# DISPOSITIVI A SEMICONDUTTORE

Generalità.

I convertitori statici hanno l'obiettivo di controllare i flussi di potenza tra ingresso ed uscita modificando opportunamente alcune grandezze elettriche per mezzo di dispositivi a semiconduttore. Tale funzione è sintetizzata nello schema della Fig. 1, in cui il convertitore statico appare come un "processore di potenza" capace di convertire, mediante dispositivi statici, le tensioni in ingresso di ampiezza $V_i$, frequenza $f_i$. e con un numero di fasi pari ad $m_i$ in tensioni di uscita di ampiezza variabile $V_0$, frequenza variabile $f_0$ e con un numero di fasi pari ad $m_0$; inoltre il flusso di potenza può essere reso reversibile.

Fig.1: Processore di potenza

Allo scopo di comprendere le enormi potenzialità di tali apparati è necessario premettere alcuni brevi notazioni sui dispositivi di potenza a semiconduttore che opportunamente collegati tra loro, costituiscono, poi, il convertitore statico nel suo complesso.

Le suddette notazioni non fanno alcun riferimento alla fisica dei semiconduttori, ma sono limitate ad una breve analisi qualitativa di quelle caratteristiche dei dispositivi stessi (tensioni di alimentazione, velocità di controllo, etc.) che presentano il maggiore interesse dal punto di vista del sistema elettrico in cui i convertitori statici stessi sono inseriti.

Si ricorda che i dispositivi a semiconduttore attualmente disponibili possono essere classificati in tre gruppi in base al loro grado di controllabilità, e cioè:

1) Diodi, il cui stato di conduzione (stato "on") o di interdizione (stato "off") é comandato dal circuito di potenza in cui il dispositivo é inserito.
2) Tiristori, il cui stato on è comandato con un segnale di controllo, mentre lo stato off è comandato dal circuito di potenza in cui sono inseriti.

3) Interruttori controllabili (Controllable Switches), in cui gli stati on ed off sono comandati da un segnale di controllo.

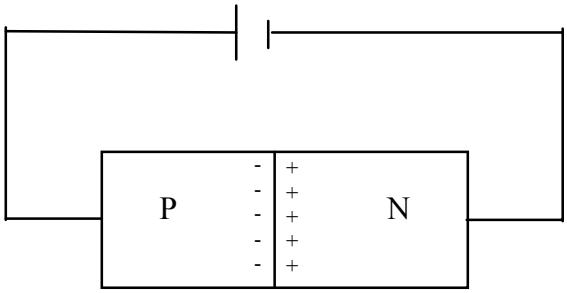
## 2. - Diodi.

Il diodo è un dispositivo a semiconduttore caratterizzato da conduzione unidirezionale.

Nei diodi a semiconduttore ciò avviene in quanto essi sono costituiti da cristalli di materiale tetravalente (germanio o silicio), i quali, come ben noto, assumono particolari proprietà quando ad essi di aggiungono quantità anche minime di sostanze pentavalenti (fosforo, arsenico, etc) o trivalenti (alluminio, boro, etc).

Gli atomi pentavalenti possono infatti inserirsi nel reticolo preesistente con quattro dei loro elettroni, lasciando, così, liberi elettroni per la conduzione (detta di tipo N); viceversa, gli atomi trivalenti danno luogo alla mancanza di corrispondenti legami di valenza, che possono essere così saturati da elettroni provenienti da legami ordinari rotti dall'agitazione termica: vi sono, quindi, dei "difetti di elettroni" o "buchi"' (equivalenti a cariche elettriche positive) in moto disordinato ed il passaggio di corrente è, anche in questo caso, facilitato (conduzione per "buchi" o di tipo P).

Si supponga, adesso, di mettere a contatto un semiconduttore di tipo P ed uno di tipo N, a costituire così un diodo: si avrà una zona ricca di elettroni (quella N) ed una sprovvista di questi ultimi (zona P). Se si collega una batteria come nella fig. 2 (polarizzazione diretta del diodo), la barriera di potenziale ai capi della giunzione si riduce; figurativamente si può pensare che il polo negativo della batteria respinga gli elettroni della zona N**,** che cosi migrano verso la zona P attraversando la zona di giunzione: il diodo pertanto conduce.



.Fig. 2 — Polarizzazione di un diodo.

Resta evidente che, qualora la batteria fosse stata collegata con la polarità invertita (polarizzazione inversa del diodo), non vi sarebbe stata conduzione: gli elettroni della zona N sarebbero, infatti, attratti dal polo positivo della stessa, mentre le cariche positive della zona P da quello negativo, formandosi cosi una zona di svuotamento attorno alla giunzione che avrebbe impedito la circolazione di corrente: in questo caso si dice che il diodo è interdetto.

Le figg. 3 a) e b) mostrano il simbolo con cui si rappresenta normalmente un diodo e la sua caratteristica corrente - tensione (i-v) in regime permanente. Quando il diodo è polarizzato direttamente, esso conduce con una caduta di tensione ai suoi capi molto bassa; quando, invece, esso è polarizzato inversamente circola solo una corrente estremamente piccola (corrente inversa di saturazione) fino a che non si raggiunge la regione di scarica distruttiva (breakdown).

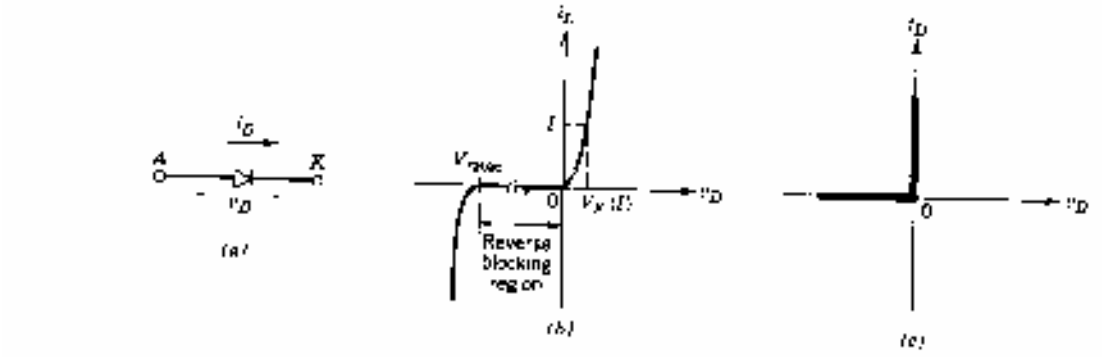



Fig. 3: Diodo : a) Simbolo grafico; b) Caratteristica i-v reale ; c) Caratteristica i-v ideale

In conseguenza della ridotta corrente in interdizione e della bassa caduta di tensione in conduzione (in confronto, evidentemente, alle tensioni e correnti del circuito di potenza in cui il diodo è inserito), la caratteristica i-v può essere rappresentata come nella fig. 3 c). L'uso di

quest'ultima è del tutto accettabile per analizzare tipologie di convertitori statici contenenti diodi, ma è inaccettabile in una qualunque fase di dimensionamento.

