

SOMMARIO

<i>Generalità sulle Macchine in Corrente Continua.....</i>	2
<i>Equazione della forza elettromotrice E.....</i>	2
<i>Circuito equivalente.....</i>	2
<i>Caratteristica di Eccitazione.....</i>	3
<i>Equazione della velocità.....</i>	3
<i>Equazione della Coppia resa all'albero motore:.....</i>	3
<i>Coppia di spunto:.....</i>	4
<i>Corrente di armatura :.....</i>	4
RENDIMENTO	4
<i>Regolazione di velocità.....</i>	5
<i>REGOLAZIONI EFFETTUABILI SU UN MOTORE C.C.</i>	6
<i>DINAMO TACHIMETRICA.....</i>	7
<i>Pregi della Dinamo Tachimetrica rispetto ad altri trasduttori di velocità.....</i>	8
<i>Difetti della Dinamo Tachimetrica rispetto ad altri trasduttori di velocità.....</i>	8

I Motori in Corrente Continua

prof. Cleto Azzani
IPSIA Moretto Brescia

Ottobre 1994

Generalità sulle Macchine in Corrente Continua

Una macchina in corrente continua è una macchina elettrica rotante reversibile che può essere usata per trasformare energia elettrica in energia meccanica (motore) o energia meccanica in energia elettrica (generatore: dinamo).

Da un *punto di vista meccanico* si distinguono due elementi : lo **Statore** ossia la parte fissa ed il **Rotore** o parte mobile.

Da un *punto di vista elettrico* in una macchina si parla di **Induttore** quando si vuole localizzare il circuito che produce il campo magnetico essenziale al funzionamento della macchina; si parla di **Indotto** quando si vuole localizzare il circuito che è sede (per la legge di Lenz) di f.e.m. indotta.

Il motore a corrente continua è una macchina elettrica rotante capace di trasformare energia elettrica (con cui viene alimentato) in energia meccanica; che si ritrova sull'albero motore stesso sotto forma di coppia (coppia motrice). Esso è costituito da :

- 1) Il circuito magnetico corredato degli avvolgimenti di eccitazione che costituisce l'Induttore rappresenta lo statore della macchina; parleremo quindi di tensione e corrente di eccitazione.*
- 2) Il circuito di armatura che costituisce l'Indotto e rappresenta il rotore della macchina; parleremo quindi di tensione e corrente di armatura.*
- 3) Il collettore e le spazzole che servono per connettere il circuito di armatura con la linea di alimentazione esterna.*

Equazione della forza elettromotrice E

$$E = K_e \cdot \Phi_e \cdot n \quad 3.1$$

Dalla Fisica :

Un conduttore di lunghezza l che si muove con velocità v su un piano perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico di induzione B è sede di f.e.m. indotta data dall'espressione :

$$e = B \cdot l \cdot v \quad 3.2$$

Si noti che l'espressione 3.2 è formalmente analoga alla 3.1 infatti :

Il flusso di eccitazione Φ_e è proporzionale all'induzione magnetica \mathbf{B} , n è proporzionale alla velocità \mathbf{v} . La costante K_e tiene conto delle varie costanti di proporzionalità: l lunghezza dei conduttori attivi, N numero di spire di cui è costituita ogni singola parte dell'indotto.

Il collettore a lamelle serve a rendere unidirezionale la f.e.m. alternata sinusoidale che si genera entro una spira in rotazione all'interno di un campo di direzione fissa.

Circuito equivalente

In figura 1 è riportato il circuito equivalente di una macchina in corrente continua ad eccitazione indipendente. In essa individuiamo due distinti circuiti: il circuito di Eccitazione e il circuito di Armatura. Il circuito di eccitazione è caratterizzato da resistenza R_e e induttanza L_e ; viene alimentato dalla tensione V_e ed in esso circola la intensità di corrente I_e ; il circuito di Armatura è caratterizzato da resistenza R_a , induttanza L_a e generatore di f.e.m. E ; alimentato dalla tensione V_a è percorso dalla intensità di corrente I_a .

