

Polycopié d'**E**lectronique de **P**uissance **A**vancée

Cours & Travaux dirigés destinés aux étudiants de 1^{ière} année
Master Électrotechnique industrielle

Réalisé par :

Dr. Mostefa Tounsi Mahmoud
Maître de Conférences B, UnivRelizane
Année universitaire 2021/2022

Avant-propos

L'électronique de puissance est la partie du génie électrique qui traite des modifications de la présentation de l'énergie électrique. Pour cela elle utilise des convertisseurs statiques à semi-conducteurs. Grâce aux progrès sur ces composants et sur leur mise en œuvre, l'électronique de puissance a pris une importance considérable dans tout le Système de Conversion d'Energie Électrique (SCEE).

.

L'électronique de puissance a pour objet de modifier la présentation de l'énergie électrique dans le but d'utiliser cette énergie avec le rendement maximum. Car plus les pertes sont grandes plus elles sont difficiles à évacuer et plus elles sont coûteuses. Pour limiter les pertes il faut travailler en commutation : le composant de base est le semi-conducteur travaillant en commutation.

Ce support de cours <<Électronique de Puissance Avancée >>est un outil qui permet aux étudiants de master en Électrotechnique Industrielle de suivre les cours cités avec un maximum de profit. Il s'adresse également aux étudiants d'électronique, automatique et électromécanique.

Par ailleurs, il est utile pour les enseignants qui désirent améliorer, progresser un fondement en cette matière d'électronique de puissance.

Ce support pédagogique de cours est complété par des applications et des travaux dirigés.

Introduction Générale

Le domaine de l'électronique de puissance a évolué dernièrement, une science fondamentale et exceptionnellement importante de l'électrotechnique. Elle est aujourd'hui très présente dans l'industrie, vu son très vaste champ d'application comme les alimentations régulées, le filtrage actif ou le contrôle des machines électriques ainsi que les compensateurs statiques de puissance réactive. Cet essor incontestable est dû, singulièrement, aux grands progrès qu'ont connus les semi-conducteurs de puissance depuis la fin des années cinquante avec l'apparition du premier thyristor.

L'électronique de puissance comprend l'étude, la réalisation et la maintenance

- Des composants électroniques utilisés en forte puissance.
- Des structures des convertisseurs et leurs fonctionnements.
- Des applications industrielles de ces convertisseurs

Le document est structuré en six chapitres qui couvrent le programme officiel d'électronique de puissance avancée du master en électrotechniques industriel. Ces chapitres sont complétés par des travaux dirigés.

Le premier chapitre s'intéresse à la méthode de modélisation et simulation des semi-conducteurs utilisés en électronique de puissance. On y trouve l'étude des diodes, des thyristors (SCR, TRIAC, DIAC, GTO), des transistors (BJT, MOSFET, IGBT).

Le second chapitre est réservé à l'étude du mécanisme de commutation dans les convertisseurs statiques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des méthodes de conception des convertisseurs statiques à commutation naturelle

Le quatrième chapitre traite les Convertisseurs statiques à commutation forcée

Le cinquième chapitre traite des convertisseurs statiques Avancés Multi-niveaux.

Le sixième chapitre couvre la qualité de l'énergie des convertisseurs avancés

Ces chapitres sont complétés par des applications et des outils mathématiques nécessaires.

CHAPITRE I

Méthode de modélisation et simulation des Semi-conducteurs de puissance

I.1. Introduction

L'électronique de puissance utilise des composants semi-conducteurs pour réaliser les fonctions de commutation (interrupteurs) chargées d'adapter les tensions et les courants issus d'un réseau de distribution pour satisfaire les besoins de la charge à alimenter.

Ce chapitre représente une étude théorique des différents interrupteurs et composants de l'électronique de puissance. Généralement, on peut attribuer les composants en électronique de puissance en trois catégories :

- ✓ Interrupteurs et composants non commandables (Diodes).
- ✓ Interrupteurs et composants commandables à fermeture ou à l'ouverture (Thyristors).
- ✓ Interrupteurs et composants commandables à l'ouverture et à la fermeture (Transistors).

I.2. Composants non commandables

I.2.1. Diode de puissance :

I.2.1.1. Présentation :

La diode de puissance est un composant électronique unidirectionnel non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture).

La diode de puissance est un composant dipôle qui contient une Anode « A » et une Cathode « K » et une jonction PN, qui possède deux états de fonctionnement : état bloqué et état passant. Le changement d'états d'une diode dépend des grandeurs électriques du circuit.

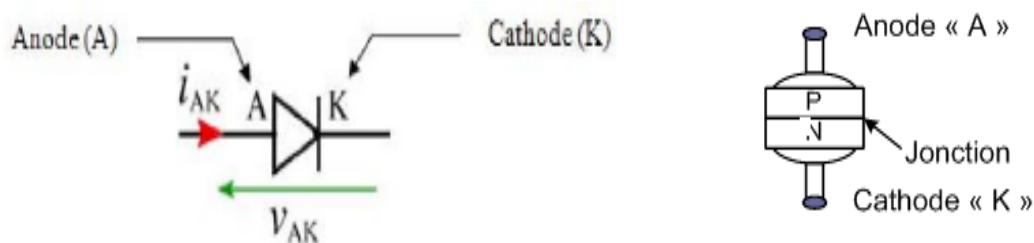


Fig 1.1 : Symbole et Structure de la diode de puissance

I.2.1.2. Principe de fonctionnement :

Deux régimes de fonctionnement de la Diode :

▪ État bloqué

La diode est polarisée négativement donc, elle tend à faire passer le courant dans le sens imperméable, la diode est bloquée ou isolante.