Vi è poi da notare che mentre un diodo passa dallo stato off a quello on in tempi estremamente rapidi (confrontati con i transitori del circuito di potenza in cui è inserito), altrettanto non è vero per il passaggio inverso: all'interdizione, come mostrato nella fig. 4, la corrente inverte il segno per un tempo $t_{rr}$ prima di annullarsi definitivamente.

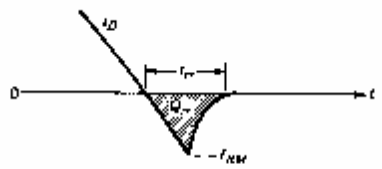


Fig. 4 Interdizione del diodo.

In base al tipo di applicazione, infine, si possono avere diversi tipi di diodo, e precisamente:

a) Diodi Schottky : sono utilizzati quando sono necessarie basse cadute di tensione nello stato on in circuiti di potenza con tensioni di uscita alquanto basse.
b) Diodi "fast-recovery": sono utilizzati in circuiti ad alta frequenza, quando sono richiesti tempi $t_{rr}$ molto piccoli (alcuni μs).

c) Diodi a frequenza industriale: sono utilizzati quando sono necessarie basse cadute di tensione nello stato on unite a tensioni di breakdown molto elevate. Sono disponibili diodi di

tal genere con correnti nominali dell'ordine dei kA e tensioni di breakdown dell'ordine delle decine di kV.

3. I tiristori.

I tiristori sono dispositivi a semiconduttore costituiti da quattro strati (nella fig. 5 ne è riportato uno del tipo P-N-P-N); essi sono caratterizzati dalla presenza di tre elettrodi**,** due di potenza ed uno di controllo detto griglia (nella letteratura inglese gate).

Come si vedrà nel seguito, essi ordinariamente non consentono il passaggio di corrente, a meno che non ricevano un impulso di corrente attraverso il terzo elettrodo di controllo. Se, infatti, si fa riferimento alla polarizzazione della fig. 5, si nota subito che mentre le giunzioni $J_1$ e $J_3$ sono correttamente polarizzate, la giunzione $J_2$ è, invece, polarizzata inversamente e, per tale motivo, la corrente che attraversa 1'intero dispositivo in tali condizioni è molto piccola, dell'ordine di una corrente inversa

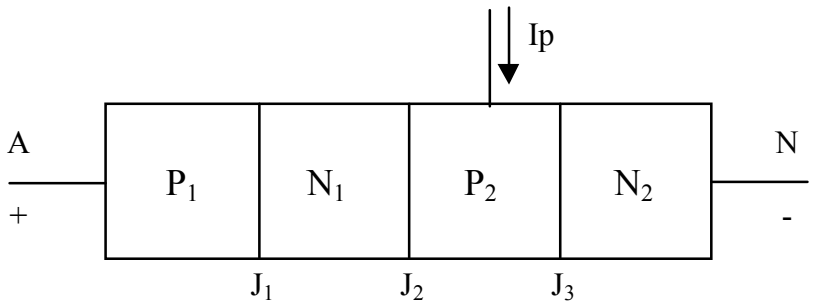



Fig. 5 - Tiristore

Nel seguito, per meglio comprendere il principio di funzionamento di un tiristore, si supporrà inizialmente assente 1'elettrodo di controllo.

Come noto, è possibile rappresentare il dispositivo della fig. 5 come somma di due transistori , uno P-N-P e 1' altro N-P-N (fig. 6)[1].

Sia $I_{E1}$ la corrente immessa nell'emettitore $E_1$; se si indica con $\alpha_1$ la frazione di cariche positive che, attraverso $J_2$, raggiunge il col1ettore $C_1$ e con $I_{c01}$ 1a corrente inversa della giunzione polarizzata inversamente, si ha che:

$$I_{c1} = \alpha_1 I_{E1} + Ic01 \qquad (1)$$

Analogamente, se si indica con $I_{E2}$ la corrente nell'emettitore $E_2$, con $\alpha_2$ la frazione di cariche, questa volta negative che, attraverso $J_2$, raggiunge il collettore $C_2$ e con $I_{c02}$ la corrente inversa della giunzione polarizzata inversamente, si ha che:

$$I_{c2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{c02} \qquad (2)$$

La corrente totale che attraversa $J_2$, comune ad entrambi i transistori sarà, ovviamente, la somma delle correnti in (1 ) ed in (2), e cioè:

$$I_{J2} = \alpha_1 I_{E1} + I_{c01} + \alpha_2 I_{E2} + I_{c02} = \alpha_1 I_{E1} + \alpha_2 I_{E2} + I_{c0t} \qquad (3)$$

[1] Un transistore é un dispositivo a 3 strati in cui una giunzione è polarizzata direttamente ed una inversamente Se la zona centra1e è molto stretta, la maggior parte delle cariche giunte in essa per opera della giunzione direttamente polarizzata riescono ugualmente ad attraversare la giunzione polarizzata negativamente raggiungendo il terminale di uscita del transistore.

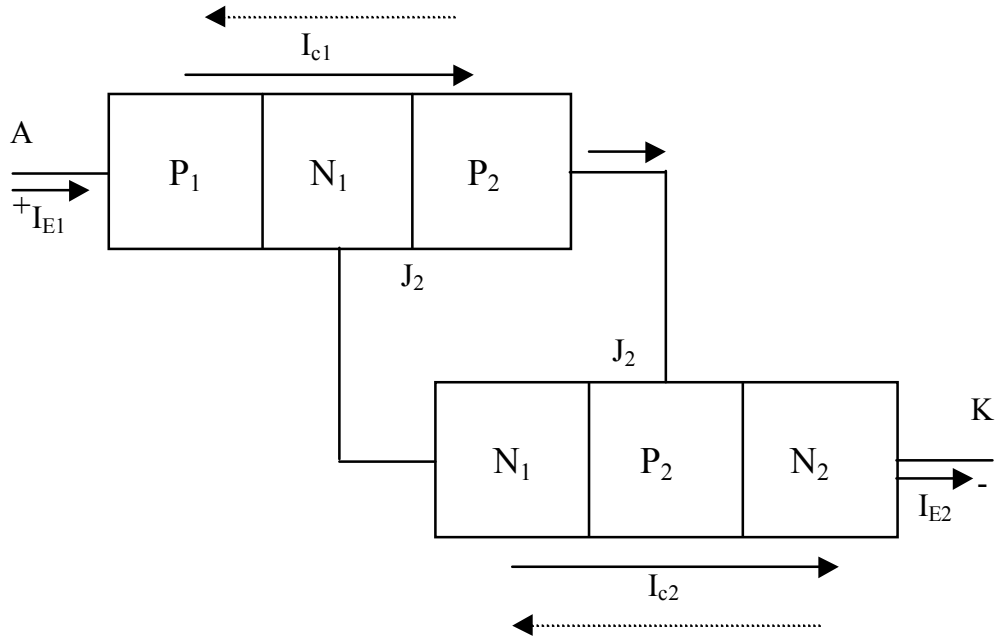



Fig.6- Schematizzazione di un tiristore

Essendo assente l'elettrodo di griglia, la corrente in ogni sezione del dispositivo deve essere uguale, e cioè $I_{E1} = I_{J2} = i_A$, per cui:

$$i_A = \alpha_1 i_A + \alpha_2 i_A + I_{c0t}$$

e quindi:

$$i_A = \frac{I_{c0t}}{1-(\alpha_1+\alpha_2)} \qquad (4)$$

Dall'analisi della (4) appare evidente che se $(\alpha_1+\alpha_2)$ risulta << 1, la corrente $i_A$ sarà circa uguale a $I_{cOt}$ ed è, quindi, molto piccola: questa è la condizione di interdizione del dispositivo . Se, invece, $(\alpha_1+\alpha_2)$ =1 la corrente $i_A$ diventa molto elevata ed è limitata solo dalla resistenza del circuito esterno: in questa condizione il dispositivo è nello stato on (o, come suole dirsi, è innescato).

