

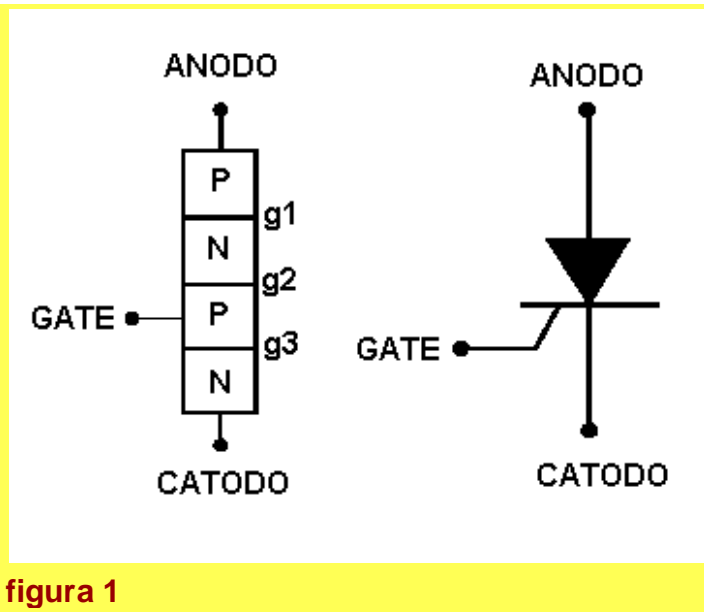
# Thyristors : il diodo SCR

I thyristors rappresentano una famiglia di semiconduttori piuttosto particolari, caratterizzati dal funzionamento tipo "switch" (ovvero "interruttore"), e formati dalla sovrapposizione di quattro strati p-n-p-n disposti a sandwich.

I tiristori sono utilizzati nei circuiti di commutazione e **controllo della potenza**, sia con tensioni continue che con tensioni alternate.

In questa sede parleremo dei componenti più comuni, ovvero il diodo **SCR**, il **TRIAC**, il **DIAC**.

## IL DIODO SCR



Confrontando la composizione di un SCR col comune diodo visto nelle lezioni precedenti, si osserva che il diodo SCR è costituito da tre giunzioni (**figura 1**, parte sinistra) :

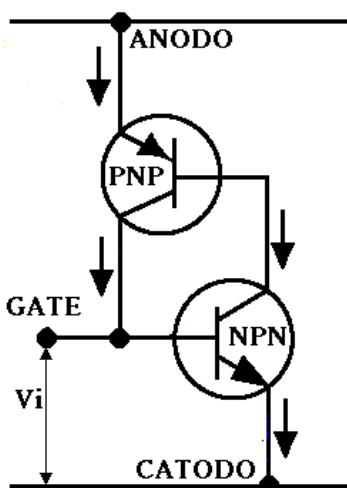
- una giunzione PN (indicata con g1)
- una giunzione NP (g2)
- una seconda giunzione PN (g3)

Sempre in **figura 1**, a destra, vediamo rappresentazione simbolica di un SCR, con un anodo, un catodo ed un elettrodo in più: il **gate**.

Se colleghiamo all'Anodo una tensione **positiva** rispetto al Catodo, **il diodo SCR, a differenza del diodo comune, non lascia passare corrente**.

Se tuttavia si applica sull'elettrodo **Gate** una tensione positiva rispetto al catodo, la corrente fluisce nel diodo, da A a K.

Il funzionamento del diodo SCR può essere compreso immaginandolo come composto da due transistor collegati come in **figura 2**.



Applicando all'anodo una tensione positiva rispetto al catodo, non passa alcuna corrente, poichè sia il transistor PNP che quello NPN, mancando una tensione di base, risultano interdetti.

Se tuttavia si applica al gate (e quindi alla base del transistor NPN) una tensione  $V_i$ , positiva rispetto al catodo, tale da provocare la conduzione del transistor, si innesca un processo che è **autorigenerante**.

Il transistor NPN, infatti, cominciando a condurre, fa passare corrente nella base del PNP; questo a sua volta inizia a condurre, e la corrente che lo attraversa entra nella base del transistor NPN, mandandolo in conduzione ancora più spinta.

**Fig.2**

A questo punto, non ha alcuna importanza se la tensione  $V_i$  sul gate è sempre presente o meno: **innescata la conduzione, il diodo SCR continua a condurre in maniera autonoma, finchè non si toglie alimentazione al circuito.**

Osserviamo 2 importanti differenze fra il **BJT**, anch'esso dotato di tre terminali, ed il diodo **SCR**:

1) La corrente che passa nel circuito di collettore di un BJT è proporzionale alla corrente di base

**La corrente in un diodo SCR non può assumere valori intermedi : o passa o non passa.**

2) Se nel BJT rimuoviamo la tensione di base, il transistor non conduce più;

**il diodo SCR, una volta portato in conduzione, non è più comandabile dall'elettrodo di controllo: continua a condurre anche rimuovendo la tensione dal GATE.**

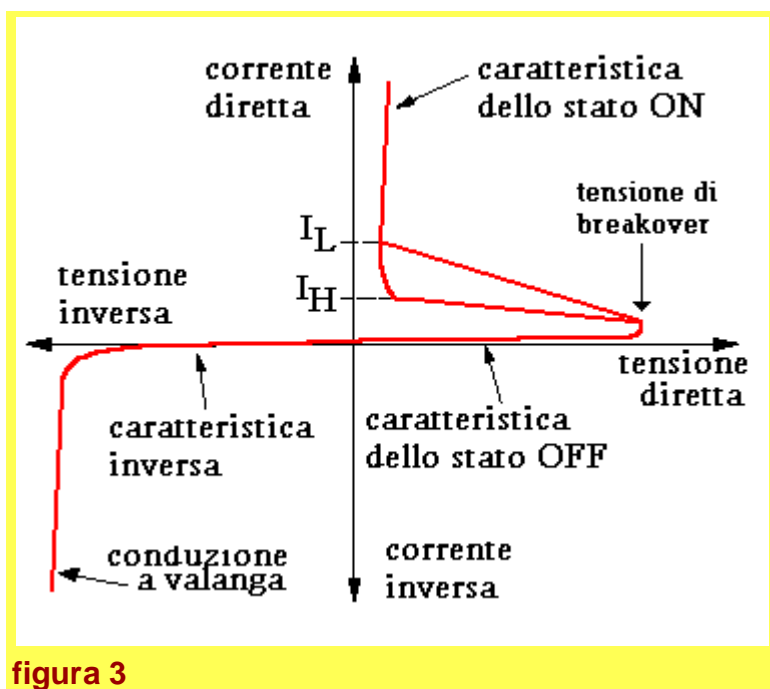


figura 3

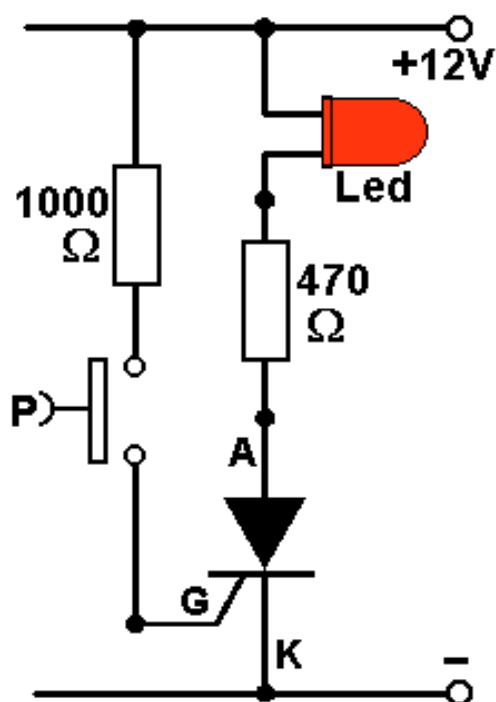
Caratteristica  $I_{ak} - V_{ak}$  del diodo SCR

