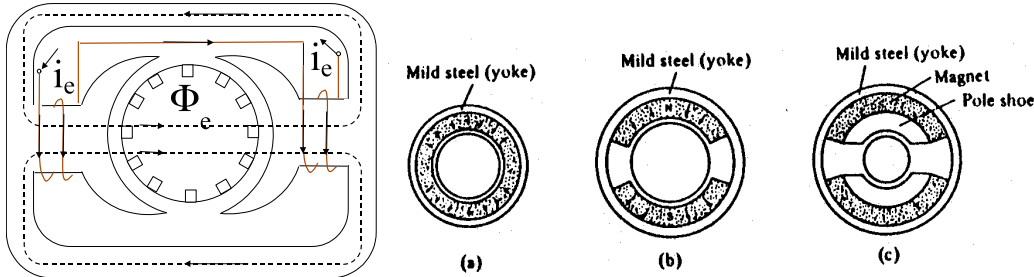


## MACCHINA A CORRENTE CONTINUA (AD ECCITAZIONE INDIPENDENTE)

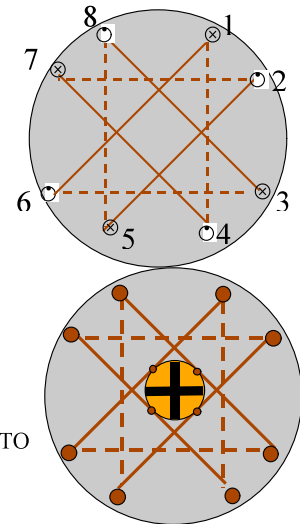
### STRUTTURA.

**STATORE.** E' costituito da un anello ferromagnetico con delle espansioni polari interne, sagomate in modo da lasciare un traferro costante rispetto al rotore. Intorno a tali espansioni è posto l'avvolgimento di eccitazione, alimentato in cc, che genera il campo di eccitazione. In piccoli motori, il campo di eccitazione può essere generato da magneti permanenti.

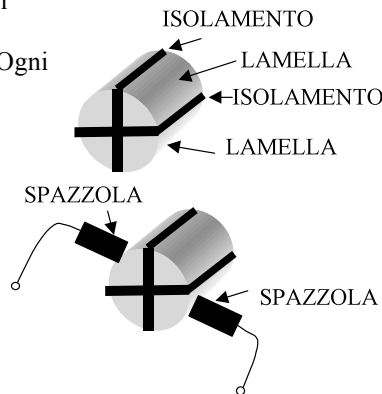


**ROTORE.** E' un cilindro pieno, dentato per alloggiare i conduttori dell'avvolgimento di indotto.

**AVVOLGIMENTO DI INDOTTO.** Si può realizzare in diversi modi. La tipologia più semplice si ottiene collegando ciascun conduttore con quello precedente al conduttore diametralmente opposto (il numero U dei conduttori deve essere multiplo di 4). Completando tutti i collegamenti, l'avvolgimento risulta chiuso in corto circuito.



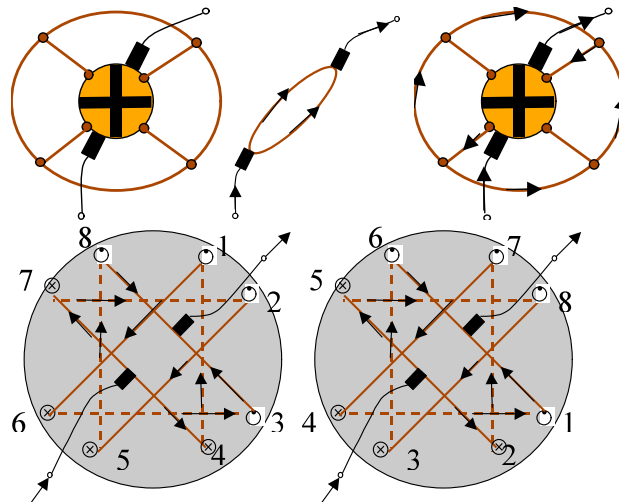
**COLLETTORE A LAMELLE.** E' un cilindro di rame, formato da tanti spicchi quante sono le matasse dell'avvolgimento (cioè  $U/2$ ); i vari spicchi sono isolati l'uno dall'altro e si chiamano lamelle. Il collettore è coassiale col rotore e solidale con esso (quindi ruota). Ogni lamella è collegata alla matassa che le è tangente.



