

Università degli Studi di Trieste
Facoltà di Ingegneria

APPUNTI del CORSO di ELETTROROTECNICA

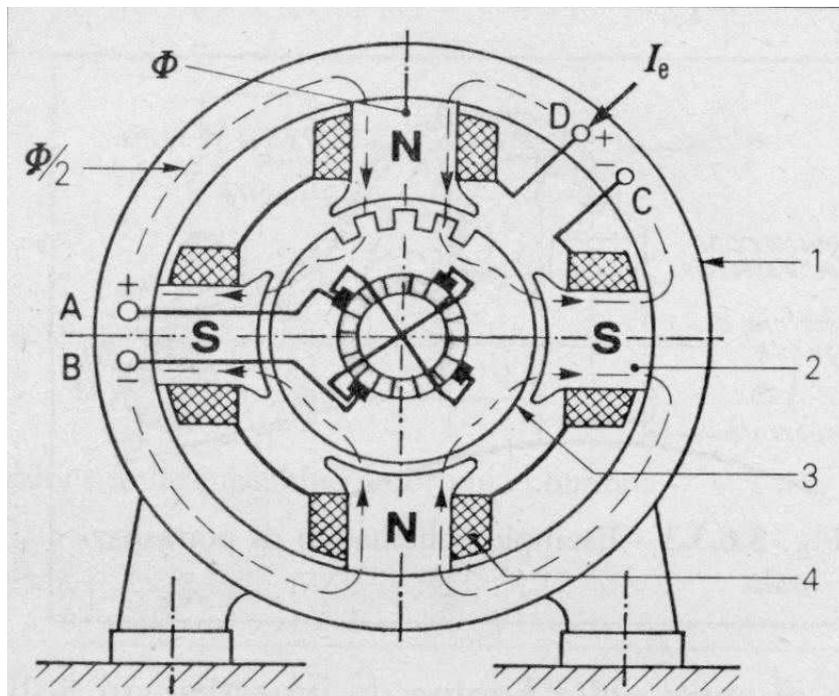
Macchine in continua

prof. ing. Stefano Longhi

a.a. 2017-2018

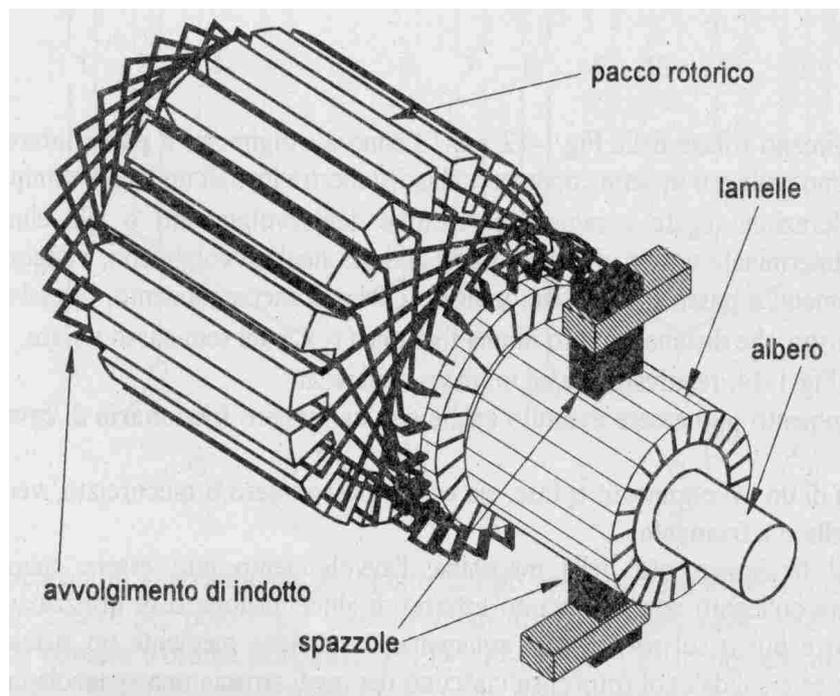
Statore

- **Sistema induttore (Statore):** anello in ghisa o acciaio dotato di poli sporgenti massicci o laminati su cui sono avvolti i conduttori dove circola la corrente continua di eccitazione i_e che genera un campo magnetico statico. Il traferro ha uno spessore costante per ottenere un campo uniforme tra la scarpa polare ed il rotore.