La tension négative ou tension inverse peut prendre, sous l'effet du reste du circuit des valeurs élevées. Il faut veiller à ce que la tension inverse reste inférieure à la tension inverse maximale que peut supporter la diode.

Le courant négatif, ou courant inverse est très faible par rapport aux courants des phases, donc on peut le négliger.

▪ État passant

La diode est polarisée positivement donc tend à faire passer un courant dans le sens direct ou perméable, c'est-à-dire de l'anode A vers la cathode K, la diode est conductrice ou passante. Le courant I_{AK} positif prend une valeur qu'est imposée par le reste du circuit. Il faut veiller à ce que la valeur moyenne de I ne dépasse pas le courant direct moyen tolérable par la diode. La tension V_{AK} aux bornes, égale à $V_A - V_K$, a une valeur positive faible de l'ordre du volt. On peut négliger cette chute de tension directe devant les autres tensions rencontrées dans le circuit.

État bloqué $V_{AK} < 0$ pour $I_{AK} = 0$ État passant $V_{AK} = 0$ pour $I_{AK} > 0$

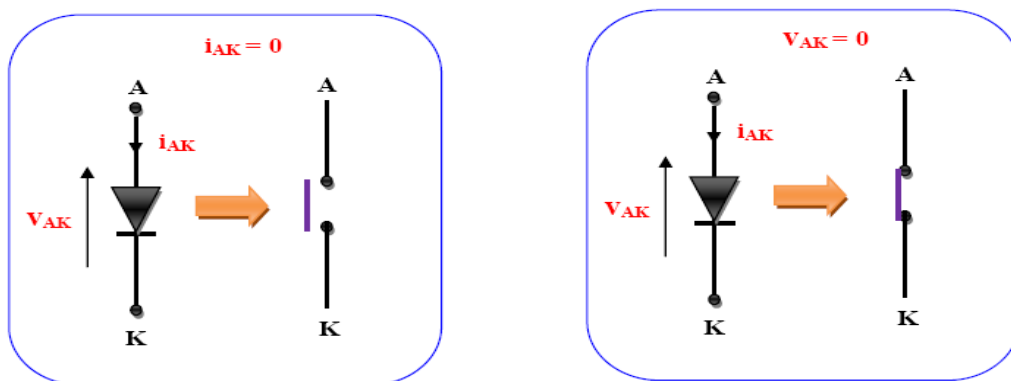


Fig 1.2 : Configurations des états d'une Diode de puissance

I.2.1.2.1. Caractéristique Idéal :

Une diode se comporte comme un interrupteur parfait dont les commutations sont exclusivement spontanées :

1. Il est fermé passant (ON) tant que le courant qui le traverse est positif.
2. Il est ouvert bloqué (OFF) tant que la tension à ses bornes est négative.

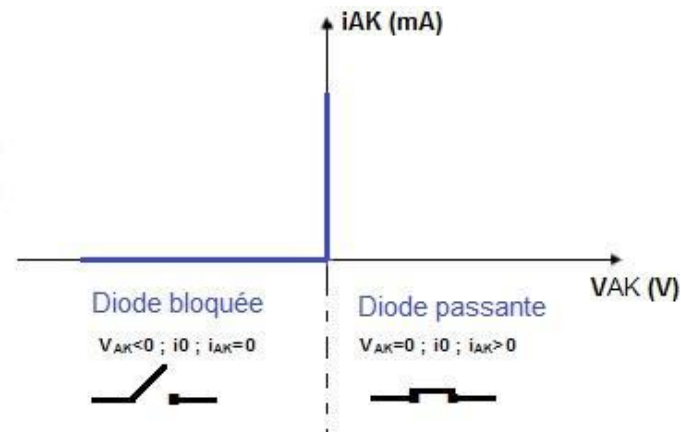


Fig 1.3. Caractéristique de la diode parfaite

I.2.1.2.2. Caractéristique Tension Courant :

Valeurs maximales admissibles **IF max** : Courant direct maximum admissible

VRmax : Tension inverse (Reverse) maximale admissible

Vseuil = (0.6 à 0.7 V) : Tension de seuil

Avalanche phénomène dangereux pour le composant

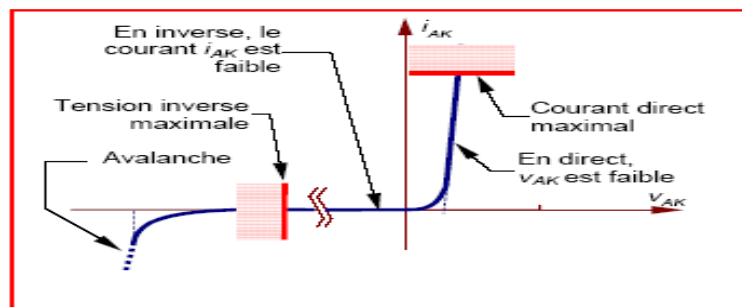


Fig1.4. Caractéristique courant tension

I.2.1.2.3. Critères de choix d'une diode

On choisit une diode de puissance selon :

- Sa tension inverse V_{AK} à l'état bloqué
- La valeur moyenne du courant I_{AK} à l'état passant



Fig 1.5 : Image d'une diode de puissance industrielle

I.2.1.2.4. Protection de la diode :

➤ Protection thermique

Lors du fonctionnement d'une diode la jonction est soumise à une température élevée.