Si comprende, quindi, che per realizzare la condizione di innesco si deve operare su $\alpha_1$ e $\alpha_2$); tali parametri dipendono dalla tensione e dalla corrente. Infatti, se la tensione aumenta,

alcuni portatori acquistano energia tale da liberarsi dal legame di valenza e formare cosi coppie elettrone-lacuna; tale fenomeno comporta un aumento degli $\alpha_i$ che risulta, però, molto contenuto sino a quando non comincia ad avere luogo il fenomeno valanga (fig. 7 a). Per quanto riguarda l'influenza della corrente di emettitore, è evidente che, per bassi valori di tale grandezza elettrica, il fenomeno della ricombinazione nella base sottrae ad essa molti portatori di cariche, il che comporta bassi valori degli $\alpha_i$; all'aumentare della corrente $I_E$ (fig. 7 b), invece, tale fenomeno di ricombinazione tende sempre più ad essere trascurabile, con conseguente aumento significativo degli $\alpha_i$

In conclusione, appare evidente che sia per effetto della tensione che per effetto della corrente possono verificarsi condizioni in cui $(\alpha_1+\alpha_2) = 1$, con la conseguenza che il dispositivo si innesca.

Dalle considerazioni "qualitative" fatte in precedenza discende, immediatamente, che la caratteristica i-v del dispositivo in esame, in assenza di controllo attraverso la griglia è quella riportata nella fig. 8.

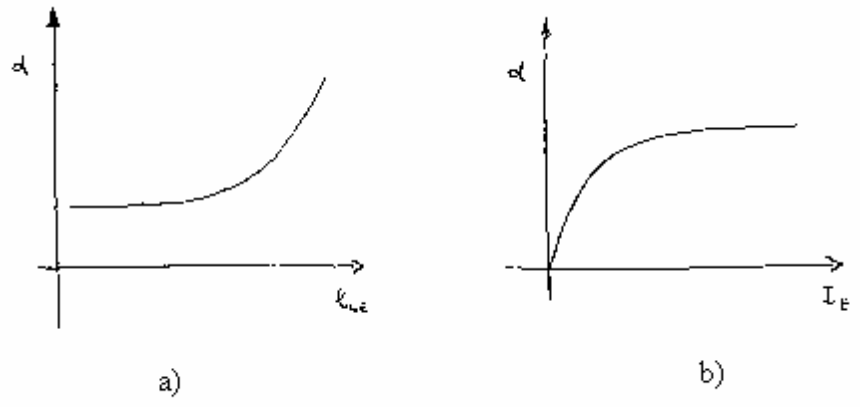



Fig. 7: Andamento degli $\alpha_1$ :a)in funzione della collettore - emettitore;
b) in funzione della corrente di emettitore.

A mano a mano che la tensione aumenta (però mantenendosi sempre a valori bassi rispetto alla tensione di moltiplicazione) i valori degli $\alpha_i$ si mantengono praticamente costanti. Il

valore di corrente che circolerà sarà, allora, molto piccolo, in particolare pari alla somma delle due correnti inverse $I_{c01}$ ed $I_{c02}$ viste prima; ne consegue, pertanto, che anche l'influenza della corrente sugli stessi $\alpha_i$ è, per ora, trascurabile.

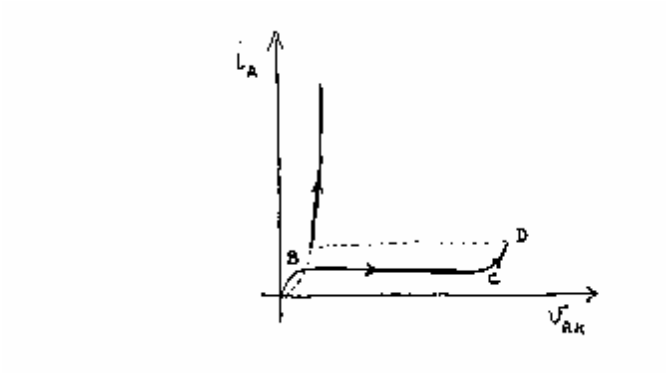



Fig. 8 - Caratteristica i-v di un tiristore in assenza di controllo di griglia.

In questa condizione il dispositivo è chiaramente, interdetto.

Nel momento in cui sì aumenta significativamente la tensione, gli $\alpha_i$ cominciano a crescere e la loro somma si approssima all'unità: la $i_A$ tende ad aumentare, contribuendo ad un ulteriore tendenza all'aumento degli. $\alpha_i$. Questo meccanismo fa si che ad un certo punto (D nella fig. 8) ambedue i transistori complementari vanno in saturazione, ed il dispositivo si innesca. La caratteristica i-v del dispositivo diventa, allora, quella di un diodo direttamente polarizzato. Infatti, essendo in saturazione, anche la seconda giunzione si polarizza direttamente: la tensione ai capi del dispositivo, somma delle cadute di tensione ai capi delle tre giunzioni presenti, sarà, allora, pari a quella di una singola giunzione polarizzata direttamente, in quanto la caduta di tensione ai capi della seconda giunzione è di segno opposta a quelle delle altre due.

Allorquando la corrente scende a valori molto bassi, per ovvi motivi, il dispositivo si interdice e. passa, di nuovo, sulla zona B-C della caratteristica riportata nella fig. 8.

Si voglia, adesso, considerare l'azione svolta dal terminale di controllo posto nella zona $P_2$. Se si inietta corrente attraverso questo terminale essa, unendosi alla corrente che attraversa $J_2$, contribuirà all 'aumento degli $\alpha_i$; in tal modo, sfruttando la rapida variabilità di questi ultimi con la corrente, si può far innescare il dispositivo per valori di tensione tanto più bassi quanto più elevato è il valore della corrente iniettata (fig. 9).

E' importante osservare che una volta innescato anche se la corrente di griglia $I_p = 0$, il dispositivo continua ugualmente a condurre, poiché si sono raggiunti in precedenza valori degli $\alpha_i$ tali da far circolare un valore di corrente che di per se è in grado di garantire i valori degli $\alpha_i$ necessari ad evitare 1'interdizione. Quest'ultima si potrà verificare solo se, per cause dovute al circuito di potenza in cui è inserito il dispositivo, la corrente $i_A$ scende a valori sufficientemente bassi o, ancora, se non sì verificano più le condizioni di corretta polarizzazione delle giunzioni da parte della tensione $v_{AK}$

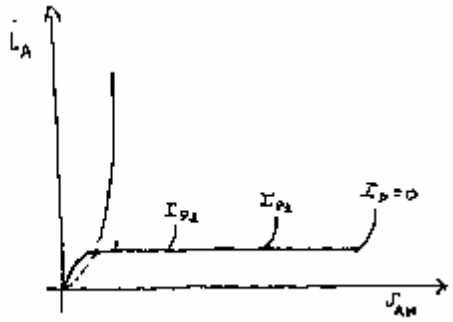


Fig 9 - Caratteristica i-v di un tiristore in presenza del controllo di griglia.