Rotore

- **Sistema indotto (rotore):** costituito da una corona cilindrica di materiale laminato ferromagnetico sulla periferia della quale vengono praticati dei fori (cave) per l'alloggiamento degli avvolgimenti di tipo chiuso (non esiste un inizio o una fine). Su questi vengono indotti i fenomeni elettromagnetici (f.e.m.) che contribuiscono a generare la coppia motrice. Le estremità delle spire sono collegate al collettore.



Collettore

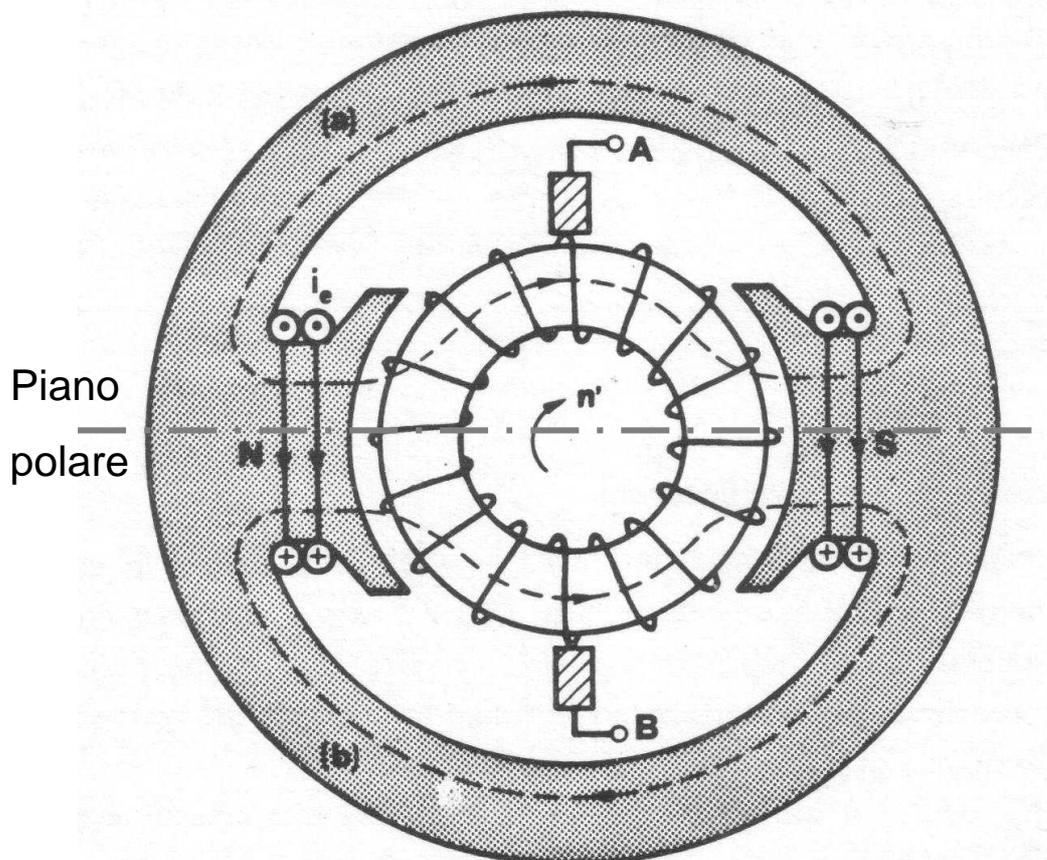
- **Collettore:** è una struttura a lamelle di rame isolate tra loro con il compito di collegare l'avvolgimento chiuso di rotore con il mondo esterno tramite una o più coppie di spazzole. Si ottengono così due o più vie interne negli avvolgimenti chiusi di rotore dove fluisce la corrente assorbita dalla alimentazione esterna. È l'elemento chiave che distingue la macchina in corrente continua dalle altre tipologie di macchina.