- Nel quadrante destro in alto si vede che il diodo non conduce finchè non si raggiunge una tensione detta di "breakover"; superata tale tensione, la curva torna indietro e diventa quella di un normale diodo rettificatore.
- Lo stesso effetto, ovvero il passaggio alla conduzione, può essere raggiunto applicando al **Gate** una piccola tensione positiva (siamo nella regione dello stato "ON", ovvero della conduzione diretta).
- $I_L$  è la "latching current" (**corrente di innesco**), ovvero la corrente necessaria per innescare la conduzione.
- $I_H$  è la "holding current" (**corrente di mantenimento**), ovvero la minima corrente sufficiente a mantenere il diodo in conduzione.
- Nel 3° quadrante, si osserva la classica curva caratteristica inversa di tutti i diodi, con la conduzione a valanga una volta che la  $V_{ak}$  raggiunge il valore negativo  $V_z$ , per cui avviene l'effetto Zener.

I principali valori che caratterizzano un diodo SCR sono :

- 1- Peak forward and reverse breakdown voltages (tensione di picco di breakdown diretta e inversa)
- 2- Maximum forward current (massima corrente diretta)
- 3- Gate trigger voltage and current (tensione e corrente di gate)
- 4- Minimum holding current,  $I_h$  (valore minimo della corrente di mantenimento)
- 5- Power dissipation (potenza dissipabile)
- 6- Maximum  $dV/dt$  (massima velocità di variazione della tensione in funzione del tempo)

*(quest'ultimo valore si riferisce ad un limite caratteristico degli SCR : se la tensione applicata sale troppo rapidamente, il diodo SCR può andare in conduzione da solo ; diventa quindi importante conoscere il massimo valore di  $dV/dt$  consentito affinché non avvenga l'innesco spontaneo).*



Un semplice circuito per provare il funzionamento di un SCR è riportato in **figura 4**.

Collegato il circuito all'alimentazione, **non** passa alcuna corrente; basta tuttavia premere anche per un attimo il pulsante P perchè il diodo SCR passi in conduzione, facendo accendere il Led.

Una volta che il Led è acceso, l'unico modo per spegnerlo, interrompendo il passaggio di corrente, è quello di staccare l'alimentazione al circuito.

**Fig. 4**

# Thyristors : TRIAC E DIAC

Il TRIAC è uno dei componenti di maggior interesse della famiglia dei thyristors ; potendo controllare il passaggio della corrente in entrambi i sensi, esso rappresenta una delle soluzioni più efficienti ed economiche per il controllo della potenza assorbita dagli utilizzatori funzionanti con tensioni alternate.

## IL TRIAC

Il **TRIAC** può essere considerato come due diodi SCR collegati in antiparallelo (controfase), ovvero affiancati, ma con direzioni opposte [ schema **a** ] della **figura 5** ]

Gli anodi dei due SCR diventano i terminali principali del TRIAC, ed assumono il nome di MT2 e MT1 ( Main Terminal 1 e Main Terminal 2 ).

I Gate dei due SCR vengono collegati insieme, e diventano il Gate del TRIAC.

In **b**) si vede la costruzione a blocchi di un TRIAC, mentre in **c**) è riportato il suo simbolo schematico.

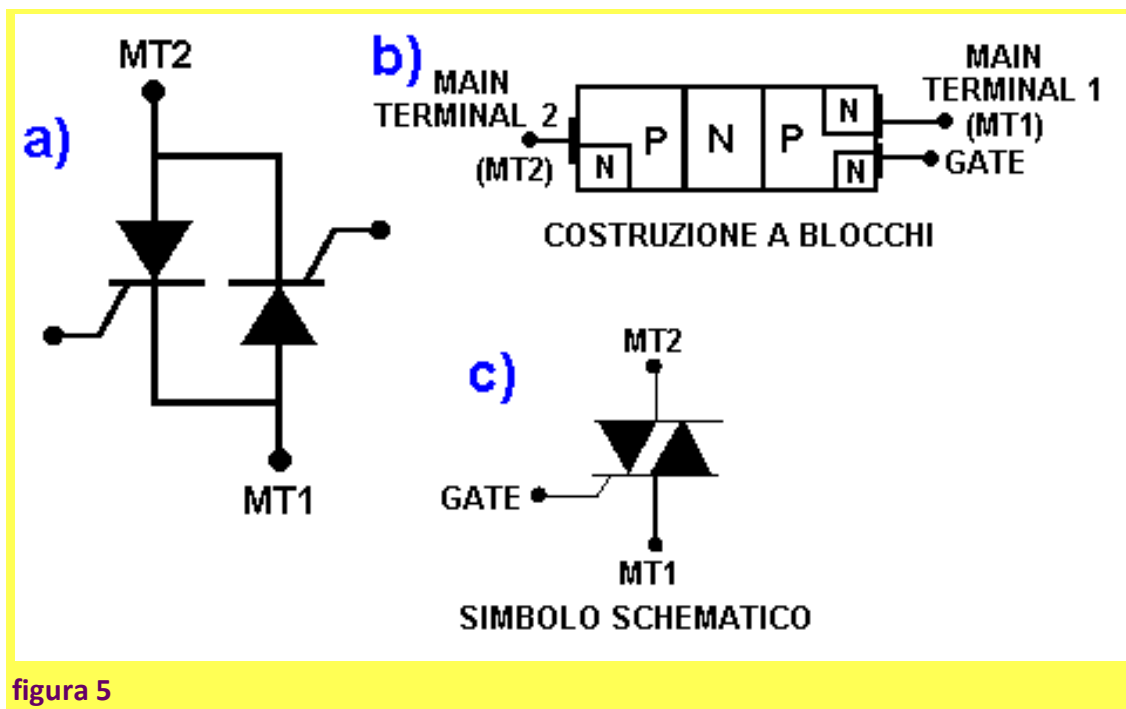


figura 5

Come si è detto, il TRIAC può essere attraversato dalla corrente in entrambi i sensi ; occorre notare, inoltre, che il suo passaggio allo stato **ON**, di conduzione, può avvenire applicando al **Gate** una tensione **sia positiva che negativa**.

Queste molteplici possibilità di funzionamento possono meglio essere illustrate facendo riferimento ad un grafico come quello di **figura 6**, detto "a quattro quadranti".

Ciascun quadrante rappresenta una diversa condizione di funzionamento del TRIAC ; le polarità e quindi le tensioni sono sempre riferite al terminale MT1.

