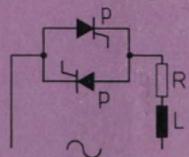
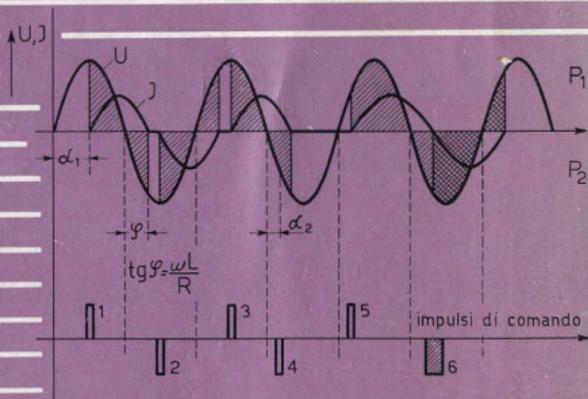
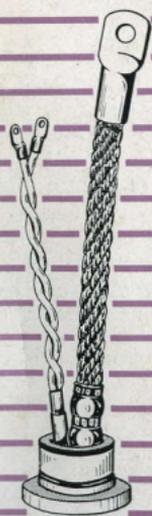


RUDOLF SWOBODA

THYRISTOR



Seguendo costantemente le norme CEI, le opere della
EDITORIALE DELFINO *facilitano la formazione pro-*
fessionale nella scuola e nell'industria.

DISEGNO ELETTROTECNICO

- G. Del Monaco - **Schemi elettrici - Convenzioni per impianti di energia.**
- G. Del Monaco - **Schemi elettrici funzionali.**
- G. Del Monaco - **Atlante dei circuiti.**
- G. Del Monaco - V. Re - **Disegno elettrotecnico ed elettromeccanico.**

MISURE ELETTRICHE

- E. Cometta - L. Cibrario - **Unità di misura.**
- E. Cometta - **Riduttori di misura.**
- E. Cometta - **Misura delle temperature.**
- A. Bandini Buti - **I nomogrammi per l'elettrotecnico.**
 - A. Bossi - E. Coppi - **Metodi di misura nei circuiti a corrente continua.**
- A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Misure elettriche: strumenti e metodi di misura.**
- A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Prove e collaudi delle macchine e degli impianti.**
- A. Bandini Buti - **Elettrotecnica pratica: misure elettriche.**
 - A. Bossi - **La tecnica delle prove ad impulsi.**
- D. Armanini - A. Bandini Buti - **Teoria e tecnica delle misure elettriche.**

MACCHINE ELETTRICHE

- E. Carbone - **Costruzione e calcolo dei piccoli trasformatori.**
- M. Rossini - **Progettazione e calcolo dei motori asincroni trifasi di piccola e media potenza.**
- M. Bertolini - **Motori elettrici di piccola e piccolissima potenza.**
- F. Pezzoli - V. Re - **Protezione delle macchine elettriche.**
- P. L. Cerato - **Gruppi Ward Leonard: composizione, funzionamento, realizzazioni elettroniche, applicazioni.**
- A. Bandini Buti - **Elettrotecnica pratica: macchine elettriche.**
 - M. Borsani - **Calcolo e progetto dei trasformatori industriali.**
 - G. Paleari - **Installazione e manutenzione dei trasformatori.**

MECCANICA

- F. Pasqualini - **Tracclatura d'officina.**
- M. Lensi - **Saldatura ossiacetilenica.**
- C. Clerici - **Disegno tecnico: problemi fondamentali grafici e geometrici.**
- C. Clerici - **Convenzioni del disegno tecnico e degli organi delle macchine.**

Swoboda - Thyristor

THYRISTOR

REPORT

of the

RUDOLF SWOBODA

THYRISTOR

EDITORIALE DELFINO - MILANO

Titolo originale dell'opera: Thyristoren

Edizione originale © Franckh'sche Verlagshandlung, Telekosmos-Verlag,
Stoccarda

Traduzione dal tedesco a cura del dott. ing. Emilio Cometta

Stampato in Italia 1967 - Unione Tipografica - Via Pace, 19 - Milano

Prefazione all'edizione italiana.

Rudolf Swoboda è uno dei pochi specialisti nel campo, ancora relativamente nuovo, dei thyristor, ai quali sin dal 1953 dedica in modo esclusivo la sua attività presso una delle più grandi Industrie elettrotecniche europee.

Siamo lieti di presentare qui la traduzione italiana di un suo volume, nel quale egli illustra le caratteristiche dei thyristor e ne descrive, in base ad esempi pratici, le più importanti modalità di impiego.

«Thyristor» è parola nuova, coniata dalla fusione dei termini «transistor» e «thyatron»: si tratta dunque di un diodo a semiconduttore controllato per mezzo di un terzo elettrodo (analogamente al transistor) però previsto per correnti elevate e soprattutto tale che non è possibile in generale agire sul regime di scarica mediante il terzo elettrodo (e in ciò il funzionamento è analogo a quello del tiratron, che per altro è un tubo a gas).

Qualche parola di giustificazione merita forse la grafia «thyatron» adottata nella presente traduzione.

Dall'inglese «transistor» si è fatto l'italiano «transistore» e dall'inglese «thyatron» si è fatto l'italiano «tiratron», termini questi entrambi accolti, oltre che dall'uso comune, anche dal Vocabolario Elettrotecnico Internazionale edito dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale.

Da «thyristor» si sarebbe potuto analogamente scrivere in italiano «tiristore». Ma poichè tale termine non è stato ancora considerato dalla suddetta Commissione Elettrotecnica Internazionale, abbiamo preferito conservare la grafia inglese «thyristor», analogamente a quanto si è fatto per tanti altri vocaboli, quali appunto anche «transistor» e «thyatron», agli inizi dell'impiego di questi componenti elettronici.

In ogni caso non riteniamo accettabile il termine ibrido «thyristore», che pure abbiamo visto usato.

First paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Second paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Third paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Fourth paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Fifth paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Sixth paragraph of faint text, appearing as a light grey block.

Prefazione all'edizione originale.

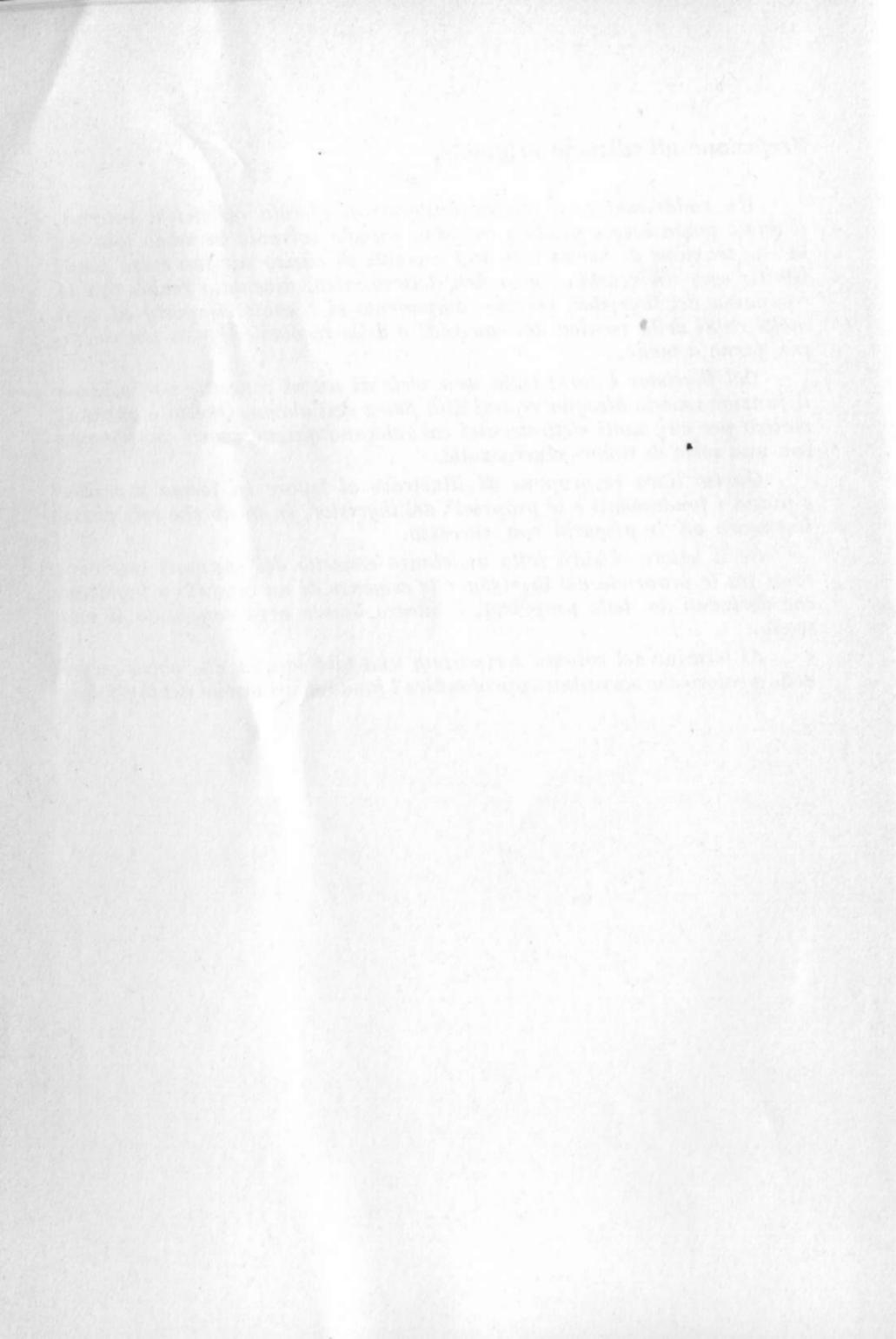
Un raddrizzatore a semiconduttore con piccola resistenza interna, il quale possa essere pilotato con una piccola corrente in modo tale che la sua tensione di uscita o la sua corrente di carico variino entro ampi limiti: ecco un vecchio sogno dell'elettrotecnico, diventato realtà con la comparsa del thyristor. Questo componente si è subito imposto ed oggi molti rami della tecnica dei comandi e delle regolazioni non potrebbero più farne a meno.

Col thyristor è sorta tutta una serie di nuovi concetti; per capirne il funzionamento bisogna rifarsi alla fisica dell'atomo. Questo è anche il motivo per cui molti elettrotecnici considerano questo nuovo componente con una sorta di timore reverenziale.

Questo libro si propone di illustrare al lettore in forma semplice e piana i fondamenti e le proprietà del thyristor, in modo che egli possa imparare ad impiegarlo con successo.

Se il lettore si sarà fatto un chiaro concetto dei rapporti intercorrenti fra le proprietà del thyristor e le esigenze di un circuito a thyristor che derivano da dette proprietà, il nostro lavoro avrà raggiunto il suo scopo.

Al termine del volume è riportata una bibliografia, che potrà essere utile a coloro che vorranno approfondire i fondamenti teorici del thyristor.



INDICE DEGLI ARGOMENTI

Generalità	11
Funzionamento del thyristor	14
Proprietà del thyristor	19
Protezione dei thyristor	31
Collegamento in parallelo e in serie di thyristor	37
Situazione attuale e previsioni sullo sviluppo futuro	41
Circuiti di comando	44
Impiego dei thyristor.....	58

1. GENERALITÀ.

Il thyristor è un raddrizzatore al silicio pilotabile. Esso si differenzia da un normale raddrizzatore al silicio per il fatto che può interdire il passaggio della corrente in entrambe le direzioni. Nella direzione di passaggio può venire reso conduttore mediante un impulso su un elettrodo di pilotaggio. Quando la corrente che percorre un thyristor scende al disotto di un determinato valore minimo, il thyristor medesimo si porta allo stato non conduttore. Il funzionamento del thyristor è molto simile a quello del thyatron, rispetto al quale presenta però tutta una serie di vantaggi. Il thyristor non necessita di una corrente di riscaldamento ed è perciò subito pronto a funzionare. La potenza di pilotaggio del thyristor è notevolmente inferiore a quella richiesta da un thyatron di caratteristiche paragonabili. Nel thyristor la caduta di tensione nella direzione di passaggio della corrente (e quindi la perdita di potenza) è notevolmente inferiore: circa 1 V contro 15 V del thyatron. Il tempo di ripristino del thyristor è notevolmente minore del tempo di deionizzazione del thyatron. Le dimensioni del thyristor sono molto inferiori e la robustezza meccanica superiore a quelle del thyatron.

Il thyristor viene impiegato con successo in misura sempre crescente, grazie alle sue ottime qualità. In conseguenza della sua rapidità di funzionamento, esso trova impiego anche nella tecnica dei comandi e delle regolazioni, in quei circuiti di potenza nei quali la corrente deve venire comandata rapidamente, senza contatti e con perdite limitate.

Mentre nei circuiti di regolazione, nei quali i fenomeni spesso avvengono con grande rapidità, si utilizzano transistori, l'impiego di questi è antieconomico o addirittura impossibile quando si devono comandare direttamente i circuiti di potenza degli organi di comando, con tensioni e correnti elevate.

Con i thyristor si possono invece realizzare circuiti che consentono di comandare senza contatti, potenze notevoli con tensioni elevate.

Particolarmente vantaggiosa per gli anelli di regolazione è la forte amplificazione che può essere conseguita con i thyristor.

I thyristor attualmente disponibili consentono correnti di passaggio con valori medi aritmetici compresi fra meno di 1 A e oltre 200 A. Le tensioni inverse massime vanno da 50 V a 1200 V (valore di cresta).

I valori indicati dai costruttori sono valori limite assoluti, che non devono in nessun caso venire superati (in inglese: maximum

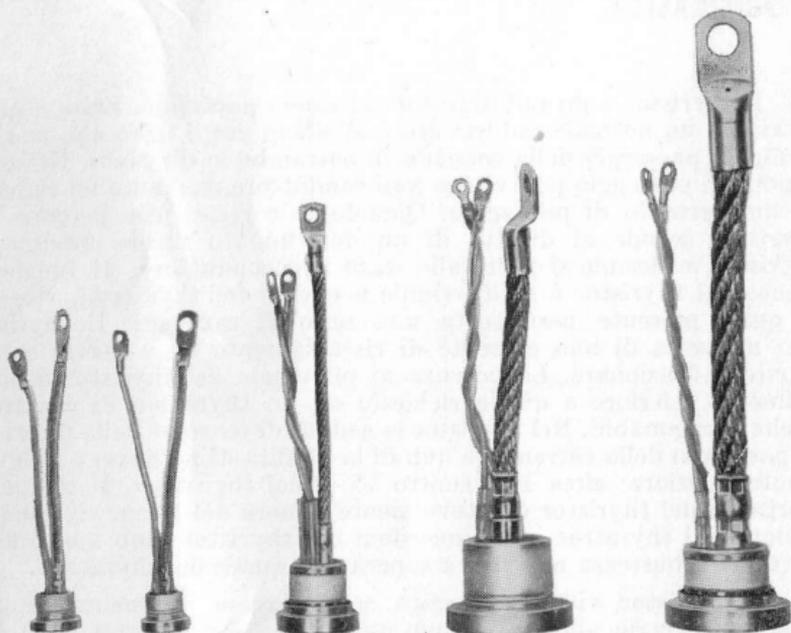


Fig. 1 - Thyristor per correnti nominali da 10 A a 170 A.

rating system). La tensione effettiva di alimentazione viene determinata dividendo la tensione inversa massima per un fattore di sicurezza (derating factor), che viene scelto fra 1,5 e 2,5 a seconda della applicazione

1.1 Costruzione meccanica del thyristor.

I quattro strati del thyristor possono venire ottenuti con diversi procedimenti. La figura 2 rappresenta un caso nel quale si è fatto ricorso sia alla tecnica della diffusione che alla tecnica della lega. Per chiarezza, i rapporti fra le dimensioni delle varie parti rappresentate nella figura 2 sono fortemente distorti. Per esempio il disco di cristallo di una cella da 15 A ha uno spessore di 0,2 mm ed un diametro di 7 mm.

Il materiale di base è un disco di silicio di dotazione n . In esso vengono diffusi atomi estranei di un elemento del III gruppo del

sistema periodico. Si formano in tal modo su entrambe le facce zone di dotazione p .

Lo strato (5) di dotazione n indicato in figura viene ottenuto per mezzo di un processo di lega. I collegamenti per l'anodo, per il catodo e per l'elettrodo di pilotaggio vengono pure ottenuti per mezzo del procedimento di lega.

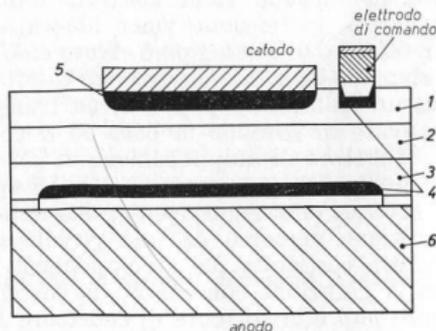


Fig. 2 - Rappresentazione schematica di un thyristor.

- 1 = strato di dotazione p (diffuso)
- 2 = strato di dotazione n (materiale di partenza)
- 3 = strato di dotazione p (diffuso)
- 4 = strati di dotazione p^* (legati)
- 5 = strato di dotazione n (legato)
- 6 = piastra di base

Il disco di cristallo viene fissato con la faccia anodica su una spessa base di rame, onde assicurare un buon disperdimento di calore verso il corpo raffreddante.

La piastra di base costituisce contemporaneamente il supporto della cella. Essa è rettificata ed argentata, onde assicurare una bassa resistenza termica verso il corpo raffreddante.

La superficie del cristallo è protetta da uno strato di lacca. Il tutto viene racchiuso in un involucro a tenuta d'aria. I collegamenti per il catodo e per l'elettrodo di pilotaggio sono incorporati in passanti di vetro. L'involucro è riempito con gas protettivo.

Un involucro perfettamente a tenuta di gas è il presupposto fondamentale per un buon thyristor, di lunga durata e di caratteristiche costanti.

2. FUNZIONAMENTO DEL THYRISTOR.

Il thyristor ha due strati di dotazione *p* e due strati di dotazione *n* (si veda la figura 3). Esso possiede tre elettrodi: l'anodo *A*, il catodo *K* e l'elettrodo di pilotaggio *St*. Se si applica al thyristor una tensione continua nel senso della conduzione (polo positivo all'anodo), con thyristor interdetto, la tensione viene sbarrata dalla giunzione *S*₂. Se si inverte la polarità, la tensione viene bloccata dalle giunzioni *S*₁ e *S*₃ ovvero, se il circuito di pilotaggio è chiuso cioè se *St* è collegato con *K*, solo dalla giunzione *S*₁. Il thyristor può essere concepito come la combinazione di un transistor *pnp* e di un transistor *nnp*, collegati in modo da avere in comune la base ed il collettore (fig. 3). Indichiamo con α_1 il fattore di amplificazione di corrente del transistor *pnp* e con α_2 quello del transistor *nnp*. Se si applica fra anodo e catodo, con elettrodo di pilotaggio aperto, una debole tensione positiva, il thyristor viene percorso da una piccolissima corrente *I*, che si può considerare costituita da 3 componenti: la corrente residua *I*₀ attraverso la giunzione comune *S*₂, la corrente di collettore $I \cdot \alpha_1$, del transistor *pnp* e la corrente di collettore $I \cdot \alpha_2$ del transistor *nnp*:

$$I = I_0 + I \cdot \alpha_1 + I \cdot \alpha_2 \quad [1]$$

$$I - I \cdot \alpha_1 - I \cdot \alpha_2 = I_0 \quad [2]$$

$$I \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_0 \quad [3]$$

$$I = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad [4]$$

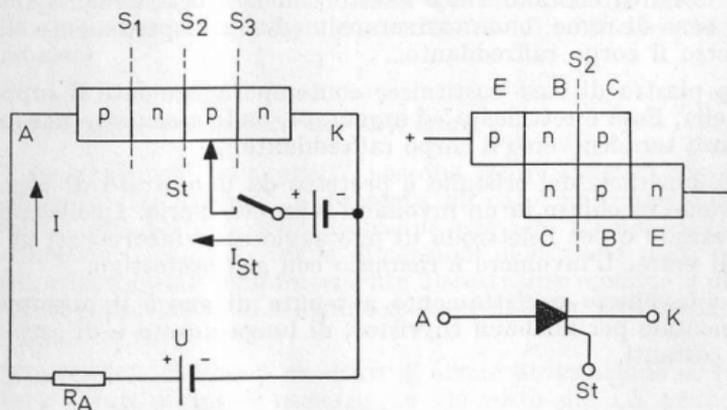


Fig. 3 - Costituzione e segno grafico del thyristor.

2.1 L'inserzione del thyristor.

I fattori di amplificazione α_1 e α_2 con correnti molto piccole sono minori di 0,5.

2.1.1 Inserzione per superamento della tensione di basculamento U_{NK} .

Con l'aumentare della tensione applicata, aumenta anche la corrente I .

Poichè nel campo delle piccole correnti, i fattori di amplificazione crescono al crescere della corrente, aumentano anche α_1 ed α_2 , fino a che la loro somma raggiunge il valore 1. Dalla equazione [4] risulta che la corrente I tenderebbe ora ad assumere un valore infinitamente grande, se non venisse limitata dalla resistenza del carico R_A . Il thyristor pertanto si porta improvvisamente nello stato di conduzione, cioè si inserisce o si innesca, come anche si dice.

2.1.2 Inserzione mediante la corrente di innesco I_z inviata mediante l'elettrodo di pilotaggio.

L'inserzione del thyristor può essere provocata anche inviando al catodo, attraverso l'elettrodo di pilotaggio, una corrente di innesco. La corrente che percorre il tratto pn comanda la giunzione comune S_2 .

Col crescere della corrente crescono anche α_1 e α_2 fino a che la loro somma è uguale ad 1. Il thyristor allora passa in stato di conduzione.

2.1.3 Inserzione in conseguenza di una eccessiva velocità di aumento della tensione du_{AK}/dt .

Un altro modo per portare il thyristor dallo stato non conduttore allo stato conduttore consiste nel dare una forte pendenza (du/dt) alla velocità di aumento della tensione, naturalmente applicata nel senso di conduzione. In questo caso entrano in gioco le caratteristiche capacitive della giunzione. La corrente di carica che percorre la capacità della giunzione è proporzionale alla velocità di aumento della tensione:

$$I_{AK} = C \cdot U_{AK} \cdot \frac{du_{AK}}{dt} \quad [5]$$

Tale corrente, se di adeguato valore, produce il medesimo effetto della corrente di innesco che percorre il circuito di pilotaggio. L'in-

serzione del thyristor senza impulso di pilotaggio viene in generale evitata se la velocità di aumento della tensione è:

$$\frac{du}{dt} \leq 20 \frac{V}{\mu s}$$

La velocità critica di aumento della tensione in un thyristor dipende da:

- 1) temperatura della giunzione T_{Sp} ;
- 2) valore massimo della tensione di blocco positiva U_{AK} ;
- 3) corrente di pilotaggio I_{StK} o I_{KSt} .

Applicando al circuito di pilotaggio, nel senso di blocco, una tensione di polarizzazione U_{KSt} , il valore critico di du/dt viene spostato, sia pure di poco, verso valori più elevati.

In condizioni di funzionamento normali, il thyristor deve venire portato in stato di conduzione solo mediante l'elettrodo di pilotaggio. L'inserzione conseguente al superamento della tensione di basculamento U_{NK} deve venire evitata, perchè si creano elevate intensità di campo locali sulla superficie dell'elemento, le quali possono provocare scariche elettriche superficiali e quindi la distruzione del thyristor.

2.1.4 Corrente e caratteristica di inserzione.

La corrente necessaria per innescare un thyristor, cioè per portarlo in stato di conduzione, è molto piccola rispetto alla corrente di

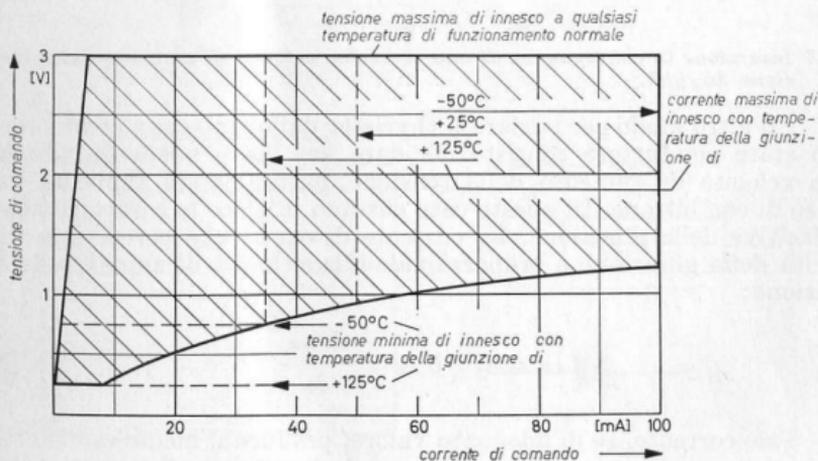


Fig. 4 - Caratteristica di innesco di un thyristor.

passaggio. Come tutte le caratteristiche dei semiconduttori, essa dipende in grande misura dalla temperatura.

Il campo di dispersione è notevolmente ampio. Nella figura 4 è rappresentata la caratteristica tipica di inserzione di un thyristor con corrente di passaggio di 15 A. Da questa caratteristica si ricava che con temperatura della giunzione di 25 °C, nel caso più sfavorevole occorre una corrente di pilotaggio di 50 mA ed una tensione di 3 V.

2.1.5 Durata dell'impulso di innesco.

La durata dell'impulso di innesco (di pilotaggio) occorrente dipende dalle caratteristiche del circuito di carico. Con carico puramente ohmico è sufficiente un impulso di 10 μ s. Con carico fortemente induttivo gli impulsi di innesco devono avere una durata sensibilmente superiore. In genere si evitano impulsi di durata eccessiva, onde tenere piccole le perdite di potenza di pilotaggio. Se il circuito di carico contiene induttanze molto forti, si possono collegare in parallelo ad esse elementi costituiti da una resistenza e da una capacità in serie; in tal modo si ottiene che la corrente di mantenimento venga sicuramente superata anche con impulsi di pilotaggio relativamente brevi.

