

Dans ce type de commutation, les temps de conduction t_f et de blocage t_o sont tous deux variable dans de très larges limites qui dépendent des paramètres de la charge (E, R, L) et des paramètres de réglages (I_{ref} , ϵI_c).

Or quel que soit le type d'interrupteur utilisé, il existe des contraintes, dues aux temps de commutation, qui imposent des valeurs minimales de t_o et t_f , donc des limitations au niveau de l'ondulation et du rapport cyclique admissible.

Nous avons déjà établi la relation :

$$\frac{\epsilon I_c}{I_k} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{(\alpha-1) T}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}$$

En posant $I_{ref} = (I_{co} + I'_{co}) / 2$ nous pouvons l'écrire :

$$\frac{I_{ref}}{I_k} + a = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + e^{-\frac{(1-\alpha) T}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right)$$

Les courbes caractéristiques obtenues à partir de ces deux relations sont tracées sur la figure 19a. Elles donnent la variation de la fréquence de découpage f représentée par le rapport τ/T en fonction de la grandeur $(I_{ref}/I_k) + a$ relative aux deux variables I_{ref} et E_c . Les grandeurs $(\epsilon I_c / I_k)$ et α sont prise comme paramètres. Ceci en supposant la conduction toujours continue.

Dans le cas fréquent où la résistance de charge est faible et la constante de temps τ élevée, nous pouvons écrire :

$$\frac{\epsilon I_c}{I_k} \frac{\tau}{T} = \alpha (1 - \alpha) \qquad \frac{I_{ref}}{I_k} + a = \alpha$$

ou encore :

$$\frac{\epsilon I_c}{I_k} \frac{\tau}{t_f} = 1 - \alpha \qquad \frac{\epsilon I_c}{I_k} \frac{\tau}{t_o} = \alpha$$

Les caractéristiques de la figure 19b traduisent graphiquement les relations ci-dessus.

On remarque en particulier :

- que la fréquence passe par un maximum pour $\alpha = 0,5$. Sa valeur est alors :

$$f_m = \frac{1}{T_M} = \frac{1}{4\tau} \frac{I_k}{\epsilon I_c}$$

- que les temps de conduction et de blocage t_f et t_0 ont une même valeur minimale pour respectivement $\alpha = 0$ et $\alpha = 1$

$$t_{b \min} = t_{f \min} = \frac{\epsilon I_c}{I_k} \tau$$

- pour un rapport cyclique donné la fréquence sera d'autant plus grande que l'ondulation sera plus faible.
- si on désire utiliser au maximum les possibilités de ce contrôle en imposant une ondulation faible du courant (ce qui d'autre part limite les risques de fonctionnement en conduction discontinue) on est amené à travailler à fréquence élevée.