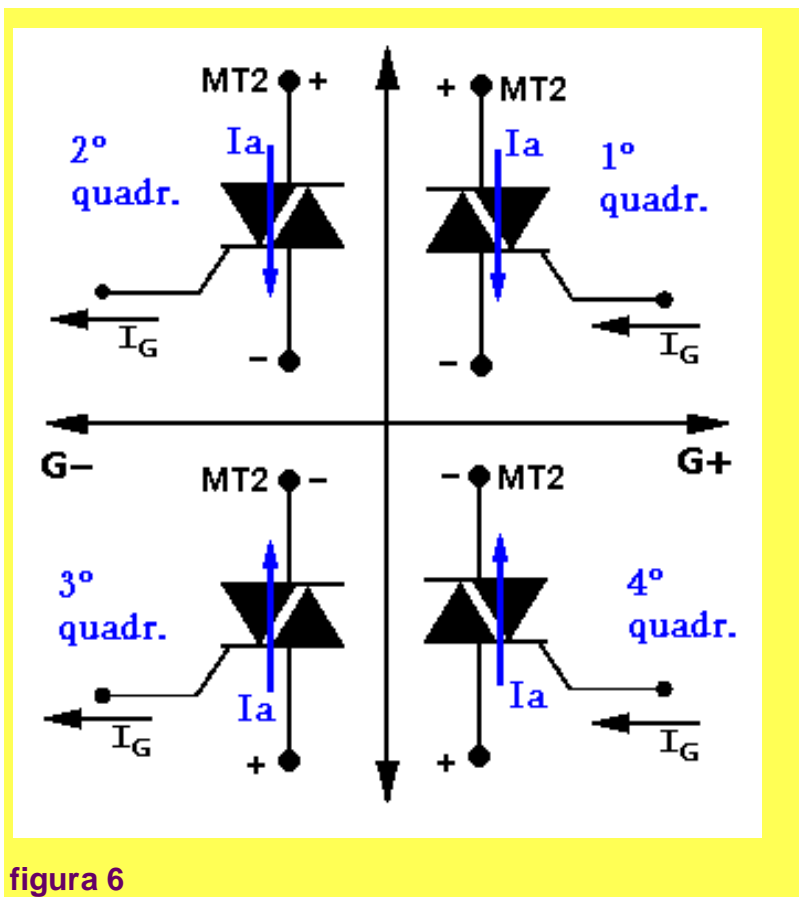


figura 6

#### 1° quadrante:

Il terminale MT2 è positivo rispetto al terminale MT1; la corrente che attraversa il TRIAC scorre infatti dall'alto verso il basso.

Il Gate, a sua volta, è positivo rispetto ad MT1, ed infatti la corrente di Gate risulta "entrante"

#### 2° quadrante:

MT2 è sempre positivo rispetto ad MT1, mentre il Gate è negativo; la corrente di Gate è una corrente "uscente"

#### 3° quadrante:

MT2 è negativo rispetto ad MT1, ed infatti la corrente attraversa il TRIAC dal basso verso l'alto; la tensione applicata al Gate è negativa rispetto ad MT1

#### 4° quadrante:

MT2 è negativo rispetto ad MT1, mentre al Gate viene applicata una tensione positiva.

La scelta di far lavorare il TRIAC in un quadrante piuttosto che un altro, ovvero di scegliere una tensione di gating positiva o negativa, modifica in modo più o meno importante le prestazioni del dispositivo.

In seguito alla disposizione fisica degli strati di semiconduttore che compongono il TRIAC, i valori della "latching current" ( $I_L$ ), della "holding current" ( $I_H$ ) e della "Gate trigger current" ( $I_{GT}$ ), variano da un quadrante all'altro.

Il funzionamento più utilizzato è quello corrispondente ai quadranti **1° e 3°**, ovvero **quando la tensione applicata al gate ha la stessa polarità di quella applicata al terminale MT2**; in tali quadranti si ottiene un'ottima **sensibilità di gate**.

E' difficile per un TRIAC lavorare nel 2° quadrante quando la corrente dei terminali principali è molto bassa. Il 4° quadrante presenta, fra tutti, la più bassa sensibilità di gate.

Per comodità e chiarezza, segue una tabella che riepiloga le principali grandezze caratteristiche dei thyristors, col nome inglese ed il corrispondente significato in italiano:

	<b>BREAKOVER POINT</b>	punto della caratteristica tensione-corrente in cui la resistenza differenziale assume valore zero
	<b>OFF State</b>	condizione del tiristore caratterizzata da alta resistenza differenziale e passaggio di corrente quasi nullo
	<b>ON State</b>	condizione del tiristore caratterizzata da bassa resistenza differenziale e passaggio della corrente principale fra i "main terminals"
	<b>Critical Rate-of-Rise of Commutation Voltage of a TRIAC (Commutating <math>dv / dt</math>)</b>	il minimo valore della velocità di salita della tensione principale, che provoca la commutazione del tiristore dallo stato OFF allo stato ON
	<b>Critical Rate-of-Rise of On-State Current (<math>di / dt</math>)</b>	la massima velocità di crescita della corrente principale che il tiristore può sopportare senza deteriorarsi
$I_{GT}$	<b>GATE TRIGGER CURRENT</b>	la minima corrente richiesta dal gate per far commutare il tiristore dallo stato OFF allo stato ON
$V_{GT}$	<b>GATE TRIGGER VOLTAGE</b>	la tensione da applicare sul gate per ottenere la commutazione
$I_L$	<b>LATCHING CURRENT</b>	il valore minimo di corrente tra anodo e catodo richiesto per mantenere il tiristore in stato di conduzione, immediatamente dopo la commutazione da OFF a ON e la rimozione della tensione di gate
$I_H$	<b>HOLDING CURRENT</b>	il valore minimo di corrente tra anodo e catodo richiesto per mantenere il tiristore nello stato di conduzione

La tabella che segue fornisce un esempio dei valori che assumono le correnti caratteristiche nei vari quadranti, per un TRIAC da 4 A.

<b>TIPICO TRIAC da 4 [A]</b>				
	<b>1°quadrante</b>	<b>2°quadrante</b>	<b>3°quadrante</b>	<b>4°quadrante</b>
$I_{GT}$ (mA)	10	16	25	27
$I_L$ (mA)	12	48	15	13
$I_H$ (mA)	10	10	11	11

Come si vede, la corrente di gate risulta di soli 10 mA quando il TRIAC viene fatto lavorare nelle condizioni corrispondenti al 1° quadrante, confermando con tale valore la migliore sensibilità ; la stessa corrente passa a 27 mA per il 4° quadrante, quello che presenta la minore sensibilità.

Il valore elevato (48 mA) della "latching current" nel 2° quadrante, coincide con una certa difficoltà di innesco del TRIAC.

# IL DIAC

Il DIAC si ottiene diffondendo impurità di tipo N in entrambi i lati di un wafer di tipo P, in modo da ottenere un dispositivo a due terminali con caratteristiche elettriche simmetriche.

La struttura di un DIAC è simile a quella di un transistor NPN con base aperta.

Si tratta di una struttura bidirezionale, che presenta un'alta impedenza (e quindi non lascia passare corrente) fino a quando la tensione applicata ai due terminali non supera un certo valore, detto "**breakover voltage**".

Al di sopra di tale valore, il DIAC entra in una zona a resistenza negativa, dove si manifesta l'effetto di conduzione a valanga.

