

Chapitre 1 : Généralités

I. Généralités sur systèmes de commande

I.1. Description d'un système de commande

Un système de commande est tout système électrique mécanique qui tourne à une vitesse variable. La figure 1, illustre un exemple d'un système élémentaire d'entraînement électrique.

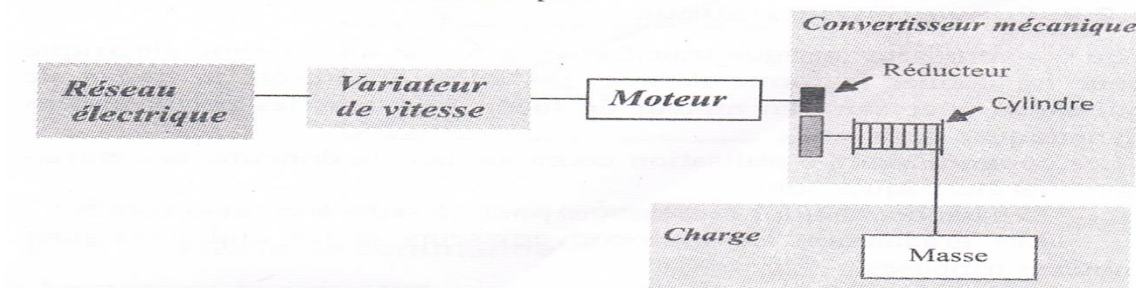


Figure 1 : Exemple d'un système d'entraînement électrique

I.2. Identification des éléments d'un système de commande

Les éléments principaux d'un système de commande ou système d'entraînement à vitesse variable sont :

- Un moteur électrique,
- Un convertisseur statique,
- Une charge associée à un convertisseur mécanique,
- Un système de commande.

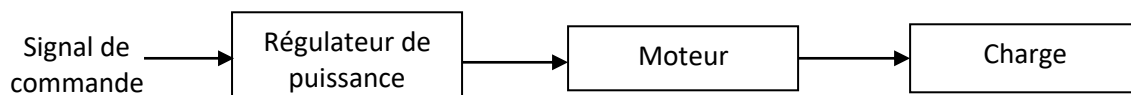


Figure 2 : système de commande

A. Moteurs des entraînements électriques

Les entraînements électriques utilisent des moteurs à courant continu et des moteurs à courant alternatif (synchrone, asynchrone et à réductance). Les moteurs électriques sont caractérisés principalement par les lois de variation du couple utile en fonction de la vitesse de rotation.

B. Convertisseur statique.

Les convertisseurs à utilisation courante dans le domaine des entraînements électriques sont:

- Les hacheurs et les redresseurs pour moteurs à courant continu,
- Les gradateurs, les cyclo-convertisseurs et les onduleurs pour moteurs triphasés.

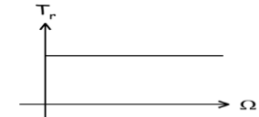
C. Convertisseur mécanique

Le convertisseur mécanique est un convertisseur de mouvement. Il assure la transmission de la puissance mécanique de l'arbre du moteur vers l'organe de travail de la charge.

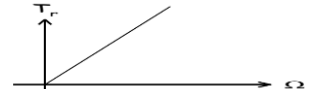
D. Charge

Elle est caractérisée par le type du couple résistant qu'elle impose. En effet, dans les entraînements électriques on trouve:

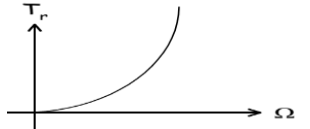
✓ Les charges à couple constant $T_r = cte$ représentées par une droite horizontale. C'est le cas pour de nombreuses machines-outils (perceuse, ...) et pour le levage.



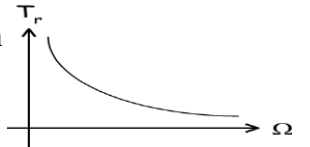
✓ Les charges à couple proportionnel à la vitesse $T_r = a\Omega$, ce qui donne une droite qui passe par l'origine. C'est le cas des pompes hydrauliques.



✓ Les charges à couple proportionnel au carré de la vitesse $T_r = a\Omega^2$ ce qui donne une parabole. C'est le cas des ventilateurs.



✓ Les charges à puissance constante $P = T_r \Omega = cte$, ce qui donne une relation donc une courbe hyperbolique. C'est le cas de l'essorage.