Anello di Pacinotti



Principio di funzionamento

- Supponiamo di eccitare l'avvolgimento statorico con una corrente continua i_e
- Il rotore, costituito dall'anello di Pacinotti, gira a velocità costante ω_m
- Piano polare: piano assiale di simmetria passante per la mezzeria dei poli. Se il flusso totale di induzione al traferro uscente dal polo nord è Φ , $\Phi/2$ passerà per il semianello superiore e $\Phi/2$ per quello inferiore



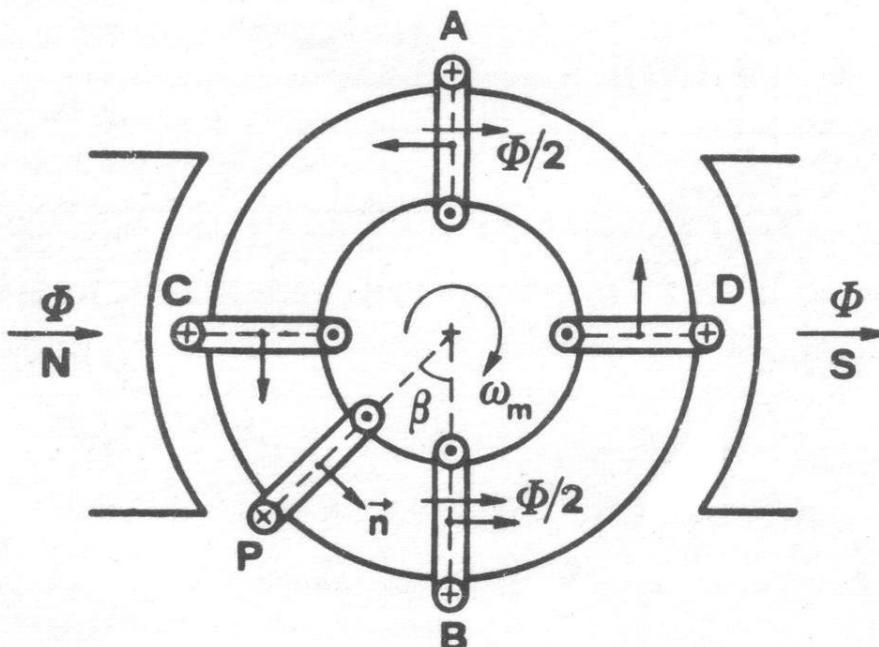
F.e.m. indotta in una spira rotoria

- Consideriamo una spira in posizione P individuata dall'angolo $\beta(t)$, calcoliamo il relativo flusso concatenato Φ_c :

$$\Phi_c = \Phi_c[\beta(t)]$$

- E la f.e.m. indotta:

$$e = -\frac{d\Phi_c}{dt} = -\frac{d\Phi_c}{d\beta} \frac{d\beta}{dt} = -\frac{d\Phi_c}{d\beta} \omega_m$$



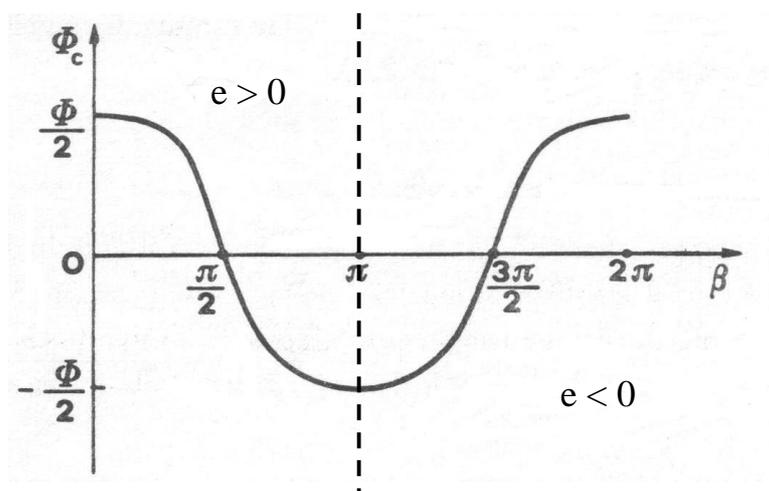
F.e.m. indotta in una spira rotorica (2)

