

ANALYSE DE LA COMMUTATION SUR CHARGE INDUCTIVE

La majorité des charges que l'on rencontre en électronique de puissance sont inductives et fonctionnent en conduction continue (le courant dans la charge ne s'annule pas au cours de la période). Il est donc important de bien comprendre comment s'effectuent les commutations dans ce cas. Nous allons pour cela étudier le cas du hacheur simple. On montre facilement que la plupart des circuits plus complexes peuvent, du point de vue de la commutation de l'interrupteur, se ramener au cas du hacheur.

La figure 1 montre le schéma de ce circuit et les principales formes d'ondes des courants y circulant.

La période de découpage T est prise faible devant la constante de temps L/R de la charge de manière à fonctionner en conduction continue avec une ondulation de courant relativement petite.

L'interrupteur est périodiquement rendu conducteur pendant un temps αT , puis bloqué le reste de la période T .

Le paramètre $\alpha = \text{temps de conduction} / \text{période}$ est appelé rapport cyclique (duty cycle).

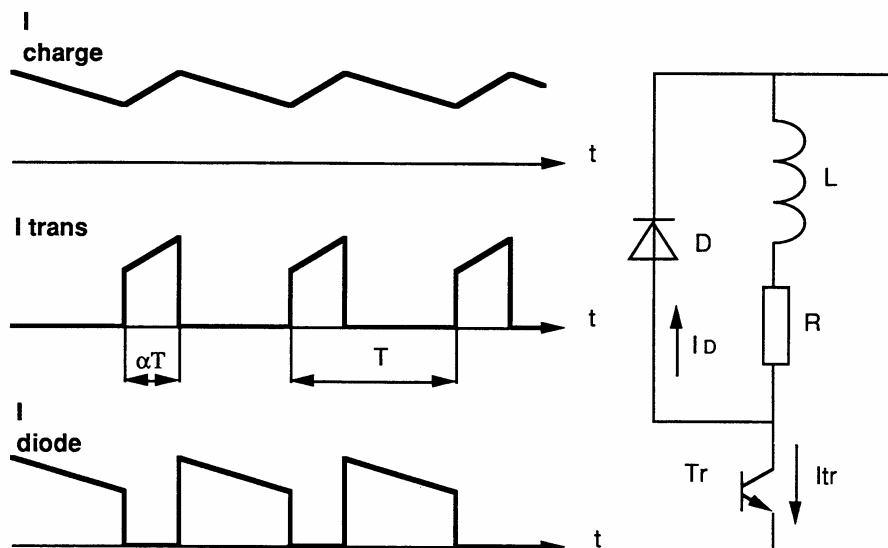


Figure 1 - Schéma de principe et principales formes d'ondes des courants dans un hacheur simple

Lorsque l'interrupteur est fermé l'équation du circuit s'écrit:

$$E = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (0 < t < \alpha T)$$

en négligeant la chute de tension dans l'interrupteur. La diode D est alors bloquée (ouverte).

Lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant continue à circuler à travers la charge par l'intermédiaire de la diode D dite diode de roue libre (free wheeling diode).

En négligeant la chute de tension dans la diode, l'équation du circuit est

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0 \quad (\alpha T < t < T)$$

Le courant dans la charge est donc continu et légèrement ondulé.

Examinons successivement les instants de commutation ($t=0$ et $t=\alpha T$)

COMMUTATION A LA FERMETURE

A l'instant t_0 on commande la fermeture de l'interrupteur. Juste avant cet instant, le circuit se trouvait en phase de roue libre et le courant circulait à travers la diode D.

Pendant la durée de la commutation (très faible devant la période T, elle même petite devant la constante de temps L/R de la charge) on peut considérer que le courant dans la charge est constant, c'est à dire que la charge se comporte comme un générateur de courant.

En appliquant la loi des noeuds on peut écrire:

$$I_{\text{charge}} = I_{\text{transistor}} + I_{\text{diode}} = \text{constante pendant la commutation}$$

A partir de l'instant t_0 le courant s'établit dans l'interrupteur avec une vitesse dI_k/dt qui ne dépend que des caractéristiques de celui-ci. Au fur et à mesure que le courant croît dans l'interrupteur, il décroît d'une quantité égale dans la diode (figure 2). A l'instant t_1 tout le courant de la charge traverse l'interrupteur et la diode se bloque.