I.3. évolution de la vitesse du moteur d'entraînement

La vitesse est régie par l'équation générale de la dynamique dynamique :

$$C_m - C_r = J.d\Omega/dt$$

Avec :

C_m : couple moteur (N.m) ;

C_r : couple résistant (N.m);

J : moment d'inertie sur l'arbre du moteur ($Kg.m^2$);

Ω : vitesse angulaire (rd/s).

Comme le moment d'inertie est positif (et reste constant tant que l'on ne change pas de charge ou de moteur), alors le mouvement peut avoir trois étapes:

a- Régime établi :

Caractérisé par une vitesse constante. Donc : $d\Omega/dt = 0$

Alors l'équation générale de la dynamique :

$$C_m - C_r = 0 \rightarrow C_m = C_r$$

b- Régime transitoire :

b.1. Accélération :

La phase d'accélération est caractérisé par : $d\Omega/dt > 0$ (la vitesse augmente)

Alors l'équation générale de la dynamique :

$$C_m - C_r = J.d\Omega/dt > 0 \rightarrow C_m > C_r$$

Le moteur doit développer un couple supérieur qu'il développe en régime établi.

Exemple : phase de démarrage.

b.2. Décélération :

La phase d'accélération est caractérisé par : $d\Omega/dt < 0$ (la vitesse diminue).

Alors l'équation générale de la dynamique :

$$C_m - C_r = J.d\Omega/dt < 0 \rightarrow C_m < C_r$$

Le couple imposé par la charge supérieur au couple développé par moteur un couple supérieur qu'il développe en régime établi.

Exemple : phase de freinage.

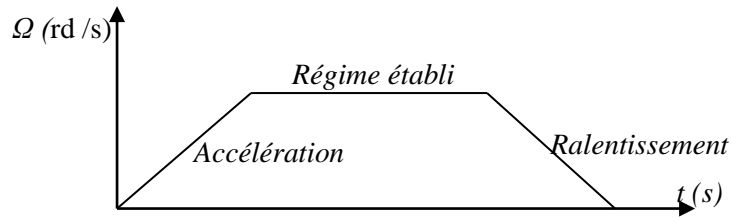


Figure 3 : Phases de mouvement

I.4. Quadrants de fonctionnement

Le signe de la puissance mécanique fournie par une machine tournante (puissance utile : $P_u = C_u \Omega$) dépend du signe de C_u (couple utile de la machine) et de Ω (vitesse de rotation en rad/s).

➤ Si C_m et Ω sont de même signe, la puissance mécanique fournie est positive et la machine fonctionne en moteur (elle fournit de l'énergie mécanique). Graphiquement cela correspond aux quadrants 1 et 3.

Pour la traction ferroviaire cela correspond à un fonctionnement moteur en marche AV (1^{er} quadrant) et AR (3^{ème} quadrant).

➤ Si C_m et Ω sont de signes contraires, la puissance mécanique fournie est négative et la machine fonctionne en génératrice (elle reçoit de l'énergie mécanique). Graphiquement cela correspond aux quadrants 2 et 4.

En traction ferroviaire, ces fonctionnements sont utilisés pour le freinage électrique (freinage AR pour 2^{ème} quadrant et AV pour 4^{ème} quadrant).

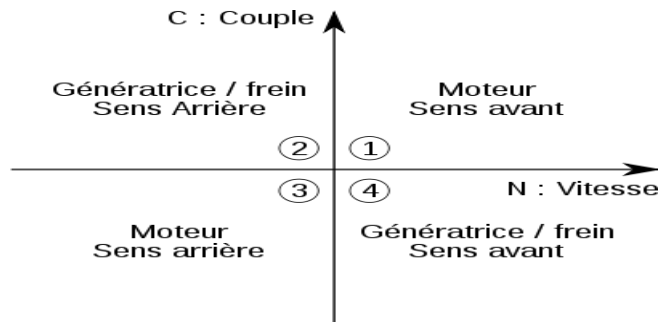


Figure 4: Les quatre quadrants de fonctionnement

I.5. Limites de couple et de vitesse pour un système de réglage (zones de fonctionnement)

Si on travaille à flux constant, la vitesse sera augmentée par la tension d'induit. Cette augmentation sera limitée par la valeur nominale de la tension d'induit. Si on souhaite aller plus vite, la seule solution possible est de réduire le flux inducteur. Cependant, cette réduction s'accompagne d'une réduction du couple moteur disponible: la vitesse augmentant et le couple diminuant, on est en présence d'un fonctionnement à puissance constante.

