

***Istituto Professionale di Stato per l'Industria e l'Artigianato  
MORETTO  
Via Luigi Apollonio, 21 BRESCIA***

***MOTORE IN CORRENTE CONTINUA***

*FRANZONI MICHELE  
PALAMIDESE ANGELO  
CAVALLARI PAOLO  
VEZZOLI MASSIMILIANO*

***Classe 5EI TIEE***

***Brescia giugno 1993***

## INTRODUZIONE

Nella produzione industriale, il prodigioso sviluppo della tecnica ha richiesto e richiederà sempre più in futuro motori a velocità regolabile, cioè aventi la possibilità di variare con continuità il numero di giri, e nelle condizioni di regime di mantenerlo costante al variare del carico. Questo è facilmente comprensibile se si pensa alla complessità ormai raggiunta dalle macchine operatrici; che richiedono quindi un avviamento lento. Oltre a questo fatto si deve pensare anche alla riduzione dei tempi di produzione, ottenibile solamente sfruttando la macchina ai suoi limiti di funzionamento. Tutto questo non può essere svolto con i cambi meccanici, per ovvi motivi; ecco perchè si sono studiate le possibilità di regolare la velocità del motore, mantenendo inalterate le sue caratteristiche. Il motore sul quale con più facilità si può agire in modo da soddisfare le nostre esigenze è il " Motore a Corrente Continua ". Prima di passare allo studio specifico dei vari sistemi di controllo, è meglio chiarire brevemente le varie caratteristiche del motore a C.C. essendo dopotutto esso l'organo che si deve controllare.

## MOTORI IN C.C

Innanzitutto i motori c.c. sono organi elettrici capaci di trasformare energia elettrica con cui vengono alimentati, in energia meccanica; cioè quella che si ritrova sull'albero motore stesso sotto forma di coppia. Esso è costituito da tre elementi essenziali:

- 1) Il circuito magnetico con gli avvolgimenti di eccitazione: **INDUTTORE** che costituisce lo statore (la parte fissa) della macchina.
- 2) " L' Indotto " rotante, sul quale è calettato l'albero motore; che porta gli avvolgimenti d'armatura che quando sono percorsi da corrente creano una coppia motrice (o meglio una reazione) con il campo magnetico creato dall'induttore.
- 3) Il collettore e le spazzole che servono per connettere l'indotto alla linea di alimentazione.

Poichè tale motore presenta le stesse identiche caratteristiche di una dinamo, esso può anche erogare corrente, e quindi è una macchina reversibile. Esso è caratterizzato ovviamente da alcuni grandezze caratteristiche:

$\Phi_e$  = flusso di eccitazione

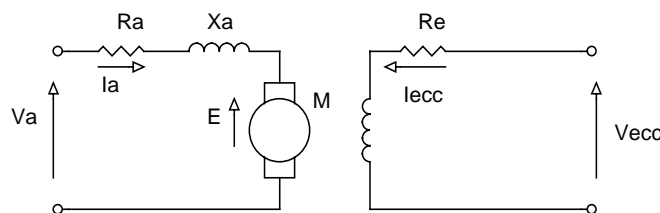
$K_e$  = costante del circuito

n = numero di giri:

Dalla legge di Lenz riferita ad un conduttore immerso in un campo magnetico che si muove a velocità v:

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Dalla formula fondamentale:



$E$  = tensione d'indotto

$$E = K_e \cdot \Phi_e \cdot n$$

$$n = \frac{E}{K_e \cdot \Phi_e} = \frac{V_a - R_a}{K_e \cdot \Phi_e}$$

si vede chiaramente che la velocità di un motore c.c.

dipende sia dalla tensione applicata

(tensione d' armatura) sia dal flusso di eccitazione.

**Coppia resa all' albero:**

La formula della coppia resa al suo albero si ricava dalla legge fisica di Lorenz:

$$F = B \cdot l \cdot I$$

da cui :

$$C = K_c \cdot \Phi_e \cdot I_a$$

dalla quale C. è funzione sia del flusso induttore, che della corrente di armatura  $I_a$ .

**Coppia di spunto:**

La legge che la regola è identica alla precedente. Essa però potrà essere 1,5-2 volte superiore alla coppia nominale, fornita dal costruttore , e cioè dalle capacità di sovraccarico momentaneo del motore preso in considerazione.

Per limitare la corrente allo spunto si può utilizzare un reostato , inserito in serie al circuito d'armatura , denominato reostato d'avviamento.

Questo reostato viene inserito a motore fermo e viene poi completamente disinserito quando il motore è a regime.

**Corrente d' armatura :**

la sua espressione è sempre data da:

$$E = V_a - R_a \cdot I_a$$

da cui:

$$I_a = \frac{(V_a - E)}{R_a}$$

ma poichè E è una forza controelettrica e il suo valore è dato dalla espressione :

$$E = K_e \cdot \Phi_e \cdot n$$

si potrà dire che la  $I_a$  varia entro un certo campo di valori, poichè essa varia con la velocità del motore (n dei giri);

e precisamente  $0 < I_a < \frac{V_a}{R_a}$

La  $I_a$  di un motore ideale diventa zero quando la E (f.c.e.m) eguaglia la  $V_a$  ; questo ,in realta, non si può verificare per la presenza degli attriti meccanici.

$$I_a = \frac{V_a}{R_a}$$

non è altro che una corrente di c.c. , cioè un valore di corrente superiore a quello della  $I_a$  nominale molto più grande del limite sopportabile. Da ciò si deduce che all'atto dell'avviamento si devono attuare particolari accorgimenti per limitare tale corrente (tramite un opportuno controllo di corrente).

## **RENDIMENTO**

Tale parametro indica il rapporto tra la potenza meccanica sviluppata dall'indotto; e la potenza elettrica assorbita dalla linea di alimentazione:

$$\eta_e = \frac{E \cdot I_a}{E \cdot I_a + R_a \cdot I_a^2} = \frac{E \cdot I_a}{V_a \cdot I_a}$$

da cui:

$$\eta_e = \frac{E}{V_a}$$

Tale formula dipende dal tipo di macchina; essa avrà particolari espressioni che dipendono dalle perdite elettriche intrinseche della macchina stessa ed inoltre non potrà mai essere pari a 1.

$$0 \leq \eta_e < 1$$

Questo rendimento è solo quello elettrico poichè non considera le perdite di tipo meccanico.

Potenza resa all'albero:

Naturalmente non tutta la potenza ( $P = E \cdot I_a$ ) la ritroviamo disponibile all'albero; infatti una parte di essa serve per vincere la coppia resistente dovuta agli attriti meccanici (che sono proporzionali al n. di giri); alla perdite per ventilazione (proporzionale al cubo della velocità), alle perdite per isteresi nel ferro e alle correnti parassite nell'indotto e nelle espansioni polari.

