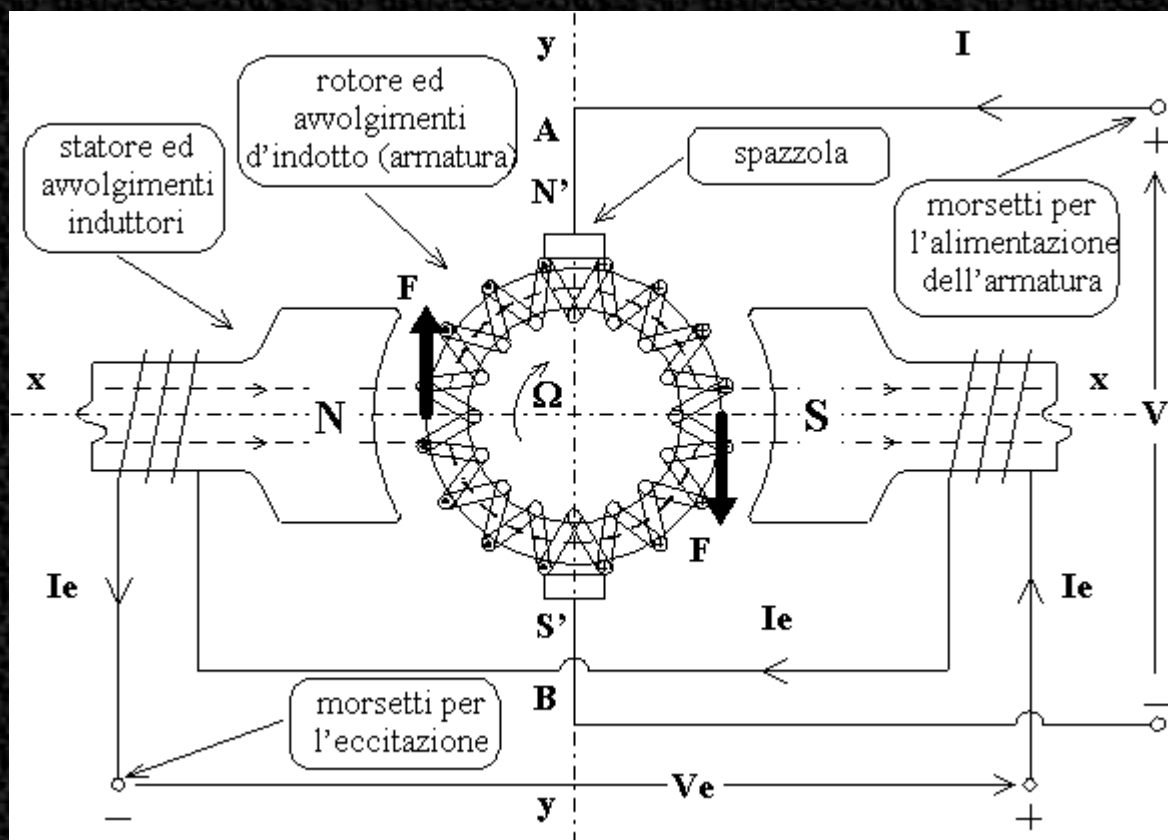


# Motori a corrente continua

## Generalità e principio di funzionamento

Bornicchia Andrea

La stessa macchina, con corrente d'eccitazione e polarità delle spazzole identiche, ruota nello stesso senso sia come motore che come generatore, solo che quando funziona come motore cambia il senso della corrente nell'indotto e nelle vie interne così che la f.e.m.  $E$  è da intendersi come *forza controelettromotrice* (f.c.e.m.), e la coppia elettromagnetica generata  $C$  (dovuta all'interazione tra il campo magnetico induttore e la corrente nelle vie interne, che origina le due forze  $F$  tangenti al cilindro d'indotto) è da intendersi come *coppia motrice* essendo concorde col verso di rotazione.



Mentre per i generatori autoeccitati si ha un verso obbligato di rotazione dovuto alla necessità di sfruttare il magnetismo residuo, nei motori autoeccitati ciò non è più vero in quanto il flusso d'eccitazione è originato dalla corrente derivata dalla linea di alimentazione stessa che si trova, sempre, alla tensione  $V$ .

