

MACCHINE IN CORRENTE CONTINUA

Schema di Principio e f.e.m.

È indicato in figura l' "Anello di Pacinotti".

L' avvolgimento di eccitazione (avvolgimento di statore) è avvolto sui poli [N e S] e determina il flusso Φ .

L' avvolgimento di indotto, disposto sul rotore, è chiuso.

La f.e.m. indotta in una generica spira [$\Phi \neq 0$, $n' \neq 0$] è:

$$e = - \frac{d\Phi_c}{dt} \quad (1)$$

ove

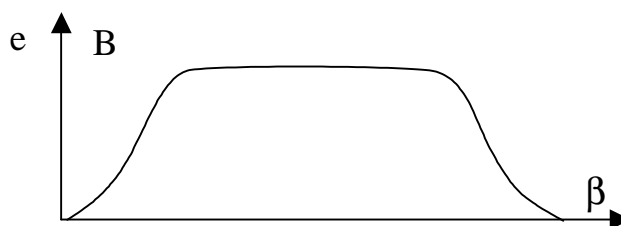
$$\Phi_c = \Phi_c(\beta) \quad (2)$$

da cui

$$e = - \frac{d\Phi_c}{d\beta} \frac{d\beta}{dt} = BR\ell\omega_m = Blv \quad (3)$$

ove B è la componente normale alla superficie esterna dell'anello del vettore induzione magnetica, R è il raggio al traferro, ℓ la lunghezza assiale, ω_m è la velocità angolare e $v = R \omega_m$ è la velocità periferica dell'anello.

Per una data velocità ω_m la f.e.m. è proporzionale a B (vedi figura, ove è indicato l'andamento dell'induzione, e quindi della f.e.m., sotto un polo).



- La f.e.m. complessiva nell'avvolgimento di indotto è nulla (a due a due si annullano i contributi di spire diametrali).
- La f.e.m. che si raccoglie fra le "spazzole" A, B è invece espressa dalla somma delle f.e.m. relative ad una "via interna" (uno dei due tratti AB):

$$E = e_1 + e_2 + e_3 + \dots \quad (4)$$

da cui

$$E = \frac{e_1\Delta t + e_2\Delta t + e_3\Delta t + \dots}{\Delta t} = \frac{\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3 + \dots}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\Delta t} \quad (5)$$

ove Δt è il tempo necessario affinché il rotore ruotando percorra la distanza che separa due spire contigue. Nel caso di macchina a due poli (come l'Anello di Pacinotti) Δt vale:

$$\Delta t = \frac{60}{N_s n'} \quad (6)$$

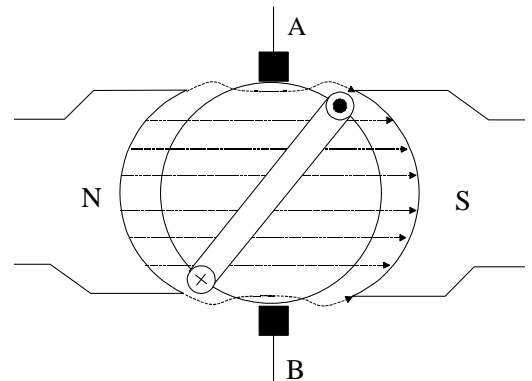
ove dove n' è il numero di giri al minuto del rotore e N_s il numero di spire dell'indotto. Sostituendo la (6) nella (5) si ottiene:

$$E = \frac{n'}{60} N_s \Phi \quad (7)$$

È possibile generalizzare la (7) [se ne tralascia la dimostrazione] al caso di macchina con avvolgimento a tamburo, 2a vie interne e $2p$ poli. Risulta:

$$E = \frac{2p}{2a} \frac{n'}{60} N \Phi \quad (8)$$

dove N è il numero di conduttori attivi. Ciò è legato al fatto che, nell'avvolgimento a tamburo (vedi figura) le spire hanno un flusso concatenato massimo pari a Φ anziché a $\Phi/2$ come negli avvolgimenti ad anello.



Equazioni Fondamentali

La figura mostra lo schema di una macchina generatrice ("dinamo") a eccitazione indipendente. Le equazioni interne si scrivono immediatamente:

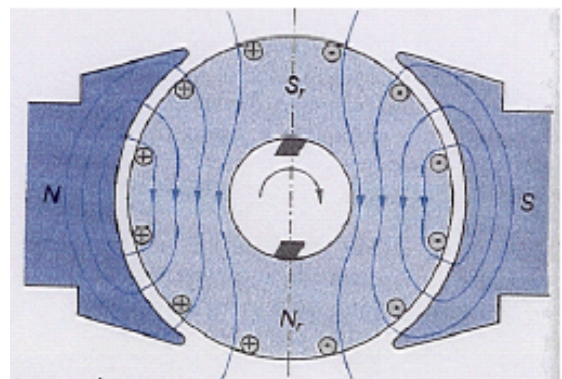
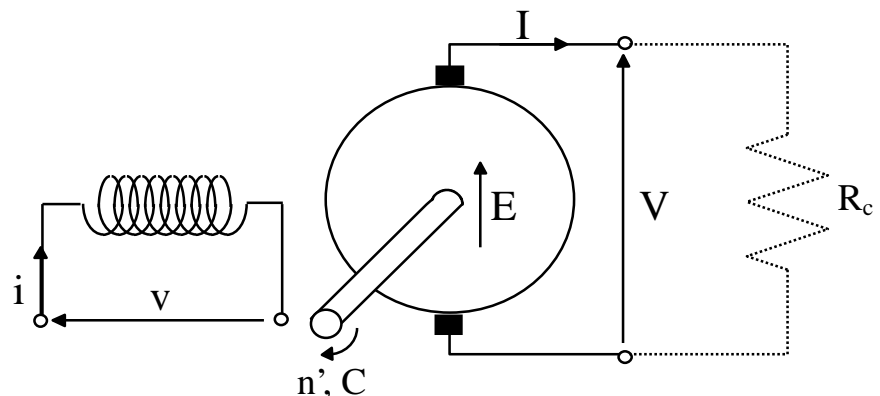
$$v = r i \quad (9)$$

$$k n' \Phi = V + R I \quad (10)$$

$$N_e i = \mathcal{R} \Phi \quad (11)$$

Nella (10) la f.e.m., espressa dalla (8), è indicata con $kn'\Phi$. Essendo k una costante di macchina [$k = \frac{2p}{2a} \frac{N}{60}$]. La (11) ["l'equazione di accoppiamento

magnetico"] è scritta, nell'ipotesi di trascurare la saturazione del ferro e coincide quindi con la legge di Hopkinson. È da notare che in essa non compare il contributo di amperspire relativo alla corrente I di indotto. Ciò si giustifica pensando che la corrente rotorica genera un campo magnetico ("**REAZIONE DI ARMATURA**") le cui linee di flusso danno però un contributo nulla al flusso uscente dal polo (vedi figura).



Nel caso in cui si voglia tenere conto della saturazione il fenomeno della reazione di armatura si complica sensibilmente e si può dimostrare che, in questo caso, il flusso Φ dipende in parte anche dalla corrente I .

Coppia

Dalla (10) si trae il seguente bilancio energetico:

$$kn'\Phi I = VI + RI^2 \quad (12)$$

↙ ↑ ↘
 Potenza meccanica = Potenza erogata al carico + Potenza dissipata

La coppia si deduce dalla potenza meccanica con ovvio passaggio:

$$C = \frac{kn'\Phi I}{2\pi n'} = \frac{60}{2\pi} \frac{2p}{2a} \frac{N}{60} \Phi I \quad (13) \Rightarrow C = k_c \Phi I \quad (14)$$

avendo posto $k_c = (2p/2a)(N/2\pi) \quad [(15)].$

Equazioni esterne

Le variabili che figurano nelle equazioni fondamentali sono sei, e precisamente v, i, n', Φ, V, I . TRE sono quindi i gradi di liberta che si possono saturare imponendo tre condizioni (“equazioni di collegamento con l’esterno”). Ad esempio:

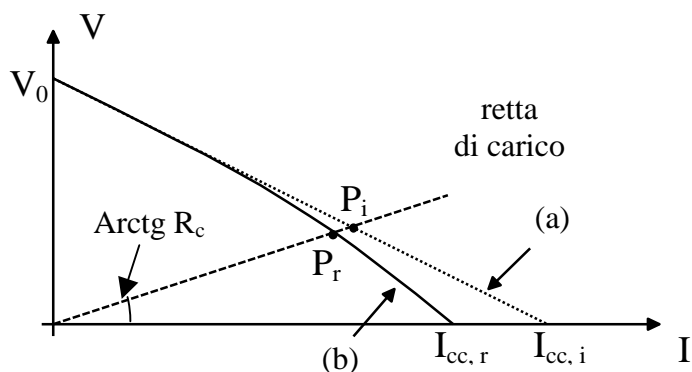
$$\begin{aligned} v &= \text{costante} \\ n' &= \text{costante} \\ V &= R_c I \end{aligned} \quad (16)$$

L’ultima delle (16) è la legge di Ohm applicata al carico esterno R_c che si suppone noto.

Caratteristica esterna

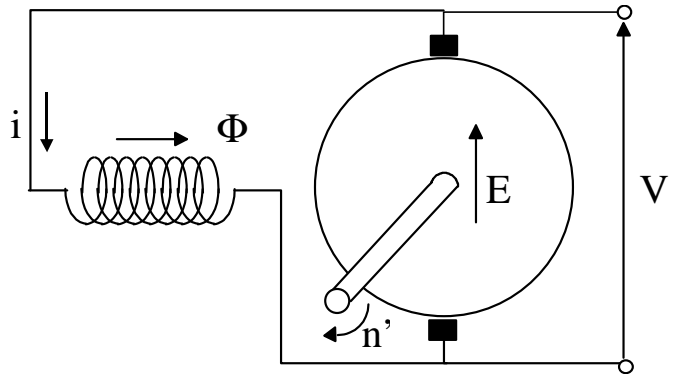
È la curva $V = V(I)$ a $i = \text{cost.}, n' = \text{cost.}$ [I è la variabile “pilota”]. La retta (a) [vedi figura], deducibile dalla (10), è la caratteristica teorica in assenza di saturazione; la curva (b), sperimentale, è la caratteristica reale.