Le point de fonctionnement optimal est le point P correspondant à la vitesse nominale et le couple nominale.

Pour le fonctionnement à couple constant, la puissance développée par le moteur est proportionnelle à la vitesse et puisque la puissance est proportionnelle au carré du courant pour éviter le courant fort Le fonctionnement à la vitesse ($N > N_n$), on doit diminuer le couple au passage alors le fonctionnement à **puissance constant**.

Pour garder cette puissance constante, on doit diminuer le couple sous la forme de parabole ($P = \text{const} = k.C.N \rightarrow C = (\text{cst}/k).(1/N)$).

- La limite supérieure admissible de la vitesse est imposée par les contraintes mécaniques de la partie tournante de moteur.

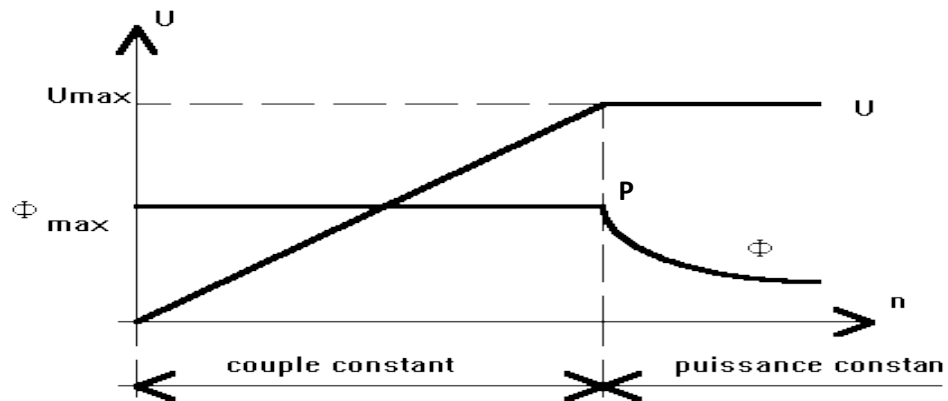


Figure 5 : Caractéristique en charge

II. Généralités sur les convertisseurs statiques

II.1. Introduction

Leur rôle consiste à adapter la source d'énergie aux exigences de la charge. Pour cela, ils sont amenés à modifier les caractéristiques des grandeurs transmises (tension, fréquence...) voire même à changer la forme de l'énergie (continu, alternatif...).

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (figure 1):

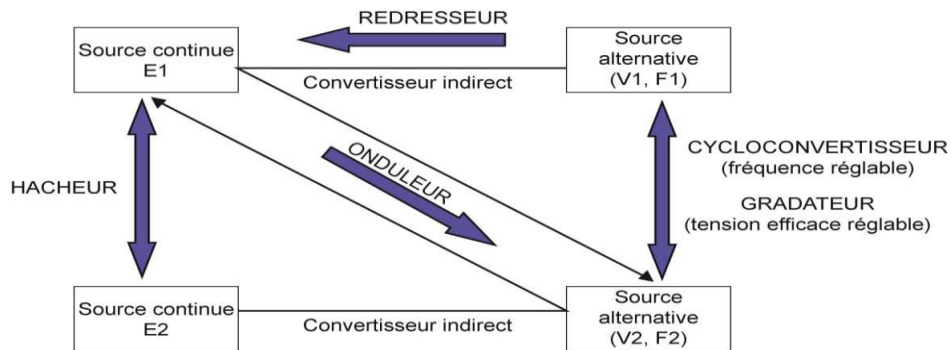


Figure 1 : Les différents types de conversion possible et le nom usuel des convertisseurs suivant leur fonction.

II.2. Généralités sur les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique.

Exemples :

- Une alimentation stabilisée transforme la tension alternative sinusoïdale du réseau EDF en tension continue (famille des redresseurs).
- Un onduleur de secours transforme la tension continue des batteries en tension alternative pour alimenter, par exemple, du matériel informatique (famille des onduleurs).