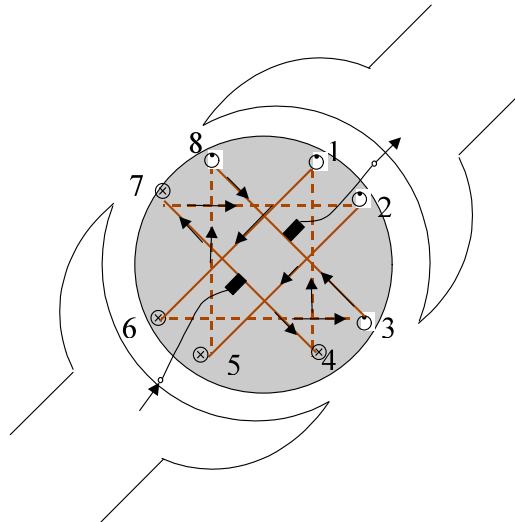
**SPAZZOLE.** Sono due parallelepipedi di grafite, premuti contro il collettore da un sistema di molle.

In ogni istante, ogni spazzola tocca una lamella, e siccome ogni lamella è collegata in 1 punto all'avvolgimento di indotto, in ogni istante tale avvolgimento presenta alle spazzole 2 vie in parallelo (per verificarlo, provare a seguire il percorso della corrente)

Le spazzole sono fisse (solidali con lo statore) => al ruotare del rotore cambia il percorso della corrente nell'avvolgimento di indotto, ma NON cambia il verso della corrente rispetto allo statore.



Ora, se le spazzole sono messe in modo tale da essere a metà dei poli, si vede che i conduttori sotto un polo presentano sempre la stessa corrente => la coppia che il campo ed i conduttori si scambiano ha sempre lo stesso verso (motrice se la macchina funziona da motore, frenante se funziona da generatore).



### PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

L'avvolgimento di eccitazione è alimentato => si genera il campo di eccitazione.

**GENERATORE.** Mettendo in rotazione il rotore a velocità  $\Omega$ , i conduttori sono in moto all'interno del campo di eccitazione => il flusso con essi concatenato varia nel tempo => per la legge dell'induzione, in essi è indotta una fem  $E$  (il cui verso è stabilito dalla regola vettoriale  $\vec{e} = \vec{v} \times \vec{B}$ ) che produce una tensione  $V$  ai morsetti dell'indotto. Se l'indotto è chiuso su un carico elettrico (una resistenza  $R$ ), la tensione  $V$  fa circolare una corrente  $I_i$ . Tale corrente è sostenuta dalla tensione  $V$ , e quindi è ad essa equiversa, come è giusto che sia, dato che la macchina sta funzionando da generatore elettrico ( $i$  concorde con  $e$ ).

Il campo di eccitazione esercita sui conduttori percorsi dalla corrente  $I_i$  una forza  $\vec{F}$  (il cui verso è stabilito dalla regola vettoriale  $\vec{F} = I_i \vec{l} \times \vec{B}$ ). La forza si scarica sul rotore => sul rotore agisce una coppia elettromagnetica  $C_e$ , che risulta essere frenante: ciò è giusto, perché il campo si sta opponendo alla coppia meccanica esercitata sul rotore.

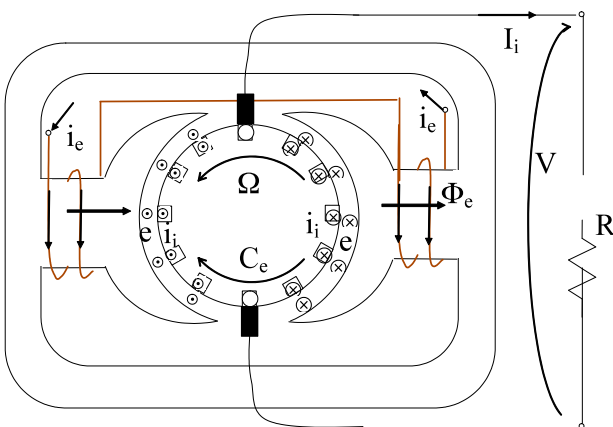
Dal punto di vista energetico, la potenza meccanica entrante si trasforma in potenza elettrica uscente.

**MOTORE.** Alimentando l'indotto con una tensione  $V$ , inizia a circolare una corrente  $I_i$ . Il campo di eccitazione esercita sui conduttori percorsi da tale corrente una forza  $\vec{F}$  (il cui verso è stabilito dalla regola vettoriale  $\vec{F} = I_i \vec{l} \times \vec{B}$ ). La forza si scarica sul rotore => sul rotore agisce una coppia elettromagnetica  $C_e$ , che mette in rotazione il motore, e quindi è una coppia motrice. Questa coppia motrice è equilibrata dalla coppia del carico meccanico.