La reazione d'indotto si presenta nei motori in forma del tutto analoga a quanto visto per i generatori, solo che l'asse neutro si trova ad essere spostato in anticipo rispetto all'interasse polare. Anche la commutazione si presenta con le stesse proprietà già viste per i generatori. I rimedi tesi a ridurre i problemi dovuti alla reazione d'indotto (avvolgimenti compensatori) ed a facilitare la commutazione (poli ausiliari) già discussi per i generatori rimangono validi anche per i motori, tanto è vero che per una macchina, predisposta per funzionare come generatore, nel caso si intenda impiegarla come motore non è necessario alcun ritocco nei collegamenti degli avvolgimenti compensatori e nei collegamenti degli avvolgimenti dei poli ausiliari. E' facile verificare che la

corrente negli avvolgimenti compensatori è senz'altro opposta a quella nella via interna sottostante il polo interessato, mentre l'eccitazione del polo ausiliario è tale per cui esso assume la stessa polarità del polo induttore dal quale la spira commutante proviene, così come deve essere per i motori.

### Principio di funzionamento

Quando il motore viene alimentato con tensione  $V$  i conduttori dell'avvolgimento indotto sono percorsi da corrente ma sono anche immersi nel campo magnetico induttore; allora, per reazione fra campo magnetico e corrente, su ciascuno di essi nasce una forza elettromagnetica  $F = B \cdot l \cdot I$

La risultante di tutte le forze di destra e la risultante di tutte quelle di sinistra forma una coppia motrice  $C = Fr \cdot b$  (ove  $b$  è il braccio ed è la minima distanza tra le direzioni delle due forze) che mette in rotazione il rotore.

Una volta in rotazione, i conduttori tagliano le linee di forza del campo e diventano sede di f.e.m. indotte che in totale danno come risultato una f.e.m.  $E$  che per legge di Lenz si oppone alla causa che l'ha generata, cioè alla tensione  $V$  di alimentazione per cui viene chiamata forza controelettromotrice (f.c.e.m.)

$$E = K \cdot n \cdot \Phi \quad [v] \quad \text{con} \quad K = \frac{2 \cdot p}{2 \cdot a} \cdot \frac{N}{60}$$

Durante la rotazione poiché si genera una f.c.e.m., è chiaro che per far passare nell'indotto stesso la corrente  $I$ , necessaria a mantenerlo in rotazione, si dovrà applicare alle spazzole una tensione  $V$  tale da vincere la f.c.e.m.  $E$  ed, inoltre, compensare la caduta ohmica  $Ri \cdot I$  dovuta alla resistenza propria dell'indotto  $Ri$  (comprensiva dell'eventuale resistenza dei vari avvolgimenti posti in serie all'indotto).

La tensione  $V$  da applicare alle spazzole di un motore a corrente continua resta perciò determinata dalla relazione fondamentale:  $V = E + Ri \cdot I$

Da questa relazione si ricava che la corrente assorbita dall'indotto di un motore è data da:

$$I = \frac{V - E}{Ri} = \frac{V - K \cdot n \cdot \Phi}{Ri} \quad [A]$$

Ne segue che se la tensione  $V$  applicata alle spazzole viene mantenuta costante, essendo costante anche la resistenza di indotto  $Ri$ , la corrente assorbita dall'indotto può variare solo se varia la f.c.e.m.  $E$ ; e, precisamente, la corrente aumenterà se la f.c.e.m. diminuisce, viceversa la corrente verrà a diminuire se la f.c.e.m. aumenta.

Il motore, come nella dinamo, ha diversi tipi di eccitazione.

Il motore ad eccitazione indipendente, se si alimenta con le stesse polarità della dinamo, ruota nello stesso senso della dinamo. Per fargli cambiare verso di rotazione, bisogna invertire la polarità dell'armatura o la polarità dell'eccitazione.



Il motore ad eccitazione derivata, comunque lo si alimenti, ruota sempre nello stesso senso della dinamo. Per fargli cambiare verso di rotazione, bisogna invertire il verso della corrente di eccitazione o d'indotto e questo è possibile solo scambiando il morsetto d'inizio con quello di fine di uno solo dei due avvolgimenti.

Il motore ad eccitazione serie, comunque lo si alimenti, ruota sempre in senso contrario a quello che assume funzionando da dinamo. Per fargli cambiare verso di rotazione si deve operare come per il motore con eccitazione derivata.

Il motore ad eccitazione composta, dato che viene costruito in modo tale che l'eccitazione derivata prevalga su quella serie, si comporta come il motore con eccitazione derivata.

