Chap 2 Conversion Continu/Continu

Les hacheurs

1. Introduction :

Les hacheurs sont des convertisseurs d'énergie qui font transit l'énergie électrique d'une source électrique continue vers une autre source continue variable dont le symbole est :

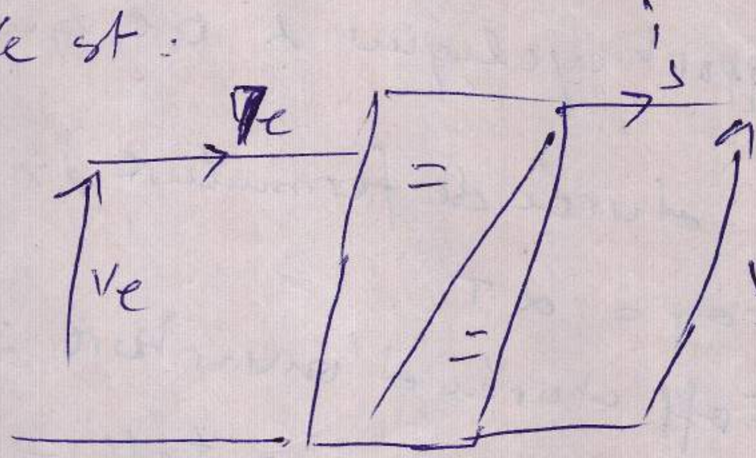
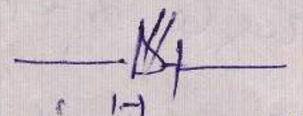


fig 1 schéma de principe.



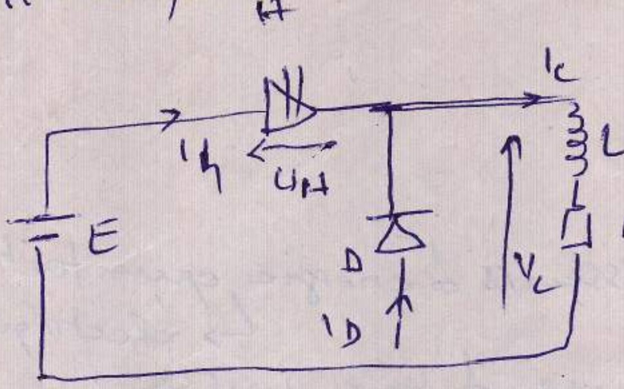
H est un interrupteur électronique

- commandable à la fermeture
- " à l'ouverture
- unidirectionnel en courant

en pratique : un hacheur peut être réalisé à l'aide : les thyristors - GTO, les transistors bipolaires, MOSFET

2 - hacheur série : (abaisseur de tension) dévolteur

soit le montage :



H est commandé par un signal de période T

de rapport cyclique α tel que : $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$

t_{on} : durée de fermeture), T période

ou $t_{on} = \alpha T$

soit t_{off} durée d'ouverture :

$T = t_{on} + t_{off} \Rightarrow t_{off} = T - t_{on} = T(1-\alpha)$

avec : $0 < \alpha < 1$

le circuit de commande règle α et T

$f = \frac{1}{T}$ est la fréquence de hachage.

3- analyse de fonctionnement :

pour : $0 < t \leq \alpha T$ H : fermé (conduit) $\Rightarrow$ D bloquée.

$$\begin{cases} u_H = 0 \\ E = V_c \Rightarrow R i_c + L\frac{di_c}{dt} = E \quad (1) \\ \\ \text{solution de l'équation (1)} \end{cases}$$

$R i_c + L\frac{di_c}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{di_c}{i_c} = -\frac{R}{L}dt \Rightarrow \ln i_c = -\frac{R}{L}t + C$