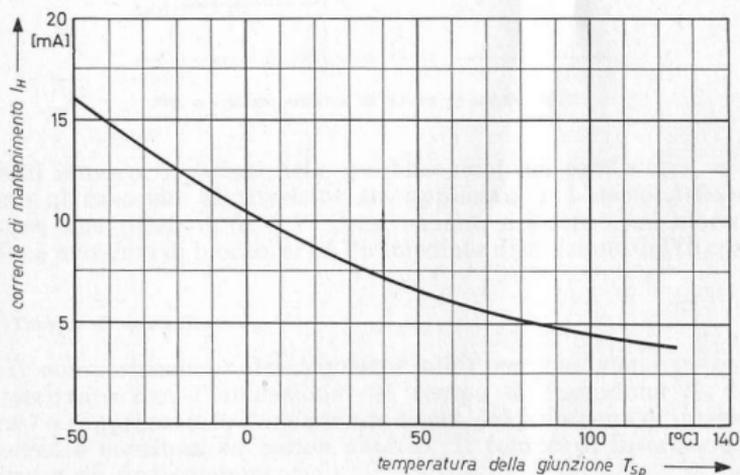


Fig. 5 - Relazione fra la temperatura T_{Sp} della giunzione e la corrente di mantenimento I_H .

2.1.6 Interdizione del thyristor mediante interruzione del circuito o riduzione della corrente sotto il valore di mantenimento I_H .

Un thyristor reso conduttore mediante un impulso di innesco applicato nel senso della conduzione non può più venire influenzato mediante l'elettrodo di pilotaggio.

L'interdizione del thyristor si può ottenere soltanto interrompendo il circuito di carico oppure aumentandone la resistenza al punto che la corrente scenda sotto il valore di mantenimento I_H .

La corrente di mantenimento dipende solo in misura ridotta dalla corrente di pilotaggio. Notevolmente maggiore è l'influenza della temperatura della giunzione (fig. 5): se questa supera il valore massimo ammissibile, il thyristor perde la sua capacità di interdire la corrente, cioè non può più essere reso non conduttore.

3. PROPRIETÀ DEL THYRISTOR.

3.1.1 Caratteristica di funzionamento del thyristor.

La figura 6 mostra l'andamento tipico della caratteristica di un thyristor. U_{NK} è la tensione di basculamento, cioè la tensione alla quale il thyristor diventa conduttore con circuito di pilotaggio aperto, ossia con corrente di pilotaggio nulla. Se il circuito di pilotaggio è percorso da corrente, la tensione di basculamento diminuisce al crescere della corrente di pilotaggio medesima. La minima tensione U_{AK} , per la quale il thyristor può ancora essere reso conduttore, è dell'ordine di grandezza di 1,2 V. I valori della corrente e della ten-

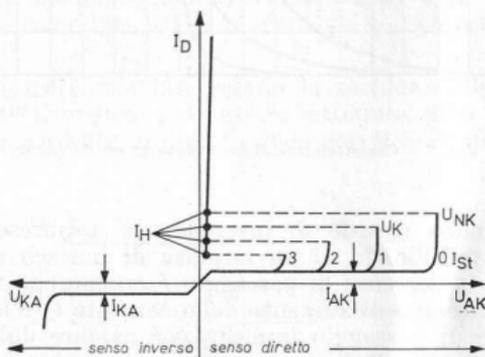


Fig. 6 - Caratteristica di lavoro di un thyristor.

sione di innesco, riportati nelle pubblicazioni dei produttori, si riferiscono al caso che al thyristor sia applicata, nel senso della conduzione, una tensione di 6 V. Se si supera, nel senso del blocco, la tensione massima di blocco, si ha l'immediata distruzione del thyristor.

3.1.2 Tempo di inserzione t_E

Il comportamento del thyristor all'inserzione viene in genere caratterizzato con l'indicazione del tempo di inserzione t_E . Nella figura 7 è rappresentato l'andamento tipico del fenomeno di inserzione di corrente continua su carico ohmico. Il tempo di inserzione t_E è costituito da due componenti:

$$t_E = t_v + t_A \quad [6]$$

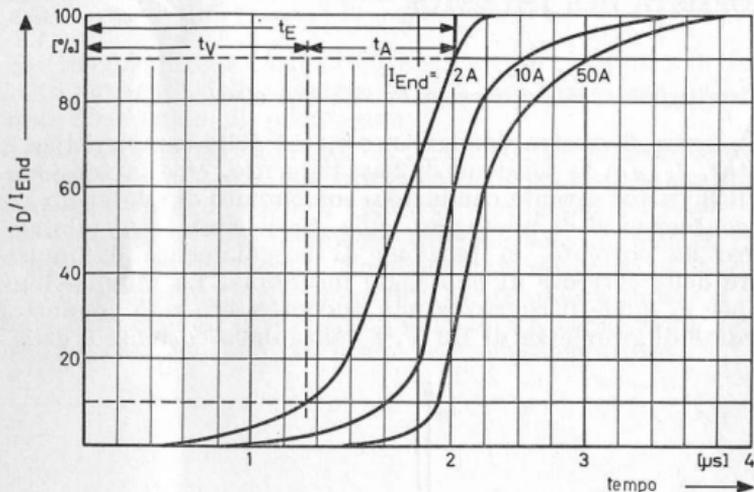


Fig. 7 - Caratteristica di inserzione di un thyristor.

t_v viene chiamato ritardo di inserzione e rappresenta il tempo che intercorre fra l'inizio di un impulso di innesco molto ripido e l'istante in cui la corrente di passaggio I_D raggiunge il 10% del suo valore finale. Il tempo di aumento della corrente t_A è invece il tempo che la corrente di passaggio impiega per passare dal 10% al 90% del suo valore finale. Tale tempo non può venire influenzato mediante l'elettrodo di pilotaggio. Il ritardo di inserzione invece dipende dal valore e dalla pendenza dell'impulso di innesco. Anche la tensione agli elettrodi del thyristor nel senso della conduzione si riduce, dopo l'inserzione, al valore della caduta di tensione di passaggio, secondo una determinata funzione del tempo.

Ne consegue che se la velocità di aumento della corrente di/dt è molto grande, si possono avere notevolissime perdite all'inserzione, specialmente alle frequenze elevate.

3.1.3 Velocità di aumento della corrente di/dt .

Se la velocità di aumento della corrente di/dt è superiore al valore massimo ammesso per il thyristor, essa deve venire limitata mediante un elemento esterno (ad esempio mediante una reattanza).

In genere si ammette come limite massimo di di/dt un valore di 20 fino a 25 A/ μ s. Il motivo di ciò consiste nel fatto che immedia-

tamente dopo l'innesco, soltanto una piccola zona del cristallo, nelle immediate vicinanze dell'elettrodo di pilotaggio, diventa conduttrice.

Perchè l'intera superficie diventi conduttrice occorre un tempo determinato e finito, dipendente dalle caratteristiche geometriche del cristallo (velocità di propagazione). Un troppo ripido aumento della corrente ha quindi per conseguenza elevatissime densità di corrente su piccole superfici parziali, il che può condurre alla distruzione del thyristor.

3.1.4 Processo di disinserzione.

In linea di principio un thyristor può venire portato allo stato non conduttore mediante una corrente negativa di pilotaggio. Ciò può però essere raggiunto solo con elementi con correnti di passaggio molto basse.

Con le intensità che interessano la tecnica delle correnti forti l'estinzione del thyristor può essere ottenuta solo riducendo per breve tempo la corrente al disotto della corrente di mantenimento.

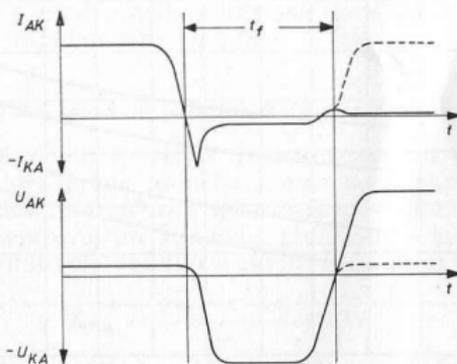


Fig. 8 - Caratteristica di disinserzione di un thyristor.

Anche il processo di interruzione ha una durata finita; il suo andamento nel caso di circuito puramente ohmico è rappresentato schematicamente nella figura 8. La corrente diminuisce rapidamente. Al passaggio della corrente per lo zero la cella è però ancora conduttrice per effetto dei portatori di cariche in essa accumulati. La corrente pertanto sale per un tempo brevissimo in senso inverso. Sol-

tanto quando tutti i portatori di cariche sono stati eliminati dalla zona di passaggio $p-n$ la cella raggiunge le condizioni di interdizione. La corrente inversa dopo avere raggiunto il valore massimo diminuisce (molto rapidamente all'inizio) fino al valore statico.

3.1.5 Tempo di ripristino t_f .

Il tempo che intercorre fra l'istante in cui la corrente passa per lo zero e l'istante in cui il thyristor riacquista la sua piena capacità di interdizione nel senso della conduzione viene chiamato tempo di ripristino. Esso è un elemento caratteristico particolarmente importante, perchè da esso dipende la frequenza massima di lavoro alla quale può venire impiegato un determinato thyristor. Il tempo di ripristino è compreso fra 10 e 100 μs , a seconda del tipo di thyristor. Nella figura 9 è rappresentato l'andamento tipico della relazione in-

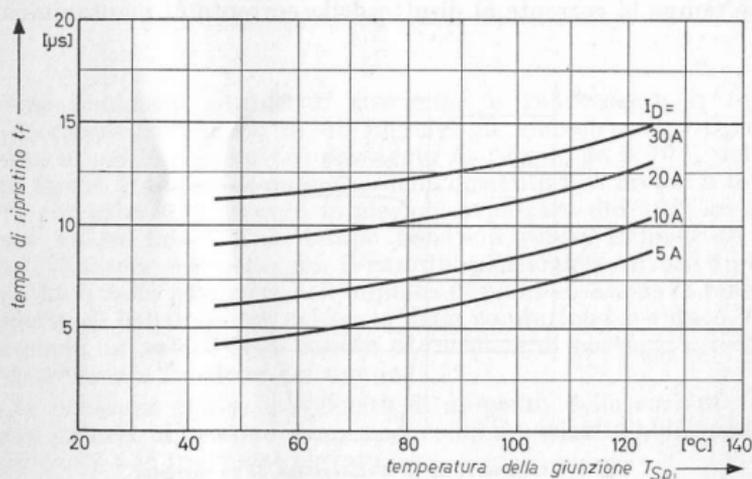


Fig. 9 - Relazione fra la temperatura della giunzione e il tempo di ripristino di un thyristor. Come parametro è indicata la corrente di passaggio.

tercorrente fra il tempo di ripristino e la temperatura della giunzione. (Anche in questo caso si tratta di un thyristor con corrente di passaggio di 15 A).

Oltre che dalla temperatura della giunzione, il tempo di ripristino dipende dalle seguenti grandezze:

- 1) corrente di passaggio I_D prima della interdizione;
- 2) corrente inversa I_{KA} ;
- 3) tensione inversa U_{KA} ;
- 4) tensione nel senso della conduzione U_{AK} ;
- 5) velocità di aumento della corrente di_{KA}/dt nel senso inverso;
- 6) velocità di aumento della tensione du_{AK}/dt nel senso della conduzione.

3.2 Caratteristiche termiche.

3.2.1 Limite di riscaldamento.

Poichè le caratteristiche più importanti di un thyristor dipendono in larga misura dalla temperatura e particolarmente per il fatto che oltre un determinato valore critico della temperatura T_{Sp} della giunzione il potere di interdizione di un thyristor diminuisce rapidamente, il calore prodotto nella giunzione deve venire dissipato verso l'esterno il più rapidamente possibile.

3.2.2 Dissipazione del calore di perdita; resistenza termica interna R_{ith} .

La capacità di un thyristor di trasmettere al supporto del suo involucro il calore prodotto nella giunzione è caratterizzata dalla resistenza termica interna R_{ith} . Questa a sua volta è data dalla differenza fra la temperatura T_{Sp} della giunzione e la temperatura T_G del supporto dell'involucro, divisa per la potenza di perdita.

$$R_{ith} = \frac{T_{Sp} - T_G}{P_V} \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad [7]$$

3.2.3 Corpi raffreddanti, resistenza di scambio di calore R_{ath} .

Per meglio disperdere il calore dall'involucro (la cui temperatura è T_G) all'ambiente (la cui temperatura è T_U), si impiegano corpi raffreddanti particolarmente indicati per ciascun tipo di thyristor. Anche per essi si ha:

$$R_{ath} = \frac{T_K - T_U}{P_V} \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad [8]$$

La superficie di tali corpi raffreddanti deve essere il più possibile estesa, pur rimanendo isotermica; essa deve cioè avere temperatura uniforme dal punto di fissaggio del thyristor sino al margine. Una simile caratteristica può essere ottenuta dando forma opportuna ai corpi raffreddanti.

3.2.4 Rappresentazione del flusso termico, circuito equivalente termico per condizioni stazionarie del carico.

La potenza dissipata dal thyristor può essere considerata come un flusso di calore che si propaga dalla giunzione all'ambiente, attraverso il corpo raffreddante. Ogni elemento ha una certa capacità termica ed oppone una determinata resistenza al flusso di calore.

Simili circuiti termici possono venire calcolati in modo analogo ai circuiti elettrici. Così per esempio la resistenza di scambio di calore R_{ath} del corpo raffreddante che dissipa una determinata potenza avrà il valore:

$$R_{ath} = \frac{T_{Sp\ max} - P_V \cdot R_{ith} - P_V \cdot R_{uth} - T_U}{P_V} \quad [9]$$

In questa formula R_{uth} rappresenta la resistenza termica fra la base dell'involucro del thyristor e il corpo raffreddante. Indichiamo qui di seguito alcuni valori numerici di R_{ith} e R_{ath} , allo scopo di dare al lettore una idea dell'ordine di grandezza delle varie resistenze termiche:

R_{ith} per una cella da 15 A: 1,1 °C/W;

R_{ith} per una cella da 180 A: 0,15 °C/W;

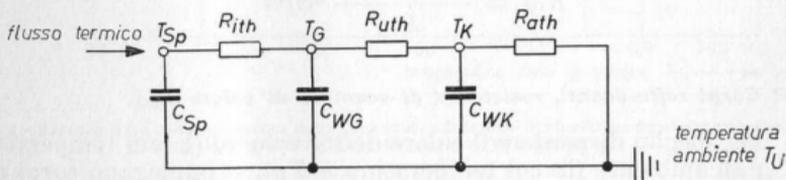


Fig. 10 - Circuito equivalente di un circuito termico.

T_{Sp} - Temperatura della giunzione
 T_G - Temperatura della custodia
 T_K - Temperatura del corpo raffreddante

e per i corrispondenti corpi raffreddanti:

R_{ath} per una cella da 15 A: con ventilazione naturale 1,25 °C/W,
con ventilazione forzata 0,4 °C/W;

R_{ath} per una cella da 180 A: con ventilazione naturale 0,55 °C/W,
con ventilazione forzata 0,15 °C/W.

La resistenza termica di passaggio dalla base dell'involucro al corpo raffreddante è compresa nei valori di R_{ath} relativi al corpo raffreddante medesimo. Nel caso di ventilazione forzata si suppone che l'aria abbia la velocità di 6 m/s.

I costruttori indicano per ciascun tipo di thyristor i valori delle resistenze suddette.

3.3 Caricabilità del thyristor.

3.3.1 Corrente di passaggio e corrente nominale.

La corrente massima ammissibile per un thyristor dipende sostanzialmente dalla efficacia del raffreddamento. I costruttori indicano come corrente nominale il valore medio aritmetico (riferito all'intero periodo) della corrente di passaggio ammissibile permanentemente con circuito monofase a semionda a carico ohmico.

I valori della corrente nominale sono validi solo se il thyristor è impiegato coi corpi raffreddanti per i quali i valori medesimi sono stati determinati.

Essi inoltre si riferiscono ad una temperatura del mezzo raffreddante di 45 °C nel caso di raffreddamento naturale e di 35 °C nel caso di raffreddamento forzato.

3.3.2 Valore di picco periodico della corrente.

Il valore di picco periodico della corrente è quel valore di picco che si ripete ad ogni periodo, anche con corrente non sinusoidale. Pure in quest'ultimo caso, il valore medio della corrente non deve superare il valore nominale, di cui si è detto al paragrafo 3.3.1.

3.3.3 Corrente a impulso.

Un indice della bontà del thyristor nel senso della conduzione è il valore massimo istantaneo dell'impulso di corrente, in forma di una semionda sinusoidale a 50 Hz, che il thyristor medesimo può

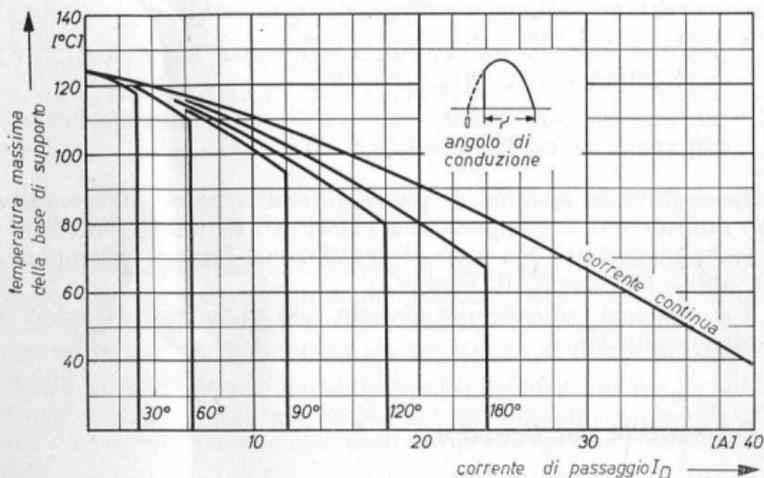


Fig. 11 - Temperatura massima ammissibile della base di supporto di un thyristor in funzione della corrente sinusoidale di passaggio.

soportare per una volta, al di fuori delle condizioni normali di funzionamento. Dopo un siffatto impulso, deve intervenire una pausa di almeno 1 minuto. Una sollecitazione di questo genere può verificarsi solamente in caso di guasto, ma mai in funzionamento normale.

I costruttori forniscono per ciascun tipo di thyristor curve caratteristiche che indicano il valore medio della corrente di passaggio ammissibile in funzione della temperatura della base del thyristor o della temperatura ambiente. La figura 11 rappresenta una famiglia di curve relative ad un thyristor da 15 A. Le curve indicano la temperatura massima ammissibile della base del thyristor, in funzione del valore I_D della corrente di passaggio. Come parametro è indicato l'angolo elettrico entro il quale il thyristor è in stato di conduzione. Queste curve consentono al progettista, mediante la misura della temperatura della base, di controllare l'esattezza dei suoi calcoli ed eventualmente di cambiare il tipo di thyristor adottato. Sul fianco della base dell'involucro di ogni thyristor è praticato un forellino, destinato a consentire una esatta misura della temperatura.

3.3.4 Limitazione della corrente con piccoli angoli di conduzione.

Dalle curve caratteristiche risulta evidente che con piccoli angoli di conduzione la corrente di passaggio deve essere ridotta. Il motivo di ciò risiede nel fatto che il valore di picco periodico ammissibile ver-

rebbe di gran lunga superato se durante il breve tempo corrispondente ad un piccolo angolo di conduzione passasse una corrente di intensità tale da dare, come media aritmetica estesa ad un periodo, la corrente nominale.

Con resistenza di carico costante, la corrente si riduce in proporzione alla riduzione della superficie tensione-tempo di conduzione. In questo caso non occorre prendere provvedimenti particolari per ridurre la corrente.

Consideriamo ad esempio la regolazione della velocità di rotazione di un motore a corrente continua, mediante variazione della tensione d'armatura ottenuta attraverso thyristor. Se a piccola velocità, cioè con piccolo angolo di conduzione della corrente, il motore deve fornire la coppia normale e quindi deve assorbire la corrente nominale, può essere necessario prendere speciali provvedimenti per evitare un sovraccarico del thyristor.

Mediante una bobina di induttanza e un diodo non asservito si può ottenere una corrente permanente.

Eventualmente può essere necessario impiegare un thyristor in grado di sopportare la corrente richiesta dal motore, pur entro il piccolo angolo di conduzione imposto dalla necessità di regolazione.

Il valore massimo della media aritmetica della corrente di passaggio, ammissibile per un determinato angolo di conduzione λ , può venire facilmente calcolato.

Supponiamo che si tratti di un thyristor da 15 A e che si voglia determinare il massimo della media aritmetica della corrente per un angolo di conduzione $\lambda = 30^\circ$. Per il thyristor in questione il costruttore indica come corrente di picco periodica il valore di 75 A.

$$I_{arm} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi-X}^{\pi} \frac{I}{\text{sen } x} \text{sen } \lambda \, d\lambda \quad [10]$$

$$I_{arm} = \frac{2 \cdot 75}{2\pi} \int_{150^\circ}^{\pi} \text{sen } \lambda \, d\lambda \quad [11]$$

$$I_{arm} = \frac{75}{\pi} \cdot \left| -\cos \lambda \right| \begin{array}{l} 180^\circ \rightarrow = 1 \\ 150^\circ \rightarrow = 0,866 \end{array} \quad [12]$$

$$I_{arm} = \frac{75}{\pi} \cdot 0,134 = 3,2 \text{ A}$$

In un thyristor da 15 A e con angolo di conduzione di 30° la corrente può dunque avere un valore medio aritmetico al massimo di 3,2 A.

3.3.5 Perdite di conduzione.

Fondamentale per la determinazione della corrente di passaggio ammissibile è, oltre al raffreddamento, l'ammontare delle perdite di conduzione del thyristor. Tali perdite possono venire calcolate in prima approssimazione con la formula seguente:

$$P_V = U_S \cdot i + I^2 \cdot R \quad [13]$$

nella quale U_S indica la tensione di interdizione e R la resistenza di transito.

Entrambi questi valori possono venire determinati mediante le curve caratteristiche riportate nella figura 12. Esse mettono in evidenza la dipendenza della caduta di tensione di passaggio dalla temperatura, ed il relativo campo di dispersione.

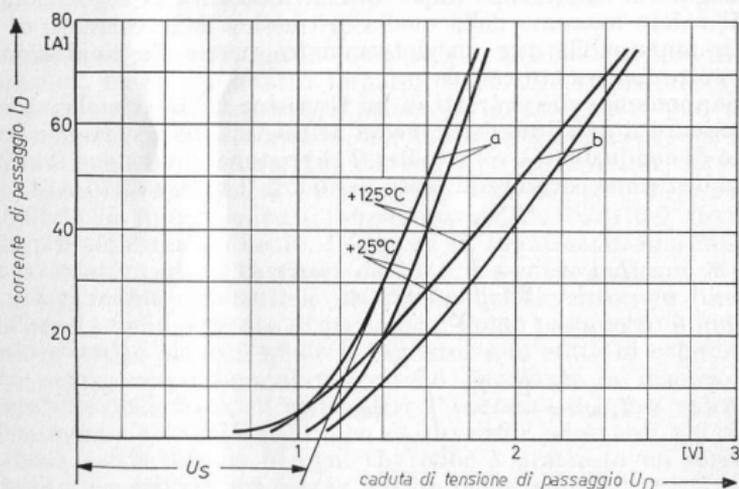


Fig. 12 - Caratteristica di conduzione di un thyristor.

Se si traccia la tangente di massima pendenza alla curva caratteristica, l'intersezione della tangente medesima con l'asse delle ascisse indica la tensione di interdizione U_S .

Il valore della tangente trigonometrica dell'angolo compreso fra la detta retta e l'asse delle ordinate è invece uguale alla resistenza di transito R .

La tensione di interdizione U_S è dell'ordine di grandezza di 1,1 V. La resistenza R di una cella da 15 A è di circa $15 \cdot 10^{-3} \Omega$ e quella di una cella da 100 A di circa $2 \cdot 10^{-3} \Omega$.

Nella figura 13 sono rappresentate le perdite di conduzione in funzione della corrente di passaggio I_D e per diversi angoli di conduzione. Le perdite totali P_V comprendono anche le perdite che si verificano in stato di interdizione, le perdite di commutazione e le perdite di pilotaggio. In condizioni normali le perdite di commuta-

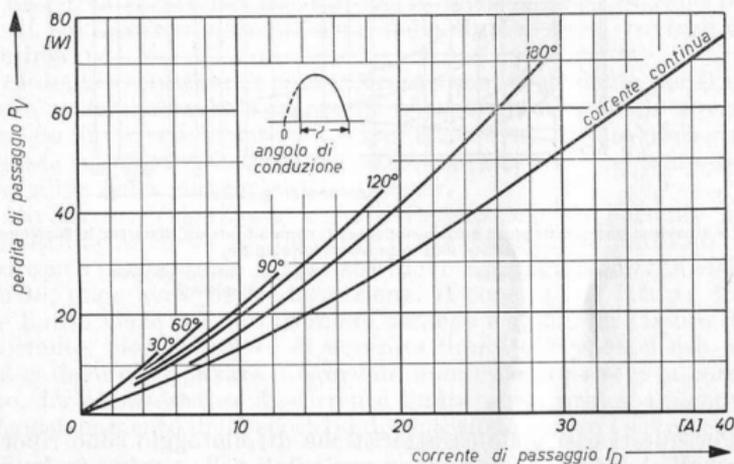


Fig. 13 - Perdite di conduzione di un thyristor in funzione della corrente sinusoidale di passaggio.

zione e quelle allo stato di interdizione sono molto piccole e possono venire trascurate. In pochi casi particolari le perdite di commutazione possono assumere valori tali da doverne tenere conto. Anche le perdite di pilotaggio possono in genere venire trascurate.

In casi particolari, per esempio in apparecchi di conversione della corrente continua in corrente alternata di elevata frequenza e potenza, occorrono impulsi di innesco con fronte molto ripido e di grande potenza. Se le perdite connesse con questi impulsi superano il 5% delle perdite totali è necessario tenerne conto.

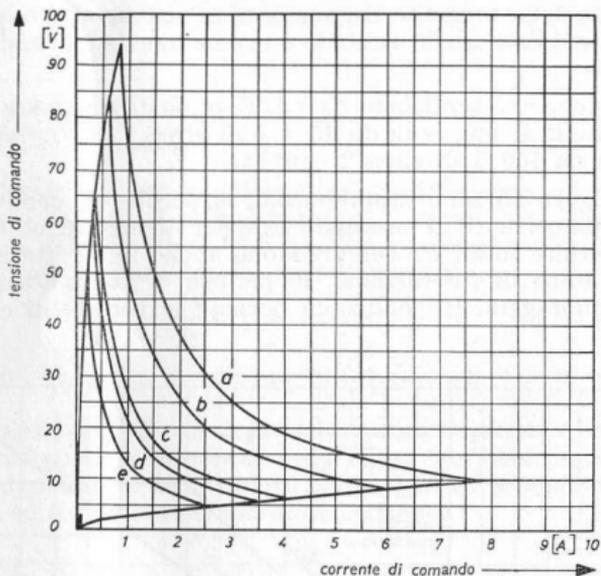


Fig. 14 - Massima potenza di picco ammissibile per il comando di un thyristor in funzione della durata dell'impulso di pilotaggio.