- Per la simmetria della macchina si ha:

$$\begin{cases} \Phi_c(0) = \Phi / 2 \\ \Phi_c(\pi / 2) = 0 \\ \Phi_c(\pi) = -\Phi / 2 \\ \Phi_c(3\pi / 2) = \end{cases}^0$$

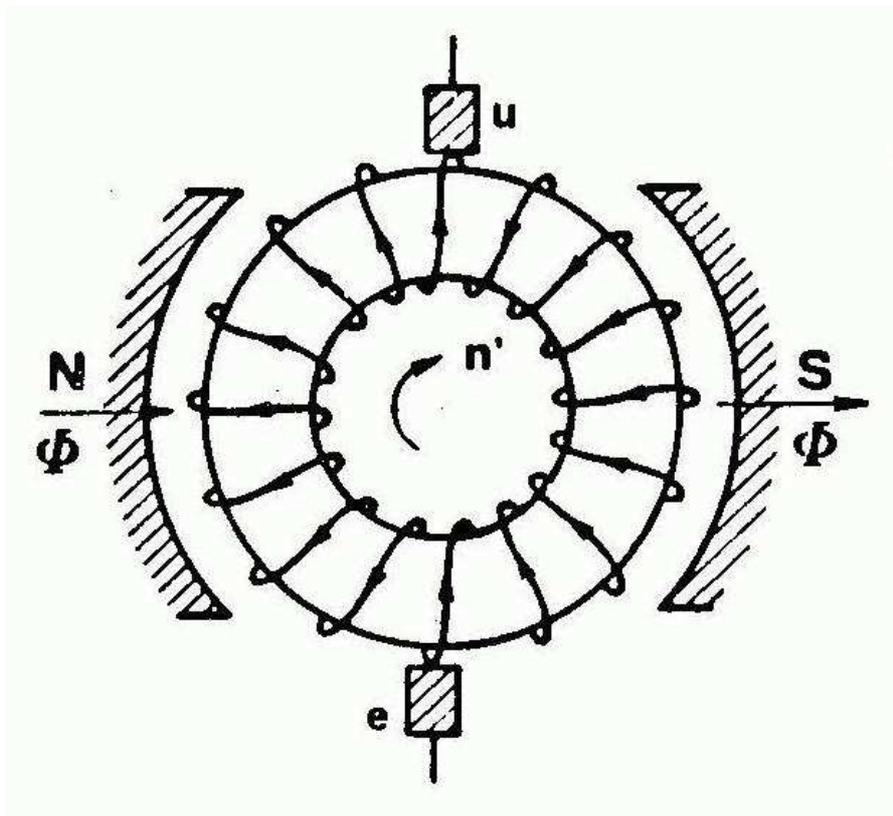
- E quindi per la f.e.m. si ottiene:

$$\begin{cases} e > 0 & \text{per } 0 < \beta < \pi \\ e < 0 & \text{per } \pi < \beta < 2\pi \end{cases}$$



F.e.m. indotta tra le spazzole

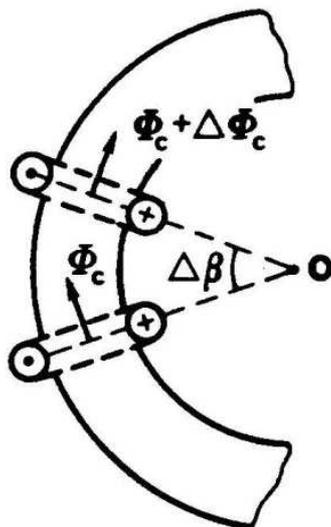
- Via interna: gruppo di spire tra le spazzole; ci sono quindi due vie interne e la f.e.m. $E(t)$ lungo una delle due vie interne è
- $E(t) = [e_1(t) + e_2(t) + \dots + e_z(t)]$
- Dove z : numero di spire tra le spazzole e e u



