

Electronique de Puissance Avancée (MEI72/MER72)**Formation : Master Electrotechnique Industrielle****Programme ou Contenu de la Matière :****Chapitre I. Modélisation des composants semi-conducteurs de puissance (en régime statique et dynamique)**

Caractéristiques idéalisées des différents types de semi-conducteurs,
Régime dynamique des interrupteurs et mode de commutation...

Chapitre II. Eléments constitutifs et Synthèse des convertisseurs statiques

Différents types de sources, règles d'association des sources, réversibilités des sources,
Méthode de synthèse des convertisseurs statiques, la cellule de commutation et ses règles,
Convertisseurs à liaison directe et indirecte,...

Chapitre III. Qualité d'énergie des convertisseurs statiques

Qualité de l'énergie électrique, notions de charges,
Pollution harmonique due aux convertisseurs statiques,
Etude des harmoniques dans les onduleurs de tension,
Introduction aux techniques de dépollution.

Chapitre IV. Conception des convertisseurs statiques à commutation forcée

Redresseurs à absorption de courant sinusoïdale,
Onduleurs à MLI, ...
Exemples d'applications des convertisseurs statiques.

Chapitre V. Onduleurs multiniveaux

Généralités : Concept multiniveaux, topologies, comparaison des onduleurs multiniveaux
Techniques de commande...

Les TDs :

Séries de travaux dirigés (TDs) pour l'application des connaissances acquises.

Modalités d'examen:

- Un examen écrit noté sur 20 points à la fin du semestre.
- Une note de TD sur 20 points (assiduité+participation+testes...).

Références bibliographiques :

- ☐ H. Foch, « Principes fondamentaux : éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques », Techniques de l'Ingénieur, D3152.
- ☐ H. Foch, « Principes fondamentaux : commutation dans les convertisseurs statiques », Techniques de l'Ing., D3153.
- ☐ A. Cunière, G. Feld, M. Lavabre, « Electronique de puissance : De la cellule de commutation aux applications industrielles », Éditions Casteilla, 2012.
- ☐ Guy Séguier, Robert Baussière, Francis Labrique, « Electronique de puissance, Structures, Fonctions de base, Principes », Édition 2011.
- ☐ Michel Pinard, « Convertisseurs et électronique de puissance : Commande, description, mise en œuvre », Édition 2009
- ☐ Guy Séguier, Philippe Delarue, Christian Rombaut, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », 2007.
- ☐ Jacques Laroche, « Electronique de puissance : Etudes des convertisseurs (cours et exercices corrigés) », 2005.
- ☐ M. Lavabre, « Electronique de puissance : conversion de l'énergie (cours et exercices résolus) », Édition Casteilla, 1998.
- ☐ H. Buihler, « Convertisseurs statiques », Édition Lavoisier, 1991.

Chapitre-I

Modélisation des Composants Semi-Conducteurs de Puissance (En Régime Statique et Dynamique)

I-1 Introduction

L'électronique de puissance est une branche de l'électricité ou de l'électrotechnique qui traite de la *modification de la présentation de l'énergie électrique* pour l'adapter dans les meilleures conditions aux multiples utilisations.

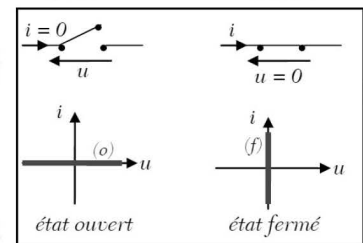
Ayant le souci de travailler à *rendement maximum*, l'électronique de puissance ne peut être qu'une *électronique de commutation* où les composants *semi-conducteurs* 'S.C' ne fonctionnent qu'en *interrupteurs ouverts ou fermés* (ils se comportent donc comme des *commutateurs* aussi parfaits que possible).