- Protection naturelle : utilisation d'un dissipateur thermique ou une embase radiateur
- Protection par ventilation forcée.
- Protection par eau ou l'huile qui circule dans le radiateur

➤ Protection contre la variation du courant (di/dt) et la variation de la tension (dv/dt).

Les composants d'électronique de puissance sont sensibles à la variation du courant ou de la tension pendant la commutation.

1. Pour amortir la variation du courant on utilise une inductance de retard
2. Pour retarder la variation de la tension utilisant un condensateur de retard

I.3. Composants commandable à la fermeture ou à l'ouverture

I.3.1. Thyristor (SCR)

Le thyristor (SCR) est un composant électronique Unidirectionnel en courant ($I_{AK} > 0$). Réversible en tension.

Commandé à la fermeture (On), Il est muni d'une électrode de déblocage.

Le thyristor est un semi-conducteur de structure PNPN assimilable à un ensemble de trios jonctions.

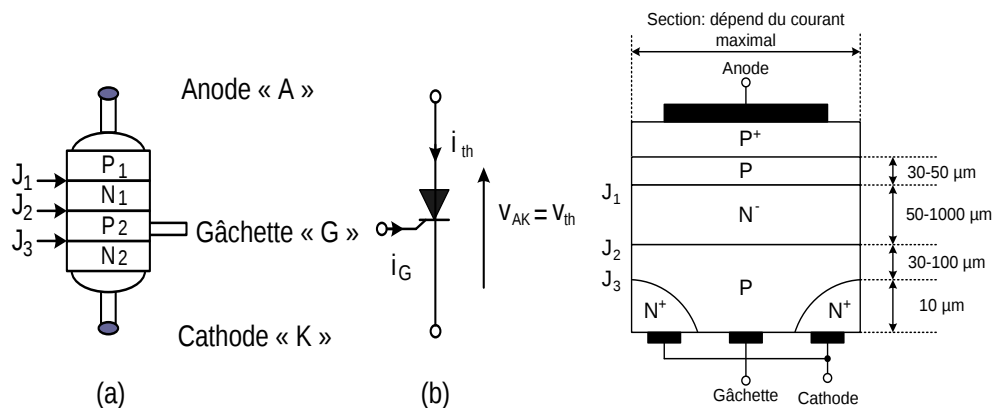


Fig.1.6. Structure et symbole d'un thyristor de puissance

- L'extrémité P est l'anode A
- L'extrémité N est la cathode K
- L'électrode de contrôle (gâchette) est issue de la couche centrale P.

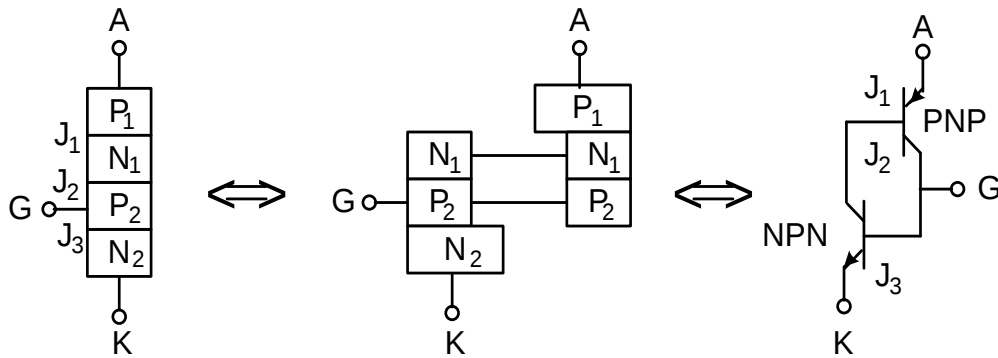


Fig.1.7. Schéma équivalent de la structure d'un thyristor

I.3.1.2. Principe de fonctionnement d'un thyristor

Le fonctionnement du thyristor s'opère suivant deux états :

- **L'état passant (ON) :** L'amorçage du thyristor est obtenu par un courant de gâchette i_G positif d'amplitude suffisante alors que la tension V_{AK} est positive. Cet état est caractérisé par une tension V_{AK} nulle et un courant i_{AK} positif.
- **L'état bloqué (OFF) :** On distingue deux types de blocage :
 - a. Blocage naturelle par annulation du courant i_{AK} .
 - b. Blocage forcée par inversion de la tension V_{AK} .

