

CHAPITRE II

Mécanismes de commutation dans les convertisseurs statiques

II.1. Introduction

En électronique de puissance, on utilise de plus en plus des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (ou fermé), soit à l'état bloqué (ou ouvert). Le passage d'un état à l'autre s'effectue périodiquement. On note T_c la période de commutation des composants des convertisseurs statiques. À l'ouverture ou à la fermeture du composant, la tension et le courant ne sont pas simultanément nul (ouverture ou fermeture prennent un temps non nul) et par conséquent des pertes de commutation sont engendrées dans les convertisseurs statiques. On peut limiter ces pertes de commutation en utilisant des circuits d'aide à la commutation CALC. L'objectif de ce chapitre est de traiter ces problèmes de commutation.

II.2. Diode

II.2.1. Caractéristiques dynamiques d'une diode

II.2.1.1. Amorçage

Généralement le phénomène transitoire à l'amorçage présente une importance plus faible. L'établissement du courant dans une diode peut se faire en déchargeant un condensateur conformément au schéma.

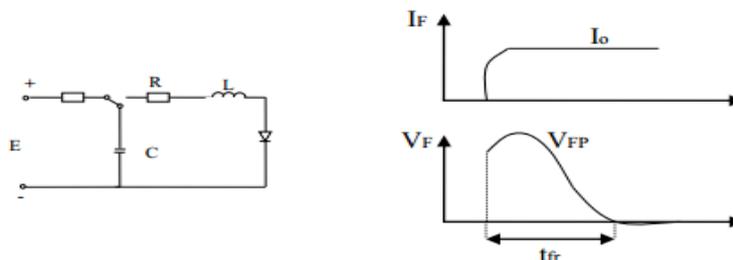


Fig 2.1 : Amorçage d'une diode

En réalité durant la conduction d'une diode, une charge électrique Q_s est stockée au niveau de la jonction. Au moment du blocage, cette charge doit être évacuée afin que la diode retrouve son pouvoir de blocage en inverse.

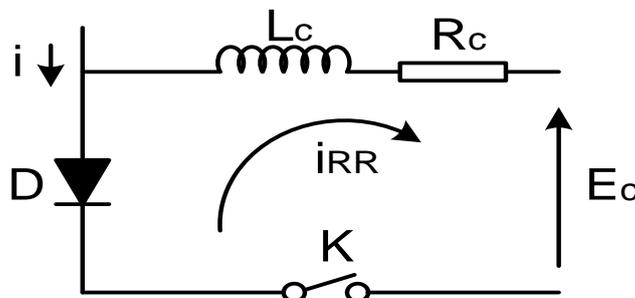


Fig 2.2 : Circuit de commutation d'une diode lors du recouvrement

- L'amorçage spontané (ou fermeture spontané) d'une diode s'effectue au passage par zéro de son courant.

Ce mode commutation s'effectue avec un minimum de pertes Joules puisque le point de fonctionnement ne quitte pas les axes.

Le temps de recouvrement inverse varie suivant les types de diodes. 100 ns à quelques μs une diode rapide (en recouvrement inverse) possède de très faible charge recouvrée (0.1 à $1\mu\text{C}$) pour une diode courant direct de 30 A.

Le tableau suivant illustre comment évolue le temps de recouvrement inverse en fonction de la tenue en tension, il correspond aux paramètres de mesure suivants :

- Température de jonction $T_j = 100^\circ\text{C}$.
- La vitesse du courant $(di/dt) = 60 \text{ A}/\mu\text{s}$.
- Courant direct $i_D = 12\text{A}$.

Tableau.2.1. Évolution du temps de recouvrement

U_{RM} (V)	U_F (V)	t_{rr} (ns)	i_{RM} (A)	Q_R (μC)
200	0.85	50	2	0.05
600	1.4	150	6	0.5
1000	1.5	300	12	2

On peut déterminer rapidement la valeur de l'énergie perdue lors d'une commutation en utilisant la figure (2.3), on suppose entre les instants t_1 et t_2 la remontée du courant linéaire dans le but de simplifier les calculs. La vitesse de décroissance du courant direct est exprimée par la relation (2.1).