In figura è pure indicata la “retta di carico” (o caratteristica dell’utilizzatore) la cui espressione analitica è rappresentata dall’ultima delle (16). Il punto di funzionamento della macchina si realizza ovviamente all’incrocio della caratteristica esterna della di-namo con la caratteristica dell’utilizzatore.



Dinamo Autoeccitate

Il tipo più impiegato è indicato in figura (**dinamo autoeccitata in derivazione**). Facendo ruotare la macchina ad un dato numero di giri n' , nasce una tensione V tra i morsetti. Ciò è dovuto alla presenza di un magnetismo residuo e alla non linearità della "caratteristica di eccitazione" $\Phi = \Phi(i)$.



Il fenomeno dell'autoeccitazione è descritto dalla seguente catena logica:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_r \\ n' \end{array} \right\} \xrightarrow{(8)} E_r \rightarrow i \rightarrow \Phi \uparrow\uparrow \rightarrow E \uparrow\uparrow \rightarrow i \uparrow\uparrow \dots$$

L'avviamento di una dinamo autoeccitata in parallelo è possibile grazie alla presenza della magnetizzazione residua sempre presente nel nucleo della macchina, e può essere qualitativamente descritta come segue:

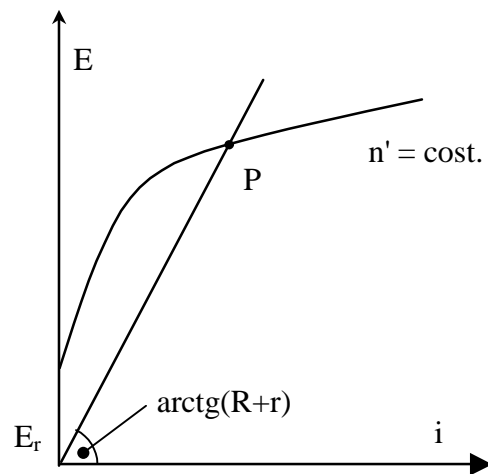
- La rotazione dell'albero provoca un movimento delle spire dell'indotto nelle linee di campo d'induzione residuo. Si genera una f.e.m. nelle spire d'indotto, che si traduce in una tensione alle spazzole E .
- La f.e.m. alle spazzole provoca una corrente i nell'avvolgimento eccitatore. Il flusso generato da tale corrente, che, se il rotore gira nel verso opportuno, è concorde con il flusso residuo. Il flusso al traferro quindi aumenta.
- L'incremento del flusso causa un incremento della f.e.m. agente sulle spire e, conseguentemente, un aumento della tensione alle spazzole. Il ciclo si richiude al punto b), finché non si è raggiunta la condizione stazionaria (il fenomeno raggiunge un equilibrio per la presenza della saturazione).

Per determinare il punto di funzionamento in condizioni stazionarie occorre risolvere il seguente sistema:

$$\begin{cases} E = (R + r)i & (17) \\ E = kn\Phi(i) & (18) \end{cases}$$

Le (17) e (18) costituiscono il sistema che fornisce, nel funzionamento a vuoto, le incognite E , i . In figura è indicata la soluzione grafica del sistema che descrive il fenomeno dell'autoeccitazione.

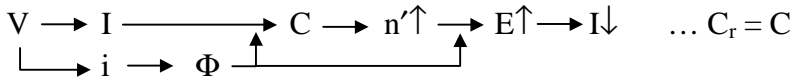
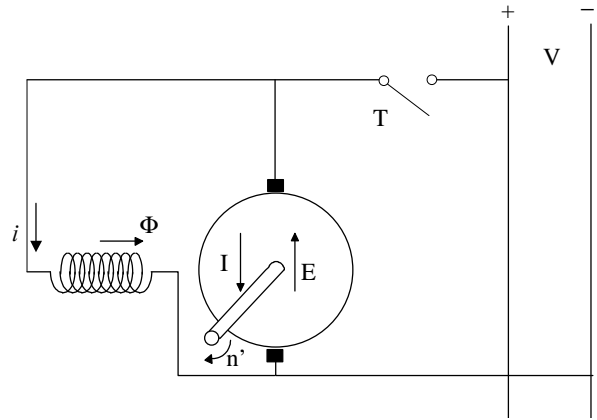
È opportuno osservare che, se si desidera che una dinamo si autoecciti, è necessario ruotare l'albero in verso opportuno e ciò al fine di non distruggere il flusso residuo



