

ELETTRONICA DI POTENZA

In elettronica vengono usati materiali particolari: i semiconduttori. Questi hanno caratteristiche elettriche intermedie tra i conduttori e gli isolanti da cui il nome; precisamente essi presentano una conducibilità intermedia tra isolanti (bassa conducibilità) e i conduttori (alta conducibilità). I semiconduttori più usati sono il silicio e il germanio.

Per quanto riguarda le principali elettriche dei semiconduttori si può dire che:

- la corrente è dovuta oltre agli elettroni anche a cariche positive dette lacune;
- la loro conducibilità, a differenza dei metalli, aumenta con la temperatura.

Per aumentare la conducibilità dei semiconduttori si fa ricorso ad un processo tecnologico detto "drogaggio". Questo consiste nell'inserire in un blocchetto di semiconduttore puro atomi di elementi particolari quali alluminio, indio, fosforo, arsenico.

Esistono due tipi di semiconduttore drogato:

- **tipo P**: ottenuto inserendo atomi di alluminio di indio in cui le lacune sono in numero maggiore rispetto agli elettroni;
- **tipo N**: ottenuto inserendo atomi di fosforo di arsenico in cui gli elettroni sono in numero maggiore rispetto alle lacune.

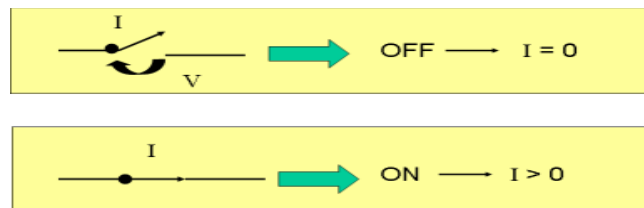
I principali dispositivi usati nell'elettronica di potenza sono

- Diodi
- SCR
- SCR - GTO
- Transistor BJT
- MOS-FET
- IGBT (Insulated Insulated Gate Gate Bipolar Bipolar Transistor)

I diodi in genere sono usati come elementi raddrizzatori e sono dispositivi a due terminali, gli altri sono usati come elementi di controllo e sono dispositivi a tre terminali (il transistor BJT ed il MOS_FET possono essere usati anche come elementi negli amplificatori di segnale).

I moderni sistemi di controllo e comando delle macchine elettriche impiegano diffusamente dispositivi elettronici di potenza, grazie ai quali è possibile, ad esempio automatizzare e ottimizzare la regolazione della velocità.

I dispositivi a semiconduttore sono utilizzati come interruttori controllati



Nelle applicazioni di potenza dell'elettronica si hanno correnti che vanno da qualche ampere fino al migliaio di ampere; le tensioni sono dell'ordine delle centinaia o delle migliaia di volt così come le potenze in gioco.

I requisiti principali degli interruttori controllati sono:

- Basse perdite in stato di conduzione;
- Alta tensione di blocco (cioè capacità di mantenere in stato di OFF la corrente a valori molto bassi anche con alte tensioni applicate al componente).
- Rapidità di commutazione;
- Bassa potenza di controllo;
- Capacità di sopportare rapide variazioni di "V" e "I"

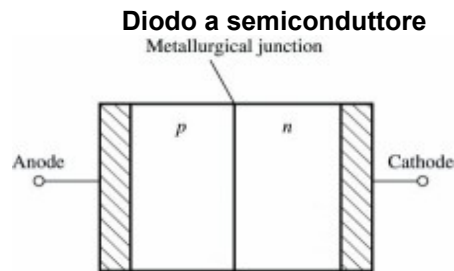
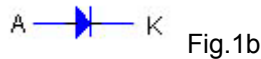


Fig. 1a



Il diodo è un componente a due terminali, anodo (**A**) e catodo (**K**) ottenuto unendo un semiconduttore di tipo P ed uno N (Fig.1a); il suo simbolo, somigliante alla punta di una freccia, è quello riportato in Figura 1b. Esso mostra che il dispositivo è unidirezionale, cioè si lascia attraversare dalla corrente solo in un senso: dall'anodo verso il catodo.

Il diodo conduce quando la rete esterna invia la corrente nel senso consentito dal dispositivo; in questo caso $V_{AK} > 0$ e il diodo è polarizzato direttamente.