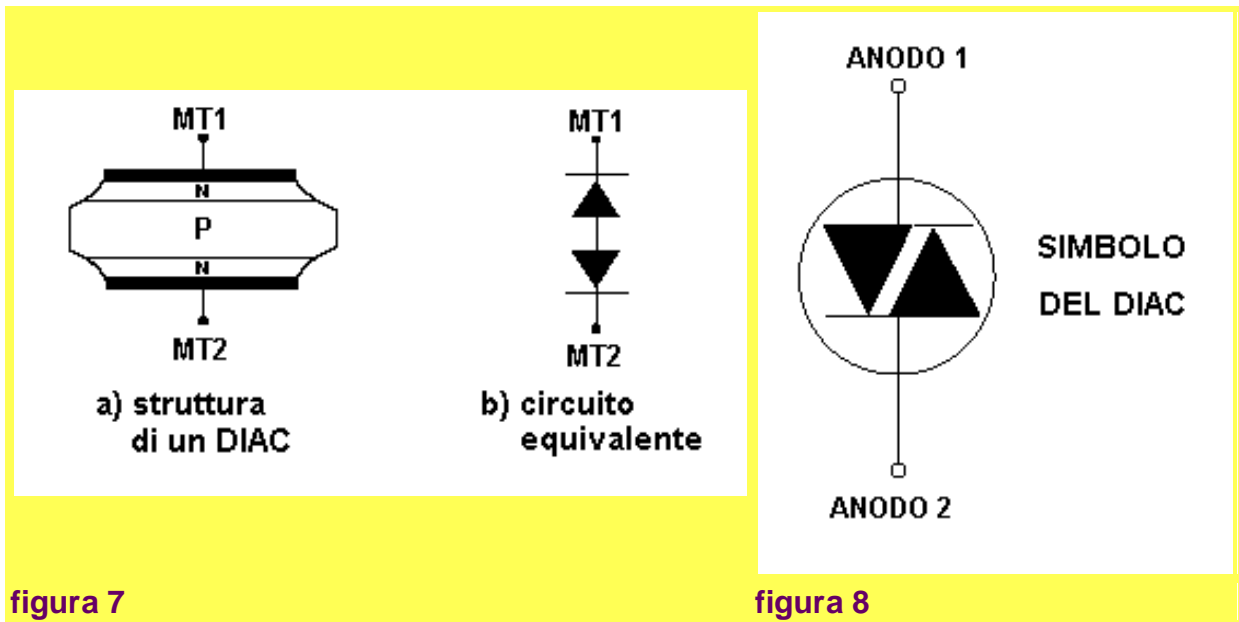


figura 7

figura 8

Essendo un dispositivo bidirezionale, il DIAC costituisce un valido ed economico sistema di innesco per i TRIAC nei circuiti a controllo di fase come i regolatori di luminosità, i sistemi di controllo di velocità dei motori, ecc. In effetti, questa è l'unica applicazione importante dei DIAC.

Come si è accennato, il passaggio in conduzione del DIAC può avvenire soltanto superando la tensione di breakover; il DIAC infatti è dotato di due soli terminali, detti anodo 1 e anodo 2, e quindi non possiede un Gate.

L'innesco ottenuto applicando ai suoi terminali una tensione superiore a quella di breakover è utilmente praticabile solo con i DIAC.

Anche gli SCR e i TRIAC potrebbero essere portati in conduzione in modo analogo, ma per questi ultimi il metodo è sconsigliabile, in quanto il ripetuto superamento della tensione di breakover potrebbe causare danni ai dispositivi stessi.

I Diac utilizzati nei circuiti a controllo di fase sono sufficientemente protetti contro una eccessiva corrente di breakover, e quindi possono lavorare in sicurezza quando il condensatore che essi scaricano non è di capacità eccessiva.

In **figura 9** si vede la caratteristica statica del DIAC, che appare simmetrica rispetto alle due polarità della tensione applicata ai terminali.

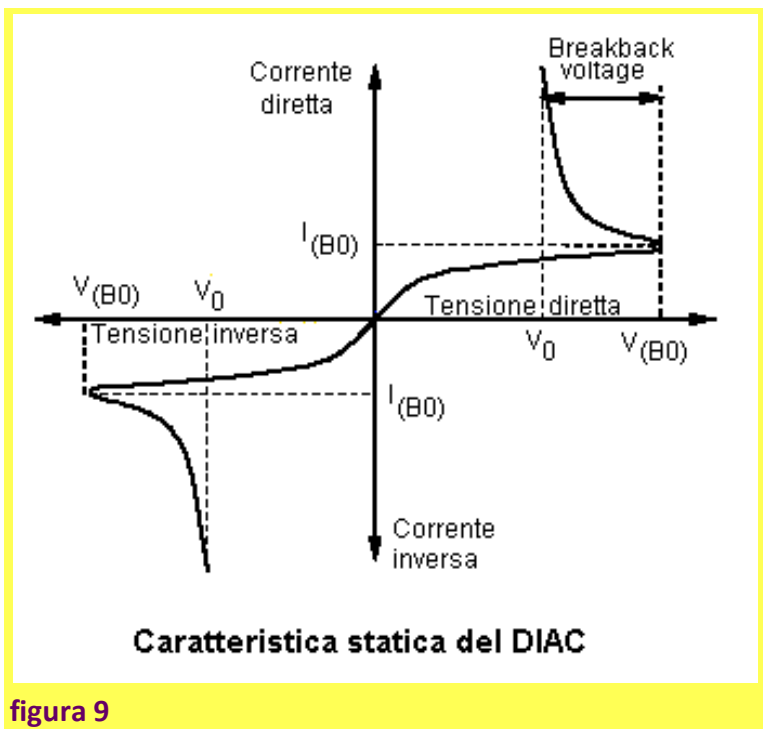


figura 9

Sia in un senso che nell'altro, la corrente che attraversa il DIAC è minima fino ad un certo valore di tensione,  $V_{BO}$ ;

superato tale valore, la tensione ai capi del DIAC scende bruscamente ad un valore più basso,  $V_0$ , detto "breakback voltage", mentre la corrente assume il valore massimo consentito dal circuito.

La corrente  $I_{BO}$ , corrispondente al breakover, viene detta appunto "breakover current".

## Thyristors : Applicazioni pratiche

Gli SCR e i TRIAC sono componenti ideali per il controllo della potenza col sistema "switching" (termine che in italiano si potrebbe tradurre come "accendi-spegni"), particolarmente per circuiti di alta potenza come quelli che impiegano elementi riscaldanti (forni, stufe, ecc.).

**La potenza che arriva al carico può essere facilmente controllata da un segnale di modesta ampiezza, evitando di ricorrere a dispositivi elettromeccanici come ad esempio i relè.**

Un circuito oramai classico che utilizza i tiristori è il "lamp dimmer", ovvero **regolatore di luce per lampade**. Un **TRIAC** particolarmente adatto a questa applicazione è il **BT138** della Philips : in primo luogo, potendo controllare picchi di corrente fino a **90 A**, esso è in grado di sopportare il notevole flusso di corrente che si produce all'accensione della lampada, quando questa è ancora fredda ; il BT138 può inoltre sostenere **transienti** di tensione bidirezionali di valore elevato, mentre, grazie alla bassa impedenza termica della sua struttura, non ha particolari necessità di alette di dissipazione del calore.

In **figura 10** si vede lo schema del circuito nella sua configurazione più semplice; segue una breve e semplificata descrizione del suo funzionamento.