## **REGOLAZIONI EFFETTUABILI IN UN MOTORE C.C.**

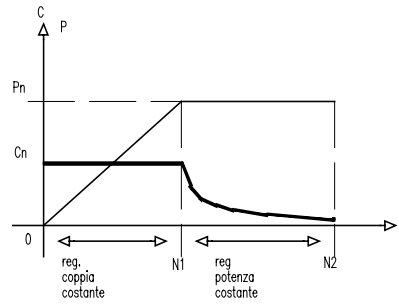
Le principali regolazioni di un motore a c.c. si possono così sintetizzare:

- 1) Regolazione del n. di giri (velocità).
- 2) Regolazione della coppia resa all'albero.
- 3) Limitazioni della corrente allo spunto.
- 4) Inversione del senso di marcia.
- 5) Frenatura.

Di queste cinque particolari regolazioni quella di cui ci siamo prefissi lo studio, e quindi la realizzazione pratica del controllo, risulta essere la regolazione di velocità, a cui andrebbe interconnessa parallelamente quella di corrente per i motivi visti in precedenza dovuti alle forti correnti di avviamento. La regolazione di velocità è forse fra tutte quella più importante in quanto permette di avere una riduzione di costi per il fatto che vengono eliminati i cambi meccanici. Permette inoltre una grande adattabilità del motore alle varie esigenze dovute alla produzione.

La regolazione di velocità o del n. di giri può essere fatta a :

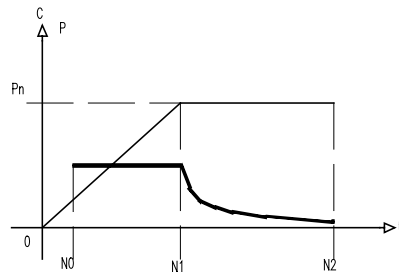
" Coppia costante " (regolando la tensione d'armatura  $V_a$ ) oppure a " potenza costante " (regolando la corrente di eccitazione). Nella fig. si vede l'andamento della coppia e della potenza in funzione dei n. dei giri.



Perciò mantenendo nel tratto 0-N1 (coppia costante) la  $I_{ecc.} = I_{ecc. nom}$  e variando la  $V_a$  di armatura si vede che la coppia rimane costante fino al n. di giri del motore fissati dal costruttore per questa regolazione (C. cost.), mentre la potenza cresce linearmente fino al valore della potenza nominale che **viene raggiunto potenza costante mentre la coppia decresce con legge iperbolica (deflussaggio)**. Tale regolazione può avvenire fino al valore del n. di giri pari a N2 stabilito come sempre dal costruttore. Esiste però una zona definita proibita (cioè il tratto N0). Delimitata dal seguente rapporto che vale circa proprio in corrispondenza di tale n. di giri N1. Superato tale n. di giri ponendo una  $I_{ecc.}$  minore di quella nominale:  $I_{ecc} < I_{ecc} I_{ecc} < I_{ecc} nom$ .

se manteniamo costante la  $V_a$ , il n. di giri aumenta ed entriamo nel tratto della regolazione a potenza costante mentre la coppia decresce con legge iperbolica.

Tale regolazione può avvenire fino al valore del numero di giri pari a N2, stabilito dal costruttore.



Esiste però una zona definita proibita (cioè il tratto  $0 \div N0$ ), definita dal seguente rapporto:

$$\frac{N_1}{N_0} \leq 20 \div 30$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 3 \div 4$$

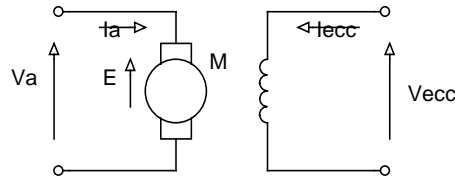
Questo lo si può capire dal fatto che a velocità nulla (per quanto riguarda il controllo a coppia cost.) il motore è chiamato a fornire coppia max. Cioè a velocità nulla il rotore è percorso da corrente, al limite potrebbe essere percorso da corrente d' armatura nominale massima con la conseguenza di un notevole sovraccarico di corrente; quindi problemi di dissipazione notevoli dovuti dall' esigenza di ventilazione per facilitare la dissipazione di calore che si avrebbe. Ecco perché N0 nella maggior parte dei casi non corrisponde allo zero.

Nel controllo del motore c.c. un' altra caratteristica è la variazione del n. di giri (errore) passando da vuoto a pieno carico, che viene espressa in forma percentuale: di solito va da 0,1-3 %. Tale errore è minore se si esegue il controllo tramite dinamo tachimetrica; mentre i valori più elevati di errore si ottengono quando si prende come riferimento la  $V_a$ . Se si prende come solo riferimento la  $V_a$  per variare la

velocità, si commette un errore poichè non si tiene conto della caduta di tensione dovuta alla resistenza d' armatura, che pur essendo piccola influenza il n. di giri.

Perciò questo fatto dipende solo dalla precisione del controllo che si vuole eseguire.

Per quanto riguarda la limitazione della corrente allo spunto, essa deve essere controllata in modo da permettere la sostituzione del reostato d' avviamento tenendo presente che il costruttore permette un sovraccarico di corrente  $I_a$  compreso tra il 50-100 % per un tempo massimo di circa 120 sec.. Nella realizzazione del nostro controllo ed in genere nel campo dei controlli i motori su di cui si preferisce agire sono i motori a c.c. con eccitazione indipendente. Appartengono a questa categoria tutti quei motori in cui il circuito d' eccitazione risulta completamente indipendente dal circuito d' armatura e l' alimentazione d' armatura e quella d' eccitazione possono anch'esse essere indipendenti:



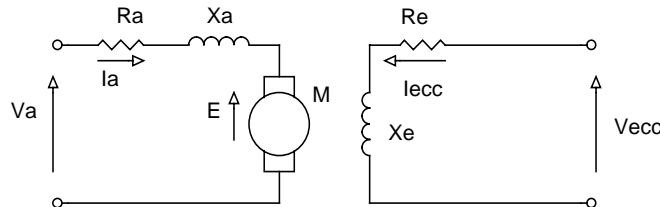
Un esempio di motore ad eccitazione indipendente presenta le seguenti caratteristiche :

$$V_{ecc} = 200V \quad I_{ecc} = 0,26A \quad V_a = 170V \quad I_a = 3,3A$$

$$giri/min. = 2500 \quad HP = 0,65 \quad HP = 0,65 .$$

Da notare che nel motore in c.c. il senso di rotazione dipende sia dal verso della corrente di armatura, sia da quella della corrente di eccitazione; pertanto per invertire il senso di rotazione basta scambiare il senso della  $I_{ecc}$ . o della  $I_a$ . Queste sono le più importanti caratteristiche, anche se non le sole che identificano il motore c.c. con eccitazione indipendente.