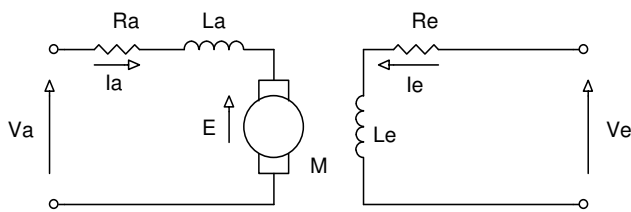


fig. 1 Circuito equivalente di una macchina in corrente continua

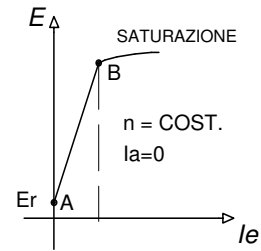


fig. 2 Caratteristica di eccitazione

Caratteristica di Eccitazione

In fig. 2 è riportata la caratteristica di eccitazione di una macchina in corrente continua. Essa esprime l'andamento della f.e.m. E data dall'espressione 3.1 al variare della corrente di eccitazione. Si noti innanzitutto che la caratteristica è ottenuta a velocità di rotazione dell'albero motore n costante, e con corrente di armatura I_a uguale a zero. La caratteristica presenta un tratto di funzionamento lineare A-B nel quale al crescere di I_e cresce proporzionalmente E . È presente un tratto che porta alla saturazione della macchina (saturazione del materiale magnetico con cui è costruito il circuito di eccitazione). Si noti che se $I_e=0$ si ha una fem residua E_r (fenomeno del magnetismo residuo).

Equazione della velocità

Dalla relazione 3.1 si ricava n :

$$n = \frac{E}{K_e \cdot \Phi_e} = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K_e \cdot \Phi_e} \quad 3.3$$

si vede chiaramente che la velocità di un motore c.c. dipende sia dalla tensione applicata (tensione di armatura) sia dal flusso di eccitazione.

Equazione della Coppia resa all'albero motore:

$$C_m = K_c \cdot \Phi_e \cdot I_a \quad 3.4$$

Dalla Fisica :

Un conduttore di lunghezza l percorso dall'intensità di corrente I immerso in una regione dello spazio ove si manifestano le azioni di un campo magnetico di induzione B è sottoposto all'azione di una forza F detta forza di Lorentz e data dall'espressione :

$$F = B \cdot l \cdot I \quad 3.5$$

Si noti che l'espressione 3.4 è formalmente analoga alla 3.5 infatti :

Il flusso di eccitazione Φ_e è proporzionale all'induzione magnetica B , C_m è proporzionale alla Forza F . La costante K_c tiene conto delle varie costanti di proporzionalità: l lunghezza dei conduttori attivi, N numero di spire di cui è costituita ogni singola parte dell'indotto, d diametro dell'indotto.

Coppia di spunto:

Si definisce *coppia di spunto* il valore massimo che può assumere la coppia motrice in condizioni di motore fermo ossia con il massimo valore di corrente di armatura. Essa assume valori pari a 1,5-2 volte il valore della coppia nominale, fornita dal costruttore, e dipende dalle capacità di sovraccarico momentaneo del motore preso in considerazione. Per contenerla bisogna limitare la corrente di armatura 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 di armatura :

scrivendo il secondo principio di Kirchoff al circuito di armatura di fig. 1 si ha :

$$E = V_a - R_a \cdot I_a \quad 3.6$$

da cui si ricava la corrente la :

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a} \quad 3.7$$

E rappresenta la forza *contro elettromotrice* che nasce nel circuito di armatura il suo valore è dato dalla espressione 3.1

$$E = K_e \cdot \Phi_e \cdot n \quad 3.8$$

si potrà dire che la corrente di armatura la varia all'interno del campo di valori:

$$0 < I_a < \frac{V_a}{R_a} \quad 3.9$$

La I_a di un motore ideale diventa zero quando la E (f.c.e.m) eguaglia la V_a ; questo, in realtà, non si può verificare per la presenza degli attriti meccanici che richiedono anche a vuoto la circolazione di una piccola corrente di armatura. Il valore :

$$I_a = \frac{V_a}{R_a} \quad 3.10$$

rappresenta la corrente di corto circuito, cioè il valore di corrente che si ha a motore fermo. Questo valore è superiore a quello della I_a nominale e anche 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 dal rotore e la potenza elettrica assorbita dalla linea di alimentazione:

$$\eta_e = \frac{E \cdot I_a}{E \cdot I_a + R_a \cdot I_a^2} = \frac{E \cdot I_a}{V_a \cdot I_a} \quad 3.11$$

da cui:

$$\eta_e = \frac{E}{V_a} \quad 3.12$$

Il rendimento 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 3.

$$0 < \eta_e < 1 \quad 3.13$$

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

Potenza resa all'albero motore :

Va osservato che non tutta la potenza

$$P = E \cdot I_a \quad 3.14$$

riportata a numeratore della formula 3.11 la ritroviamo disponibile sotto forma di potenza meccanica all'albero motore; infatti una parte di essa serve per vincere la coppia resistente dovuta agli attriti meccanici (che sono proporzionali al numero 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.