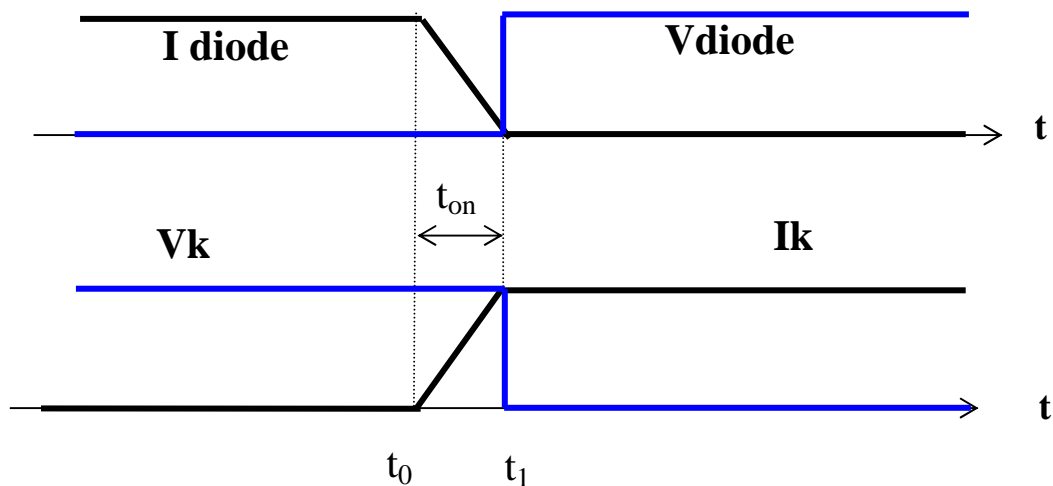


Fig. 2 - Commutation à la fermeture sur charge inductive en conduction continue

Pendant toute la phase $t_{on} = t_1 - t_0$ la diode D est conductrice et la tension à ses bornes est par conséquent très faible, l'interrupteur supporte donc l'intégralité de la tension E de la source d'alimentation. Ceci donne lieu à des pertes systématiques.

A chaque cycle une énergie $W_{on} = EI_{on} / 2$ est dissipée dans l'interrupteur (indépendamment de la nature de celui-ci et sans compter ses propres pertes).

Exemple:

Considérons un transistor commutant, sur charge inductive en conduction continue, un courant de 10 A sous 400 V à la fréquence de 20 kHz. Supposons que le temps de montée du courant soit de 0,5 μ s. La puissance théorique perdue par commutation à la fermeture est dans ce cas:

$$P_{on} = VI_{on} / 2T$$

$$P_{on} = (400 \times 10 \times 0,5 \times 10^{-6} / 2) \times 20 \times 10^3 = 20 \text{ W}$$

Cette puissance dissipée dans l'interrupteur est à rapprocher des pertes pendant la phase de conduction.

En admettant une chute de tension $V_{ce \text{ sat}}$ de 1 V et pour un rapport cyclique de 80%, on a:

$$P_c = V_{ce \text{ sat}} \times I_c \times \alpha$$

$$P_c = 1 \times 10 \times 0,8 = 8W$$

On constate que dans ce cas les pertes à la fermeture sont 2,5 fois plus importantes que les pertes de conduction.

COMMUTATION A L'OUVERTURE

L'interrupteur est supposé conducteur, il est intégralement traversé par le courant circulant dans la charge. A l'instant t_0 , on commande son ouverture (fig. 3).

Le courant commence à décroître, puis s'annule après un temps t_f (fall time).

Pendant la durée de la commutation (de 100 à 1000 fois plus faible que la période T) on peut considérer que la charge se comporte comme un générateur de courant constant.

En appliquant la loi des noeuds on peut écrire:

$$I_{\text{charge}} = I_{\text{transistor}} + I_{\text{diode}} = \text{constante pendant la commutation}$$

A l'instant t_1 , le courant dans l'interrupteur commence à décroître et par conséquent un courant complémentaire s'établit dans la diode D.

A l'instant $t_2 = t_1 + t_f$, le courant s'annule dans l'interrupteur et tout le courant circulant dans la charge passe par la diode D.