Motori a Corrente Continua

Motori eccitati in derivazione

Lo schema è indicato in figura. Alla chiusura dell'interruttore T il motore si avvia. Fisicamente ciò si giustifica con la seguente catena logica:



Il funzionamento della macchina può essere spiegato intuitivamente come segue:

- all'avviamento, la tensione V genera nell'avvolgimento di eccitazione una corrente i , che una volta esaurito il transitorio, tende al valore V/r . La corrente i genera il flusso principale;
- all'avviamento, la tensione V genera nell'avvolgimento di indotto una corrente I , che in assenza di flusso principale assume valore V/R . Tale corrente viene detta corrente di spunto;
- l'interazione della corrente di indotto I con il flusso principale dà luogo ad una coppia motrice. Se tale coppia è maggiore della coppia resistente, l'albero del motore comincia a ruotare con moto accelerato;
- la rotazione dell'albero provoca il moto delle spire di indotto attraverso il flusso di induzione. Su ogni spira si induce quindi una f.e.m. che produce una tensione alle spazzole E che si oppone alla tensione V ;
- la f.e.m. E , detta anche f.e.m. contro elettromotrice, provoca una diminuzione della corrente di indotto i , e, di conseguenza, una diminuzione della coppia motrice;
- finché la coppia motrice rimane maggiore della coppia resistente, il rotore continua ad aumentare la sua velocità angolare. L'aumento di velocità angolare causa l'aumento della f.e.m. contro elettromotrice E , quindi la diminuzione della corrente di indotto I e infine la diminuzione della coppia motrice. Il transitorio di avviamento si arresta una volta raggiunta la condizione di equilibrio tra la coppia motrice e quella resistente

Con le convenzioni di figura, le equazioni risultano:

$$V = r i \quad (19)$$

$$V = k n' \Phi + R I \quad (20)$$

$$N i = \mathcal{R} \Phi \quad (21)$$

ove $E = k n' \Phi$

n° variabili 5 → V, i, I, Φ, n'

n° equazioni 3

n° gradi 2

I due gradi di libertà si possono saturare con due condizioni corrispondenti a due equazioni di collegamento con l'esterno:

$$k_c \Phi I = C_u \quad (22)$$

$$V = \text{costante} \quad (23)$$

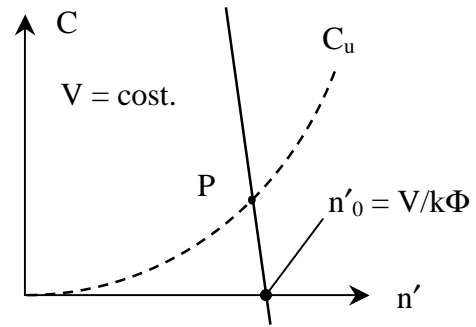
ove $C = k_c \Phi I$

è la coppia elettromagnetica del motore.

Caratteristica meccanica C(n)

La variabile pilota è n' , la grandezza che si fissa è V .

$$(20) \rightarrow n' = \frac{V - RI}{k\Phi} \xrightarrow{(14)} n' = \frac{V - R \frac{C}{k_c \Phi}}{k\Phi} \quad (24)$$

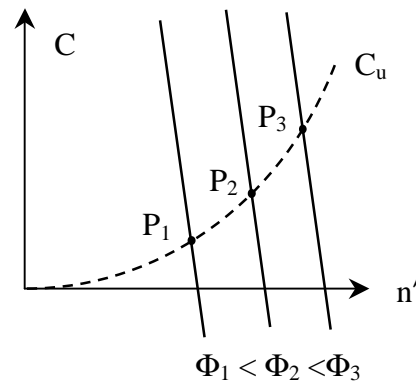
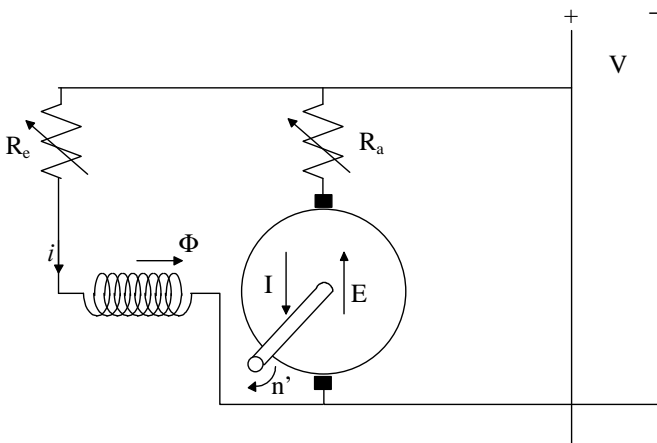


Se $V = const. \xrightarrow{(19)} i = const. \xrightarrow{(21)} \Phi = const.$, quindi la (24) è una retta (vedi figura).