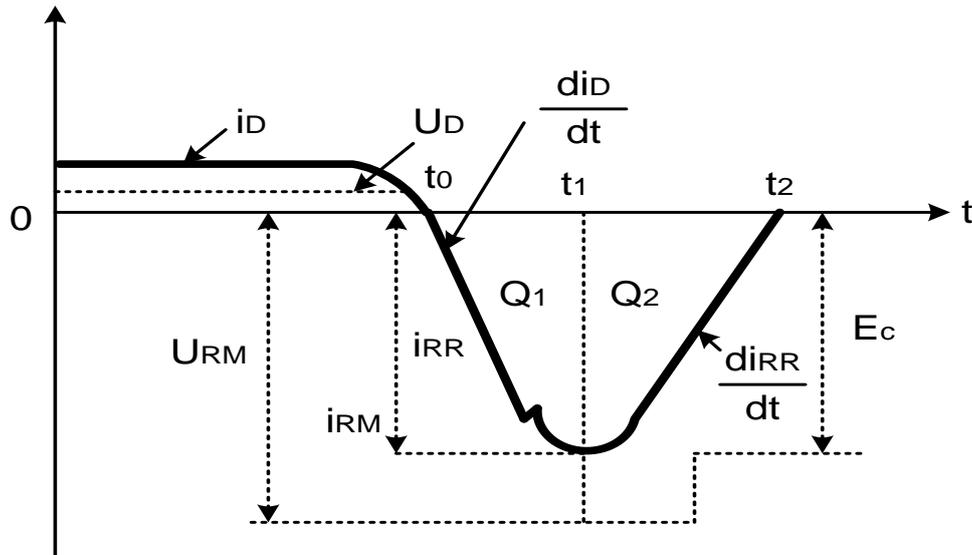


Fig 2.3 : formes d'ondes schématisées de l'ouverture d'une diode

$$\frac{di_D}{dt} = -\left(\frac{E_c}{L_c}\right) \quad (2.1)$$

i_D : le courant direct de la diode

E_c : la tension appliquée. L_c : l'inductance.

Les charges évacuées Q_1 et Q_2 sont égales à :

$$Q_1 = \frac{1}{2} I_{RM} (t_1 - t_0) = \frac{1}{2} \frac{L_c}{E_c} I_{RM}^2 \quad (2.2)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} I_{RM} (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

L'énergie perdue à chaque commutation est donnée par :

$$W = \int_{t_0}^{t_2} u \times i dt \quad (2.4)$$

Entre t_0 et t_1 , U_D est très faible. L'énergie peut être considérée négligeable.

$$W = \frac{1}{2} E_c I_{RM} (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} L_c I_{RM}^2 \quad (2.5)$$

En utilisant les équations (2.2) et (2.3), pendant chaque commutation on obtient l'énergie perdue cette forme :

$$W = Q_2 E_c + Q_1 E_c \quad (2.6)$$

Où :

$$W = Q_R E_c \quad (2.7)$$

La charge recouvrée Q_R pendant la commutation est donc :

$$Q_R = \int_{t_0}^{t_1} i dt \quad (2.8)$$

II.3. Thyristor

II.3.1 Caractéristiques dynamiques d'un thyristor

II.3.1.1. Amorçage

Pour assurer l'amorçage du composant :

- L'impulsion de gâchette doit se maintenir tant que le courant d'anode n'a pas atteint le courant de maintien I_m (en Anglais hold) $I_m = \frac{I_{AK\ max}}{1000}$.
- La largeur de l'impulsion de gâchette dépend donc du type de la charge alimentée par le thyristor.
- Sa durée sera d'autant plus importante que la charge sera inductive.

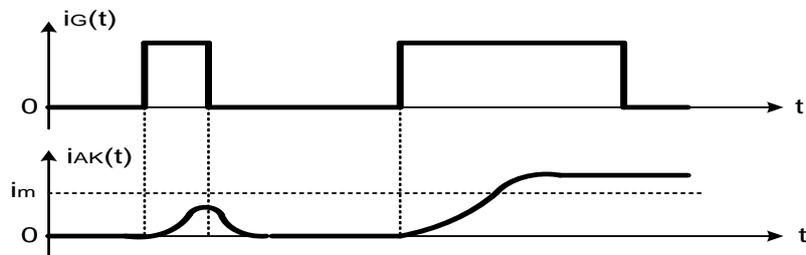


Fig.2.4 : Évolution du courant i_{AK} en fonction de i_G à l'amorçage du Thyristor