### Avviamento dei motori a corrente continua

All'atto dell'avviamento è chiaro che quando l'indotto di un motore è fermo la f.c.e.m. è nulla qualunque sia il tipo di eccitazione. In questo istante essendo nulla la f.c.e.m.  $E$ , l'indotto si comporta come una semplice resistenza e quindi assorbe una corrente, denominata *corrente di avviamento o di spunto*  $I_a$ , la quale risulta del valore:

$$I_a = \frac{V}{R_i} \quad \text{perché :}$$

$$I = \frac{V - E}{R_i} \quad \text{siccome} \quad E = K \cdot n \cdot \Phi$$

e all'avviamento  $n=0$  e  $\Phi=0$ , si avrà  $E=0$

Considerando che la resistenza di indotto  $R_i$  è sempre molto piccola, applicando all'indotto ancora fermo l'intera tensione nominale, la corrente di avviamento  $I_a$  assume in genere una intensità così elevata da riuscire pericolosa per la conservazione del motore.

È necessario, allora, provvedere a limitare la corrente di spunto a valori compatibili e questo avviene in due modi:

- a) Avviamento a tensione ridotta
- b) Avviamento a tensione nominale

### Avviamento a tensione ridotta

Con questo modo si vuole limitare la corrente di spunto agendo sulla tensione  $V$  e allora occorrerà disporre di una sorgente di alimentazione regolabile (che può essere ottenuta con convertitori statici, i quali serviranno anche per la regolazione della velocità).

Così, all'atto dell'avviamento, la tensione applicata sarà molto piccola, appena sufficiente a vincere la caduta ohmica sulla resistenza  $R_i$  con la corrente prevista per l'avviamento. All'aumentare dei giri del motore, e quindi della f.c.e.m., la tensione viene via via fatta crescere fino al suo valore nominale.

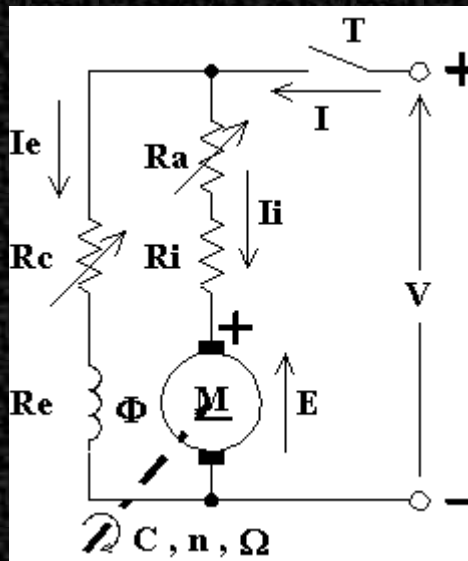
### Avviamento a tensione nominale

Questo tipo di avviamento viene attuato ponendo in serie all'indotto un'opportuna resistenza  $R_a$  tramite il cosiddetto *reostato d'avviamento*.

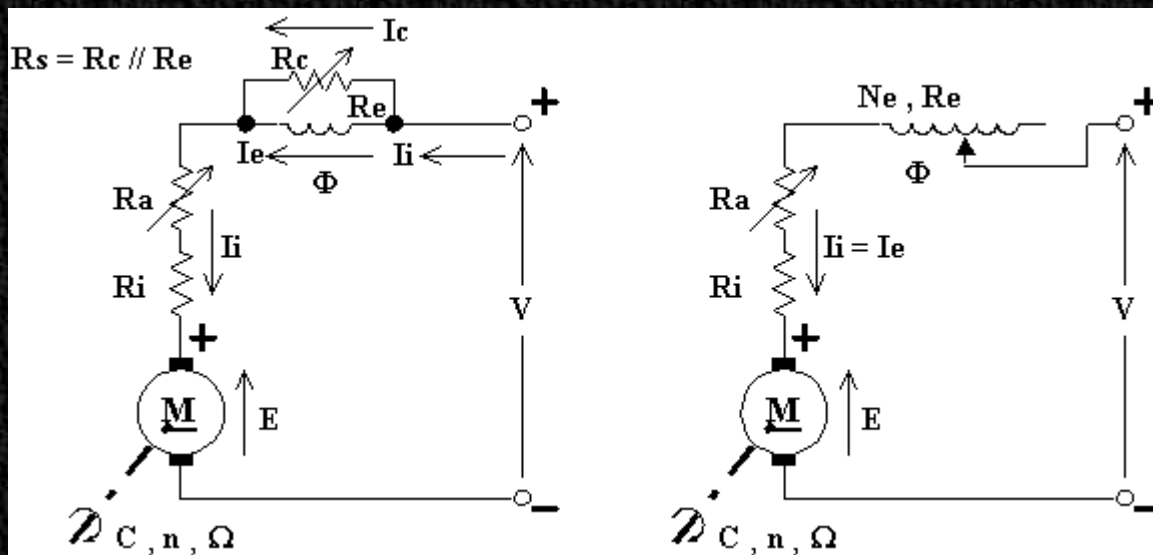
$$\text{Infatti: } I_a = \frac{V}{R_i + R_a} \text{ [A]}$$