Il punto di funzionamento P si ha all'intersezione della caratteristica meccanica con la caratteristica dell'utilizzatore (vedi figura). Tale intersezione può essere variata (ottenendo un "regolazione di velocità") modificando il flusso mediante un reostato di eccitazione R_e .

Ciò si verifica immediatamente considerando la velocità a vuoto ($C = 0$):

$$n'_0 = \frac{V}{k\Phi} \quad (25) \Rightarrow \Phi \downarrow, n'_0 \uparrow$$



Avviamento

$$(20) \rightarrow I = \frac{V - kn'\Phi}{R} \xrightarrow{(n'=0)} I_{avv} = \frac{V}{R} \uparrow\uparrow$$

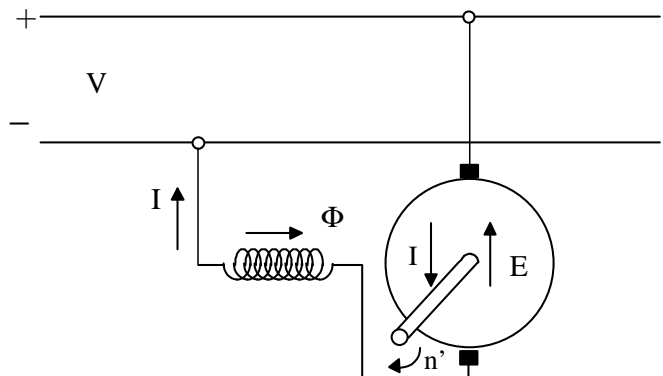
Per limitare la corrente all'avviamento I_{avv} si ricorre all'inserzione, durante l'avviamento, di un reostato di avviamento R_a .

Motori eccitati in serie

Equazioni (due)

$$V = kn'\Phi + (R + r) I \quad (26)$$

$$NI = \mathcal{R} \Phi \quad (27)$$

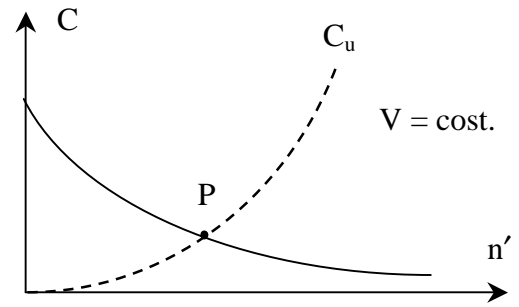


Dalle (14), (26) e (27) si ottiene quindi la caratteristica meccanica:

$$C = \frac{kN}{\mathcal{R}} \frac{V^2}{\left[\frac{kN}{\mathcal{R}} n' + (r + R) \right]^2} \quad (28)$$

L'andamento della caratteristica meccanica è mostrato in figura. Per limitare la corrente all'avviamento ($n' = 0$) si ricorre all'inserzione, durante l'avviamento, di un reostato di avviamento R_a , analogamente a quanto visto per il motore eccitato in derivazione. In condizioni di regime il reostato viene disinserito. In teoria il numero di giri a vuoto ($C = 0$) è infinito. È quindi necessario prendere qualche precauzione affinché il motore non si danneggi qualora accidentalmente funzioni con coppia resistente molto bassa.

È possibile regolare la velocità e la coppia della macchina variando il flusso principale, quindi: a) agendo su un reostato posto in parallelo al circuito di eccitazione; b) variando, mediante un opportuno selettore, il numero di spire del circuito di eccitazione.



2. CENNI COSTRUTTIVI

Il rotore di una macchina a c.c. è costituito da un cilindro laminato in materiale ferromagnetico, nella cui periferia sono ricavate le scanalature (**cave**) che accolgono le spire dell'avvolgimento di indotto. I poli sono composti da un nucleo attorno al quale vengono sistemati gli avvolgimenti di eccitazione, e da un'espansione polare, sagomata a ventaglio con profilo concentrico a quello del rotore (vedi figura 2.1). La maggiore sezione dell'espansione polare ha lo scopo di diminuire la riluttanza del traferro. Per la stessa ragione si limita quanto più possibile lo spessore del traferro. A causa dello spostamento dei denti rotorici si hanno sensibili variazioni di flusso sull'espansione polare. Per limitare gli effetti delle correnti parassite dovute a tali variazioni, le espansioni sono costruite con lamierini isolati tra loro con vernici.

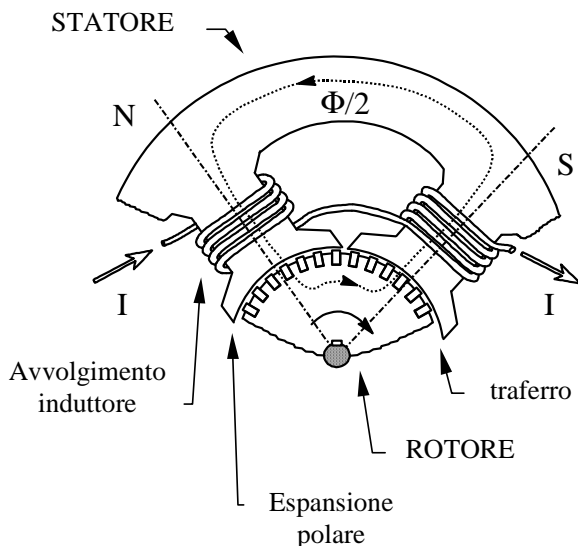


Figura 2.1.