I-2) Fonctionnement idéalisé et classification des interrupteurs

I-2-1) Interrupteur parfait ou idéal

Un *interrupteur idéal* présente une *caractéristique à quatre segments* qui fait apparaître deux états stables :

- état ouvert ou bloqué (o) : $i = 0$ et $u \neq 0$
 \Rightarrow *Interrupteur Ouvert*
- état fermé ou passant (f) : $i \neq 0$ et $u = 0$
 \Rightarrow *Interrupteur Fermé*

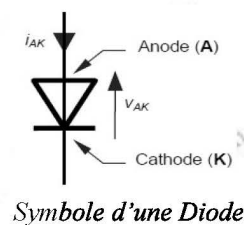


Caractéristique statique d'un interrupteur parfait

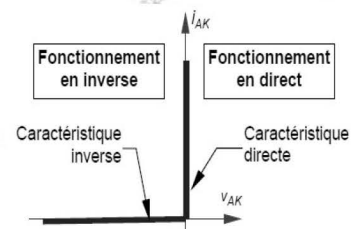
I-2-2) Interrupteurs à semi-conducteurs

1) Fonction Diode (commutation spontanée)

La *diode de puissance* est un composant *non commandable* (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Donc, la diode se caractérise par une *commutation spontanée ou naturelle à l'amorçage et au blocage* (dépendant de la polarisation directe ou inverse imposée par le circuit de puissance).



Symbole d'une Diode



Caractéristique statique idéalisée d'une diode

Comme le montre la figure ci-contre, la diode représente un *interrupteur unidirectionnel en tension et en courant* résultant à une *caractéristique à deux segments de signe opposé*.

2) Fonction Thyristor (fermeture commandée et ouverture spontanée)

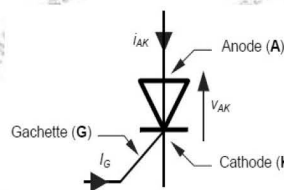
2-1) Thyristor 'SCR' :

Le thyristor est un composant *commandé à la fermeture*, mais *pas à l'ouverture*. En fait, il se caractérise par une *commutation spontanée ou naturelle seulement au blocage*.

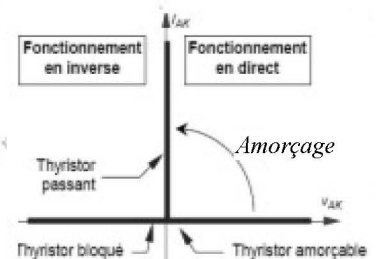
Son *amorçage* est obtenu par un courant de gâchette i_G positif d'amplitude suffisante (avec $v_{AK} > 0$).

L'état passant (ON) d'un thyristor est équivalent à celui de la diode.

Donc, le thyristor représente une réversibilité en tension résultant à une *caractéristique à trois segments*.



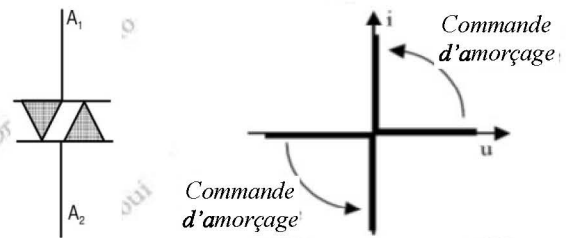
Symbole d'un Thyristor



Caractéristique statique idéalisée d'un Thyristor

2-2) TRIAC (Triode Alternating Current)

Le **Triac** peut être considéré comme le **groupement antiparallèle de deux thyristors**. Il représente donc **une caractéristique statique à quatre segments**. Son blocage est spontané.



Symbole et Caractéristique statique idéalisée d'un Triac

3) Fonction Transistor (Interrupteurs commandés à l'amorçage et au blocage)

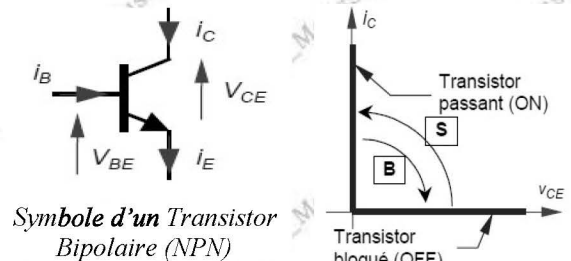
3-1) Transistor bipolaire de puissance (BJT)

Le **transistor BJT** est un composant **totalelement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture.

En électronique de puissance, le transistor BJT représente deux états stables :

- **Transistor bloqué (B) ou OFF** : L'équivalent est un **commutateur ouvert**.
- **Transistor saturé (S) ou ON** : L'équivalent est un **commutateur fermé**.

