Faculté de Technologie
Département de génie électrique
1er Année Master CMT
Matière: EPA
M'sila : 2020/2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mohamed Boudiaf de M'sila

Chapitre 1 Rappel sur les convertisseurs DC-DC non isolés

III.1 INTRODUCTION

Le convertisseur continu-continu est un convertisseur statique capable de transiter l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue avec un rendement presque égale à l'unité. Il a pour fonction de fournir une tension ou un courant continu de valeur moyenne réglable à partir d'une tension ou un courant continu fixe. La tension ou le courant continu fixe peut être une batterie d'accumulateurs, un redresseur à diodes connecté à un réseau alternatif, une alimentation stabilisée, etc.

Les représentations symboliques couramment utilisées pour schématiser un convertisseur DC/DC sont données par la figure III.1.

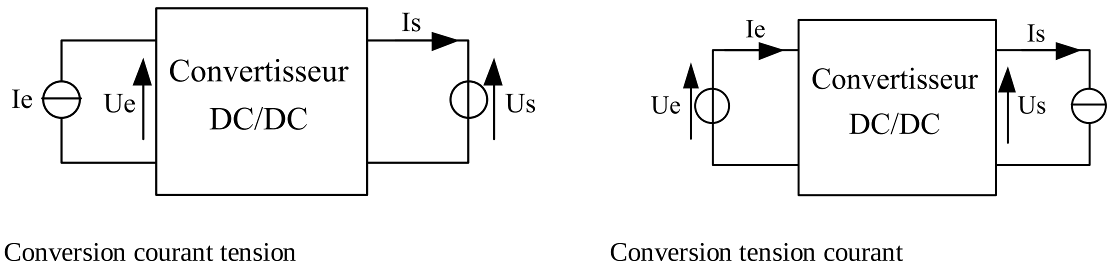


Fig. III.1. Représentations symboliques d'un convertisseur DC/DC

Selon la connexion entre les deux sources continues, nous distinguons deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux dont les deux sources sont non isolés, appelés **hacheurs**, et ceux qui comportent une isolation galvanique réalisée par un transformateur, appelés **alimentations à découpage**. Dans ce chapitre, nous allons étudier que les hacheurs.

III.2 LES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU NON ISOLES

Selon l'application de ces hacheurs ou le sens de transfert de l'énergie par ces hacheurs, nous distinguons deux types de hacheurs. Lorsque le transfert de l'énergie a un seul sens, on parle de hacheurs non réversibles. Lorsque le transfert de l'énergie est dans les deux sens, on parle alors de hacheurs réversibles. L'application principale des hacheurs est la variation de vitesse des machines à courant continu.

III.2.1. Les hacheurs non réversibles

Les hacheurs non réversibles sont des convertisseurs statiques réalisés par des interrupteurs électroniques non réversibles en courant et en tension (unidirectionnels en courant et en tension).

Selon la valeur de la tension moyenne au niveau des deux sources et la position des interrupteurs constituant le convertisseur, nous distinguons deux structures des hacheurs non réversibles. Lorsque la valeur moyenne de la tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée, on parle de hacheur **non réversible série** (l'interrupteur commandable est en série avec la source d'entrée). Lorsque la valeur moyenne de la tension de sortie est supérieure à celle de l'entrée, on parle de hacheur **non réversible parallèle** (l'interrupteur commandable est en parallèle avec la source d'entrée).

La valeur de la tension moyenne est calculée à partir de la tension de la source d'entrée et la durée de fonctionnement du hacheur liée au rapport cyclique α. Le rapport cyclique α est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur T_{ON} et la période de hachage ou de commutation T de celui-ci :

$$\alpha = \frac{T_{ON}}{T} \qquad \text{(III.1)}$$

III.2.1.1 Hacheur non réversible série (abaisseur, dévolteur ou Buck)

L'hacheur série permet la commande de débit d'une source de tension et un récepteur de courant. La structure du hacheur série non réversible peut être réalisée à partir du système qui est décrit sur la figure III.2.

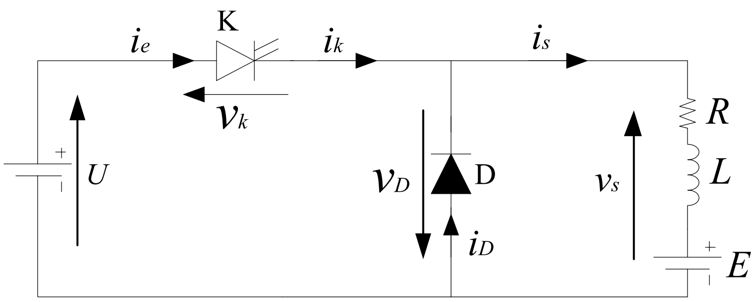


Fig. III.2. Hacheur série

Le hacheur série présente deux interrupteurs, dont l'un est commandé à l'amorçage et au blocage alors que l'autre est une simple diode de puissance. La structure présentée n'est réversible ni en courant, ni en tension. Pour commencer, la charge (récepteur) adoptée est un moteur à courant continu (charge active R, L et E).

L'inductance L est dans le rôle de limiter l'ondulation de courant dans la machine.

La diode D **de roue libre** assure la protection du transistor K et participe au lissage du courant dans le moteur en assurant la continuité du courant de l'inductance.

III.2.1.1.1 Analyse de fonctionnement

Selon la valeur du courant de sortie (le débit dans la bobine) ou la valeur du rapport cyclique, nous allons distinguer deux cas de la conduction: la **conduction continue_(**courant non interrompu) et la **conduction discontinue (**courant interrompu).

La conduction continue est caractérisée par le fait que le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, même avec la présence d'ondulation due au découpage. Dans ce cas, le courant de sortie est suffisamment fort et α est supérieur à α_{lim} donné par:

$$\alpha_{lim} = \frac{\tau}{T}\ln\left[\frac{E}{U}\left(e^{\frac{T}{\tau}} - 1\right) + 1\right] \qquad \text{(III.2)}$$

Avec $\tau = \frac{L}{R}$ la constante de temps électrique.

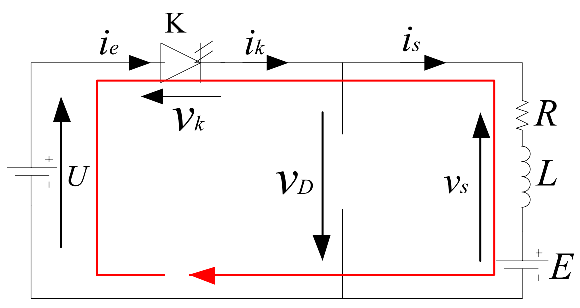
La conduction discontinue: dans ce cas, le courant moyen de sortie est bien entendu positif, mais, en raison de sa faible valeur moyenne, l'ondulation du courant dans l'inductance peut amener ce dernier à s'annuler. Or, les interrupteurs étant unidirectionnels, le courant ne peut changer de signe et reste à 0. Dans ce régime α est inférieur à α_{lim}.

