée de la figure ci-dessous à partir de sa phase initiale durant lequel la diode de roue libre conduit seule le courant de charge; les autres courants dans le circuit sont nuls. Durant cette phase, le condensateur est chargé sous une tension positive $v_c(0) = v_0$.



1) Analyser le fonctionnement du convertisseur dans les phases suivantes :
Phase 1 : A $t = 0$, le thyristor principal est amorcé ; il est le seul composant conducteur. A noter que durant cette phase un courant circule dans la branche LC.
a°) Donner les expressions instantanées de $v_c(t)$, $i_c(t)$ et $i_{Tp}(t)$.
b°) Calculer l'instant t_1 de blocage de T_p et calculer la valeur de la tension $v_c(t_1)$ à moment.
Phase 2 : La diode D_a est conductrice seule; un courant circule toujours dans la branche LC.
a°) Donner les expressions instantanées de $v_c(t)$, $i_c(t)$ et $i_{Da}(t)$.
b°) Calculer l'instant t_2 de blocage de D_a et calculer la valeur de la tension $v_c(t_2)$
c°) Quelle est la condition sur la tension $v_c(t_2)$ pour que la diode de roue libre entre en conduction à $t = t_2$.
Phase 3 : La diode D est conductrice seule; un courant circule toujours dans la branche LC.
a°) Donner les expressions instantanées de $v_c(t)$, $i_c(t)$ et $i_D(t)$.
b°) Calculer l'instant t_3 d'annulation du courant dans le condensateur $i_c(t_3) = 0$ et calculer la valeur de la tension $v_c(t_3)$.
Phase 4 : La diode D est conductrice seule; tous les autres courants sont nuls.
2°) Tracer les formes des tensions $v_c(t)$, $U(t)$, $v_T(t)$ et celles des courants $i_c(t)$, $i_{Tp}(t)$, $i_D(t)$, $i_{Da}(t)$.

3°) Refaire l'analyse du fonctionnement si la condition (c) de la deuxième phase n'est pas remplie. Retracé les formes des tensions et des courants dans le montage.

Exercice 4



Dans le convertisseur à commutation forcée de la figure ci-contre, le condensateur est supposé chargé sous une tension $v_c(0) = -V_0$ telle que $V_0 > E$. Le fonctionnement du montage passe par les phases suivantes :

- Phase 0 (initiale) : Le thyristor principal T_p conduit seul le courant de charge supposé constant.

- Phase 1 : $t \in [\alpha T, t_1]$: le thyristor auxiliaire T_a conduit seul.

- Phase 2 : $t \in [t_1, T]$: la diode de roue libre D conduit seul.

- Phase 3 : $t \in [T, t_2]$: Le thyristor principal T_p et la diode auxiliaire D_a conduisent simultanément.

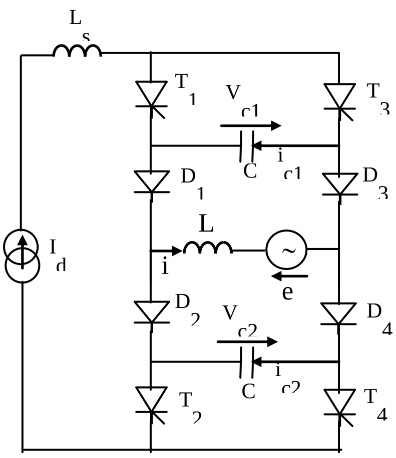
- Phase 4 : $t \in [t_2, t_3]$: le thyristor principal T_p conduit seul.

1) Analyser le fonctionnement du montage sur une période de fonctionnement T tout en donnant à chaque phase les expressions instantanées de $v_c(t)$ et $i_c(t)$. En déduire les expressions des temps t_1, t_2 et t_3.

2) Tracer les formes des tensions $v_c(t), U_d(t), v_{T_p}(t)$ et celles des courants $i_c(t), i_{Tp}(t), i_D(t), i_{Da}(t)$.