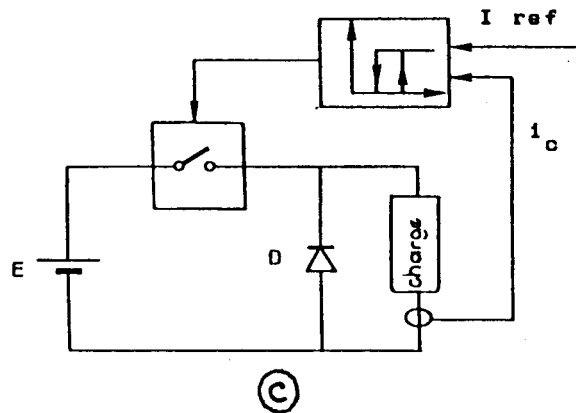
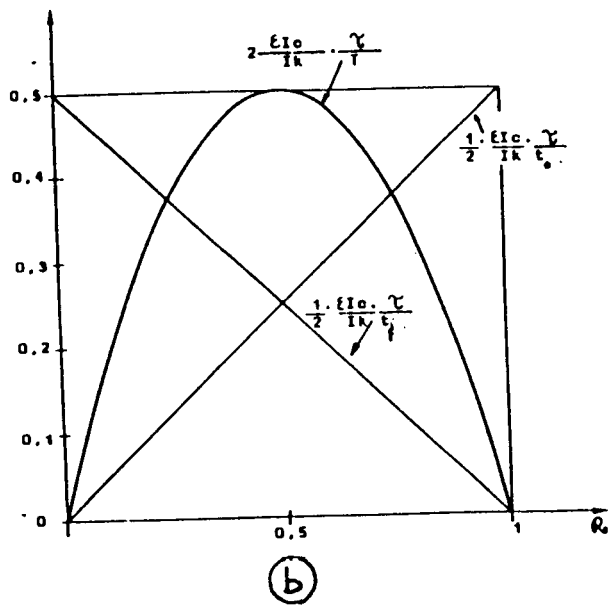
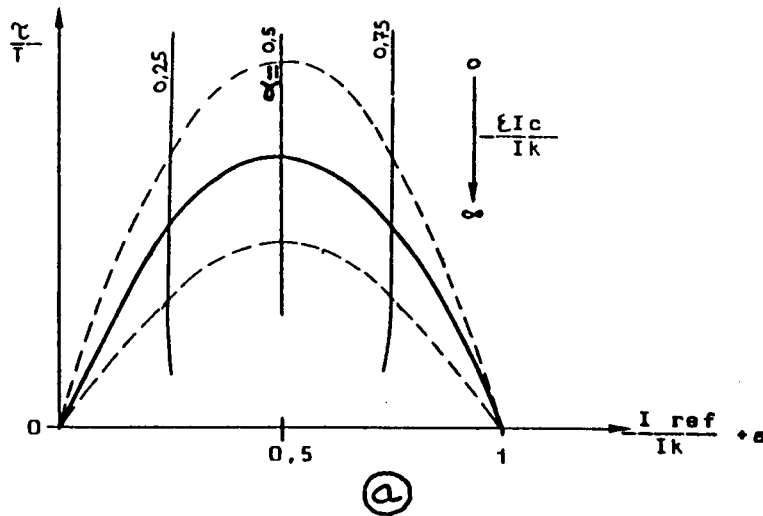


Figure 19: Contrôle du courant dans un hacheur par fourchette de courant.

Ce type de modulation permet d'assurer une régulation du courant de charge par une boucle ne présentant pas de problème de stabilité.

Un montage tel que celui de la figure 19c se présente comme une source de courant de valeur moyenne voisine de la valeur du courant de référence et d'ondulation absolue i_c constante.