***III.2.1.1.1.1 Conduction continue* (α supérieur à α_{lim})**

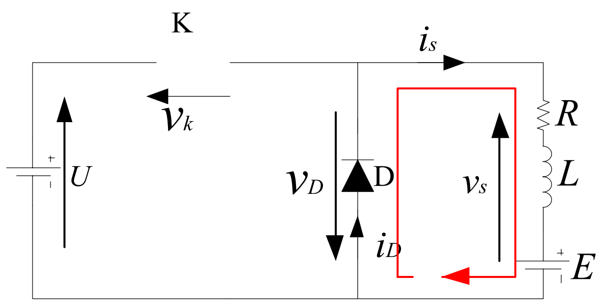
Dans ce cas, le courant est suffisant et ne s'annule jamais, la conduction est continue (non interrompue) tout au long de la période T et elle se décompose en deux phases:

0 <t < αT, K fermé (passant), D bloquée, **phase active**, Fig. III.3-a.

αT< t < T, K ouvert (bloqué), D passante, **phase de roue libre**, Fig. III.3-b.



-a-



-b-

Fig. III.3. Fonctionnement d'un hacheur série pendant ses deux phases

Phase active : l'interrupteur K relie directement la source avec le récepteur, Fig. III.3-a.

0 <t < αT, K fermé (passant), D bloquée.

Pendant cet intervalle, le courant i_D est nul, et le courant i_e et i_s sont identiques.

La tension v_k est nulle. La tension v_D= -U.

La tension de sortie est égale la tension de source v_S=U.

➢ ***Courant dans la bobine***

La loi des mailles donne par ailleurs:

$$E + v_L + Ri_s = U = v_s \qquad \text{(III.3)}$$

L'équation différentielle définissant le courant et la tension aux bornes de l'inductance dans ce cas est donnée par:

$$L\frac{di_s}{dt} + Ri_s = U - E \qquad \text{(III.4)}$$

C'est un régime transitoire du 1^er^ ordre, dont on peut mettre l'équation sous sa forme canonique

$$\frac{L}{R}\frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{U-E}{R} \qquad \text{(III.5)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donné l'expression qui représente l'évolution du courant de sortie. L'expression du courant i_s est donc:

$$i_s = i_{min}e^{\frac{-t}{\tau}} + \frac{U-E}{R}(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) \qquad \text{(III.6)}$$

Avec i_{min} le courant dans l'inductance à instants t=0.

Pendant cet intervalle, le courant i_s croit de i_{min} jusqu'à i_{max} et l'énergie magnétique stockée dans l'inductance ($0{,}5Li_s^2$) augmente.

Calcul de i_{max}

A instants t=αT, le courant $i_s=i_{max}$, donc le courant i_{max} est donné par:

$$i_s(t = \alpha T) = i_{max} = i_{min}e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} + \frac{U-E}{R}(1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}) \qquad \text{(III.6)}$$

<u>Phase de roue libre</u>: la diode de roue libre court-circuite le récepteur, Fig. III.3-b.

αT<t < T, K ouvert (bloquée), D passante.

Pendant cet intervalle, le courant i_e est nul et les courants i_D, i_s sont identiques

La tension v_k=U. La tension v_D=0. La tension de sortie est nulle $v_s=0$.

➢ ***Courant dans la bobine***

La loi des mailles donne par ailleurs:

$$E + v_L + Ri_s = 0 \qquad \text{(III.7)}$$

L'équation différentielle définissant le courant dans ce cas est donnée par:

$$\frac{L}{R}\frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{-E}{R} \qquad \text{(III.8)}$$

A l'instant $t=\alpha T$, le courant i_s est égale à i_{max}, donc le courant i_s est donné par :

$$i_s = i_{\max}e^{-(\frac{t-\alpha T}{\tau})} + \frac{E}{R}(e^{-(\frac{t-\alpha T}{\tau})} - 1) \qquad \text{(III.9)}$$

Pendant cet intervalle, le courant i_s décroit et l'inductance se décharge.

- *Calcul de* i_{min}

A instants $t=T$, le courant $i_s=i_{min}$, donc le courant i_{min} est donné par :

$$i_s(t=T) = i_{min} = i_{\max} e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} + \frac{E}{R}(e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} - 1) \qquad \text{(III.10)}$$

➢ *Chronogrammes des tensions et des courants en conduction continue*

La figure III.4 illustre les allures de la tension d'entrée $U_e(t)$, de la tension de sortie $v_s\ (t)$, de la tension aux bornes d'inductance $v_l(t)$, du courant d'entrée $i_e(t)$, du courant de sortie $i_s(t)$, et du courant traversent la diode $i_d(t)$.

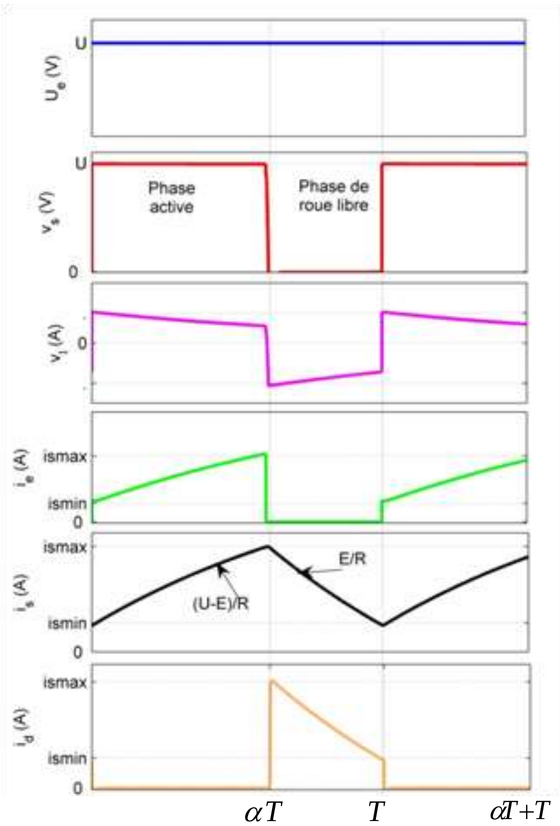


Fig. III.4 Chronogrammes des tensions et des courants en conduction continue

➢ *Ondulation du courant dans la bobine*

Dans l'étude des hacheurs, il est important d'apprécier l'ondulation du courant.