Il circuito semplificato risulta essere il seguente:



in esso sono messi in evidenza sia le due resistenze,  $R_a$  (armatura) e  $R_e$  (eccitazione); sia le due reattanze  $X_a$ ,  $X_e$ .

Gli avvolgimenti infatti oltre a presentare una resistenza, presentano pure una certa reattanza induttiva. In conclusione le formule che riassumono il funzionamento del motore c.c. si possono così definire:

$$E = K' \cdot I_{ecc} \cdot n$$

$$coppia \equiv I_a \quad P = E \cdot I_a \equiv C \cdot n$$

$$V_a = E + R_a \cdot I_a$$

Il nostro studio sulla regolazione della velocità parte dalla formula:

$$n = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{I_{ecc}}$$

se  $R_a \cdot I_a = 0$

$$n \equiv \frac{V_a}{I_{ecc}} \hat{=} \dot{u}$$

guardiamo perciò quali elementi possono influire sulla velocità, o meglio se è preferibile nel nostro tipo di controllo una regolazione a coppia cost., o a potenza cost.; l'equazione fondamentale del motore c.c. come si è già visto è:

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi_e$$

Nell'equazione si vede che la f.c.e.m. del motore è proporzionale alla sua velocità "n", ad una cost. "K" e al flusso d' eccitazione. Quando il motore funziona a regime la c.d.t. sulla resistenza d' armatura  $R_a$  è circa uguale a zero; infatti tutta la tensione d' armatura  $V_a$  si trova ai capi del motore. Perciò si può ritenere:

$$V_a = E = K_e \cdot n \cdot \Phi_e$$

da cui ricavando il numero di giri del motore:

$$n = \frac{V_a}{K_e \cdot \Phi_e}$$

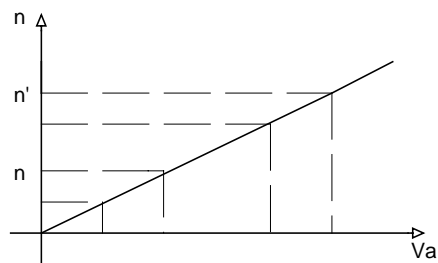
La velocità, e la tensione d' armatura sono in rapporto proporzionale fra loro a flusso cost. , mentre a  $V_a$  costante, è inversamente proporzionale al flusso d' eccitazione.

$$n = \frac{K(cost.)}{\Phi_e} \quad K_e = V_a = K$$

Perciò si tratta di decidere su quali di questi due parametri,  $V_a$  e il flusso d' eccitazione, si debba agire. Consideriamo la velocità in funzione della  $V_a$ , che è il parametro a noi più utile:

$$n = \frac{V_a}{K_e \cdot \Phi_e} \quad e = cost.$$

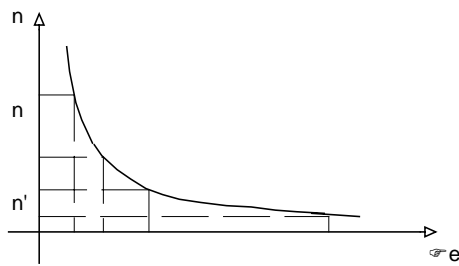
non è altro che l'equazione di una retta N, a meno di una costante è proporzionale a  $V_a$ :



Ciò vuol dire che se noi diamo uno stesso incremento di tensione d' armatura delta  $V_a$  per bassi e per alti valori di  $V_a$ , le variazioni della velocità del motore conseguenti, saranno esattamente uguali. Prendiamo in esame invece la formula della velocità "n" in funzione del flusso d' eccitazione.

$$n = \frac{K_e(cost.)}{\Phi_e} \quad V_a = cost.$$

Si osservi che un' incremento delta del flusso di eccitazione effettuato attorno ad un valore del flusso piccolo provoca una notevole variazione del n. dei giri; mentre un egual incremento del flusso effettuato attorno ad un valore del flusso elevato provoca una ridotta variazione del n. dei giri.



La variazione della velocità del motore e del flusso di figura non è quindi una variazione lineare, perciò questa alternativa non viene presa in considerazione. Quindi si agirà sulla  $V_a$  per variare il n. di giri "n" del motore. Realizziamo perciò (dopo aver dedotto le varie osservazioni) " il controllo a coppia costante ".

## **DINAMO TACHIMETRICA**

Sull'albero del motore viene calettata una dinamo tachimetrica con la funzione di trasdurre la velocità in una grandezza elettrica, precisamente in una tensione continua.

L'espressione della tensione di uscita della D.T. è :

$$e_0 = K_d \cdot n \qquad K_d = K_e \cdot \Phi_e$$

dove  $K_d$  indica la costante tachimetrica, che nel nostro caso vale  $0,06 \text{ V / g.}$ . È evidente che per avere una linearità buona  $K_d$  deve restare il più costante possibile entro una vasta gamma di velocità. In realtà  $K_d$  può variare per i seguenti motivi:

A) Per la corrente fornita dalla D.T..

Nelle caratteristiche del costruttore sono comunque sempre indicate le variazioni della "eo" (forza elettromotrice) in funzione della corrente.

Un effetto smagnetizzante inoltre è prodotto nella D.T. da eventuali corto circuiti sull'uscita; questi corto circuiti di carattere accidentale devono essere evitati con una certa attenzione.

B) Per la velocità massima.

Il costruttore, dando la classe della D.T., ne limita anche il valore della velocità massima. Conviene distinguere il limite massimo meccanico della velocità dal limite elettrico. Il limite massimo meccanico stabilisce la massima velocità a cui la D.T. può arrivare senza pregiudicare le sue caratteristiche meccaniche (ad esempio cuscinetti, serraggio meccanico degli avvolgimenti, adesione delle spazzole, etc.). Il limite elettrico invece fissa la massima f.e.m. che si può ottenere dalla D.T. senza che ne siano compromesse le caratteristiche di isolamento degli avvolgimenti e del collettore.

C) Con la temperatura.

Essendo per la maggior parte le D.T. costruite con magneti permanenti, i campi magnetici da questi prodotti sono sensibili alla temperatura. Una compensazione per le normali variazioni di temperatura è praticata su tutte le D.T.. È possibile ottenere, eseguita su richiesta, una ulteriore compensazione per quei casi in cui la D.T. è chiamata a lavorare in condizioni di temperatura particolari.

D) Ondulazione della tensione d'uscita. p73 Questa ondulazione è funzione del numero di lamelle del collettore ed al fine di tener bassa questa ondulazione i costruttori usano collettori con elevato numero di lamelle.

La presenza poi, nelle D.T., del collettore, porta altri inconvenienti. Nell'istante di commutazione (passaggio delle spazzole tra una lamella e l'altra) si generano delle correnti di corto circuito tra le due lamelle e, all'atto del distacco, uno scintillio. Con opportuni accorgimenti questo scintillio è ridotto al minimo, però il segnale della D.T., osservato all'oscilloscopio, presenterà sovrapposti alla "eo" disturbi abbastanza evidenti.