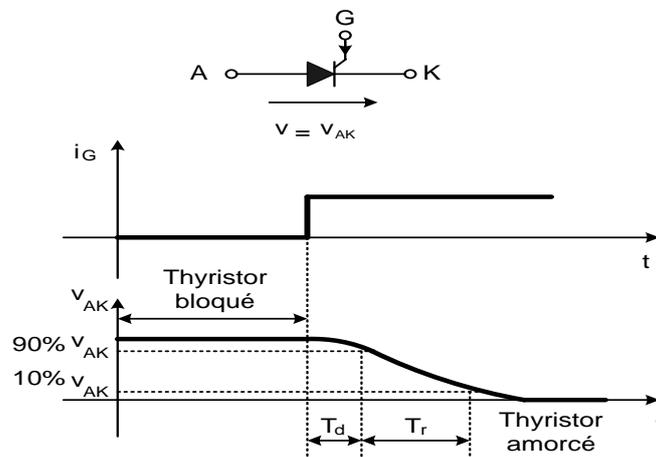


Fig.2.5 : Variation de V_{AK} à la fermeture du Thyristor

Temps d'amorçage $\rightarrow T_{gt} = T_d + T_r$

Où :

T_d : Temps de retard à amorçage

T_r : Temps de croissance commandé par la gâchette.

II.3.1.2. Blocage

Tout comme la diode, le thyristor se bloque uniquement quand son courant anodique est nul. Ce courant peut s'annuler de manière naturelle, ou on peut le forcer à être nul.

Deux types de commutations du passage de l'état amorcé à l'état bloqué :

- ✓ Commutation naturelle.
- ✓ Commutation forcée.

II.3.2.1. Commutation naturelle

Un thyristor traversé par un courant alternatif → Ce thyristor se bloque à chaque passage par zéro du courant anodique I_{AK} (cas des redresseurs et des gradateurs) → nécessite un circuit d'amorçage cyclique.

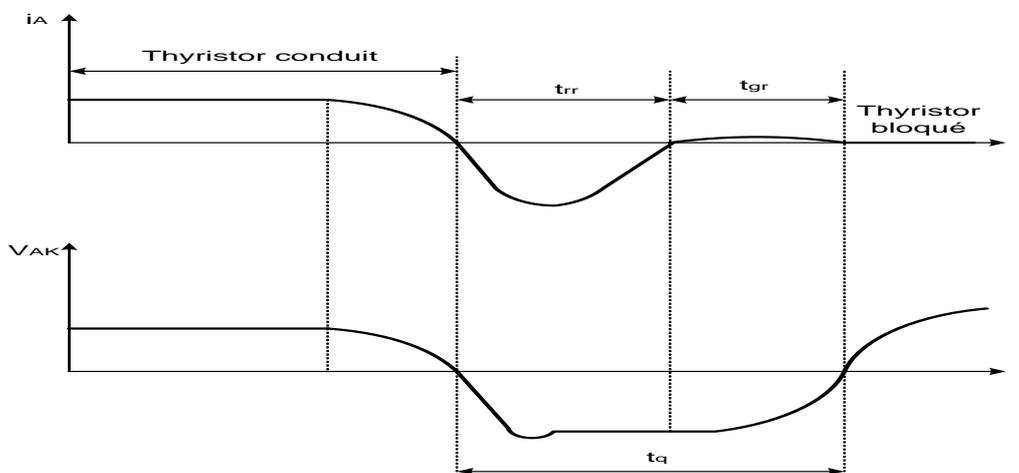


Fig.2.6 : Ouverture ou blocage du thyristor

Temps du désamorçage (blocage) du thyristor → $T_q = T_{rr} + T_{gr} \approx 5 \text{ à } 400 \mu\text{s}$

Où :

T_{gr} : Temps de disparition des électrons dans la jonction J2 (gaterecovery time).

T_{rr} : Temps de recouvrement inverse.