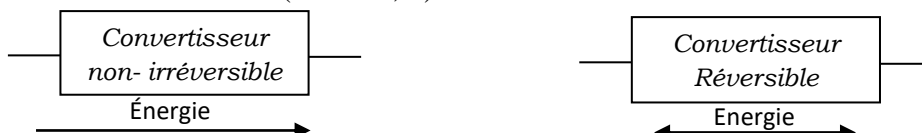
Les convertisseurs statiques sont constitués essentiellement de deux types d'éléments :

- Les composants passifs (condensateur et inductance) qui assurent le stockage de l'énergie ainsi que le filtrage des ondes de tension et de courant.
- Les composants à semi-conducteur jouant le rôle d'interrupteur et dont la commande permet le contrôle du transfert de puissance entre le générateur et le récepteur.

II.1. Réversibilité des convertisseurs

Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie peut transiter de manière bidirectionnelle (source récepteur ou récepteur source), c'est-à-dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Un convertisseur non-réversible transfère (et convertit) l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice. L'énergie ne peut pas transiter dans l'autre sens.

Certains convertisseurs statiques sont naturellement réversibles (onduleurs,...). D'autres sont naturellement non-réversibles (redresseur à diodes,...). Suivant le schéma de leur structure, certains pourront être réversibles ou non (hacheur,...).



Exemple : Lors du freinage d'une voiture électrique, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (moteur génératrice) qui sert à recharger les accumulateurs à travers le redresseur réversible (redresseur commandé).

II. 3. Quelques exemples d'interrupteurs

Les interrupteurs électroniques les plus couramment utilisés actuellement dans les convertisseurs statiques sont les diodes, les thyristors, les thyristors GTO, les transistors bipolaires, MOSFET, et IGBT.

1. La diode

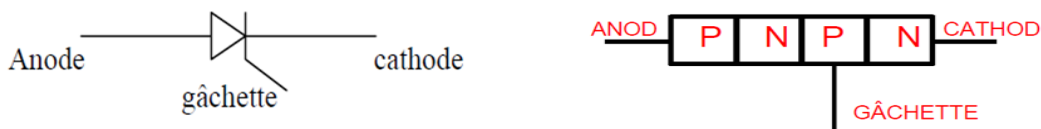
C'est un interrupteur à 2 segments de signe opposés. Idéalement, elle ne peut donc commuter que sans pertes. Ceci n'est technologiquement pas réalisé à cause de son mécanisme de conduction par diffusion : il en résulte une charge stockée qui doit s'évacuer et peut être à l'origine de pertes par commutation.

2. Le thyristor

Le thyristor est un élément semi-conducteur qui possèdent quatre couches respectivement dopé PNPN, trois jonctions PN et trois électrodes : l'Anode (A), la cathode (K) et la gâchette (G). Comme la diode, le thyristor laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'anode vers la cathode.

Mais le thyristor ne conduira que si un courant minimum positif est fourni à la gâchette.

En fait, s'il est polarisé en direct ($V_{AK} > 0$), une impulsion positive suffira pour le rendre conducteur. C'est donc une diode commandée et plus spécifiquement un redresseur commandé, d'où son nom anglais 'Silicon Controlled Rectifier' (SCR), ce qui signifie (Redresseur commandé au silicium).



- Amorçage

L'amorçage d'un thyristor est obtenu par différents phénomènes physiques, dans tous les cas l'amorçage rend le thyristor conducteur et un courant circule de l'anode vers la cathode ($I_{AK} > 0$). La tension V_{AK} est alors faible, environ de l'ordre de quelques dixièmes de volts. Il est à noter que pour le thyristor reste conducteur, son courant d'anode I_{AK} doit rester supérieur à une certaine valeur appelé courant de maintien.

- Blocage

Sous tension inverse, la tension anode cathode notée V_{AK} est négative, la première et la dernière jonction sont polarisées en inverse et donc bloquées, le courant de fuite a une intensité très faible en raison des différences de dopage entre les couches. C'est la jonction d'anode qui supporte la plus grande partie de la tension inverse.

Pour bloquer un thyristor il suffit de lui imposer une tension V_{AK} négative, alors même une impulsion positive appliquée sur la gâchette ne pourra l'amorcer.

- Caractéristique statique

La caractéristique statique réelle d'un thyristor est représentée sur la figure 2.