② ①

$$i_c = e^{-\frac{R}{L}t + c} = e^{-\frac{t}{\tau}} \underbrace{e^{c}}_{= A} \quad \text{avec } \tau = L/R$$

$$i_c = A\, e^{-t/\tau}$$

$i_p = K$ l'équat° ① devient

$$R i_p = E \Rightarrow i_p = \frac{E}{R}$$

d'où

$$i_c(t) = i_h + i_p = A e^{-t/\tau} + E/R \quad ②$$

pour $t = 0$ $\quad i_c(0) = A + E/R = I_{min} \Rightarrow$

$$A = I_{min} - \frac{E}{R}$$

l'équat° 2 devient : $\boxed{i_c(t) = \left(I_{min} - \frac{E}{R}\right) e^{-t/\tau} + E/R}$

pour : $\alpha T < t \leq T$ H bloqué (ouvert), D conductrice

$$V_E = V_D = 0 \Rightarrow V_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow i_c(t) = B e^{-t/\tau}$$

pour : $t = \alpha T \Rightarrow i_c(\alpha T) = I_{max} = B e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}$

$$\Rightarrow B = I_{max}\, e^{\alpha \frac{T}{\tau}}$$

$$i_c(t) = I_{max}\, e^{\alpha \frac{T}{\tau}}\, e^{-t/\tau} = \boxed{I_{max}\, e^{-\left(\frac{t - \alpha T}{\tau}\right)}}$$

4- Valeur moyenne de la tension $V_c(t)$

$$V_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_c(t)\, dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E\, dt = \frac{E}{T} \cdot \alpha T = \alpha E$$

NB $\alpha = 0 \Rightarrow V_{cmoy} = 0$, $\alpha = 1$ $V_{cmoy} = E$

$$V_c = Ri + L\frac{di}{dt} \Rightarrow$$

$$V_c\,dt = Ri\,dt + L\,di \Rightarrow \int_0^T V_c\,dt = \int R i_c\,dt + \cancel{\int_{min}^{max} L\,di_c}$$

$$\frac{1}{T}\int_0^T V_c\,dt = \frac{R}{T}\int_0^T i_c\,dt + \cancel{\int L\,di_c}$$

$$\Rightarrow V_{c\,moy} = R\,I_{c\,moy} \Rightarrow I_{c\,moy} = \frac{V_{c\,moy}}{R} = \boxed{\frac{\alpha E}{R}}$$

Ondulation de courant:

$$i_c(t) = \left(I_{min} - \frac{E}{R}\right)e^{-t/\tau} + E/R \quad \text{pendant } [0, \alpha T]$$

pour $t = \alpha T$, $i_c(t) = I_{max} = \left(I_{min} - E/R\right)e^{-\alpha T/\tau} + E/R$ --- (1)

$$i_c(t) = I_{max}\, e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}} \quad \text{don } [\alpha T, T]$$

pour $t = T \Rightarrow i_c(t) = I_{min} = I_{max}\, e^{-\frac{T(1-\alpha)}{\tau}} \Rightarrow$

$$I_{max} = I_{min}\, e^{\frac{T(1-\alpha)}{\tau}} \quad \text{--- (2)}$$

$$(1) = (2) \Rightarrow \left(I_{min} - E/R\right)e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + E/R = I_{min}\, e^{\frac{T(1-\alpha)}{\tau}}$$

$$I_{min}\left(e^{\frac{T(1-\alpha)}{\tau}} - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) = E/R\left(1 - e^{-\alpha T/\tau}\right)$$

$$\Rightarrow I_{min} = \frac{E}{R}\,\frac{1 - e^{-\alpha T/\tau}}{e^{\frac{T-\alpha T}{\tau}} - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}} = \boxed{\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{e^{\alpha T/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1}\right)}$$

$$I_{max} = I_{min}\, e^{\frac{T-\alpha T}{\tau}} = \frac{E}{R}\left(\frac{e^{\alpha T/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1}\right)e^{\frac{T-\alpha T}{\tau}}$$

$$= \frac{E}{R}\,\frac{e^{T/\tau} - e^{\frac{T-\alpha T}{\tau}}}{e^{T/\tau} - 1} = \boxed{\frac{E}{R}\cdot\frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{-T/\tau}}}$$