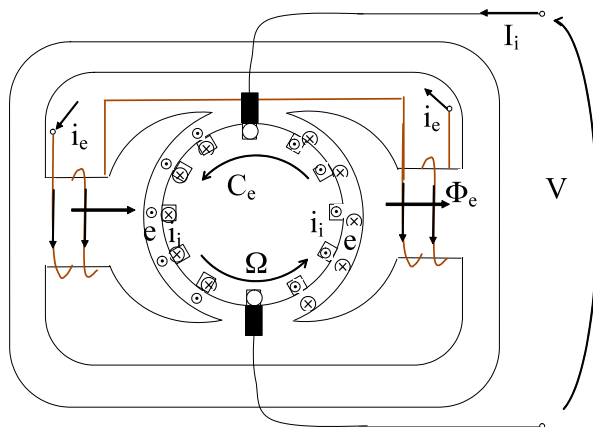
Dato che il rotore ruota a velocità  $\Omega$ , i conduttori sono in moto all'interno del campo di eccitazione => il flusso con essi concatenato varia nel tempo => per la legge dell'induzione, in essi è indotta una fem  $E$  (il cui verso è stabilito dalla regola vettoriale  $\vec{e} = \vec{v} \times \vec{B}$ ). Tale fem risulta opposta alla corrente  $I_i$ , il che è giusto perché la macchina sta funzionando da utilizzatore elettrico ( $i$  opposta ad  $e$ ).

Dal punto di vista energetico, la potenza elettrica entrante si trasforma in potenza meccanica uscente.

### FUNZIONAMENTO DA GENERATORE

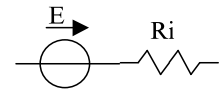


### FUNZIONAMENTO DA MOTORE



## CIRCUITO EQUIVALENTE e LEGGE ALLA MAGLIA

In entrambi i funzionamenti, il campo di eccitazione induce nell'avvolgimento di indotto una fem  $E \Rightarrow$  in entrambi i funzionamenti, l'indotto può essere rappresentato da una fem  $E$  con in serie la resistenza dell'avvolgimento  $R_i$ . In realtà questo circuito vale a regime, perché bisogna ricordare che ogni avvolgimento dà luogo ad una induttanza, per cui nel circuito si aggiunge una  $L$  (che ovviamente fa sentire la sua presenza solo nei transitori).

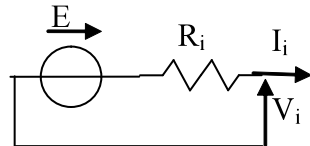


Quindi, il circuito equivalente di motore e generatore è lo stesso; ciò che cambia è il verso della corrente (e quindi della potenza). Infatti, come visto prima, nel funzionamento da generatore la corrente è concorde con  $E$ , ed uscente, mentre nel funzionamento da motore, la corrente è entrante, ed opposta ad  $E$ .

Dal circuito equivalente discende immediatamente la legge alla maglia nei due funzionamenti.

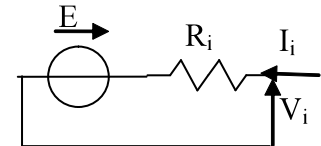
### GENERATORE

$$E = R_i I_i + V_i$$



### MOTORE

$$V_i = E + R_i I_i$$



## LEGGI DI FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA $E = K\Phi\Omega$ $C = K\Phi I$

Siano:  $B$  = induzione media nel traferro,  $l$  = lunghezza del conduttore in senso assiale,  $\Omega$  = velocità di rotazione in rad/sec,  $R$  = raggio del rotore,  $v = \Omega R$  = velocità tangenziale dei conduttori di rotore,  $U$  = numero dei conduttori in serie nell'avvolgimento,  $A$  = sezione del polo,  $\Phi = B A$  = flusso del polo.

Tramite la legge dell'induzione elementare, la fem indotta in ciascun conduttore può essere espressa come  $e = B l v = B l \Omega R$ . La fem ai capi dell'avvolgimento è  $E = U e = U B l \Omega R = U B A l \Omega R / A = K \Phi \Omega$ .

Quindi la fem ai morsetti della macchina è proporzionale al flusso e alla velocità di rotazione:  $E = K \Phi \Omega$ .

Dall'espressione della fem e dal bilancio energetico  $E I_i = C \Omega$  segue l'espressione della coppia  $C = K \Phi I_i$ .