Se la rete esterna prova a inviare corrente nel diodo dal catodo verso l'anodo, il diodo non conduce affatto; in questo caso $V_{AK} < 0$ e il diodo è polarizzato inversamente.

La caratteristica corrente/tensione, per valori positivi di V_{AK} , di un diodo al Silicio è quella di Fig.2 .

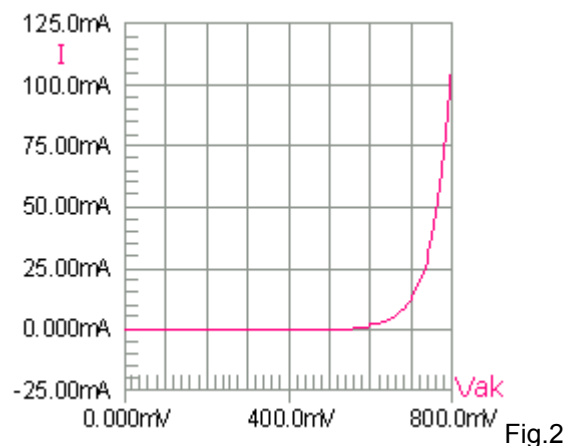


Fig.2

Essa evidenzia che:

- il diodo non è lineare perché la caratteristica I/V_{AK} non è rettilinea
- per valori di polarizzazione diretta inferiori a **0.5V** (tensione di soglia), il diodo praticamente non conduce
- quando V_{AK} oltrepassa 0.5V la corrente cresce molto rapidamente; infatti, piccoli incrementi di tensione provocano grandi incrementi di corrente e V_{AK} si stabilizza, in pratica, attorno al valore di **0.7V** (tensione di conduzione)

La caratteristica completa del dispositivo, riportata in Fig.3, mostra, come sapevamo, che, quando il diodo è polarizzato inversamente , cioè quando V_{AK} è minore di zero, esso non conduce; però se V_{AK} diventa più negativa di un certo valore, detto tensione di rottura o di **breakdown** (nel nostro caso -50V) il diodo entra bruscamente in conduzione e V_{AK} si stabilizza attorno al valore di rottura

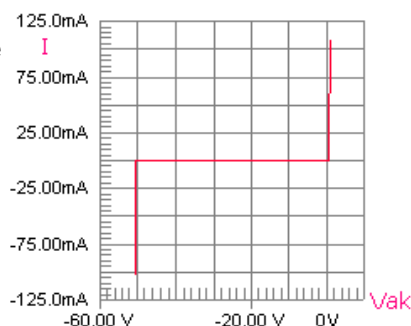


Fig3

La tensione di rottura varia da un diodo all'altro; comunque va assolutamente evitato che V_{AK} raggiunga il valore di breakdown perchè il diodo potrebbe distruggersi

Resistenza ohmica

Quando il diodo è in piena conduzione la corrente, come indicato dalla caratteristica, cresce molto rapidamente, limitata soltanto dalla **resistenza ohmica (bulk resistance)** del dispositivo, che è molto piccola, circa 1ohm; se si vuole evitare di bruciare il componente, bisogna inserire in serie al componente un resistore di limitazione, il cui valore va scelto in base alla massima corrente che può attraversare il diodo.

Massima corrente diretta

La massima corrente che può attraversare un diodo polarizzato direttamente viene chiamata **maximum forward current**; essa viene riportata sui data sheets del componente e varia da diodo a diodo. Per l' 1N4001 essa è 1A.

Massima dissipazione di potenza

La potenza P_d dissipata dal diodo è:

$$P_d = I \cdot V_{ak}$$

dove I è la corrente che attraversa il diodo e V_{ak} è la tensione che cade ai capi del componente (circa 0.7V). Essa non può oltrepassare un certo valore, indicato come **maximum power dissipation**; questo valore viene raggiunto quando la corrente diretta assume il suo massimo valore.