Dès que la diode D devient conductrice ($t > t_1$), la chute de tension à ses bornes devient très faible (de 0,7 V à 1,5 V selon le type de diode et l'intensité du courant). L'interrupteur voit donc à ses bornes la tension de la source d'alimentation pendant toute la durée de la commutation. Il en résulte des pertes à chaque cycle: $W_{\text{off}} = V I t_f / 2$

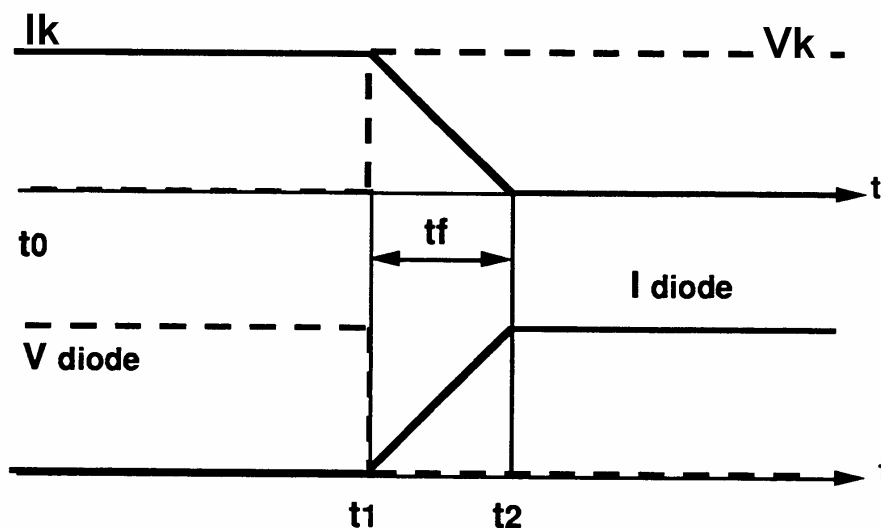


Fig. 3 - Commutation à l'ouverture sur charge inductive en conduction continue

Exemple

Reprenons l'exemple précédent. On considère un transistor commutant 10 A sous 400 V à 20kHz. Le temps de descente t_f est supposé égal à 0,4 μs . La puissance théorique perdue par commutation à l'ouverture est dans ce cas:

$$P_{\text{off}} = (V_{\text{Itf}} / 2) f$$

$$P_{\text{off}} = (400 \times 10 \times 0,4 \times 10^{-6} / 2) \times 20 \times 10^3 = 16 \text{ W}$$

soit deux fois plus que les pertes de conduction calculées précédemment. La puissance totale dissipée par l'interrupteur dans cet exemple est donc:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{c}} + P_{\text{on}} + P_{\text{off}}$$

$$P_{\text{tot}} = 8 + 20 + 16 = 44 \text{ W}$$

Admettons que ce transistor soit monté sur un système refroidisseur de résistance thermique jonction-ambiance $R_{\text{th j-a}} = 3,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ et que sa température maximale de jonction soit $T_{\text{j}} = 200^\circ\text{C}$.

Nous pouvons calculer la température atteinte par la jonction:

$$T_{\text{j}} = T_{\text{amb}} + R_{\text{th j-a}} \times P_{\text{tot}}$$

$$T_{\text{j}} = T_{\text{amb}} + 3,5 \times 44 = T_{\text{amb}} + 154^\circ\text{C}$$

Si la température ambiante T_{amb} est par exemple de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, la température de jonction atteint 194°C , ce qui est très voisin de la limite absolue.

Nous voyons donc que le fonctionnement de ce transistor est limité par des considérations thermiques dues en majeure partie aux pertes de commutation.

La réduction des pertes de commutation est donc un problème fondamental.

Il existe deux voies pour y parvenir:

- Diminuer les temps de commutation par une commande optimale de l'interrupteur
- Utiliser des circuits d'aide à la commutation (CALC) ou des structures de convertisseur imposant des conditions moins sévères pour les interrupteurs (convertisseurs à résonance).

On notera que ces considérations sont valables quelque soit la nature du composant utilisé comme interrupteur (transistor bipolaire, MOS, GTO, IGBT,...).

CIRCUITS D'AIDE A LA COMMUTATION

Les réseaux d'aide à la commutation sont des circuits passifs capables de stocker momentanément de l'énergie. Il ont pour but:

- de diminuer les pertes de commutation de l'interrupteur
- éventuellement, de déformer le cycle de commutation dans le plan V-I de façon à l'inscrire à l'intérieur de l'aire de sécurité.

CIRCUIT D'AIDE A LA COMMUTATION À LA FERMETURE

Le principe du réseau consiste à insérer en série avec l'interrupteur un élément capable de supporter la tension d'alimentation pendant la durée de la commutation de manière à ce que l'interrupteur puisse commuter sous une tension pratiquement nulle. Pour ce faire, on utilise une inductance en série entre la charge et l'interrupteur (fig.4).