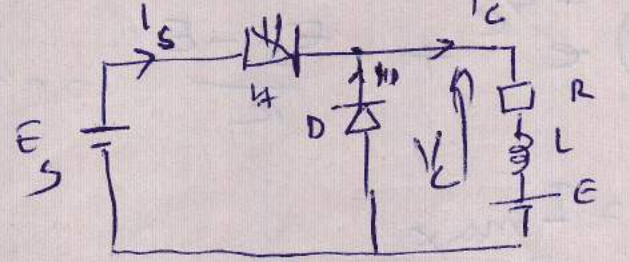
$\Delta I = I_{max} - I_{min} = ?$ ondulation de courant

I - hacheur série ② ①

a- charge = R L E

i_c : intérrompu (conduct° discontinue)

soit le montage :



cas : conduct° est continue (c-a-d L suffisamment grande pour avoir i_c ininterrompu).

E (batterie ou Macc),

b- analyse de fonctionnement :

$\forall$ l'état de H et D on a : $V_c = Ri_c + L\frac{di_c}{dt} + E$

pour $t \in [0, \alpha T]$: H conduit, D bloquée

$$\begin{cases} i_D = 0 \ , \ V_H = 0 \\ i_s = i_c \\ V_c = E_s \end{cases}$$

l'intensité du courant dans la charge $i_c(t)$ vérifie l'équat° différentielle suivante

$$L\frac{di_c}{dt} + Ri_c + E = E_s$$

$$L\frac{di_c}{dt} + Ri_c = E_s - E \Rightarrow \frac{L}{R}\frac{di_c}{dt} + i_c = \frac{E_s - E}{R}$$

$$i_c(t) = i_H + i_P = A e^{-t/\tau} + \frac{E_s - E}{R} \quad \tau = L/R$$

pour $t = 0 \Rightarrow$

$$i_c(0) = I_{min} = A + \frac{E_s - E}{R} \Rightarrow A = I_{min} \frac{E_s - E}{R}$$

$$i_c(t) = \left(I_{min} - \frac{E_s - E}{R}\right) e^{-t/\tau} + \frac{E_s - E}{R} \quad \ldots (1)$$

pour $t = \alpha T$ $i_c(t = \alpha T) = I_{max}$

de (1) $\Rightarrow$ $$i_{max} = \left(I_{min} - \frac{E_s - E}{R}\right) e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E_s - E}{R}$$

pour $t \in [\alpha T, T)$; D conduise H bloqué

$$\begin{cases} U_c = 0 \\ R i_c + L\frac{di_c}{dt} + E = 0 \end{cases} \Rightarrow L\frac{di_c}{dt} + R i_c = -E$$

$$\frac{L}{R}\frac{di_c}{dt} + i_c = -E/R \Rightarrow$$

$$i_c(t) = i_p + H_H = B e^{-t/\tau} - E/R$$

pour $t = \alpha T$, $i_c(t = \alpha T) = I_{max}$

$$I_{max} = B e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} - E/R \Rightarrow$$

$$B = \left(I_{max} + E/R\right) e^{\frac{\alpha T}{\tau}}$$

$$i_c(t) = \left(I_{max} + \frac{E}{R}\right) e^{\frac{\alpha T - t}{\tau}} - E/R \quad \ldots (2)$$

(2) (2) (2)

pour : $t = \alpha T$ l'equation (1) devient :

$$I_{max} = \left(I_{min} - \frac{E_s - E}{R}\right) e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E_s - E}{R} \quad ----(3)$$

pour $t = T$ l'equation (2) devient :

$$I_{min} = \left(I_{max} + E/R\right) e^{\frac{\alpha T - T}{\tau}} - E/R \quad ----(4)$$

de (3) et (4) $\Rightarrow$

$$I_{max} = \left[\left(I_{max} + E/R\right) e^{\frac{\alpha T - T}{\tau}} - E/R - \frac{E_s - E}{R}\right] e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E_s - E}{R}$$

$$I_{max}\left(1 - e^{-T/\tau}\right) = \frac{E}{R} e^{-T/\tau} - \frac{E}{R}\cancel{e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}} - \frac{E_s - E}{R} \cancel{e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}$$

$$I_{max}\left(1 - e^{-T/\tau}\right) = \cancel{\frac{E - E_s}{R} e} \quad \frac{E}{R}\left(e^{-T/\tau} - 1\right) -$$