Questi disturbi devono essere opportunamente eliminati prima che la tensione della D.T. entri nell'anello di regolazione.

Dal punto di vista meccanico le D.T. devono avere un basso valore del momento d'inerzia. Questo dato caratteristico deve essere preso in considerazione specialmente in quei controlli di velocità in cui il motore in c.c., al quale la D.T. è calettata, è piccolo e con un proprio momento d'inerzia confrontabile a quella della D.T.. Sempre da un punto di vista meccanico va prestata molta attenzione nella costruzione del giunto elastico che unisce il motore alla D.T.. Difetti in questo particolare punto possono essere causa di errori od oscillazioni. Sono inoltre disponibili in commercio dei piccoli motori per servomeccanismi con la D.T. incorporata, nei quali viene così eliminato il problema dell'accoppiamento meccanico.

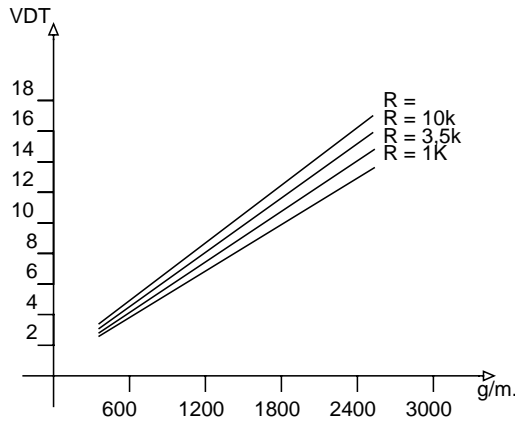
Alcuni pregi delle D.T. possono essere:

- A) non vi sono problemi di sfasamenti e di forme d' onda.
- B) Per velocità nulla anche la tensione d' uscita è nulla.
- C)  $K_d$  compresa fra  $10mV/giro$  e  $100mV/giro$

Per contro si possono avere i seguenti difetti:

- A) la tensione d' uscita è alterata da una ondulazione la cui frequenza dipende dalla velocità di rotazione (e non può quindi essere agevolmente eliminata con un filtro).
- B) Inconvenienti dovuti alla presenza di spazzole (e del collettore segmentato), alto valore della coppia d' attrito; vibrazioni alle alte velocità; consumo rapido delle spazzole e deterioramento del collettore; generazione di rumori ad alta frequenza dovuti alla commutazione; momento d' inerzia del rotore piuttosto elevato, specie se confrontato con altri sistemi.

La figura che segue riporta l' andamento della tensione d' uscita in funzione della velocità e per diversi valori di carico.



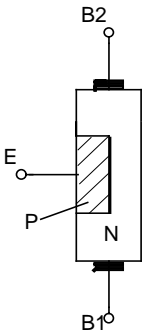
Vengono ora esposte le principali caratteristiche di una di una D.T :

$$K_d = 0,06 \frac{V}{giro} \quad I_{max} = 180mA$$

$$n_{max} \frac{giri}{min.} = 10000$$

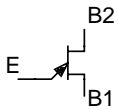
### TRANSISTOR UNIGIUNZIONE ( UJT )

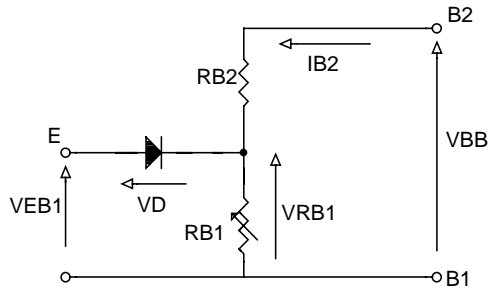
Il transistor unigiunzione è un dispositivo a semiconduttore con tre terminali avente la seguente struttura:



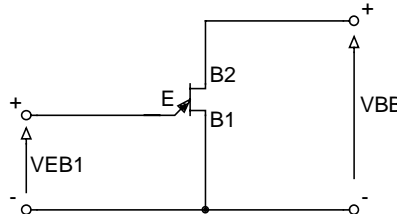
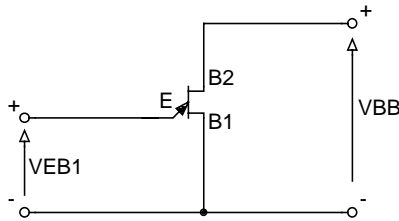
Esso è formato da una barretta di silicio con debole drogaggio di tipo N, con due terminali alle estremità; su di un lato della barretta è applicato un elettrodo di alluminio ( drogato di tipo P ), il quale, legandosi con il silicio drogato di tipo N, forma una giunzione PN. I due terminali sono detti rispettivamente basi B1 e B2, mentre l' elettrodo di alluminio, che forma la giunzione, è l' emettitore. Per determinare le condizioni di funzionamento del dispositivo, occorre polarizzarlo in modo che il potenziale di B2 sia maggiore di quello di B1, inoltre la giunzione PN deve essere polarizzata direttamente per cui anche il potenziale dell'emettitore deve essere maggiore di quello di B1.

Polarizzazione di un UJT:





Per descrivere il comportamento dell' UJT, si ricorre al circuito equivalente sopra riportato. In esso si nota che la resistenza  $R_{B1}$  è variabile, questo perchè il suo valore si modifica in funzione della corrente di emettitore. Essa varia da alcuni Kohm ad alcuni ohm, in corrispondenza di variazioni di  $I_e$  da 0 ad alcune decine di mA. la resistenza complessiva che si vede tra i morsetti B1 e B2, per  $I_e$  uguale a 0, è definita resistenza di interbase e vale:



$$R_{BB} = R_{B1} + R_{B2}$$

e può assumere valori che vanno da alcuni Kohm alle

decine di Kohm. Variando però  $R_{B1}$ , dovuta ad una variazione di  $I_e$ , si ha di conseguenza una variazione di  $R_{BB}$  e quindi della corrente  $I_{B2}$ :

$$I_{B2} = \frac{V_{BB}}{R_{BB}}$$

la caduta ai capi di  $R_{B1}$ , con  $I_e = 0$ , è espressa mediante il rapporto di partizione:

$$V_{RB1} = \frac{V_{BB} \cdot R_{B1}}{R_{BB}} \quad V_{RB1} = \frac{V_{BB} \cdot R_{B1}}{R_{BB}}$$

si definisce il rapporto intrinseco il termine:

$$n = \frac{R_{B1}}{R_{BB}}$$

risulta che:

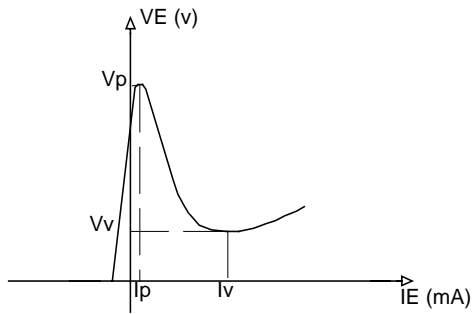
$$V_{RB1} = n \cdot V_{BB}$$

Valore tipico di  $n$  è 0,6.