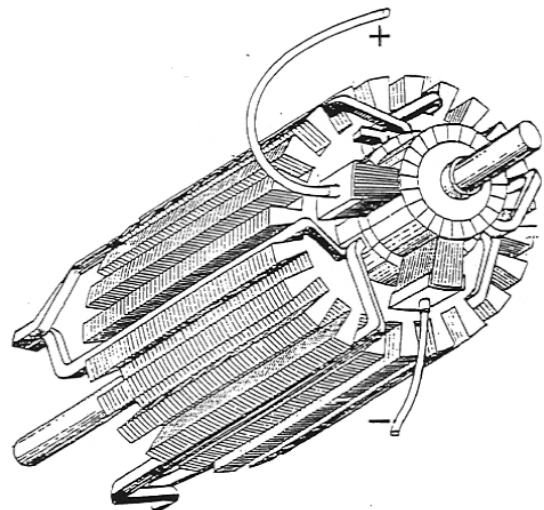


Figura 2.2. - Rotore di una macchina a c.c. con parte dell'avvolgimento.

3. REAZIONE DI ARMATURA

Non si è finora parlato dell'effetto delle correnti che passano negli avvolgimenti di indotto. La distribuzione del campo di induzione magnetica è infatti influenzata dalle correnti di indotto, che a loro volta dipendono dal carico applicato alle spazzole. Si consideri la distribuzione del campo di induzione magnetica nel funzionamento a vuoto (vedi figura 3.1). In questo caso l'andamento dell'induzione magnetica è generato unicamente dalle correnti di eccitazione, dal momento che sono nulle le correnti di indotto. Quando invece le spazzole sono connesse ad un carico, le correnti nel circuito rotorico generano una forza magnetomotrice (f.m.m.) che va linearmente lungo il traferro.

Le correnti nel circuito d'indotto generano un campo di induzione magnetica, la cui distribuzione spaziale è mostrata in figura 3.2, e che viene indicato come campo prodotto dalla **reazione d'armatura**. Supponendo valida l'ipotesi di linearità del materiale, è lecito sommare il campo di induzione magnetica prodotto dai circuiti di eccitazione a quello generato dalla reazione dell'armatura, per ottenere il campo risultante illustrato in figura 3.3. È immediato verificare che la deformazione del campo prodotta dalla reazione di indotto provoca lo spostamento dell'asse neutro. Dato che il campo di induzione prodotto dalla reazione di indotto è antisimmetrico rispetto all'asse delle espansioni polari, il flusso totale Φ non viene modificato, e quindi rimane invariata la f.e.m. alle spazzole. Quindi, in ipotesi di linearità del mezzo, la tensione erogata dalla macchina risulta indipendente dal carico. In realtà, per la non linearità del ferro, il campo risultante al traferro non è uguale alla somma del campo di eccitazione e del campo di reazione. In particolare, a causa della saturazione del ferro, la diminuzione dell'induzione sotto una metà del polo non è completamente compensata dall'aumento sotto l'altra metà. Questo provoca una diminuzione di flusso e quindi una diminuzione della f.e.m. a carico rispetto a quella a vuoto.

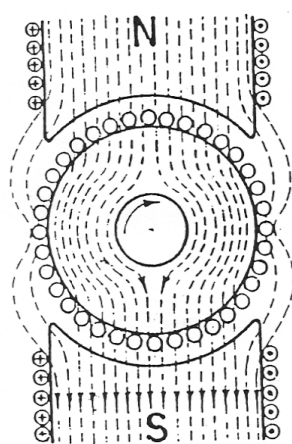


Figura 3.1
CAMPO INDUTTORE

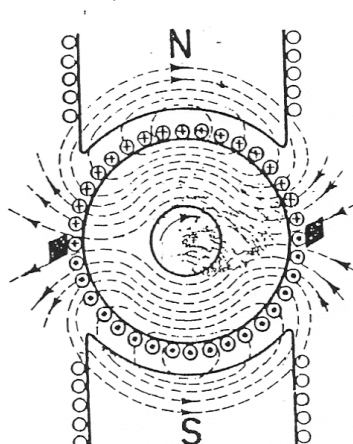


Figura 3.2
CAMPO TRASVERSALE
(o INDOTTO)