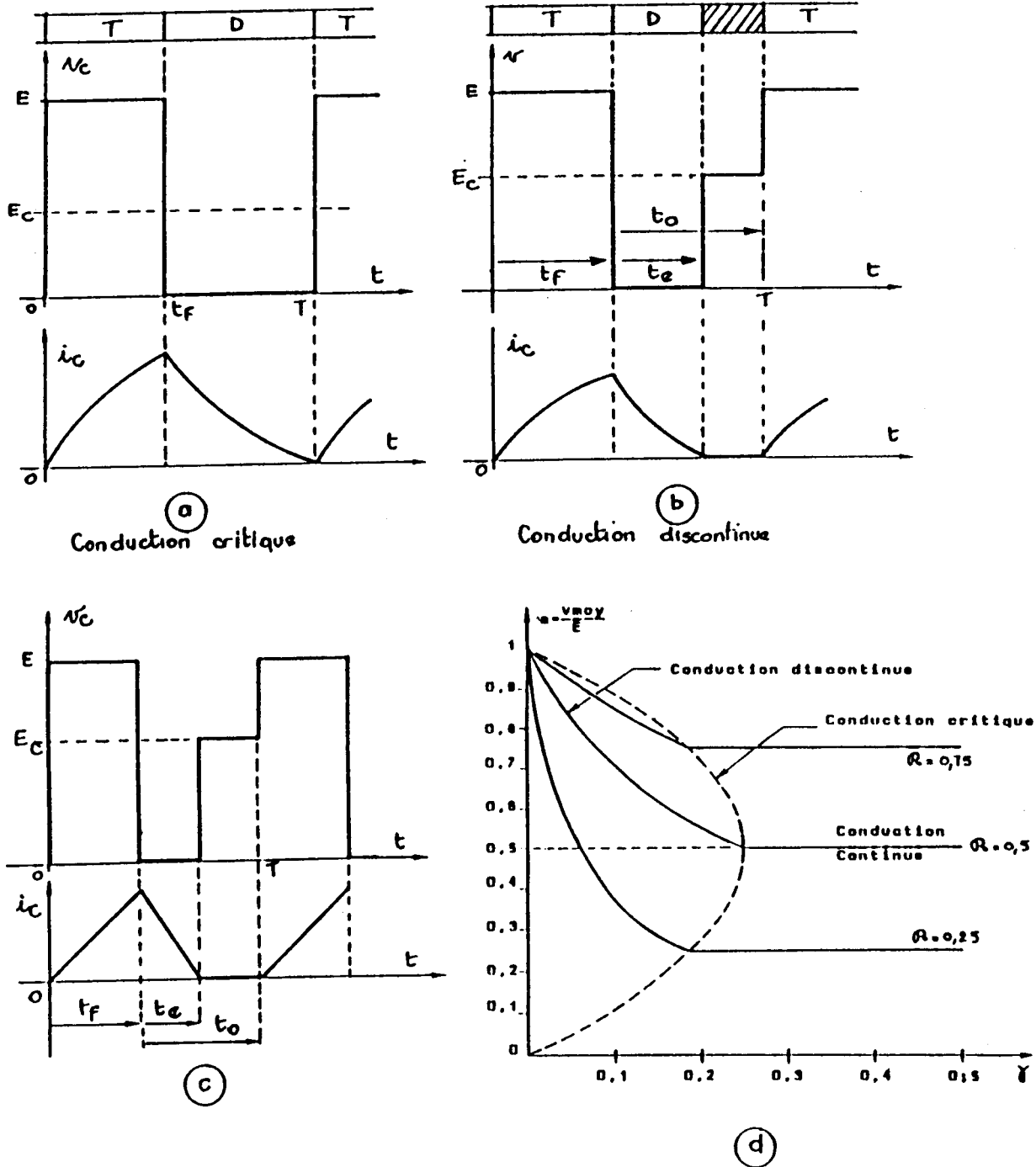


Figure 20: Hacheur dévolteur en conduction critique et discontinue. Caractéristique de charge.

5-2/ Conduction critique

C'est le cas particulier de fonctionnement où le minimum de courant est nul mais sans discontinuité (figure 20a). Ecrivons que $i'_{co} / I_k = 0$. Il vient:

$$\frac{e^{-\frac{t_o}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a = 0$$

On en déduit la condition de conduction critique:

$$e^{\frac{T}{\tau}} = 1 + a \left(e^{\frac{T}{\tau}} - 1 \right)$$

On peut obtenir à partir de cette relation la valeur de l'inductance L_c (inductance critique) qui, pour un fonctionnement donné assure au moins la conduction critique.

De même l'expression de l'ondulation du courant en régime critique s'écrit :

$$\left(\frac{\Delta I_c}{I_k} \right)_c = \frac{1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a$$

Ces deux relations permettent de déterminer les lieux critiques pour différentes valeurs de a , fixant les limites de validité des caractéristiques établies précédemment pour chaque type de modulation (figures 16, 17 et 19a).

5-3/ Conduction discontinue

Pendant la séquence de roue libre, l'inductance restitue toute l'énergie accumulée et le courant s'annule au bout d'un temps t_e inférieur au temps d'ouverture t_o .