Per impedire che corrente e potenza oltrepassino i limiti consentiti in serie al diodo va inserito un resistore di limitazione, come nel circuito di Fig.4, il cui valore minimo, nel caso del diodo 1N 4001, è:

$$R = \frac{E - V_{ak}}{I_{max}} = \frac{10 - 0.7}{1} = 9.3 \Omega$$

Nel caso pratico, verranno usati valori maggiori di 9.3ohm, in modo da far funzionare il diodo in condizioni di assoluta sicurezza

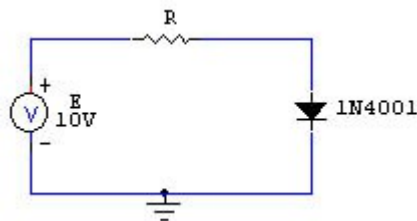


Fig.4

Polarizzazione inversa

Quando il diodo è polarizzato inversamente (Fig.5) esso è percorso da una debolissima corrente, detta corrente inversa, indicata spesso con I_o , che non supera qualche microAmpere ed è perciò trascurabile a tutti gli effetti. Questo è vero sino a quando la tensione inversa ai capi del diodo non oltrepassa il valore di breakdown, nel qual caso il diodo si distrugge, probabilmente anche in presenza di una resistenza di limitazione.

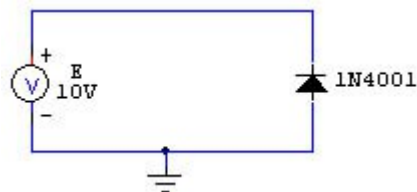


Fig.5

La corrente I_o è molto sensibile alle variazioni di temperatura; nei diodi al silicio essa, mediamente, raddoppia per ogni aumento di 10°C; ciò, da un lato, crea problemi di stabilità termica; dall'altro consente la realizzazione di sensori di temperatura.

Raddrizzatori

I raddrizzatori sono dei circuiti che convertono una tensione bipolare in una unipolare, quindi a valor medio sicuramente diverso da zero; molto spesso la tensione che viene raddrizzata è quella di rete. I raddrizzatori si suddividono in raddrizzatori a semionda, in cui la corrente scorre solo per mezzo periodo, e raddrizzatori ad onda intera, in cui la corrente scorre per tutto il periodo del segnale di ingresso, ovviamente sempre nello stesso verso.

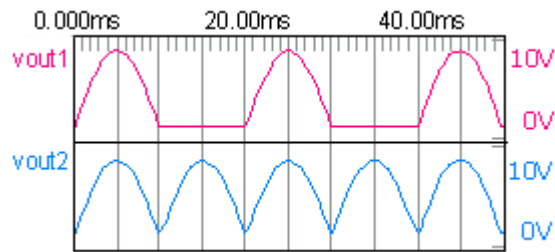


Fig.28

Raddrizzatore a semionda

E' costituito semplicemente da un diodo e da un carico resistivo; spesso è preceduto da un trasformatore riduttore; quello impiegato in Fig.29 riduce la tensione a primario di un fattore 10. Per l'analisi circuitale del raddrizzatore utilizzeremo il modello del diodo ideale.

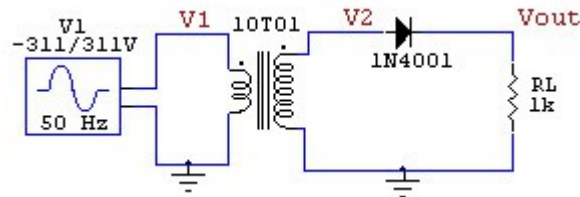


Fig.29

A secondario abbiamo la tensione V2, sinusoidale a frequenza 50Hz e picco 31.1V. Durante la semionda positiva di V2, il diodo è polarizzato direttamente; esso è quasi un cortocircuito e , perciò, la semionda positiva di V2 si trasferisce sul carico

Durante la semionda negativa di V2, il diodo è polarizzato inversamente. Esso non conduce e allora $V_{out}=0$; la tensione a secondario si trasferisce, quindi, sul diodo