F.e.m. indotta tra le spazzole (2)

- Considerando i flussi concatenati

$$\begin{aligned}
 E(t) &= - \left[\frac{d\Phi_{c1}}{d\beta} + \frac{d\Phi_{c2}}{d\beta} + \dots + \frac{d\Phi_{cz}}{d\beta} \right] \omega_m = \\
 &= - \left[\frac{\Delta\Phi_{c1} + \Delta\Phi_{c2} + \dots + \Delta\Phi_{cz}}{\Delta\beta} \right] \omega_m = \\
 &= - \left[\frac{(\Phi_{c2} - \Phi_{c1}) + (\Phi_{c3} - \Phi_{c2}) + \dots + (\Phi_{cz} - \Phi_{c(z-1)})}{\Delta\beta} \right] \omega_m = \\
 &= \frac{\Phi_c(0) - \Phi_c(\pi)}{\Delta\beta} \omega_m
 \end{aligned}$$



F.e.m. indotta tra le spazzole (3)

- ponendo $\Delta\beta = 2\pi / N_s$
- N_s : numero di spire rotoriche
- n' : numero di giri al minuto
- $\omega_m = 2\pi n' / 60$

$$E = N_s \frac{n'}{60} \Phi$$

- La E è costante (nel limite delle approssimazioni fatte) nel tempo se n e Φ sono costanti
- Dipende solo dal flusso totale Φ , non dalla sua distribuzione

Avvolgimento embricato semplice

- Le matasse sono costituite da tante spire (la prima spira va dalla lamella 1 alla lamella 2, lati 1 e 10')

- Ci sono due vie interne:

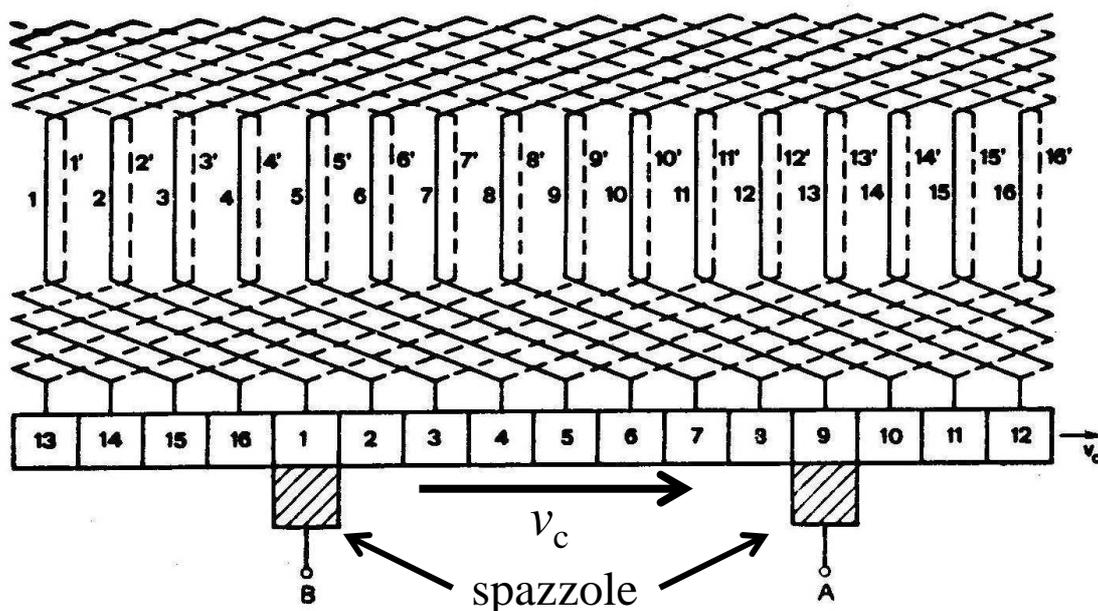
Prima via interna

1-10', 2-11', ..., 7-16', 8-1'