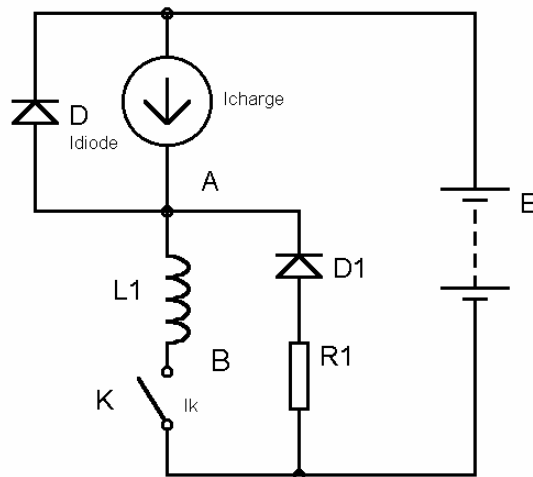


Figure 4 - Schéma de principe du circuit d'aide à la commutation à la fermeture

Le circuit étant supposé fonctionner en roue libre (tout le courant de la charge traverse la diode), on met en conduction l'interrupteur à l'instant t_0 . Le potentiel du point B tombe donc très rapidement à zéro, alors que le point A reste au potentiel de l'alimentation puisque la diode est conductrice. La différence de potentiel entre les points A et B est donc égale à la tension d'alimentation. Il s'établit alors dans l'inductance L_1 un courant régi par l'équation:

$$V_{AB} = L_1 \frac{di}{dt}$$

C'est-à-dire, qu'un courant croissant linéairement à partir de zéro s'établit à travers l'inductance L_1 et l'interrupteur. La charge étant un générateur de courant, le courant dans la diode décroît d'une quantité égale. A l'instant t_1 , tout le courant de la charge traverse l'inductance L_1 et l'interrupteur, la diode D se bloque. L'inductance de la bobine du réseau d'aide à la commutation étant très faible devant celle de la charge, le potentiel du point A tombe à une valeur très voisine de celle du point B, c'est-à-dire, pratiquement à zéro.

Les formes d'ondes de la figure 5 montrent que dans ces conditions, la commutation de l'interrupteur s'effectue pratiquement sans pertes.

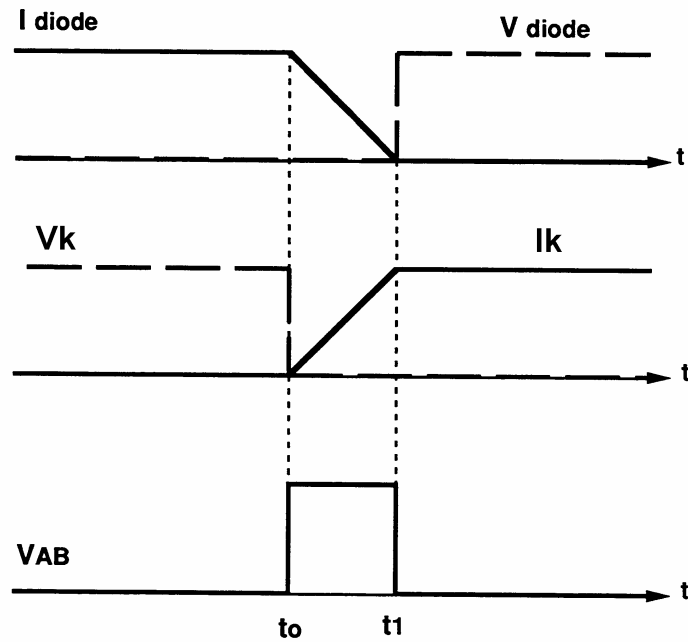


Fig. 5 - Commutation à la fermeture avec réseau d'aide à la commutation

Cependant l'inductance L_1 qui est traversée par le courant de la charge I_L emmagasine une énergie $E = 0,5.L_1.I_L^2$ qu'il va falloir aiguiller lors de l'ouverture du circuit sous peine de surtension destructrice pour l'interrupteur. C'est le rôle de la diode D_1 et de la résistance R_1 . On notera que la constante de temps L_1/R_1 du réseau d'aide à la commutation doit être faible devant la période de découpage.

Le bilan énergétique de l'opération consiste donc en une transformation de l'énergie qui serait perdue en commutation dans l'interrupteur $E = 0,5 VI t_{on}$ en une énergie électromagnétique $E = 0,5L_1I^2$ qui sera dissipée dans la résistance R_1 .

RESEAU D'AIDE A LA COMMUTATION A L'OUVERTURE

Le principe de ce réseau consiste à connecter en parallèle avec l'interrupteur un élément capable d'absorber temporairement le courant de la charge de manière à ce que la tension ne soit ré-appliquée qu'avec un certain retard par rapport à la chute du courant dans l'interrupteur. On utilise pour cela un condensateur connecté en parallèle avec l'interrupteur.