$$\frac{E}{R} e^{-T/\tau} - \cancel{\frac{E}{R} e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}} - \frac{E_s}{R} e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \cancel{\frac{E}{R} e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}} + \frac{E_s}{R} - \frac{E}{R}$$

$$= \frac{E}{R}\left(e^{-T/\tau} - 1\right) - \frac{E_s}{R}\left(e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} - 1\right)$$

$$\boxed{I_{max} = \frac{E_s}{R}\left(\frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{-T/\tau}}\right) - E/R}$$

d'où

$$I_{min} = \left[\left(\frac{E_s}{R}\left(\frac{1-e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1-e^{-T/\tau}}\right) \cancel{- \frac{E}{R}}\right) \cancel{+ \frac{E}{R}}\right] e^{\frac{\alpha T - T}{\tau}} - \frac{E}{R}$$

$$I_{min} = \frac{E_s}{R} \frac{1-e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1-e^{-\frac{T}{\tau}}} e^{\frac{\alpha T - T}{\tau}} - \frac{E}{R}$$

$$= \frac{E_s}{R} \frac{e^{-\frac{\alpha T - T}{\tau}} - e^{-T/\tau}}{1-e^{-T/\tau}} - \frac{E}{R}$$

calculer $\Delta I_c = I_{max} - I_{min} \stackrel{?}{=} \alpha \frac{E_s}{L} T (1-\alpha)$

$e^{\varepsilon} \simeq 1+\varepsilon$ avec $\tau > T$, $\tau = L/R$

$\tau >> \alpha T$

c) Valeur moyenne de la tension $v_c(t)$.

$$V_{cmoy} = \frac{1}{T}\int_0^T v_c(t)\, dt = \int_0^{\alpha T} E_s\, dt = \alpha E_s$$

I_{cmoy} ? $\quad u_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} + E$

$$u_c\, dt = R i_c\, dt + \cancel{L\, di_c} + E\, dt$$

$$u_{cmoy} = R i_{cmoy} + E \rightarrow I_{cmoy} = \frac{u_{cmoy} - E}{R}$$

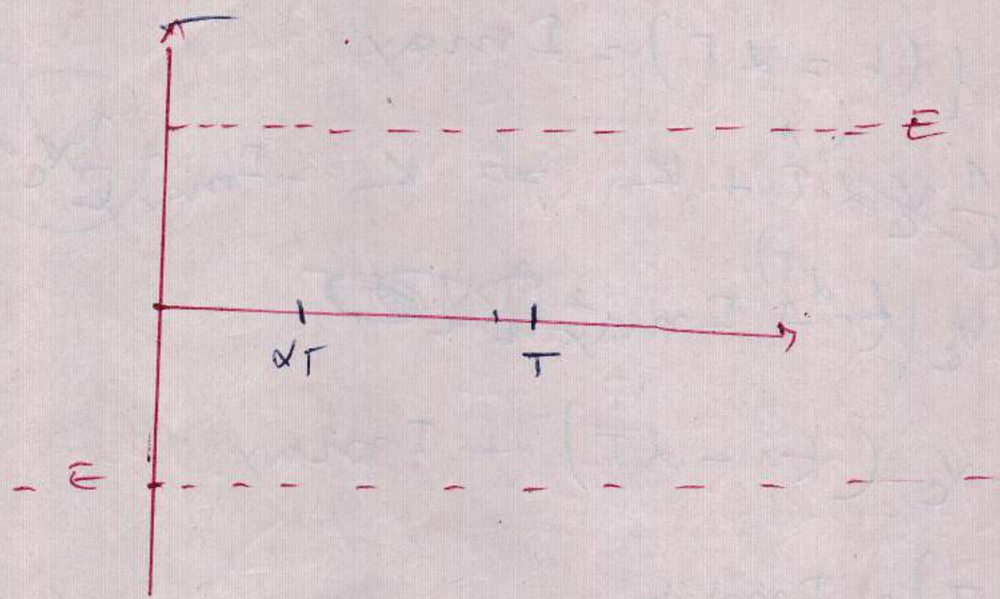
$$\boxed{I_{cmoy} = \frac{\alpha E_s - E}{R}}$$