Durant la conduction est continue, le courant dans la bobine oscille entre i_{min} et i_{max}, ce qui en résulte une ondulation absolue de valeur:

$$\Delta i_s = i_{max} - i_{min} \qquad \text{(III.11)}$$

- ***Calcul des courants i_{min} et i_{max}***

Pour calculer les courants $i_{\min}$ et $i_{\max}$, nous utilisons la continuité de i_s à $t=\alpha T$ et la périodicité de i_s ($i_s(t = 0) = i_s(t = T)$).

$$i_{min} = i_{\max} e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} + \frac{E}{R}(e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} - 1) \qquad \text{(III.12)}$$

$$i_{max} = i_{min} e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} + \frac{U-E}{R}(1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}) \qquad \text{(III.13)}$$

Par la résolution du système d'équations (1) et (2) on obtient.

$$i_{min} = \frac{U}{R}\frac{(e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} - e^{\frac{-T}{\tau}})}{(1-e^{\frac{-T}{\tau}})} - \frac{E}{R} \qquad \text{(III.14)}$$

$$i_{max} = \frac{U}{R}\frac{(1-e^{\frac{-\alpha T}{\tau}})}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)} - \frac{E}{R} \qquad \text{(III.15)}$$

L’ondulation du courant $\Delta i_s = i_{max} - i_{min}$ est donnée par:

$$\Delta i_s = i_{max} - i_{min} = \frac{U}{R}\frac{(1-e^{\frac{-\alpha T}{\tau}})}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)} - \frac{E}{R} - \frac{U}{R}\frac{(e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} - e^{\frac{-T}{\tau}})}{(1-e^{\frac{-T}{\tau}})} + \frac{E}{R} \qquad \text{(III.16)}$$

$$\Delta i_s = i_{max} - i_{min} = \frac{U}{R}[\frac{(1-e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} - e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} + e^{\frac{-T}{\tau}})}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)}] \qquad \text{(III.17)}$$

$$\Delta i_s = \frac{U}{R}[\frac{(1-e^{\frac{-\alpha T}{\tau}})(1-e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T})}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)}] \qquad \text{(III.18)}$$

En pratique, la période de fonctionnement T du hacheur est très petite devant la constante de temps τ (fréquence de hachage élevée). Ce qui rend le rapport $\frac{T}{\tau}$ très petit.

Quand $\frac{T}{\tau} \to 0$ et sachant que $e^x \cong 1 + x$, il vient:

$e^{-(\frac{1-\alpha}{\tau})T} = 1 - (\frac{1-\alpha}{\tau})T$; $e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} = 1 - \frac{\alpha T}{\tau}$; $e^{\frac{-T}{\tau}} = 1 - \frac{T}{\tau}$

$$\Delta i_s = \frac{U}{R}\frac{\alpha(1-\alpha)T}{\tau} \qquad \text{(III.19)}$$

$$\Delta i_s = \frac{U\alpha(1-\alpha)}{fL} \qquad \text{(III.20)}$$

L’ondulation du courant $\Delta i_s = i_{max} - i_{min}$ est maximale pour α = 1/2 et nulle lorsque α vaut 0 ou 1. Cette ondulation diminue lorsque la valeur de l’inductance L augmente ou la période de commutation T diminue c.à.d. la fréquence de commutation f augmente.

L’ondulation maximale est donné par : $\Delta i_{smax} = \frac{U}{4fL}$

➢ ***Valeurs moyennes de v_s, v_D et i_s***

- ***les valeurs moyennes V_s et V_D***

La loi des mailles donne par ailleurs: $v_s = -v_D$

La valeur moyenne de la tension de sortie est calculée par:

$$V_s = \frac{1}{T}\int_0^T v_s(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} Udt \qquad \text{(III.21)}$$

Lorsque $\begin{cases} v_s(t) = U \ \grave{a}\ t \in [0, \alpha T] \\ v_s(t) = 0 \ \ \grave{a}\ t \in [\alpha T, T] \end{cases}$

Ce qui donne:

$$V_s = \frac{1}{T}\alpha T U \qquad \text{(III.22)}$$

Alors

$$V_s = \alpha U \text{ et } V_D = -\alpha U \qquad \text{(III.23)}$$

Lorsque $\alpha \in [0,1]$, la valeur moyenne de la tension de sortie V_s peut-être régler dans $[0, U]$, donc le montage est abaisseur de tension ou dévolteur c.-à-d. la puissance circule toujours de la source qui possède une tension supérieure vers la source qui possède une tension inférieure.

- ***la valeur moyenne I_s***

La loi des mailles donne par ailleurs:

$$v_s = E + v_L + Ri_s \qquad \text{(III.24)}$$

La valeur moyenne d'une somme est la somme des valeurs moyennes et que la moyenne d'un constant est égal à cette constante.

$$V_s = E + V_L + RI_s \qquad \text{(III.25)}$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes d'une bobine étant toujours nulle en régime périodique. On obtient donc la valeur moyenne de i_s comme:

$$I_s = \frac{\alpha U - E}{R} \qquad \text{(III.26)}$$

A partir de cette égalité, on peut calculer facilement i_{min} et i_{max} lorsque

$$I_s = \frac{i_{min} + i_{max}}{2} \qquad \text{(III.27)}$$

Donc

$$i_{min} \approx I_s - \frac{\Delta i_s}{2} \qquad \text{(III.28)}$$

$$i_{max} \approx I_s + \frac{\Delta i_s}{2} \qquad \text{(III.29)}$$

- ***Calcule de la puissance transmise***

Dans notre document on considère que les interrupteurs sont idéaux c.-à-d. la puissance de sortie peut être considérée égale à la puissance d'entrée. En continu et pour une tension de source parfaitement constant, la relation de la puissance est donné par.

$$p = V_s . I_s = U . I_e \qquad \text{(III.30)}$$

***III.2.1.1.1.2 Conduction discontinue* (α inférieur à α_{lim})**

Lorsque la fréquence f du hacheur est très petit ou bien l'inductance L à une valeur très faible, le rapport T/τ n'est pas négligeable. Dans ce cas, le courant est faible et s'annule pendant un intervalle [βT, T], la conduction est discontinue (interrompue) et elle se décompose en trois phases :

$\boldsymbol{0 < t < \alpha T}$, K fermé (passant), D bloquée, **phase active**.

$\boldsymbol{\alpha T < t < \beta T}$, K ouvert (bloqué), D passante, **phase de roue libre**.

$\boldsymbol{\beta T < t < T}$, K ouvert (bloqué), D bloquée, **phase de repos**.