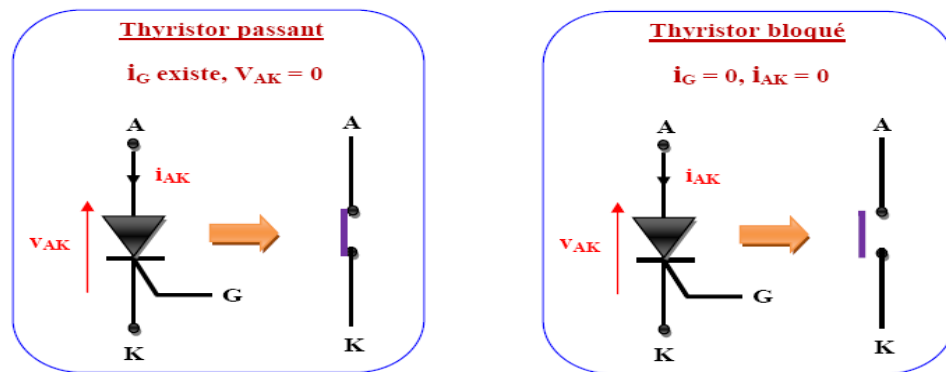


Fig 1.8 : Configurations des états d'un thyristor de puissance

I.3.1.2.1. Caractéristique Tension-Courant d'un thyristor

Valeurs maximales admissibles :

IF max: courant direct maximal admissible. **VDRM :** tension maximale directe répétitive. **VRRM :** tension maximale inverse répétitive. **Tension de seuil :** $V_d = 0,6$ à $0,7$ V.

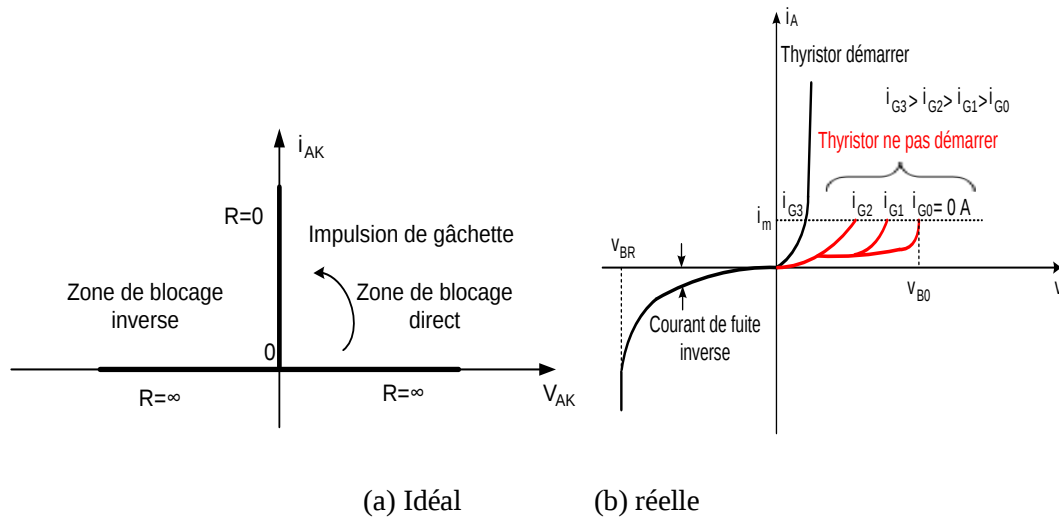


Fig 1.9 : Caractéristiques d'un thyristor :

I.3.1.2.2. Critères de choix d'un thyristor :

On choisit les thyristors par deux critères essentiels :

- La tension inverse VRRM ou directe VDRM maximale de V_{AK} .
- Le courant moyen de i_{AK} à l'état passant.



Fig1.10 : Images des thyristors de puissance

I.3.1.2.3. Protection du thyristor :

a. Protection contre les di/dt:

Au début de l'amorçage du thyristor, seule une petite partie de la jonction est conductrice. Si la vitesse de croissance du courant principal est trop importante, elle peut entraîner des densités de courant énormes qui vont détruire le composant. Pour limiter ce phénomène, on utilise des petites inductances en série avec le thyristor.

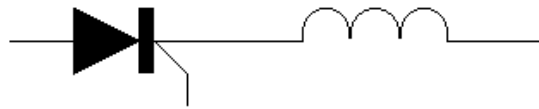


Fig1.11 : Circuit de protection contre la variation du courant

b. Protection contre les dv/dt :

Si la tension anode-cathode augmente trop rapidement, elle peut entraîner un amorçage intempestif du thyristor (sans signal de gâchette). Pour neutraliser ce phénomène, on utilise le circuit suivant :

Lorsqu'une surtension présente entre les points A et B, le condensateur se charge à travers D et l'impédance de la ligne. La tension V_{AK} évolue plus lentement (comme aux bornes du condensateur). La résistance R intervient lors de l'amorçage commandé et limite le courant de décharge du condensateur dans le thyristor.