Le temps T_q est fonction de :

- Courant traversant le thyristor avant la commutation.
- $\frac{di}{dt}$ Variation du courant pendant la commutation

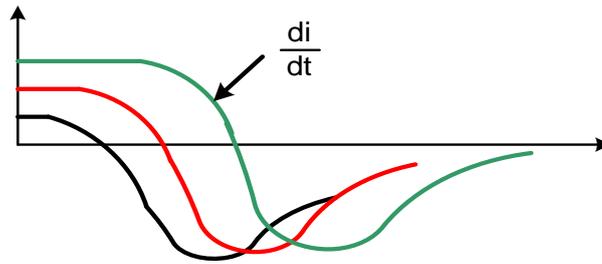


Fig 2.7 : Influence du dérivé de courant sur la caractéristique dynamique du thyristor

Finalement on peut dire qu'un blocage du thyristor est réussi si la condition est respectée :

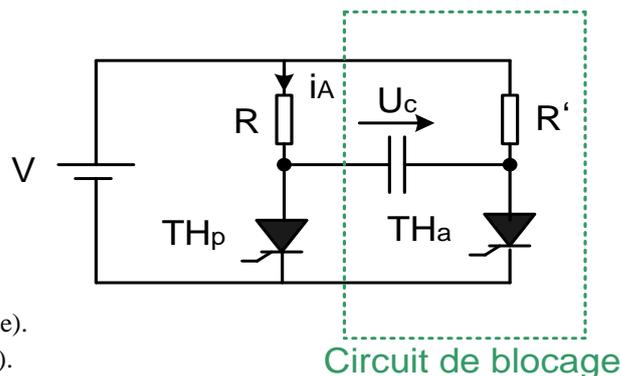
$$t_{\text{off}} \geq t_q \quad (2.9)$$

Après annulation du courant i_{AK} , la tension V_{AK} doit devenir négative pendant un temps au moins égal au temps d'application de tension inverse t_q ($t_q = 100 \mu\text{s}$). Si ce temps n'est pas respecté, le thyristor risque de se réamorcer spontanément dès que V_{AK} tend à redevenir positive, même durant un court instant.

II.3.2.2. Commutation forcée

Le blocage se fait par inversion de la tension V_{AK} au moyen d'un circuit de blocage (cas des hacheurs et des onduleurs). Ce blocage est imposé par la mise en conduction d'un autre composant, qui applique une tension négative aux bornes du thyristor, provoquant donc son extinction.

II.3.2.2.1. Circuit de principe



THa : Thyristor auxiliaire (faible puissance).

THp : Thyristor principal (forte puissance).

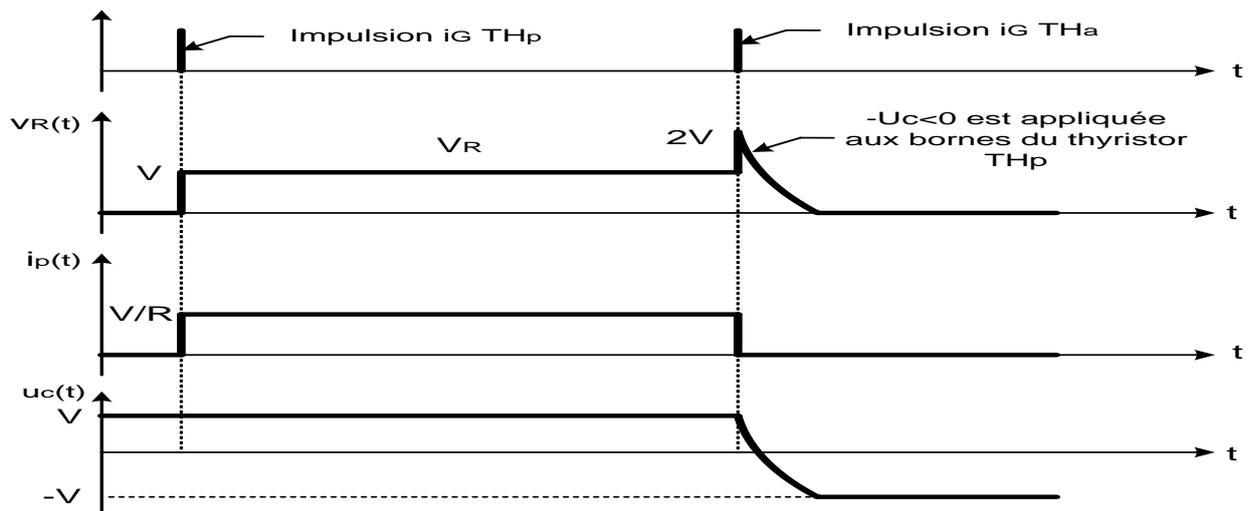
Fig.2.8 : Exemple d'un circuit de blocage

II.3.2.2.2. Principe de fonctionnement du circuit

Les deux thyristors sont initialement bloqués. Dès que THp est amorcé, il conduit et assure le courant i_p dans la charge.