La figure 20b donne les formes d'onde (tension aux bornes de la charge, courant dans la charge) d'un hacheur dévolteur en régime de conduction discontinue.

Nous appellerons α_c le rapport cyclique de conduction défini par $\alpha_c = (t_f + t_e) / T$

Calculons les valeurs moyennes réduites de la tension et du courant :

$$V_{\text{moy}} = \frac{t_f}{T} E + \frac{T - t_f - t_e}{T} E_c$$

$$\frac{V_{\text{moy}}}{E} = \alpha + a(1 - \alpha_c)$$

$$I_{c \text{ moy}} = \frac{V_{c \text{ moy}} - E_c}{R} = (\alpha + a(1 - \alpha_c)) I_k - a I_k$$

$$\frac{I_{c \text{ moy}}}{I_k} = \alpha - a \alpha_c$$

Il nous reste à définir α_c en fonction des paramètres du hacheur : a , α et T / τ

Reprenant les valeurs extrêmes du courant nous écrivons :

$$I'_{\infty} = 0 = I_{\infty} e^{-\frac{t_o}{\tau}} - \frac{E_c}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}}\right)$$

$$I_{\infty} = \frac{E - E_c}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}\right)$$

qui donne en éliminant I_{∞} :

$$\alpha_c = \frac{\tau}{T} \text{Log} \left(1 + \frac{e^{\frac{\alpha T}{\tau}} - 1}{a}\right)$$

Les relations ci-dessus définissent entièrement le fonctionnement du hacheur en régime de conduction discontinue connaissant les caractéristiques de la charge (a et τ) et les paramètres de contrôle (α et T).

Remarquons en particulier que la tension moyenne fournie par le hacheur n'est plus indépendante de la charge mais, par l'intermédiaire de α_c , présente une valeur d'autant plus grande que α_c est faible.

Le fonctionnement en conduction discontinue a de sérieux inconvénients : pour un réglage donné, le hacheur ne se comporte pas comme une bonne source de tension mais présente l'équivalent d'une impédance interne.

Le paragraphe suivant doit mettre plus facilement en évidence ce phénomène.

5-4/ Caractéristique de charge

Ce sont les caractéristiques $V_{c \text{ moy}}(I_{c \text{ moy}})$ d'un hacheur pour différentes valeurs de α pris comme paramètre.

Pour simplifier les calculs et les courbes correspondantes nous supposons la résistance de charge suffisamment faible pour pouvoir négliger le terme $R I_c$ dans l'équation différentielle :

$$v_e = E_e + R I_e + L \frac{di_e}{dt} \quad \text{qui devient} \quad \frac{di_e}{dt} = F_m E - E_e$$

Le courant I_c croît linéairement pendant le temps t_f ($F_m = 1$) puis décroît de même pendant le temps t_e ($F_m = 0$) (figure 20c).

Calculons $I_{c moy}$.

$$I_{c moy} = \alpha_c \frac{i_m}{2} \quad \text{avec} \quad i_m = \frac{\alpha T}{L} (E - E_c) \quad \text{et} \quad \alpha_c = \frac{\alpha}{a}$$

$$I_{c moy} = \frac{\alpha^2 T}{a 2L} (E - E_c) = \frac{\alpha^2 T E}{a 2L} (1 - a)$$

Passons en grandeurs réduites en posant :

$$a = \frac{E_c}{E} = \frac{V_{c moy}}{E} \quad \gamma = \frac{2L}{TE} I_{c moy}$$

nous écrivons

$$\gamma = \alpha^2 \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \quad \text{ou} \quad \boxed{a = \frac{\alpha^2}{\gamma + \alpha^2}}$$

Pour une valeur donnée de α , la conduction est discontinue pour les faibles valeurs de $I_{c moy}$.