Seconda via interna

9-2', 10-3', ..., 15-8', 16-9'

- Il secondo terminale dell'ultima matassa (16-9') è collegato alla lama 1 da cui inizia l'avvolgimento, che risulta essere chiuso



Rotore



Commutazione

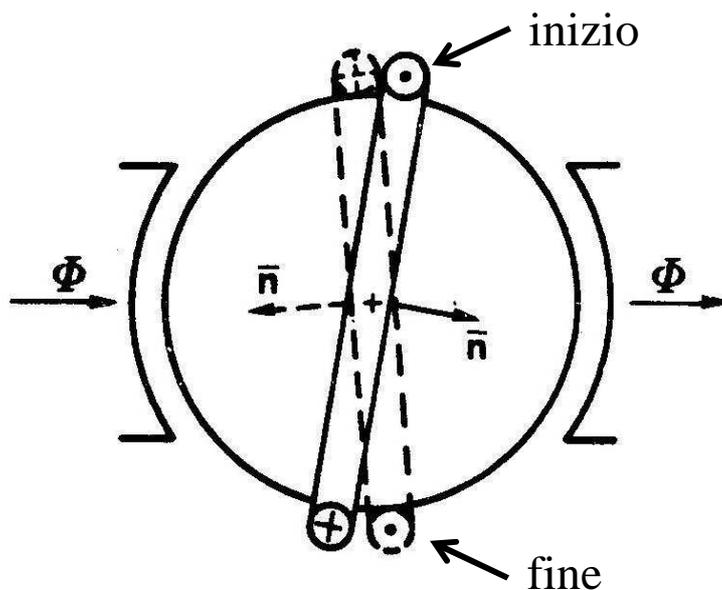
- Considerato il movimento del collettore a velocità v_c , le spazzole B e A entrano successivamente in contatto con le lamelle 16 e 8. L'intervallo di tempo in cui avviene la commutazione delle lamelle è il “periodo di commutazione” delle matasse.
- Questo tempo, che si ripete periodicamente per tutte le matasse, rappresenta l'intervallo in cui una matassa passa da una via interna a un'altra.

F.e.m. indotta tra le spazzole del rotore con 2 poli per lo statore

- La f.e.m. indotta tra le spazzole è in questo caso

$$E = 2N_s \frac{n'}{60} \Phi$$

poichè la variazione di flusso concatenato che la spira subisce nel percorrere l'intera via interna è ora 2Φ e non Φ .



F.e.m. indotta tra le spazzole del rotore con p coppie polari

- In generale, con p coppie polari e $N = 2N_s$, numero totale di conduttori attivi, si ha:

$$E = p \frac{n'}{60} N \Phi$$

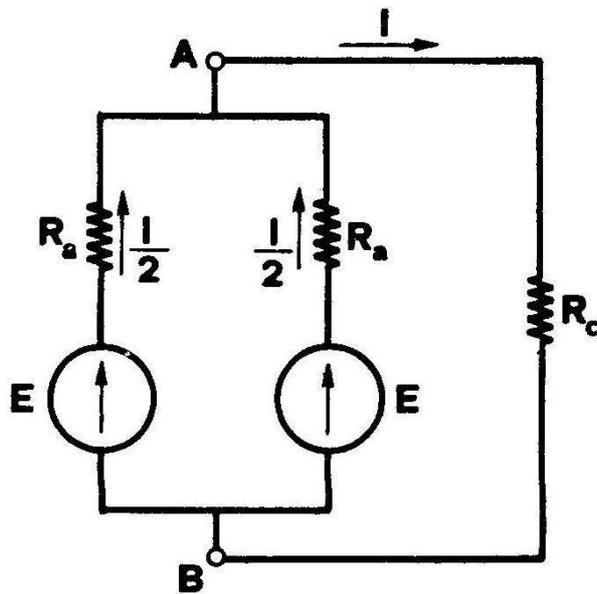
- La presenza di più coppie di poli rende possibile la realizzazione di avvolgimenti caratterizzati dall'aver un numero di lati in parallelo ($2a$, detti vie interne) che può essere uguale al numero di poli