- THp est amorcé, THa est bloqué → le condensateur C se charge jusqu'à $U_C = V$ qui est positive. Si on amorce THa, la tension négative $-U_C = -V$ est appliquée à THp qui force son blocage.
- Au réamorçage de THp, THa se bloque ($U_C < 0$) et C se recharge jusqu'à $U_C = V > 0$ et le système est prêt pour un nouveau cycle de blocage.

II.3.2.2.3. Chronogramme du circuit d'extinction du thyristor



II.4. Transistor Bipolaire (BJT)

Un transistor travaillant en commutation ne peut occuper de façon stable que deux états :

- État bloqué, il suffit théoriquement de ne pas alimenter sa base,
- État saturé, il faut envoyer à sa base un courant supérieur à $\frac{I_c}{\beta}$ avec (β : gainstatique)

Pratiquement les procédés d'amorçage et de blocage sont complexes et mènent généralement à une polarisation inverse de la tension base V_{BE} durant les phases de blocage du transistor.

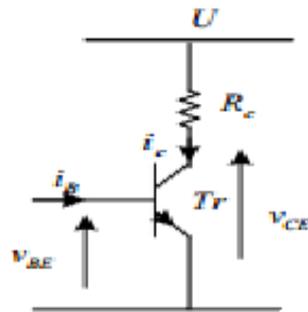


Fig.2.9. Schéma de principe d'un transistor (BJT)

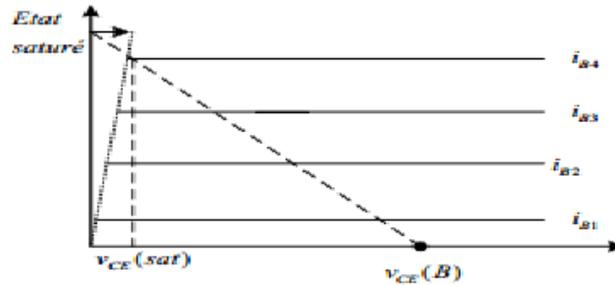


Fig .2.10. Caractéristique statique d'un transistor bipolaire

II.4.1. Caractéristique de commutation d'un BJT

II.4.1.1. Amorçage

L'amorçage est caractérisé par :

- Un temps de retard t_d « delay time » entre l'instant d'application de i_B et le passage de i_C de 10% de sa valeur finale.
- Un temps de montée t_r « rise time » entre l'instant de passage de i_B entre 10% et 90% de sa valeur finale.

Le constructeur du transistor indique que le temps de fermeture est de :

$$t_{on} = t_d + t_r \quad (2.10)$$

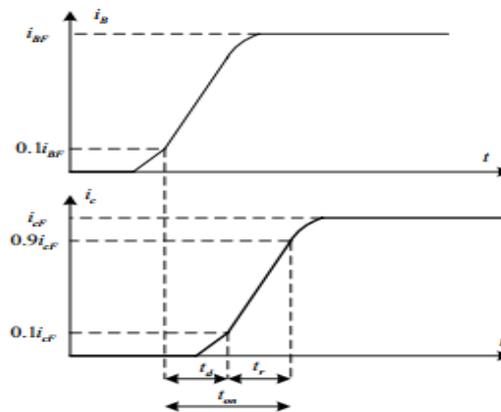


Fig.2.11. Caractéristique de fermeture d'un transistor

II.4.1.2. Blocage

L'ouverture est caractérisée :

- Un temps d'évacuation de la charge stockée t_s « storage time » entre la suppression de i_B et le passage de i_C à 90% de sa valeur initiale.
- Un temps de descente t_f « fall time » entre l'instant de passage de i_B entre 90% et 10% de sa valeur initiale.

Le constructeur indique le temps d'ouverture est donc :

$$t_{off} = t_s + t_f \quad (2.11)$$

II.5. Transistor MOSFET

Un transistor à effet de champ est un transistor de puissance ou de commutation dont la grille est isolée du semi-conducteur par une couche isolante.