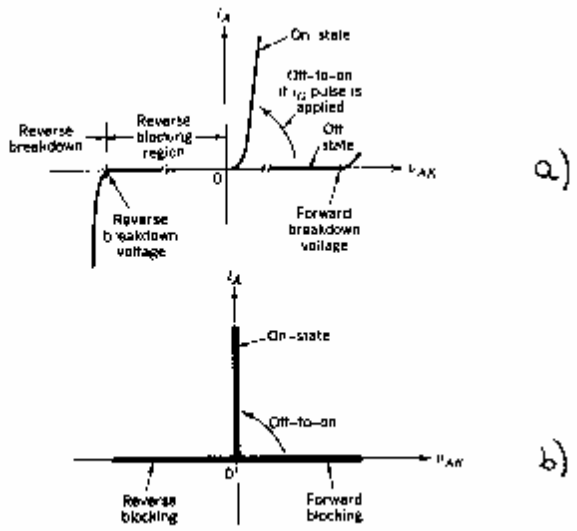
Procedendo analogamente ai diodo, si hanno, poi , le caratteristiche i-v reale e ideale riportate nelle figg. 10 a) e b) rispettivamente.

Inoltre anche nel caso dei tiristori, si può definire un intervallo $t_q$ (detto di turn off ) durante il quale va mantenuta, costantemente, una tensione di contropolarizzazione anodo-catodo se si vuole evitare che il dispositivo, sottoposto, poi a tensioni anodo-catodo di polarizzazione possa innescarsi anche in assenza di controllo di griglia.

Fig. 10 - Tiristore: a) Caratteristica i-v reale; b) caratteristica i -v ideale

In conclusione in base al tipo di applicazione, si possono avere diversi tipi dì tiristori, e precisamente:

1) i tiristori per convertitori: sono utilizzati nel campo della frequenza industriale in applicazioni per elevate potenze (HVDC, azionamenti elettrici, etc ); hanno basse cadute di tensione nello stato di accensione e correnti (fino a 4 kA) e tensioni di blocco (fino a 5-7 kV) molto elevate.
2) tiristori per inverters: hanno basse cadute di tensione nello stato di accensione e bassi valori dì $t_q$ (da 5 a 100 μs) con correnti e tensioni fino a 15 kA e 2.5 kV, rispettivamente.
3) Tiristori ad impulso luminoso: sono innescati da un impulso di luce canalizzato da. una fibra. ottica. Trovano applicazione nel campo delle alte tensioni, quando ci sono difficoltà per gli elevati potenziali rispetto a terra che debbono sopportare i dispositivi elettronici classici di accensione. Sono note applicazioni con tensioni fino a 4 kV e correnti fino a 3 kA.



## 4.- Interruttori controllabili.

### 4.1- Generalità.

Gli "interrutori controllabili" (nella letteratura inglese "controllable switches") sono dispositivi nei quali è possibile comandare, mediante un opportuno circuito di controllo, sia il passaggio dallo stato di interdizione a quello di conduzione (chiusura o accensione del dispositivo), sia il passaggio dallo stato di conduzione a quello di interdizione (apertura o spegnimento del dispositivo).

Questi dispositivi vengono indicati con il simbolo grafico riportato nella fig. 11: quando il dispositivo è aperto la corrente $i_T$ è nulla ; a dispositivo chiuso la corrente $i_T$ invece, fluisce nel senso indicato dalla freccia.

Fig.11 - Rappresentazione grafica degli interruttori controllabili.

Alla famiglia degli interruttori controllabili appartengono i seguenti dispositivi:

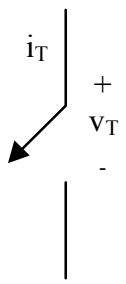
a) BJT ( Bipolar Junction Transistor - Transistor a giunzione bipolare);

b) MOSFET ( Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor - Transistor ad effetto di campo metallo - ossido - semiconduttore);

c) GTO (Gate-Turn-Ott Thyristors - Tiristore a spegnimento comandato )

d) IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors - Transistor bipolare a gate isolata).

Nel seguito prima di effettuare una breve descrizione delle principali caratteristiche di ciascuno dei suddetti dispositivi, si analizza il problema delle perdite connesso all'intera famiglia di tali dispositivi.



## 4.2 - Le perdite nei dispositivi totalmente controllati

Un dispositivo totalmente controllato ideale ha le seguenti caratteristiche:

- è in grado di sostenere tensioni dirette e inverse di qualsiasi ampiezza con correnti nulle nello stato di interdizione;
- conduce correnti di qualsiasi ampiezza con cadute di tensioni trascurabili;
- è capace di commutare dallo stato di conduzione a quello di interdizione e viceversa istantaneamente dopo l'innesco;
- assorbe potenze trascurabili per l'innesco.

I dispositivi reali non hanno le caratteristiche sopra menzionate e, quindi, durante il funzionamento sono sede di perdite che possono distruggere irreversibilmente il dispositivo stesso.

Per calcolare le perdite in un generico dispositivo totalmente controllato, si consideri il circuito in Fig.12. Tale circuito semplificato rappresenta una molteplicità di cavi applicativi nei quali il dispositivo è impiegato con carichi a caratteristica induttiva, ossia tali da poter essere rappresentati attraverso un generatore di corrente.

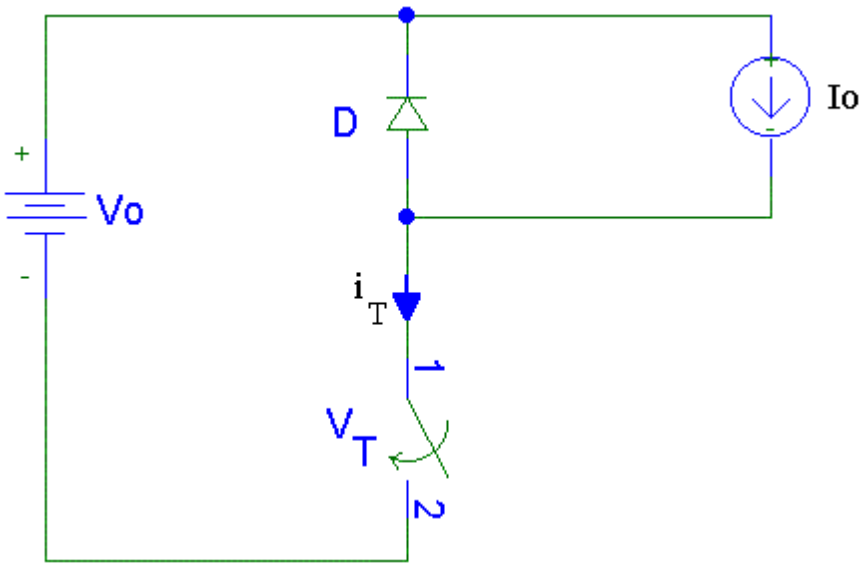



Fig.12: Circuito di riferimento per il calcolo delle perdite

Siano:

S = segnale di accensione

$\tau_{ON} + \tau_{OFF} = \tau_S$ = periodo di switching

$1/\tau_S = f_S$ = frequenza di switching.