D'après sa caractéristique statique, le **BJT** est un **interrupteur unidirectionnel en tension et en courant**. Ce qui résulte à **une caractéristique à deux segments de même signe (positif)**.



Symbole d'un Transistor Bipolaire (NPN)

Caractéristique statique idéalisée d'un Transistor BJT

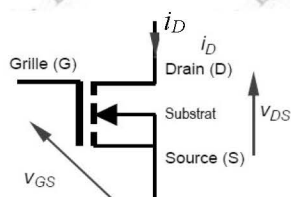
3-2) Transistor MOS ou MOSFET de puissance

Le **MOS** est un composant **totalelement commandé** : à la fermeture et à l'ouverture.

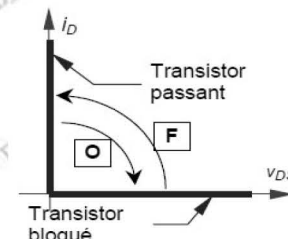
Il représente ces deux états :

- **Transistor ouvert (OFF ou O)** : L'équivalent du MOS est ainsi un **interrupteur ouvert**.
- **Transistor fermé (ON ou F)** : L'équivalent du MOS est, dans ce cas, un **interrupteur fermé**.

De même que le BJT, le **MOS** est **unidirectionnel en tension et en courant**.



Symbole d'un Transistor MOS

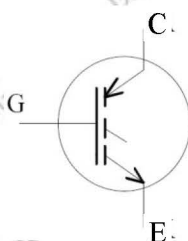


Caractéristique statique idéalisée d'un Transistor MOS

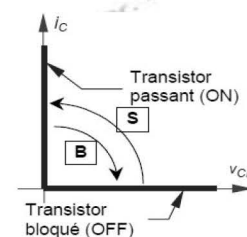
3-3) Transistor IGBT : un Compromis MOSFET-BJT

Un transistor hybride, **commande MOS en tension et circuit de puissance bipolaire**, permet de meilleures performances : c'est le **transistor IGBT (Insulated-Gate-Bipolar-Transistor)**.

L'**IGBT** est **unidirectionnel en tension et en courant**.



Symbole de l'IGBT

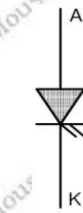


Caractéristique statique idéalisée d'un Transistor IGBT

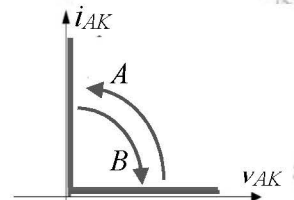
3-4) Thyristor blocable (Gate Turn Off, GTO)

Il s'agit d'un thyristor équipé d'une seconde gâchette destinée à permettre le blocage (B) de cet élément.

Contrairement à un thyristor normal, le **GTO ne permet pas le blocage d'une tension inverse**. Donc **il est unidirectionnel en tension et en courant**.



Symbole d'un

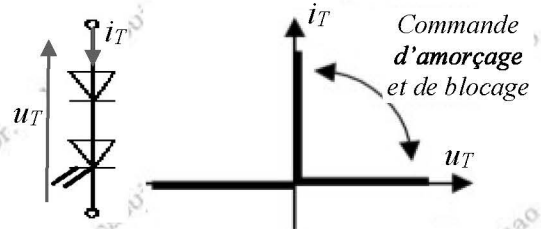


Caractéristique statique idéalisée d'un GTO

4) Fonctions des Interrupteurs synthétisés

4-1) Association série des interrupteurs :

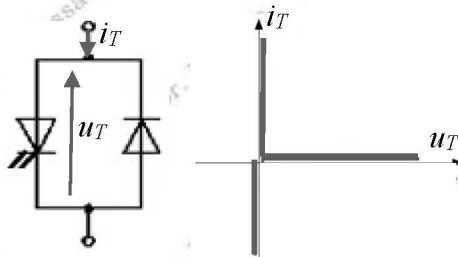
Dans le cas où le circuit de puissance impose une tenue en tension inverse, il suffit d'insérer **une diode en série avec l'interrupteur**. **L'équivalent est un interrupteur totalement commandable, bidirectionnel en tension et unidirectionnel en courant**.



Fonctionnement avec tension inverse

4-2) Association parallèle des interrupteurs :

De même, pour assurer le passage d'un courant inverse, on peut monter **une diode en antiparallèle avec l'interrupteur**. Ce qui permet de **réaliser des éléments bidirectionnels en courant**.