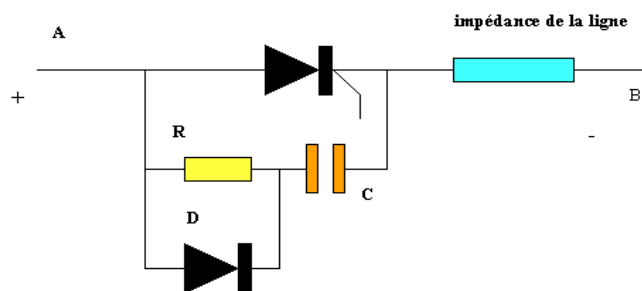


Fig1.12 : Circuit de protection contre la variation de la tension

I.3.2. Thyristor BlocableGTO

I.3.2.1.Présentation :

Le thyristor GTO (GateTurn Off) est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir être bloqué à l'aide de la gâchette, contrairement aux thyristors classiques. Il est utilisé pour les commutations des fortes puissances.

- Le GTO est un dispositif bistable quatre couches semi-conductrices proche du thyristor, dont on peut commander l'amorçage et le blocage par une électrode de commande (gâchette).
- La possibilité de commander obtenue grâce à une inter digitalisation très poussée entre grille et cathode.
- L'amorçage s'effectue comme celui d'un thyristor par une impulsion de gâchette positive.
- Le blocage s'effectue comme celui d'un transistor par extraction d'un courant inverse de gâchette sous une tension de commande gâchette –cathode négative.

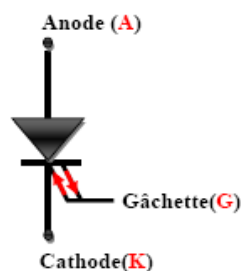


Fig1.13. Symbol d'un Thyristor GTO

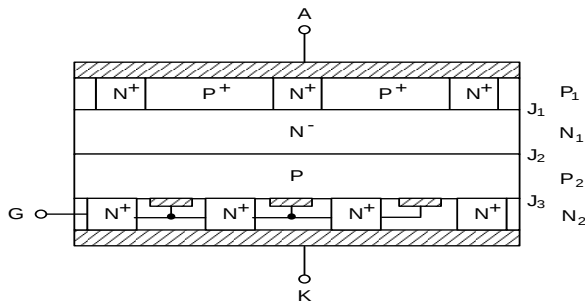


Fig1.14. Constitution d'un GTO

La couche P1 court-circuitée par des blocs N+ en contact avec l'anode et la couche N1.

- Cathode morcelée en un grand nombre d'îlots indépendants. Cette géométrie particulière permet d'obtenir le blocage par inversion du courant de gâchette.

I.3.2.2. Principe de fonctionnement :

- **L'état passant (ON) :** Un GTO s'amorce par la gâchette (avec $V_{GK} > 0$) comme un thyristor SCR. Le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient.
- **L'état bloqué (OFF) :** Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner la quasi-totalité du courant d'anode dans la gâchette. En pratique, on applique donc une tension négative sur la gâchette ($V_{GK} < 0$) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable.

En général : Un GTO

- Semblable au thyristor SCR mais son blocage se fait par inversion du courant de gâchette.
- La fréquence de coupure f_c est de l'ordre de 100 Hz.
- La commande est délicate et coûteuse.
- La protection vis-à-vis du court-circuit est difficile.

Son Domaine d'utilisation

Le GTO est utilisé pour les fortes puissances tel que :

- Traction électrique.
- Variation de vitesse des moteurs à courant continu (hacheurs).
- Alimentations sans coupure (onduleurs).
- Systèmes d'allumage automobile
- Modulateurs radar.



Fig1.15. Image d'un GTO de puissance

I.3.3. Le Triac

Le triac est un interrupteur semi-commandable bidirectionnel. La fermeture de l'interrupteur triac correspond à l'amorçage d'une avalanche, comme dans le thyristor. Il est équivalent à deux thyristors montés en antiparallèle, mais à la différence du montage à deux thyristors, il ne comporte qu'une seule gâchette.

Le triac est un composant d'électronique de puissance qui possède des caractéristiques suivantes :

- Bidirectionnel en courant.
- Commandable à la fermeture.
- Équivalent à deux thyristors en tête bêche.
- Commandé par une seule gâchette.

I.3.3.1. Symbole

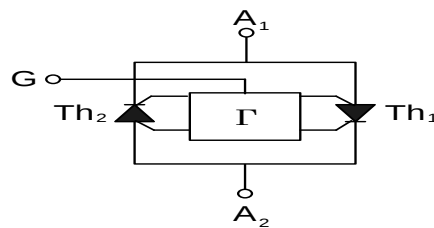


Fig1.16. Schéma équivalent d'un Triac

I.3.3.2. Structure d'un TRIAC

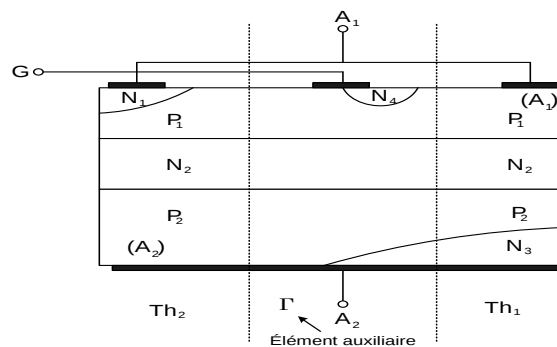


Fig1.17. Constitution du triac

I.3.3.3. Caractéristique statique

Elle se déduit celle du thyristor : Avec V_{B0} : la tension à l'amorçage.