Allorchè la tensione applicata all'emettitore,  $V_e$ , diviene maggiore della somma tra la caduta ai capi del diodo ( $V_d = 0,6 \text{ V}$ ) e la  $V_{RB1}$ , si ha la circolazione della corrente  $I_e$ , che porta ad un immediato abbassamento di  $R_{B1}$ , e quindi di  $R_{BB}$ . La tensione di ingresso che permette la circolazione di  $I_e$ , viene definita tensione di picco:

$$V_p = n \cdot V_{BB} + V_d$$

La caratteristica di un UJT è la seguente:



In essa si può osservare che finchè  $V_e$  si mantiene al di sotto del valore di picco  $V_p$  (regione di interdizione) la corrente  $I_e$  coincide con la corrente di polarizzazione inversa di un diodo. Quando  $V_e = V_p$ , comincia a circolare la corrente  $I_e$  dall' emettitore verso la base B1, ed a ciò consegue, come già noto, una diminuzione di  $R_{B1}$ , aumento di  $I_e$  e diminuzione di  $V_e$ . La zona in cui si verifica ciò è detta a resistenza differenziale negativa. La  $I_e$ , nella regione a resistenza differenziale negativa, aumenta fino a che la zona di barretta di silicio compresa tra emettitore e B1 non raggiunge la saturazione. In tale condizione si ha un punto della caratteristica

definito punto di valle (V). Quando la  $I_e$  supera il valore  $I_v$  (cioè nella zona di saturazione), il comportamento del transistor è paragonabile a quello di un normale diodo. Un campo tipico di applicazioni dell' UJT è la generazione di brevi impulsi e denti di sega.

Il circuito per la realizzazione di queste forme d'onda è il seguente:

Alimentando questo circuito, il condensatore C inizia a caricarsi mediante la resistenza R. Quando la tensione  $V_e$ , ai capi del condensatore raggiunge il valore di picco  $V_p$ , si ha circolazione di corrente nella regione E-B1 dell' UJT, ne segue una diminuzione di  $R_{B1}$  e quindi una rapida scarica del condensatore attraverso la  $R_{B1}$  stessa e la  $R_1$  esterna. In tal modo ai capi di  $R_1$  si ha una tensione impulsiva con decremento esponenziale. Poichè, durante la scarica, la tensione ai capi di C scende a valori molto inferiori a  $V_p$ , il fenomeno di conduzione attraverso l'UJT cessa e si ritorna alla situazione iniziale, cioè il condensatore ricomincia a caricarsi. Ordini di grandezza delle resistenze:

$$R_1 = 27 \div 47\Omega \quad R_2 = 220 \div 680\Omega$$

i valori di R e C stabiliscono la frequenza la quale è data dalla formula:

$$f = \frac{1}{\left( R \cdot C \cdot \ln \frac{1}{1-n} \right)}$$

poichè  $\ln X = 2,3 \cdot \log X$  risulta:

$$f = \frac{1}{\left( R \cdot C \cdot 2,3 \cdot \log \frac{1}{1-n} \right)}$$

assumendo per "n" il valore tipico di 0,6 e svolgendo i calcoli risulta:

$$f = \frac{1}{R \cdot C}$$

Il valore di R varia tra  $1M\Omega$  e alcuni  $K\Omega$ .

Il valore di C si calcola dalla formula precedente a seconda della frequenza desiderata.

## **DIODI CONTROLLATI AL SILICIO S.C.R.**

Passiamo perciò alla spiegazione della vera e propria fase del controllo, e del suo funzionamento. L'elemento essenziale di tutto il circuito è senz'altro rappresentato dagli SCR (Silicon-Rectifier Controlled) che sono l'anello di collegamento tra motore e circuito elettronico; tramite tali dispositivi industriali, si riesce a parzializzare la tensione d'armatura sul motore e quindi a ridurne (come si è visto in precedenza) il numero di giri del motore; il vantaggio è che la parzializzazione avviene in modo continuo per tutto l'arco del periodo, e ciò si ripercuote sulla variazione della velocità che risulta così una variazione lineare. Perciò prima di spiegare i vari circuiti analizziamo le sue caratteristiche, le protezioni, i circuiti d'impiego e circuiti di disinnesco. L'SCR è il più importante diodo raddrizzatore controllato sia per le sue caratteristiche elettriche che per le sue dimensioni eccezionalmente ridotte rispetto alla potenza che esso è in grado di controllare. Esso strutturalmente risulta essere composto da 4 strati di semiconduttore a drogaggio alterno PNPN, cioè separati da tre giunzioni secondo la seguente disposizione:

a)            b)            c)

a) Struttura di un SCR: A = anodo; G = gate; K = catodo;

b) Simbolo circuitale dell' SCR;

c) schematizzazione dell' SCR mediante una coppia di BJT complementare con reazione positiva.

Per comprendere il funzionamento degli SCR è possibile eseguire una schematizzazione in cui, essi vengono rappresentati come due transistori complementari connessi secondo lo schema di fig. "c". Da tale fig. si può osservare che il collettore di ciascun transistor è connesso alla base dell'altro realizzando in tal modo una reazione positiva. Se si applica tra il catodo e l'anodo di un SCR ovvero tra gli emettitori dei due ipotetici BJT una d.d.p.

con polarità positiva sull'anodo e quindi negativa sul catodo, si possono verificare le seguenti due situazioni:

A) In assenza di comando al gate, si ha una d.d.p.  $V_{b2} = 0$  per il transistor T2, da cui si trae che  $I_{b2} = 0$ . La corrente di base del transistor T1 in tal caso coincide con la corrente di saturazione inversa della giunzione collettore-base di T2, ma tale corrente è insufficiente a fare innescare la conduzione di T1, e, di conseguenza, di T2. In altri termini l'SCR ha la giunzione intermedia NP polarizzata inversamente, e presenta di conseguenza una resistenza molto elevata tra anodo e catodo;

B) Se si applica al gate una tensione positiva rispetto al catodo si ha l'ingresso di una corrente  $I_{b2}$  nella base di T2, il quale si pone in conduzione e fa circolare una corrente:

$$I_{C2} = hFE_2 \cdot I_{B2}$$

attraverso il proprio collettore, ovvero attraverso la base di T1.

La corrente:

$$I_{B1} = I_{C2} = hFE_2 \cdot I_{B2}$$

pone in conduzione il transistor T1, facendo circolare in esso la corrente:

$$I_{C1} = hFE_1 \cdot I_{B1} = hFE_1 \cdot hFE_2 \cdot I_{B2}$$

Tale corrente, grazie alla reazione positiva fluisce anche nella base di T2. La reazione positiva porta rapidamente alla saturazione i due transistori; il fenomeno si mantiene anche se la corrente di gate viene tolta. Questo consente di comprendere che mediante un comando impulsivo di gate, è possibile porre in conduzione l' SCR in modo che presenti una resistenza pressochè nulla tra anodo e catodo.