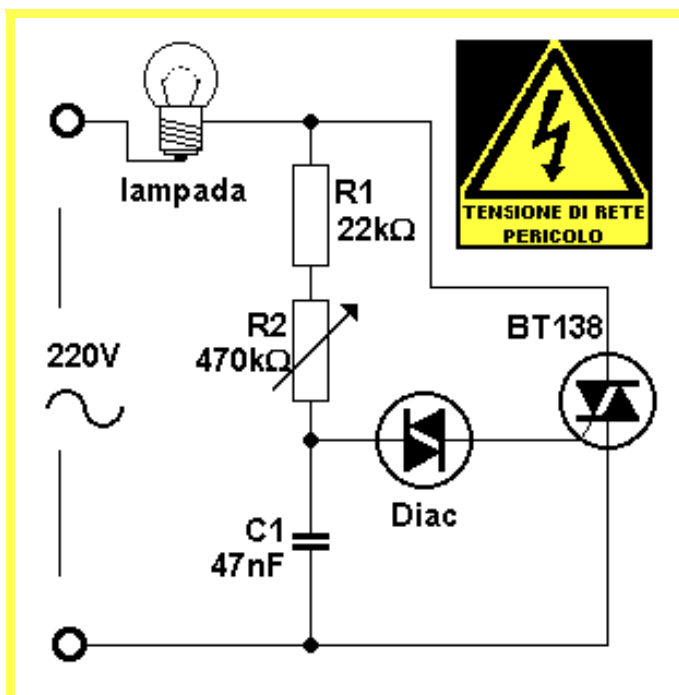


figura 10

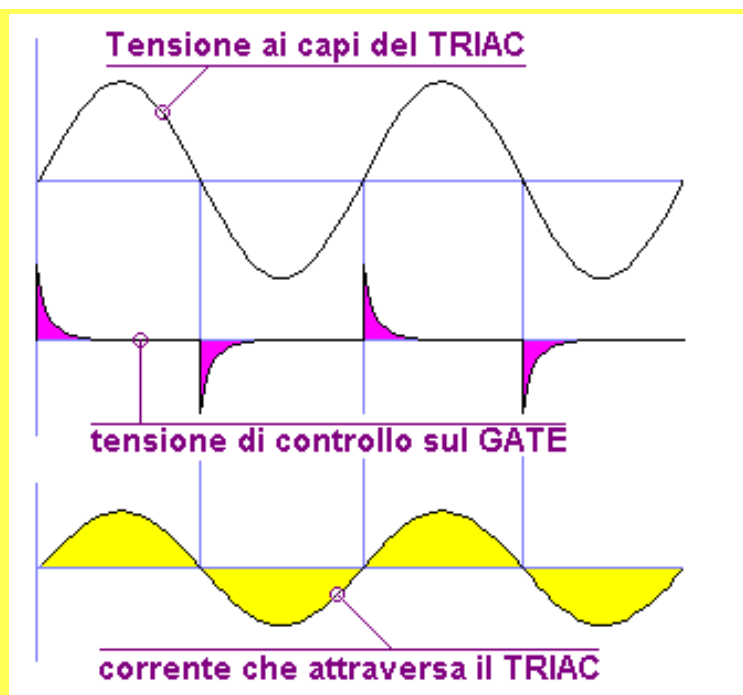


figura 11

Poichè il circuito viene collegato alla corrente alternata di rete, ai capi del TRIAC saranno presenti, alternandosi da un semiperiodo all'altro, la semionda positiva e quella negativa.

Se noi facessimo arrivare sul Gate degli impulsi perfettamente sincronizzati con l'**inizio** di ogni semionda, il TRIAC sarebbe sempre in conduzione, ed in pratica la lampada si accenderebbe alla **massima potenza**. Questo caso è rappresentato nel grafico di **figura 11** : si vede che gli impulsi sul Gate arrivano esattamente all'inizio di ogni semionda; ogni impulso innesca il TRIAC, facendolo condurre per tutta la durata della semionda che segue.

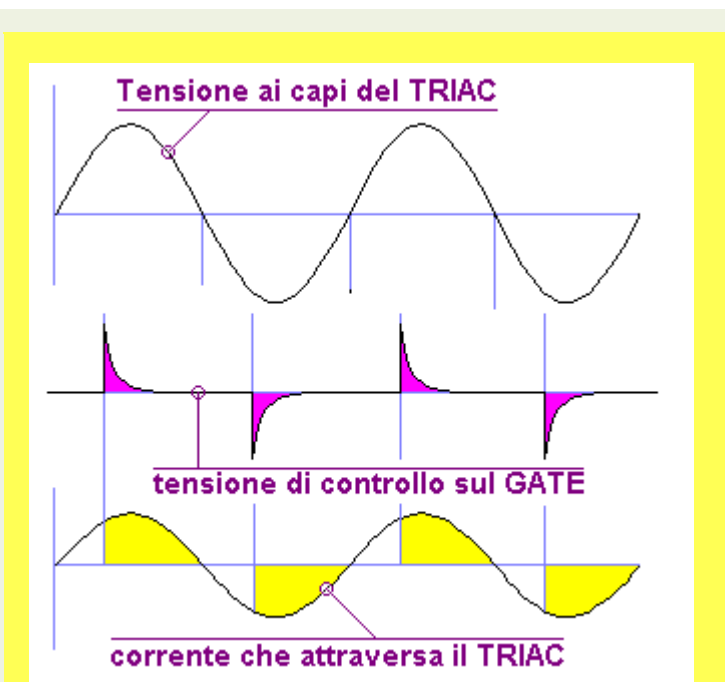


figura 12

Supponiamo invece di inviare gli impulsi sul gate ritardati rispetto all'inizio delle semionde, ovvero "sfasati";

come si vede in **figura 12**, poichè il TRIAC è bloccato, la corrente non potrà scorrere in corrispondenza di ogni semionda di tensione, ma **solo dopo che l'arrivo di un impulso sul gate avrà innescato il TRIAC**.

Poiché solo una parte della corrente attraversa il carico e cioè la lampada, succede che il valore medio della corrente stessa risulta minore, e quindi alla lampada arriva **meno potenza**.

**Più gli impulsi sul gate saranno sfasati rispetto alle semionde della tensione applicata al TRIAC, più sarà breve il tempo per cui passerà la corrente.**

Ad ottenere questo sfasamento, provvede il circuito visto in **figura 10**, ed esattamente le due resistenze **R1+R2** insieme al condensatore **C1**.