La  $R_a$  può essere dimensionata in modo tale che la corrente d'avviamento non superi quella nominale di targa (allora si fa un avviamento a corrente nominale e a coppia nominale perché  $C = K' \cdot \Phi \cdot I$ )

Il reostato di avviamento viene inserito nei motori in modo diverso secondo il tipo di eccitazione: derivata, separata o in serie.



Motore ad eccitazione in derivata



Motore ad eccitazione in serie

In particolare per i motori ad *eccitazione derivata* (figura 1), il reostato di campo  $R_c$  deve essere inserito a monte del punto di derivazione del reostato di avviamento  $R_a$ ; ciò al fine di evitare che all'atto dell'avviamento venga ridotta la tensione ai capi del circuito di eccitazione, col risultato di rendere l'avviamento impossibile per insufficienza di flusso e quindi anche di coppia.

Nel caso invece dell'*eccitazione in serie* (figura 2), il reostato di avviamento può essere inserito indifferentemente a monte o a valle del motore purché in serie sul circuito di indotto.

Supponendo di impiegare un reostato a gradini; inizialmente, prima di chiudere l'interruttore  $T$ , bisogna che il reostato sia tutto inserito e di valore tale che la corrente circolante nel reostato e nell'indotto, in serie fra loro, risulti dello stesso ordine di grandezza della corrente normale  $I_n$  del motore.

Non appena il motore si avvia, si genera nell'indotto la f.c.e.m.  $E$  la quale, opponendosi alla corrente, la fa diminuire: man mano che il motore accelera si deve quindi escludere per gradi il reostato di avviamento fino a raggiungere l'esclusione completa ad avviamento ultimato.

Il primo metodo è generalmente impiegato nelle attuali applicazioni dei motori a corrente continua perché non fa uso dei reostati di avviamento.

Il secondo metodo, invece, si applica per i motori industriali e per la trazione elettrica, di non recente installazione.

## Regolazione della velocità dei motori a corrente continua

Il problema della regolazione di velocità ha trovato in passato soluzioni diverse a seconda delle potenze in gioco: per le piccole potenze sono state adottate talvolta delle regolazioni reostatiche, che diventano ovviamente inaccettabili per potenze maggiori a causa delle eccessive dissipazioni di energia; per le applicazioni a grandi potenze sono stati invece impiegati i classici gruppi rotanti costituiti da un motore a corrente alternata alimentato da una dinamo ad eccitazione dipendente (come nei gruppi Ward-Leonard).

Più modernamente, invece, il problema della generazione di una tensione continua di ampiezza variabile, necessaria per la variazione di velocità, è stato risolto, per potenze anche ingentissime, grazie ai progressi conseguiti nella tecnica di costruzione e di impiego dei diodi, dei tiristori e transistori di potenza, che costituiscono gli elementi base per la realizzazione dei convertitori statici da corrente alternata, monofase o trifase, alla continua (e viceversa).



## Equazioni del motore a corrente continua a eccitazione separata

In base alla teoria dei motori a corrente continua, la velocità di rotazione di un motore a corrente continua è espressa, dalla relazione che qui si riporta in forma semplificata:

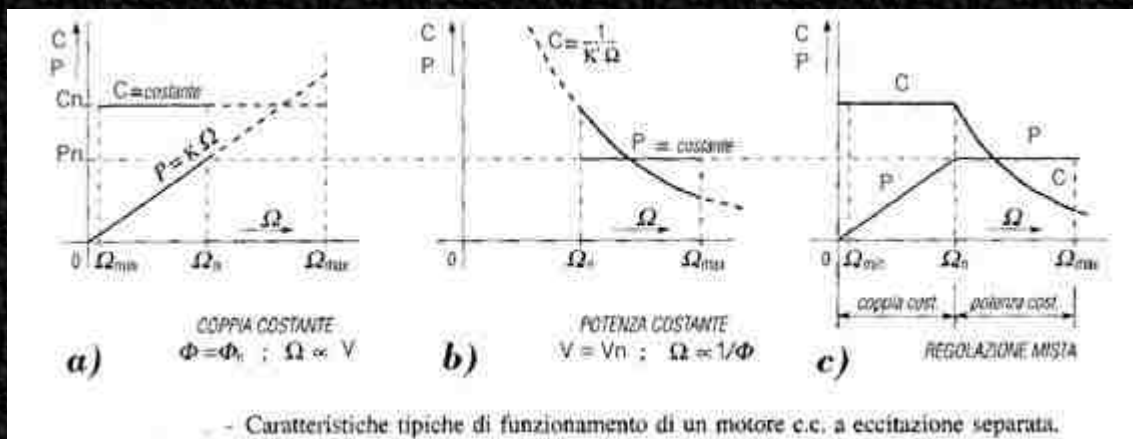
$$n = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{V - R_i \cdot I}{K \cdot \Phi} \approx \frac{V}{K \cdot \Phi}$$

Questa espressione dimostra che, a parte le cadute ohmiche di indotto  $R_i \cdot I$  (che sono in effetti trascurabili rispetto a  $V$ ), la velocità di rotazione del motore è direttamente proporzionale alla tensione di alimentatore indotto, e inversamente proporzionale invece al flusso per polo  $\Phi$  che è a sua volta una funzione crescente della corrente di eccitazione  $I_e$ .

Nella maggior parte dei casi si attua un tipo di funzionamento per il quale la variazione della velocità viene effettuata modificando unicamente la tensione di alimentazione  $V$ , mantenendo invariata invece la corrente di eccitazione  $I_e$ , e quindi il flusso  $\Phi$ : ciò al fine preciso di poter utilizzare a tutte le velocità la coppia motrice nominale del motore, ottenibile imprimendo nel circuito di armatura la corrente nominale  $I_n$ ; tale coppia è espressa dalla seguente relazione:

$$C_n = K \cdot I_n \cdot \Phi = \text{costante}$$

Si può quindi affermare che, volendo attuare un funzionamento a coppia “disponibile” costante, si deve agire unicamente sulla variazione della tensione di alimentazione di indotto, mantenendo invece costante l’eccitazione.



Nell’azionamento a coppia costante la potenza “disponibile”, espressa in funzione delle grandezze meccaniche ed elettriche, cresce invece linearmente con la velocità di rotazione e con la tensione  $V$  d’armatura, in base alla relazione:

$$P = \omega \cdot C = V \cdot I_n$$

fino al raggiungimento del valore nominale  $P_n$  corrispondente alla tensione nominale  $V_n$ .

Quando la variazione di velocità viene ottenuta mantenendo costante la tensione di armatura al valore  $V = V_n$  e variando invece il flusso di eccitazione, si realizza la regolazione a potenza

“disponibile” costante. La relazione mostra infatti che, diminuendo il flusso nominale, la velocità aumenta, mentre la coppia  $C = V_n \cdot I_n / \omega$  varia in proporzione inversa alla velocità stessa; la potenza disponibile rimane pertanto costante a tutte le velocità ed è pari a quella nominale (naturalmente il carico può richiedere anche una potenza minore, sicché il motore assorbirà una corrente inferiore alla nominale).