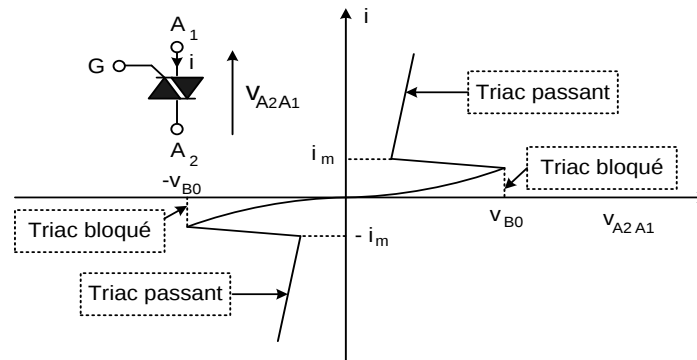


Fig1.18 : Caractéristique réelle

I.3.3.4. Amorçage

Deux commandes $G +$ et $G -$ sont alors nécessaires pour l'interrupteur équivalent, selon que l'on agit sur le thyristor amorçable pour $v > 0$ ou sur celui amorçable pour $v < 0$

Par courant de gâchette $\rightarrow$ quatre cas possibles : amorçage dans les quatre quadrants

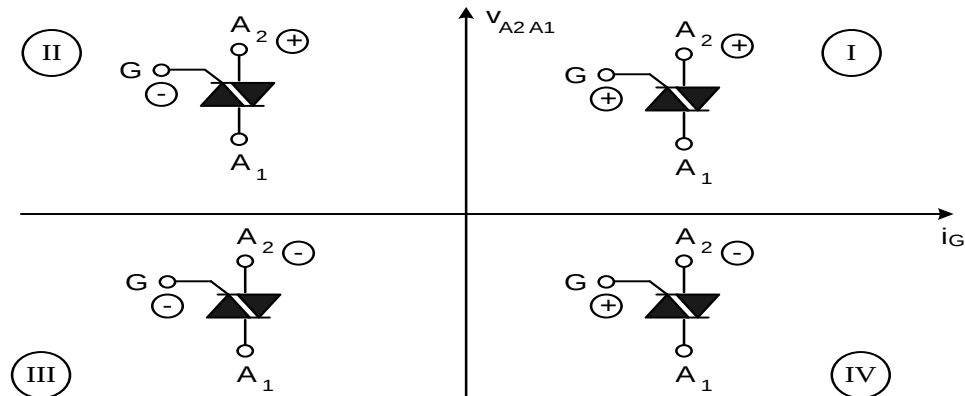


Fig1.19 : Quatre quadrants d'amorçage.

Quadrant de déclenchement	Polarité par rapport à A_1		Condition d'amorçage i_G
	de A_2	de G	
I	+	+	Faible
II	+	-	Moyen
III	-	-	Moyen
IV	-	+	Fort

I.3.4. MOSFET.

Le transistor MOSFET est un composant électronique unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant.

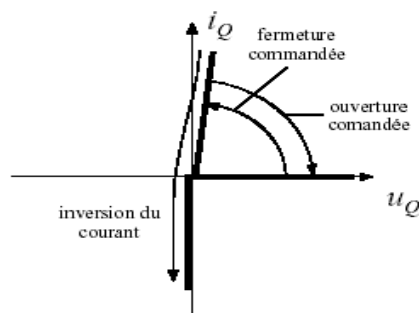


Fig 1-20. Représentation du MOSFET sur la forme d'un interrupteur

I.3.4.1. Symbole du MOSFET

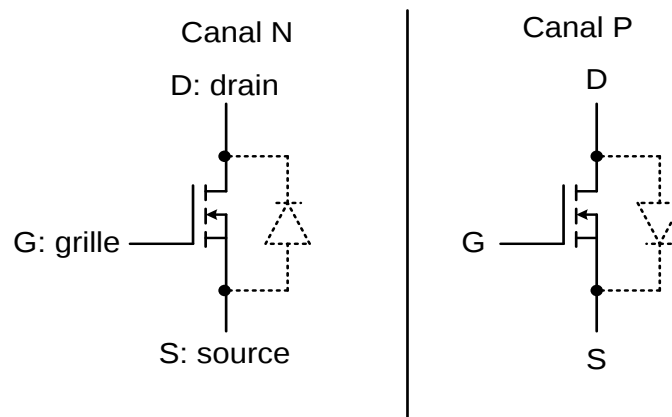


Fig I.21 : Symbole de MOSFET

I.3.4.2. STRUCTURE DU MOSFET

Un MOSFET de puissance est formé généralement d'un grand nombre de cellules élémentaires mises en parallèle. La structure la plus répandue pour les MOSFET de puissance utilisés en commutation est celle correspond au DMOSFET.