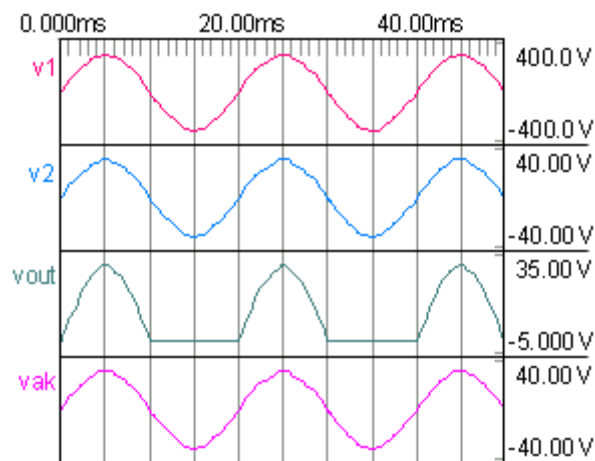


Fig.30

Le forme d'onda evidenziano che il picco di V_{out} è più piccolo, rispetto a quello di V2, di 0.7V (la caduta ai capi di un diodo in conduzione). Un 'analisi più accurata mostrerebbe anche che la corrente in R_L scorre per un pò meno di mezzo periodo; il diodo, infatti, entra in conduzione quando V2, durante la semionda positiva, oltrepassa 0.5V.

Raddrizzatore a presa centrale

Il raddrizzatore **ad onda intera** a presa centrale utilizza due diodi che conducono in controfase; i due segnali, uguali in modulo e opposti in fase, necessari per pilotare D1 e D2 vengono forniti dal trasformatore con secondario a presa centrale. Al primario del trasformatore c'è la tensione di rete che , nel nostro caso, viene ridotta di un fattore 10.

Al secondario abbiamo la tensione $V_2 = V_a - V_b$ di picco 31V; ai due estremi del secondario abbiamo le tensioni V_a e V_b , uguali in modulo ma opposte in fase, entrambe riferite a massa e di picco 15.5V

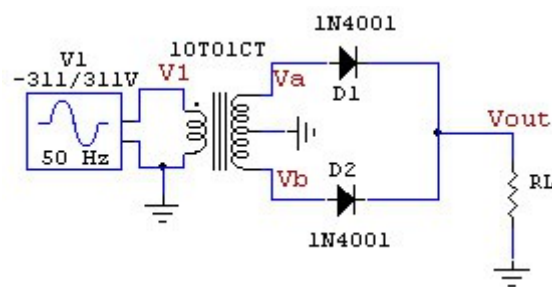


Fig.32

Durante la semionda positiva di V2, Va è positiva e Vb è negativa; allora il diodo D1 conduce mentre il diodo D2 è interdetto; la semionda positiva di Va viene passata al carico.

Nella semionda negativa di V2, è Vb ad essere positiva; il diodo che conduce è, allora, D2 e al carico RL viene passata la semionda positiva di Vb.

Vout è allora una tensione raddrizzata ad onda intera il cui picco è uguale, idealmente, a quello di Va e di Vb e alla metà del picco di V2 (in realtà è 0.7V più piccolo); la sua frequenza è doppia rispetto a quella del segnale originario .

Ciascuno dei due diodi, quando è in conduzione, ha ai suoi capi all'incirca 0.7V; quando è interdetto è connesso, attraverso l'altro diodo in conduzione, ai due estremi del secondario; il picco della tensione inversa ai capi del diodo coincide perciò con V2p.

Raddrizzatore a ponte

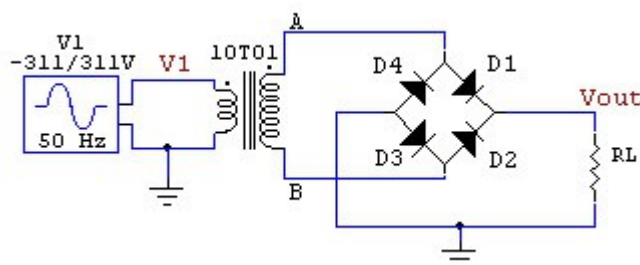


Fig.35

Il raddrizzatore a ponte utilizza due coppie di diodi, rispettivamente D1 - D3 e D2 - D4, che conducono in contofase; i quattro diodi sono connessi a ponte.