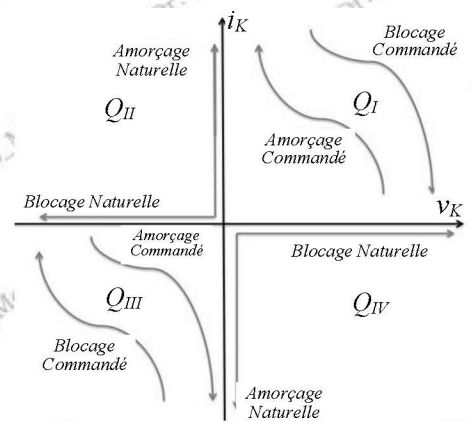
Fonctionnement avec conduction inverse

I-3) Régimes Dynamiques des Interrupteurs / Modes de Commutation

Une transition entre les deux états stables d'un interrupteur (bloqué et passant) est appelée **commutation**. On parle ainsi :

- d'amorçage (ou fermeture) : lors de passage de l'état OFF à l'état ON.
- de blocage (ou ouverture) lors de passage de l'état ON à l'état OFF.

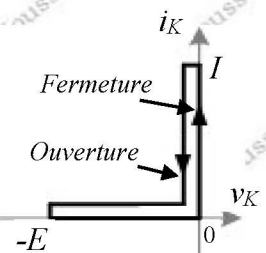
La **caractéristique dynamique d'un interrupteur** : c'est la trajectoire suivie par le point de fonctionnement pour passer d'un point situé sur un segment à un point situé sur un autre segment (de la caractéristique statique). Avec cette définition on peut distinguer deux modes de commutation :



A) Commutation Spontanée ou Naturelle

Soit le point de fonctionnement se déplace le long des axes dans des quadrants où les segments sont de signes opposés (**quadrants 2 ou 4**) : avec $W=0$, ce mode de commutation est appelée « **commutation spontanée ou naturelle** ». Ainsi :

- L'amorçage ou la fermeture spontanée de cet interrupteur s'effectue au passage par zéro de la tension v_K .
- Le blocage ou l'ouverture spontanée de ce même interrupteur s'effectue au passage par zéro du courant i_K .

Caractéristique Dynamique d'un interrupteur avec Commutation Spontanée ($W=0$)

B) Commutation Commandée ou Forcée

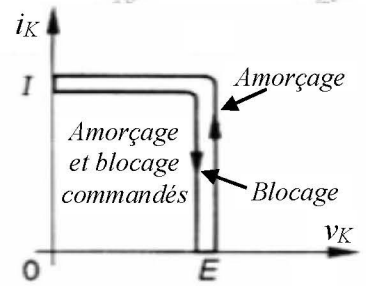
Soit le point de fonctionnement se déplace dans un 1/4 de plan où les segments sont de mêmes signes : **quadrants 1 ou 3**, avec $W > 0$, on parle alors de « **commutation commandée ou forcée** ».

Dans ce cas, l'interrupteur possède, en plus de ses électrodes principales, une électrode de commande sur laquelle il est possible d'agir pour provoquer son changement d'état de manière quasi instantanée.

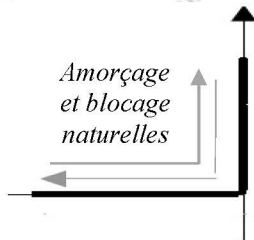
Ce mode de commutation commandée peut faire apparaître des contraintes sévères en terme de dissipation d'énergie sur l'interrupteur (nécessitant ainsi une certaine protection).

NB : $w = \int v_K(t) \cdot i_K(t) dt$ (pendant une période de commutation)

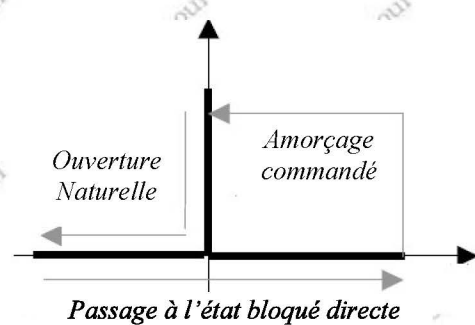
En considérant ces deux modes de commutation (spontanée et commandée) pour les interrupteurs, on peut représenter la caractéristique dynamique correspondante à chaque composant 'S.C'.