Regolazione di velocità

Il nostro studio sulla regolazione della velocità parte dalla formula:

$$n = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K_e \cdot L_e \cdot I_e} \equiv \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{I_e} \quad \text{se} \quad R_a \cdot I_a \ll V_a \quad 3.22$$

$$n \equiv \frac{V_a}{I_e} \quad 3.23$$

Analizzando la relazione fondamentale 3.1 della macchina in corrente continua

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi_e \quad 3.24$$

si vede che la f.c.e.m. del motore è proporzionale alla sua velocità n , e al flusso d'eccitazione Φ_e . 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:

$$V_a \cong E = K_e \cdot n \cdot \Phi_e \quad 3.25$$

da cui ricavando n si ha :

$$n = \frac{V_a}{K_e \cdot \Phi_e} \quad 3.26$$

Il numero di giri n , a flusso di eccitazione costante Φ_e , risulta essere direttamente proporzionale alla tensione di armatura V_a ; il numero di giri n , a tensione d'armatura costante, risulta inversamente proporzionale al flusso di eccitazione Φ_e .

$$n \cong \frac{V_a}{K_\Phi} \quad \text{a } \Phi_e \text{ cost} \quad 3.27$$

$$n \cong \frac{K_V}{\Phi_e} \quad \text{a } V_a \text{ cost.}$$

3.28

L'equazione 3.27 riportata in fig. 5 non è altro che l'equazione di una retta. Ciò significa che a medesimi incrementi di tensione d'armatura ΔV_A per bassi e per alti valori di V_a , le variazioni della velocità del motore conseguenti, saranno esattamente uguali.

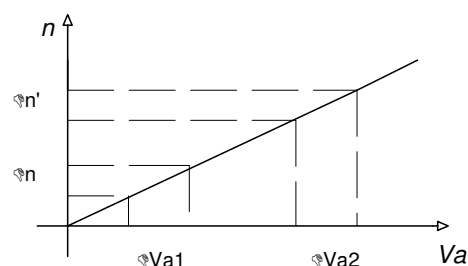


fig. 5 andamento di n in funzione di V_a

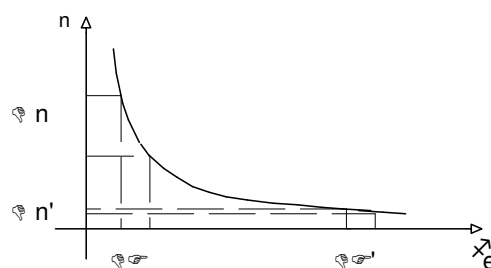


fig. 6 andamento di n in funzione del flusso

L'equazione 3.28 riportata in fig. 6, rappresenta una legge di tipo iperbolico. Si osservi infatti che un incremento $\Delta\Phi$ del flusso di eccitazione effettuato attorno ad un valore del flusso piccolo provoca una notevole variazione del numero dei giri; mentre un egual incremento del flusso effettuato attorno ad un valore di flusso elevato provoca una ridotta variazione del numero dei giri.

REGOLAZIONI EFFETTUABILI SU UN MOTORE C.C.

Le principali regolazioni che possono essere effettuate sulle grandezze elettriche o meccaniche di un motore in corrente continua sono :

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

Le considerazioni che seguono riguarderanno unicamente la regolazione di velocità, a cui andrebbe interconnessa parallelamente quella di corrente per i motivi visti in precedenza (forti correnti di avviamento).

La regolazione di velocità è forse fra tutte quella più importante in quanto largamente impiegata negli impianti industriali.

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

- a " *Coppia costante* " (regolando la tensione d'armatura V_a) oppure
- a " *Potenza costante* " (regolando la corrente di eccitazione).

Nei grafici riportati nelle fig. 3 e 4 è riportato l'andamento della coppia e della potenza in funzione dei numero dei giri.

Si osservi che, mantenendo nel tratto 0-N1 (coppia costante) la $I_e = I_{en}$ e variando la V_a di armatura si vede che la coppia rimane costante fino al numero di giri N_1 del motore fissati dal costruttore per questa regolazione, mentre la potenza cresce linearmente fino al valore della potenza nominale P_n . Nel tratto $N_1 - N_2$ (tratto a potenza costante pari a P_n) $V_a = V_{an} = \text{cost.}$ e l'aumento del numero di giri viene ottenuto riducendo il flusso di eccitazione (deflussaggio); la coppia decresce in questo tratto con legge iperbolica.

Esiste però una zona proibita alla regolazione (il tratto 0-N0 di fig. 4), definita dal seguente rapporto:

$$\frac{N_1}{N_0} \leq 20 \div 30 \quad \text{Nel tratto 0-N0} \quad 3.15$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 3 \div 4 \quad 3.16$$

A velocità nulla il motore è chiamato a fornire coppia massima e il rotore è percorso da una corrente molto alta che provoca problemi di dissipazione termica con conseguente necessità di ventilazione forzata per facilitare lo smaltimento dell'eccessivo calore che si sviluppa nel circuito di armatura. Ecco perché N_0 nella maggior parte dei casi non corrisponde a velocità nulla.