Phase active

$\boldsymbol{0 < t < \alpha T}$, K fermé (passant), D bloquée.

Pendant cet intervalle, le courant i_D est nul et les courants i_e et i_s sont identiques.

La tension v_k est nulle. La tension v_D=-U.

La tension de sortie est égale la tension de source $v_s = U > 0$.

- ***Courant dans la bobine***

L'équation différentielle définissant le courant dans ce cas est donnée par:

$$U = vs = E + L\frac{di_s}{dt} + Ri_s \qquad \text{(III.31)}$$

C'est un régime transitoire du 1er ordre, dont on peut mettre l'équation sous sa forme canonique

$$\frac{L}{R}\frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{U-E}{R} \qquad \text{(III.32)}$$

$$i_{\max} = \frac{\alpha T}{\tau}\left(\frac{U-E}{R}\right) \qquad \text{(III.33)}$$

$$i_{\max} = \frac{\alpha T}{L}(U-E) = \frac{\alpha}{fL}(U-E) \qquad \text{(III.34)}$$

Le courant i_s croit pendant cet intervalle et l'énergie magnétique stockée dans l'inductance ($0{,}5Li_s^2$) augmente.

Phase de roue libre

$\boldsymbol{\alpha T < t < \beta T}$, K ouvert (bloqué), D passante.

Pendant cet intervalle, le courant i_e est nul et les courants i_D, i_s sont identiques.

La tension v_k = -U. La tension v_D=0.

La tension de sortie est nulle $v_s=0$.

- ***Courant dans la bobine***

L'équation différentielle définissant le courant dans ce cas est donnée par:

$$\frac{L}{R}\frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{-E}{R} \qquad \text{(III.35)}$$

L'expression du courant est:

$$i_s = (i_{\max}+\frac{E}{R})e^{-(\frac{t-\alpha T}{\tau})} - \frac{E}{R} \qquad \text{(III.36)}$$

$$i_{\max} = \frac{E}{R}e^{\left(\frac{\beta T-\alpha T}{\tau}\right)} - \frac{E}{R} \qquad \text{(III.37)}$$

$$i_s = \frac{E}{R}(e^{-\left(\frac{t-\beta T}{\tau}\right)} - 1) \qquad \text{(III.38)}$$

En utilisant l'approximation $(e^x = 1 + x)$ on obtient:

$$i_{\max} = \frac{ET}{R}\left(\frac{\beta-\alpha}{\tau}\right) \qquad \text{(III.39)}$$

- ***Ondulation du courant dans la bobine***

Dans une conduction discontinue, le courant dans la bobine ondule entre *0* et i_{max} et son ondulation donnée par:

$$\Delta i_s = i_{max} = \frac{ET}{R}\left(\frac{\beta-\alpha}{\tau}\right) = \frac{E}{fL}(\beta-\alpha) \qquad \text{(III.40)}$$

- *la valeur de β*

$$i_{max} = \frac{E}{fL}(\beta-\alpha) = \frac{\alpha T}{L}(U-E) \qquad \text{(III.41)}$$

$$E(\beta-\alpha) = \alpha(U-E) \qquad \text{(III.42)}$$

$$\beta = \alpha\frac{U}{E} \qquad \text{(III.43)}$$

<u>Phase de repos</u>

$\boldsymbol{\beta T<t<T}$, K ouvert (bloqué), D bloquée. Dans cet intervalle la tension de sortie est égale le f.e.m E, $v_s=E$ et le courant et la tension de l'inductance sont nuls $i_L=0$, $v_L=0$.

La tension $v_D=-E$. La tension $v_k=v_D+U=U-E$

- ***Valeurs moyennes de v_s, v_D et i_s***

  - ***les valeurs moyennes V_s et V_D***

En régime périodique, la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle.

La loi des mailles donne par ailleurs:

$$v_s = -v_D$$

$$V_s = \alpha U + (1-\beta)E \qquad \text{(III.44)}$$

- *la valeur moyenne I_s*

La loi des mailles donne par ailleurs:

$$v_s = E + v_L + Ri_s \qquad \text{(III.45)}$$

$$I_s = \frac{\alpha U - \beta E}{R} \qquad \text{(III.46)}$$

➢ ***Chronogrammes des tensions et des courants en conduction discontinue***

La figure III.5 représente les allures de la tension d'entrée *$U_e(t)$*, de la tension de sortie *v_s (t)*, de la tension aux bornes d'inductance *$v_l(t)$*, du courant d'entrée *$i_e(t)$*, du courant de sortie *$i_s(t)$*, et du courant traversent la diode i_d(t).

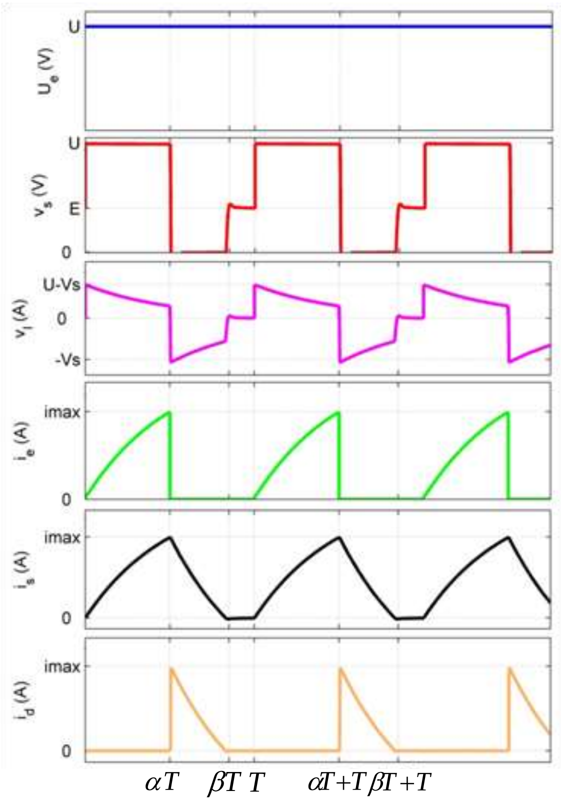


Fig III.5 Chronogrammes des tensions et des courants en conduction discontinue

III.2.1.2 Hacheur non réversible parallèle survolteur (élévateur ou boost).

L'hacheur parallèle permet la commande de débit d'une source de courant alimentant un récepteur de tension. La structure du hacheur parallèle non réversible peut être réalisée à partir du système qui est décrit sur la figure III.8.