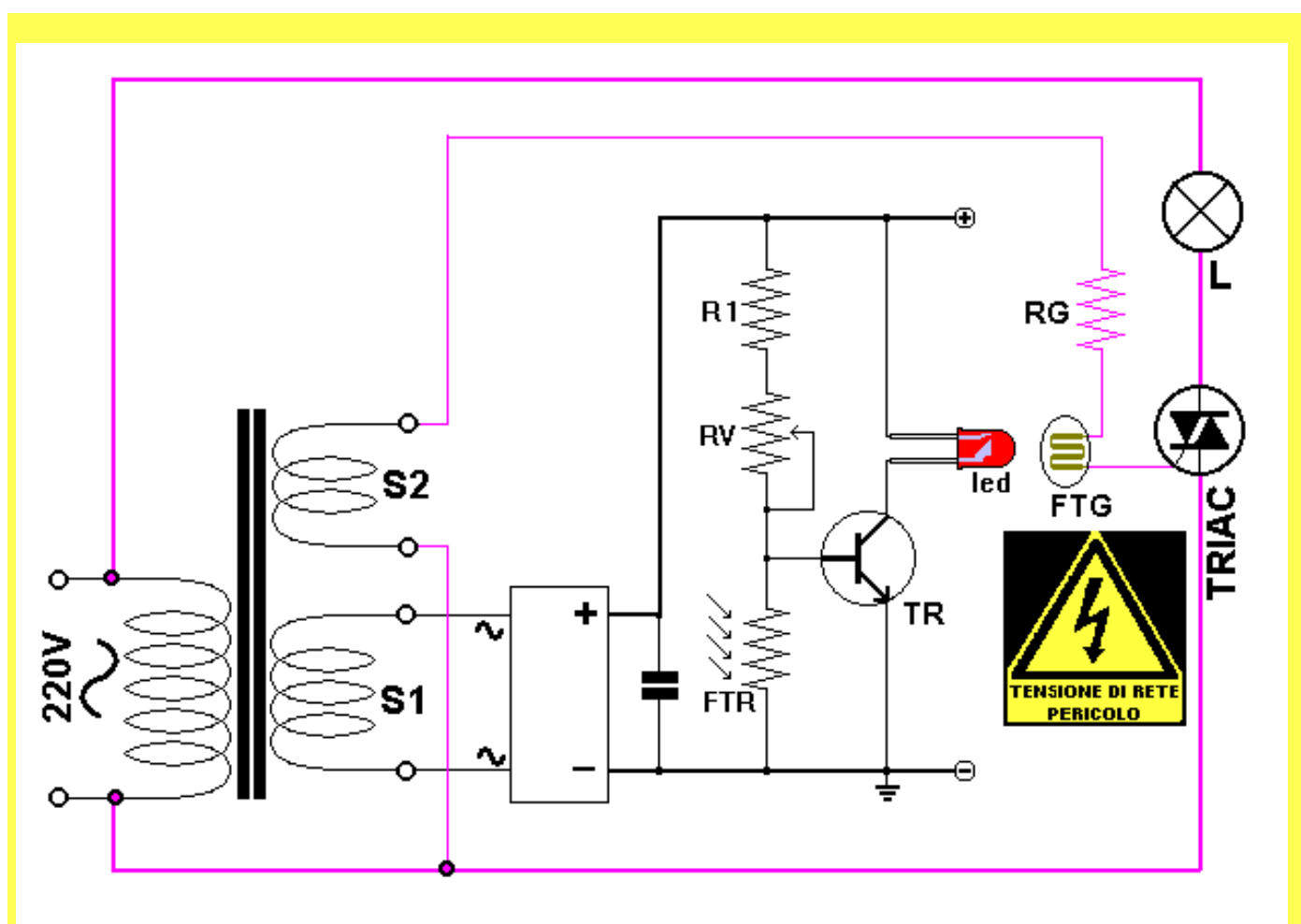
La resistenza **R2** è regolabile: aumentando il suo valore, C1 impiega più tempo a caricarsi, e quindi gli impulsi sul Gate giungono più in ritardo.

Ogni impulso è infatti prodotto dalla carica accumulata da C1 ; quando la tensione ai capi del condensatore raggiunge la **tensione di breakover** del DIAC, questo va in conduzione e scarica sul Gate del TRIAC l'energia che si è accumulata in C1.

Il TRIAC passa a sua volta in conduzione, e vi resta per tutta la durata della semionda, cioè fino a che questa torna al valore zero.

Un modo diverso di ottenere l'innesco di un TRIAC è quello di far giungere sul gate una tensione alternata di basso valore, in fase con quella applicata ai "main terminals" MT1 ed MT2.

In **figura 13** si vede un esempio di tale applicazione.



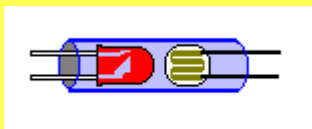
**figura 13**

Il circuito, che serviva a comandare l'**accensione di un utilizzatore in funzione della luce ambiente**, utilizzava a tale scopo un **relè** pilotato da un transistor. In questo caso, il relè viene eliminato, ed al suo posto si utilizza un **TRIAC**, con le stesse funzioni di dispositivo "**switching**".

Come si vede, il circuito del TRIAC, che comprende la lampada L (utilizzatore), è disegnato in viola, e costituisce un circuito a parte, derivato direttamente dalla tensione di rete a 220 V.

La tensione alternata che arriva sul Gate del triac viene prelevata da un secondo avvolgimento (S2) del trasformatore utilizzato per l'alimentazione di tutto il circuito ; si tratta di un avvolgimento anch'esso a bassa tensione, in grado di fornire pochi **Volt** e qualche centinaio di **mA** di corrente.

Questa bassa tensione di controllo arriva al Gate attraverso la resistenza **RG** e la foto-resistenza **FTG**;



**figura 14**  
**foto-accoppiatore**  
**realizzato montando**  
**in un tubetto un led**  
**ed una fotoresistenza,**  
**sigillati per essere**  
**insensibili alla luce**  
**esterna.**

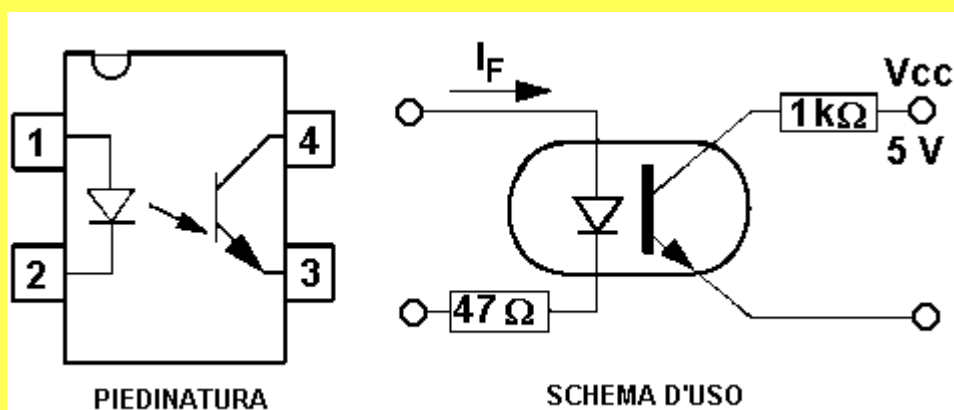
quando la FTG è illuminata, la sua resistenza diventa molto bassa e consente il passaggio di una corrente in grado di innescare il TRIAC.

Ad illuminare la fotoresistenza provvede il led inserito sul circuito di collettore del transistor che, nel vecchio circuito, comandava il relè.

L'accoppiamento del led con la fotoresistenza FTG, che permette di abbinare il funzionamento di due circuiti, senza collegarli dal punto di vista elettrico, si definisce "**opto-isolato**"; in pratica esiste un **accoppiamento di tipo ottico**, mentre si mantiene l'**isolamento elettrico** fra il circuito di comando e quello del TRIAC.

Perchè l'accoppiamento funzioni, il led e la fotoresistenza, montati uno di fronte all'altro, devono essere racchiusi in un involucro che non consenta il passaggio della luce esterna (**figura 18**).