Durata dell'impulso	Massima potenza di picco ammissibile
a - 50 μ s	75 W
b - 100 μ s	50 W
c - 500 μ s	26 W
d - 1 ms	21 W
e - 10 ms	12,5 W

Per questi casi nelle caratteristiche di pilotaggio sono riportate le iperboli che indicano le punte ammissibili delle perdite in funzione della durata dell'impulso: si veda ad esempio la figura 14. In base alla durata dell'impulso ed alla frequenza si determinano le perdite continue, il cui valore viene moltiplicato per la resistenza termica interna del thyristor.

$$P_{st} \cdot R_{tth} = {}^{\circ}\text{C} \left[\frac{W \cdot {}^{\circ}\text{C}}{W} \right] \quad [14]$$

Si determina in tal modo la maggior sovratemperatura della giunzione del thyristor. Per determinare la massima corrente di passaggio (fig. 11) si deve diminuire di un ugual valore la massima temperatura ammissibile della base dell'involucro.

4. PROTEZIONE DEI THYRISTOR.

Nei circuiti che impiegano thyristor non si può evitare che si verifichino punte di corrente di breve durata, di intensità superiore alla corrente nominale del thyristor. In base alle caratteristiche di sovracorrente fornite dal costruttore, si può stabilire quali sovracorrenti possono essere tollerate, e per quanto tempo, senza che venga messa in pericolo la vita del thyristor.

4.1 Protezione contro le sovracorrenti; fattore di sovracorrente, fattore di corrente limite.

Le curve caratteristiche riprodotte nella figura 15 danno il fattore di sovracorrente in funzione della durata della sovracorrente medesima.

Si definisce fattore di sovracorrente quel coefficiente per il quale si deve moltiplicare la corrente nominale per ottenere la sovracorrente. Se la sovracorrente effettiva rimane al disotto delle curve disegnate sul diagramma, non viene superata la massima temperatura ammissibile della giunzione del thyristor.

Diverso è il significato delle caratteristiche di corrente limite riprodotte nella figura 16. Le curve di corrente limite indicano la sovracorrente per la quale il thyristor deve essere immediatamente disinserito, onde evitarne la distruzione. Il concetto di fattore di corrente limite viene definito in modo analogo a quello di fattore di sovracorrente, cioè il fattore di corrente limite è il coefficiente per il quale si deve moltiplicare la corrente nominale per avere la corrente limite. La caratteristica di corrente limite serve principalmente per il dimensionamento dei dispositivi di protezione contro i sovraccarichi.

4.1.1 Protezione contro i corto circuiti. Integrale limite di carico.

I corto circuiti rappresentano la sollecitazione più pericolosa per i thyristor. Di importanza basilare per la protezione contro di essi è l'integrale limite di carico $\int i^2 dt$, cioè il valore massimo ammissibile per l'integrale del quadrato della corrente di passaggio rispetto al tempo. I costruttori di thyristor calcolano tale integrale in base al valore limite della corrente ad impulso:

$$\int_0^{10 \text{ msec}} i^2_{Stoss} \sin^2 \omega t dt \quad [15]$$

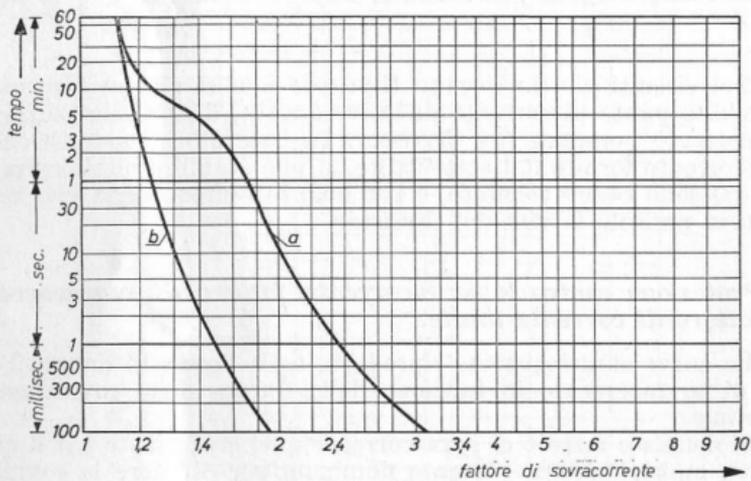


Fig. 15 - Caratteristiche di sovraccarico di un thyristor.

a - iniziando da freddo
 o - iniziando dalla temperatura di regime.

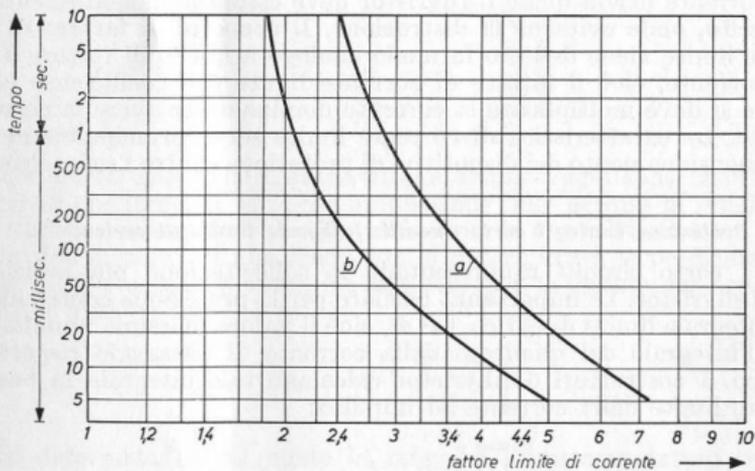


Fig. 16 - Caratteristiche di corrente limite di un thyristor

a - iniziando da freddo
 b - iniziando dalla temperatura di regime.

L'integrale limite di carico dipende relativamente poco dalla temperatura. Poichè interessa solo per tempi molto brevi (< 10 ms), esso può in pratica essere considerato come costante.

In caso di corto circuito, il thyristor deve essere disinserito mediante valvole ad intervento rapidissimo, che devono venire dimensionate in modo che il valore di $\int i^2 dt$ del thyristor sia sicuramente inferiore al valore di $\int i^2 dt$ indicato per le valvole e calcolato in base all'integrale di fusione. Se in caso di corto circuito viene sfruttato in pieno il valore di $\int i^2 dt$ indicato dal costruttore, nel breve intervallo di tempo che intercorre fino alla fusione delle valvole viene notevolmente superata la temperatura massima ammissibile per la giunzione ed il thyristor perde per breve tempo le sue proprietà di interdizione.

4.1.2 Protezione contro i sovraccarichi.

Il thyristor deve anche essere protetto mediante relè termici di massima corrente contro i sovraccarichi di durata relativamente lunga. Tali relè vanno collegati in serie con le valvole di protezione contro i corto circuiti. Normalmente questi relè, del tipo a bimetallo, vengono tarati in modo da intervenire in un tempo variabile da 10 a 30 minuti nel caso di sovraccarico del 20% (cioè nel caso in cui la corrente sia di 1,2 volte la corrente nominale).

4.2 Protezione contro le sovratensioni. Circuiti di protezione.

Il thyristor come tutti i componenti a semiconduttori, è molto sensibile alle punte di sovratensione. Esso viene protetto contro di esse mediante particolari circuiti.

4.2.1 Collegamento di elementi protettivi alla cella.

Il collegamento di elementi protettivi alla cella ha principalmente lo scopo di ridurre le punte di tensione che si verificano alla commutazione, in conseguenza della inerzia della cella. Quando abbiamo esaminato i fenomeni che avvengono alla disinserzione (vedi paragrafo 3.1.4) abbiamo visto che l'inerzia dei portatori di carica provoca un impulso inverso di corrente i_{KA} con andamento molto ripido. Quando tutti i portatori di carica sono stati eliminati, la corrente inversa si annulla, inizialmente pure con forte pendenza.

Per effetto delle induttanze inevitabilmente presenti nei circuiti, ne risultano brevi punte di tensione che si sommano alle normali tensioni inverse e che possono largamente superare la tensione di picco massima ammessa per il thyristor.

Contro tali punte di tensione, il thyristor viene protetto mediante un condensatore ad esso collegato in parallelo, il quale viene dimensionato facendo l'ipotesi che in esso si debba trasferire tutta la energia accumulata nella induttanza del circuito al momento in cui si verifica la punta di corrente inversa i_{KA} . Ponendo anche la condizione che l'aumento della tensione ai morsetti del condensatore possa essere pari al massimo alla differenza fra la massima tensione inversa ammissibile e la tensione di esercizio, si determina la capacità minima del condensatore:

$$C_{min} = \frac{Li^2_{KA}}{(U_{picco} - U_{rete})^2} F \quad [16]$$

Poichè la scarica del condensatore che si verifica alla inserzione del thyristor causa pericolose perdite, si deve inserire una resistenza limitatrice in serie col condensatore medesimo. Il valore minimo di questa resistenza viene determinato in base al massimo valore ammissibile dalla corrente I_E che si verifica durante il processo di inserzione:

$$R_{min} = \frac{U_{rete}}{I_E - I_{E\ Last}} \Omega \quad [17]$$

In questa formula $I_{E\ Last}$ indica il valore massimo della corrente assorbita alla inserzione della resistenza del carico. Questo elemento $R-C$ deve essere sistemato nelle immediate vicinanze del thyristor.

4.2.2 Collegamento di elementi protettivi al trasformatore.

Un'altra protezione del thyristor consiste nel munire di elementi $R-C$ l'avvolgimento secondario del trasformatore. Le sovratensioni che si verificano nella rete di alimentazione, e che sono dovute a manovre di interruttori, a folgorazioni e ad altri fenomeni simili, vengono attenuate dalla induttanza di dispersione del trasformatore e dalla resistenza e capacità collegate a quest'ultimo; se tali elementi sono scelti correttamente, l'attenuazione delle sovratensioni è tale che esse non risultano più pericolose per il thyristor.

Il calcolo di questi elementi di protezione è in parte realmente difficile; esso però non riguarda il progettista dei circuiti applicativi, perchè il costruttore dei thyristor indica per ciascun tipo e per le relative tensioni di alimentazione i valori più convenienti di capacità e di resistenza.

Se il thyristor viene collegato direttamente alla rete senza l'interposizione di un trasformatore, l'impiego di elementi $R-C$ è ugualmente efficace, purchè l'induttanza di dispersione del trasformatore venga sostituita con reattanze inserite sui conduttori di alimentazione. La caduta di tensione provocata dalla induttanza L_{Dr} di tale reattanza deve corrispondere alla tensione di corto circuito del trasformatore (circa 4-6 % della tensione nominale):

$$L_{Dr} = \frac{U_N \cdot 4}{100 \cdot I_N \cdot \omega} H \quad [18]$$

nella quale:

U_N = tensione di rete; I_N = corrente di linea.

Le perdite nella reattanza risultano:

$$P_{Dr} = \omega L_{Dr} \cdot I^2 \quad [19]$$

I fenomeni di risonanza dovuti a capacità parassite ed alla induttanza di protezione possono venire eliminati mediante una resistenza di smorzamento R_D collegata in parallelo alla reattanza; essa deve corrispondere a circa il doppio dell'impedenza caratteristica:

$$\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Il valore più conveniente della resistenza è:

$$\frac{R_D}{\Omega} = 2\pi \cdot 10^3 \frac{L}{mH} \quad [20]$$

In essa si verificano le perdite:

$$P = (\omega L \cdot I)^2 \cdot \frac{1}{R_D} \quad [21]$$

Questa resistenza deve avere bassissima induttanza.

4.2.3 Collegamento di elementi protettivi al carico.

Se il carico collegato al thyristor ha una induttanza notevole, il rapido aumento della corrente al momento della inserzione provoca

una sovratensione, la quale in tutti i circuiti, tranne che in quelli a semionda, si sovrappone alla tensione inversa delle celle in stato di interdizione. Per attenuare questa sovratensione, in molti casi non è sufficiente collegare elementi protettivi alle singole celle. Al carico, di resistenza R_a e induttanza L_a , si deve collegare allora un elemento attenuatore, la cui resistenza R e capacità C dipendono dai valori di R_a ed L_a . Per una compensazione completa, se $R_a = R$, deve essere:

$$C = \frac{L_a}{R^2} \quad [22]$$

Se il valore di C , che risulta dal calcolo, è eccessivo, ci si può accontentare, nella maggior parte dei casi, di una compensazione incompleta. I valori più convenienti di C e di R vengono allora determinati sperimentalmente.

5. COLLEGAMENTO IN PARALLELO E IN SERIE DI THYRISTOR.

5.1 Collegamento in parallelo di thyristor.

Nel collegamento in parallelo di thyristor si presentano due problemi fondamentali: la suddivisione in parti uguali della corrente ed il sicuro innesco dei singoli thyristor. Dalla figura 12 risulta che la caduta di tensione di passaggio U_D è influenzata in forte misura dalla temperatura della giunzione.

Inoltre per una determinata temperatura e per un dato tipo di cella si ha una ampia banda di dispersione dei valori di U_D . In fase di controllo, i thyristor vengono suddivisi in vari gruppi: ogni gruppo è composto di thyristor le cui cadute di tensione di passaggio differiscono una dall'altra per non più 70 mV o al massimo 110 mV. I thyristor che vengono collegati in parallelo devono appartenere ad un medesimo gruppo.

Inoltre nei thyristor collegati in parallelo non si sfrutta mai in pieno la loro corrente nominale: questa viene moltiplicata per un fattore K , detto «fattore di collegamento in parallelo», minore di 1. Si cerca sempre di fare in modo che K non debba essere minore di 0,8.

5.1.1 Suddivisione uniforme della corrente.

Se si esegue un puro e semplice collegamento in parallelo dei thyristor, è impossibile ottenere una suddivisione uniforme della corrente, anche se i thyristor stessi appartengono ad un medesimo gruppo (per quanto riguarda la caduta di tensione di passaggio U_D).

Nella parte sinistra della figura 17 è rappresentata la banda di dispersione di un gruppo. Si vede che con una caduta di tensione di passaggio $U_D = 1,4$ V le correnti di due thyristor collegati in parallelo possono differire, nel caso più sfavorevole, di 60 A. Una migliore suddivisione della corrente si ottiene disponendo piccole resistenze (dell'ordine di 5 m Ω) in serie coi due thyristor collegati in parallelo. In molti casi è sufficiente la resistenza dei fusibili di protezione dei thyristor.

Nella parte di destra della figura 17 è rappresentata la caratteristica tensione-corrente di una piccola resistenza (circa 5 m Ω), oltre alla banda di dispersione di U_D di un gruppo di thyristor. Le due ultime curve sulla destra rappresentano la caratteristica risultante. Il valore totale della caduta di tensione di passaggio è ora maggiore (essendo aumentato dalla caduta di tensione provocata dalla resi-

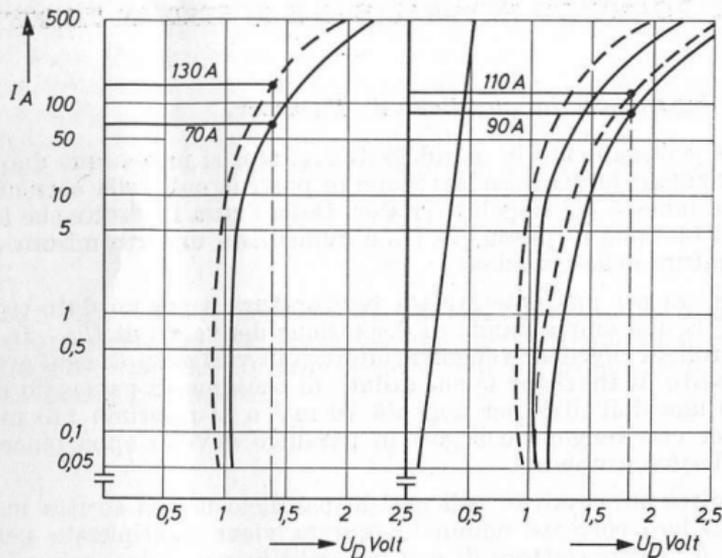


Fig. 17 - Collegamento in parallelo dei thyristor.
Caratteristiche di conduzione senza e con resistenza addizionale.

stenza), ma le correnti dei due thyristor differiscono ora, nel caso più sfavorevole, soltanto di 20 A. Una suddivisione di corrente ancora migliore può essere ottenuta con l'impiego di reattanze.

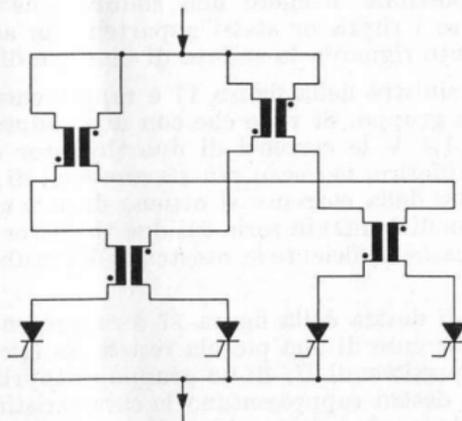


Fig. 18 - Collegamenti dei trasformatori di equilibratura della corrente fra molti thyristor collegati in parallelo.

Se i thyristor da collegare in parallelo sono più di due, le reattanze vengono concatenate ciclicamente. Gli avvolgimenti magneticamente accoppiati consentono il passaggio soltanto di correnti uguali ed egualizzano anche le cadute di tensione.

La sezione dei nuclei deve essere dimensionata per la massima durata di conduzione della corrente e per l'intero campo di dispersione della caduta di tensione di passaggio. Inoltre le reattanze non devono saturarsi.

5.1.2 Sicurezza di innesco dei thyristor collegati in parallelo.

I thyristor collegati in parallelo funzionano in modo ineccepibile solo se si provvede ad assicurarne l'innesco il più possibile contemporaneo. Grandi differenze nel ritardo di inserzione di thyristor collegati in parallelo possono essere dovute al fatto che, dopo l'innesco del primo thyristor, la tensione fra anodo e catodo delle celle collegate in parallelo si riduce al valore della caduta di tensione di passaggio del thyristor già in stato di conduzione.

Se la tensione anodica scende sotto 1,5 V, la corrente necessaria per la commutazione del thyristor aumenta rapidamente, al punto che i successivi thyristor possono passare allo stato di conduzione molto più tardi o addirittura non commutare affatto. Per il primo thyristor può pertanto venire superata l'ammissibile velocità di aumento della corrente di/dt , oppure esso può venire sovraccaricato in quanto viene percorso dalla corrente totale.

Le differenze fra i tempi di ritardo di inserzione vengono eliminate adottando impulsi di comando di grande ampiezza e con fronte ripido. In genere è sufficiente che la pendenza iniziale corrisponda ad un aumento per microsecondo di 5 volte la corrente minima di commutazione. Le resistenze o le reattanze cui si ricorre per egualizzare la distribuzione della corrente sono molto utili anche per impedire che la tensione anodo-catodo delle celle che non hanno ancora commutato discenda a valori troppo bassi durante il processo di commutazione.

5.2 Collegamento in serie di thyristor.

Se la tensione di lavoro, in determinati circuiti, supera la tensione inversa dei thyristor, questi possono venire collegati in serie. In parallelo ai thyristor disposti in serie si collegano elementi $R-C$ che assicurano una suddivisione uniforme della tensione e contemporaneamente costituiscono una protezione contro l'influsso dell'inerzia del sistema.

Se i thyristor sono alimentati con tensione continua, in parallelo agli elementi $R-C$ devono essere disposte resistenze ohmiche egualizzatrici.

Il modo migliore per comandare i thyristor è di impiegare un trasformatore di impulsi con due avvolgimenti secondari. Gli impulsi di comando devono avere grande ampiezza e fronte ripido onde consentire brevi tempi di ritardo di inserzione.

Anche con questi provvedimenti però non si riesce ad ottenere una commutazione perfettamente contemporanea dei thyristor collegati in serie, in conseguenza della inevitabile dispersione delle caratteristiche di commutazione.

Se la commutazione dei thyristor collegati in serie avviene a distanza anche di pochi microsecondi, si verificano picchi di tensione al thyristor che commuta con ritardo.

Tali picchi vengono livellati dagli elementi $R-C$. In conseguenza dei fenomeni di cui si è ora parlato, è sconsigliabile collegare in serie più di 2 thyristor.

È consigliabile che thyristor destinati ad essere collegati in serie vengano scelti in una classe di tensione superiore alla tensione inversa strettamente necessaria.

6. SITUAZIONE ATTUALE E PREVISIONI SULLO SVILUPPO FUTURO.

Lo studio delle proprietà dei thyristor ha mostrato che esiste un notevole numero di caratteristiche che ne condizionano l'applicabilità ai singoli casi specifici.

Allo stato attuale della tecnica non è possibile costruire thyristor le cui caratteristiche più importanti abbiano tutte contemporaneamente il valore massimo.

I thyristor che vengono attualmente costruiti possono essere raggruppati in 2 classi.

La prima classe è destinata all'impiego in reti a corrente forte a 50 Hz. In questi thyristor si dà particolare importanza ad una elevata resistenza, alla tensione inversa ed a buone caratteristiche di conduzione. Per questi tipi vengono ammessi anche impulsi di corrente di elevata intensità e tensioni periodiche di picco di circa 1200 V. Le tensioni di prova dei costruttori sono in genere del 20% superiori a questi valori.

Le correnti di transito vanno da frazioni di 1 A a oltre 200 A. La corrente di picco ammessa nei thyristor per correnti più intense può raggiungere i 4000 A.

Tutti i suddetti valori si riferiscono ad una temperatura di giunzione di 125 °C.

I thyristor della seconda classe sono invece previsti per essere impiegati in circuiti ad alta frequenza. In questi thyristor si dà particolare importanza al tempo di ripristino ed ai valori massimi ammissibili di du/dt e di/dt . Il buon comportamento alle frequenze elevate viene ottenuto a spese delle caratteristiche di conduzione. I valori garantiti del tempo di ripristino di questi thyristor sono compresi fra 12 e 20 microsecondi.

La massima velocità ammissibile di aumento della tensione è di 400 V/ μ s. La massima velocità ammissibile di aumento della corrente è di 25 A/ μ s.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si può prevedere che gli sforzi saranno intesi ad ottenere una tensione inversa più elevata e correnti di passaggio più intense.

Un aumento della tensione inversa sopportabile comporta, almeno allo stato attuale della tecnica, un peggioramento delle caratteristiche di conduzione.

Il compromesso che si deve raggiungere fra queste due caratteristiche contrastanti, verrà determinato dai sempre più vasti campi di impiego dei thyristor.

Anche nell'aumentare le correnti di passaggio si deve sempre tenere presente la sicurezza del thyristor. Parallelamente alla corrente di passaggio cresce automaticamente la superficie della giunzione. A prescindere dai problemi di natura meccanica, che si presentano con le superfici cristalline delle giunzioni di grandi dimensioni, esplica ruolo di sempre maggiore importanza anche la velocità di propagazione. Anche qui, determinanti per gli impulsi futuri saranno i requisiti posti dagli utilizzatori. Finora tutte le esigenze, per quanto riguarda la corrente di transito, poterono venir soddisfatte collegando in parallelo i thyristor.

La tendenza a consentire più elevate velocità di aumento della corrente di/dt , senza porre in pericolo la vita del thyristor, ha fruttato portato alla realizzazione di un nuovo tipo di thyristor con emettitore a campo trasversale.

Come già si è detto al paragrafo 3.1.3, il motivo per cui il valore di di/dt non può superare determinati limiti consiste nel fatto che, subito dopo la commutazione, solo una piccolissima zona della superficie cristallina, in prossimità dell'elettrodo di comando, diventa conduttrice.

La figura 19 mostra come funziona l'emettitore a campo trasversale. La zona n (emettitore) che si trova in prossimità dell'elettrodo di comando

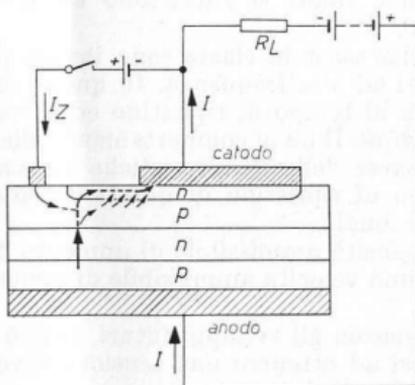


Fig. 19 - Rappresentazione schematica di un thyristor con emettitore a campo trasversale.

trodo di comando non ha contatto metallico. La corrente attraversa trasversalmente la zona di emettitore, provocando una caduta di tensione, la quale a sua volta richiama nella base p una corrente di

buchi diretta verso la zona n . Si ottiene in tal modo in breve tempo un aumento della superficie interessata al passaggio della corrente. L'impiego pratico di questo thyristor dimostrerà fino a quale punto si possa aumentare il valore di di/dt .

Si vede che lo sviluppo dei thyristor ha oggi raggiunto un limite che può essere superato solo con concessioni in un senso o nell'altro. C'è da augurarsi che pretese eccessive non comportino nello sviluppo del thyristor tendenze che vadano a scapito della sua sicurezza di impiego, che è oggi assai elevata.

7. CIRCUITI DI COMANDO.

Prima di descrivere esempi di impiego dei thyristor, vogliamo accennare ai più importanti sistemi di comando dei thyristor medesimi. Nella realizzazione di questi circuiti si fa ampio ricorso alla tecnica delle telecomunicazioni e degli impulsi; è necessario che il tecnico delle correnti forti acquisti familiarità con questi circuiti.

7.1 Comando orizzontale.

Nella figura 20 sono indicati alcuni semplici circuiti, derivati dalla tecnica di impiego dei thyatron, adatti a consentire la variazione dell'angolo di commutazione α .

Nella parte superiore della figura è rappresentato il comando con la tensione alternata U_{St} , che viene sfasata, mediante un semplice ponte di fase, rispetto alla tensione di lavoro U_A . Si parla qui di comando orizzontale.

Variando la resistenza inserita nel ponte di fase, la tensione di comando U_{St} può venire sfasata di circa 170° .

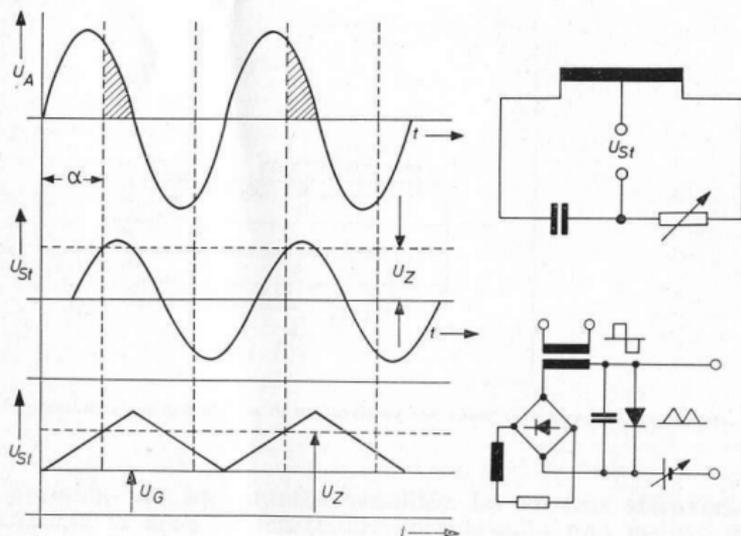


Fig. 20 - Innesco di thyristor con « comando orizzontale » e « comando verticale ».