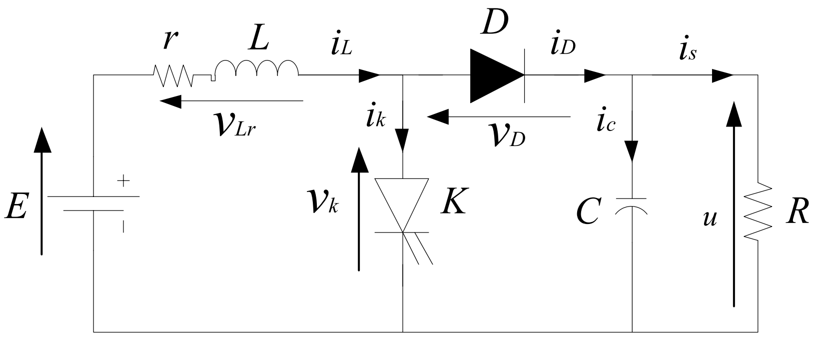


Fig. III.8. Hacheur parallèle

Comme le hacheur série, le hacheur parallèle possède deux interrupteurs, dont l'un est commandé à l'amorçage et au blocage en parallèle avec la source du courant alors que l'autre est une simple diode de puissance. La structure présentée n'est pas réversible ni en courant, ni en tension. Du côté de la source d'entrée, on a pris un générateur de tension en série avec une inductance de résistance interne *r* pour réaliser une source de courant. Du côté de la charge (récepteur), on a pris une résistante R en parallèle avec un condensateur. Le condensateur à une capacité suffisante, pour considérer que la tension de sortie v_S comme parfaitement continue.

III.2.1.2.1 Analyse de fonctionnement

Comme le cas d'un hacheur série, le hacheur parallèle fonctionne aussi en deux régimes selon la valeur l'inductance de la source: la **conduction continue (**courant non interrompu) et la **conduction discontinue (**courant interrompu).

III.2.1.2.1.1 Conduction continue

Dans ce cas, le courant est suffisant et ne s'annule jamais tout au long de la période *T* et elle se décompose en deux phases:

$0 < t < \alpha T$, K fermé, D bloquée, **phase d'accumulation**, Fig. III.9-a

$\alpha T < t < T$, K ouvert, D passante, **phase active**, Fig. III.9-b.

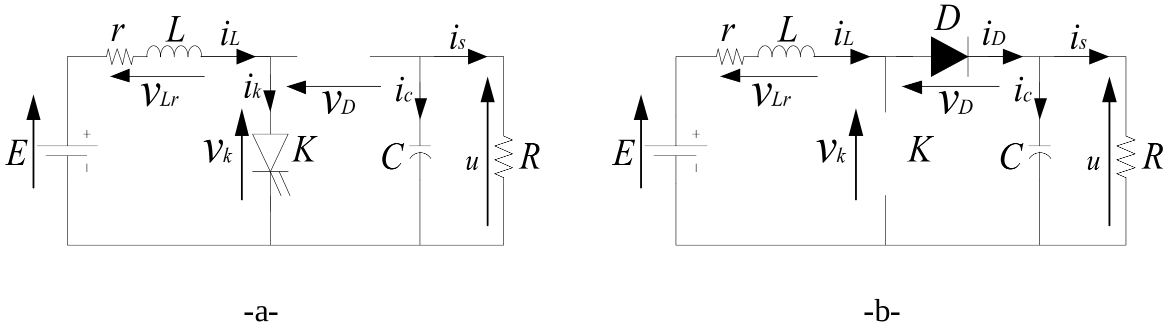


Fig .III.9 Fonctionnement d'un hacheur parallèle pendant les deux phases

<u>Phase d'accumulation</u> **:** l'interrupteur K court-circuite la source, Fig. III.9-a.

0 < t < αT, K fermé, D bloquée.

Pendant cet intervalle, le courant i_D=i=0, et les courants i_k et i_L sont identiques.

Le condensateur assure d'alimentation de la charge, le courant i_C =-i_s.

La tension $v_L = L\frac{di_L}{dt} = E - ri_L$ La tension v_k=0. La tension v_D=-u=-v_C=-Ri_s.

- ***Courant traversant l'inductance de la source***

L'équation différentielle définissant le courant et la tension aux bornes de l'inductance dans ce cas est donnée par:

$$L\frac{di_L}{dt} + ri_L = E \qquad \text{(III.47)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donner l'expression qui représente l'évolution du courant de source (d'inductance).

$$i_L = i_{min}e^{\frac{-t}{\tau}} + \frac{E}{r}(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) \qquad \text{(III.48)}$$

Avec i_{min} le courant dans l'inductance à l'instants $t=0$.

Pendant cet intervalle, le courant i_L croit de i_{min} jusqu'à i_{max} comme indiqué la figure III.10 et l'énergie magnétique stockée dans l'inductance ($0{,}5Li_L^2$) augmente.

- ***Calcul du courant i_{max}***

A l'instant $t=\alpha T$ le courant i_L=i_{max}

$$i_L(\alpha T) = i_{max} = i_{min}e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{r}(1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}) \qquad \text{(III.49)}$$

<u>Phase active</u> **:** la diode relié directement la source avec le récepteur, Fig. III.9-b.

αT < t < T, K ouvert, D passante.

Pendant cet intervalle, le courant i_D=i_L=i

Le courant i_k =0. Le courant $i = i_{s+}\ i_C$. La tension $v_L = L\frac{di_L}{dt} = E - ri_L - U$. La tension v_D est nulle.

La tension $v_k = v_e$ =-u=-v_C= $E - ri_L - v_L$.

- ***Le courant i_L et la tension v_L de la bobine***

L'équation différentielle définissant le courant et la tension aux bornes de l'inductance dans ce cas est donnée par:

$$L\frac{di_L}{dt} + ri_L = E - U \qquad \text{(III.50)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donner l'expression qui représente l'évolution du courant de source (l'inductance).

$$i_L = i_{\max} e^{-\left(\frac{t-\alpha T}{\tau}\right)} + \frac{E-U}{r}\left(1 - e^{-\left(\frac{t-\alpha T}{\tau}\right)}\right) \qquad \text{(III.51)}$$

Le courant i_L décroit pendant cet intervalle de i_{max} jusqu'à i_{min} lorsque E<U comme indiqué sur la figure III.10. Pendant cet intervalle, l'inductance se décharge et l'énergie stockée est transférée au condensateur et la charge *R*.