3) Quelle est la valeur de C qui permet un blocage sure du thyristor principal.

Exercice 5



Soit le commutateur à diodes d'isolement de la figure ci-contre. On désire étudier la commutation du courant I_d d'une paire de thyristors (T_1, T_4) à une autre paire (T_2, T_3).

Etat initial $t_0 \leq \frac{T}{2}$: Le courant I_d traverse T_1, D_1, moteur D_4 et T_4. Les condensateurs ont une charge initiale $v_{c1}=v_{c2}=-v_0$. La f.é.m du moteur pourra être considérée constante durant la commutation.

1°) A l'instant $t=t_0$, on amorce T_2 et T_3 ce qui provoque l'extinction instantanée de T_1 et T_4.

a) T_1 et T_4 se désamorcent, D_2 et D_3 restent bloquées. Pourquoi ?

b) Donner l'expression de $v_{c1}(t)$ (ou $v_{c2}(t)$) en fonction du temps. A quel instant t_1, les thyristors T_1 et T_4 cessent d'être soumis à une tension inverse négative ?

c) Comment choisir C pour que les blocages soient assurés.

d) A quel instant t_2 les diodes D_2 et D_3 conduisent ?

2°) A l'instant $t=t_2$, les diodes D_2 et D_3 conduisent, D_1 et D_4 restent passantes.

a) Donner les expressions instantanées de $v_{c1}(t)$ et $i(t)$.

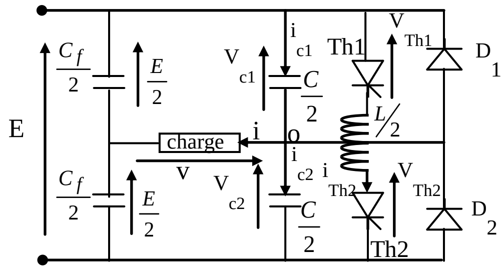
b) A quel instant t_3 (fin de commutation), les diodes D_1 et D_4 cessent de conduire? Quelle est la valeur finale de i ?

c) Exprimer la valeur de v_0.

d) Pour $t_0 \leq t \leq t_3$: tracer les ondes de v_{c1} et i.

Exercice 6

On considère l'onduleur à source à point milieu de la figure ci-contre. On suppose que la bobine à point milieu reliant les deux thyristors est parfaitement couplée et que le courant de charge i reste constant durant la commutation égale à I_0. On se propose d'étudier la commutation du courant I_0 du thyristor Th_1 (état initial) vers la diode D_2 (état final).



A l'instant t<t_0, le courant I_0 traverse Th_1, L/2 et la charge, avec v_{c1}=0, v_{c2}=E. A l'instant t=t_0, on amorce Th_2. On désigne par t_1 l'instant où Th_1 cesse d'être soumis à une tension inverse,t_2 l'instant où D_2 entre en conduction et t_3 l'instant où Th_2 cesse de conduire.

I) 1ere phase de commutation : $(t_0 \leq t \leq t_2)$

a) **Monter qu'à l'instant t=t_0, Th_1 est soumis à une tension inverse que l'on calculera.**
b) **Dans cette phase D_1 et D_2 ne peuvent conduire. Pourquoi ? Exprimer $v_{c2}(t)$, $i_{Th2}(t)$ et $v_{Th1}(t)$.**
c) **Déterminer l'instant t_2.**

II) 2ere phase de commutation : $(t_2 \leq t \leq t_3)$

a) **Dans cette phase, D_2 entre en conduction, Th_2 est toujours conducteur. Pourquoi ?**
b) **Sachant que la chute de tension dans un semi-conducteur en conduction est 1V environ. Exprimer $i_{Th2}(t)$. En déduire l'instant t_3 où Th_2 cesse de conduire.**

III) Tracer dans l'intervalle [t_0,t_3] les ondes : $v_{c1}(t)$, $v_{c2}(t)$, $v_{Th1}(t)$ et $i_{Th2}(t)$.