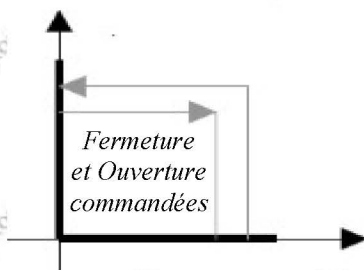
Caractéristique Dynamique d'un interrupteur avec Commutation Commandée ($W > 0$)



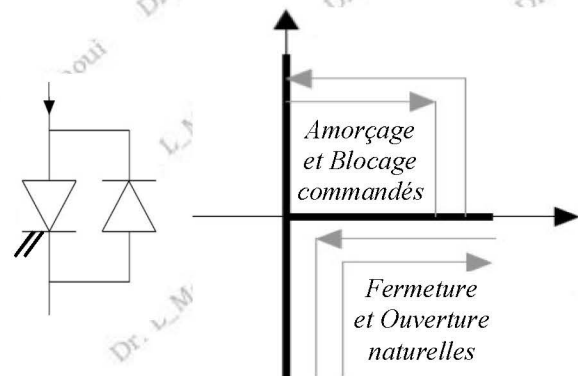
Caractéristiques statique et dynamique d'une diode



Caractéristiques statique et dynamique d'un thyristor SCR



Caractéristiques statique et dynamique correspondantes à la fonction transistor



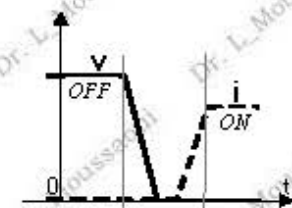
Caractéristiques statique et dynamique pour un exemple d'interrupteurs synthétisés

I-4) Vocabulaire des commutations/Pertes de Commutation

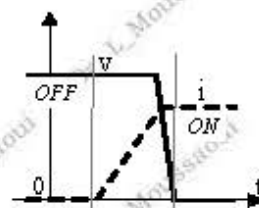
Les **composants 'S.C'** ne sont pas parfaits ; ils consomment de l'énergie à l'état bloqué (léger courant), à l'état passant (légère tension) et aussi lors des commutations (passage de l'état bloqué vers l'état passant et réciproquement). Il convient alors de chercher à réduire ces pertes autant que possible.

On doit noter également, que les commutations des interrupteurs à 'S.C' (soit spontanées ou commandées) ne sont jamais instantanées. En fait, on dit que :

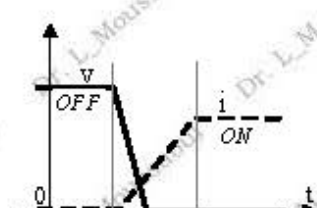
- Une **commutation à la fermeture est douce** ou à **tension nulle** (Zero Voltage Switching) si la montée du courant ' i ' ne commence qu'après l'annulation de la tension ' v ' (figure a1).
- Une **commutation à l'ouverture est douce** ou à **courant nul** (Zero Current Switching) si la tension ' v ' ne commence à monter qu'après l'annulation du courant ' i ' (figure b1).
- Une **commutation à la fermeture est dure** si le courant ' i ' dans le composant monte alors que la tension ' v ' à ses bornes ne s'est pas encore annulée (figure a2).
- Une **commutation à l'ouverture est dure** si la tension ' v ' monte alors que le courant ' i ' dans le 'S.C' ne s'est pas encore annulée (figure b2).



(a1): Commutation Douce (ZVS)

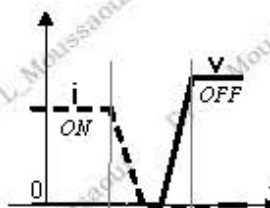


(a2): Commutation Dure

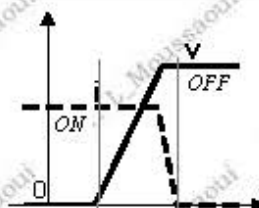


(a3): Commutation Adoucie

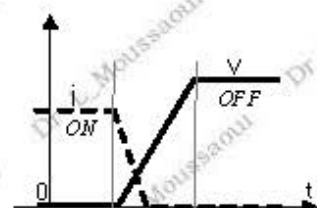
a) Fermeture d'un interrupteur



(b1): Commutation Douce (ZCS)