Si trascurino la caduta di tensione diretta sul diodo e il tempo di ritardo nell'invio del segnale di accensione.

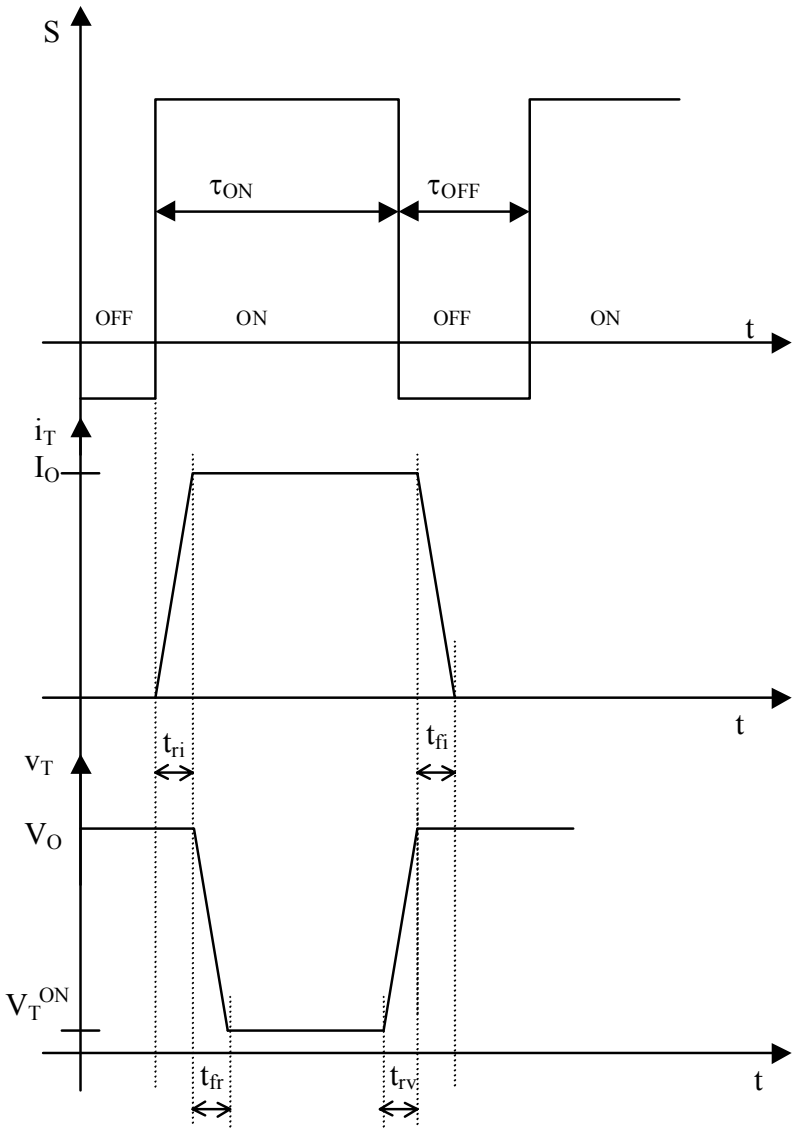



Fig.13: Andamento temporale delle grandezze di comando, di corrente di tensione dello switch.

Quando lo switch è in stato di conduzione, S=ON , la corrente $I_0$ passa interamente attraverso lo switch ed il diodo è interdetto. Quando lo switch è in stato di interdizione la corrente $I_0$ passa interamente attraverso il diodo e la tensione $V_0$ insiste ai capi dello switch. La figura 13 mostra l'andamento delle grandezze elettriche in corrispondenza dei due valori del segnale di comando S. Nel seguito si analizzano in particolare i quattro stati: interdizione;

commutazione dell'interdizione alla conduzione, conduzione, commutazione dalla conduzione all'interdizione.

- Interdizione

  Nello stato di interdizione la corrente inversa nello switch è trascurabile e praticamente nulla. La tensione $v_T$ è pari a $V_0$.

- Commutazione dell'interdizione alla conduzione

  Lo switch commuta dallo stato di interdizione allo stato di conduzione attraverso l'applicazione del segnale S positivo. Durante tale commutazione la corrente nello switch, $i_T$ , cresce con legge assunta lineare in un tempo $t_{ri}$. Solo dopo che la corrente $I_0$ passa interamente lo switch, il diodo inizia ad essere inversamente polarizzato e, corrispondentemente, la tensione ai capi dello switch, $v_T$, raggiunge il ridotto valore $V_T^{ON}$ in un tempo pari a $t_{fv}$.

  Durante tale commutazione, di durata $\tau^c_{ON} = t_{ri} + t_{fv}$, si hanno contemporaneamente valori di corrente $i_T$ e di tensione $v_T$.

- Conduzione

  Quando lo switch è in conduzione la tensione ai suoi capi, $V_T^{ON}$ , è dell'ordine dei Volt con un valore che dipende dal tipo di switch. Durante tale periodo, di durata $\tau_{ON}$ , lo switch conduce la corrente $I_0$.

- Commutazione dalla conduzione all'interdizione

  Lo switch commuta dallo stato di conduzione a quello di interdizione attraverso l'applicazione del segnale S negativo. Durante tale commutazione, la tensione ai capi dello switch, $v_T$ , a partire dal valore $V_T^{ON}$ raggiunge la piena tensione $V_o$ in un tempo non nullo e pari a $t_{rv}$. Solo dopo l'istante $t_{rv}$, il diodo inizia ad essere polarizzato direttamente e la corrente passa dal diodo allo switch in un tempo non nullo e pari a $t_{fi}$. Durante tale commutazione, di durata $\tau^c_{OFF} = t_{rv} + t_{fi}$ si hanno contemporaneamente valori elevati di corrente $i_T$ e di tensione $v_T$.

La Fig.14 mostra l'andamento istantaneo della potenza dissipata nei diversi intervalli di tempo sopra descritti.

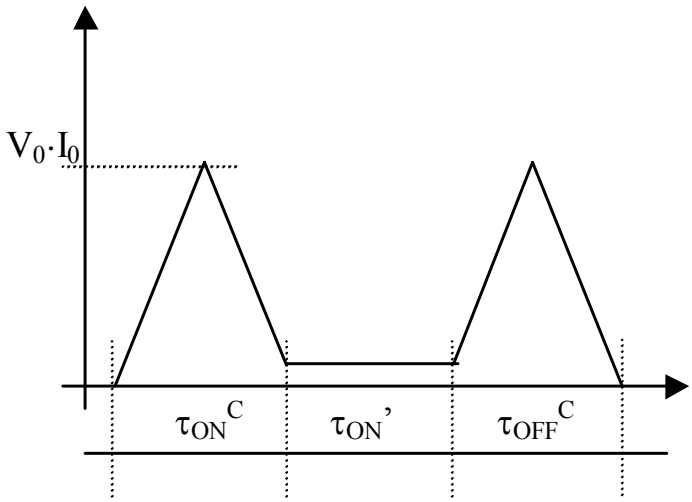



Fig.14: Andamento della potenza dissipata nello switch.