Lorsque $I_{c moy}$ augmente on passe par la conduction critique, puis en conduction continue. Cherchons le lieu des points correspondants à la conduction critique :

Nous avons alors $a = \alpha$ d'où :

$$\boxed{\gamma = a(1 - a)}$$

Les caractéristiques $\gamma(a)$, soit $V_{c moy}(I_{c moy})$ sont donc, pour diverses valeurs de α , celles de la figure 20d. On constate, dans la zone de conduction discontinue, une variation importante de $V_{c moy}$ en fonction de la charge.

6/ ETUDE DU HACHEUR SURVOLTEUR SUR CHARGE R, L, E

La structure non réversible du hacheur survolteur dont nous avons fait la synthèse au paragraphe 2, n'est pas d'une utilisation courante dans le domaine des moyennes et fortes puissances. Elle présente un intérêt plus grand dans le domaine des alimentations continu-continu de faible puissance qui sont étudiées au chapitre B 15.

Toutefois, pour assurer la réversibilité d'un hacheur, les structures correspondantes (réversibles en tension ou en courant) sont telles qu'elles peuvent fonctionner soit en dévolteur (sens direct de la puissance) soit en survolteur (sens inverse de la puissance). Nous allons donc mettre en évidence les propriétés du hacheur survolteur en utilisant pour les grandeurs électrique les mêmes notations et les mêmes conventions de signe que pour le montage dévolteur. Les résultats obtenus seront ainsi directement applicables aux hacheurs réversibles.

6-1/ Fonctionnement en conduction continue

Avec les conventions de signe de la figure 21a, le courant i_c est toujours négatif. A la séquence de roue libre correspond une croissance de ce courant en valeur absolue (charge de l'inductance L), à la