Le transistor MOSFET offre de meilleures performances en termes de vitesse de commutation et donc permet de réduire les pertes par commutation. Il est malheureusement limité en puissance car on ne peut réaliser un composant apte à tenir une tension élevée à l'état bloqué tout en présentant une faible chute de tension à l'état passant. Un MOSFET fort courant doit être un composant basse tension et inversement.

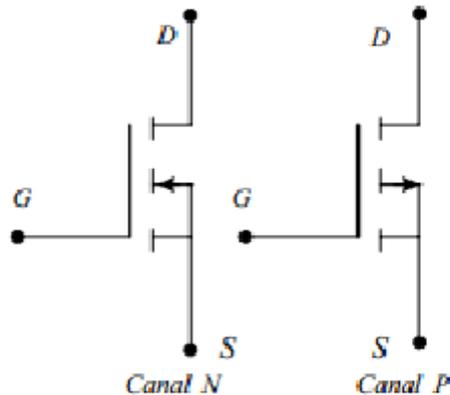


Fig 2.14 : Transistor à effet de champ

Un transistor possède des caractéristiques suivantes :

- Très grande impédance d'entrée ; ce qui signifie que l'état du fonctionnement du transistor est fixé par la tension d'entrée.
- La durée de commutation très courte et en principe pas de temps de retard ni temps d'évacuation de la charge stockée.

Du fait que le courant de la grille $I_G = 0$:

$I_D = f(V_{GS})$ à V_{DS} constante : **Caractéristique de la commande.**

$I_D = f(V_{DS})$ à V_{GS} constante : **Caractéristique de sortie**

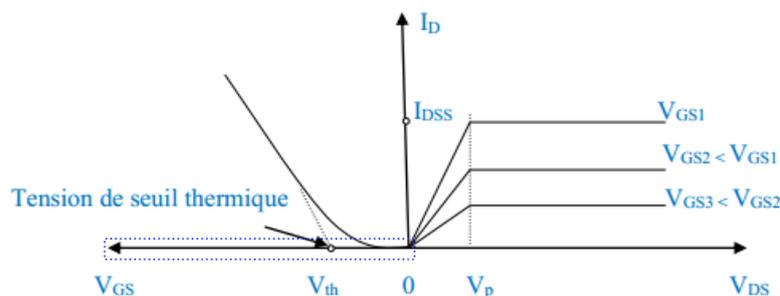


Fig 2.15 : Caractéristique statique du FET

II.6. Le Transistor IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)

Un transistor IGBT est hybridation d'un transistor bipolaire et un transistor à effet de champ comme le montre les figures suivantes :

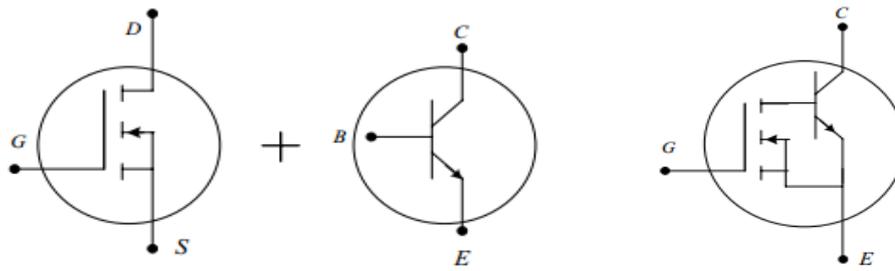


Fig 2.16 : Schéma de principe d'un IGBT

La chute de tension directe IGBT est faible même si la tension est élevée. À la mise en conduction, le comportement de l'IGBT s'écarte peu de celui du MOSFET. En revanche, au blocage par retour rapide à zéro de la tension V_{GE} , le courant i traversant le composant reste transitoirement à une valeur sensiblement supérieure à la valeur normale de son courant de fuite. Ce phénomène de courant de queue (tailcurrent) augmente d'une façon significative les pertes au blocage.