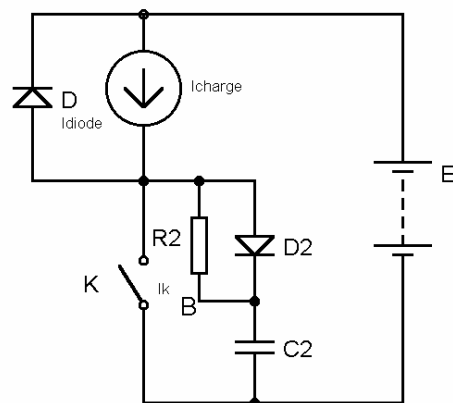


Fig. 6 - Réseau d'aide à l'ouverture

L'interrupteur étant conducteur, on commande son blocage à l'instant t_0 et le courant commence à décroître. Vis-à-vis du temps de commutation, la charge peut être considérée comme un générateur de courant. Nous pouvons donc écrire

$$I_{\text{charge}} = I_{\text{transistor}} + I_{\text{condensateur}} + I_{\text{diode}}$$

Lorsque le courant décroît dans l'interrupteur, il croît donc de la même quantité dans le condensateur. (Il ne peut s'établir de courant dans la diode que lorsque le potentiel du point A est remonté à celui de l'alimentation, ce qui suppose que le condensateur soit totalement chargé).

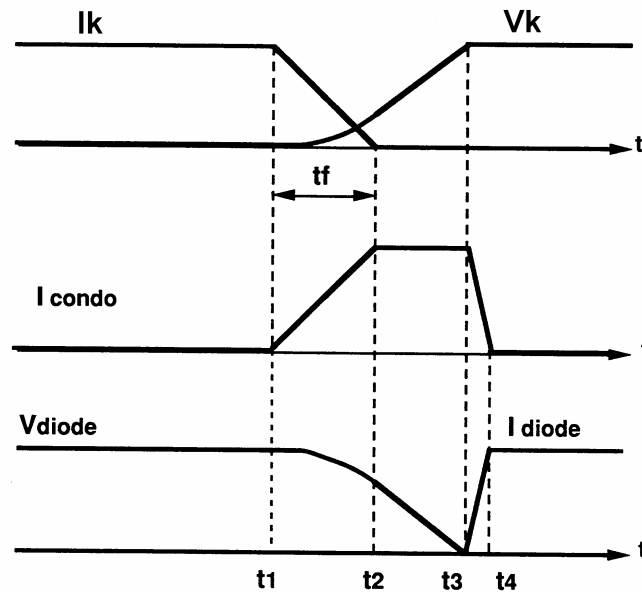


Fig. 7 - Commutation à l'ouverture avec réseau d'aide

Après un temps t_f , le courant s'annule dans l'interrupteur (fig. 7) et si le condensateur n'est pas totalement chargé, tout le courant de la charge traverse ce dernier. Lorsque le condensateur atteint sa charge maximale, la diode entre en conduction. Le courant croît donc dans la diode et décroît dans le condensateur jusqu'à ce que tout le courant de la charge traverse la diode. La tension aux bornes du condensateur, qui est égale à la tension V_k aux bornes de l'interrupteur, s'écrit:

$$V_0 = (1/C) \int i dt$$

Si l'on suppose que le courant décroît linéairement dans l'interrupteur pendant le temps d'ouverture t_f , la tension V_k entre les instants t_1 et t_2 est un arc de parabole. La tension croît ensuite linéairement entre t_2 et t_3 . A l'instant t_3 le condensateur est totalement chargé, le potentiel du point A est voisin de celui de l'alimentation et la diode D entre en conduction. Les formes d'ondes de la fig.7 montrent que les pertes de commutation à l'ouverture sont considérablement réduites dans l'interrupteur.

Pour que ce réseau fonctionne correctement, il est nécessaire de le compléter par une diode D_2 et une résistance R_2 . De ce fait, le fonctionnement du circuit n'est pas modifié et le courant de décharge du condensateur pendant la phase de conduction de l'interrupteur est limité. On devra s'assurer que le temps de conduction αT de l'interrupteur reste toujours suffisamment long pour assurer la décharge du condensateur. On pourra choisir par exemple:

$$\alpha T \text{ min} > 3R_2C_2$$

L'énergie $0,5 C_2 V_0^2$ emmagasinée dans le condensateur C_2 est dissipée dans la résistance R_2 .