Le energie dissipate nei diversi intervalli di tempo sono pari a:

- $W_{ON}^{c} \cong \frac{1}{2} V_o I_o \tau_{ON}^{c}$
- $W_{OFF}^{c} \cong \frac{1}{2} V_o I_o \tau_{OFF}^{c}$
- $W_{ON} = V_T^{ON} I_o \tau_{ON}$

Dove $W^c_{ON}$ e $W^c_{OFF}$ rappresentano l'energia dissipata nella commutazione e $W^c_{ON}$ rappresenta l'energia dissipata in conduzione.

Il valore medio delle perdite di potenza nelle commutazioni, $P^c$, e nella fase di conduzione, $P_{ON}$, sono pari a:

$$P^c = \frac{1}{2} V_o I_o \left(\tau_{ON}^{c} + \tau_{OFF}^{c}\right) \frac{1}{\tau_s} = W_{tot}^{c} \cdot f_s$$

$$P_{ON} = I_o V_T^{ON} \tau_{ON} f_s$$

Dalle espressioni ricavate per le perdite in commutazione ed in conduzione, si possono facilmente dedurre le caratteristiche desiderabili per uno switch:

- bassi valori della corrente inversa;
- bassi valori della caduta di tensione diretta $V_T^{ON}$ per ridurre le perdite in conduzione;

- tempi di commutazione $\tau^c_{ON}$ e $\tau^c_{OFF}$ molto ridotti al fine di impiegare il dispositivo a elevati valori di $f_s$;
- capacità di condurre alti valori di corrente e di sostenere alti valori di tensione inversa;
- bassi valori di potenza per commutare lo switch;
- capacità di sopportare la tensione nominale e la corrente nominale contemporaneamente per evitare l'impiego di circuiti esterni di protezione (circuiti di "snubber")
- capacità di sostenere elevati valori di $\frac{di}{dt}$ e di $\frac{dv}{dt}$ per evitare l'impiego di circuiti esterni per la loro limitazione.

Nel seguito si eviterà di addentrarsi nell'esame della fisica del semiconduttore, limitandosi a prendere in considerazione le sole "caratteristiche esterne; in particolare verranno analizzati i tempi di commutazione e i valori massimi di tensione e di corrente sopportabili da ciascuno di essi.

4.3 - Transistori a giunzione bipolare (B JT )

Il simbolo grafico di un transistor a giunzione bipolare NPN è riportato nella fig. 15:

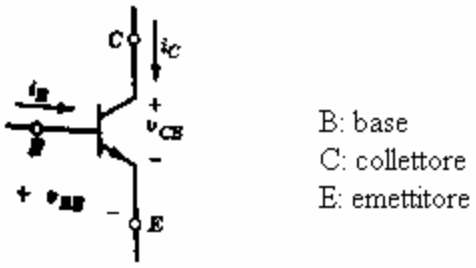



Fig. 15: Transistore a giunzione bipolare (BJT)

Il suddetto dispositivo presenta tre morsetti: uno di segnale (base) e due di potenza (collettore ed emettitore).

La sua caratteristica statica, normalmente chiamata caratteristica di collettore, è riportata nella fig. 16 a.

Il BJT, utilizzato come interruttore controllabile, viene comandato in corrente e fatto funzionare alternativamente nella zona di interdizione (transistor aperto) o in quella di saturazione (transistor chiuso): come mostra la caratteristica i-v della fig. 16 a, una corrente di base $I_B$ di valore opportuno, determina il passaggio dalla zona di interdizione a quella di conduzione: una volta attivato, il dispositivo permane nello stato di conduzione se la $I_B$ è fornita con continuità. Si fa, inoltre, notare che la tensione $v_{CE(sat)}$., che si presenta tra i morsetti di potenza, assume valori dell'ordine di 1-2 Volt, per cui le perdite di potenza in conduzione sono di piccolo valore.

Nella fig.16 b è riportata la caratteristica i-v ideale del BJT.

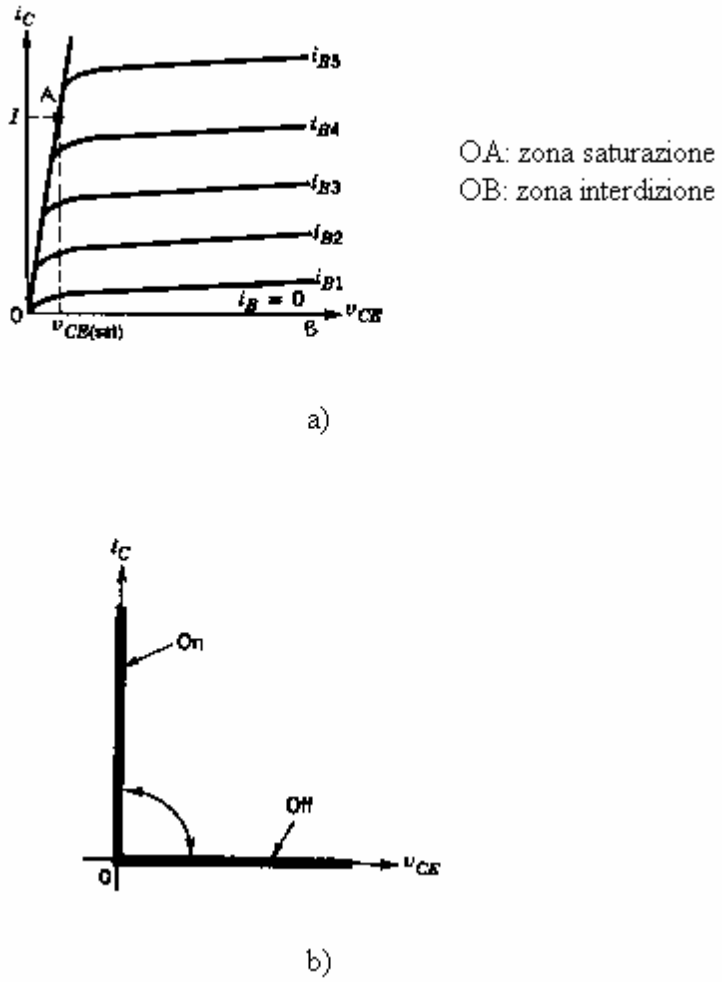



Fig. 16 - Transistore a giunzione bipolare: a) caratteristica statica reale;
b) caratteristica statica ideale

E' utile definire, per questi dispositivi, il guadagno statico dì corrente:

$h_{FE} = I_C / I_B$,

essendo $I_C$ la corrente di collettore ed $I_B$ la corrente di base; i valori assunti da tale parametro, il cui significato è ovvio sono dell'ordine di 5-10. Per ottenere guadagni di corrente di valore più elevato vengono utilizzate particolari configurazioni, ad esempio quelle illustrate nella fig.17.