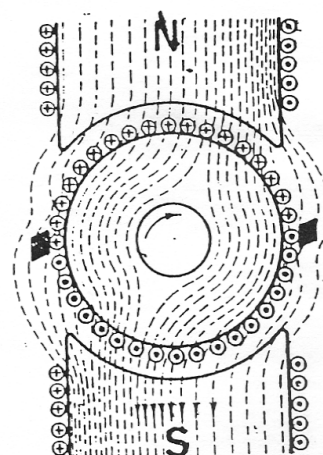


Figura 3.3
CAMPO RISULTANTE

Concludiamo riassumendo gli effetti principali prodotti dalla reazione di armatura:

- Distorsione del campo;
- spostamento dell'asse neutro;
- peggioramento della commutazione;
- diminuzione del flusso al traferro (in saturazione);

4. LA COMMUTAZIONE

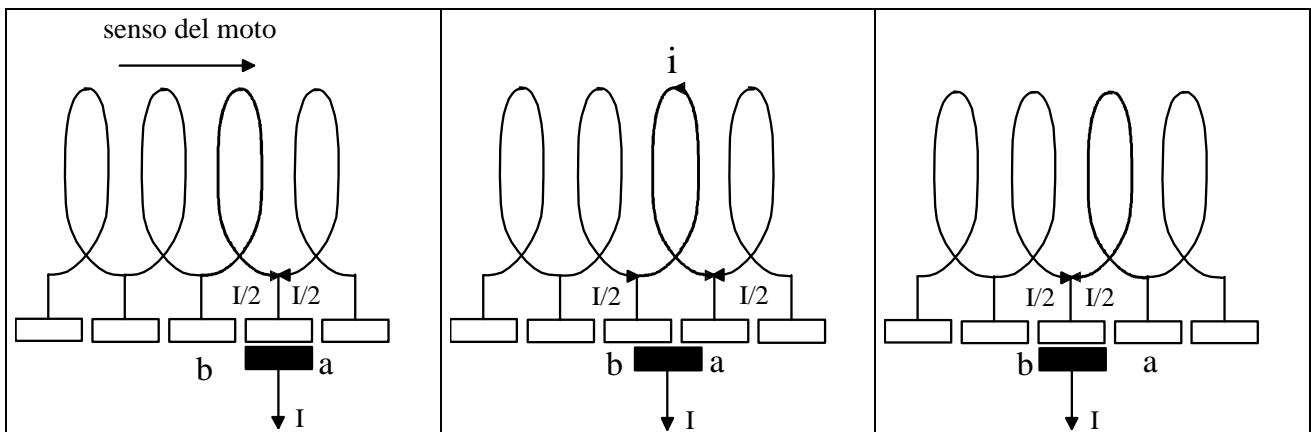


Figura 4.1. - Spira in commutazione

Viene definita **commutazione** il passaggio dei lati attivi di una spira da una via interna all'altra. Si consideri la figura 4.1, nella quale è illustrato schematicamente un indotto ad anello in prossimità di una delle spazzole. Al generico istante T la spazzola è a contatto solo con la lama a del collettore. La corrente I che viene raccolta dalla spazzola arriva in eguale misura dalle due spire a destra e a sinistra della lama a . Per effetto della rotazione del rotore, in un tempo t_c , detto **tempo di commutazione**, la spazzola si viene a trovare a contatto unicamente con la lamella b . Nel periodo di tempo $T < t < T + t_c$, La spira rappresentata in figura 4.1 con tratto più grosso è cortocircuitata, poiché la spazzola è a contatto con le due lame a e b . La corrente i che percorre tale spira varia nel tempo, poiché deve passare da un valore $I/2$ a $-I/2$.

Ipotizzando che:

- sia nulla la resistenza ohmica della spira;
- siano nulle le forze elettromotrici agenti sulla spira in corto circuito;
- sia costante la resistenza di contatto tra spazzola e collettore;

la corrente i passerebbe da $I/2$ a $-I/2$ con legge lineare, e a tale andamento corrisponderebbe una distribuzione di densità di corrente costante sulla superficie di contatto tra spazzola e collettore. Una commutazione siffatta si dice **lineare** o a **densità di corrente costante**, ed è illustrata in figura 4.2.

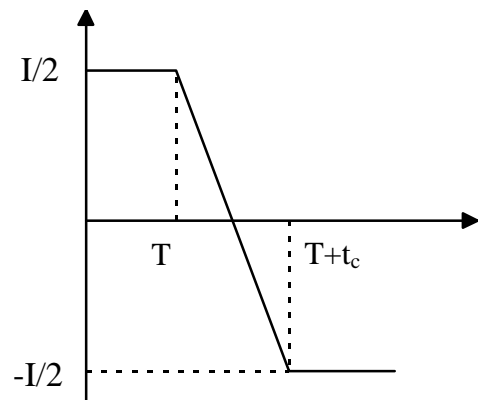


Figura 4.2. - Commutazione lineare.