I valori delle resistenze  $R_G$  ed  $FTG$  cambiano in funzione della tensione del secondario S2 e delle caratteristiche del triac che si usa; orientativamente, per  $R_G$  può essere adatto un valore di circa **4,7 K $\Omega$** , mentre la **fotoresistenza FTG** deve avere un valore dell'ordine delle **centinaia di K $\Omega$  al buio** e di **pochi K $\Omega$  alla luce**.



**figura 19 - ( fotoaccoppiatore SFH615 )**

In ogni caso, in commercio esistono, già confezionati, dei foto-accoppiatori, come il tipo SFH615 (**figura 19**), costituito da un **diodo al GaAs (Arseniuro di Gallio)** quale emettitore di **infrarossi** e da un transistor planare al silicio, come rivelatore, il tutto incapsulato in un involucro plastico **DIP-4**, ed in grado di garantire un sicuro isolamento fino a una tensione di lavoro di 400 [Vrms].

## **ATTENZIONE : PERICOLO DI FOLGORAZIONE !**



Coloro che intendono realizzare praticamente i circuiti qui descritti, devono porre in atto tutte le misure atte a garantire la personale incolumità; si ricorda infatti che, mentre i circuiti visti nelle lezioni precedenti erano alimentati a pile o a bassa tensione, i componenti come i TRIAC risultano direttamente collegati alla tensione 220 V di rete, con pericolo di scariche elettriche anche mortali per l'operatore.

**Si raccomanda quindi di :**

- **lavorare solo su piani di lavoro isolanti, come formica o legno**
- **scollegare l'alimentazione ogni volta che si procede ad una modifica del circuito**
- **lavorare stando seduti su pedane isolanti, facendo attenzione a non essere sudati e ad avere le mani ben Asciutte**
- **se possibile, effettuare le sperimentazioni interponendo un trasformatore 1:1 o "separatore di rete", in modo tale da essere in ogni caso elettricamente isolati dalla rete.**

# CONTROLLO DI POTENZA

## 1 Generalità sui tiristori

Il tiristore è l'organo di regolazione intrinseco in un regolatore di potenza a tiristori e lavora in linea di principio come interruttore elettronico che adempie un processo di commutazione in ogni semionda della rete di alimentazione. Come nel caso dei diodi anche nel caso dei tiristori il flusso di corrente è possibile in una sola direzione (senso diretto dall'anodo al catodo). Contrariamente ai diodi, che conducono immediatamente in presenza di tensione  $U_{AK}$  positiva, i tiristori bloccano la corrente in senso diretto fintantoché non vengono fatti commutare o, come si dice, non vengono "innescati" attraverso un impulso di comando al gate. Una volta innescati, la corrente  $I$  fluisce fino a quando il suo valore non va sotto al valore della corrente di mantenimento (holding current), cosa che nei circuiti a corrente alternata corrisponde al passaggio per lo zero di una delle due semionde della rete. Per poter alimentare un carico in corrente alternata con tiristori, sono sempre necessari due tiristori per fase (uno per la semionda positiva, l'altro per la semionda negativa) collegati in antiparallelo.

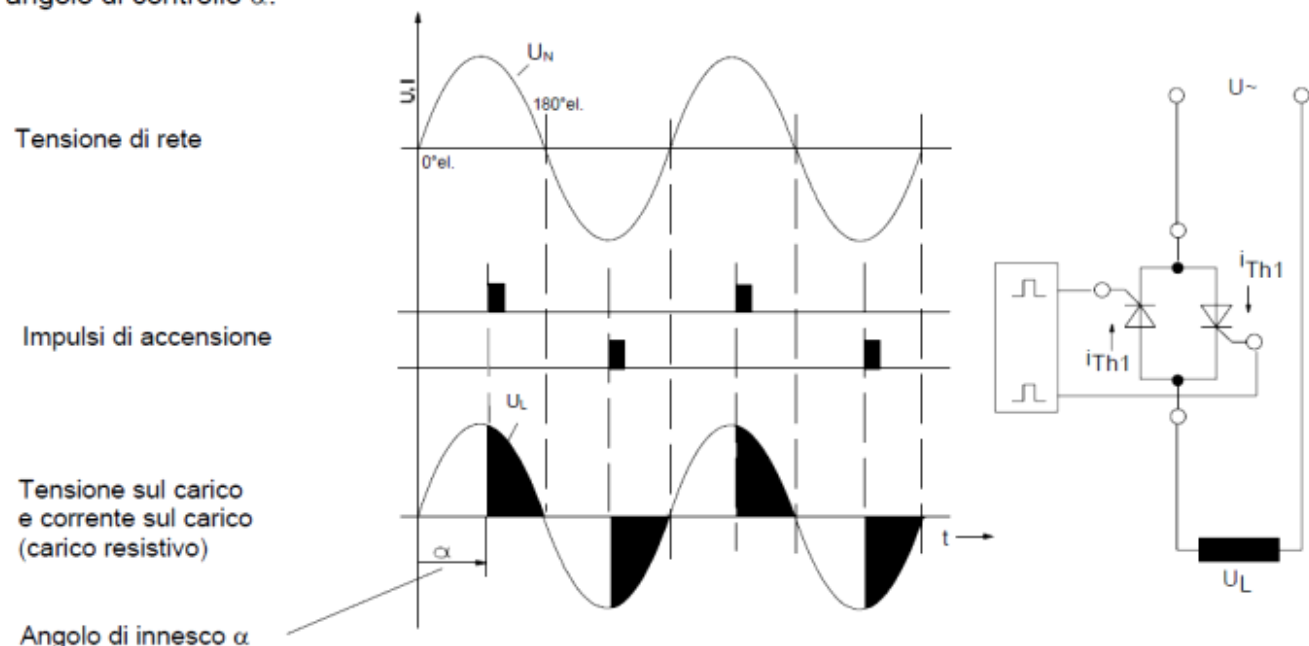
### 1.1 Generalità sul funzionamento e utilizzo dei convertitori di potenza a tiristori

#### 1.2 Modi di funzionamento

Ci sono fondamentalmente due procedimenti per poter variare la potenza fornita a un utilizzatore in corrente alternata. Si differenzia qui tra il principio del controllo a parzializzazione di fase (o a taglio di fase) e il principio del controllo a treni d'onda (o a ciclo d'onda completo). La scelta del modo di funzionamento dipende essenzialmente dal tipo di carico e dalla dinamica di regolazione del sistema. A titolo di esempio il controllo a parzializzazione di fase viene impiegato dove sono richiesti processi di regolazione veloci come ad esempio negli azionamenti per ventilatori /pompe, regolatori di flusso luminoso ma anche nei processi termotecnici con elevata dinamica termica o elementi scaldanti con grandi variazioni del rapporto  $R_{freddo} / R_{caldo}$ . Per contro, il controllo a treni d'onda è adatto all'impiego in presenza di costanti di tempo termiche di valore elevato come ad esempio nel caso dei forni di fusione, forni industriali, etc. (costanti di tempo di temperatura elevate).