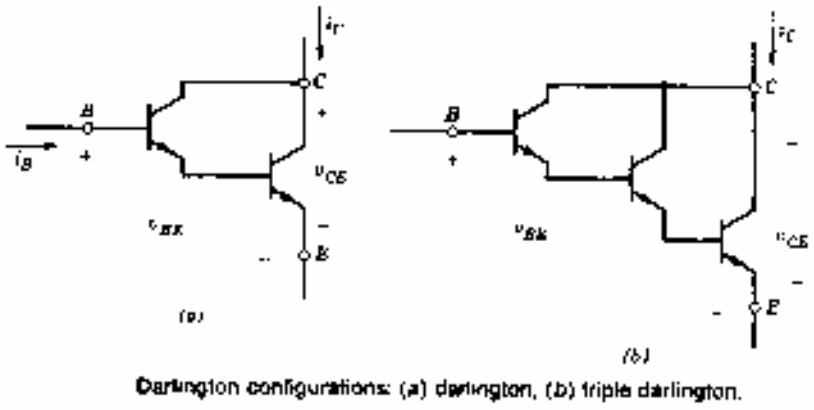



Fig. 17 - Configurazioni di BJT caratterizzate da elevati valori del guadagno statico di corrente.

Le configurazioni riportate nella fig. 17 presentano tuttavia, alcuni svantaggi:

i) la tensione $v_{CE(sat)}$ assume valori superiori a 2 Volt, per cui si hanno maggiori perdite in fase di conduzione;

ìi) i tempi di commutazione sono elevati.

Per quanto riguarda infine, i tempi di commutazione caratteristici dì questi dispositivi, essi possono variare da poche centinaia di nanosecondi a qualche microsecondo. La massima tensione sopportabile, poi, dai BJT attualmente disponibili sul mercato è di circa 1400 Volt, le portate in corrente sono, invece dell'ordine delle centinaia di Ampere..

## 4. 4 - Transistor ad effetto di campo metallo-ossido-semiconduttore (MOSFET)

Il simbolo grafico di un MOSFET è riportato nella fig. 18.

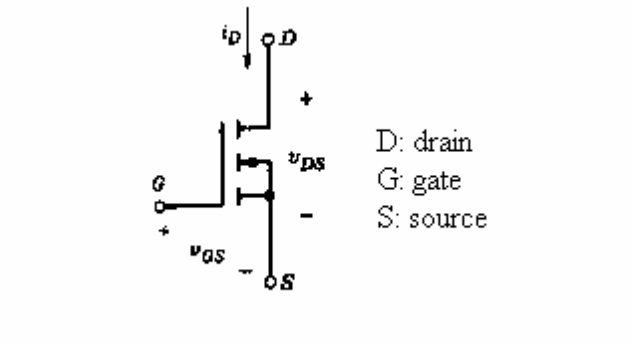



Fig. 18: Transistor ad effetto di campo metallo-ossido-semiconduttore (MOSFET).

Questi dispositivi sono a quattro morsetti: uno di segnale (gate.) e tre di potenza. Dei morsetti di potenza, due sono sempre collegati tra loro, pertanto i terminali accessibili sono soltanto due (drain e source).

La caratteristica statica di un MOSFET è riportata nella fig 19 a.

I MOSFET sono dispositivi comandati in tensione: il passaggio dallo stato di interdizione a quello di conduzione sì ha quando la tensione tra gate e source **(**$v_{GS}$**)** assume un valore superiore ad un valore *,* tipico del dispositivo, detto valore di "soglia". Una volta attivato, il dispositivo permane nello stato di conduzione solo se la tensione $v_{GS}$ va applicata con continuità. Bisogna, però, tenere presente che ogni MOSFET presenta un limite ben preciso alla massima tensione sopportabile tra gate e source (attualmente tale limite è di 20 Volt) e non sopporta sovratensioni, anche se di breve durata.

In fig. 19 b è riportata la caratteristica ideale di un MOSFET.

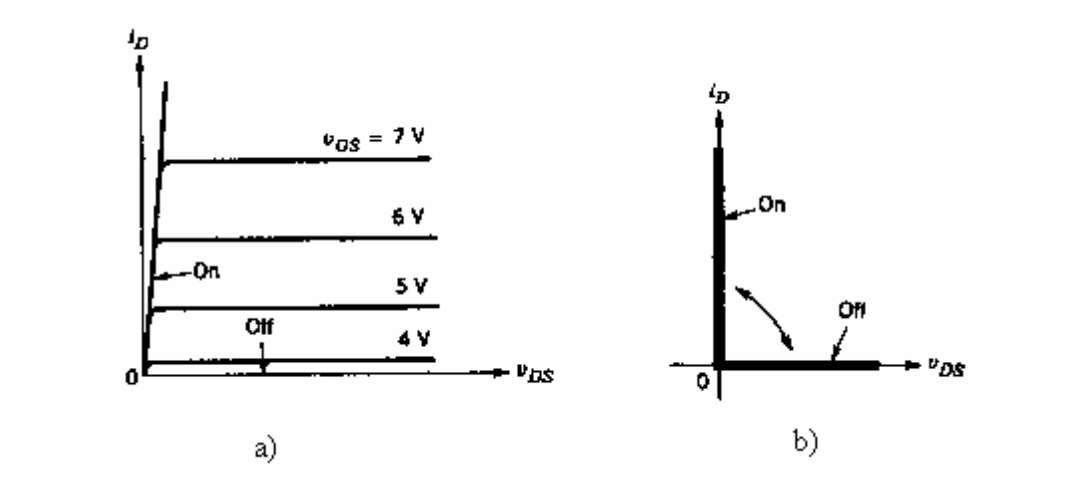



Fig 19: Transistor ad effetto campo meta1lo-ossido-semicoduttore:
a) caratteristica statica reale ; b) caratteristica statica ideale.

Per quanto riguarda il comportamento statico, sono di grosso interesse i valori massimi di tensione e di corrente che tali dispositivi sono in grado di sopportare. Attualmente sono disponibili MOSFET capaci di sopportare tensioni fino a 1000 Volt in corrispondenza di valori di corrente molto piccoli (qualche Ampere), e M0SFET capaci di sopportare e1evati valori di corrente (centinaia di Ampere) in corrispondenza di picco1i valori di tensione (centinaia di Volt).

Per quanto riguarda i tempi di commutazione, essi sono molto piccoli: possono variare da poche decine a poche centinaia di nanosecondi

4.5 - Tiristori a spegnimento comandato (GTO)

Il simbolo grafico di un GTO è riportato nella fig. 20.