- ***Calcul du courant i_{min}***

Pendant ce phase et dans l'instant $t=T$ le courant $i_L=i_{min}$

$$i_{min} = i_{\max} e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T} + \frac{E-U}{r}\left(1 - e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T}\right) \qquad \text{(III.52)}$$

➢ ***Chronogrammes des tensions et des courants en conduction continue***

Nous désignons les allers suivants : la tension d'entrée $v_e(t)$, la tension aux bornes d'inductance $v_l(t)$, le courant traversent l'inductance $i_L(t)$, le courant traversent l'interrupteur K $i_k(t)$, la tension $v_k(t)$ aux bornes d'interrupteur K, le courant traversent la diode $i_d(t)$, la tension aux bornes de diode $v_d(t)$, la tension de sortie u (t), le courant traversent le condensateur $i_c(t)$ et le courant $i_s(t)$ de la charge R.

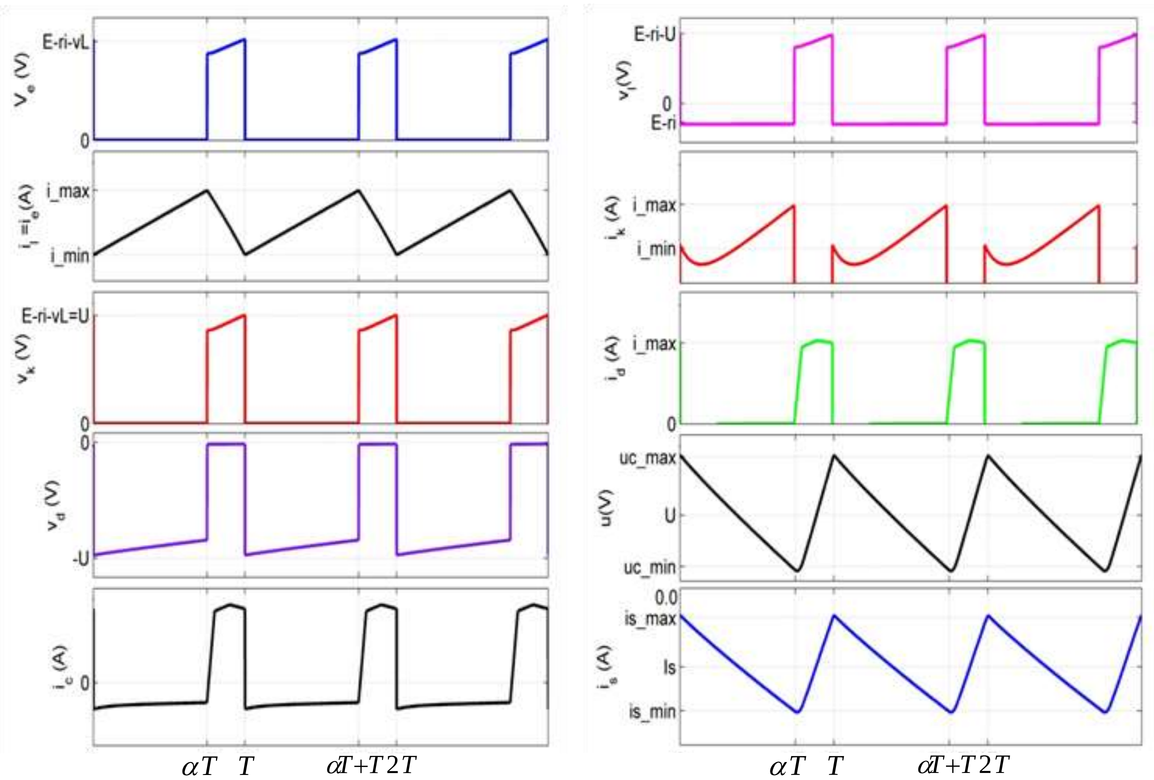


Fig. III.10 Chronogrammes des tensions et des courants en conduction continue

➢ ***Valeurs moyennes***

- ***les valeurs moyennes U et I_s***

Si on suppose que le courant de source $I_e=I_L$ est parfaitement continu comme indiqué sur la figure III.11, alors on peut calculer la valeur de *U* comme suit:

$$U = \frac{E - rI_e}{(1-\alpha)} \qquad \text{(III.53)}$$

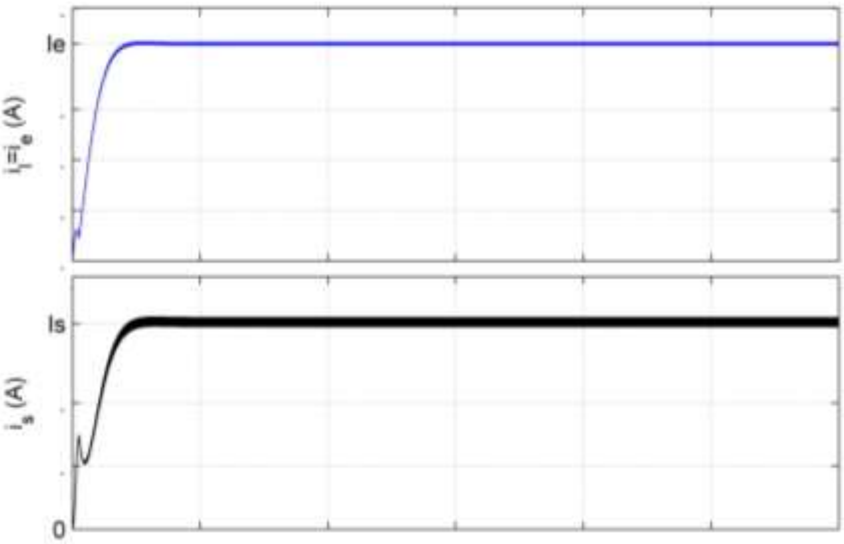


Fig. III.11. Le courant de source i_e et de sortie i_s

- ***la valeur moyenne de I_s et de I_e***

Lorsque le courant de source I_e est parfaitement continu, alors on peut calculer la valeur de I_s comme suit:

$$I_s = I_e(1-\alpha) \qquad \text{(III.54)}$$

$$I_s = \frac{U}{R} \qquad \text{(III.55)}$$

Donc

$$I_e = \frac{U}{R(1-\alpha)} \qquad \text{(III.56)}$$

La valeur moyenne U est.

$$U = \frac{ER(1-\alpha)}{R(1-\alpha)^2 + r} = I_e R(1-\alpha) \qquad \text{(III.57)}$$

A partir de cet expression, on peut remarquer que la valeur moyenne de la tension et donc du courant de sortie sont réglables par le rapport cyclique α. Dans ce cas le transfert de la puissance entre la source et le récepteur est réglable selon l'expression suivante:

$$P = I_e(1-\alpha)U \qquad \text{(III.58)}$$

Donc le montage est élévateur de tension ou survolteur c.-à-d. la puissance circule toujours de la source qui possède une tension inférieure vers la source qui possède une tension supérieure.