② ③

le hacheur est un élévateur de tension

$$\frac{\alpha}{1-\alpha} < 1 \Rightarrow \alpha < 1-\alpha \Rightarrow 2\alpha < 1 \Rightarrow \alpha < \frac{1}{2}$$

le hacheur est un abaisseur de tension



2

Dans ce cas la bobine décharge une partie de son energie dans la charge

$$V_c = -V_L = -L\frac{di_L}{dt} \Rightarrow$$

$$di = -\frac{1}{L} V_c\, dt$$

$$i_L(t) = -\frac{1}{L} V_c(t-\alpha T) + K'$$

à $t = \alpha T$, $i_L(t = \alpha T) = I_{max}$

$$I_{max} = -\frac{1}{L} V_c \alpha T + K \Rightarrow K = I_{max} + \frac{1}{L} V_c \alpha T$$

$$i_L(t) = -\frac{1}{L} V_c(t - \alpha T) + I_{max}$$

$$i_L(t) = -\frac{1}{L} V_c\,(t - \alpha T) + I_{max}$$

à $t = T$ $i_L(t = T) = I_{min}$

$$i_L(t = T) = I_{min} = -\frac{1}{L} V_c\,(T - \alpha T) + I_{max}$$

$$I_{max} - I_{min} = \boxed{\Delta I = \frac{1}{L} V_c T(1-\alpha)}\ \text{③}$$

de ② et ③ on trouve:

$$\frac{1}{L} V_c T(1-\alpha) = \frac{E}{L}\alpha T$$

$$\boxed{V_c = E\,\frac{\alpha}{1-\alpha}}$$

$$\frac{V_c}{E} = \frac{\alpha}{1-\alpha} > 1$$

$$\alpha > 1 - \alpha$$

$$2\alpha > 1 \Rightarrow \alpha > \frac{1}{2}$$

Hacheurs à liaison indirecte

1- Introduction

Pour commander le transfert d'énergie entre deux sources de même nature, il faut utiliser un hacheur à liaison indirecte (ou à commutation) c-à-d le circuit comporte un élément inductif ou capacitif

2- hacheur à commutation selfique

a) schéma de principe

soit le montage

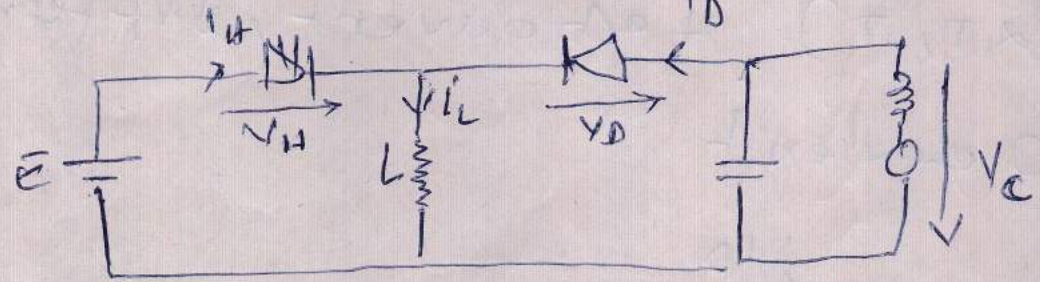
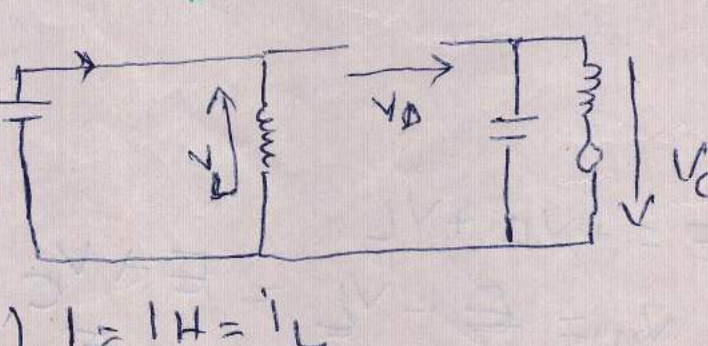


schéma ①

b) analyse de fonctionnement :

pour $t \in [0, \alpha T]$: H est fermé, D est bloquée ouverte

schéma ① devient :



$$\begin{cases} I = I_H = i_L \\ V_H = 0 \\ I_D = 0 \end{cases} \quad V_D = -(V_L + V_C) = -(E + V_C)$$