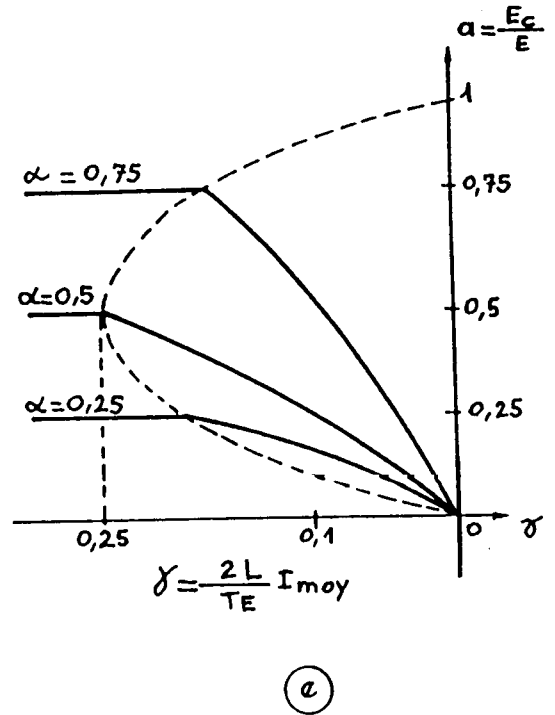
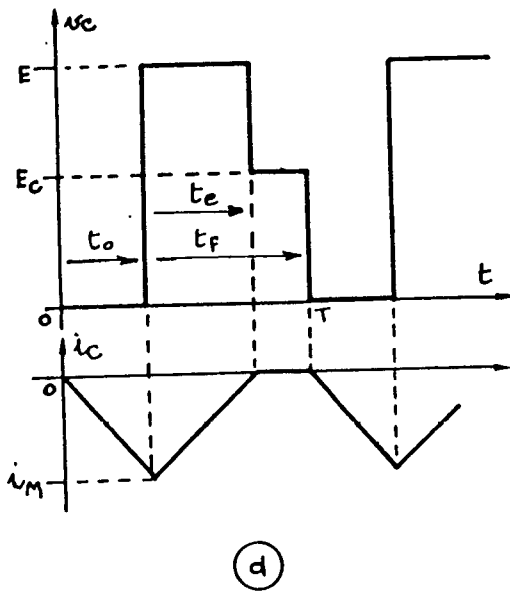
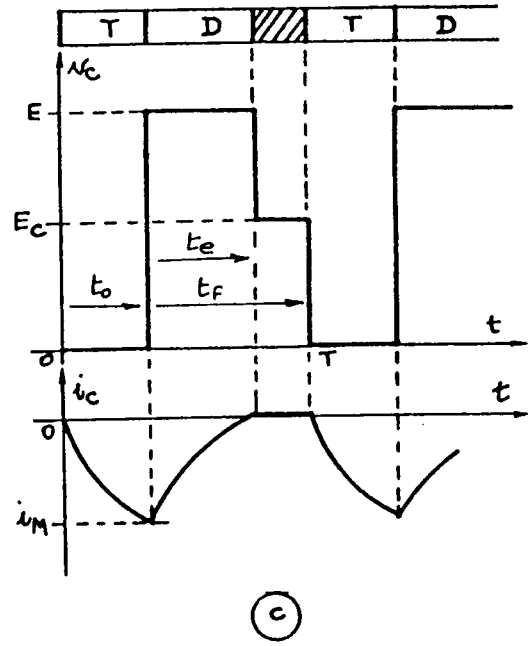
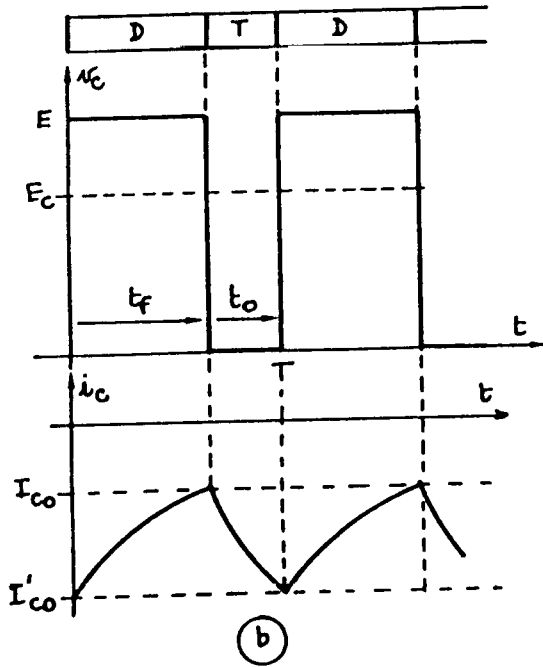
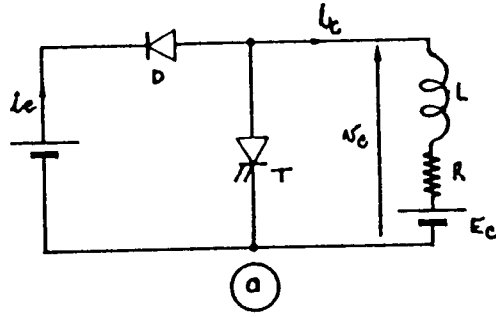


Figure 20: Hacheur survolteur en conduction continue et discontinue. Caractéristique de charge.

séquence active une décroissance de cette valeur absolue (décharge de l'inductance). Les formes d'onde de la tension v_c et du courant i_c sont données sur la figure 21b.

Nous pouvons écrire comme pour le hacheur dévolteur :

$$\frac{V_{c \text{ moy}}}{E} = \alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{t_f}{T}$$

$$\frac{I_{c \text{ moy}}}{I_k} = \alpha - a \quad \text{avec} \quad I_k = \frac{E}{R} \quad \text{et} \quad a = \frac{E_c}{E}$$

$$\frac{I_{\phi \text{ moy}}}{I_{c \text{ moy}}} = \alpha \quad \frac{I_{\phi \text{ moy}}}{I_k} = \alpha (\alpha - a)$$