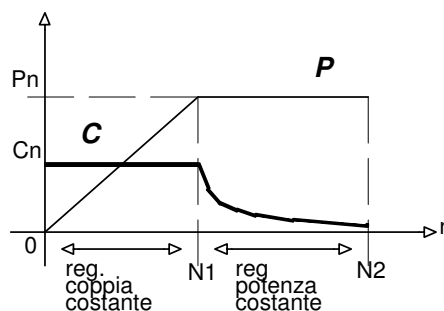


fig. 3 Curve C(n) e P(n)

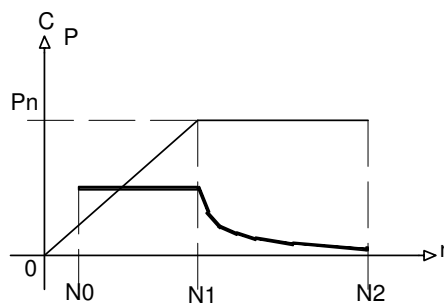


fig. 4 Tratto 0-No

Nel controllo del motore c.c. la variazione del n. di giri passando da vuoto a pieno carico, viene espressa in forma percentuale: di solito oscilla fra lo 0,1% e il 3%. Tale valore è minore se si effettua un controllo di velocità con dinamo tachimetrica; mentre i valori più elevati di errore si ottengono quando si utilizza come segnale di retroazione la tensione di armatura V_a , che solo in prima approssimazione è proporzionale al numero di giri n (si commette infatti un errore poiché non si tiene conto della caduta di tensione dovuta alla resistenza d'armatura); la scelta del tipo di retroazione dipende solo dal livello di precisione che si vuole ottenere dal controllo ad anello chiuso.

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 compreso tra il 50-100% per un tempo massimo di circa 120 sec.. 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:

In un motore in corrente continua, il verso di rotazione dell'albero motore (orario o anti-orario), dipende sia dal verso della corrente di armatura, sia da quella della corrente di eccitazione; pertanto per invertirlo basta scambiare il verso della I_a o della I_e .

Le relazioni fondamentali sulla macchina in corrente continua possono così essere riassunte:

$$E = K_e \cdot n \cdot \Phi_e = K_e \cdot n \cdot L_e I_e = K'_e \cdot n \cdot I_e \quad 3.17$$

avendo posto:

$$K'_e = K_e \cdot L_e \quad 3.18$$

$$C_m = K_c \cdot \Phi_e \cdot I_a \equiv I_a$$

$$3.19$$

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

$$3.20$$

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

$$3.21$$

DINAMO TACHIMETRICA

La dinamo tachimetrica viene calettata sull'albero motore della macchina in corrente continua 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:

$$e_0 = K_d \cdot n \quad K_d = K_e \cdot \Phi_e \quad 3.29$$

dove K_d indica la costante tachimetrica (valori usuali attorno decine di mV/giro al min.). È evidente che per avere una buona linearità 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 elettro motrice) 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.. E' possibile ottenere, 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. .

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.

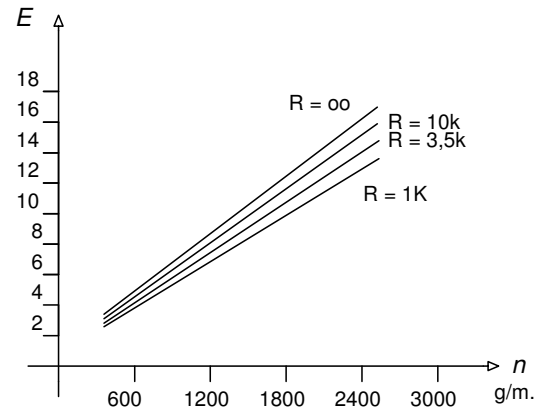


fig. 7 andamento di E(n) per vari valori di R

Dal punto di vista meccanico la Dinamo Tachimetrica deve 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.

Pregi della Dinamo Tachimetrica rispetto ad altri trasduttori di velocità

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 $10 \div 100 mV/g$

Difetti della Dinamo Tachimetrica rispetto ad altri trasduttori di velocità

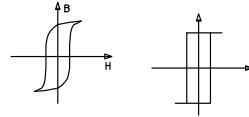
A) la tensione d' uscita è alterata da una ondulazione la cui frequenza dipende dalla velocità di rotazione (e non può quindi essere agevolmente eliminata con un filtro).

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.

In fig. 7 è riportato l'andamento della tensione prelevabile in uscita ad una dinamo tachimetrica al variare del numero di giri n per diversi valori del carico.

CONCLUDERE !!!!

mancano considerazioni su:
 modalità di eccitazione : serie parallelo
 schema a blocchi del motore in c.c.
 compensazione, saturazione etc.
 sistema Word Leonard
 Costanti di tempo meccanica ed elettrica



CIRCUITO DI CAMPO CIRCUITO DI ARMATURA