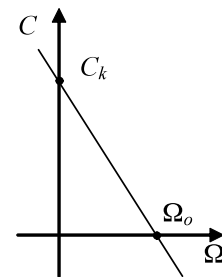
## CARATTERISTICA MECCANICA $C(\Omega)$

Combinando la legge alla maglia e le equazioni di funzionamento, si ottiene l'espressione della caratteristica meccanica.

$$C = K\Phi I_i = K\Phi \frac{V_i - E}{R_i} = K\Phi \frac{V_i - K\Phi\Omega}{R_i} = K\Phi \frac{V_i}{R_i} \left( 1 - \frac{K\Phi}{V_i} \Omega \right) = C_k \left( 1 - \frac{\Omega}{\Omega_o} \right)$$

$$C_k = K\Phi \frac{V_i}{R_i} \text{ è la coppia a velocità nulla (coppia di spunto)}$$

$$\Omega_o = \frac{V_i}{K\Phi} \text{ è la velocità a carico nullo (velocità a vuoto)}$$



NOTA1: la pendenza della caratteristica meccanica è molto elevata, perché in condizioni nominali la caduta  $R_i I_i$  sulla resistenza  $R_i$  è necessariamente piccola ( $3 \div 6\%$  di  $V_i$ ), per non avere perdite elevate. Ne segue che la coppia di spunto è molto più alta della coppia nominale, e quindi la curva  $C(\Omega)$  è molto pendente. Infatti:

$$\frac{C_k}{C_n} = \frac{K\Phi V_i}{R_i} \frac{R_i}{K\Phi(V_i - E)} = \frac{V_i}{V_i - E} = \frac{V_i}{R_i I_i} = \frac{V_i}{0.003 \div 0.06 V_i} = 15 \div 30$$

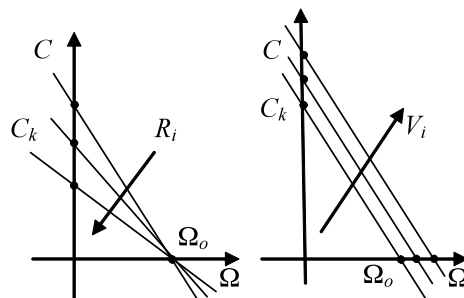
NOTA2:  $C = K \Phi I_i \Rightarrow C_k / C_n = I_k / I_n = 15 \div 30 \Rightarrow$  se non si effettua qualche regolazione, la corrente allo spunto è troppo elevata e può danneggiare la macchina.

## METODI DI REGOLAZIONE DI COPPIA E VELOCITÀ

I metodi di regolazione si ricavano dall'espressione della caratteristica meccanica.

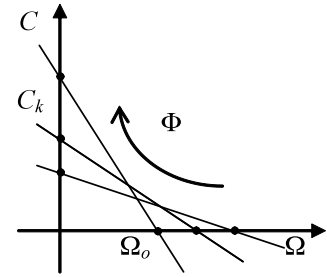
1. Regolazione reostatica: varia  $R_i \Rightarrow$  varia  $C_k$ , mentre  $\Omega_o$  rimane costante  $\Rightarrow$  l'intercetta  $\Omega_o$  rimane fissa, mentre l'intercetta  $C_k$  varia. Dalle espressioni di  $\Omega_o$  e  $C_k$ , si vede che se  $R_i$  sale,  $C_k$  scende  $\Rightarrow$  all'aumentare di  $R_i$ , la pendenza cala.

2. Regolazione d'armatura: varia  $V_i \Rightarrow$  variano  $C_k$  e  $\Omega_o$  nello stesso modo  $\Rightarrow$  variano entrambe le intercette, ma la pendenza rimane costante. Dalle espressioni di  $\Omega_o$  e  $C_k$ , si vede che se  $V_i$  sale,  $C_k$  e  $\Omega_o$  aumentano  $\Rightarrow$  all'aumentare di  $V_i$ , la retta trasla verso destra.



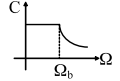
3. Regolazione di campo: varia  $\Phi \Rightarrow$  variano  $C_k$  e  $\Omega_o$  in modo opposto (una aumenta e l'altra cala)  $\Rightarrow$  la retta ruota. Dalle espressioni di  $\Omega_o$  e  $C_k$ , si vede che se  $\Phi$  sale,  $C_k$  aumenta e  $\Omega_o$  cala  $\Rightarrow$  la retta ruota in senso orario all'aumentare di  $\Phi$ .

NOTA: oggi giorno la regolazione reostatica si effettua solo per le macchine già costruite, ma per quelle nuove non viene prevista, perché è dissipativa. Si operano le altre due regolazioni, tramite dei convertitori elettronici che consentono di regolare  $V_e$  (tramite cui si regola  $I_e$  e quindi  $\Phi$ ) e  $V_i$ .