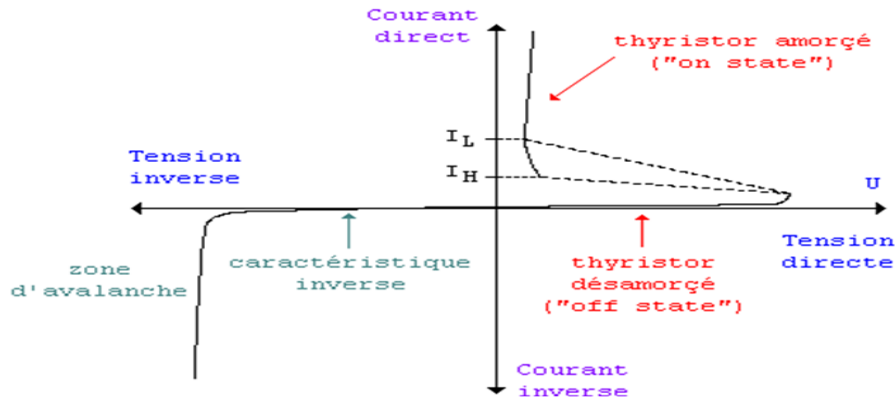


Figure 2. Caractéristique statique réelle d'un thyristor

2.3 Le thyristor GTO

Le thyristor GTO (Gate Turn 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, avec des tensions de 2500 V, 4500 V, et 6000 V et des courants de 600 A à 6000 A environ.



Figure 3. Deux symboles différents un peu au niveau de la gâchette

- Amorçage

Un GTO s'amorce par la gâchette, avec $V_{AK} > 0$ comme pour un thyristor. La commande de l'amorçage par la gâchette doit être énergique et donc le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient, et la gâchette doit être alimentée de manière permanente par un courant IG . Ce courant permet de réduire la chute de tension directe à l'état passant aux bornes du GTO.

- Blocage

Le blocage du thyristor GTO peut se faire de deux façons :

- par interruption naturelle du courant principal I_{AK} , ce qui se produit par exemple à chaque alternance s'il est utilisé sous tension alternative ;
- par extraction du courant au niveau du circuit de gâchette, obtenue par application d'une tension négative sur la gâchette, par un circuit appelé "extracteur de charges". En effet, l'application d'une tension négative V_{GK} fait apparaître un courant de gâchette négatif bloquant le GTO.

Cette phase d'extinction forcée doit impérativement être terminée avant de commander à nouveau le passage vers l'état passant, sinon il y a risque de destruction du composant.

Il y a donc un temps minimal de blocage (typiquement $100 \mu s$), ce qui est à l'origine de la limitation en fréquence de commutation du GTO.

2.4 Le transistor bipolaire

Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur. Son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN, l'une en direct et l'autre en inverse. La polarisation de la jonction PN inverse par un faible courant électrique (parfois appelé effet transistor) permet de commander un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant.

Caractéristiques du transistor NPN

Pour débloquer (rendre passant) le transistor, il faut que la jonction base-émetteur soit polarisée en direct avec une tension supérieure à la tension de seuil, V_S de cette jonction (figure 1.7.a).

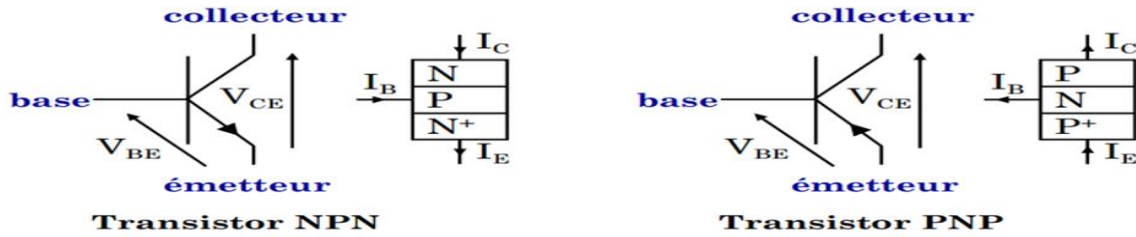


Figure 4. Représentation symbolique des transistors NPN et PNP

Si la jonction BC est polarisée en inverse, alors le courant des électrons peut traverser cette jonction, dans ce cas le courant de collecteur I_C est indépendant de la tension collecteur/émetteur V_{CE} (régime linéaire : $(I_C = \beta \cdot I_B)$).