I valori normali di caduta tra anodo e catodo di un generico SCR in conduzione sono dell'ordine di pochi volt (circa 2V).

La caratteristica di funzionamento dell' SCR è la seguente:

Caratteristiche dirette e inverse del' SCR.

Nel primo quadrante sono rappresentate le caratteristiche dirette

$$I_{GT3} > I_{GT2} > I_{GT1} > 0$$

dove tali correnti sono quelle di innesco del componente. La caratteristica inversa è quella di un normale diodo. Le rimanenti sigle riportate in figura saranno spiegate in seguito.

In tale fig. si possono osservare i seguenti punti caratteristici:

1) **TENSIONE DI ROTTURA DIRETTA (Vbo di break over):** è il valore di tensione che, applicato tra anodo e catodo dell'SCR, lo pone in conduzione anche in assenza di impulso in gate. Il motivo per cui si verifica la rottura è il seguente: come è noto, ciò che mantiene interdetti l' SCR è la polarizzazione inversa della giunzione intermedia NP.

Superata la Vbo, per effetto valanga, la corrente cresce e porta alla distruzione del dispositivo.

Tale giunzione presenta una capacità "c" per cui viene fornito un impulso di tensione ai suoi capi, circola attraverso la giunzione, una corrente.

Se tale corrente risulta sufficiente ad innescare il fenomeno di reazione positiva, il dispositivo si pone in conduzione. Per questo motivo il costruttore oltre a fornire la tensione di rottura diretta Vbo fornisce il valore della derivata della tensione ai suoi capi rispetto al tempo intesa come rapporto tensione-durata, di una variazione di tensione applicata tra anodo e catodo, in grado di portare in conduzione il dispositivo con  $I_G = 0$ . Tale caratteristica degli SCR è generalmente dannosa, in taluni casi può essere utilizzata al fine di produrre un innesco senza agire sul gate. Se nell'elettrodo di gate viene introdotta una corrente, si osserva un abbassamento della tensione di rottura Vb, proporzionale all'intensità della corrente stessa (curve relative a: IGT1, IGT2, IGT3, di fig.).

2) **CORRENTE DI MANTENIMENTO:** rappresenta il valore minimo di corrente necessario perchè abbia luogo la reazione positiva che mantiene innescato l' SCR (nel passaggio da ON a OFF).

3) **CORRENTE DI LATCHING:** rappresenta la minima corrente necessaria per determinare l' innesco (nel passaggio da OFF a ON).

4) **REGIONE DI CONDUZIONE DIRETTA:** è la zona delle caratteristiche, che descrive il comportamento tensione-corrente nell' SCR in conduzione.

5) **REGIONE INVERSA:** applicando ai capi dell' SCR una tensione inversa (catodo positivo e anodo negativo), il comportamento che si riscontra è il medesimo di un diodo polarizzato inversamente. Si osservi tuttavia che in tal caso le giunzioni si polarizzano inversamente sono due.

Gli SCR sono reperibili in commercio suddivisi in base alle seguenti specifiche:

**IGT = CORRENTE D' INNESCO:** minima corrente richiesta in gate, per passare dallo stato di interdizione a quello di conduzione, con una certa tensione diretta applicata;

**IH = CORRENTE DI MANTENIMENTO:** minima corrente diretta (da anodo a catodo), per mantenere in conduzione l' SCR dopo il passaggio della corrente principale IT(av);

**IT(av) = MASSIMA CORRENTE DIRETTA** con conduzione a 180 gradi (semiperiodo).

**IRMS = MASSIMA CORRENTE EFFICACE.**

**Vbo = TENSIONE DI ROTTURA DIRETTA:** tensione positiva (tra anodo e catodo) massima, che l' SCR è in grado di tenere ai propri capi. Superando tale tensione l' SCR può entrare in conduzione anche con  $I_G = 0$ .

**VDRM = MASSIMA TENSIONE INVERSA DI PICCO (ripetitivo)** che l' SCR è in grado di bloccare allorchè è interdetti.

Superando tale tensione l' SCR entra in conduzione inversa (catodo-anodo).

**VFM = MASSIMA CADUTA DI TENSIONE IN CONDUZIONE DIRETTA.**

**VGT = TENSIONE D' INNESCO TRA GATE E CATODO,** necessaria per dar luogo alla corrente d' innesco.

Il campo attuale di valori di tensione e corrente di questi semiconduttori è il seguente:

Correnti: IT(av) da 1 a 350 Amper

Tensioni: Vbo da 30 a 1200 Volt.

Gli SCR vengono suddivisi in famiglie, i cui componenti hanno tutti la medesima  $I_T(av)$  e valori di  $V_{bo}$  diversi. I vari componenti della medesima famiglia sono distinti l'uno dall'altro mediante una lettera o un numero nella sigla.

## ***DISINNESCO DEGLI SCR IN CORRENTE ALTERNATA***

È noto che, nel funzionamento in c.a., i diodi controllati si disinnescano automaticamente allorché la tensione alternata di alimentazione passa per lo zero.

Tuttavia, se il carico cui i diodi sono applicati è di natura induttiva, si origina uno sfasamento tra tensione e corrente, che ha come conseguenza il mantenimento della conduzione, ovvero produce rineschi indesiderati. Per il corretto funzionamento dell' SCR si devono prendere in considerazione alcuni parametri caratteristici, e precisamente "la Derivata di tensione e di corrente" e cioè:

$$\frac{dV}{dt} \qquad \frac{dI}{dt}$$

o meglio la velocità di variazione della tensione ai suoi capi o della corrente attraverso esso. Infatti essa ha dei limiti per evitare la distruzione del dispositivo. ( $dt$ ) è dell'ordine dei microsec.. Supponiamo di applicare una tensione del tipo di fig., la derivata di tensione non è altro che  $dV/dt$  che come già visto in precedenza si deve limitare per evitare p73 l' innesco in assenza di impulsi di gate.

Per non far innescare l' SCR la derivata di tensione e di corrente devono essere:

$$\frac{dV}{dt} = 300 \text{ V}/\mu\text{S} \qquad \frac{dI}{dt} = 100 \text{ A}/\mu\text{S}$$

Quando si hanno gradienti superiori a questi, si deve ricorrere a delle protezioni:

1)per quanto riguarda  $\frac{dV}{dt}$  si ricorre ponendo in parallelo all' SCR una resistenza e una capacità come in figura.

Tali ordini di valori dipendono da come è costruito l' SCR.

2)per il  $\frac{dI}{dt}$  si pone in serie all' SCR una induttanza come in figura.