(b2): Commutation Dure



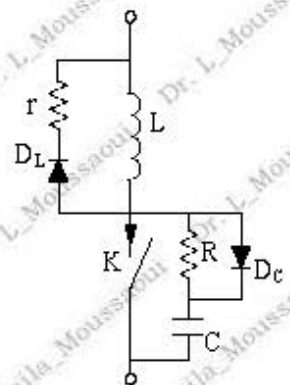
(b3): Commutation Adoucie

b) Ouverture d'un interrupteur

Ex : Représentez (sur le même plan) les caractéristiques statique et dynamique correspondantes à chaque type de commutation (douce, dure et adoucie).

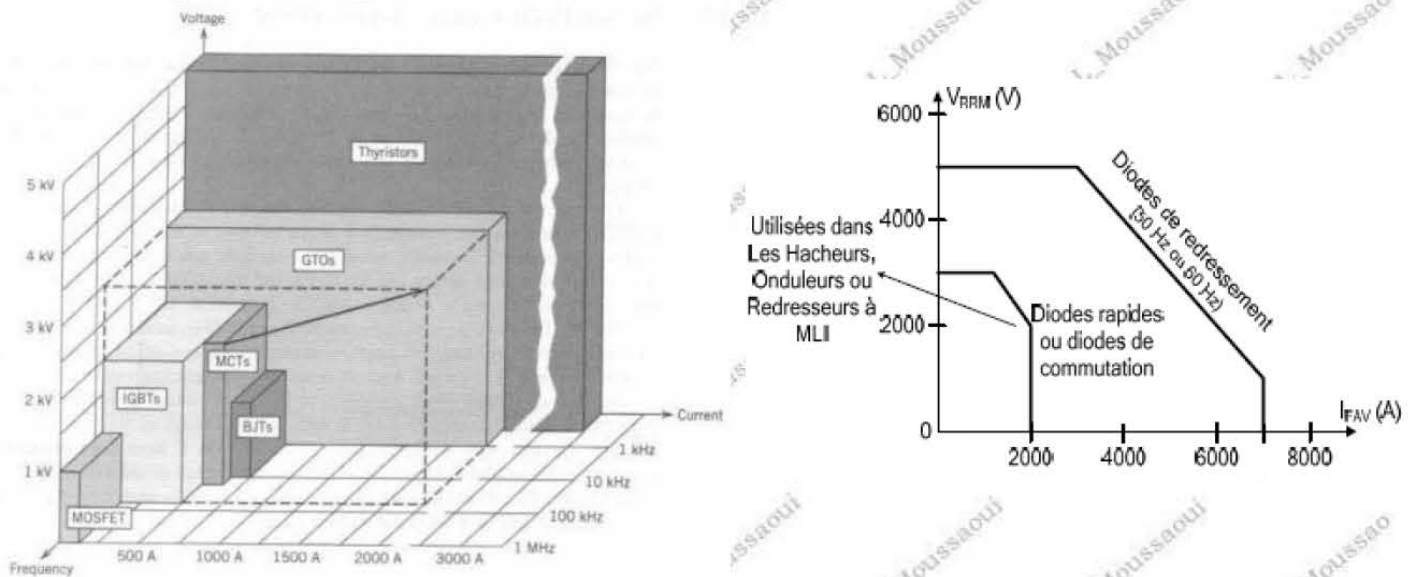
Remarques :

- Dans le plan courant-tension, une commutation douce correspond au passage du point de fonctionnement d'un segment à un autre en se déplaçant sur ces segments, donc le long des axes, et en passant par le point 'O'. Ainsi la puissance dissipée ($v \times i$) dans l'interrupteur sera toujours nulle.
- Alors, les commutations spontanées des diodes ou des thyristors (lors de leurs ouvertures) sont donc naturellement douces puisqu'elles nécessitent le passage par le point 'O'.
- Une commutation dure correspond au passage d'un segment à un autre à travers le premier ou le troisième quadrant (représentant la commutation commandée que l'on trouve dans la fonction thyristor ou transistor). Dans ce cas, la puissance instantanée ($v \times i$) dissipée dans le composant 'S.C' est importante.
- Pour adoucir les commutations dures on ajoute aux interrupteurs commandés des Circuits d'Aides à la Commutation (en abrégé CALC ; en anglo-saxon, Snubbers, c'est-à-dire Adoucisseurs). Sur la figure ci-dessous, on donne un exemple d'un adoucissement des commutations (dans les convertisseurs à commutation adoucie).