Dans cette cas la bobine est reliée à la source elle immagazine d'energie

$$V_L = E \Rightarrow L\frac{di}{dt} = E \Rightarrow di = \frac{E}{L}dt$$

$$i_L(t) = \frac{E}{L}t + K$$

à $t=0$ $\quad i_L(0) = I_{min} \Rightarrow I_{min} = \frac{E}{L}\times 0 + K$

$K = I_{min}$ d'où $\boxed{i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{min}}$ -- (1)

à $t = \alpha T$ $\quad i_L(t=\alpha T) = I_{max}$

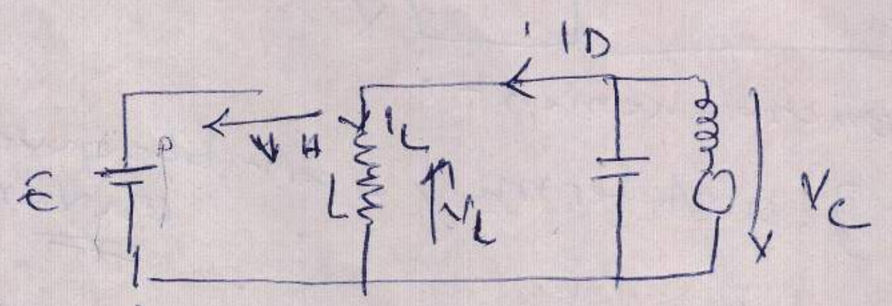
d'ù:

$\Rightarrow I_{max} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{min}$

$I_{max} - I_{min} = \boxed{\Delta I = \frac{E}{L}\alpha T}$ ------ (2)

pour $t \in (\alpha T, T)$ H est ouvert, D fermée

schéma (1) devient



$$\begin{cases} i_D = i_L \\ i_H = 0 \\ V_C = -V_L \\ V_D = 0 \\ \cancel{V_H = E + V_L} \quad E = +V_H + V_L \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_H = E - V_L = E + V_C$$

21

③ ②

① et ② $\Rightarrow$

$$\frac{I}{\cancel{q}}(1-\alpha)\cancel{T} = \frac{I_{ch}}{\cancel{e}}\alpha \cancel{T}$$

$$\Rightarrow I = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{ch}$$

$$\frac{V_c}{E} = \frac{I}{I_{ch}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

3- Hacheur à commutation capacitive

① ③ ③

a) schéma de principe

le montage est tel que

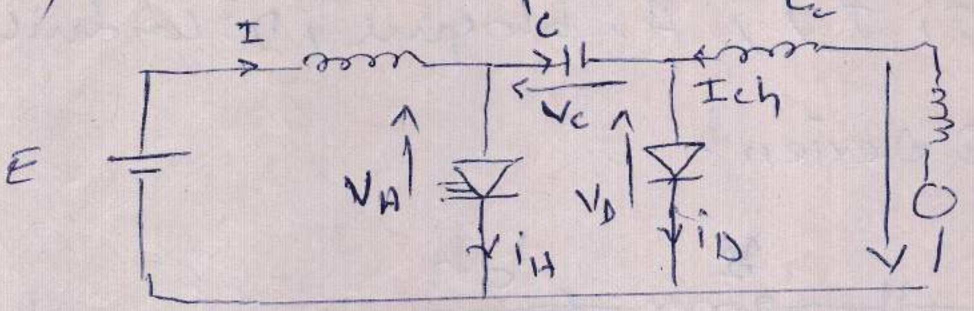
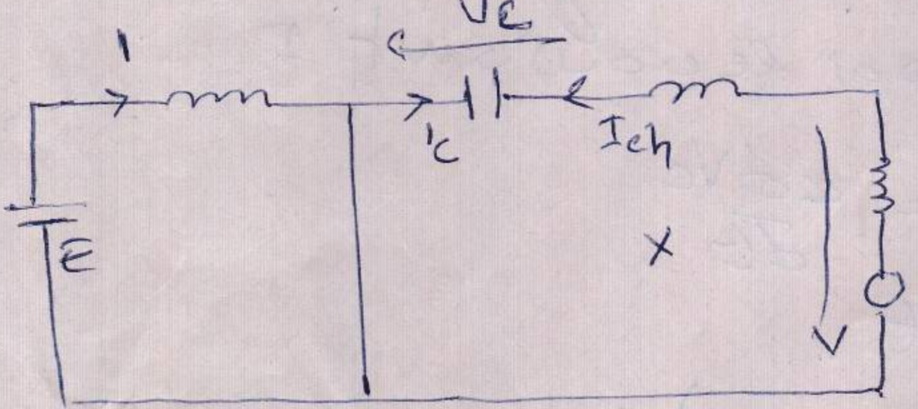