Le basculement entre ces deux fonctionnements se produit à la tension V_{CEsat} (*sat* pour saturation), le courant I_C n'est proportionnel à I_B (Figure 3).

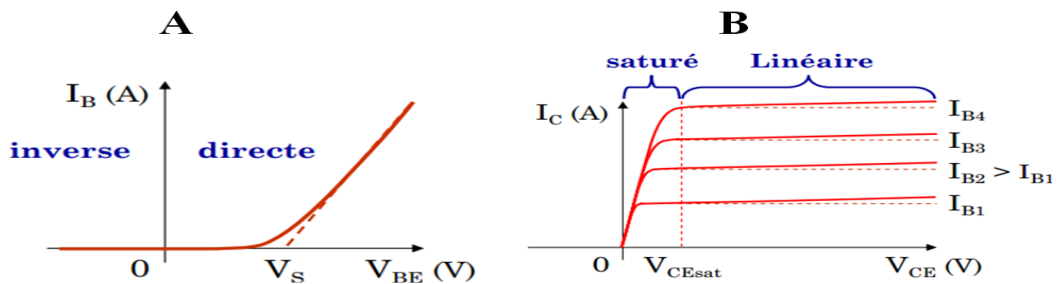


Figure 3. Caractéristiques du transistor NPN

2.5 Transistor MOSFET

Les transistors MOS (Métal Oxyde Semi-Conducteur) sont des transistors à effet de champ (Field Effect Transistor), parfois appelés MOSFET.

Ses trois bornes (figure 1.8) sont le drain D, la source S et la grille G qui constitue l'électrode de commande. Celle-ci est isolée du reste du composant par une couche d'oxyde.

Principe de fonctionnement

Le transistor MOSFET est commandé par une tension V_{GE} qui lorsqu'elle devient suffisamment grande $V_{GE} > V_{th}$ provoque l'établissement d'un courant entre le drain et la source. Le mode de fonctionnement dépend alors de la tension V_{DS} , donc de la polarisation.

Le transistor MOSFET ne consomme pas d'énergie sur son circuit de commande, le courant de gâchette étant nul $I_G = 0$.

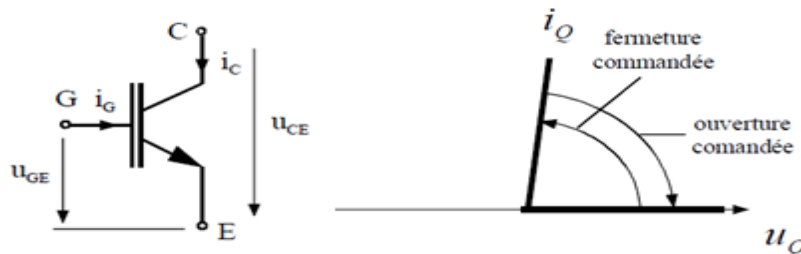


Figure 4 .Représentation symbolique et caractéristique d'un MOSFET

2.6 Transistor IGBT

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) est un transistor bipolaire à commande par effet de champ. Dans le même composant il réunit les avantages :

- du transistor bipolaire (chut de tension faible à l'état passant, tension directe blocable élevée)
- du transistor MOS (commande en tension, vitesse de commutation élevée).

En effet, coté commande, entre la grille G et l'émetteur E, il équivaut exactement à un MOS; coté commandé, entre collecteur C et émetteur E, il équivaut sensiblement à un bipolaire à jonction.

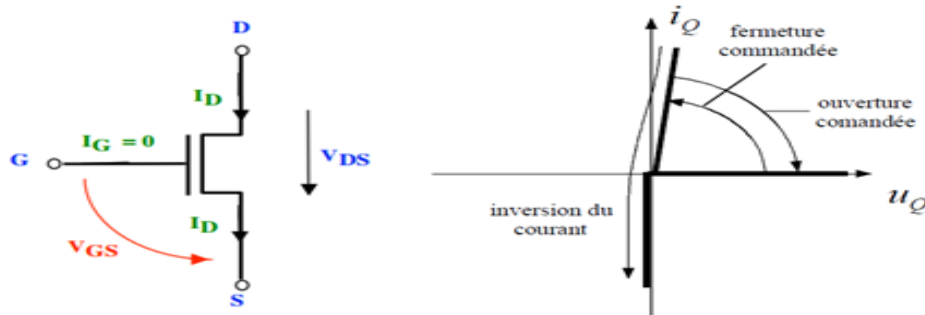


Figure 5 .Caractéristique statique et dynamique d'un IGBT

La gamme d'utilisation des IGBT va de 600V à 6500V environ, et pour des courants pouvant aller jusqu'à 2400A par modules. Il peut être utilisé notamment sur les onduleurs de 50kW alimentant les machines pour la traction électrique sur les véhicules hybrides. Il équipe également les convertisseurs de traction pour le TGV.