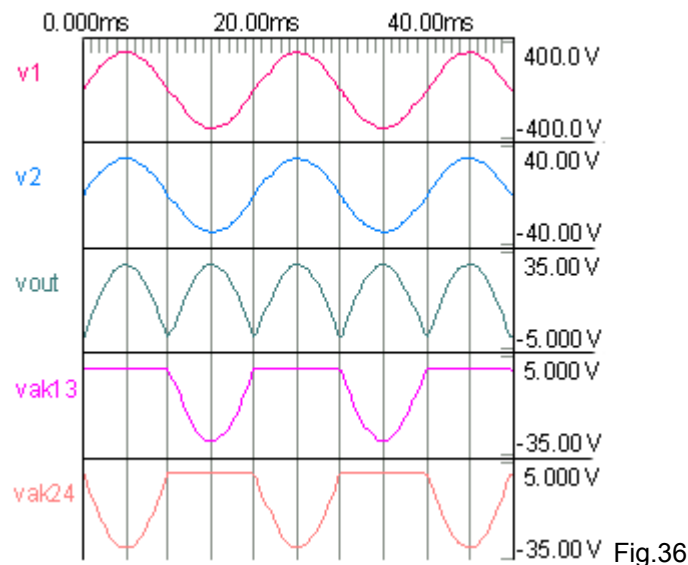
Il ponte , detto ponte di Graetz , è pilotato, su una diagonale, dalla tensione $V_2 = V_a - V_b$ presente al secondario del trasformatore; la tensione di uscita è prelevata sull'altra diagonale.

I due estremi del secondario sono entrambi fuori massa. Vediamo le forme d'onda del raddrizzatore, riportate in Fig.36; durante la semionda positiva di V2 , il punto A è a potenziale maggiore rispetto al punto B; di conseguenza, i diodi D1 e D3 sono polarizzati direttamente e conducono ; la coppia D2 - D4 è interdetta. La semionda positiva di V2 viene allora smistata al carico attraverso il quasi cortocircuito costituito da D1 e D3.

Durante la semionda negativa di V2, il punto A è a potenziale più basso rispetto al punto B; i diodi D1 e D3 sono interdetti mentre D2 e D4 conducono.

Attraverso il quasi cortocircuito costituito da D2 e D4 , stavolta al carico viene smistata Vba, cioè -V2; in definitiva al carico arriva la semionda negativa di V2 ribaltata.

Vout è una tensione raddrizzata ad onda intera , quindi a frequenza doppia rispetto a quella di ingresso .



Le due coppie di diodi D1 - D3 e D2 - D4 hanno ai loro capi una tensione di 0.7v nelle semionde in cui conducono; invece, quando sono polarizzati inversamente, hanno ai loro capi la tensione del secondario come tensione inversa; e allora il picco di tensione inversa è $PIV = V_{2p}$.
 Il picco di V_{out} , almeno idealmente è uguale a quello di V_2 (in realtà se ne discosta di circa 1.4V per via della caduta sui due diodi in conduzione).

Il filtro capacitivo

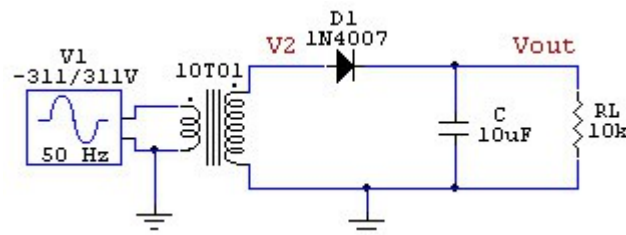


Fig.37

La tensione uscente dai raddrizzatori è, sì, unipolare ma non è continua ; per livellarla ulteriormente occorre mettere in parallelo al carico un grosso condensatore che, come sappiamo, tende a mantenere costante la tensione ai suoi capi (Fig. 37).

Il circuito così ottenuto prende il nome di raddrizzatore filtrato capacitivamente.

Come mostrano le forme d'onda (Fig.38), nel primo quarto di periodo C si carica velocemente al picco di V_2 ; subito dopo D1 si interdice perché il potenziale all'anodo scende al di sotto di quello al catodo ($V_2 < V_{out}$); nel periodo successivo, in prossimità del picco positivo, il potenziale all'anodo supera di nuovo quello al catodo, il diodo rientra in conduzione per un breve intervallo di tempo e ricarica il condensatore.