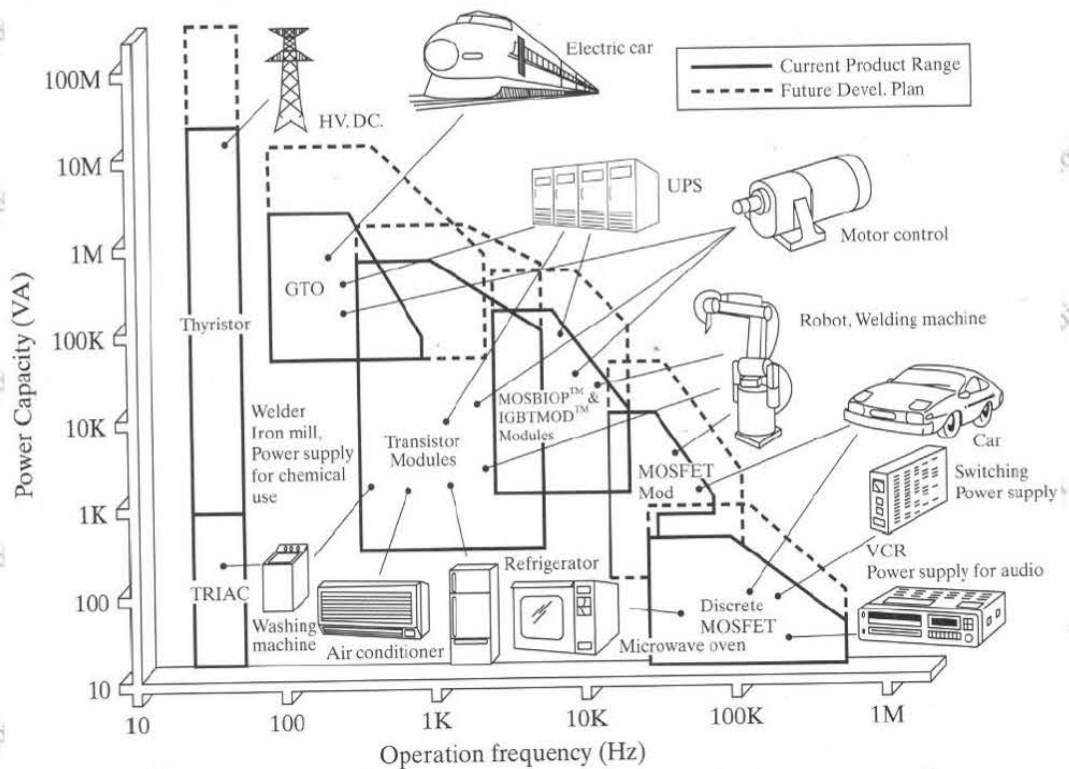


ANNEXE- CHAPITRE I

Les différents composants semi-conducteurs ne peuvent pas être employés dans les mêmes gammes de puissance et de fréquence de commutation, en raison des contraintes liées à leurs structures respectives. Les deux figures ci-dessous présentent la classification et les plages d'utilisation, en fréquence de commutation et en puissance apparente, des différents dispositifs à semi-conducteurs dont nous venons de parler.



Classification des composants Semi-conducteurs (Cours ECE2 / E2 / S. Azzopardi 2011)



Plage d'emploi des différents interrupteurs

Récemment, avec l'existence des transistors bipolaires de puissance à un coût relativement réduit, les convertisseurs à transistors ont remplacés presque tous les convertisseurs à thyristors jusqu'à 100KVA.

De même, les progrès effectués sur l'IGBT on lui permet de prendre une partie des applications des GTOs et des MOSs et presque toutes les applications des transistors bipolaires pour constituer, dans les équipements d'électronique de puissance, l'élément semi-conducteur de base (pour des puissances P de 1 à 1000 kW et des fréquences f jusqu'à 30 kHz).