Essa si oppone infatti alla variazione di corrente ai suoi capi. L' induttanza deve saturare in un tempo di 10÷20 microsec. dopo il quale la corrente è a regime e l' effetto prodotto dall' induttanza scompare. Perciò riassumendo il circuito completo per la protezione contro i gradienti di V e di I. è il seguente :

Nonostante questo, l'SCR non è protetto del tutto contro le sovracorrenti , serve quindi in serie all' induttanza un fusibile. Esso è d' obbligo quando si tratta del campo di controlli di elevata potenza. La grandezza che caratterizza il fusibile è la corrente al quadrato per il tempo cioè l' energia di fusione e dovrà sempre essere verificata la seguente relazione:

Nonostante tutto deve essere ben chiaro il fatto che l' SCR assolve la sua funzione solo nel caso lo si faccia funzionare nelle condizioni termiche per cui è stato costruito. L' SCR può gestire limite una corrente maggiore basta che sia raffreddato in modo esatto. Da ciò si capisce l' importanza che riveste la dissipazione.

## **ALIMENTATORE MONOFASE A PONTE SEMICONTROLLATO**

Consideriamo il ponte semicontrollato che può essere costituito in due configurazioni diverse

La differenza consiste nella diversa posizione degli SCR e per la presenza nel secondo circuito del diodo volano (DV).

Il primo circuito ha il vantaggio di non avere bisogno del suddetto diodo; ma complica però il circuito d' innesco poichè gli SCR essendo sullo stesso ramo del ponte hanno i loro catodi a diverso potenziale. Il funzionamento però per entrambi è il medesimo.

In esso i carichi induttivi, la presenza di due diodi normali sullo stesso ramo ( nel primo caso ) e del diodo volano ( nel secondo caso ) facilita il percorso della corrente induttiva del carico. Volendo rappresentare su di un grafico l' andamento della tensione sul carico in funzione dell' angolo alfa si ottiene un andamento cosinusoidale come in figura:

Per facilitare ancor più la comprensione di tale grafico è stata riportata in ordinata il rapporto tra tensione  $V_c$  sul carico e quella  $V_{co}$  che si avrebbe se i diodi non fossero controllati ( sempre con segnale d' ingresso  $V_a$  alternato ).

Si vede che se alfa è uguale a zero tale rapporto è uguale a uno, infatti non vi è parzializzazione; nel caso in cui alfa fosse uguale a 90 gradi il rapporto vale 0,5, infatti la parzializzazione è esattamente la metà.

### ***SINCRONISMO***

Per l' innesco degli SCR non viene inviato un solo impulso ma un treno di impulsi ad una certa frequenza, infatti l' SCR innesca solamente in corrispondenza del primo impulso che lo trova predisposto all' innesco. Poichè l' SCR deve soprattutto svolgere la funzione di regolazione della corrente ( cioè della potenza fornita al motore ), gli impulsi di innesco DEVONO ESSERE SINCRONIZZATI CON LA FREQUENZA DI RETE. I grafici che dimostrano tale fatto sono i seguenti:

Da tali grafici si capisce chiaramente che più l' angolo di innesco è grande , più il valore medio della forma d' onda nel tempo sul carico diminuisce. Perciò affinché nel tempo la potenza rimanga parzializzata costantemente per tutto l' arco del suo utilizzo, con quel valore medio gli impulsi ( o meglio il primo impulso ) DEVE CAPITARE SEMPRE NELLO STESSO ISTANTE DALL'INIZIO DEL PERIODO. Si avrà in tal modo che la potenza sarà sempre allo stesso valore.

### ***SCHEMA A BLOCCHI COMPLETO DEL SISTEMA DI CONTROLLO***

Fatte le premesse tecniche sul comportamento dei componenti a semiconduttore impiegati, utili al fine di comprendere come funziona il controllo del motore; si passa allo schema a blocchi definitivo di tale controllo, tenendo ben presente che il trasduttore è di tipo analogico (dinamo tachimetrica).

Lo schema a blocchi complessivo è il seguente:

Dove "P" è il potenziometro di "Set point" (valore di riferimento della velocità), NC è il nodo di confronto; VCO è l' oscillatore controllato in tensione; P.S.C. è il ponte semi-controllato; M è il motore a c.c.; la D.T. è la dinamo tachimetrica ovvero il trasduttore di velocità impiegato. Si analizza ora brevemente ogni singolo elemento costitutivo del precedente schema a blocchi, e precisamente gli elementi circuitali che lo compongono.

### ***MODULATORE DI POTENZA***

Per i discorsi precedentemente fatti sul comando degli SCR, se il segnale errore che esce dal nodo di confronto è positivo si deve anticipare l' innesco dell' SCR, se è negativo si deve ritardare l' innesco degli stessi, il che equivale ad avere un' area minore della semionda, valore medio minore e quindi potenza sull' armatura del motore minore con conseguente riduzione della velocità. Per la costruzione del circuito che genera impulsi tali da fare innescare prima o dopo gli SCR ci si serve di un particolare circuito denominato VCO (Voltage Controlled oscillator). Esso è un oscillatore comandato in tensione nel quale la frequenza della rampa generata in uscita è proporzionale alla tensione di pilotaggio in ingresso.

Lo schema completo di tale oscillatore è il seguente:

Il blocco VCO, riceve in ingresso il segnale errore proveniente dal nodo di confronto N.C.. Tale segnale è la differenza tra il " SET POINT " impostato attraverso il potenziometro P ed il segnale proveniente dalla D.T.. Tanto più alto è l'errore tanto più la velocità del motore è lenta e lontana da quella impostata sul potenziometro P; quindi tale segnale agisce sul VCO anticipando l' innesco degli SCR del ponte, fornendo pertanto maggiore energia al motore il quale potrà aumentare il proprio numero di giri riducendo di conseguenza il segnale errore.

Il circuito VCO può essere scomposto come segue:

Si analizzano ora i seguenti singoli blocchi: Generatore di corrente, è costituito da due transistori al silicio. Fra base e massa del primo transistor T1 di tipo NPN giunge il segnale errore proveniente dal nodo di confronto N.C.. La funzione di tale transistor polarizzato come in figura è quella di generatore di corrente di tipo SINKING. Al collettore di tale transistor è connessa la base del transistor T2 di tipo PNP; la funzione di quest'ultimo è quella di generatore di corrente di tipo SOURCING cioè erogatore di corrente positiva verso il condensatore.

All'aumentare del segnale errore in base a T1 aumenta la corrente di collettore dello stesso e quindi aumenta la sua tensione fra collettore e +Vcc. Questo aumento comporta di conseguenza un aumento del segnale in base a T2 che provoca a sua volta un aumento di corrente di collettore di T2. A questo scopo si può dimostrare che con un segnale errore costante e quindi, con corrente costante di collettore di T2 il condensatore C si carica con legge lineare, esiste cioè un legame di proporzionalità .