#### ESEMPIO DI REGOLAZIONE.

Utilizzando dapprima la regolazione d'armatura, poi quella di campo, si riesce ad ottenere una caratteristica meccanica con coppia costante fino alla velocità base  $\Omega_b$ , poi con coppia calante come  $1/\Omega$  (potenza costante)



Per  $\Omega < \Omega_b$  si pone  $\Phi = \Phi^* = \text{cost}$  (ponendo  $V_e = \text{cost}$ ), e si fa in modo che  $I_i = I_i^* = \text{cost}$ , alimentando con una tensione  $V_i$  variabile con la velocità  $\Omega$ , di valore  $V_i = R_i I_i^* + K \Phi^* \Omega$  (infatti, con tale tensione, la corrente risulta  $I_i = (V_i - E) / R_i = (R_i I_i^* + K \Phi^* \Omega - K \Phi^* \Omega) / R_i = I_i^* = \text{cost}$ ); quindi la coppia risulta costante:  $C = K \Phi I_i = K \Phi I_i^* = C^* = \text{cost}$ . Raggiunta la velocità base  $\Omega_b$  (velocità per cui  $V_i = V_{in}$ ), si pone  $V_i = V_{in} = \text{cost}$  e  $\Phi \propto 1 / \Omega$  (la regolazione di  $\Phi$  si effettua regolando  $V_e$ ). Quindi la fem e la corrente sono costanti:  $E = K \Phi \Omega = \text{cost} = E_n$ ,  $I_i = (V_{in} - E_n) / R_i = I_{in} = \text{cost}$ . Ne segue che la coppia è inversamente proporzionale alla velocità, e la potenza  $P = C \Omega$  è costante.

NOTA: con questo metodo di regolazione si risolve anche il problema dell'avviamento, perché si vede che la coppia è limitata, e quindi anche la corrente; in particolare,  $C^*$  sarà un valore non superiore alla coppia nominale  $C_n$  (per evitare danni meccanici), e quindi  $I^*$  risulta non superiore alla corrente nominale  $I_n$ .

#### LEGGI DI FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA $C = K \Phi I$ $E = K \Phi \Omega$ (trattazione + approfondita)

La coppia media su 1 conduttore è  $C_{m1} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} c(t) dt = \frac{1}{\omega T/2} \int_0^{\omega T/2} c(t) \omega dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi c(\theta) d\theta$

Su ogni conduttore agisce una forza  $bli$  con braccio  $R \Rightarrow c = bliR$ .

Inoltre, se la corrente di indotto è  $I$  e ci sono  $a$  vie in parallelo, la corrente in ogni conduttore è  $I/a$ .

Quindi  $C_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi b(\theta) l \frac{I}{a} R d\theta = \frac{I}{a} R l \frac{1}{\pi} \int_0^\pi b(\theta) d\theta = \frac{I}{a} R l B_m = \frac{I}{a} \frac{p\tau}{2\pi} l B_m = \frac{I}{a} \frac{p}{2\pi} \Phi = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} \Phi I$ .

Nella macchina ci sono  $U$  conduttori, quindi  $C_m = U \cdot C_{m1} = \frac{U}{2\pi} \frac{p}{a} \Phi I = K \Phi I$ .

La fem media indotta in una spira è  $e_{m1spira} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e_{1spira}(t) dt = \frac{2}{T} \int_{\Psi(0)}^{\Psi(T/2)} d\Psi$

In  $t = 0$ , il flusso concatenato è l'intero flusso di polo  $\Phi$ ; dopo  $T/2$ , il flusso concatenato è ancora  $\Phi$ , ma con segno negativo; quindi l'integrale del flusso concatenato è  $2\Phi \Rightarrow e_{m1spira} = \frac{2}{T} 2\Phi = 4f\Phi$

Nella macchina, in ogni via in parallelo ci sono  $U/2a$  spire, quindi la fem di ogni via è  $E_m = \frac{U}{2a} e_{m1spira} = \frac{U}{2a} 4f\Phi$ .

Ricordando il legame fra velocità di rotazione e frequenza  $\Omega = \frac{2}{p} \omega = \frac{2}{p} 2\pi f$  si ha

$E_m = \frac{U}{2a} 4 \frac{p}{2} \frac{\Omega}{2\pi} \Phi = \frac{U}{2\pi} \frac{p}{a} \Phi \Omega = K \Phi \Omega$ .

La trattazione mostra che la costante di proporzionalità  $K$  è la stessa per la coppia e la fem, e dipende da come è fatto l'avvolgimento.