In realtà le ipotesi fatte non sono mai rispettate, e l'andamento della corrente i può discostarsi anche notevolmente da quello lineare. In particolare, durante la commutazione intervengono i seguenti fenomeni:

- la spira in corto circuito, per effetto del moto del rotore, si muove in un campo di induzione variabile nello spazio, ed è quindi sede di f.e.m.;
- la spira è concatenata ad un campo magnetico prodotto dalla corrente i . L'inversione di tale corrente provoca l'insorgere di f.e.m. autoindotte che si oppongono a tale variazione;
- La resistenza della spira non è nulla;
- La resistenza di contatto diminuisce all'aumentare della densità di corrente attraverso il contatto.
- Altre spire che commutano contemporaneamente a quella presa in considerazione possono produrre f.e.m. di mutua induzione.

Se la macchina ha due spazzole collocate sull'asse neutro, le uniche f.e.m. agenti sulle spire in corto circuito sono quelle autoindotte che si oppongono all'inversione della corrente, esercitando un'azione ritardante sulla commutazione. In tal caso si verifica un addensamento di corrente sulla superficie di contatto (orlo di uscita) tra la spazzola e la lamella che viene abbandonata (la lamella a in figura 4.1). Tale addensamento provoca uno scintillio che cresce al crescere della corrente I erogata dalla macchina. L'andamento della corrente i nella spira in commutazione è rappresentato qualitativamente in figura 4.3 dalla curva 2.

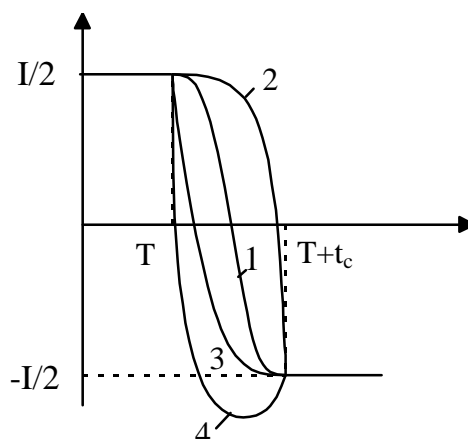


Figura 4.3.

Se, in una macchina che funziona da generatore, le spazzole sono spostate di un certo angolo nel senso del moto del rotore, la variazione di flusso principale concatenato alla spira durante la commutazione genera una f.e.m. che ha segno opposto a quello della f.e.m. autoindotta, e quindi anticipa la commutazione. Al contrario, la variazione del flusso concatenato generata dalla reazione di armatura può avere effetto ritardante, generando una f.e.m. concorde con quella autoindotta. È possibile annullare il fenomeno dello scintillio spostando le spazzole di un opportuno angolo α_c , in modo da annullare le f.e.m. agenti sulla spira in corto circuito. Poiché le f.e.m. autoindotte dipendono dalla corrente erogata, l'angolo α_c dipende dalle condizioni di carico del generatore. Tale accorgimento non è quindi attuabile su macchine di grossa potenza, ed è inefficace in presenza di brusche variazioni di carico. Quando l'angolo di rotazione delle spazzole è tale che le f.e.m. generate dalla variazione di flusso principale concatenato siano maggiori delle f.e.m. autoindotte, la densità di corrente tende ad addensarsi sulla superficie di contatto tra la spazzola e la lamella in entrata. In tal caso la corrente i segue un andamento del tipo 3 in figura 4.3 e si può verificare uno scintillio sull'orlo di ingresso della spazzola. Ulteriori spostamenti delle spazzole possono dare origine ad andamenti di corrente del tipo 4, che corrispondono a commutazioni con scintillio sull'orlo di ingresso e di uscita delle spazzole.

Modificando opportunamente l'andamento del campo di induzione è possibile migliorare la commutazione mantenendo le spazzole sull'asse neutro. A ciò si provvede mediante i **poli ausiliari** o **di commutazione** caratterizzati da un'espansione molto ridotta rispetto a quella dei poli principali, e posti in corrispondenza dell'asse neutro. I poli di commutazione sono eccitati mediante un avvolgimento posto in serie all'indotto, ed è quindi percorso da una corrente uguale a quella che fluisce nelle spire rotoriche. In tal modo, a meno di effetti di saturazione, il campo di induzione generato dai poli di commutazione è sempre proporzionale alla corrente di indotto. Il moto della spira in commutazione attraverso tale campo di induzione provoca una f.e.m. che è in grado di bilanciare la f.e.m. autoindotta per qualsiasi condizione di carico. I poli di commutazione, inoltre hanno la funzione di annullare l'effetto della reazione d'armatura nella zona interpolare, facendo in modo che l'asse neutro coincida con l'asse interpolare e non dipenda dalla corrente di indotto.

In macchine di grossa potenza le condizioni di funzionamento sono ulteriormente modificate mediante l'adozione dei **circuiti compensatori**. Tali circuiti, disposti in cave ricavate nelle espansioni polari principali, sono in serie con i poli di commutazione, e generano un campo di induzione con asse coincidente con l'asse neutro. Tale campo riduce la distorsione provocata dalla reazione d'armatura.