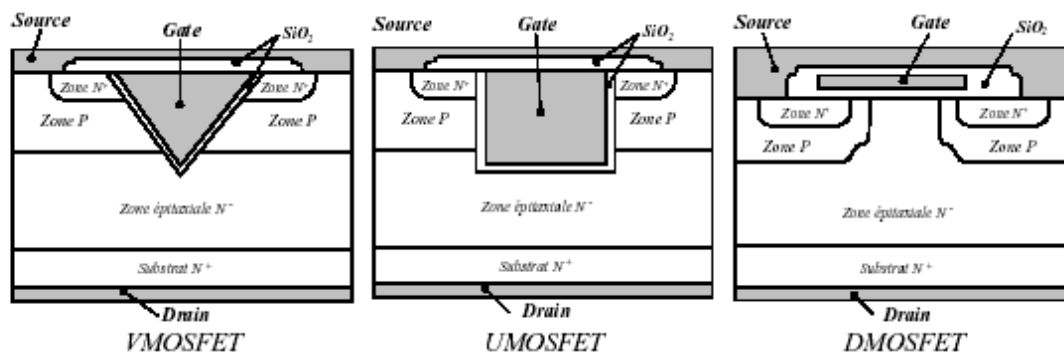


Fig 1-22. Structure des MOSFET

Les MOSFET sont des composants commandés en tension. Le composant est à l'état ON lorsque la tension Grille-Source est inférieure à la tension de seuil.

Les MOSFET nécessitent le maintien continu d'une tension Grille-Source appropriée pour demeurer dans l'état ON. Aucun courant de grille ne circule, excepté durant les commutations lorsque la capacité de grille est chargée puis déchargée. Les temps de commutation sont très brefs, allant de quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes.

La résistance à l'état ON d'un MOSFET entre le Drain et la Source augmente rapidement avec la tension bloquée. Cette résistance entraîne une dissipation de puissance à l'état OFF.

I.3.5. Transistor BJT

BJT : Bipolar Junction Transistor ou transistor bipolaire à jonction. Ce composant est apparu en 1947, il est surtout utilisé pour des applications en faible puissance et faible tension.

I.3.5.1. Symbole et structure de BJT

On distingue deux types de transistors bipolaires et les électrodes, ainsi que le sens conventionnel de courant. La mise en conduction ou la coupure est commandée par injection d'un courant dans la base.

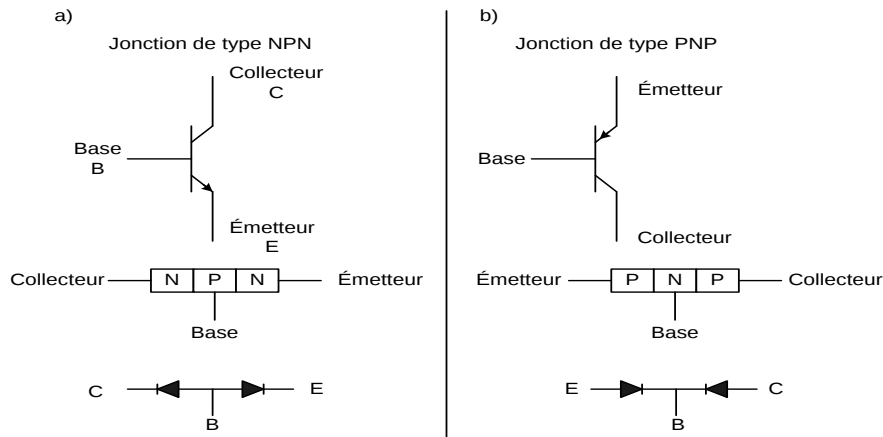


Fig 1.23. Symbole et structure d'un transistor BJT (a) type NPN b) type PNP

I.3.5.2. Constitution des jonctions d'un transistor bipolaire

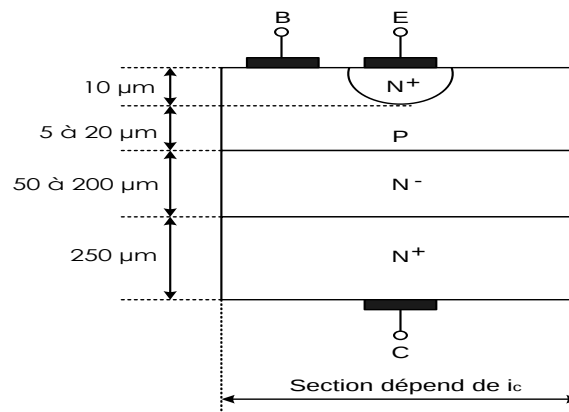


Fig. 1.24. Constitution du BJT

La zone N- entre base et collecteur permet à la jonction base-collecteur, polarisée en inverse, de supporter une tension inverse importante sans claquage, en absorbant de transistor.

I.3.5.3. Les pertes dans le transistor :

Durant les périodes de conduction, la puissance dissipée est constante. Elle participe aux pertes en conduction qui sont sensiblement constantes. Pendant les commutations la puissance est une succession de paraboles.

Cela constitue les pertes en commutation qui sont d'autant plus importantes que la fréquence est élevée.