Mais dans ce cas $\alpha < a$ et $I_{c \text{ moy}} < 0$

Les relations sur les valeurs maximales et minimales et celle sur l'ondulation sont :

$$\frac{I_{\infty}}{I_k} = \frac{1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a \quad \text{et} \quad \frac{I'_{\infty}}{I_k} = \frac{e^{-\frac{t_0}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a$$

$$\frac{\varepsilon I_c}{I_k} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad \text{ou si } T \ll \tau \quad \frac{\varepsilon I_c}{I_k} \approx \frac{T}{\tau} \alpha (1 - \alpha)$$

Les conclusions relatives aux procédés de réglage et de limitation de courant établies pour le hacheur dévolteur sont directement transposables au hacheur survolteur.

6-2/ Conduction critique

Elle correspond à $I_{c0} = 0$ soit

$$e^{-\alpha \frac{t_f}{\tau}} = 1 + a \left(e^{-\frac{T}{\tau}} - 1 \right) \quad \text{et} \quad \frac{\varepsilon I_c}{I_k} = \frac{1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a$$

séquence active une décroissance de cette valeur absolue (décharge de l'inductance). Les formes d'onde de la tension v_c et du courant i_c sont données sur la figure 21b.

Nous pouvons écrire comme pour le hacheur dévolteur :

$$\frac{V_{c \text{ moy}}}{E} = \alpha \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{t_f}{T}$$

$$\frac{I_{c \text{ moy}}}{I_k} = \alpha - a \quad \text{avec} \quad I_k = \frac{E}{R} \quad \text{et} \quad a = \frac{E_c}{E}$$

$$\frac{I_{\phi \text{ moy}}}{I_{c \text{ moy}}} = \alpha \quad \frac{I_{\phi \text{ moy}}}{I_k} = \alpha (\alpha - a)$$

Mais dans ce cas $\alpha < a$ et $I_{c \text{ moy}} < 0$

Les relations sur les valeurs maximales et minimales et celle sur l'ondulation sont :

$$\frac{I_{\infty}}{I_k} = \frac{1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a \quad \text{et} \quad \frac{I'_{\infty}}{I_k} = \frac{e^{-\frac{t_0}{\tau}} - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a$$

$$\frac{\varepsilon I_c}{I_k} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right)}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad \text{ou si } T \ll \tau \quad \frac{\varepsilon I_c}{I_k} \approx \frac{T}{\tau} \alpha (1 - \alpha)$$

Les conclusions relatives aux procédés de réglage et de limitation de courant établies pour le hacheur dévolteur sont directement transposables au hacheur survolteur.

6-2/ Conduction critique

Elle correspond à $I_{c0} = 0$ soit

$$e^{-\alpha \frac{t_f}{\tau}} = 1 + a \left(e^{-\frac{T}{\tau}} - 1 \right) \quad \text{et} \quad \frac{\varepsilon I_c}{I_k} = \frac{1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} - a$$

6-3/ Conduction discontinue

Le courant i_c atteint sa valeur nulle avant la fin de la séquence active. La durée de conduction t_e de la diode D est plus courte que le temps t_f de modulation.

Posons $\alpha_c = (t_o + t_e) / T$: temps relatif de conduction ($t_e < t_f$)

La valeur moyenne de la tension s'écrit :

$$V_{c \text{ moy}} = E \frac{t_o}{T} + E_c \frac{t_f - t_o}{T} = (E - E_c) \frac{t_o}{T} + E_c \frac{t_f}{T}$$

ou
$$\frac{V_{c \text{ moy}}}{E} = \alpha - (1 - \alpha_c)(1 - a) \quad \text{avec } a = \frac{E_c}{E}$$

Comme
$$\frac{V_{c \text{ moy}}}{E} = \frac{I_{c \text{ moy}}}{I_k} + a$$
,

on peut écrire la valeur moyenne du courant sous la forme :

$$\frac{I_{c \text{ moy}}}{I_k} = (\alpha - 1) + \alpha_c (1 - a)$$

L'expression du temps relatif de conduction est :

$$\alpha_c = \frac{\tau}{T} \cdot \text{Log} \left(\frac{e^{\frac{(1 - \alpha) T}{\tau}} - a}{1 - a} \right)$$

6-3/ Caractéristique de charge

Ce sont les caractéristiques $V_{c \text{ moy}} = F(I_{c \text{ moy}})$ en fonction des paramètres a , α , et τ .