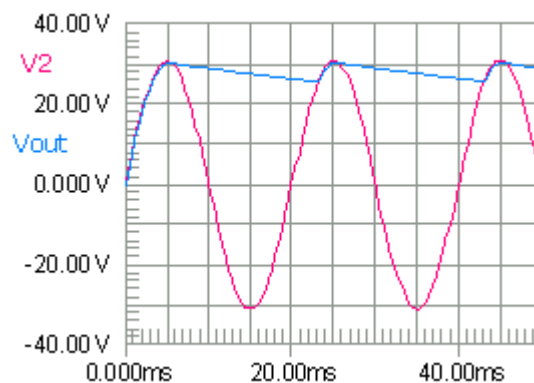


Fig.38

Diodo Zener

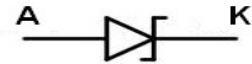


Fig. 43

La caratteristica I-Vak (Fig.44) del diodo Zener mostra che il dispositivo:

- si comporta come un normale diodo, se è polarizzato direttamente
- al contrario dei normali diodi, può condurre anche quando è polarizzato inversamente, se la tensione inversa supera una soglia, V_z , che varia da un componente all'altro

V_z viene chiamata tensione di Zener (o di rottura) e, nel nostro caso, è 3.9V; una volta oltrepassata la soglia di conduzione inversa, piccole variazioni di tensione comportano grandi variazioni di corrente e la tensione ai capi del diodo si stabilizza attorno al valore di V_z .

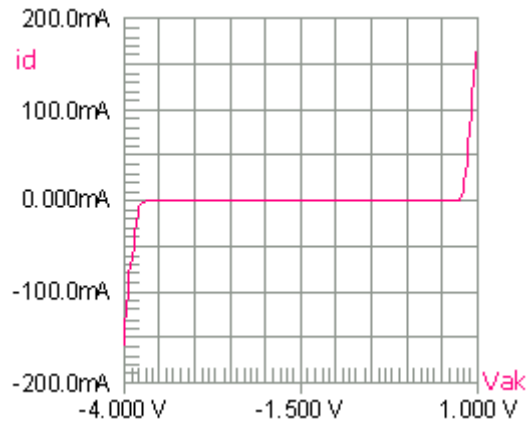


Fig.44

Il simbolo del dispositivo è quello riportato in Fig.43.

Il diodo Zener viene fatto lavorare, di solito, nel tratto verticale (o quasi) della caratteristica inversa; infatti, quando funziona in questa zona il dispositivo è capace di assorbire grandi variazioni di corrente, senza subire apprezzabili variazioni di tensione; in pratica, il diodo, quando è in conduzione inversa, si comporta da stabilizzatore di tensione.

Lo Zener lo troviamo in parallelo al carico, nel raddrizzatore con filtro capacitivo, per mantenerne costante la tensione di uscita al variare della tensione ai capi del condensatore; il circuito ottenuto (Fig.47) è un esempio rudimentale di alimentatore stabilizzato.

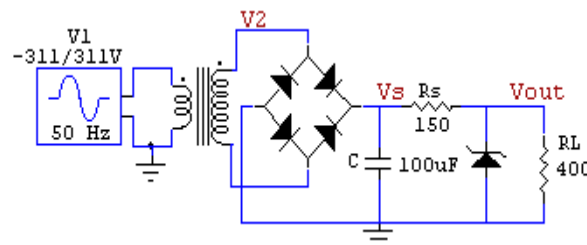
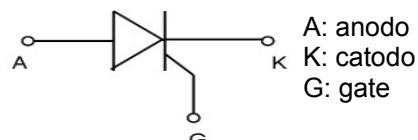


Fig.47

SCR – Tiristori

Questo dispositivo è usato come interruttore controllato ed è un dispositivo a tre terminali.

I terminali di anodo e catodo sono quelli che vanno sul circuito di potenza mentre il terzo, il gate, è usato come terminale di controllo.



Funzionamento del dispositivo

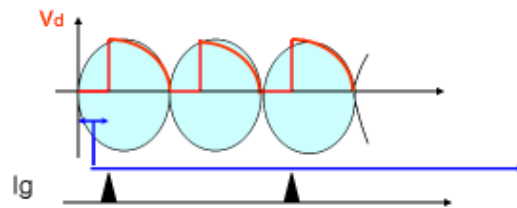
Stato di OFF ($I_G = 0$)

Stato di ON (applicazione di un impulso di corrente sul Gate, nell'ipotesi che sia $V_{AK} > 0$)

Una volta che l'SCR è in ON, il gate non lo controlla più e in particolare non può causare il Turn-off.

$I_G < 0$, non è in grado di spegnere il dispositivo (cioè di eliminare l'accesso di minoritari, perché l'area di K è \gg dell'area di G).

Il Turn-Off può essere effettuato da un circuito esterno, riducendo la I_A al di sotto di un valore minimo di tenuta (I_{AH}). Il Turn-off può essere accelerato applicando $V_{AK} < 0$ (spegnimento forzato).