Quando U_{st} raggiunge il valore U_z della tensione che deve essere applicata all'elettrodo di comando del thyristor, perchè nel circuito di pilotaggio circoli la corrente necessaria a provocare la commutazione del thyristor stesso, questo diventa conduttore.

Si chiama angolo di inserzione o di comando o di commutazione l'angolo α del quale l'istante di inserzione è in ritardo rispetto all'istante di passaggio per lo zero della tensione di lavoro.

Si chiama invece angolo di conduzione o di passaggio della corrente l'angolo $(180^\circ - \alpha)$.

7.2 Comando verticale.

Se i thyristor vengono impiegati come organi di manovra in circuiti di regolazione, l'istante di inserzione viene in genere determinato mediante una tensione continua prelevata dal regolatore. In questo caso l'angolo di inserzione spesso viene variato mediante una tensione alternata sovrapposta a una tensione continua variabile. Modificando il valore della tensione continua, la tensione alternata viene spostata verticalmente ed in tal modo viene fissato l'istante di inserzione del thyristor. Si parla in questo caso di comando verticale.

Se alla tensione continua variabile si sovrappone una tensione triangolare in luogo di una tensione alternata sinusoidale si ottiene un andamento lineare della regolazione con comando verticale. Nella parte inferiore della figura 20 è rappresentato un comando verticale mediante sovrapposizione di una tensione triangolare.

La tensione triangolare può essere facilmente ottenuta, come è indicato a destra in basso della figura. Se la corrente continua fornita da un raddrizzatore viene perfettamente livellata, la corrente anodica ha forma rettangolare; un condensatore percorso da questa corrente provoca una caduta di tensione triangolare. Il diodo collegato in parallelo al condensatore fa sì che i triangoli abbiano la base sull'asse delle ascisse; una variazione della tensione continua determina uno spostamento in senso verticale della tensione triangolare; il valore della tensione continua determina pertanto l'angolo α di inserzione.

7.3 Comando di thyristor mediante trasduttori.

In circuiti di regolazione, nei quali non si hanno esigenze spinte per quanto riguarda la velocità di regolazione, il comando dei thyristor può essere effettuato mediante trasduttori; questi presentano il vantaggio che consentono di fare agire sul regolatore parecchie gran-

dezze di disturbo mediante avvolgimenti di comando metallicamente separati. Anche il raffronto fra grandezza di riferimento e grandezza controllata può essere effettuato nel trasduttore.

Nella figura 21 è rappresentato un circuito di comando mediante trasduttore; il funzionamento è illustrato dalla caratteristica riportata a destra. Per le posizioni estreme *a* e *b* sono disegnate tratteggiate le corrispondenti superfici tensione-tempo: U_{RA} rappresenta la caduta di tensione che si ha ai capi della resistenza di lavoro R_A . Il ripido aumento della tensione U_{RA} viene utilizzato per rendere conduttore il thyristor. A seconda della direzione istantanea della corrente, attraverso i diodi *n1* e *n2* viene inserito il corrispondente raddrizzatore comandabile. L'angolo di inserzione corrisponde all'angolo di intervento del trasduttore.

Tutti i circuiti di cui abbiamo finora parlato hanno in comune la proprietà che la corrente di comando percorre il circuito di pilotaggio dall'istante dell'innesco fino al primo passaggio naturale per lo zero.

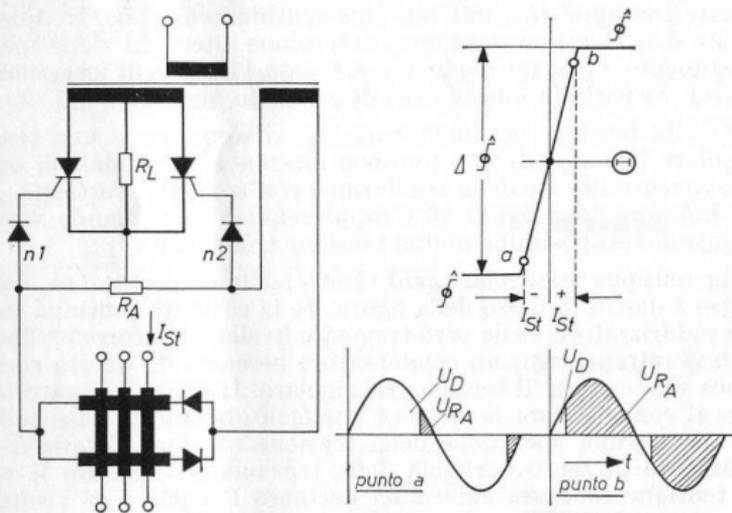


Fig. 21 - Circuito di comando di thyristor con trasduttore.

Ciò è vantaggioso se si richiede un impulso di comando lungo in conseguenza di una elevata induttanza del carico. Se l'angolo di comando α è grande, la piena tensione di comando risulta applicata all'elettrodo di pilotaggio del thyristor anche nel semiperiodo negativo.

In tal caso la corrente inversa I_{KA} aumenta rapidamente, specialmente con tensioni di lavoro elevate. Anche le perdite nella giunzione $p-n$ dalla parte dell'anodo aumentano rapidamente sicché il thyristor risulta termicamente sovraccaricato e può anche venire distrutto.

Per proteggere il thyristor si deve limitare la potenza, il che è antieconomico, oppure bisogna ridurre la tensione di comando, durante il semiperiodo negativo, a un valore non superiore a 0,5 V.

7.4 Riduzione della tensione di comando durante il semiperiodo negativo.

La riduzione della tensione di comando durante il semiperiodo negativo può essere ottenuta mediante lo schema rappresentato nella figura 22. Durante il semiperiodo positivo per il thyristor $p1$, i diodi $n1$ e $n2$ non conducono. La resistenza $r2$ è percorsa dalla corrente di comando del thyristor $p1$. La tensione di comando è qui indicata simbolicamente come tensione variabile di una batteria.

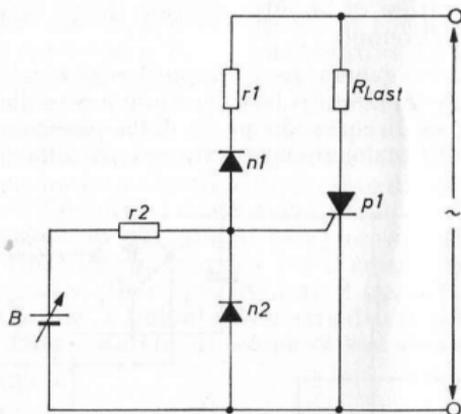


Fig. 22 - Circuito per la riduzione della tensione applicata al tratto di comando di un thyristor durante il semiperiodo negativo.

Durante il semiperiodo negativo il thyristor $p1$ è in condizioni di interdizione perchè al suo catodo è applicato un potenziale positivo. I due diodi $n1$ ed $n2$ sono ora invece conduttori; la corrente che li percorre è limitata dalla resistenza $r1$. La batteria eroga corrente attraverso $r2$, $n1$ e $r1$. La tensione di comando viene ora assorbita dalla

resistenza r_2 , perchè all'elettrodo di comando può risultare applicata solo la caduta di tensione di passaggio del diodo n_2 . Se n_2 è un diodo al germanio, tale caduta di tensione diretta è dell'ordine di 0,3 V. La tensione applicata all'elettrodo di comando durante il semiperiodo negativo è quindi ridotta a questo valore.

7.5 Circuiti di comando a impulsi.

Il comando dei thyristor con impulsi brevi e ripidi presenta parecchi vantaggi. Come abbiamo già visto al paragrafo 2.1.5, con carico puramente ohmico sono sufficienti impulsi della durata di circa 10 microsecondi. In genere si impiegano impulsi di comando della durata di 100 fino a 200 microsecondi. Con l'impiego di parecchi thyristor, il comando è indipendente dalla inevitabile dispersione delle caratteristiche di innesco. Al circuito di comando può venire applicato un impulso della durata massima di circa 300 microsecondi anche quando il thyristor è in condizioni di interdizione.

In linea generale, i circuiti di comando ad impulso sono costituiti da uno stadio generatore di impulsi, eccitato da un elemento dipendente dalla fase o dal tempo.

In fig. 33 lo stadio generatore di impulsi comprende i transistori p_1 e p_2 . Si tratta di un circuito basculante monostabile il quale per effetto di un impulso di comando passa dalla posizione di riposo a un'altra posizione di funzionamento e ritorna poi nuovamente, dopo

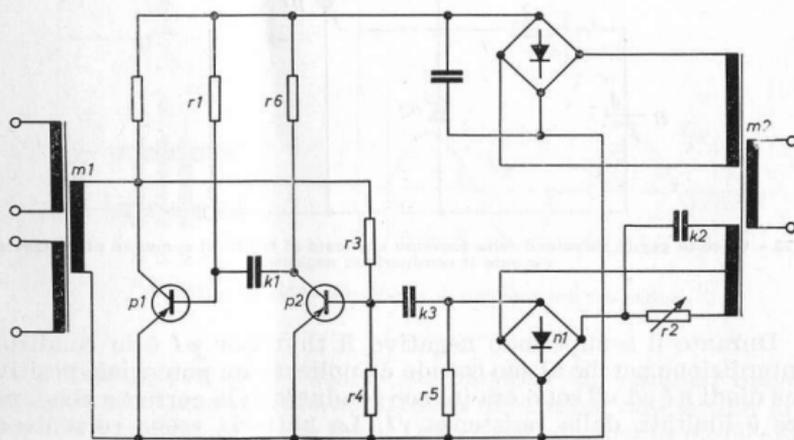


Fig. 23 - Circuito di comando per thyristor. Ponte di fase e stadio emettitore di impulsi.

un certo tempo, nella posizione di riposo. In condizioni di riposo, il transistor $p1$ è in stato di conduzione perchè alla sua base, attraverso $r1$, è applicato un potenziale negativo.

Il transistor $p2$ invece è in stato di interdizione perchè alla sua base è applicato, attraverso $r3$, il potenziale positivo del collettore del transistor $p1$.

Quando il transistor $p1$ conduce, il condensatore $k1$ viene caricato alla tensione di esercizio attraverso la resistenza $r6$. La sua armatura di sinistra (nella figura) assume potenziale positivo.

L'avvolgimento secondario inferiore del trasformatore $m2$ costituisce, insieme al condensatore $k2$ ed alla resistenza variabile $r2$, un ponte di fase, come quello che abbiamo visto nella figura 20. La tensione di uscita di questo ponte di fase può venire sfasata fino a circa 170° variando la resistenza $r2$.

Il raddrizzatore $n1$ trasforma la tensione di uscita del ponte di fase in impulsi a semionda raddrizzata.

Ogni impulso a semionda porta il transistor $p2$ in stato di conduzione. Il potenziale positivo dell'emettitore si porta al collettore. La carica positiva del condensatore $k1$ viene portata alla base del transistor $p1$; questo pertanto passa in condizioni di interdizione, nelle quali rimane fino a che il condensatore $k1$ non ha invertito la sua carica attraverso la resistenza $r1$.

Quando la carica è invertita l'armatura di sinistra (nella figura) ha potenziale negativo. Il transistor $p1$ passa nuovamente allo stato di conduzione, cioè il circuito si riporta allo stato primitivo. Il transistor $p2$ viene portato nuovamente in stato di interdizione attraverso la resistenza $r3$ dal potenziale del collettore di $p1$.

La variazione di tensione al collettore del transistor $p1$ viene rilevata dal traslatore di impulsi $m1$ e trasmessa come impulso di innesco al thyristor. Il tempo, durante il quale il transistor $p1$ è in stato di interdizione, e quindi l'ampiezza dell'impulso di innesco, sono determinati dalla costante di tempo di scarica del condensatore $k1$.

Tale tempo è:

$$\tau_1 = 0,69 r1 \cdot C_{(k1)} \text{ s} \quad [23]$$

L'istante in cui è emesso l'impulso di innesco può venire determinato variando la resistenza $r2$ del ponte di fase. La durata dell'impulso medesimo viene invece determinata scegliendo opportunamente i valori della resistenza $r1$ e della capacità del condensatore $k1$.

Nella figura 24 è rappresentato un circuito che fornisce impulsi di innesco spostabili di circa 170° in dipendenza della tensione continua fornita da un regolatore. Anche questo circuito comprende un ponte di fase e uno stadio generatore di impulsi.

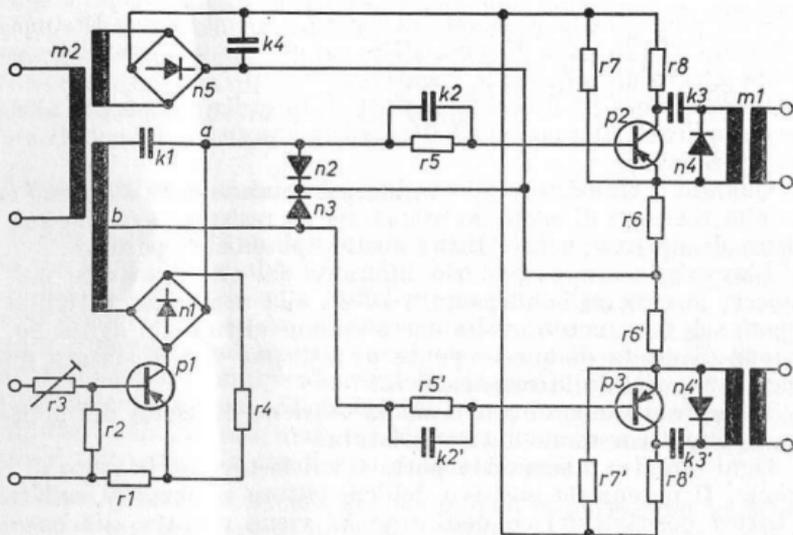


Fig. 24 - Circuito di comando per thyristor. Gli impulsi di comando vengono spostati nel tempo mediante la variazione della tensione continua di uscita di un regolatore.

$r1$ - 20 Ω 0,5 W; $r2$ - 200 Ω 0,5 W; $r3$ - 500 Ω resistenza variabile 0,3 W; $r4$ - 10 Ω 0,5 W; $r5$ - 1 k Ω 0,5 W; $r5'$ - 1 k Ω 0,5 W; $r6$ - 30 Ω 0,5 W; $r6'$ - 30 Ω 0,5 W; $r7$ - 3,6 k Ω 0,5 W; $r8$ - 800 Ω 1 W; $k1$ - 16 μ F 60 V carta metallizzata; $k2$ - 2 μ F 60 V carta metallizzata; $k2'$ - 2 μ F 60 V carta metallizzata; $k3$ - μ 4 F 60 V carta metallizzata; $k4$ - condensatore elettrolit. 100 μ F 24 V; $p1$ - AC 117; $p2$ - Ac 117; $p3$ - AC 117; $n1$ - B 30/200; $n2$ - OA 129; $n3$ - OA 129; $n4$ - OA 129; $n5$ - B 30/200.

$m1$ - Trasformatore di impulsi Valvo con nucleo di ferrite EE 30. Avvolgimento primario 80 spire filo rame 0,4 \varnothing ; secondario 40 spire, filo rame 0,4 \varnothing .

$m2$ - Trasformatore di rete; avvolgimento primario 220 V; avvolgimento secondario 1 : 16 V - 0,2 A; avvolgimento secondario 2 : 2 \times 10 V - 0,5 A.

Il ponte di fase è qui costituito dall'avvolgimento secondario inferiore (in figura) del trasformatore $m2$, dal condensatore $k1$, dal transistor $p1$ e dal raddrizzatore $n1$. Il transistor $p1$ insieme al raddrizzatore $n1$ costituisce la resistenza variabile.

Il raddrizzatore $n1$ serve ad impedire che il transistor $p1$, cui viene applicata una tensione alternata, abbia un funzionamento inverso (emettitore come collettore e collettore come emettitore).

Poichè il grado di amplificazione di un transistor in funzionamento inverso è notevolmente minore che in funzionamento normale, si verificherebbero forti distorsioni. La tensione di uscita del ponte di fase può essere ritardata di circa 170° mediante la tensione continua applicata alla base del transistor. Le resistenze $r2$ e $r3$ consentono di adattare l'ingresso del ponte di fase alla uscita del regolatore.

La tensione di uscita del ponte di fase pilota a seconda della direzione uno dei due transistori $p2$ e $p3$.

Supponendo che in un determinato istante il punto a abbia potenziale positivo, viene portato allo stato di conduzione il transistore $p3$, attraverso il diodo $n2$ e la resistenza $r6'$. Se invece è positivo il punto b , viene reso conduttore il transistore $p2$ attraverso il diodo $n3$ e la resistenza $r6$.

Le resistenze $r5$ e $r5'$ inserite nei circuiti di base, limitano le correnti di pilotaggio dei transistori $p2$ e $p3$.

I condensatori $k2$ e $k2'$ determinano un rapido aumento della corrente di comando dei transistori.

Lo stadio generatore di impulsi in questo caso è costituito da un solo transistore per semionda. Il suo funzionamento è il seguente:

A riposo l'emettitore del transistore $p2$ riceve una tensione di polarizzazione negativa di circa 0,1 V attraverso le resistenze $r6$ ed $r7$. Esso è pertanto sicuramente in stato di interdizione.

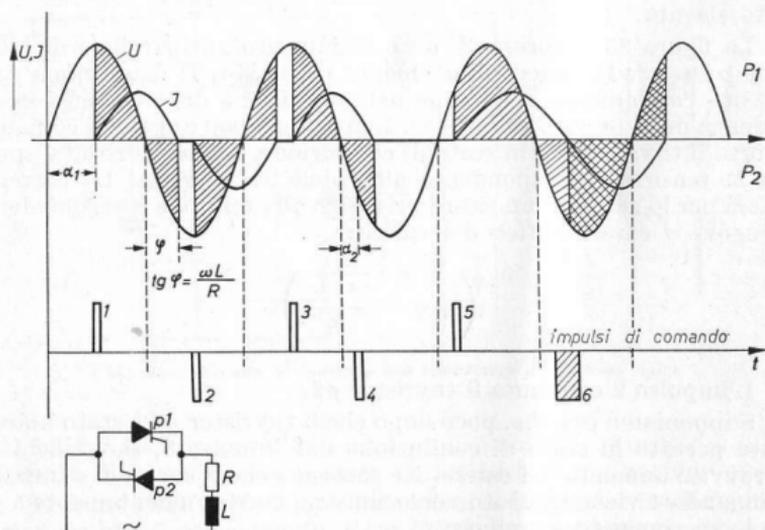


Fig. 25 - Influenza della durata degli impulsi di comando con thyristor collegati in opposizione.

Mentre il transistore $p2$ è in stato di interdizione, il condensatore $k3$ viene caricato alla piena tensione di esercizio, attraverso la resistenza $r6$, il diodo $n4$ e la resistenza $r8$. La sua armatura di destra (in figura) ha potenziale positivo.

Se ora un impulso di comando porta il transistor $p2$ allo stato di conduzione, il suo tratto emettitore-collettore diventa di bassa resistenza; il condensatore $k3$ si scarica allora attraverso l'avvolgimento primario del trasformatore di impulsi $m1$ ed il transistor $p2$.

L'impulso della corrente di scarica viene prelevato dall'avvolgimento secondario del trasformatore di impulsi ed utilizzato come impulso di innesco del thyristor.

La durata dell'impulso viene fissata scegliendo un condensatore $k3$ di capacità opportuna. Se si impiegano transistori di commutazione si possono ottenere impulsi con fianchi molto ripidi. La durata massima degli impulsi che si possono ottenere con questo circuito è di 3 ms. Nella didascalia della figura sono riportati i valori dei vari componenti che costituiscono il circuito.

Impulsi di comando particolarmente lunghi possono essere necessari per esempio quando due thyristor, in collegamento antiparallelo, sono inseriti come organi di comando sul primario di un trasformatore. A basso carico il trasformatore costituisce una induttanza molto elevata.

La figura 25 rappresenta un collegamento antiparallelo dei thyristor $p1$ e $p2$. Il carico è fortemente induttivo. Il diagramma rappresenta l'andamento nel tempo delle tensioni e delle correnti in dipendenza degli impulsi di innesco. L'impulso 1 con angolo di comando α_1 porta il thyristor $p1$ in stato di conduzione. Al carico risulta applicata la tensione corrispondente alla zona tratteggiata. La corrente I passa per lo zero con un ritardo rispetto alla tensione corrispondente all'angolo φ caratteristico del carico:

$$\left(\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} \right).$$

L'impulso 2 commuta il thyristor $p2$.

Supponiamo ora che, poco dopo che il thyristor $p1$ è stato nuovamente portato in stato di conduzione dall'impulso 3, si verifichi un improvviso aumento del carico. Ne consegue che il successivo impulso di comando 4 viene spostato verso sinistra, corrispondentemente a un angolo di comando α_2 minore.

Dall'andamento della corrente si vede che il thyristor $p1$ è ancora in stato di conduzione quando il thyristor $p2$ riceve l'impulso di comando 4. Fintanto però che $p1$ conduce, $p2$ risulta a polarità invertite e quindi non può passare allo stato di conduzione.

L'utilizzatore verrà nuovamente percorso da corrente solo quando il thyristor $p1$ verrà commutato dall'impulso 5. L'avvolgimento del

rottura dell'emettitore U_{ED} , il tratto emettitore-base 1 diventa di bassa resistenza ed il condensatore $k1$ si scarica improvvisamente attraverso la resistenza $r3$.

$$U_{ED} = \eta \cdot U_{BB} + U_V \quad [24]$$

In questa formula η rappresenta una costante intrinseca del transistor, compresa fra 0,54 e 0,68 a seconda del tipo.

U_{BB} è la tensione applicata ai due collegamenti di base.

U_V è la caduta di tensione al diodo emettitore; essa è dell'ordine di grandezza di 0,15 V.

La tensione ai morsetti del condensatore $k1$ ha la forma di una tensione a denti di sega.

Ogni volta che il condensatore si scarica, ai capi della resistenza $r3$ si presenta una tensione con andamento assai appuntito, che viene utilizzata come impulso di innesco del thyristor.

La costante di tempo di carica $r1 \cdot C_{(k1)}$ del condensatore $k1$ viene scelta in modo che, con $r1$ completamente inserita, sia di 10 ms.

Diminuendo $r1$, diminuisce pure la costante di tempo di carica di $k1$ e quindi aumenta la frequenza degli impulsi. Il thyristor passa allo stato di conduzione alla prima scarica. Si può quindi diminuire o aumentare l'angolo di comando, diminuendo o aumentando $r1$.

La sincronizzazione degli impulsi con la tensione di rete viene ottenuta trasformando, mediante il diodo Zener $n2$, la tensione di rete raddrizzata e non livellata in una tensione ad andamento trapezoidale.

Ogni volta che la tensione passa per lo zero, il condensatore $k1$ si scarica. Il processo di carica comincia ogni volta dopo il passaggio per lo zero dalla tensione di rete, con che si ottiene la sincronizzazione.

Se si vuole che l'istante di commutazione del thyristor venga variato non a mano, mediante la resistenza $r1$, ma automaticamente mediante una tensione continua fornita da un regolatore, basta sostituire la resistenza $r1$ con un transistor, come indicato a sinistra in alto in figura 26. La tensione variabile continua viene applicata come tensione di comando alla base del transistor.

Questo circuito offre il vantaggio di sostituire praticamente un impulso permanente fino al passaggio per lo zero della tensione, senza che sia necessario mantenere per tutto il tempo la corrente di comando. Si elimina in tal modo un aumento, sia pure limitato, del riscaldamento del thyristor.

Scegliendo opportunamente il condensatore $k1$ e la resistenza $r3$ si può far sì che l'impulso di comando del thyristor non sia troppo breve; esso infatti deve avere durata sufficiente per garantire che la

corrente nel circuito di lavoro del thyristor, data l'induttanza presente nel circuito stesso, superi sicuramente il valore di mantenimento.

Come già abbiamo detto al paragrafo 2.1.5 il superamento della corrente di mantenimento può essere facilitato collegando in parallelo al carico induttivo un gruppo $R-C$.

Nella maggior parte dei casi, in parallelo a un carico fortemente induttivo si avrà senz'altro un gruppo $R-C$ per attenuare le punte di tensione che si verificano al momento della commutazione.

7.7 Sistemi di comando di circuiti trifasi.

Per pilotare un circuito trifase comprendente thyristor occorrono tre serie di impulsi sfasate reciprocamente di 120° ; ogni serie deve a sua volta essere costituita da una sequenza di impulsi distaccati di 180° uno dall'altro.

Per ogni fase occorre quindi un dispositivo di comando, ad esempio come quello rappresentato nella figura 24. Questi tre dispositivi devono a loro volta avere un comando comune, onde ottenere lo sfasamento desiderato.

A titolo di esempio nella figura 27 è indicato come vanno distribuiti gli impulsi di comando dei singoli thyristor di un ponte trifase.

Per ogni periodo occorrono 6 impulsi distanziati di 60° uno dall'altro. Nella figura, questi impulsi sono numerati progressivamente ed il numero è ripetuto accanto all'elettrodo di pilotaggio del thyristor corrispondente.

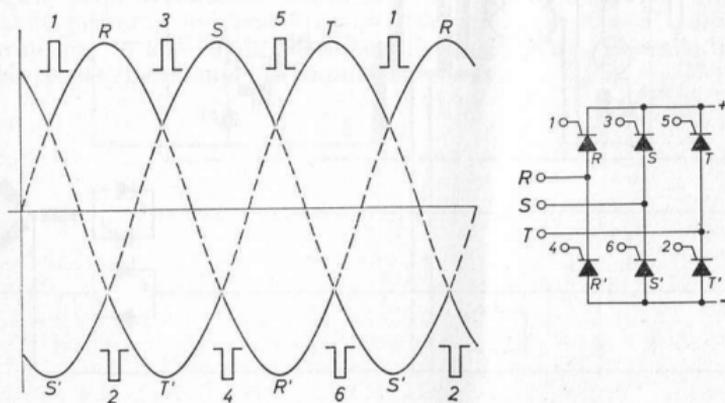


FIG. 27 - Distribuzione degli impulsi di comando in un ponte trifase con 6 thyristor.