Sapendo che la corrente nel condensatore vale:

$$i_c = \frac{dQ}{dt}$$

ma essendo

$$Q = C \cdot V$$

si può scrivere che:

$$i_c = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

ovvero è pari alla derivata della quantità di carica rispetto al tempo. Se in tale formula "ic" è costante, come in questo caso e fornita dal transistor T2 ed ovviamente C è costante sarà costante anche il seguente rapporto:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{i_c}{C} = \text{cost.}$$

Ciò significa che l' andamento di Vc in funzione di "t" varia con legge lineare come volevasi dimostrare, il diagramma è il seguente:

$$\text{dove } tg = ic/C \quad tg = i_c/C$$

E' importante osservare che rispetto al circuito dell' oscillatore spiegato nella parte teorica sull' UJT è stato sostituita alla resistenza R., il generatore di corrente sopra indicato al fine di ottenere una carica del condensatore lineare anzichè esponenziale allo scopo di linearizzare la regolazione . Inoltre è importante notare che rispetto al circuito teorico è stato sostituita alla resist. R1 di basso valore il primario di un trasformatore ad impulsi le cui caratteristiche fondamentali sono quelle di avere due secondari isolati galvanicamente utilizzati per pilotare i due gates degli SCR del ponte semi controllato. Il VCO è stato alimentato con un onda trapezoidale ottenuta mediante un ponte di GRAETZ per permettere la sincronizzazione del segnale a dente di sega presente sul cond. C con la tensione alternata di rete. Tale alimentazione trapezoidale consente di scaricare il cond. C, quando questa va a zero. Infatti la tensione fra Base 1 e Base 2 scende anch' essa a zero, quindi la giunzione di emettitore conduce e allora il condensatore si scarica. Quando la tensione trapezoidale sale da 0 a Vz (tensione di zener), può ripartire un nuovo ciclo di carica del condensatore C che consentirà quindi di generare un nuovo impulso di innesco per gli SCR. Da notare che in un periodo T della tensione di alimentazione trapezoidale (che vale 10 mS con una frequenza di rete di 50 Hz) di impulsi ne possono essere generati anche più di uno però sarà solo e solamente il primo che determina l'innesco. Lo schema completo del modulatore è il seguente:

*Elenco componenti:*

*R1=5,6k D1=1N4007 R2=6,8k D2=1N4007 R3=1K D3=1N4007 R4=120K D4=1N4007 R5=1,8K  
D5=1N4148 R6=82K Dz=12V 10W R7=470 T1=BC237 R8=3,3K T2=BC350 R9=1K T3=2N2646  
R10=1K 2W DT=DINAMO TAC R11=6,8K 15W P=22K TR=TRASF. IMP.  
C=22 nF*

In altre parole lo schema rispecchia l'unione di ogni singolo p73 circuito finora studiato. In tale schema inoltre si può osservare che in serie al potenziometro P di "SET POINT", sono disposte due resistenze R1 ed R2, le quali hanno il compito di limitare la velocità minima e massima, e precisamente la R1 fissa il limite di velocità massima a 1500 giri/min., come stabilito dal costruttore senza il quale il motore si porta alla velocità limite di 2500 giri/min.

con conseguente surriscaldamento dello stesso; la R2 fissa il limite di velocità minima di 30 giri/min. senza la quale al disotto di tale numero di giri per avere una coppia costante il motore è chiamato ad assorbire una corrente molto elevata con conseguente surriscaldamento dello stesso. Il diodo disposto in serie alla R7 ha il compito di effettuare la compensazione termica dovuta alla Vbe del transistor T2 per limitare il fenomeno della deriva termica dei due transistor.

## **CIRCUITO DI POTENZA**

Si è già spiegato in precedenza la costituzione e l'utilità dei vari circuiti di alimentazione di potenza con diodi raddrizzatori controllati, analizziamo perciò come risulta costituito in questo caso il circuito di potenza il cui schema è il seguente:

*R1 = 150 R2 = 150 C3 = 0,47 microF D1 = 21 PI 60 IR 20 A D2 = 21 PI 60 IR 20 A D3 = 21 PI 60 IR 20 A  
D4 = 1N4007 D5 = 1N4007 D6 = 1N4007 SCR1 = SCR2 = C 107 F = Fusibile 2 A*

Non dovendo effettuare il recupero di energia in rete, il ponte sarà di tipo "SEMICONTROLLATO", cioè composto da due SCR e due diodi di potenza. Il diodo volano D3 è dello stesso tipo degli altri due diodi di potenza (Imax=20A) Poichè si deve alimentare sia l'avvolgimento di armatura con tensione Va che l'avvolgimento di eccitazione con tensione Vecc, si è ricavato sul ponte semicontrollato l'alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione sfruttando i due diodi D1 e D2. Poichè tali diodi sono di potenza con corrente massima di 20 amper, si sono aggiunti solamente due diodi D4 e D5, collegati come in figura

realizzando un normale ponte a diodi per avere a disposizione una tensione di eccitazione separata. Si deve tener presente infatti che in questo caso si controlla un tipo di motore ad eccitazione indipendente. Il circuito si comporta come l'insieme di due ponti, uno normale e l'altro controllato. Questo è stato possibile poiché si sono avuti a disposizione i diodi: D1, D2, D3, di elevata potenza che sopportano bene anche il secondo dovuto all'eccitazione del motore. Tutti gli altri elementi che formano il circuito di potenza non sono altro che elementi di protezione dello stesso. Infatti come si è già parlato precedentemente il compito dei gruppi RC (R3-C3 ; R4-C4) posti in parallelo agli SCR, è quello di limitare la derivata di tensione, cioè la velocità di variazione della tensione fra anodo e catodo ai capi dei due SCR, che se troppo elevata favorisce l'innescò anche in assenza di impulsi sui gates, non rendendo più controllabile tutto il sistema. I valori dei componenti del gruppo RC sono:  $R=150\text{ Ohm}$ ,  $C=470\text{nF}$ . Il compito dei diodi D6 e D7 del tipo 1N4005 posti in serie al secondario del trasformatore a impulsi, e al gate di ogni SCR, è quello di garantire l'arrivo sul gate della sola parte positiva degli impulsi d'innescò; da quanto si vede tali diodi hanno il catodo connesso al gate di ogni SCR. Sull'alimentazione in alternata, viene posto un fusibile che garantisce la protezione dalle eventuali sovracorrenti, che se sollecitassero troppo gli SCR li danneggerebbero irrimediabilmente.

### *CONCLUSIONI*

In tale schema di potenza complessivo non è stato previsto un sistema di protezione della corrente massima assorbita dal motore. Tuttavia sul ponte è stato inserito in serie alla linea di alimentazione un fusibile da 2,5 Ampere al fine di proteggere il motore dai sovraccarichi e dalle correnti di corto circuito.

---