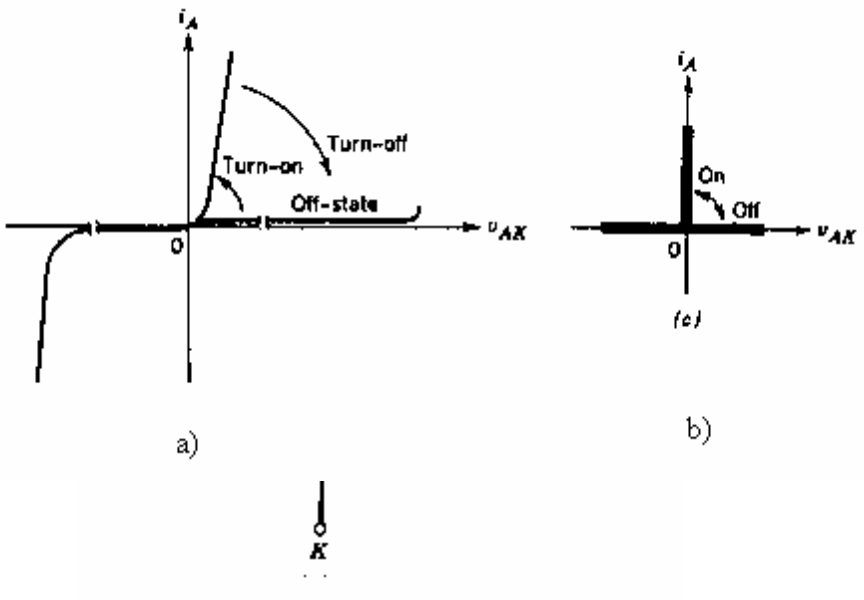



Fig. 20: Tiristore a spegnimento comandato (GTO).

I GTO hanno tre terminali: uno di segnale e due di potenza (anodo e catodo)

La caratteristica statica reale di un GTO è riportata nella fig. 21 a; quella idea1e nella fig. 21 b.

Il GTO è un dispositivo comandato in corrente: la sua accensione richiede, infatti, un impulso di corrente di gate di ampiezza opportuna. Una volta acceso, il GTO permane nello stato di conduzione senza bisogno che la gate sia interessata da una corrente continuativa. Lo spegnimento del dispositivo si ottiene facendo fluire nell'elettrodo di controllo una corrente inversa dì ampiezza sufficientemente elevata (1/4 - 1/3 della corrente anodica), oppure applicando all'elettrodo di control1o stesso una controtensione compresa tra 5 e 10 Volt

Fig. 21:Tiristori a spegnimento comandato: a) caratteristica rea1e; b ) caratteristica ideale

Altra importante caratteristica del GTO e che tale dispositivo è in grado di bloccare tensioni negative il cui valore massimo dipende dal tipo di GTO utilizzato (tensione di breakdown).

La tensione anodo - catodo in conduzione assume valori dell'ordine di 2 - 3 Volt, pertanto le perdite in conduzione di questo dispositivi risultano maggiori di quelle tipiche dei BJT e dei MOSFET.

La. massima pendenza con la quale può essere applicata al GTO una tensione diretta (massimo dv/dt) durante la fase di spegnimento, inoltre, risulta notevolmente dipendente dal valore della corrente da spegnere. Per proteggere, allora, questi dispositivi da eccessivi valori della dv/dt che potrebbero determinare la rottura del dispositivo, vengono utilizzati opportuni circuiti di smorzamento collegati in parallelo al dispositivo stesso (fig. 22).

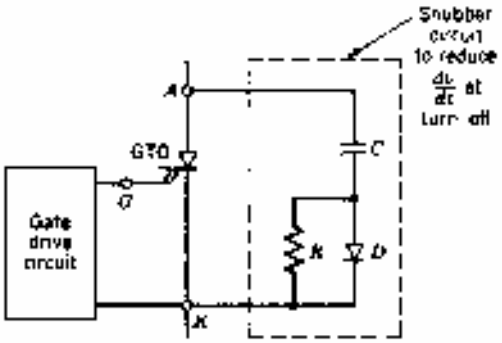



Fig. 22: Circuiti di smorzamento.

I tempi di commutazione tipici di questi dispositivi sono molto elevati e variano da 1 a 25 microsecondi.

Infine, attualmente sono disponibili GTO in grado di sopportare valori di tensione dell'ordine di 6000 Volt e valori di corrente dell'ordine di varie centinaia di Ampere (1.2 kA al massimo).

4. 6 - Transistor bipolare a gate isolata (IGBT).

Il simbolo grafico di un IGBT è riportato nella fig.23.

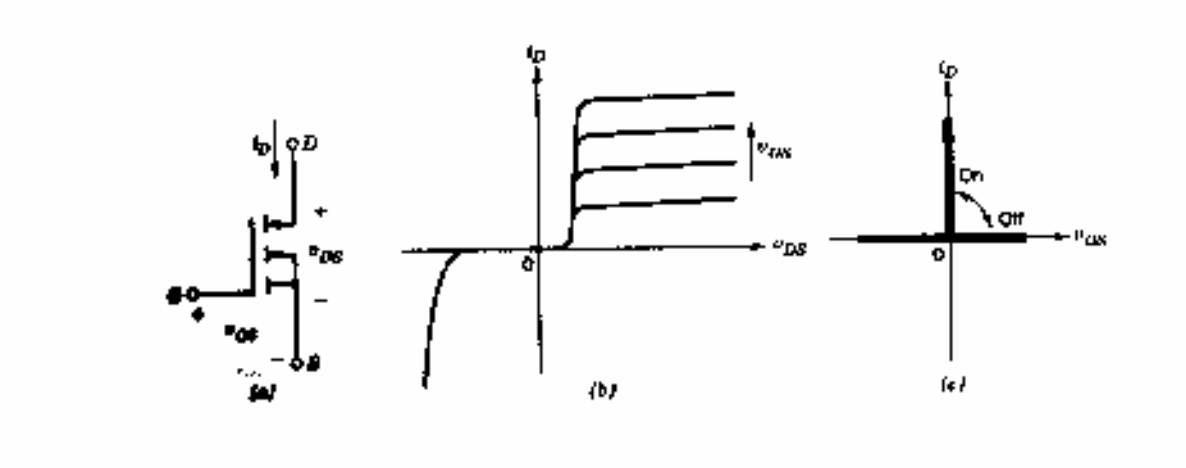


Fig. 23: Transistor bipolare a gate isolata (IGBT): a) simbolo grafico;
b) caratteristica i-v; c) caratteristica ideale.

Anche 1'IGBT è comandato in tensione e necessita di piccoli va1ori della $v_{GS}$ (fig. 23) per 1 'accensione. Come i BJT, inoltre, anche questi dispositivi presentano bassi valori di tensione in fase dì conduzione e quindi basse perdite; come i GTO invece sono in grado di bloccare le controtensioni.

I tempi di commutazione tipici di questi dispositivi sono dell'ordine di qualche microsecondo La massima tensione sopportabile di circa 3000 Volt; le portate di corrente sono dell'ordine delle centinaia di Ampere.

Al termine della breve descrizione delle caratteristiche dei BJT, dei MOSFET, dei GTO, e, infine, degli IGBT è utile far riferimento alla tabella I, in cui sono poste a confronto le potenze conseguibili e le velocità di commutazione dei singoli dispositivi.

Tab. I

| Dispositivo | Potenze Conseguibili | Velocita' Commutazione |
|---|---|---|
| BJT | MEDIE | MEDIA |
| MOSFET | PICCOLE | ELEVATA |
| GTO | ELEVATE | PICCOLE |
| IGBT | MEDIE | MEDIA |