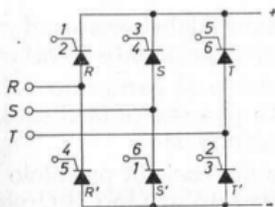


Fig. 28 - Distribuzione degli impulsi di comando in un ponte trifase

Durante ogni periodo, ciascun thyristor è in stato di conduzione per 120° . Contemporaneamente, ciascuno dei due thyristor contrapposti conduce per 60° . Per esempio il thyristor R conduce durante 60° col thyristor S' e per i successivi 60° col thyristor T' : questi due ultimi si trovano in opposizione di fase col thyristor R .

Supponiamo che il circuito debba essere inserito partendo dalle condizioni di corrente zero e che l'istante di inserzione coincida con l'impulso 1.

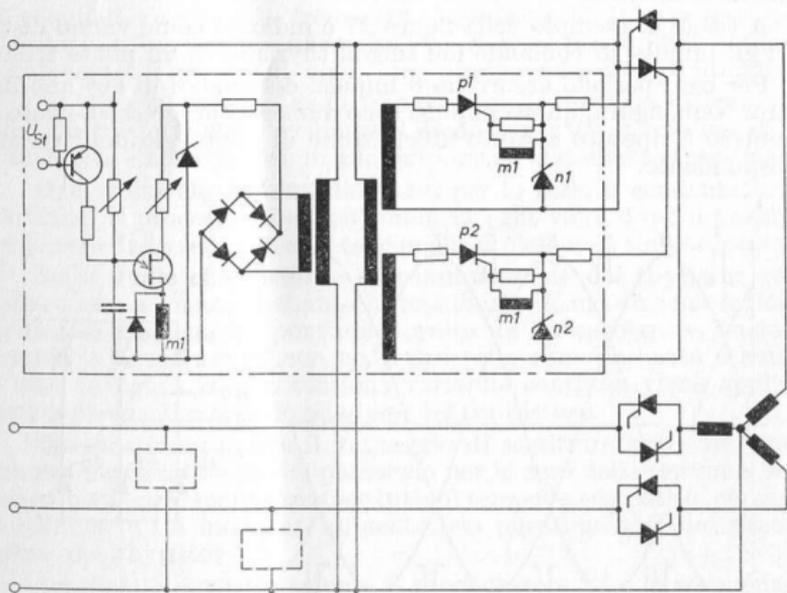


Fig. 29 - Comando di un circuito trifase.

Questo dovrebbe rendere conduttore il thyristor R , il quale però in effetti non può innescarsi perchè il thyristor S' di fase opposta, non è conduttore. Nemmeno il successivo impulso 2 può innescare il thyristor T' , perchè il thyristor R non ha commutato e quindi non conduce corrente. Il circuito può venire avviato solo se gli impulsi di comando hanno ampiezza un po' superiore a 60° . In tal caso infatti l'impulso 1 risulta ancora applicato al thyristor R quando il thyristor T' riceve l'impulso 2: i thyristor R e T' vengono innescati contemporaneamente.

Il funzionamento del circuito può venire avviato anche se a ciascun impulso di comando di un thyristor ne segue un secondo a distanza di 60° . In questo caso all'elettrodo di comando del thyristor R verrebbero applicati gli impulsi 1 e 2.

Col circuito di pilotaggio rappresentato nella figura 24 i traslatori di impulsi mI vengono muniti di un doppio avvolgimento secondario. In tal modo è possibile applicare un impulso agli elettrodi di comando di due thyristor, pur mantenendo i circuiti metallicamente separati. La distribuzione degli impulsi ai singoli thyristor è indicata nella figura 28.

Nella figura 29 è rappresentato un altro sistema di comando di circuiti trifasi. In ogni fase dall'utilizzatore trifase sono inseriti due thyristor in controfase. Come emettitori di impulsi vengono utilizzati transistori a giunzione unica. Per mezzo del traslatore mI gli impulsi del transistore a giunzione unica pilotano qui due thyristor ausiliari $p1$ e $p2$. Le semionde positive, mediante i diodi Zener $n1$ e $n2$, vengono trasformate in onde trapezoidali, le quali a loro volta vengono utilizzate per la commutazione dei thyristor principali collegati, come abbiamo visto, in controfase. Gli impulsi di comando risultano pertanto applicati ai thyristor principali sino al passaggio naturale per lo zero della tensione; di conseguenza, si rende inutile in questo caso l'emissione di impulsi successivi.

8. IMPIEGO DEI THYRISTOR. - GENERALITÀ.

Dopo aver descritto il funzionamento e le proprietà dei thyristor, vogliamo ora illustrare alcuni esempi di impiego, onde dare una idea delle loro vaste possibilità di utilizzazione.

Gli impieghi dei thyristor si possono suddividere in due gruppi fondamentali:

- 1) circuiti a corrente alternata;
- 2) circuiti a corrente continua.

I due gruppi sono contraddistinti principalmente dalle caratteristiche seguenti:

a) nei circuiti a corrente alternata i thyristor si interdicono automaticamente ad ogni passaggio naturale per lo zero della corrente e devono venire resi conduttori ad ogni semiperiodo positivo mediante un impulso di comando. I thyristor consentono di realizzare, senza mezzi ausiliari, regolatori continui della corrente alternata;

b) nei circuiti a corrente continua invece il thyristor, una volta posto in stato di conduzione, rimane conduttore fino a che non viene interdetto mediante l'interruzione del circuito o mediante uno speciale dispositivo di interdizione. La corrente di carico può venire regolata con continuità solo mediante particolari mezzi ausiliari.

Rientrano nel primo gruppo di impiego (circuiti a corrente alternata) i regolatori di corrente alternata, raddrizzatori, convertitori bidirezionali e interruttori rapidi.

Nel secondo gruppo di impiego (circuiti a corrente continua) sta in primo luogo il funzionamento come interruttore; infatti il thyristor in tutti gli esempi di impiego esplica le funzioni di un interruttore.

8.1 Impieghi nei circuiti a corrente alternata.

8.1.1 Regolatore di corrente alternata (monofase o trifase).

L'impiego di thyristor come organi di manovra in circuiti a corrente alternata si è ormai generalizzato. Con ingombro molto limitato e ridottissima potenza di pilotaggio, i thyristor possono comandare potenze notevoli con perdite trascurabili. Essi vengono impiegati nella regolazione di impianti di riscaldamento, per il comando di fari e di impianti di illuminazione nonché per il telecomando di ogni genere di utilizzatori in corrente alternata.

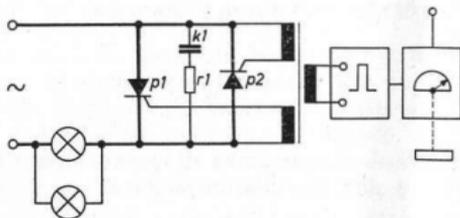


Fig. 30 - Regolatore a thyristor per l'oscuramento graduale di un impianto di illuminazione con lampade ad incandescenza.

La figura 30 rappresenta lo schema fondamentale di un circuito di regolazione della intensità di illuminazione mediante lampade ad incandescenza, quale si usa in teatri, cinematografi e sale di conferenze. I due thyristor $p1$ e $p2$ lavorano in controfase. Condensatore $k1$ e resistenza $r1$ costituiscono il circuito di protezione. I thyristor vengono pilotati da uno stadio emettitore di impulsi. Lo spostamento nel tempo degli impulsi di comando viene realizzato a mano mediante un ponte di fase.

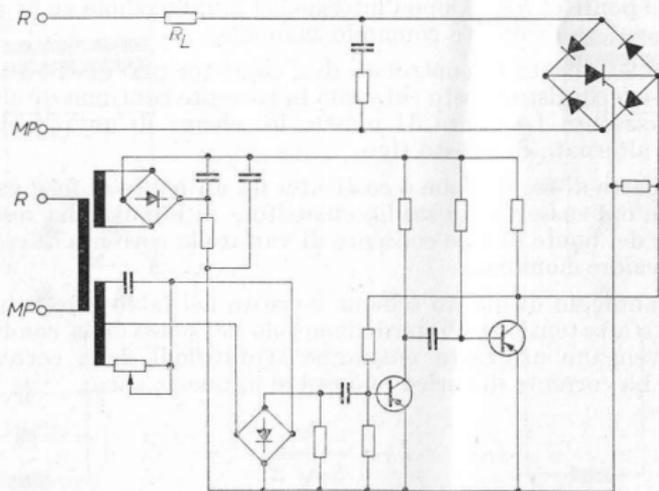


Fig. 31 - Regolatore di corrente con thyristor sul ramo a corrente continua di un raddrizzatore.

La corrente di carico può avere l'intensità:

$$2 \cdot I_{nenn} \cdot \frac{\pi}{2 \sqrt{2}} A$$

in questa formula I_{nenn} rappresenta il valore medio aritmetico della corrente ammissibile per la cella impiegata.

Per l'inserzione si deve ricorrere a particolari artifici. Si suppone che il circuito sia dimensionato in modo che i thyristor vengano sfruttati in pieno. La resistenza ohmica di una lampadina ad incandescenza a freddo è circa 1/11 della resistenza a caldo. Al momento della inserzione pertanto e fino a che il filamenti non hanno raggiunto la temperatura finale, circola una corrente fino a 11 volte la corrente normale. Il thyristor verrebbe distrutto. Il sovraccarico dei thyristor alla inserzione viene evitato chiudendo insieme al contattore principale un secondo contattore che cortocircuita i thyristor e che viene riaperto dopo 1-2 secondi. Dopo questo tempo infatti i filamenti delle lampadine hanno raggiunto la temperatura di regime ed i thyristor possono prendere il carico.

Il sovraccarico dei thyristor alla inserzione può venire evitato anche prelevando la tensione di comando del contattore principale da un contatto ausiliario posto in posizione di « *Buio* » del potenziometro del ponte di fase. Dopo l'inserzione l'illuminazione viene portata al pieno valore mediante comando manuale.

Il collegamento in controfase di 2 thyristor può essere sostituito da un unico thyristor posto sul ramo in corrente continua di un ponte di raddrizzatori. La figura 31 mostra lo schema di un regolatore di corrente alternata di questo tipo.

La parte di regolazione è costituita da un ponte di fase variabile a mano e dal susseguente stadio emettitore di impulsi. La resistenza variabile del ponte di fase consente di variare la corrente di carico da zero al valore nominale.

Il vantaggio di questo schema consiste nel fatto che il thyristor è soggetto alla tensione d'interdizione solo nel senso della conduzione, benchè vengano utilizzate entrambe le direzioni della corrente alternata. La corrente di carico può essere in questo caso:

$$I_N \cdot \frac{\pi}{2 \sqrt{2}}$$

essendo I_N la corrente nominale del thyristor.

8.1.2 Raddrizzatori.

Il campo classico di impiego dei thyristor è rappresentato dai raddrizzatori, coi quali si trasforma energia in corrente alternata monofase o trifase, in energia a corrente continua, e dai convertitori coi quali, come vedremo nel prossimo paragrafo, si trasforma energia in corrente continua, in energia in corrente alternata, che viene immessa nella rete appunto a corrente alternata.

Si parla in tal caso più precisamente di convertitori bidirezionali.

La figura 32 mostra come la corrente assorbita da un utilizzatore alimentato da un ponte monofase di raddrizzatori può venire regolata praticamente senza perdite, da zero al valore nominale.

In un ponte monofase, due raddrizzatori sono sostituiti da due thyristor. L'applicazione degli impulsi di comando è molto semplice, perchè i catodi dei due thyristor si trovano al medesimo potenziale. Le resistenze di protezione $r2$ e $r3$ limitano la corrente di comando e contemporaneamente ne determinano una suddivisione equilibrata fra i due thyristor. Il condensatore $k1$ e la resistenza $r1$ servono di protezione all'avvolgimento secondario del trasformatore. Se il carico è fortemente o addirittura puramente induttivo, la sua induttanza tenderà a mantenere la corrente anche dopo l'interdizione dei thyristor ad ogni passaggio per lo zero della tensione di rete.

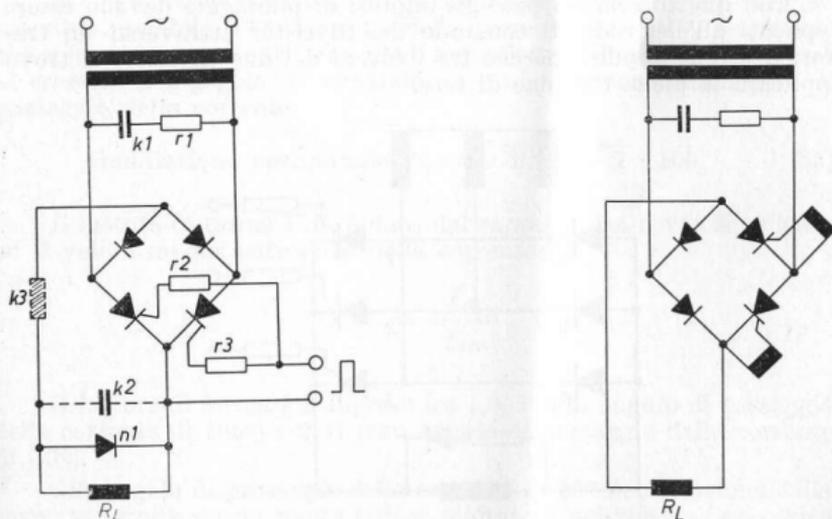


Fig. 32 - Raddrizzatore a ponte con thyristor.

In conseguenza del brevissimo tempo di disinserzione dei thyristor, ai capi dell'induttanza di carico si verificano notevoli picchi di tensione, che possono provocare la distruzione dei thyristor medesimi. Il diodo $n1$ consente alla corrente di circolare liberamente, fino a che è stata dissipata tutta la energia accumulata nella induttanza. I picchi di tensione vengono in tal modo limitati al valore della caduta di tensione di passaggio del diodo $n1$.

Nella maggior parte dei casi, i circuiti raddrizzatori vengono muniti di dispositivi di livellamento della tensione raddrizzata. Tale dispositivo è disegnato tratteggiato nella figura 32. Il condensatore di livellamento $k2$ deve essere accompagnato da una reattanza $k3$ o da una resistenza, che limiti la corrente iniziale di carica del condensatore medesimo. Un condensatore senza impedenza limitatrice di corrente provocherebbe, all'atto della inserzione del circuito, la distruzione dei thyristor.

I due thyristor possono venire inseriti nel ponte anche in modo dissimmetrico, come è indicato nello schema a destra della figura 32.

Questo circuito presenta il vantaggio di consentire, quando i thyristor vengono interdetti, che la corrente continui a circolare attraverso i due raddrizzatori non pilotati, fino a che non è stata dissipata l'energia accumulata nella eventuale induttanza del carico. Diventa in tal modo superfluo l'impiego del diodo $n1$ che abbiamo visto nello schema di sinistra.

Con questo schema però gli impulsi di pilotaggio devono essere applicati all'elettrodo di comando dei thyristor attraverso un trasformatore di impulsi, perchè fra i catodi dei due thyristor si trova applicata la piena tensione di rete.

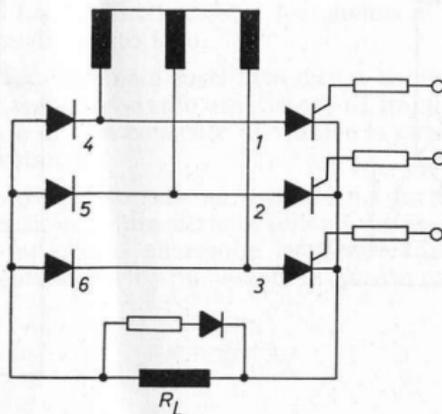


Fig. 33 - Raddrizzatore a ponte trifase con 3 thyristor e 3 diodi non comandati.

Nella figura 33 è rappresentato lo schema corrispondente relativo a un ponte trifase.

In ogni ramo di questo ponte sono disposti in serie un raddrizzatore non pilotato ed un thyristor. Il comando dei tre thyristor mediante impulsi è molto semplice, perchè i loro catodi si trovano al medesimo potenziale. Per questo motivo, ponti trifasi di questo tipo sono di impiego molto frequente.

Anche qui, in parallelo col carico induttivo è disposto un diodo, per consentire la dissipazione della energia accumulata nella induttanza. La resistenza in serie col diodo limita il tempo di diseccitazione di R_L . Quanto maggiore è la resistenza, tanto maggiore è la tensione connessa con la dissipazione della energia accumulata in R_L e quindi tanto minore è il tempo occorrente per dissipare totalmente tale energia.

Il valore massimo di questa resistenza è determinato dalla caduta di tensione che si verifica ai suoi capi all'istante iniziale, quando essa è percorsa dalla intera corrente di carico. Questa tensione deve essere minore della differenza fra la tensione di picco ammissibile per il thyristor e la tensione di picco della rete, onde evitare danni al thyristor.

I dispositivi di livellamento necessari per un ponte trifase sono più piccoli di quelli richiesti da un ponte monofase.

Se i thyristor sono pilotati in modo da condurre per l'angolo massimo possibile, l'ondulazione della corrente è il 4,6% del valore che si ha con un ponte trifase a diodi non pilotati. L'ondulazione cresce al crescere dell'angolo di comando, cioè al diminuire dell'angolo di passaggio della corrente.

$$\text{Ondulazione percentuale } \% = \sqrt{F.F.^2 - 1} \cdot 100 \quad [25]$$

Il fattore di forma F.F. è dato dal rapporto fra il valore efficace ed il valore medio aritmetico della corrente:

$$F.F. = \frac{I_{eff}}{I_{arm}}$$

Il fattore di forma è compreso fra 1,002 (con angolo di passaggio della corrente di 180°) e 2,31 (con angolo di passaggio della corrente di 30°).

Con angolo di passaggio della corrente di 30° l'ondulazione della corrente fornita da un ponte trifase pilotato è del 208%. Con carico ohmico è necessario un dispositivo di livellamento.

Tutti i circuiti raddrizzatori conosciuti, a stella, a doppia stella, a bobina di drenaggio possono venire equipaggiati con thyristor e possono pertanto venire impiegati come raddrizzatori comandati a mano od automaticamente. Alimentatori stabilizzati, apparecchi per la carica e la formazione di batterie vengono oggi equipaggiati con thyristor.

Uno speciale interesse presentano i thyristor nella tecnica degli azionamenti e delle regolazioni; in queste applicazioni assume particolare importanza l'elevato rendimento raggiungibile coi thyristor.

Negli azionamenti di convertitori rotanti, ad esempio, la velocità di rotazione può venire regolata variando la tensione rotorica mediante raddrizzatori a thyristor. Un regolatore automatico può consentire di mantenere costante la velocità di rotazione, indipendentemente dalle variazioni di carico e di altre grandezze perturbatrici.

8.1.3 Convertitori bidirezionali.

In base alla figura 34 vogliamo ora descrivere il funzionamento di un convertitore equipaggiato con thyristor; supponiamo che in serie col carico R_L sia inserita una induttanza L sufficiente per man-

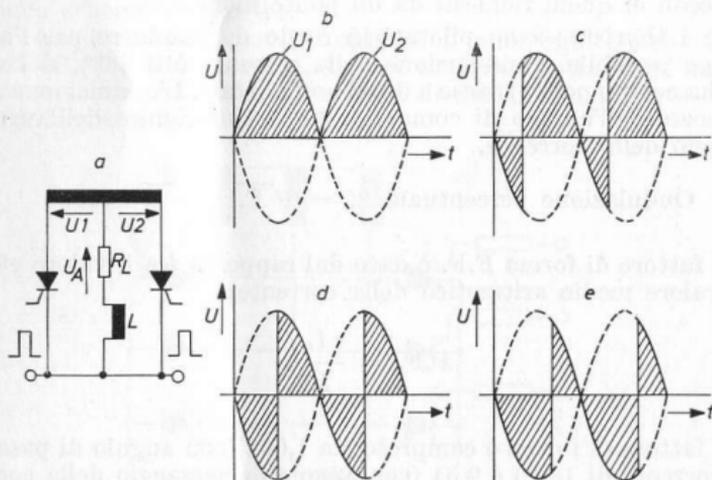


Fig. 34 - Convertitore a thyristor.

b	= ritardo dell'innesco	0° ;	piena tensione
c	"	60° ;	$U_A = 50\%$
d	"	90° ;	$U_A = 0$
e	"	120° ;	$U_A = -50\%$.

tenere una circolazione permanente di corrente. Per semplicità abbiamo scelto un circuito con due thyristor con collegamento al punto medio del secondario del trasformatore. La tensione di uscita viene regolata ritardando il flusso di corrente mediante i thyristor; le celle cioè non vengono inserite immediatamente dopo il passaggio per lo zero della semionda di tensione ad esse corrispondente. L'innesco avviene con un determinato angolo di ritardo. I diagrammi della figura indicano la tensione di uscita in dipendenza del ritardo all'innesco. Tale tensione è data dalla differenza fra le superfici sopra e sotto l'asse delle ascisse. Ogni cella conduce corrente per 180° , perchè l'induttanza restituisce l'energia in essa accumulata.

La tensione di uscita risultante diminuisce al crescere dell'angolo di ritardo all'innesco; quando tale angolo ha il valore di 90° , la tensione di uscita è nulla. Se si aumenta ulteriormente l'angolo di ritardo, la tensione risultante diventa negativa.

Se si sostituisce il carico R_L con una sorgente di tensione, il senso del flusso di energia si inverte e la sorgente di tensione invia energia in rete. Si parla per tale motivo di convertitori bidirezionali.

Il funzionamento con flusso di energia nei due sensi viene spesso sfruttato per la formazione di batterie di accumulatori al piombo.

Tale processo è costituito da successive cariche e scariche della batteria a corrente costante.

La batteria viene caricata prelevando energia dalla rete a corrente alternata; la corrente viene raddrizzata e mantenuta costante mediante un raddrizzatore-regolatore a thyristor.

Dopo un tempo prefissato un dispositivo automatico interrompe la carica ed inverte mediante apposito commutatore la polarità dei collegamenti della batteria. L'angolo di ritardo all'innesco viene ora portato ad un valore superiore a 90° . La batteria si scarica. Il convertitore trasforma in energia a corrente alternata l'energia a corrente continua accumulata nella batteria e la restituisce alla rete.

La corrente di scarica viene mantenuta costante dal medesimo regolatore che era servito per mantenere costante la corrente di carica.

Il sistema che abbiamo ora descritto assume particolare importanza nei grandi impianti di formazione delle batterie, perchè consente di rinviare in rete, praticamente senza perdite, l'energia di scarica che una volta doveva venire dissipata in resistenze.

La figura 35 mostra un altro esempio di impiego. La corrente rotorica di un motore per argano viene regolata mediante un raddrizzatore a thyristor.

Il senso di rotazione del motore viene invertito invertendo pure mediante thyristor il senso della corrente di campo.

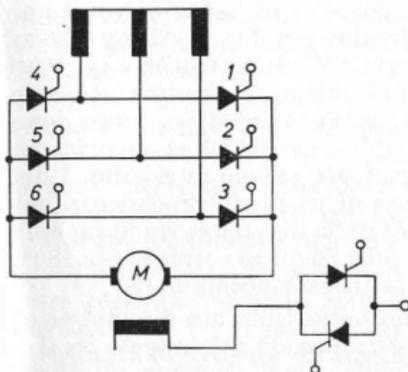


Fig. 35 - Alimentazione del rotore di un motore a corrente continua con ponte trifase a thyristor. Inversione del campo mediante thyristor.

Se il motore è collegato in modo da ruotare nel senso dell'abbassamento del carico, questo tenderà ad assumere, per effetto della gravità, una velocità sempre maggiore. Se si inverte la polarità degli avvolgimenti rotorici (oppure di quelli di campo) e si comandano i thyristor con un angolo di ritardo all'innesco superiore a 90° , il motore fornisce energia alla rete attraverso il convertitore e viene frenato. La forza frenante può venire variata modificando l'angolo di innesco dei thyristor.

I circuiti a ponte dei convertitori sono equipaggiati con 6 thyristor perchè con 3 soli thyristor non è possibile effettuare la conversione completa della corrente continua. Con 3 thyristor si riesce a effettuare la conversione in un solo quadrante, mentre con 6 thyristor la conversione avviene nei quattro quadranti. Per azionamenti che devono invertire frequentemente e rapidamente il senso di rotazione,

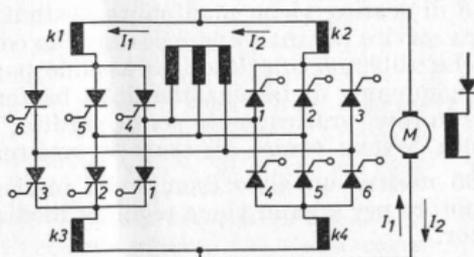


Fig. 36 - Convertitore-invertitore del senso di rotazione mediante thyristor in collegamento antiparallelo.

si impiegano convertitori doppi. La figura 36 mostra un circuito con collegamento antiparallelo di 2 convertitori, ciascuno dei quali comprende 6 thyristor e può funzionare sia nel senso di raddrizzare la corrente alternata che nel senso opposto.

È previsto un convertitore per ogni senso di rotazione. Ne risulta che nel senso della conduzione i due convertitori sono collegati in serie. Per tale motivo i due convertitori devono essere comandati in modo che la corrente di circolazione interna sia mantenuta entro limiti ristretti.

I due raddrizzatori vengono comandati in modo da erogare la medesima tensione continua. La differenza fra i valori istantanei delle due tensioni viene assorbita dalle 4 reattanze $kI \dots kA$, che limitano la corrente di circolazione interna.

I thyristor vengono comandati in modo da dare alla tensione l'esatta polarità, mentre la corrente di carico interessa automaticamente l'esatto convertitore, a seconda del senso di rotazione che deve essere accelerato o frenato.

I circuiti di questo tipo, con due convertitori a thyristor e con collegamento antiparallelo, consentono di raggiungere brevissimi tempi di inversione del senso della corrente e dell'energia.

I convertitori bidirezionali hanno recentemente assunto particolare importanza per la regolazione, con perdite molto limitate, della velocità di rotazione dei motori asincroni con rotore avvolto.

In molti casi, e particolarmente per servizi gravosi, il motore asincrono presenta notevoli vantaggi rispetto al motore a corrente continua. Accanto al minor prezzo, il vantaggio principale del motore asincrono è che esso possiede un collettore ad anelli, il quale in esercizio è fonte di difficoltà e di inconvenienti incomparabilmente inferiori a quelli causati dal collettore a lamelle, di cui sono muniti i motori a corrente continua.

Mediante resistenze variabili inserite nel suo circuito rotorico, il motore asincrono può venire avviato con gradualità, esattamente come lo può essere, mediante resistenze addizionali regolabili, il motore a corrente continua. La velocità di rotazione del motore asincrono diminuisce proporzionalmente al crescere dell'energia dissipata nel circuito rotorico in conseguenza dello scorrimento. Con velocità di rotazione molto ridotta, l'energia dissipata nelle resistenze del circuito rotorico raggiunge valori percentualmente molto elevati ed il rendimento del motore scende a valori assai bassi.