II.6.1. Caractéristique dynamique d'un IGBT

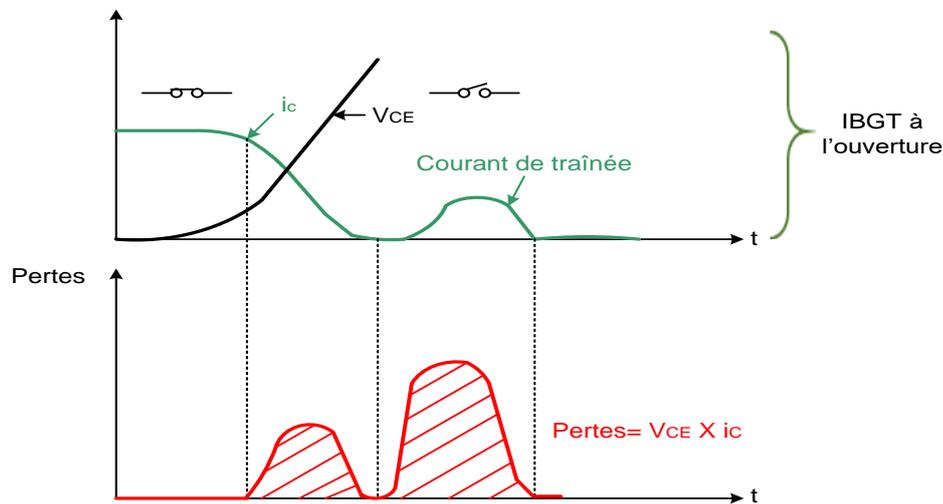


Fig.2.17 : Ouverture d'un IGBT

Les pertes de commutation d'un IGBT sont obtenues par :

$$p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T v_{CE}(t) i_C(t) dt \quad (2.12)$$

Les avantages du composant l'IGBT sont :

- ✓ Temps de commutation très court.
- ✓ Chute de tension du composant à l'état passant réduite.
- ✓ Faible puissance de commande due à la structure du MOSFET.
- ✓ Courants de conduction importants.

Cependant, un inconvénient majeur réside dans l'IGBT, le courant de traînée

II.7. Conclusion

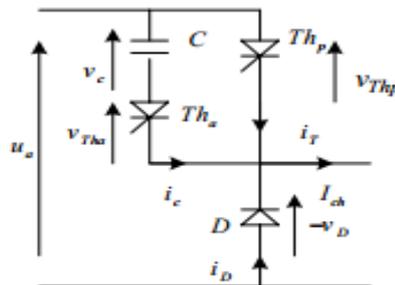
Les convertisseurs statiques sont des montages d'électronique de puissance qui assurent la conversion de l'énergie électrique. La puissance de sortie est aux pertes près égale à celle d'entrée seule la présentation est modifiée. Les montages de base des convertisseurs statiques sont : le redresseur, hacheur, l'onduleur et le gradateur. Le fonctionnement de ces montages est basé sur la commutation de courants entre mailles adjacentes de circuits électriques. Cette commutation est assurée par des interrupteurs à deux états (ouvert, fermé). Ces interrupteurs sont des semi-conducteurs de puissance utilisant les propriétés de conduction unidirectionnelle. Les composants actifs utilisés sont : les diodes, les transistors, les thyristors, triacs, IGBT.

II.8. Travaux Dirigés

Exercice.1 : On considère le montage de la figure ci-dessous. Le thyristor Th_p conduit initialement le courant de charge $I_{Thp} = 0$.

Le condensateur est chargé sous $V_C = -V_{C0} < 0$ (Th_p et Th_a sont des interrupteurs supposés parfaits).

1. Le thyristor Th_a est-il amorçable ? Si oui. On commande à la date t_0 la gâchette au moyen d'un courant suffisant. Montrer que Th_p se bloque.
2. Établir les expressions de $V_C(t)$, $V_D(t)$, $i_c(t)$, $i_D(t)$ et $i_{Thp}(t)$. En déduire l'instant t_2 de blocage de la diode.



Exercice 2 :

Dans le but d'étudier le comportement du transistor en commutation, on propose le montage de la figure 1 :

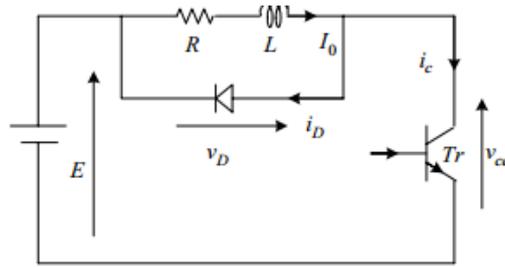


Figure 1

On suppose :

- La constante du temps $\tau = \frac{L}{R}$ de la charge est grande devant les temps de commutation du transistor de sorte que I_0 reste constant et égal 5A.
- La diode est parfaite,
- Le comportement du transistor aux moments de commutations est donné par la figure 2.