$$E = \frac{p}{a} \frac{n'}{60} N \Phi = k_e N \Phi$$

$$\text{dove } k_e = \frac{p}{a} \frac{n'}{60}$$

Circuito equivalente

- Il circuito equivalente della macchina (generatore) con due vie interne è:



Per ogni via interna si ha una corrente $I/2a$

- GENERATORE: $V_{AB} = E - RI$
dove R : resistenza equivalente del rotore pari a $(R_a/2)$

Coppia di un motore

- I conduttori dell'indotto sono soggetti a tante forze tangenziali che costituiscono nel loro insieme una coppia che trascina l'indotto in rotazione. Per effetto della rotazione i conduttori vengono a tagliare le linee di forza del campo
- Nell'indotto del motore si genera una f.e.m. che agisce in verso opposto alla corrente che viene assorbita dall'indotto
- Un generico conduttore d'indotto, sottoposto a un campo B , è soggetto a una forza tangenziale

$$F_{tk} = Bl \frac{I}{2a}$$

- Per tutti gli N conduttori si ha

$$F_t = \sum_{K=1}^N Bl \frac{I}{2a} = N B_m l \frac{I}{2a}$$

Coppia di un motore (2)

- La coppia risulta quindi: ($R = 2p\tau/2\pi$)

$$C = \left(\frac{2p\tau}{2\pi} \right) NB_m l \frac{I}{2a} = \frac{pN}{2\pi a} \tau l B_m I = k_c \Phi I$$

$$\text{dove } k_c = \frac{pN}{2\pi a}$$

- Utilizzando il bilancio di potenza:

$$V = E + RI = K_e N \Phi + RI \quad (I \text{ entrante in A})$$

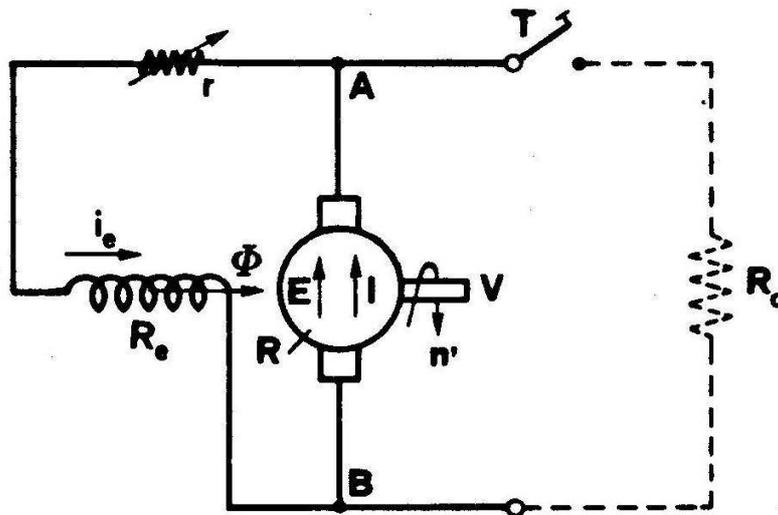
$$I = \frac{V - k_e \Phi N}{R}$$

$$P_a = VI = EI + RI^2 \Rightarrow EI = P_m$$

$$EI = \omega_m C \Rightarrow C = \frac{EI}{\omega_m} = \frac{k_e \Phi N I}{\omega_m} = k_c \Phi I$$