Questo inconveniente può venire evitato con l'impiego di un convertitore bidirezionale.

La figura 37 rappresenta un « *circuito convertitore iposincrono* ».

L'energia di scorrimento del rotore ad anelli (circolo a destra nella figura 37) viene trasformata in corrente continua mediante un ponte trifase con raddrizzatori al silicio e successivamente ritrasfor-

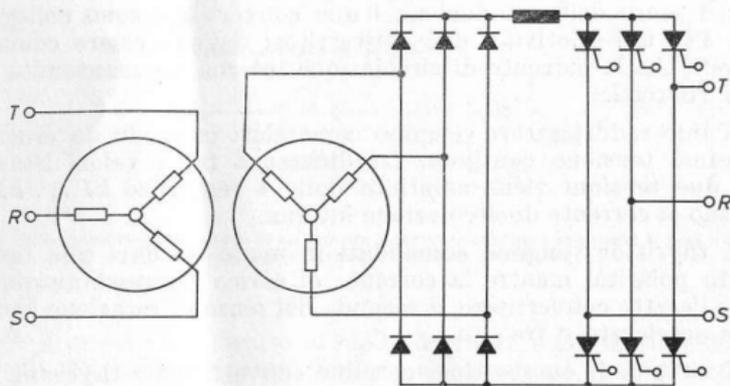


Fig. 37 - Circuito convertitore iposincrono. Regolazione della velocità di un motore asincrono con rotore ad anelli.

mata in corrente alternata da un convertitore comprendente 6 thyristor e immessa in rete attraverso un trasformatore (non disegnato in figura).

Variando l'angolo di innesco dei thyristor del convertitore, la velocità di rotazione del motore può venire variata con continuità; le perdite sono ora praticamente trascurabili.

Poichè la frequenza rotorica non è uguale alla frequenza di rete, i due circuiti — del raddrizzatore e del convertitore — devono essere disaccoppiati mediante una reattanza, la quale esplica contemporaneamente le funzioni di reattanza di commutazione.

Se si vuole che la velocità di rotazione del motore rimanga costante, se ne misura il valore mediante una dinamo tachimetrica accoppiata al motore stesso; la tensione fornita da questa dinamo viene confrontata con una tensione di riferimento corrispondente alla desiderata velocità del motore.

La differenza di queste due tensioni, opportunamente amplificata, comanda il generatore di impulsi del convertitore.

È opportuno che questa regolazione venga completata con una regolazione di corrente. Si misura mediante riduttori il valore della

corrente trifase nei conduttori che vanno al raddrizzatore; il valore di riferimento viene fornito dall'amplificatore di regolazione.

La caratteristica coppia-velocità di rotazione del motore asincrono con la regolazione di velocità ora descritta corrisponde all'incirca a quella di un motore a corrente continua.

8.1.4 Interruttori rapidi in circuiti a corrente alternata.

Particolarmente nelle macchine utensili, i motori trifasi sono spesso soggetti a frequentissimi avviamenti ed arresti. Anche trascurando il fatto che i contattori hanno tempi di manovra relativamente lunghi, bisogna considerare che la loro vita è limitata, se la frequenza di manovra è molto elevata. I thyristor consentono di realizzare interruttori privi di contatti i quali, oltre ad avere tempi di intervento brevissimi, consentono anche frequenze di manovra molto elevate.

La figura 38 mostra un esempio pratico. Un motore trifase viene comandato mediante thyristor; su ogni fase ne sono inseriti due, in collegamento antiparallelo.

Il comando dei thyristor, se essi devono soltanto venire inseriti e disinseriti, cioè resi conduttori ed interdetti, è molto semplice.

Gli impulsi generati da un emettitore con una frequenza di 2 kHz e ampiezza di circa 100 μ s vengono applicati agli elettrodi di comando dei 6 thyristor attraverso tre traslatori, ciascuno dei quali è provvisto di due avvolgimenti secondari.

La potenza di uscita dell'emettitore di impulsi deve essere di circa 10 W.

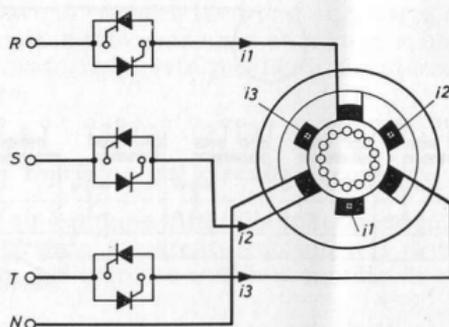


Fig. 38 - Comando mediante thyristor di un motore asincrono con rotore a gabbia di scoiattolo.

Fintanto che l'emettitore di impulsi è alimentato, gli impulsi da esso emessi pervengono agli elettrodi di pilotaggio dei thyristor, i quali pertanto conducono la corrente. Per interrompere i thyristor, cioè per togliere corrente al motore, si interrompe l'alimentazione dell'emettitore di impulsi; l'inserzione e la disinserzione di questo può avvenire mediante interruttori meccanici o elettronici.

La distanza di un impulso dal passaggio per lo zero di una delle tre tensioni (reciprocamente sfasate di 120°) che costituiscono il sistema trifase, se gli impulsi sono emessi con frequenza di 2 kHz, può essere nel caso più sfavorevole di 9 gradi elettrici. Ciò corrisponde ad una asimmetria delle 3 tensioni di fase di circa 1% e quindi è senza altro trascurabile.

La figura 39 mostra un altro esempio di interruttore rapido. Questo schema consente non solo di inserire e disinserire un motore trifase mediante thyristor (quindi senza contatti), ma anche di invertirne il senso di rotazione. Prima di passare da un senso di rotazione all'altro, il motore viene frenato con corrente continua.

Quando il motore ha rotazione sinistrorsa, sono inseriti i thyristor 2, 2', 4, 4'; quando la rotazione è destrorsa sono inseriti i thyristor

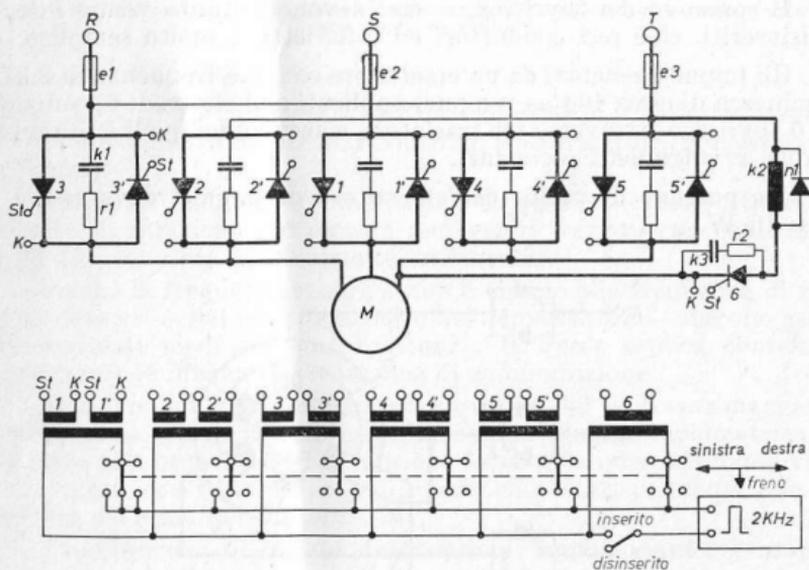


Fig. 39 - Circuito a thyristor per l'inversione del senso di rotazione e per la frenatura in corrente continua di un motore sincrono.

3, 3', 5, 5'. I thyristor 1 e 1' sono conduttori per entrambi i sensi di rotazione.

Per invertire il senso di rotazione si passa obbligatoriamente per uno stadio intermedio, nel quale vengono resi conduttori i thyristor 1, 1' e 6.

Attraverso la reattanza k_2 , il thyristor 6, un avvolgimento statico del motore ed il thyristor 1', circola ora una corrente continua a una semionda, che frena fortemente il motore. L'intensità della corrente di frenatura viene limitata dalla reattanza k_2 , in parallelo alla quale è disposto un diodo non asservito per consentire la disseccazione della reattanza medesima.

I thyristor vengono comandati mediante impulsi rettangolari emessi da un generatore di impulsi. Gli impulsi si susseguono con una frequenza di 2 kHz ed hanno una durata di 100 μ s ciascuno. Essi vengono applicati all'elettrodo di comando dei thyristor mediante traslatori di impulsi separati.

Nella figura 39 si suppone che il circuito di comando venga predisposto mediante un commutatore meccanico a 6 piani. In pratica si lavora generalmente con interruttori elettronici. In tal caso, la possibilità di rendere conduttori i thyristor 2, 2' e 4, 4' deve essere sicuramente bloccata rispetto alla possibilità di rendere conduttori i thyristor 3, 3' e 5, 5'.

In tutti i casi in cui i thyristor esplicano la funzione di interruttori, si deve prevedere anche un interruttore principale di tipo meccanico, col quale si possa staccare dalla rete il motore o in genere l'apparecchio utilizzatore.

Infatti una sia pur piccola corrente residua circola sempre anche attraverso i thyristor interdetti. Inoltre gli elementi di protezione k_1 r_1 portano tensione alle fasi dell'utilizzatore.

Quando si devono eseguire lavori su un motore o su un utilizzatore in genere, comandato mediante thyristor, è indispensabile che esso venga distaccato dalla rete mediante un interruttore principale di tipo meccanico.

8.2 Impiego dei thyristor nei circuiti a corrente continua.

Nella figura 40 è rappresentata l'applicazione più semplice di un thyristor in un circuito a corrente continua. Il thyristor sostituisce qui un contattore per corrente continua munito di contatto di autoalimentazione.

Il comando a thyristor presenta tempi di intervento notevolmente inferiori rispetto al comando mediante normali contattori.

Mentre un contattore per corrente continua da 200 A ha tempi di intervento di $60 \div 80$ ms, un thyristor di uguale corrente nominale chiude il circuito in pochi microsecondi e lo interrompe in circa 20 μ s.

Altri vantaggi dell'impiego dei thyristor sono costituiti dal funzionamento senza contatti e dalla possibilità di una maggiore frequenza di manovra.

Quando si preme il pulsante di « *Marcia* », la corrente di innesco percorre il tratto di comando del thyristor attraverso la resistenza rI . Il thyristor diventa conduttore e la corrente può percorrere la resistenza di carico R_L . Il condensatore di interdizione kI viene caricato, attraverso la resistenza rI , alla piena tensione di rete, diminuita dalla caduta di tensione di circa 1 V, che ha luogo attraverso il thyristor. La sua armatura superiore (nella figura) ha potenziale positivo.

Quando si preme il pulsante di « *Arresto* », l'armatura positiva del condensatore viene collegata al catodo del thyristor.

Il condensatore si scarica attraverso il thyristor, invertendone per breve tempo la polarità e portandolo di conseguenza allo stato di interdizione.

Nel caso, del resto eccezionale, che il circuito di carico sia privo di induttanza, il diodo non asservito nI può venire soppresso.

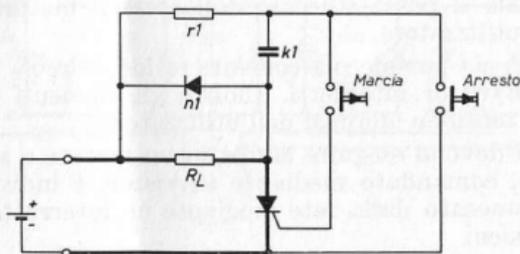


Fig. 40 - Impiego del thyristor come contattore a corrente continua con autoritenuta.

La capacità minima del condensatore di interdizione è determinata dalla corrente di carico e dal tempo di ripristino del thyristor. La corrente di scarica del condensatore deve avere l'intensità della corrente di carico per un tempo almeno pari al tempo richiesto dalla cella per interdirsi.

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{U} F \quad [26]$$

I corrente di carico;

U tensione alla quale è caricato il condensatore;

Δt deve essere un po' maggiore del tempo t_f di ripristino del thyristor.

Il sistema di interdizione del thyristor mediante scarica di un condensatore, che abbiamo ora illustrato viene adottato in quasi tutti i circuiti a corrente continua che impiegano thyristor.

8.2.1 Interruttori rapidi.

In molte applicazioni della elettrotecnica industriale si esige che grossi magneti di accoppiamento o di azionamento intervengano in tempi brevissimi.

È noto che la corrente impulsiva di scarica di un condensatore, che sia caricato ad una tensione multipla della tensione normale di alimentazione dell'elettromagnete, consente di ottenere tempi di intervento molto brevi.

Nella figura 41 indichiamo come questo problema possa venire risolto per mezzo di thyristor.

Il thyristor $p1$ è collegato in serie all'avvolgimento S dell'elettromagnete, con funzioni di interruttore.

Il raddrizzatore $n1$ alimenta la bobina S alla sua tensione nominale. Il condensatore $k1$ viene caricato dal raddrizzatore $n2$ ad una tensione quintupla di quella fornita da $n1$.

Quando l'interruttore è in posizione di « *Disinserito* » (il dispositivo di comando, che in pratica è di tipo elettronico, è qui indicato per semplicità mediante due commutatori meccanici) il condensatore $k4$ riceve una corrente di carica attraverso la resistenza $r4$, il commutatore $a2$ ed il tratto di pilotaggio del thyristor $p2$. Questa corrente rende anche conduttore il thyristor $p2$.

Attraverso la resistenza di protezione $r6$ ed il thyristor $p2$ il condensatore $k4$ viene ora caricato alla medesima tensione del condensatore $k1$.

La resistenza $r5$ determina la tensione applicata all'elettrodo di comando di $p2$. La resistenza $r6$ può essere molto piccola; essa ha la funzione di limitare la corrente iniziale di carica di $k4$ ad un valore non pericoloso per $p2$.

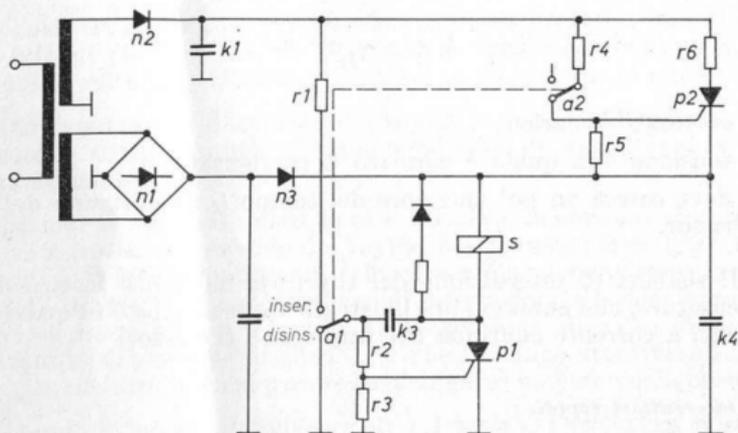


fig. 41 - Inserzione rapida di un magnete d'azionamento mediante impulso di scarica di un condensatore. I thyristor esplicano la funzione di interruttori rapidi.

Quando $k4$ è caricato alla piena tensione, non circola più corrente ed il thyristor $p2$ si interdice. Il diodo $n3$ blocca la tensione di $k4$ rispetto al raddrizzatore $n1$.

Il comando di inserzione porta i commutatori $a1$ e $a2$ in posizione di « *Inserito* », $a2$ toglie tensione all'elettrodo di comando di $p2$. Circola ora corrente attraverso la resistenza $r1$, il contatto $a1$, la resistenza $r2$ ed il tratto di pilotaggio del thyristor $p1$. Quest'ultimo viene reso conduttore e di conseguenza il condensatore $k4$ si scarica attraverso di esso sull'avvolgimento dell'elettromagnete. L'impulso della corrente di scarica determina un rapido intervento dell'elettromagnete medesimo. Quando la tensione del condensatore $k4$ è diventata inferiore alla tensione del raddrizzatore $n1$, il diodo $n3$ diventa conduttore ed il raddrizzatore $n1$ si assume l'alimentazione permanente di S attraverso $p1$.

La resistenza $r3$ limita la tensione applicata all'elettrodo di comando del thyristor $p1$.

Il condensatore di interdizione $k3$ viene caricato alla medesima tensione del condensatore $k1$ attraverso la resistenza $r1$, il commutatore $a1$ ed il thyristor $p1$.

Per diseccitare il magnete si portano i commutatori $a1$, $a2$ nuovamente in posizione di « *Disinserito* ». Il condensatore di interdizione $k3$ si scarica attraverso il commutatore $a1$ ed il thyristor $p1$. Ciò

determina per un breve tempo l'annullamento della corrente che percorre il thyristor $p1$ e quindi la sua interdizione. L'elevato picco di tensione provocato dalla interruzione del circuito del magnete S , si scarica attraverso il diodo non asservito disposto in parallelo con l'avvolgimento di S .

La resistenza inserita in serie con tale diodo provoca una rapida diseccitazione del magnete; quanto più elevata è la resistenza, tanto più rapida è la diseccitazione del magnete. Il valore massimo di questa resistenza è determinato dalla caduta di tensione da essa provocata.

La corrente che la percorre è all'inizio pari alla corrente che percorre l'avvolgimento del magnete prima dell'interruzione del circuito. La caduta di tensione ai capi della resistenza, aumentata della caduta di tensione di passaggio di $n2$, non deve superare la massima tensione inversa ammissibile per il thyristor $p1$.

Il commutatore $a2$ applica nuovamente tensione all'elettrodo di comando del thyristor $p2$. Come detto all'inizio, il condensatore $k4$ si carica attraverso $p2$ ed è pronto per una nuova inserzione del magnete S .

La figura 42 mostra l'applicazione dei thyristor al comando di uno stroboscopio a lampeggiamento.

Il condensatore di lampeggiamento viene caricato attraverso la resistenza $r1$; contemporaneamente anche il condensatore di innesco $k2$ viene caricato alla tensione (continua) di 350 V, attraverso la resistenza $r2$. Chiudendo il contatto d del relé disegnato tratteggiato, il condensatore di innesco $k2$ si scarica attraverso l'avvolgimento primario del trasformatore di Tesla $m1$. L'elevato picco di tensione che si genera al secondario innesca il tubo lampeggiatore L , attraverso il quale si scarica il condensatore $k1$. Per osservare fenomeni molto rapidi, occorrono frequenze di lampeggio elevate, che non possono venire ottenute con interruttori meccanici, soprattutto se sono in gioco potenze sensibili.

Il thyristor coi suoi brevi tempi di intervento e di ripristino, rappresenta in questi casi l'interruttore ideale.

Il thyristor $p1$ sostituisce dunque il contatto d . Ad ogni impulso applicato al suo elettrodo di pilotaggio, il thyristor diventa conduttore ed il condensatore $k2$ si scarica attraverso di esso e l'avvolgimento primario del trasformatore di Tesla $m1$. Con ciò entra in oscillazione il circuito oscillante costituito dalla induttanza primaria del trasformatore $m1$ e dal condensatore $k2$. Dopo che l'energia inizialmente accumulata nel condensatore si è trasferita nella induttanza, il senso della corrente si inverte e l'energia si trasferisce nuovamente dall'induttanza alla capacità. Tale corrente inversa determina l'interdizione del thyristor.

Il tempo occorrente perchè il thyristor venga interdetto corrisponde quindi ad un semiperiodo della frequenza propria del circuito oscillante. La durata di tale semiperiodo deve essere leggermente maggiore del tempo di ripristino del thyristor.

Si vede che si possono ottenere frequenze di funzionamento molto elevate. La frequenza massima di lampeggio è determinata pratica-

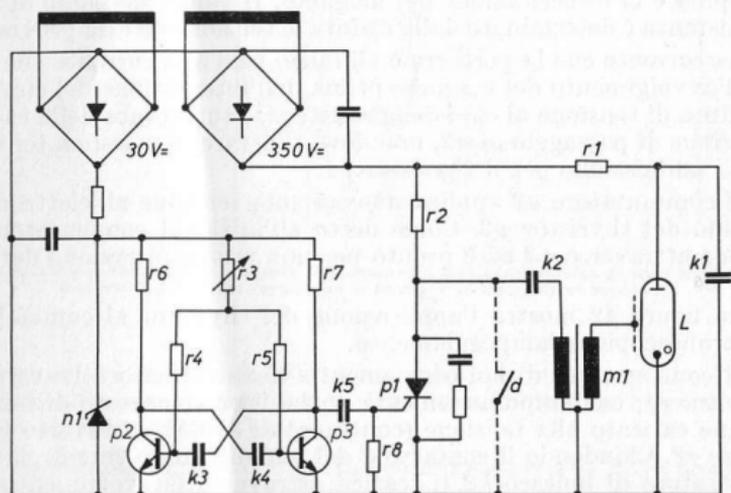


Fig. 42 - Impiego del thyristor come interruttore rapido in uno stroboscopio elettronico.

mente dalla costante di tempo di carica dei condensatori $k1$ e $k2$, le quali hanno rispettivamente i valori $\tau_1 = r1 \cdot C_{k1}$ e $\tau_2 = r2 \cdot C_{k2}$.

Il thyristor è protetto da un condensatore e da una resistenza in serie fra di loro ed in parallelo col thyristor medesimo.

Gli impulsi di comando del thyristor $p1$ vengono generati da un multivibratore comprendente i transistori $p2$ e $p3$.

Il funzionamento del multivibratore può essere brevemente descritto nel modo seguente.

Supponiamo che il transistore $p2$ sia inizialmente in stato di conduzione, perchè alla sua base, attraverso le resistenze $r3$ e $r4$, è applicato un potenziale positivo rispetto all'emettitore. Il condensatore $k3$ viene caricato attraverso il tratto base-emettitore di $p2$, e la resistenza $r7$. La sua armatura di destra (nella figura) ha potenziale positivo. Il transistore $p3$ è interdetto, perchè alla inserzione di $p2$,

si ha una caduta di tensione attraverso la resistenza di collettore $r6$ ed il potenziale negativo applicato al collettore di $p2$ si trasferisce alla base del transistor $p3$ attraverso il condensatore $k4$.

Successivamente il condensatore $k4$ inverte la polarità attraverso le resistenze $r3$ e $r5$. Allora alla base del transistor $p3$ risulta applicato potenziale positivo; $p3$ diventa conduttore e interdice il transistor $p2$ attraverso il condensatore di base $k3$.

Il transistor $p2$ rimane interdetto fino a che il suo condensatore di base $k3$ non ha invertito la polarità attraverso le resistenze $r3$ ed $r4$.

Quando il condensatore $k3$ ha invertito la polarità il transistor $p2$ ridiventa conduttore ed il gioco si ripete continuamente.

Ogni volta che il transistor $p3$ è interdetto, un impulso di carica percorre il condensatore $k5$ e la resistenza $r8$. La caduta di tensione ai capi di $r8$ determina l'innesco del thyristor $p1$.

La frequenza con la quale si susseguono gli impulsi di innesco del thyristor $p1$ dipende dalle costanti di tempo che presiedono alla inversione di polarità dei condensatori $k3$ e $k4$. Variando il valore della resistenza $r3$, si varia la frequenza degli impulsi di comando di $p1$ e quindi la frequenza di emissione dei lampi dello stroboscopio.

8.2.2 Regolatori di corrente continua - Regolazione ad impulsi.

Nei circuiti a corrente continua, la regolazione (non a gradini) della corrente finora è stata eseguita, nella maggioranza dei casi, mediante resistenze variabili, le quali sono però sede di perdite, che possono essere anche molto elevate.

L'adozione di circuiti pulsanti realizzati mediante thyristor consente invece di regolare la corrente senza perdite apprezzabili.

Mediante un interruttore, si inserisce la corrente di carico ad intervalli di tempo uguali e con una determinata frequenza. L'istante di interruzione della corrente medesima determina l'ampiezza degli impulsi e quindi il valore medio della corrente nel tempo.

Descriveremo il funzionamento di un circuito a corrente continua di questo tipo con riferimento allo schema di principio della figura 43.

In serie col carico R_L è disposto il thyristor $p1$. Il condensatore di interdizione $k1$ viene caricato alla piena tensione di rete mediante il thyristor ausiliario $p2$. L'armatura di sinistra (in figura) di questo condensatore ha potenziale positivo.

Quando $k2$ è carico la corrente si annulla, o più esattamente scende al disotto del valore della corrente di mantenimento di $p2$, il quale pertanto si interdice.

Se ora si applica un impulso di innesco all'elettrodo di comando del thyristor $p1$, questo diventa conduttore ed il carico R_L viene percorso da una corrente, la cui intensità è determinata dalla resistenza del carico medesimo.

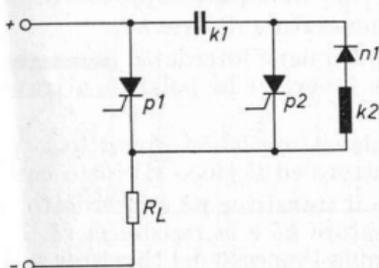


Fig. 43 - Schema di principio di un regolatore a impulsi di corrente continua con dispositivo di interdizione dei thyristor.

Quando $p1$ è conduttore, entra in oscillazione anche il circuito oscillante costituito dal condensatore $k1$ e dalla reattanza $k2$.

Il condensatore $k1$ inverte la sua carica attraverso la reattanza $k2$ ed il diodo $n1$. La sua armatura di destra (in figura) ha ora potenziale positivo.

Una nuova inversione di polarità è impedita dal diodo $n1$.

Un impulso di comando al thyristor $p2$ rende questo conduttore; il condensatore di interdizione $k1$ si scarica allora attraverso i thyristor $p2$ e $p1$.

Il thyristor $p1$ funziona per breve tempo a polarità invertita e pertanto si interdice.

Se ora il thyristor $p1$ viene reso periodicamente conduttore mediante una determinata sequenza di impulsi, e se si varia opportunamente il ritardo col quale l'impulso di innesco viene applicato al thyristor di interdizione $p2$, si può determinare a piacere il tempo (entro ciascun ciclo di funzionamento) durante il quale $p1$ è conduttore.

In tal modo risulta variabile con continuità, cioè senza gradini, il valore medio della corrente che percorre il carico.

Il sistema di variazione del carico che abbiamo ora descritto prende il nome di comando ad ampiezza di impulsi.

La capacità del condensatore di interdizione dipende dalla corrente di carico e dal tempo di ripristino del thyristor.

$$C = \frac{I_{max} \cdot \Delta_t}{U} (F) \quad [27]$$

nel quale U indica la tensione alla quale il condensatore viene caricato e Δ_t il tempo durante il quale scorre la corrente di interdizione, tempo che deve essere un po' maggiore del tempo di ripristino t_r .