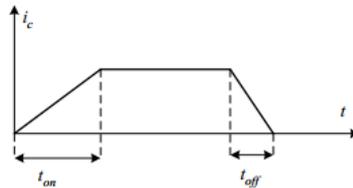


Figure 2

A. Commutation à la fermeture du transistor

A-1. Commutation à la fermeture sans circuit d'aide à la commutation.

1. Préciser les valeurs initiales de i_D et V_{ce} . Tracer les variations de $i_D(t)$ et $i_c(t)$.
2. À quel instant la diode D se bloque-t-elle ? Représenter alors $V_{ce}(t)$.
3. Déterminer l'expression de $i_D(t)$ pendant cette phase. En déduire celle de l'énergie W_1 perdue dans le transistor au moment de la mise en conduction.
4. Le fonctionnement du transistor est périodique de fréquence $f = 10\text{Khz}$ déterminer l'expression de la puissance P_1 dissipée dans Tr, calculer sa valeur.
5. Indiquer clairement dans le plan (i_c, V_{ce}) le déplacement du point de fonctionnement de Tr pendant la commutation

A-2. Commutation à la fermeture avec circuit d'aide à la commutation.

Le circuit auxiliaire utilisé est représenté par la figure 3 :

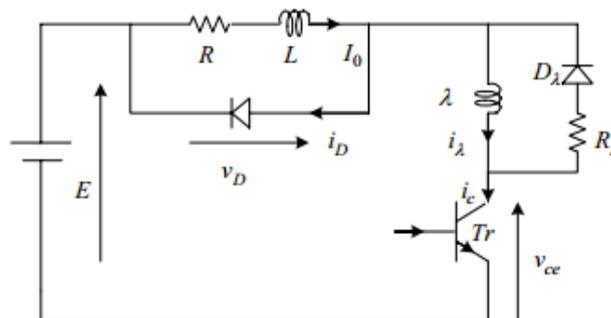


Figure 3

Quel est le rôle de l'inductance λ ? On admet pour la suite que dès que $i_c \neq 0$, la tension V_{ce} s'annule.

1- Le courant i_c commence à croître à l'instant $t = 0$; représenter alors les i_c , $V_{ce}(t)$ et $i_D(t)$.

B- Commutation à l'ouverture du transistor

B-1. Commutation à l'ouverture avec circuit d'aide à la commutation

Le circuit auxiliaire à utiliser est donné par la figure 4 :

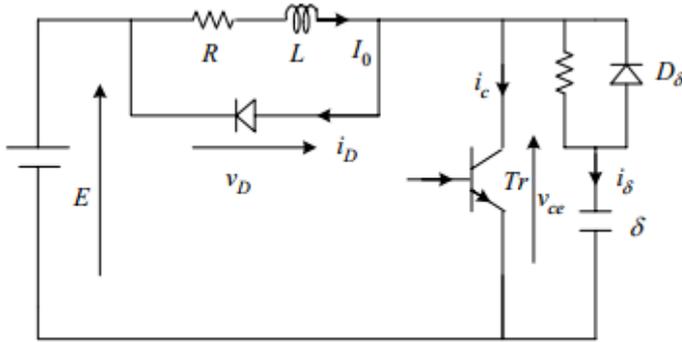


Figure 4

Avec $\delta = 100\text{nF}$

- 1- Quel est le rôle du condensateur δ supposé initialement déchargé.
- 2- Donner l'expression de $i_\delta(t')$, $V_{ce}(t')$. Représenté alors $i_c(t')$, $i_\delta(t')$, $V_{ce}(t')$ pour $t' \leq t_{off}$
- 3- Que vaut i_δ pour $t' \leq t_{off}$? En déduire l'expression de $V_{ce}(t')$ pour $t' \geq t_{off}$.

REFERENCES

1. [Hasnaoui Othman B.A.](#) « Support de cours et TD d'électronique de puissance » École Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis. Université de Tunis.
2. [Farid. NACERI](#) « Cours Électronique de puissance avancée ». Université de Batna 2.
3. Electronic&Composants, World Electronic Industries, 2010-2015