I.3.6. L'IGBT

L'IGBT est formé d'un grand nombre de cellules élémentaires mises en parallèle. On retrouve la même structure que celle d'un MOSFET. La source devient l'émetteur. Du côté du collecteur C, on trouve une zone P+fortement dopée qui forme avec la zone N- du substrat une jonction PN, tandis que dans un MOSFET le drain est directement connecté à travers une couche N+

I.3.6.1. Principe

L'IGBT combine les avantages du transistor bipolaire et du MOSFET :

- Bipolaire → faibles pertes en conduction mais temps de commutation élevée
- MOSFET → temps de commutation faible mais pertes en conduction plus élevées, augmentant avec V_{DS} .

I.3.6.2. Structure

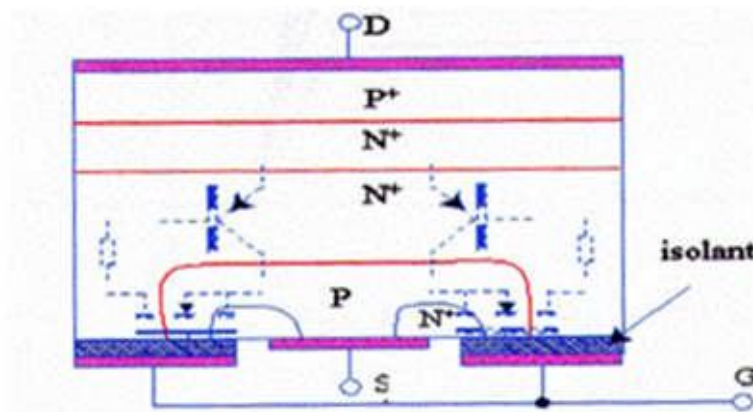


Fig I.25. : Structure de l'IGBT

Cette structure ne comporte pas une diode parallèle inverse, donc elle peut supporter une tension inverse à l'état bloqué. Cette tenue en tension inverse est toutefois assez faible à cause des forts dopages. La majorité des applications de l'IGBT utilisent des modules avec une diode rapide dont le calibre en tension.

I.3.6.3. Symbole :

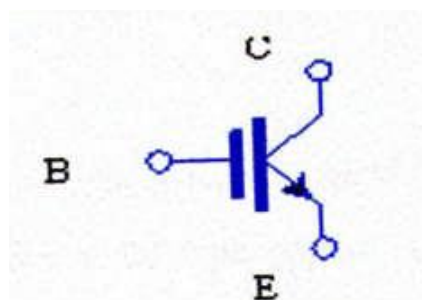


Fig I.26. : Symbole d'un IGBT

I.3.6.4. Caractéristique statique :

Les caractéristiques statiques d'un IGBT, mesurées le courant I_D en fonction de la tension V_{DS} pour diverses valeurs de la tension de commande V_{GE} ,

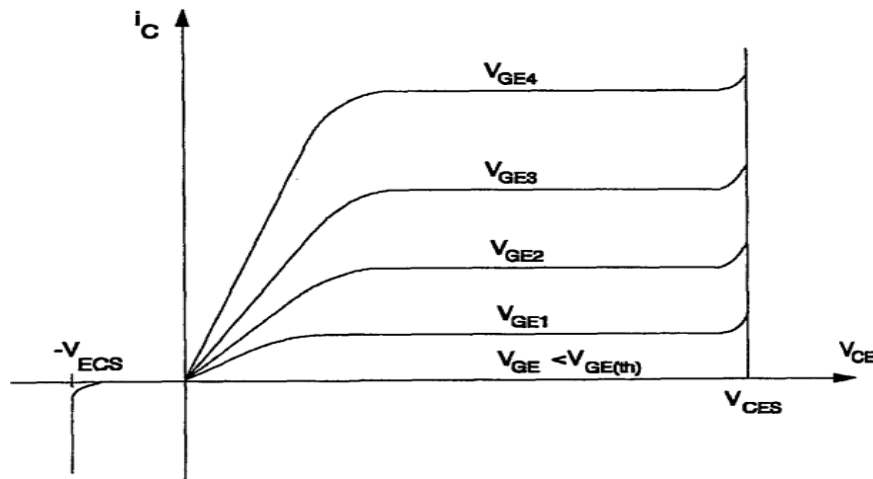


Fig I.27 : Caractéristiques statiques pour le composant IGBT

I.3.6.5. Les pertes :

$$P_{IGBT} = P_{\text{conduction}} + P_{\text{commutation}}$$

Les pertes dans le IGBT sont formées par les pertes en conduction et les pertes en commutation

I.4. Conclusion

- Les transistors MOS sont utilisés généralement pour les faibles puissances et fortes fréquences. La conduction unipolaire du composant leur confère de faibles pertes en commutation au détriment d'une chute de tension élevée en conduction à forte tension de claquage.
- Le MOSFET est plus rapide en commutation que l'IGBT dès que la puissance augmente et pour des fréquences inférieures à 50 KHz, l'IGBT est de loin le plus recommandé

REFERENCES

- INTERRUPTEURS SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE « Énergie et convertisseurs d'énergie ». Université de Savoie
-
- LES COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE
-
- MerabetBoulouiha Houari « cours d'électronique de puissance avancée » ENPO Université d'Oran.
-
- Michel Pinard « CONVERTISSEURSET ÉLECTRONIQUEDE PUISSANCE »
Commande • Description Mise en œuvre. Edition DUNOD.