La frequenza di risonanza f_0 del circuito oscillante è determinata dalla induttanza L della impedenza $k2$ e dalla capacità C del condensatore di interdizione $k1$:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad [28]$$

La frequenza di risonanza determina il tempo impiegato dal condensatore di interdizione $k1$ per invertire la sua polarità: tale inversione di carica avviene infatti nel primo semiperiodo di oscillazione del circuito.

È conveniente che l'induttanza abbia un valore tale che la frequenza di risonanza del circuito oscillante sia da 4 a 5 volte la frequenza con la quale si susseguono gli impulsi di innesco del thyristor $p1$.

8.2.3 Comando ad ampiezza di impulsi.

Nella figura 44 mostriamo un esempio pratico di impiego di comando ad ampiezza di impulsi. Lo schema di principio rappresenta la regolazione di velocità di un motore a corrente continua con eccitazione in serie. Sul circuito principale sono inseriti il thyristor $p1$ (con funzione di interruttore) l'impedenza di livellamento $k3$ ed il motore M .

Il funzionamento del thyristor di interdizione $p2$ insieme al condensatore $k1$, alla impedenza $k2$ ed al diodo $n1$, è già stato spiegato con riferimento alla figura 43. Quando il thyristor $p1$ è interdetto, la corrente del motore circola attraverso il diodo $n2$ non asservito, fino a che non è stata dissipata l'energia accumulata nella induttanza del motore e nella impedenza di livellamento $k3$. Dimensionando opportunamente quest'ultima, si può far sì che l'utilizzatore sia percorso da corrente con continuità, cioè senza interruzioni.

Quando al circuito viene applicata tensione, un impulso di corrente percorre la resistenza $r1$, il condensatore $k4$, il diodo $n3$ e il circuito di pilotaggio del thyristor ausiliario $p2$, che viene in tal modo reso conduttore. Il condensatore di interdizione $k1$ viene caricato alla tensione di rete attraverso il thyristor $p2$. Contemporaneamente si avvia l'emettitore di impulsi costituito dal transistor a giunzione unica $p3$, dalle resistenze $r8$, $r9$ ed $r10$, dal condensatore $k8$ e dal trasformatore di impulsi $m1$.

La frequenza di emissione degli impulsi è determinata dalla costante di tempo alla carica del condensatore $k8$:

$$\tau = (r8 + r9) \cdot C_{k8} \quad [29]$$

La frequenza di lavoro più conveniente per un circuito di questo tipo è compresa fra 200 e 400 Hz. Con frequenze più elevate, le perdite nel ferro del motore diventano eccessive.

La tensione di alimentazione dell'emettitore di impulsi è tenuta costante mediante i diodi Zener $n5$ ed $n6$, insieme alla resistenza $r11$. Gli impulsi vengono applicati al circuito di comando del thyristor $p1$ attraverso l'avvolgimento 1, 2 del trasformatore di impulsi $m1$.

Il thyristor $p1$ viene dunque commutato allo stato di conduzione col ritmo con cui si susseguono gli impulsi generati dall'emettitore.

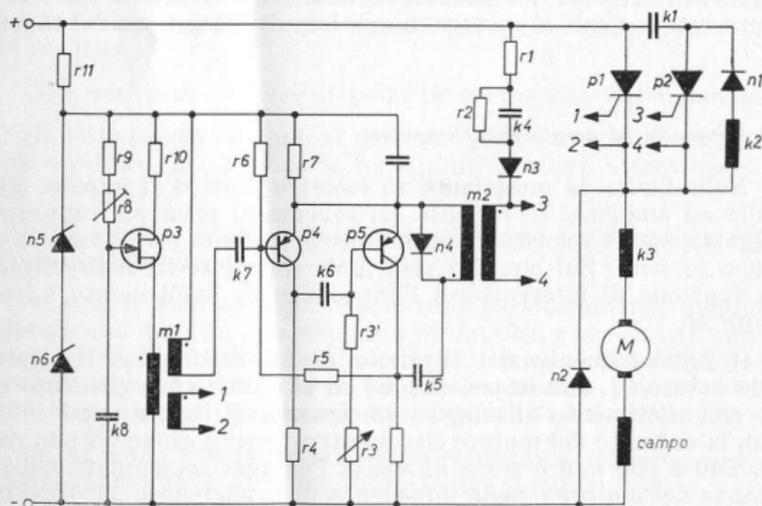


Fig. 44 - Comando di ampiezza di impulsi per la regolazione mediante thyristor della velocità di un motore a corrente continua con eccitazione in serie.

Attraverso il secondo avvolgimento secondario del traslatore di impulsi $m1$, ogni impulso viene applicato, tramite il condensatore $k7$, anche ad un circuito ritardatore.

Tale circuito (circuito basculante monostabile) basato sui transistori $p4$ e $p5$ funziona nel modo seguente: a riposo il transistor $p5$ è conduttore perchè alla sua base, attraverso le resistenze $r3$ e $r3'$, è applicato un potenziale negativo. Il transistor $p4$ è interdetto perchè alla sua base è applicato, attraverso la resistenza $r5$, il potenziale positivo del collettore di $p5$.

Il condensatore $k6$ viene caricato attraverso la resistenza $r7$, il tratto emettitore-base del transistor $p5$ e la resistenza $r4$. La sua armatura a destra (in figura) ha potenziale positivo.

L'impulso che perviene attraverso il condensatore $k7$ applica un potenziale negativo alla base del transistor $p4$, il quale pertanto diviene conduttore.

Il collettore del transistor $p4$ diventa positivo. Allora il potenziale positivo del condensatore $k6$ viene applicato alla base del transistor $p5$, che viene in tal modo interdetto.

Quando il transistor $p5$ è interdetto, il condensatore $k5$ si carica attraverso la resistenza $r7$ ed il diodo $n4$. La sua armatura di destra (in figura) assume potenziale positivo.

Il transistor $p5$ resta interdetto fino a che il condensatore $k6$ inverte nuovamente la sua polarità attraverso le resistenze $r3$ ed $r3'$.

Quando la polarità di $k6$ si è invertita, alla base del transistor $p5$ risulta applicato nuovamente potenziale negativo e $p5$ diventa conduttore.

L'intero circuito si riporta pertanto nuovamente nello stato iniziale. Non appena il transistor $p5$ diventa conduttore, il condensatore $k5$ si scarica attraverso l'avvolgimento primario del traslatore di impulsi $m2$ ed il transistor $p5$. L'impulso di corrente di scarica, attraverso l'avvolgimento secondario 3, 4 del traslatore, viene applicato come impulso di innesco al tratto di comando del thyristor ausiliario $p2$, il quale diventa conduttore.

Allora il condensatore di interdizione $k1$ si scarica attraverso i due thyristor e $p1$ viene interdetto.

L'intervallo di tempo che intercorre fra l'impulso di innesco e l'impulso di interdizione, e quindi l'ampiezza dell'impulso della corrente di carico, è determinato dalla costante di tempo alla carica del condensatore $k6$:

$$\tau = 0,69 \cdot (r3 + r3') \cdot C_{k5} \quad [30]$$

Variando la resistenza $r3$ si può quindi modificare la durata dei singoli impulsi e quindi il valore medio della corrente di carico.

Quando viene tolta tensione all'intero circuito, il condensatore $k4$ si scarica attraverso la resistenza $r2$. Esso è allora pronto ad innescare $p2$ non appena la tensione venga nuovamente applicata e ad avviare la carica del condensatore di interdizione $k1$.

Il circuito che abbiamo ora descritto viene impiegato principalmente per la regolazione della velocità di rotazione dei motori a corrente continua. Esso consente per esempio di variare senza perdite la velocità di marcia di veicoli ad accumulatori.

Se si vuole invece effettuare una regolazione automatica della velocità di rotazione, la resistenza variabile $r3$ viene sostituita da un transistor.

La tensione di uscita di una dinamo tachimetrica viene confrontata con una tensione campione corrispondente al valore di consegna della velocità. Il transistor viene comandato con la differenza di queste due tensioni.

8.2.4 Comando a frequenza di impulsi.

In certi casi può essere conveniente ricorrere ad un sistema di comando ad impulsi di ampiezza (durata) costante e di frequenza variabile.

Specialmente se il carico è puramente ohmico, questo sistema consente di raggiungere frequenze di lavoro molto elevate; in tal caso si riducono di molto le dimensioni dei dispositivi di livellamento.

Nella figura 45 è rappresentato lo schema di principio di un comando a frequenza di impulsi. Il thyristor $p1$ lavora qui con auto-interdizione.

Quando al circuito viene applicata tensione, il condensatore $k4$ si carica attraverso l'impedenza $k5$ e l'utilizzatore.

Il thyristor $p1$ viene reso conduttore mediante un impulso applicato all'elettrodo di comando. Il carico R_L è ora percorso da corrente.

Contemporaneamente il circuito oscillante costituito dal condensatore $k4$ e dalla induttanza $k5$ viene chiuso e si iniziano pertanto le oscillazioni. Dopo il primo semiperiodo, il senso della corrente si inverte, il che ha per conseguenza l'interdizione del thyristor $p1$.

La frequenza di risonanza del circuito oscillante determina il tempo durante il quale il thyristor $p1$ è conduttore, cioè determina la durata degli impulsi di corrente che percorrono l'utilizzatore. Il va-

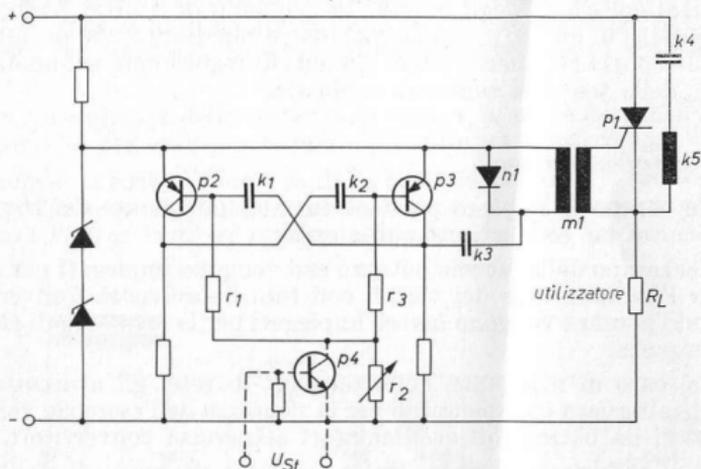


Fig. 45 - Comando a frequenza di impulsi per la regolazione mediante thyristor della corrente media di carico di un apparecchio utilizzatore in corrente continua.

lore medio della corrente unidirezionale che percorre il carico è quindi proporzionale alla frequenza con la quale si susseguono gli impulsi di comando del thyristor $p1$.

Questi impulsi vengono generati mediante un multivibratore, il cui funzionamento è già stato spiegato nelle pagine precedenti. Ogni volta che il transistor $p3$ viene interdetto, il condensatore $k3$ si carica attraverso il diodo $n1$. Quando $p3$ ritorna in stato di conduzione, il condensatore $k3$ si scarica attraverso l'avvolgimento primario del trasformatore di impulsi $m1$ ed il transistor $p3$ medesimo.

L'impulso di corrente di scarica viene applicato, mediante l'avvolgimento secondario del trasformatore $m1$, al tratto di pilotaggio del thyristor $p1$.

La frequenza con la quale il multivibratore emette gli impulsi può venire modificata mediante la resistenza variabile $r2$. Parallelamente alla frequenza del multivibratore viene regolata la corrente di carico.

Col transistor $p4$, i cui collegamenti sono disegnati con linea a trattini, si vuol indicare che il medesimo effetto che si ottiene variando la resistenza $r3$ può essere raggiunto anche sfruttando una tensione variabile continua U_{St} fornita da un regolatore automatico.

Quando il circuito è comandato in modo che il valore medio della corrente di carico raggiunge il livello più alto, si può avere una fre-

quenza di emissione degli impulsi di comando di 3 kHz. L'ampiezza degli impulsi in questo caso non può essere superiore a 200 μ s, affinché il circuito possa rimanere stabile. I limiti di regolazione vanno dal 5% al 95% della tensione continua applicata.

8.2.5 Convertitori autonomi.

Un campo di impiego particolarmente importante dei thyristor è costituito dai convertitori autonomi.

Nel campo delle piccole potenze essi vengono impiegati per esempio per l'illuminazione dei veicoli con tubi fluorescenti. Convertitori di grande potenza vengono invece impiegati per la fornitura di energia di emergenza.

Nel caso di mancanza della tensione di rete, gli utilizzatori in corrente alternata indispensabili per la sicurezza dell'esercizio vengono alimentati da batterie di accumulatori attraverso convertitori.

Se si raddrizza nuovamente la tensione alternata di uscita del convertitore, questo assume la funzione di un trasformatore di corrente continua. Se il convertitore genera frequenze elevate, il livellamento della tensione raddrizzata può essere raggiunto con filtri di modeste prestazioni.

Un convertitore funziona poi da trasformatore di frequenza, se si raddrizza una corrente alternata di una determinata frequenza e si utilizza la corrente raddrizzata così ottenuta per alimentare un convertitore avente una qualunque altra frequenza di uscita.

Nella figura 46 è rappresentato un tipo di circuito fondamentale per convertitore a thyristor.

I thyristor $p1$ e $p2$ lavorano sul secondario di un trasformatore con presa centrale.

Supponiamo che il thyristor $p1$ venga reso conduttore mediante un impulso applicato al suo elettrodo di comando. La corrente erogata dalla batteria percorre la metà di sinistra dell'avvolgimento del trasformatore $m1$, il diodo $n1$, il thyristor $p1$, l'induttanza $k2$ per ritornare infine alla batteria.

La tensione ai capi dell'avvolgimento del trasformatore aumenta fino al valore della tensione della batteria.

Nella metà di destra dell'avvolgimento del trasformatore viene indotta la medesima tensione, cosicché il condensatore di commutazione $k1$ viene caricato al doppio della tensione della batteria. Tale tensione risulta applicata nel senso della conduzione anche al thyristor interdetto $p2$.

Il successivo impulso di comando rende conduttore il thyristor $p2$. Il condensatore di commutazione $k1$, la cui armatura di destra, in figura, ha potenziale positivo, si scarica attraverso i thyristor $p2$ e $p1$.

In conseguenza della corrente di scarica, la corrente nel thyristor $p1$ si annulla per un breve tempo e pertanto $p1$ si interdice.

Adesso la corrente erogata dalla batteria percorre la metà destra dell'avvolgimento del trasformatore, il diodo $n2$, il thyristor $p2$, l'induttanza $k2$ per ritornare infine alla batteria.

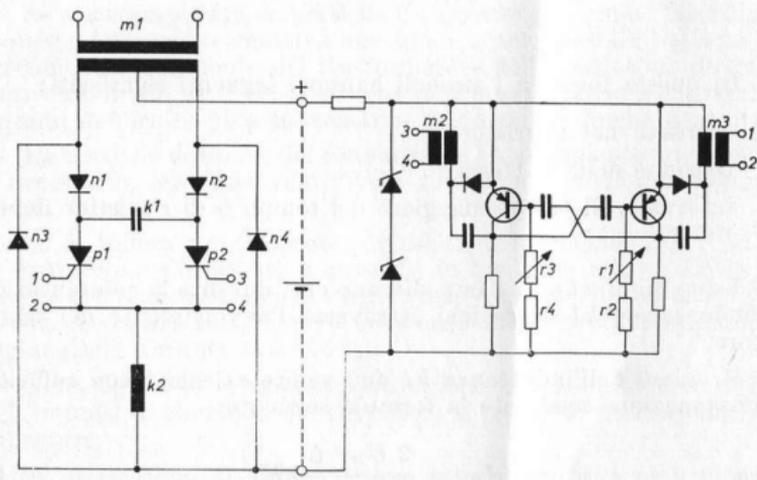


Fig. 46 - Convertitore autonomo a thyristor con comando mediante multivibratore.

Al successivo impulso di comando, la corrente torna a passare per il thyristor $p1$ ed il gioco si ripete continuamente, col ritmo degli impulsi di pilotaggio dei thyristor.

L'induttanza $k2$ impedisce un aumento troppo rapido della corrente durante la commutazione, onde evitare che il condensatore di commutazione $k1$ inverta la sua polarità prima che il thyristor che è conduttore sia sicuramente interdetto. Essa impedisce inoltre che la corrente aumenti eccessivamente durante la fase di commutazione.

Per un breve tempo durante la commutazione entrambi i thyristor sono conduttori e le due metà dell'avvolgimento primario del trasformatore $m1$ sono percorse da correnti di senso contrario. La

corrente può pertanto raggiungere, per breve tempo, intensità molto elevate. L'induttanza k_2 è dimensionata in modo che durante la commutazione la corrente totale è limitata a circa 1,2 volte la corrente nominale.

La capacità del condensatore di commutazione k_1 deve essere tale che la sua corrente media di scarica, per un tempo un po' maggiore del tempo di ripristino t_f del thyristor, sia pari alla corrente che percorre il thyristor prima della interdizione:

$$C_{k_1} = \frac{I_{AK} \cdot \Delta t}{2 U_B} F \quad [31]$$

In questa formula i simboli hanno i seguenti significati:

I_{AK} corrente nel thyristor;

U_B tensione della batteria;

Δt intervallo di tempo maggiore del tempo t_f di ripristino del thyristor.

I due diodi n_1 ed n_2 impediscono che, durante la commutazione, il condensatore k_1 si scarichi attraverso l'avvolgimento del trasformatore.

Il valore dell'induttanza k_1 può venire calcolato con sufficiente approssimazione mediante la formula seguente:

$$L_{k_1} = \frac{2 U_B \cdot \Delta t}{0,2 I_{AK}} H \quad [32]$$

nella quale i simboli hanno i seguenti significati:

U_B tensione della batteria;

I_{AK} corrente di un thyristor;

Δt intervallo di tempo, maggiore del tempo t_f di ripristino dei thyristor.

Il trasformatore m_1 deve essere avvolto simmetricamente e con bassa dispersione di flusso.

Se il flusso disperso è elevato, alla inserzione si verificano elevati picchi di tensione, che si sovrappongono alla tensione della batteria e mettono in pericolo le celle. I picchi di tensione sono dovuti a fe-

nomeni di risonanza, determinati dalla induttanza di dispersione insieme alle capacità di commutazione.

Se il carico è induttivo, la corrente nell'avvolgimento secondario del trasformatore è in ritardo rispetto alla tensione. La corrente di carico continuerà a fluire nel medesimo senso, anche dopo l'inversione della tensione, fino a che si è annullata la energia accumulata nella induttanza del circuito.

Il primario del convertitore non può essere percorso da corrente dopo l'interdizione del thyristor. Una via al passaggio della corrente reattiva è offerta dai diodi $n3$ ed $n4$.

Se per esempio era conduttore il thyristor $p1$, dopo l'interdizione di questo la corrente reattiva che tende a tornare alla batteria percorrendo l'avvolgimento del trasformatore nella medesima direzione, interessa il diodo $n4$. I diodi $n3$ e $n4$ mettono pertanto il convertitore in grado di fornire potenza reattiva (induttiva e anche capacitiva).

La tensione di uscita del convertitore ha andamento trapezoidale. Se necessario, essa può venire resa sinusoidale mediante opportuni circuiti filtranti.

Se si tollera una tensione di uscita trapezoidale i convertitori per le tensioni più elevate e costruiti in modo da avere piccole perdite nel rame, consentono di raggiungere rendimenti fino al 96 %. Se si vuole che la tensione di uscita sia sinusoidale il rendimento massimo raggiungibile si riduce al 70-75 %.

Nella figura 46 è rappresentato anche lo schema dell'emettitore degli impulsi di comando dei thyristor; si tratta di un semplice multivibratore.

Se la tensione di alimentazione è stabilizzata, i multivibratori consentono di raggiungere senza particolari difficoltà una elevata costanza della frequenza di lavoro. Con lo schema rappresentato nella figura 46 si ottiene sicuramente una frequenza di uscita costante entro $\pm 1\%$, con tensione di alimentazione variabile di $\pm 15\%$ e con temperatura compresa fra 15 °C e 45 °C.

Il funzionamento del multivibratore è stato descritto nelle pagine precedenti.

Gli impulsi di comando devono venire applicati ai thyristor mediante i traslatori di impulsi $m2$ ed $m3$, perchè l'emettitore di impulsi è alimentato dalla medesima batteria del convertitore ed è indispensabile che gli impulsi non abbiano potenziale di polarizzazione.

Le resistenze $r1$ fino a $r4$, al pari dei condensatori di base ad esse collegati in serie, devono essere poco sensibili alle variazioni di temperatura.

Lo schema di convertitore a ponte rappresentato nella figura 47 offre alcuni vantaggi rispetto a quello con trasformatore a presa centrale che abbiamo visto più sopra, ma richiede l'impiego di un maggior numero di componenti.

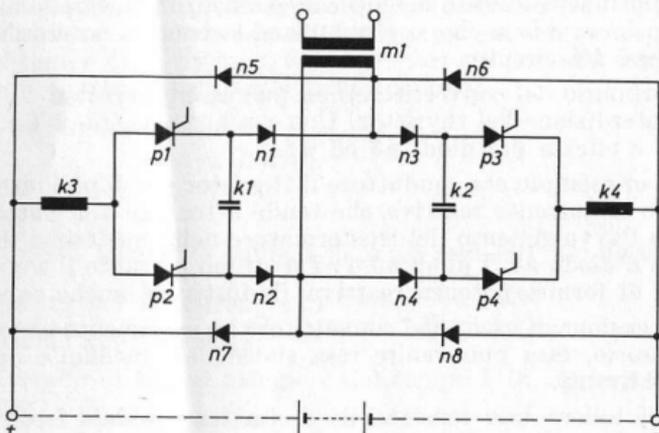


Fig. 47 - Convertitore bidirezionale con thyristor collegati a ponte.

Il trasformatore viene meglio sfruttato. La tensione inversa dei thyristor corrisponde alla tensione della batteria, e non al doppio della tensione medesima come nel caso del trasformatore con presa centrale.

L'impulso di comando viene applicato alternativamente ai thyristor $p1$ e $p4$ oppure $p2$ e $p3$.

Quando sono conduttori i thyristor $p1$ e $p4$, la corrente erogata dalla batteria percorre l'induttanza $k3$, il thyristor $p1$, il diodo $n1$, il primario del trasformatore, il diodo $n4$, il thyristor $p4$, l'induttanza $k4$ e ritorna infine alla batteria.

La corrente percorre l'avvolgimento primario del trasformatore $m1$ da destra verso sinistra (in figura).

Se il carico è induttivo, la corrente dell'avvolgimento primario, quando i thyristor $p1$ e $p4$ sono interdetti, può continuare a circolare attraverso i diodi $n6$ e $n7$, fino a che si è annullata l'energia accumulata nella induttanza del carico. Tale energia viene restituita alla batteria.

I diodi $n1$ fino a $n4$ servono ad impedire la scarica dei due condensatori di commutazione $k1$ e $k2$ attraverso l'avvolgimento primario del trasformatore $m1$.

I diodi $n5$ fino a $n8$ assicurano la circolazione della corrente reattiva. La capacità minima dei condensatori di commutazione è data dalla relazione:

$$C_{k_1; k_2} = \frac{I \cdot \Delta_t}{U_B} F \quad [33]$$

nella quale i simboli hanno i significati seguenti:

I corrente primaria massima;

U_B tensione della batteria;

Δ_t intervallo di tempo, maggiore del tempo t_f di ripristino del thyristor.

L'induttanza delle due reattanze di commutazione $k3$ e $k4$ viene determinata con sufficiente approssimazione mediante la formula:

$$L = \frac{U_B \cdot \Delta_t}{2 \cdot 0,2 I} H \quad [34]$$

nella quale i simboli hanno i seguenti significati:

U_B tensione della batteria;

I corrente primaria massima;

Δ_t intervallo di tempo maggiore del tempo di ripristino t_f del thyristor.

I convertitori con circuito a ponte vengono impiegati principalmente quando si hanno tensioni continue di alimentazione elevate. Inoltre il miglior sfruttamento del trasformatore consente di ridurne le dimensioni.

Per l'alimentazione di emergenza di utilizzatori di potenza elevata occorrono convertitori trifasi.

Finora nella maggior parte dei casi i convertitori trifasi sono stati realizzati collegando opportunamente tre convertitori monofasi a ponte.

Se le esigenze non sono spinte, i convertitori trifasi possono venire realizzati molto semplicemente.

La figura 48 mostra lo schema di un semplice convertitore trifase. Esso corrisponde esattamente a quello di un raddrizzatore in ponte trifase, con la sola differenza che è invertita la polarità del lato corrente continua. Il valore delle induttanze di commutazione $k1$ e $k2$

può venire determinato come nel caso del convertitore a ponte monofase. Lo stesso dicasi per i condensatori di commutazione $k3$, $k4$ e $k5$, che nello schema della figura 48 sono collegati al secondario del trasformatore.

Questo sistema presenta il vantaggio di consentire l'impiego di condensatori di minore capacità. È infatti da ritenere che la tensione di uscita di un convertitore trifase sia maggiore della tensione continua di ingresso. La capacità dei condensatori, calcolata con la formula che abbiamo visto nelle pagine precedenti, deve venire ridotta a secondario in ragione del rapporto di trasformazione.

Il collegamento dei condensatori di commutazione sul secondario del trasformatore presenta inoltre il vantaggio che la tensione di uscita del convertitore ha andamento prossimo a quello sinusoidale. Il fattore di distorsione (riferito ad una sinusoide perfetta) è circa del 14%. Nella maggior parte dei casi una simile forma d'onda è sufficiente per alimentare direttamente gli utilizzatori, senza che sia necessario ricorrere all'impiego dei filtri.

I raddrizzatori $n1$ fino a $n6$ consentono la circolazione della corrente reattiva.

Se per la frequenza generata dal convertitore è sufficiente una precisione di $\pm 1\%$, il comando dei thyristor mediante impulsi è particolarmente semplice.

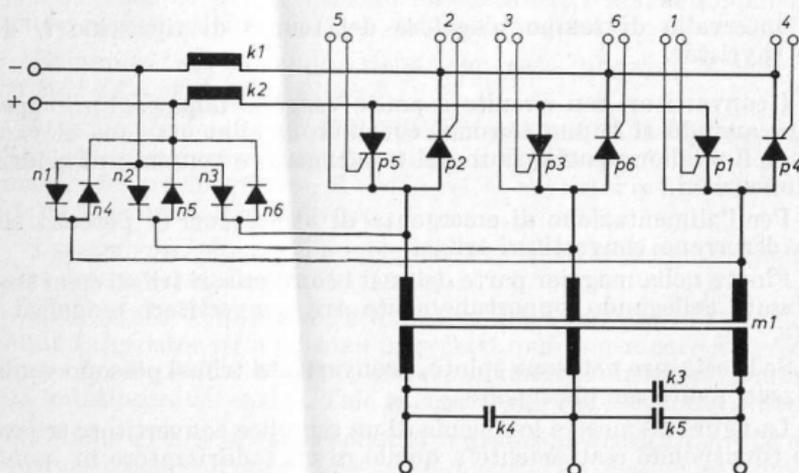


Fig. 48 - Convertitore autonomo trifase con thyristor collegati a ponte.