II.4. Classification des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques peuvent être classés de la manière suivante :

a. Les redresseurs

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, si ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.

b. Les hacheurs

Ce sont des convertisseurs continu-continu délivrant une tension continue réglable à partir d'une tension continue de valeur fixe, ils jouent ainsi le rôle de transformateur à courant continu.

c. Les onduleurs

Ce sont des convertisseurs continu-alternatif, ils permettent donc de convertir une tension continue en une tension alternative, on les désigne alors d'onduleurs de tension (ou un courant continu en un courant alternatif, on parle alors de mutateurs).

d. Les gradateurs

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif, ou variateur de courant alternatif lorsque $f_1 = f_2$. Les gradateurs produisent des tensions et des courants alternatifs à partir d'une alimentation alternative sans modifier la fréquence des tensions, ils jouent ainsi le rôle des autotransformateurs abaisseurs réglables.

Le gradateur est un convertisseur de structure extrêmement simple. Il est principalement utilisé en éclairage (lampadaire halogène, éclairage de scène, discothèque,...) et sur moteur universel (perceuse, aspirateur,...) car, pour ces applications, la fréquence des courants d'alimentation n'a que peu d'importance. Il est aussi utilisé sur des moteurs asynchrones à cage pour de la variation de vitesse industrielle et domestique économique en pompage et ventilation.

e) Les cyclo-convertisseurs

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est-à-dire qu'il permet la conversion d'une tension alternative de fréquence f_1 en tension alternative de fréquence f_2 .

III. Technologie des composants de l'électronique de puissance pour les véhicules électriques

III.1. L'électronique de puissance dans la traction électrique

Le rôle de l'électronique de puissance est de permettre la transformation de l'énergie électrique d'une forme à une autre en changeant sa forme. Il s'agit là d'un rôle essentiel dans le domaine de la traction électrique. En effet, le système de stockage généralement, fournit une tension et un courant continu, mais l'on trouve à bord des véhicules des organes générateurs ou récepteurs qui ne travaillent pas à partir des mêmes tensions.

Ainsi, on trouve dans un véhicule principalement trois types de convertisseurs.

- Les convertisseurs AC-DC : Redresseurs,
- Les convertisseurs DC-DC : Hacheurs,
- Les convertisseurs DC-AC : Onduleurs.

Dans les véhicules électriques, les redresseurs sont chargés de transformer le courant et la tension alternatifs provenant soit du réseau d'alimentation extérieur, soit de l'alternateur, en une tension et un courant continu **pour le système de stockage**. Il existe différents types de redresseurs à base de diodes, de thyristors, ou encore MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) à base d'IGBT et de diodes.

Les hacheurs servent principalement à adapter la tension de **la batterie** à celle **des auxiliaires**. C'est également le hacheur qui permettra d'adapter la tension dans le cas de l'utilisation d'un moteur à courant continu pour la traction du véhicule. Ce dernier permettra, entre autre, le **réglage du couple et de la vitesse du moteur électrique**.

L'onduleur permet d'adapter la tension continue provenant de la batterie pour l'alimentation de moteur à courant alternatif. On va également à travers ce dispositif gérer le couple et la vitesse du moteur.

III.2. Les Composants

Les convertisseurs utilisent des composants semi conducteurs pour remplir le rôle d'interrupteur commandé afin de laisser passer ou non le courant. Les plus utilisés en traction électrique sont le transistor **MOSFET** (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor), et **l'IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor) ils sont souvent accompagnés de diodes de puissance dites de roue libre. Il en existe d'autres (thyristor...) mais les caractéristiques de ces deux transistors sont particulièrement adaptées à la traction électrique et aux puissances mises en jeu dans le domaine automobile.

Ces composants sont souvent associés en parallèle afin de pouvoir commuter des courants importants, suivant la puissance de la machine.