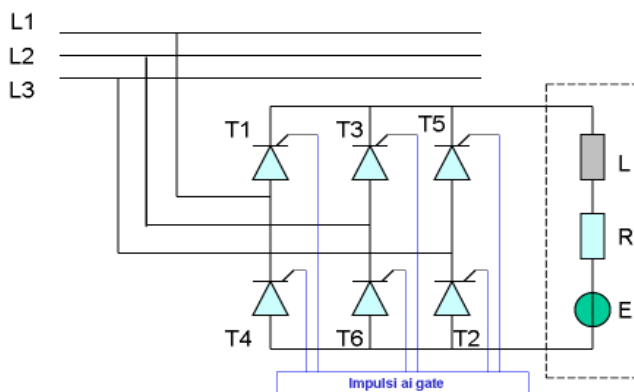


Gli SCR possono essere usati anche nella conversione AC – DC inseriti, al posto dei diodi, nei ponti raddrizzatori; in questo modo si controlla il valore della tensione continua in uscita del convertitore.

Esistono due tipi di SCR:

- SCR RECTIFIER GRADE: usati per convertitori AC-DC per frequenze fino a 400 Hz
- SCR INVERTER GRADE: usati per convertitori DC-AC fino a 20 kHz

Esempio di convertitore AC/DC trifase controllato tramite SCR



TRIAC

È un particolare tipo di SCR composto in realtà da due di questi inseriti in antiparallelo col vantaggio di essere un componente unico, compatto, su un solo chip di silicio.

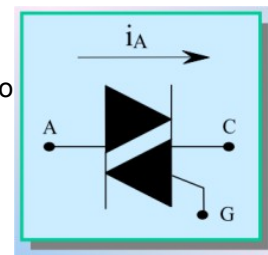
Il comando permette l'accensione di uno dei due tiristori, ma non lo spegnimento, che avviene solo mediante polarizzazione inversa.

I Triac raggiungono tensioni di blocco di 1500 V con correnti di 100 A.

I limiti sono:

- bassissima frequenza di commutazione;
- difficoltà di funzionamento con basso fattore di potenza.

Sono utilizzati come variatori di tensione per l'illuminazione.



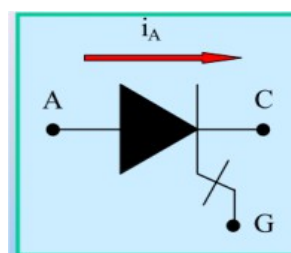
SCR - GTO

è un SCR sul quale lo spegnimento può essere fatto con un impulso positivo sul gate.

Quando polarizzato in inversa si comporta come diodo, quando polarizzato in diretta ha un comportamento che dipende dal valore della corrente di gate.

In particolare, polarizzato in diretta, rimane in interdizione diretta fino all'invio di un impulso di corrente positiva al Gate.

Rimane in conduzione fino alla polarizzazione inversa o fino all'invio di un impulso di corrente negativa al Gate.



Può dunque essere posto in conduzione mediante controllo della corrente di gate e può anche essere spento allo stesso modo.

I G.T.O. sono costruiti per tensioni fino a 6÷7 kV e correnti fino a 4÷5 kA e possono arrivare a frequenze di commutazione di 10 kHz.

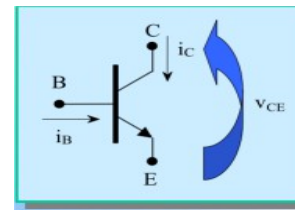
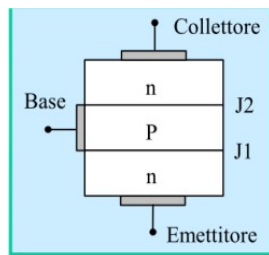
- Presenta piccole cadute in conduzione (3÷4 V);
- come il tiristore è adatto per gestire grandi potenze.

TRANSISTOR BJT

È un componente elettronico composto da tre regioni di materiale semiconduttore che formano due giunzioni. Si possono avere due tipi transistor: NPN e PNP

In figura sono riportati la struttura e il relativo simbolo elettrico (NPN)

il Transistor è un componente a tre terminali di cui quello denominato “base” rappresenta quello di controllo. gli altri due sono emettitore e collettore e sono quelli che vanno collegati al circuito di potenza



Lo stato del BJT dipende dal valore della corrente di base per cui esso è un dispositivo controllato in corrente.