È sufficiente una catena di sei transistori, nella quale ciascun transistore interdice il successivo per un sesto di periodo. Dopo $1/6$ di periodo il transistore ridiventa conduttore e interdice il transistore successivo. I tempi di interdizione vengono esattamente determinati da elementi $R-C$.

I transistori possono determinare un impulso sia alla inserzione che alla disinserzione. Tali impulsi vengono ordinatamente applicati ai tratti di comando dei thyristor corrispondenti.

Il primo impulso deve, mediante un pulsante di avviamento, venire applicato contemporaneamente anche alla controcella corrispondente, affinché la corrente possa circolare. Una volta che il funzionamento del circuito è avviato, la catena degli impulsi continua regolarmente.

8.2.6 Convertitori autonomi con interdizione singola.

Di particolare importanza per gli sviluppi futuri si presenta la regolazione della velocità di rotazione dei motori asincroni con rotore in corto circuito.

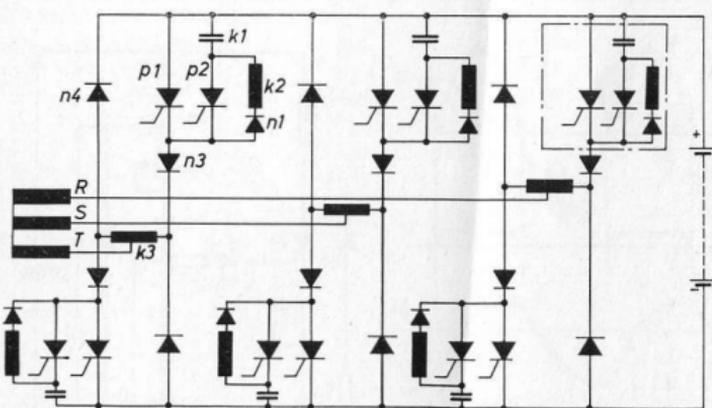


Fig. 49 - Convertitore autonomo a ponte trifase con interdizione singola.

È noto che la velocità di un motore con rotore in corto circuito può venire variata entro ampi limiti modificando la frequenza della tensione alternata di alimentazione dello statore.

Poichè contemporaneamente alla frequenza si deve variare anche la tensione, è conveniente impiegare convertitori muniti di un dispositivo di interdizione indipendente per ciascun thyristor.

Nella figura 49 è rappresentato lo schema di un convertitore trifase autonomo con collegamento a ponte e interdizione singola.

I convertitori di questo tipo vengono chiamati anche convertitori ad impulsi.

Ciascun thyristor principale $p1$ ha un proprio dispositivo di interdizione, costituito dal condensatore $k1$, dal thyristor di interdizione $p2$, dalla induttanza $k2$ e dal diodo $n1$. Ciascun thyristor può venire reso conduttore indipendentemente dagli altri thyristor con un determinato angolo di ritardo e può venire interdetto in un istante qualsiasi.

In tal modo la tensione di uscita del convertitore può venire variata entro ampi limiti.

Il diodo $n3$ impedisce la scarica attraverso il carico del condensatore di interdizione $k1$. Il diodo $n4$ consente la circolazione della corrente reattiva o della corrente di ritorno del carico.

Le reattanze $k3$ corrispondono alle reattanze di commutazione.

9. L'IMPIEGO DEI THYRISTOR NEGLI UTENSILI PORTATILI E NEGLI ELETTRODOMESTICI.

Benchè gli esempi citati in questo volume non abbiano assolutamente la pretesa di costituire una elencazione completa dei possibili impieghi dei thyristor, risulta da essi che questi componenti elettronici hanno già una larga diffusione.

Appare pertanto abbastanza strano che i thyristor vadano solo lentamente imponendosi nel campo degli utensili portatili e degli elettrodomestici, soprattutto se si pensa che il loro impiego in tale campo è largamente propagandato in modo particolare da ditte americane.

Nella figura 50 è rappresentato un semplice esempio di regolazione della velocità di rotazione di un piccolo motore per sega circolare.

Questo circuito è stato segnalato da F. W. Gutzwiller della G.E.C.

Il thyristor *p1* è inserito fra l'avvolgimento rotorico e l'avvolgimento statorico del motore universale. Durante il semiperiodo positivo della tensione di rete il condensatore *k1* viene caricato attraverso le resistenze *r1* e *r2* ed il diodo *n3*. Non appena il potenziale positivo della sua armatura superiore (in figura) è sufficiente per fornire la

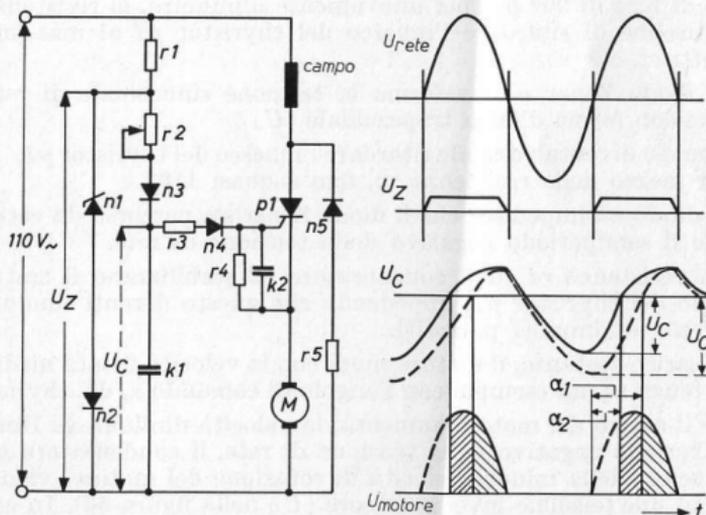


Fig. 50 - Semplice circuito per la regolazione mediante un thyristor della velocità di un motore universale.

corrente di innesco al tratto di comando del thyristor $p1$, questo diventa conduttore. Il motore è percorso da corrente e pertanto si mette in rotazione. Durante il successivo semiperiodo negativo, la corrente percorre la resistenza $r5$, il diodo $n5$ e l'avvolgimento di campo del motore. Il rotore, che è ancora in moto, inverte la sua polarità e funziona da generatore, caricando con polarità invertita rispetto alla precedente il condensatore $k1$, attraverso la resistenza $r3$, il diodo $n4$, e la resistenza $r4$.

Il diodo $n3$ impedisce che la corrente ritorni in rete attraverso le resistenze $r2$ e $r1$.

Al passaggio per lo zero della tensione di rete, l'armatura superiore (in figura) del condensatore $k1$ ha potenziale negativo.

Durante il semiperiodo positivo successivo il condensatore $k1$ inverte nuovamente la sua polarità attraverso le resistenze $r1$ e $r2$ ed il diodo $n3$.

La costante di tempo della inversione di carica viene regolata mediante la resistenza $r2$.

Quanto più rapidamente si inverte la carica del condensatore $k1$, tanto prima diventa positiva la sua armatura superiore e tanto prima il thyristor $p1$ diventa conduttore.

Poichè la tensione di rete raggiunge il valore massimo con un angolo di fase di 90° per poi nuovamente diminuire, la resistenza $r2$ consentirebbe di ritardare l'innesco del thyristor $p1$ al massimo di 90° elettrici.

Il diodo Zener $n1$ trasforma la tensione sinusoidale di rete in tensione con forma d'onda trapezoidale (U_z).

Con ciò diventa possibile ritardare l'innesco del thyristor $p1$, sempre per mezzo della resistenza $r2$, fino a quasi 180° .

Il diodo $n2$ impedisce che il diodo Zener sia percorso da corrente durante il semiperiodo negativo della tensione di rete.

La resistenza $r4$ ed il condensatore $k2$ stabilizzano il tratto di comando del thyristor $p1$, impedendo che questo diventi conduttore per effetto di impulsi parassiti.

A carico costante, il motore ruota con la velocità fissata mediante la resistenza $r2$ (ad esempio con l'angolo di comando α_1 del thyristor).

Se il carico del motore aumenta, la velocità diminuisce. Durante il semiperiodo negativo della tensione di rete, il condensatore $k1$, in conseguenza della minore velocità di rotazione del motore, viene caricato ad una tensione inversa minore (U_c nella figura 50). In conseguenza di ciò, nel successivo semiperiodo positivo, l'angolo α_2 di comando del thyristor diventa minore.

La corrente assorbita dal motore aumenta e quindi aumenta pure la velocità di rotazione.

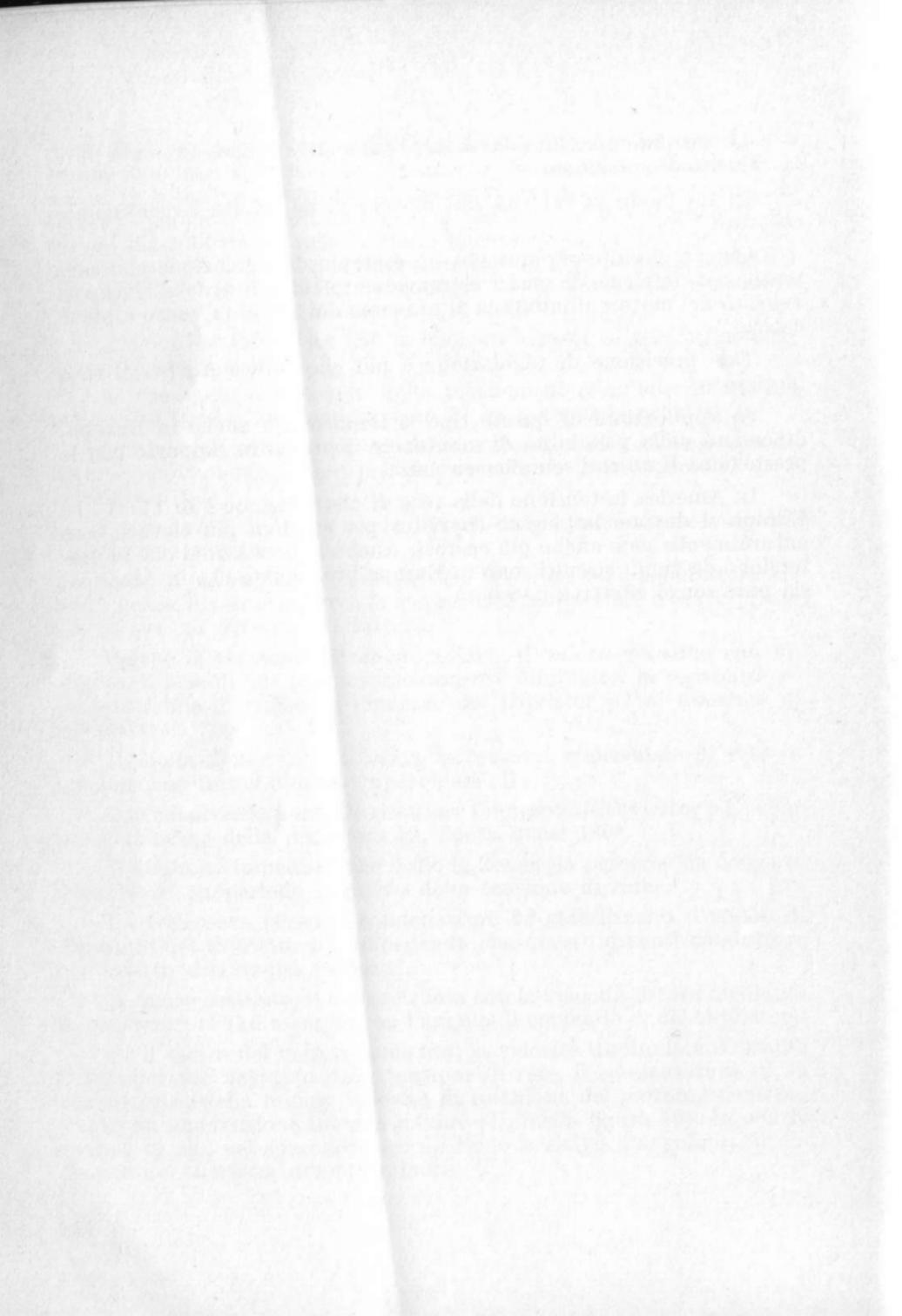
In tal modo la velocità dal motore viene tenuta sensibilmente costante.

Questo circuito rappresenta un esempio di regolazione che consente, con impiego di mezzi estremamente ridotti, di fare sì che la velocità del motore diminuisca al massimo del 20 %, da vuoto a pieno carico.

Tale precisione di regolazione è più che sufficiente per il caso ipotizzato.

Se applicazioni di questo tipo si imporranno anche in Europa, dipenderà dalla possibilità di mantenere il prezzo in rapporto con le prestazioni di un così semplice circuito.

In America la tensione della rete di distribuzione è di 117 V. In Europa si devono impiegare thyristor per tensioni più elevate, che naturalmente sono anche più costosi. Anche le prestazioni che si pretendono da simili circuiti sono in Europa più elevate che in America, sia pure senza effettiva necessità.



SIMBOLOGIA

α_1, α_2	fattore di amplificazione della corrente
dv/dt	velocità di aumento della tensione
di/dt	velocità di aumento della corrente
$F.F.$	fattore di forma = $\frac{\text{valore efficace}}{\text{valore medio aritmetico}}$
I_{AK}	Corrente nel senso della conduzione (dall'anodo al catodo)
I_{KA}	Corrente inversa
I_H	Corrente di mantenimento
I_Z	Corrente di innesco
I_D	Corrente di passaggio
I_E	Corrente durante il transitorio di inserzione
P_V	Perdite totali
P_{St}	Perdite di comando
R_{ath}	Resistenza di scambio di calore del corpo raffreddante
R_{ith}	Resistenza termica interna
R_{uth}	Resistenza termica di passaggio fra la base della custodia ed i corpi raffreddanti.
R_L	Resistenza di carico
t_A	Tempo di aumento della corrente
t_E	Tempo di inserzione
t_f	Tempo di ripristino
T_{sp}	Temperatura della giunzione
t_V	Ritardo di innesco
U_{KA}	Tensione inversa
U_{BB}	Tensione fra base 1 e base 2 del transistor a giunzione unica
U_{EB1}	Tensione fra emettitore e base 1 del transistor a giunzione unica
U_K	Tensione di basculamento
U_{St}	Tensione di comando o di pilotaggio
U_Z	Tensione di innesco
η	Costante intrinseca del transistor a giunzione unica
α	Angolo di innesco o di comando
φ	Angolo di fase
λ	Angolo di conduzione
τ	Costante di tempo

BIBLIOGRAFIA

1. Libri.

Silicon Controlled Rectifier Manual - General Electric Company 1964.

Silicon Controlled Rectifier, Designers' Handbook Westinghouse Electric Corporation, 1964.

Thyristor Handbuch - Siemens Schuckertwerke AG 1965.

2. Articoli in periodici.

STUMPE, A. C.: *Die Kennlinien der steuerbaren Siliziumzelle*; ETZ-A, Vol. 83 (1962), Fascicolo 4, Pagg. 81-87.

STUMPE, A. C.: *Das Schaltverhalten der steuerbaren Siliziumzelle*. ETZ-A, Vol. 83 (1962) Fascicolo 9, Pagg. 291-298.

GERLACH, W. e SEID, F.: *Wirkungsweise der steuerbaren Siliziumzelle*; ETZ-A, Vol. 83 (1962) Fascicolo 8, Pagg. 270-277.

ABRAHAM, L.; HEUMANN, K.; KOPPELMANN, F.: *Wechselrichter zur Drehzahlsteuerung von Käfigläufermotoren*; AEG - Mitteilungen, Vol. 54 (1964) Fascicolo 1/2, Pagg. 89-106.

REICHMANN, H.: *Stromrichter mit steuerbaren Siliziumzellen für motorische Antriebe*; AEG-Mitteilungen, Vol. 51 (1961) Fascicolo 11/12, Pagg. 463-471.

GERMANN, F.: *Geräte mit steuerbaren Siliziumzellen für Stromversorgungsanlagen der Fernmeldetechnik*; AEG-Mitteilungen, Vol. 52 (1962) 3/4, Pagine 102-103.

GINSBACH, K.-H. e SWOBODA, R.: *Eigenschaften und Anwendungen der Thyristoren*; ETZ-B, Vol. 16 (1963) Fascicolo 23, Pagg. 673-676.

GERLACH, W.: *Steuerbare Siliziumzellen*; AEG-Mitteilungen 51 (1961) Fascicolo 11/12, Pagg. 348-353.

SWOBODA, R.: *Thyristoren als schnelle Schalter in Gleichstromkreisen*; « Elektro-Technik 47 » (1965), Fascicolo 12, Pagg. 231-233.

GERMANN, F.: *Wechselrichter mit Thyristoren für Einphasenwechselstrom und Drehstrom zur Verwendung in der Industrie*; AEG-Mitteilungen, Vol. 55 (1965) Fascicolo 3, Pagg. 242-245.

KWOKA, L.: *Neue Stromrichtergeräte mit Thyristoren zum Formieren von Bleibatterien* « Elektronik-Entwicklung » 1965, Pagg. 26-27.

GERMANN, F.: *Wechselrichter mit Thyristoren für unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen und für Notstromversorgungsanlagen*; AEG-Mitteilungen, Vol. 54 (1964) Fascicolo 3/4.

GERMANN, F. u. SWOBODA, R.: *Wechselrichter mit steuerbaren Siliziumzellen*; AEG-Mitteilungen, Vol. 53 (1963) Fascicolo 3/4, Pagg. 69-70.

INDICE

1. Generalità	11
1.1 <i>Costruzione meccanica del thyristor</i>	12
2. Funzionamento del thyristor	14
2.1 <i>L'inserzione del thyristor</i>	15
2.1.1 Inserzione per superamento della tensione di bascu- lamento U_{NK}	15
2.1.2 Inserzione mediante la corrente di innesco I_z inviata me- diante l'elettrodo di pilotaggio	15
2.1.3 Inserzione in conseguenza di una eccessiva velocità di au- mento della tensione di du_{AK}/dt	15
2.1.4 Corrente e caratteristica di inserzione	16
2.1.5 Durata dell'impulso di innesco	17
2.1.6 Interdizione del thyristor mediante interruzione del cir- cuito o riduzione della corrente sotto il valore di mante- nimento I_H	18
3. Proprietà del thyristor	19
3.1.1 Caratteristica di funzionamento del thyristor	19
3.1.2 Tempo di inserzione t_E	19
3.1.3 Velocità di aumento della corrente di/dt	20
3.1.4 Processo di disinserzione	21
3.1.5 Tempo di ripristino t_f	22
3.2 <i>Caratteristiche termiche</i>	23
3.2.1 Limite di riscaldamento	23
3.2.2 Dissipazione del calore di perdita; resistenza termica in- terna R_{th}	23
3.2.3 Corpi raffreddanti, resistenza di scambio di calore R_{ath} ..	23
3.2.4 Rappresentazione del flusso termico, circuito equivalente termico per condizioni stazionarie del carico	24
3.3 <i>Caricabilità del thyristor</i>	25
3.3.1 Corrente di passaggio e corrente nominale	25
3.3.2 Valore di picco periodico della corrente	25
3.3.3 Corrente a impulso	25
3.3.4 Limitazione della corrente con piccoli angoli di conduzione	26
3.3.5 Perdite di conduzione	28
4. Protezione dei thyristor	31
4.1 <i>Protezione contro le sovracorrenti; fattore di sovracorrente, fattore di corrente limite</i>	31
4.1.1 Protezione contro i corto circuiti. Integrale limite di carico	31
4.1.2 Protezione contro i sovraccarichi	33

4.2	<i>Protezione contro le sovratensioni. Circuiti di protezione</i>	33
4.2.1	Collegamento di elementi protettivi alla cella	33
4.2.2	Collegamento di elementi protettivi al trasformatore	34
4.2.3	Collegamento di elementi protettivi al carico	35
5.	Collegamento in parallelo e in serie di thyristor	37
5.1	<i>Collegamento in parallelo di thyristor</i>	37
5.1.1	Suddivisione uniforme della corrente	37
5.1.2	Sicurezza di innesco dei thyristor collegati in parallelo	39
5.2	<i>Collegamento in serie di thyristor</i>	39
6.	Situazione attuale e previsioni sullo sviluppo futuro	41
7.	Circuiti di comando	44
7.1	<i>Comando orizzontale</i>	44
7.2	<i>Comando verticale</i>	45
7.3	<i>Comando di thyristor mediante trasduttori</i>	45
7.4	<i>Riduzione della tensione di comando durante il semiperiodo negativo</i>	47
7.5	<i>Circuiti di comando a impulsi</i>	48
7.6	<i>Circuiti a sequenza di impulsi con transistori a giunzione unica</i> ..	53
7.7	<i>Sistemi di comando di circuiti trifasi</i>	55
8.	Impiego dei thyristor - Generalità	58
8.1	<i>Impieghi nei circuiti a corrente alternata</i>	58
8.1.1	Regolatore di corrente alternata (monofase o trifase)	58
8.1.2	Raddrizzatori	61
8.1.3	Convertitori bidirezionali	64
8.1.4	Interruttori rapidi in circuiti a corrente alternata	69
8.2	<i>Impiego dei thyristor nei circuiti a corrente continua</i>	71
8.2.1	Interruttori rapidi	73
8.2.2	Regolatori di corrente continua - Regolazione ad impulsi	77
8.2.3	Comando ad ampiezza di impulsi	79
8.2.4	Comando a frequenza di impulsi	82
8.2.5	Convertitori autonomi	84
8.2.6	Convertitori autonomi con interdizione singola	91
9.	L'impiego dei thyristor negli utensili portatili e negli elettrodomestici	93
	Simbologia	97
	Bibliografia	99

ELETTRONICA

- A. Bandini Buti - V. Re - Oscilloscopio a raggi catodici.
- P. L. Cerato - Tubi elettronici nell'industria.
- P. L. Cerato - Circuiti fondamentali dell'elettronica industriale.
 - E. Mazza - Diodi al germanio ed al silicio.
 - E. Mazza - Transistori.
- P.L. Cerato - Amplificatori magnetici.
- C. Borgonovo - Regolazione automatica.
 - E. Gelder - I transistori nei circuiti di commutazione.
- R. Swoboda - Thyristor.
 - M. Flego - Controllo numerico delle macchine utensili.
 - K. Apel - Circuiti elettronici di conteggio.
- V. J. Karpov - I transistori nei circuiti di stabilizzazione.
 - G. Figini - I circuiti logici statici e le loro applicazioni negli azionamenti industriali.
- V. Vivona - Gli elaboratori elettronici.
- E. Gelder - W. Hirschmann - Applicazioni pratiche dei semiconduttori.
 - Esempi di circuiti transistorizzati.
- V. Medved - I relè statici.
 - G. Figini - Azionamenti a velocità variabile.
 - R. Hahn - Tecnica dei comandi digitali.
- H. von Höppl - Circuiti integrati.
 - N. Grilloni - Il transistor come interruttore.
 - N. Grilloni - Dispositivi PNP - Tiristori e triac.
 - N. Grilloni - Polarizzazione e stabilizzazione termica dei transistori - Calcolo dei radiatori.
 - G. Figini - Alimentatori ed invertitori statici.
- G. Calabrese - L'algebra di Boole.
 - G. Figini - Servomeccanismi - Teoria della regolazione automatica.
 - G. Figini - Elettronica industriale - Circuiti ed applicazioni.
- G. Montessori - Elettronica di potenza - Azionamenti in c.c.

GALVANOTECNICA

- G. Clerici - Gli accumulatori elettrici.
- E. Giudici - Impianti galvanotecnici.
- L. Bresciani - L'ossidazione anodica dell'alluminio.
- G. Mastai - Formule e dati pratici per galvanotecnica.

MANUALI PRATICI

- V. Re - Prontuario elettrotecnico.
- Sbk - Manuale degli schemi.

TELEFONIA

- M. Gandais - A. Sanneris - Principi di traffico telefonico.
- M. Luceri - Il telefono.
- E. Angeleri - Trasmissione dati.

IMPIANTI ELETTRICI

- W. Forlani - **Gli impianti elettrici e le norme di legge.**
F. Bottio - L. Sottani - **La protezione contro i contatti elettrici accidentali.**
- G. Paleari - **Rifasamento degli impianti elettrici industriali.**
R. Costa - **Il calcolo delle correnti di corto circuito negli impianti elettrici.**
- C. Clerici - **Illuminotecnica - Progetto e calcolo degli impianti di illuminazione.**
E. Coppi - **Le cabine di trasformazione per impianti industriali e civili.**
E. Coppi - **La costruzione delle cabine di trasformazione.**
C. Clerici - **La messa a terra degli impianti elettrici.**
G. Pagani - **Linee elettriche aeree di bassa e media tensione.**
E. Cometta - **Magneti permanenti.**
L. Cibrario - **I raddrizzatori a semiconduttori.**
E. Mazza - **Il relè tipo telefonico nell'industria.**
P. L. Cerato - **Manutenzione delle apparecchiature elettriche.**
G. Figini - **Equipaggiamenti elettrici industriali.**
G. Colli Lanzi - **Alberi elettrici.**
L. F. Bottio - **La corrosione delle canalizzazioni interrate.**
R. Casagrande - C. Clerici - **Parafulmini.**
G. Schönberg - **Orologi elettrici.**
V. Re - **Installazione delle macchine elettriche rotanti.**
V. Re - **Manutenzione delle macchine elettriche rotanti.**
G. Paleari - **Installazione e manutenzione dei trasformatori industriali.**
G. Perone - **I contattori e le loro applicazioni.**
A. Bossi - E. Sesto - **Gli scaricatori di sovratensione: criteri di scelta e di impiego.**
R. Roeper - **Le correnti di corto circuito nelle reti elettriche trifasi.**
L. Salvati - **Progettazione e calcolo degli elettromagneti.**
E. Sesto - **I cavi per energia: criteri di scelta e di impiego.**
A. Bossi - E. Sesto - **Interruttori per gli impianti di potenza.**
G. Abete - **L'ascensore elettrico.**
A. Bossi - E. Sesto - **Impianti elettrici.**
A. Bandini Buti - M. Bertolini - **Elettrotecnica pratica - Elementi fondamentali.**
E. Sesto - A. Bossi - **Elettrotecnica pratica - Tecnica degli impianti.**
V. Re - A. Bandini Buti - **Energia Elettrica.**
V. Re - **L'Installatore qualificato:**
Vol. I - **Impianti elettrici nelle abitazioni.**
Vol. II - **Impianti di messa a terra.**
Vol. III - **Impianti di illuminazione civile e industriale.**
Vol. IV - **Impianti di illuminazione esterna.**