##### 1.2.1 Controllo a parzializzazione di fase

Nel controllo a parzializzazione di fase il tiristore corrispondente viene nuovamente innescato in ogni semionda della rete per mezzo di un impulso di comando. La corrente attraverso ciascun tiristore scorre da questo istante di accensione fino al passaggio per lo zero naturale di ciascuna semionda sinusoidale. Spostando questo impulso di comando all'interno della semionda di tensione è possibile variare la tensione sul carico in modo praticamente continuo e in questo modo viene regolata la potenza trasferita al carico. Il campo di impostazione, nel quale l'impulso di tensione può essere spostato, si trova fra  $0^\circ$  el. e  $180^\circ$  el., dove  $0^\circ$  el. corrispondono al grado di pilotaggio massimo cioè alla piena tensione. Il punto di innesco (angolo di innesco) viene chiamato angolo di parzializzazione  $\alpha$  o angolo di controllo  $\alpha$ .



Andamento della tensione e della corrente nel pilotaggio con controllo a parzializzazione di fase



Questo modo di funzionamento è ugualmente adatto per l'impiego con carichi ohmici, ohmici-induttivi e induttivi.

I vantaggi di questo modo di funzionamento consistono nell'impostabilità in modo continuo, nella possibilità di dosaggio fine e nel rapido tempo di reazione del trasferimento di energia al carico.

Una limitazione dinamica della corrente è possibile solo con questo modo di funzionamento.

Gli svantaggi del controllo a parzializzazione di fase consistono nei rapidi fronti di salita delle semionde di rete tagliate e nei disturbi ad alta frequenza associati risultanti dalle armoniche che si presentano. Svantaggioso è anche l'insorgere di una potenza reattiva anche nel caso di carichi ohmici.

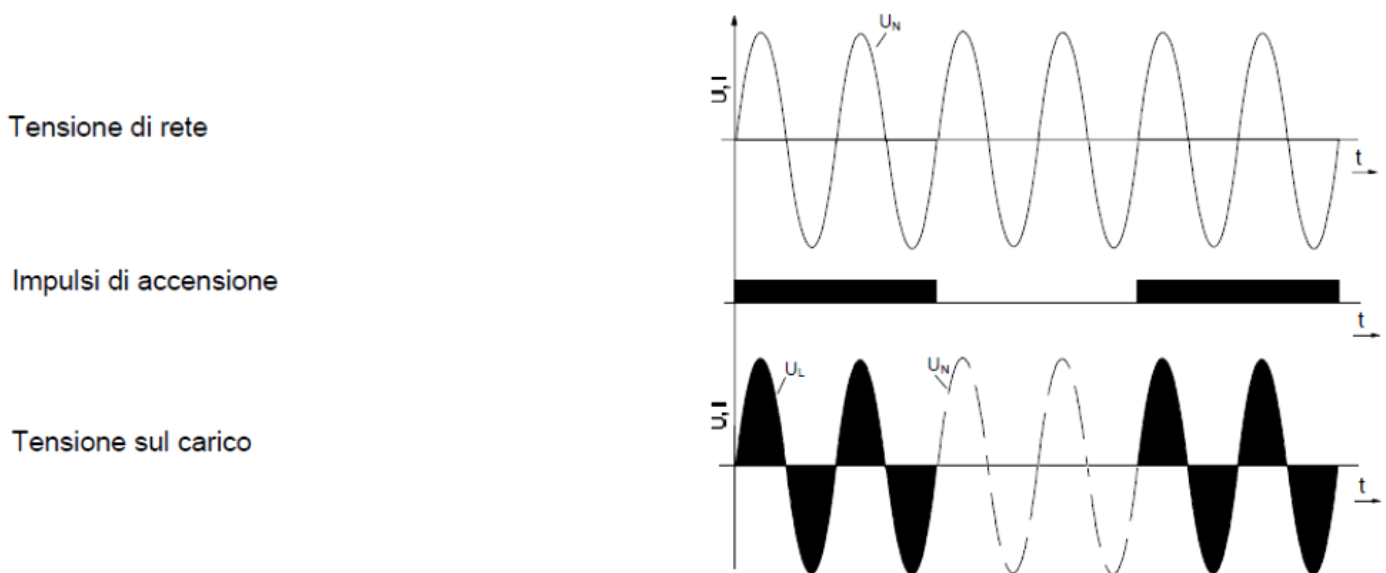
### 1.2.2 Controllo a treni d'onda

Nel modo di funzionamento con controllo a treni d'onda (o controllo a ciclo d'onda completo) vengono fatte passare semionde di rete complete come "pacchetti d'onda" con pause corte o più lunghe. Il valore della potenza viene fornito per mezzo del rapporto di inserzione (duty-cycle), tempo di inserzione su tempo di disinserzione. A causa della durata fissa del periodo della frequenza di rete data si ha allora un limite nel dosaggio della potenza al carico e quindi anche nella dinamica dell'intero sistema.

Vantaggioso è, nel controllo a treni d'onda, che la corrente nel carico è puramente sinusoidale e quindi non vengono generate armoniche e (con carico ohmico) non insorge potenza reattiva. Anche i disturbi a radiofrequenza sono minimi poiché i tiristori vengono innescati in corrispondenza del passaggio per lo zero della tensione.

Svantaggioso è che, a causa della sollecitazione ciclica sulla rete, possono insorgere nelle reti deboli fluttuazioni di tensione che possono portare ad esempio negli impianti di illuminazione a fastidiose fluttuazioni del flusso luminoso (flicker di tensione).

Funzionamento con controllo a treni d'onda



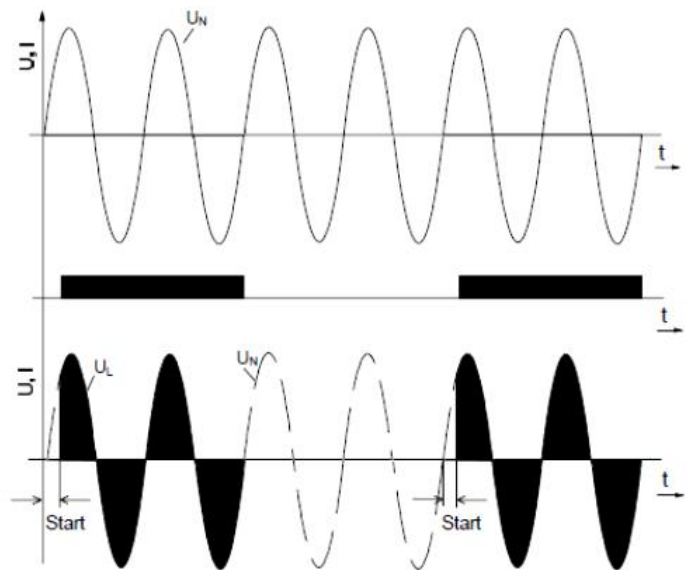
$$\text{Potenza } P = \frac{P_{\max} \cdot T_{\text{ein}}}{T} \quad \text{dove } T_{\text{ein}} = \text{tempo d'inserzione, } T = \text{durata del periodo}$$

### Funzionamento con controllo a treni d'onda

Tensione di rete

Impulsi di accensione

Tensione sul carico



Con i regolatori di potenza REOTRON serie MEW si può scegliere fra due modalità di funzionamento con controllo a treni d'onda:

- Durata del periodo fissa con cicli di commutazione lunghi di durata 5000 ms
- Tempo di ciclo variabile con differenti tempi di inserzione e disinserzione in base al valore di riferimento e della grandezza manipolata (senza taglio della prima semionda).