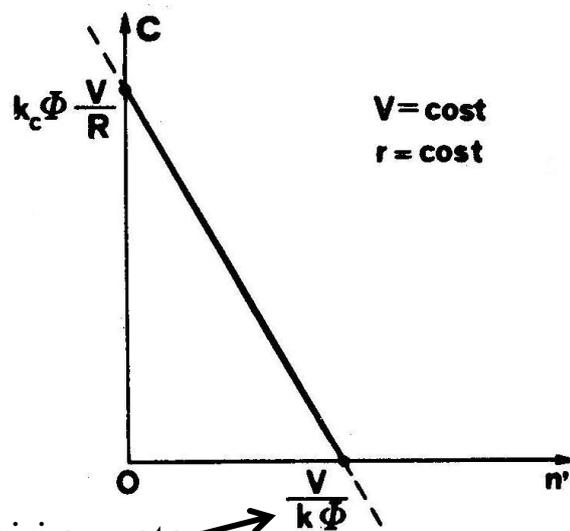
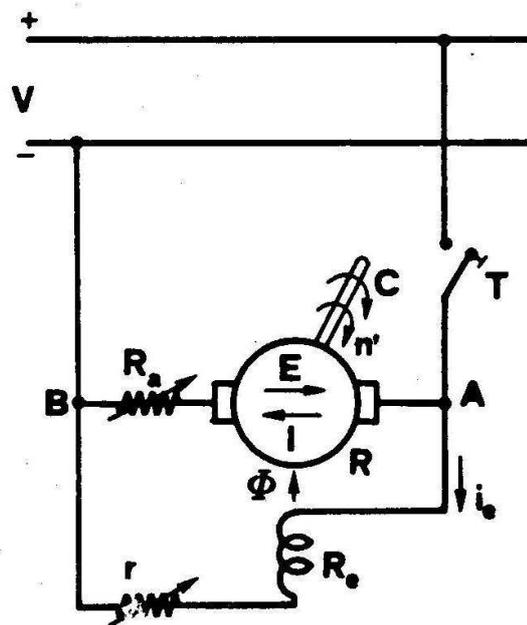
Schemi di eccitazione - generatore

- Generatore con eccitazione parallelo
 - Avvolgimento statorico o di eccitazione con corrente i_e
 - r : reostato di eccitazione



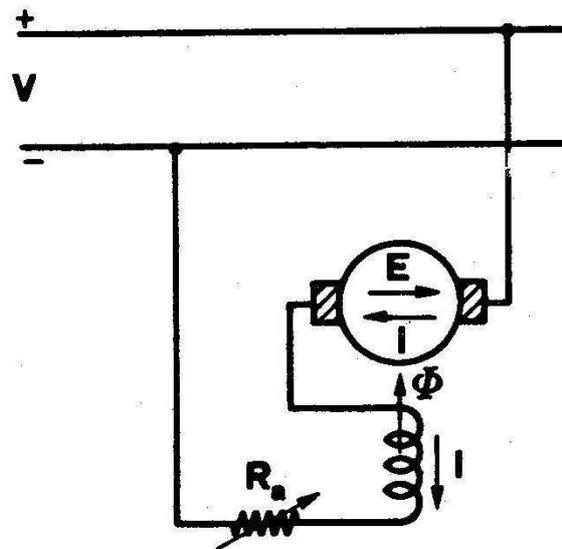
Schemi di eccitazione – motore (1)

- Motore con eccitazione in derivazione (paral.)
 - R_a : reostato di avviamento (serve a ridurre la corrente di spunto, proporzionale a C)



Schemi di eccitazione – motore (2)

- Motore con eccitazione in serie



- Motore con eccitazione indipendente
 - Consente una regolazione di velocità molto ampia ($v_e = R_e i_e$)

Schemi di eccitazione – motore (3)

- Controllo della tensione di armatura: coppia disponibile costante
- Controllo del flusso di eccitazione (di campo): potenza disponibile costante

$$\omega_m = \frac{E}{k_c \Phi} \approx \frac{V}{k_c \Phi}$$