Il BJT può essere collegato con connessione a emettitore comune o a base comune. Nel caso di sistemi di potenza si usa la connessione a emettitore comune.

Il componente rimane in conduzione solo se si mantiene una corrente di base; per lo spegnimento è sufficiente un picco di corrente di base negativo e quindi non sono richiesti circuiti esterni per la commutazione forzata.

Lavorando in switching mode, il BJT passa dalla zona di interdizione alla zona di saturazione.

Possono commutare ad elevata frequenza (10 kHz), ma non resistono alle tensioni inverse e le applicazioni sono perciò limitate ad inverter e chopper alimentati in corrente continua.

Fra i parametri caratteristici abbiamo:

- Massima tensione collettore-emettitore: 1000÷1200 V
- Massima corrente di collettore: 600÷800 A

MOS-FET

Il nome significa Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

Anche questo è un componente a tre terminali i cui nomi sono Gate, Source e Drain. Il terminale di controllo è quello di gate mentre tra source e drain si collega il circuito di potenza da controllare.

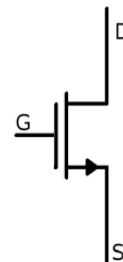
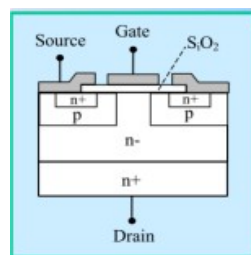
In figure viene riportato la struttura e il simbolo elettrico.

Il MOS_FET può essere usato o come interruttore controllato in tensione o come amplificatore inoltre esso è usato come componente fondamentale delle porte logiche usate nell'elettronica digitale.

I MOSFET arrivano fino a tensioni massime di 1000 V, con basse correnti, mentre per tensioni più ridotte possono sopportare anche 100 A.

Il circuito di gate ha una soglia tipica di 2-4 V sotto la quale la corrente diretta è piccolissima.

Si possono evidenziare due zone; la prima a R_{on} costante, la seconda a corrente costante. La R_{on}



cresce con la taglia del componente e questo è un grosso svantaggio ($0.1 \div 1 \Omega$).

Al contrario però hanno bassissime perdite di commutazione.

E' necessario mantenere V_{GS} , ma non vi è passaggio di corrente e di conseguenza dissipazione di potenza, se non in commutazione.

Il tempo di commutazione risulta dell'ordine dei 100 nsec. Il componente è velocissimo (centinaia di kHz).

Questi componenti risultano facilmente collegabili in parallelo perché hanno coefficiente di temperatura positivo; quello che più si scalda, più aumenta di resistenza e di conseguenza cala la sua corrente.

IGBT

Anche questo componente ha tre terminali Gate, Collettore ed Elettore dove il gate rappresenta il terminale di controllo; è un componente comandato in tensione cioè bisogna applicare una tensione per farlo condurre (stato ON).

E' uno dei componenti più usati.

Questo componente offre alcuni vantaggi dei MOSFET, BJT e GTO combinati.

- Come il MOSFET è controllato in tensione, ha elevata impedenza di Gate, quindi piccole perdite per il controllo.
- Come il BJT ha piccole cadute in conduzione ($2 \div 5 V$).
- Come il GTO può resistere a tensioni inverse dell'ordine dei 1000V.
- I tempi di commutazione sono dell'ordine di 1 Microsec (componente veloce, fino a 30 kHz).
- I limiti attuali sono 2500 V, 1000 A.

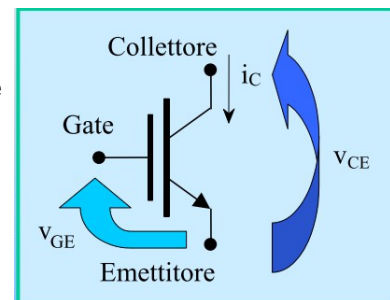


TABELLA RIASSUNTIVA		
	POTENZA	VELOCITÀ DI COMMUTAZIONE
Tiristori (SCR, GTO)	Alta	Bassa
BJT	Media	Media
MOS_FET	Bassa	Alta
IGBT	Media	Media