➢ ***Ondulation de courant dans la bobine***

Le courant dans la bobine oscille entre i_{min} et i_{max}, ce qui en résulte une ondulation de valeur:

$$\Delta i_L = i_{max} - i_{min} \qquad \text{(III.59)}$$

- ***Calcul des courants i_{min} et i_{max}***

Pour calculer les courants $i_{\min}$ et $i_{\max}$ nous utilisons la continuité de i_L à $t=\alpha T$ et la périodicité de i_L ($i_L(t = 0) = i_L(t = T)$).

$$i_{min} = i_{\max} e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T} + \frac{E-U}{r}\left(1 - e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T}\right) \qquad \text{(III.60)}$$

$$i_{max} = i_{min} e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{r}\left(1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}\right) \qquad \text{(III.61)}$$

Par la résolution du système d'équations (III.60) et (III.61) on obtient.

$$i_{min} = \frac{E}{r} - \frac{U}{r}\frac{\left(1-e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T}\right)}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)} \qquad \text{(III.62)}$$

$$i_{max} = -\frac{U}{r}\frac{\left(e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} - e^{\frac{-T}{\tau}}\right)}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)} + \frac{E}{r} \qquad \text{(III.63)}$$

$$\Delta i_L = i_{max} - i_{min} = \frac{U}{r}\left(\frac{1-e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T} - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}} + e^{\frac{-T}{\tau}}}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)}\right) \qquad \text{(III.64)}$$

$$\Delta i_L = \frac{U}{r}\left[\frac{\left(1-e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}\right)\left(1-e^{-\left(\frac{1-\alpha}{\tau}\right)T}\right)}{\left(1-e^{\frac{-T}{\tau}}\right)}\right] \qquad \text{(III.65)}$$

En utilisant l'approximation ($e^x = 1 + x$) on obtient:

$$\Delta i_L = \frac{E\alpha}{fL} \qquad \text{(III.66)}$$

L'ondulation de courant $\Delta i_L = i_{max} - i_{\min}$ est maximale pour $\alpha = 1/2$ et nulle lorsque α vaut 0 ou 1. Cette ondulation diminue lorsque la valeur de l'inductance L augmente ou la période de commutation T diminue c.à.d. la fréquence de commutation f augmente.

L'ondulation maximale est donnée par : $\Delta i_{smax} = \frac{U}{4fL}$

- ***Ondulation de tension aux bornes du condensateur***

Pour calculer l'ondulation de la tension de sortie aux bornes du condensateur C, on suppose que le courant i_S est parfaitement continu.

0 < t < αT

$$v_C = Ri_s \text{ et } i_C = -I_s$$

L'équation différentielle définissant la tension aux bornes du condensateur est donnée par:

$$C\frac{dv_C}{dt} = i_C = -Is \qquad \text{(III.67)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donner l'expression qui représente l'évolution de la tension aux bornes du condensateur.

à t=0, $v_c = u_{max}$, l'expression de la tension v_C est donc:

$$v_C = -\frac{Is}{C}t + u_{max} \qquad \text{(III.68)}$$

à t=αT, $v_c = u_{min}$, l'expression de la tension v_C est donc:

$$v_C(t=\alpha T)=u_{min}=-\frac{Is}{C}\alpha\mathrm{T}+u_{max} \qquad \text{(III.69)}$$

Et lorsque l'ondulation de tension de sortie Δu= u_{max}- u_{min} on à:

$$\Delta v_C=u_{max}-u_{min}=\frac{Is}{C}\alpha\mathrm{T} \qquad \text{(III.70)}$$

$$\Delta v_C=\frac{Is}{fC}\alpha=\frac{U}{RfC}\alpha \qquad \text{(III.71)}$$

L'ondulation de tension de sortie $\Delta v_C=u_{max}-u_{min}$est maximale pour α = α_{max} et nulle lorsque α vaut 0. Cette ondulation diminue lorsque la valeur de *C* augmente ou la période de commutation T diminue c.à.d. la fréquence de commutation *f* augmente.

L'ondulation maximale est donnée par :

$$\Delta v_{Cmax}=\frac{U}{RfC}\alpha_{\max} \qquad \text{(III.72)}$$

III.2.1.2.1.2 Conduction discontinue

La période de commutation dans la conduction discontinue est décomposée en trois phases. La troisième phase est la **phase de repos** qui correspondent aux états des interrupteurs K ouvert et D bloquée (i_L = 0) pendent un intervalle de temps [$\beta T, T$].

Phase d'accumulation **:** l'interrupteur K court-circuite la source, Fig. III.9-a.

0 < t < αT, K fermé, D bloquée.

Pendant cet intervalle, le courant $i_D=i=0$, et les courants i_k et i_L sont identiques

Le condensateur l'alimentation de la charge et le courant i_C =-i_s.

La tension $v_L=L\frac{di_L}{dt}=E-ri_L$

La tension v_k est nulle.

La tension v_D=-u=-v_C=-Ri_s.

- ***Le courant i_L et la tension v_L de la bobine***
- ***Courant traversant l'inductance ou de source***

L'équation différentielle définissant le courant et la tension aux bornes de l'inductance dans ce cas est donnée par:

$$L\frac{di_L}{dt}+ri_L=E \qquad \text{(III.73)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donné l'expression qui représente l'évolution du courant d'inductance de la source de courant.

A $t=0$ $i_L=0$.

$$i_L=\frac{E}{r}-\frac{E}{r}e^{\frac{-t}{\tau}} \qquad \text{(III.74)}$$

Pendant cet intervalle, le courant i_L croit de *0* jusqu'à i_{max} et l'énergie magnétique stockée dans l'inductance ($0{,}5Li_L^2$) augmente en conséquence.

- ***Calcul du courant i_{max}***

A l'instant $t=\alpha T$, le courant $i_L=i_{max}$

$$i_L(\alpha T) = i_{max} = \frac{E}{r}(1 - e^{\frac{-\alpha T}{\tau}}) \qquad \text{(III.75)}$$

A l'aide de l'approximation ($e^x = 1 + x$) on obtient:

$$i_{max} = \frac{E}{r}\frac{\alpha T}{\tau} = \frac{E}{Lf}\alpha \qquad \text{(III.76)}$$

<u>Phase active</u> **:** la diode relié directement la source avec le récepteur, Fig. III.9-b.

$\boldsymbol{\alpha T < t < \beta T}$, K ouvert, D passante.

Pendant cet intervalle, le courant $i_D=i_L=i$

Le courant i_k =0. Le courant $i = i_{s+}$ i_C. La tension $v_L = L\frac{di_L}{dt} = E - ri_L - U$

La tension v_D est nulle. La tension $v_k = u = v_C$.