schéma ①

b) analyse de fonctionnement

pour $t \in [0, \alpha T]$: H : conduit, D : bloquée.

le schéma ① devient



le condensateur va décharger dans la charge

$$i_c = -i_{ch} = c\frac{dV_c}{dt}$$

$$\Rightarrow V_c = \frac{1}{c}\int i_c\, dt = -\frac{1}{c}\int i_{ch}\, dt$$

$$= -\frac{1}{c} i_{ch}\, t + K$$

à $t = 0$ / $V_c(t=0) = V_{c\,max} \Rightarrow V_{c\,max} = K$

Alors :

$$V_c = -\frac{i_{ch}}{c} t + V_{c\,max}$$

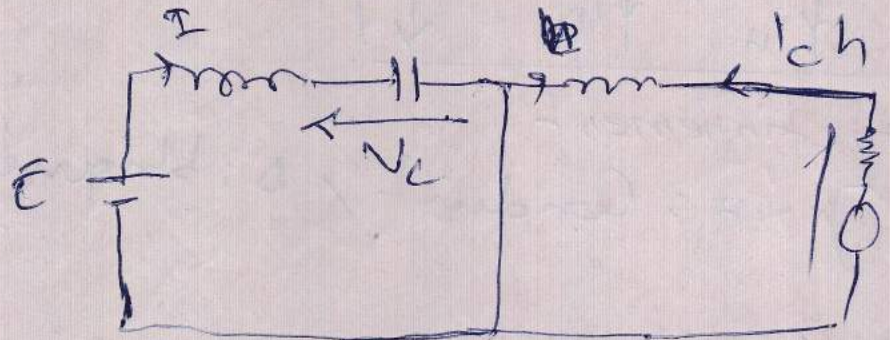
à $t = \alpha T$, $V_c(t = \alpha T) = V_{c\,min}$

$V_{cmin} = -\frac{I_{ch}}{C}\alpha T + V_{cmax}$

$\Rightarrow V_{cmax} - V_{cmin} = \Delta V_c = \frac{I_{ch}}{C}\alpha T$ (1)

Pour $t \in (\alpha T, T)$, H : bloqué, D : conduite

le schéma (1) devient :



le condensateur est charger à travers la source E par le courant I

donc : $I = I_c = C\frac{dV_c}{dt}$

$dV_c = \frac{1}{C} I_c \, dt$

$\Rightarrow V_c(t) = \frac{I_c}{C}(t - \alpha T) + \underline{\underline{C}}$ $(I_c = I)$

pour $t = \alpha T$, $V_c(t = \alpha T) = V_{cmin}$

$\Rightarrow V_{cmin} = C$ i.e. $V_c(t) = \frac{I}{C}(t - \alpha T) + V_{cmin}$

pour $t = T$ $V_c(t = T) = V_{cmax}$

$V_{cmax} = \frac{I}{C}(T - \alpha T) + V_{cmin}$

$\boxed{\Delta V_c = \frac{I}{C}(T - \alpha T)}$ (2)