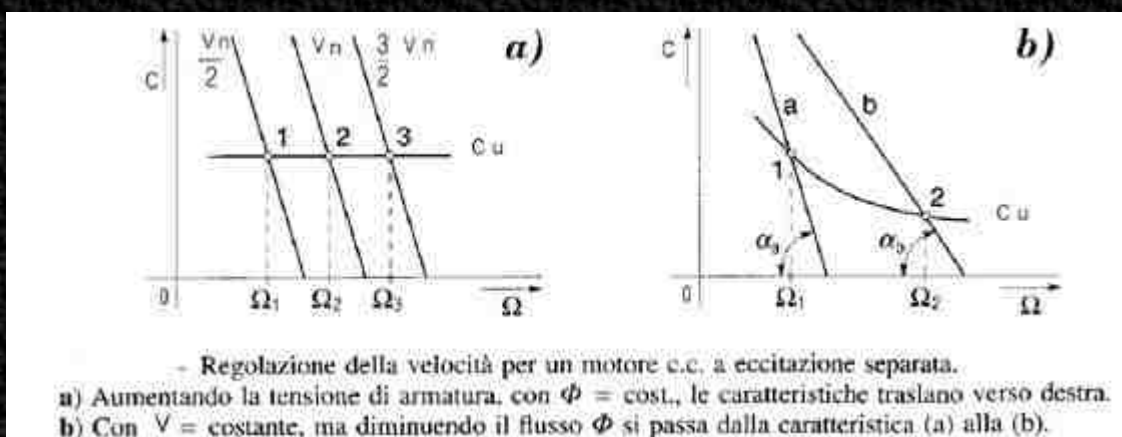
In molte applicazioni si avvia la macchina col massimo flusso di eccitazione e tensione gradualmente crescente fino al valore nominale: la coppia disponibile risulta allora costante, mentre la potenza cresce linearmente con la velocità; raggiunta la velocità nominale, la tensione di armatura non viene più modificata, ma si diminuisce il flusso di eccitazione; in tal modo la velocità aumenta e il motore lavora a potenza disponibile costante, potendo fornire una coppia che diminuisce all’aumentare della velocità ( il carico all’albero deve anch’esso diminuire conseguentemente). Si ottiene così la regolazione mista, illustrata.

Sempre nel caso del motore a eccitazione separata, che presenta il maggior numero di applicazioni nel campo dei controlli automatici, la coppia può esprimersi con la relazione qui riscritta nella forma:

$$C = \frac{K \cdot \Phi}{R_i} \cdot V - \frac{K^2 \cdot \Phi^2}{R_i} \cdot \omega$$

Esaminando quest’espressione si può concludere che esistono le seguenti possibilità di variazione della velocità del motore:

1) (**regolazione d’armatura**) mantenendo costante il flusso  $\Phi$  di eccitazione e aumentando la tensione d’armatura  $V$  si ha una traslazione verso destra della caratteristica meccanica coppia-velocità: in tal modo, nel funzionamento a coppia utile  $C_u$  costante, la velocità si sposta sui valori  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  corrispondenti ai punti 1, 2, 3;

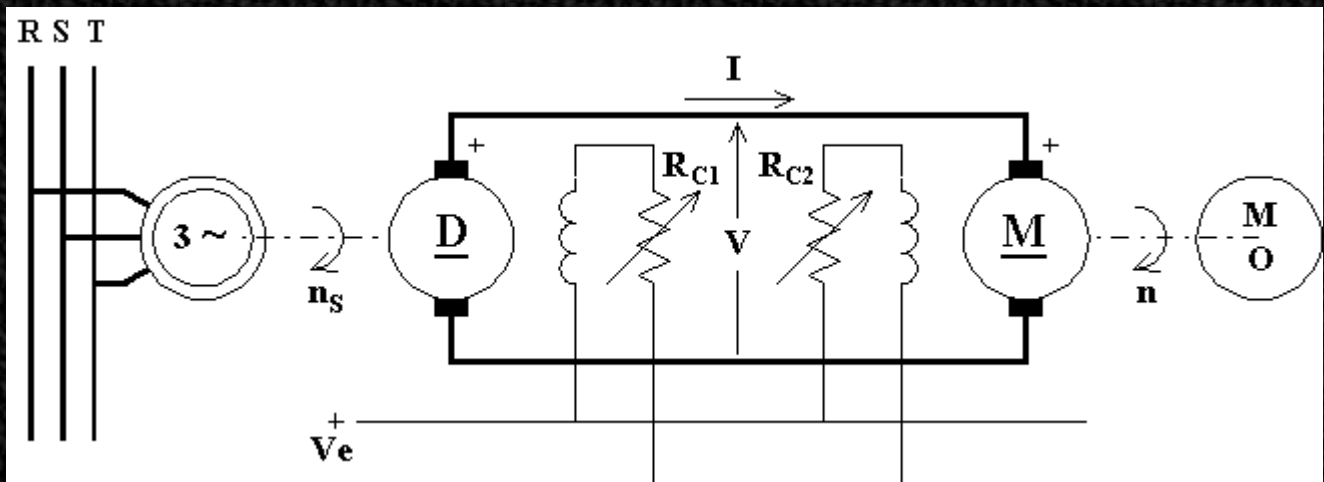


2) (**regolazione di campo**) mantenendo costante la tensione di alimentazione  $V$  e diminuendo il flusso di eccitazione  $\Phi$  si passa dalla curva (a) alla curva (b), con variazione della pendenza  $\alpha$ , e conseguentemente alla velocità da  $\omega_1, \omega_2$  data la caratteristica di carico  $C_u$ .