➢ ***Le courant i_L et la tension v_L de la bobine.***

L'équation différentielle définissant le courant et la tension aux bornes de l'inductance dans ce cas est donnée par:

$$L\frac{di_L}{dt} + ri_L = E - U \qquad \text{(III.77)}$$

La résolution de cette équation différentielle permet de donner l'expression qui représente l'évolution du courant de la source de courant.

$$i_L = \left(i_{max} - \frac{E-U}{r}\right)e^{-\left(\frac{t-\alpha T}{\tau}\right)} + \frac{E-U}{r} \qquad \text{(III.78)}$$

A $t=\alpha T$, le courant $i_L=i_{max}$

Le courant i_L est décroit pendant cet intervalle de i_{max} jusqu'à *0* comme indiqué sur la figure III.12.

Pendant cet intervalle, l'inductance se décharge et l'énergie stockée sera transférée au condensateur et à la charge *R*.

- ***Calcul du courant i_{max}***

A l'instant $t=\beta T$, $i_L=0$.

$$i_L(t = \beta T) = \left(i_{max} - \frac{E-U}{r}\right)e^{-\left(\frac{\beta-\alpha}{\tau}\right)T} + \frac{E-U}{r} = 0 \qquad \text{(III.79)}$$

$$i_{max} = \frac{E-U}{r}(1 - e^{\left(\frac{\beta-\alpha}{\tau}\right)T}) \qquad \text{(III.80)}$$

Par approximation de ($e^x = 1 + x$) *on à.*

$$i_{\max} = \frac{U-E}{Lf}(\beta - \alpha) \qquad \text{(III.81)}$$

- *la valeur de β*

$$i_{max} = \frac{E}{Lf}\alpha = \frac{U-E}{Lf}(\beta - \alpha) \qquad \text{(III.82)}$$

$$\beta = \frac{U}{U-E}\alpha \qquad \text{(III.83)}$$

- ***Ondulation du courant dans la bobine***

Dans une conduction discontinue, le courant dans la bobine ondule entre *0* et i_{max} et son ondulation est donnée par:

$$\Delta i_s = i_{max} = \frac{E\alpha}{fL} = \frac{E-U}{r}\frac{(\beta-\alpha)T}{1-\frac{r}{L}(\beta-\alpha)T} \qquad \text{(III.84)}$$

L'ondulation du courant $\Delta i_s = i_{max}$ est maximale pour α = 1 et nulle lorsque α vaut 0. Cette ondulation diminue lorsque la valeur de l'inductance *L* augmente ou la période de commutation *T* diminue c.à.d. la fréquence de commutation *f* augmente.

L'ondulation maximale est donnée par : $\Delta i_{smax} = \frac{E}{fL}$

Phase de repos

αT < t < βT, K ouvert, D bloquée.

Pendant cet intervalle, les courants $i_k = i_D = i_L = i = 0$.

La tension $v_L = 0$.

Dans cet intervalle la tension de l'interrupteur K est égale le f.e.m E, $v_k = E$, et le courant i_s est assuré par le condensateur $i_s = -i_C$.

- ***Chronogrammes des tensions et des courants en conduction discontinue***

La figure III.12 représente l'évolution des grandeurs suivante: la tension d'entrée $v_e(t)$, la tension aux bornes d'inductance $v_l(t)$, le courant traversent l'inductance $i_L(t)$, le courant traversent l'interrupteur K $i_k(t)$, la tension $v_k(t)$ aux bornes d'interrupteur K, le courant traversent la diode $i_d(t)$, la tension aux bornes de diode $v_d(t)$, la tension de sortie u (t), le courant traversent le condensateur $i_c(t)$ et le courant $i_s(t)$ de la charge R.

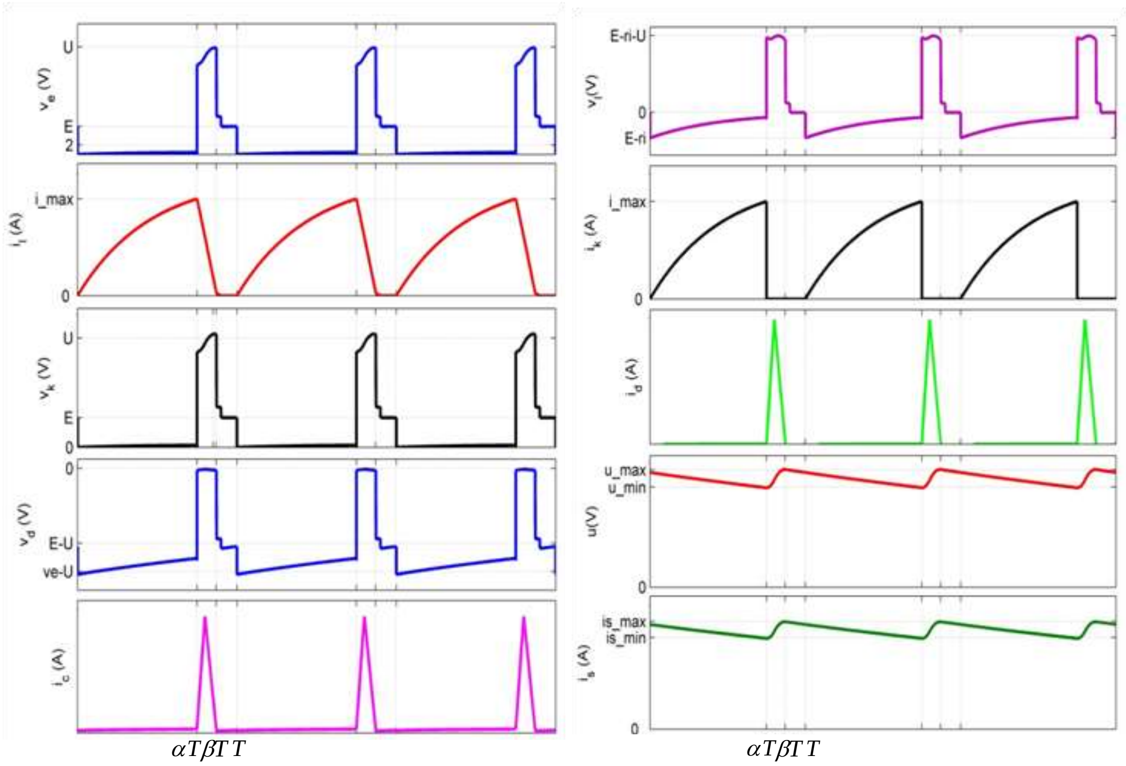


Fig III.12. Chronogrammes des tensions et des courants en conduction discontinue