Comme nous l'avons fait pour le montage dévolteur, nous recherchons les caractéristiques simplifiées obtenues en négligeant l'influence de la résistance R sur la conduction discontinue (on suppose $\tau \gg T$). Les formes d'ondes correspondantes sont représentées sur la figure 21d.

Nous pouvons écrire :

$$i_M = - \frac{E_c}{L} t_o = \frac{E_c - E}{L} t_o$$

$$I_{c \text{ moy}} = \frac{i_M}{2} \frac{t_o + t_e}{T}$$

d'où
$$I_{c \text{ moy}} = - \frac{ET}{2L} \left(\frac{t_o}{T} \right)^2 \frac{E_c}{E} \left(1 + \frac{E_c}{E - E_c} \right)$$

et en grandeurs réduites:

$$\frac{2L}{TE} I_{c \text{ moy}} = \gamma - (1 - \alpha)^2 \frac{a}{1 - a}$$

La limite de conduction discontinue (conduction critique) est obtenue pour $\alpha_c = 1$

Nous avons alors :

$$(V_{c \text{ moy}} / E) = \alpha \quad \text{soit si R est négligeable: } V_{c \text{ moy}} = E_c \quad \alpha = a \quad \text{d'où}$$

$$\gamma = - (1 - a)^2 \frac{a}{1 - a} = -a(1 - a)$$

parabole qui définit la zone du plan $\gamma (a)$ à l'intérieur de laquelle la conduction est discontinue.

Les caractéristiques correspondantes sont représentées sur la figure 21e.

7/ HACHEUR REVERSIBLE EN TENSION FONCTIONNANT SUR CHARGE R, L, E

Rappelons que la structure du hacheur réversible en tension, représentée sur la figure 22a, est susceptible de deux modes de modulation.

7-1/ Modulation +E 0, -E 0

La modulation de la tension E est effectuée par la commande cyclique de la cellule de commutation (T_1, D_1) qui commute donc en permanence.

Le choix du fonctionnement en dévolteur ($P > 0$) ou en survolteur ($P < 0$) est effectué par la commande de la cellule (T_2, D_2) qui ne commute que lorsque la réversibilité du système est demandée (par exemple phase de freinage d'un moteur de traction).

La réversibilité en tension, dans le cas d'une charge active modélisable par un dipôle R, L, E_c (la résistance R étant faible) est liée à la réversibilité de la f.c.e.m E_c , le courant i_c étant unidirectionnel. (Il est évident que la source de tension E doit être réversible en courant).

Si $E_c > 0$, le hacheur fonctionne en dévolteur: T_2 est conducteur, D_1 bloquée.

Si $E_c < 0$, le hacheur fonctionne en survolteur: T_2 est bloqué, D_2 conductrice.

Remarque : la cellule de commutation (T_2, D_2) qui n'a besoin de fonctionner ni rapidement ni fréquemment est parfois remplacée par un commutateur électromécanique.

Les caractéristiques générales de fonctionnement sont donc celles, soit du hacheur dévolteur, soit du hacheur survolteur suivant l'état de la cellule (T_2, D_2)

La figure 22 représente alors les caractéristiques de charge simplifiées de ce hacheur réversible, qui occupent deux quadrants du plan $\gamma (a)$: quadrant 1 dans le sens direct ($E_c > 0$), quadrant 4 dans le sens inverse ($E_c < 0$).