### Gruppi Ward-Leonard



Permettono di ottenere un maggior campo di variabilità della velocità e di rendere più agevoli sia le operazioni di avviamento che di frenatura dei motori.



In questo caso si ha la possibilità di regolare il motore (ad eccitazione indipendente) sia attraverso la variazione del reostato di campo  $R_{C2}$  che della tensione  $V$  applicata all'armatura.

La macchina asincrona funziona normalmente da motore e trascina la macchina in corrente continua ad essa coassiale, funzionante da generatore, ad una velocità  $n_s$  praticamente costante al variare del carico (considerando i valori contenuti dello scorrimento).

Il motore viene fatto partire con una tensione sufficientemente bassa intervenendo sul reostato di campo  $R_{C1}$ , in tal modo non è necessario il reostato d'avviamento del motore e le perdite in fase di avviamento sono ridotte. Per bassi valori di velocità si fa funzionare il motore con corrente assorbita costante e reostato  $R_{C2}$  del tutto disinserito, quindi si ha il flusso nel motore praticamente costante (trascurando i fenomeni di saturazione). La velocità viene variata agendo su  $R_{C1}$  e, quindi, sulla tensione  $V$ . In tal modo la coppia del motore è costante (nei limiti in cui sono costanti la corrente assorbita ed il flusso), e la potenza resa dal motore è proporzionale alla velocità  $n$  ed, a meno della c.d.t. sulla resistenza interna del motore, alla tensione  $V$ . Raggiunta la velocità corrispondente alla tensione massima possibile, si mantiene costante tale tensione massima e si agisce su  $R_{C2}$  per aumentare la velocità del motore; infatti un aumento del reostato comporta una diminuzione della corrente d'eccitazione e del flusso e quindi un aumento della velocità.

Per invertire il senso di marcia del motore si inverte la polarità dell'eccitazione della dinamo, infatti così facendo viene invertita la polarità della tensione applicata all'armatura del motore.

E' possibile la frenatura a recupero, basta ridurre bruscamente la corrente d'eccitazione della dinamo, in modo che la sua f.e.m. risulti inferiore alla f.e.m. del motore che, ora, funzionerà da generatore erogando una potenza elettrica pari alla propria energia cinetica specifica ed alla potenza meccanica ricevuta dalla macchina operatrice  $MO$ . La macchina in corrente continua coassiale con la macchina asincrona funzionerà da motore erogando all'albero la potenza ricevuta sotto forma elettrica e la macchina asincrona funzionerà da generatore riversando in rete l'equivalente potenza elettrica.

### Fuga del motore a corrente continua



Nei motori ad eccitazione indipendente o derivata, se viene a mancare, durante il normale funzionamento, la corrente d'eccitazione accade che il flusso si riduce al piccolo valore residuo  $\Phi_r$ .

Come conseguenza si ha:

a) la riduzione della f.e.m. al piccolo valore  $E_r = K \cdot \Phi_r \cdot n$  con il conseguente grande aumento della corrente d'indotto al valore:

$$I_F = \frac{V - E_r}{R_i} \cong \frac{V}{R_i}$$

Sicuramente la corrente è tale da distruggere il collettore a lamelle nel caso in cui non intervenga una protezione di massima corrente.

b) la coppia del motore diventa  $C_F = K' \cdot \Phi_r \cdot I_F$  e può accadere che, nonostante il piccolo valore del flusso, a causa dell'elevatissima corrente tale coppia superi la coppia resistente applicata all'albero determinando un'accelerazione e, quindi, un aumento incontrollabile della velocità del motore (il motore è andato in fuga). Tale meccanismo, una volta innestato, può portare alla distruzione meccanica del motore.

Lo stesso inconveniente può presentarsi anche nel motore con eccitazione composta, tuttavia la presenza dell'eccitazione in serie garantisce la permanenza di un flusso che limita gli inconvenienti dovuti alla cessata eccitazione derivata. Nel caso di motori con eccitazione serie l'inconveniente non può presentarsi perché la mancanza della corrente d'eccitazione significa la contemporanea mancanza della tensione d'armatura (rimane per tali motori il pericolo derivante dal funzionamento a vuoto).