



La macchina a collettore (o in corrente continua) 3° parte

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Forza elettromotrice indotta

Facendo sempre riferimento alla macchina a 2 poli, supponiamo che il rotore venga posto in rotazione dall'esterno alla velocità angolare ω e che l'avvolgimento di armatura non sia alimentato (funzionamento da generatore).

Per la legge di Faraday, in un conduttore che si muove a velocità v , tagliando le linee di flusso di un campo magnetico costante B , si induce una tensione e :

$$\vec{e} = \vec{v} \wedge \vec{B} \cdot l$$

Quindi, la rotazione del rotore nel campo magnetico generato dallo statore indurrà nei conduttori di rotore delle forze elettromotrici:

$$E_i = \omega \cdot r \cdot B_i \cdot l$$

Quando i conduttori sono disposti entro le cave, diventa problematico valutare sia il valore di B_i nel conduttore, sia definire correttamente la velocità relativa del conduttore rispetto alle linee del campo.

2

L. Frosini

Forza elettromotrice indotta

Per definire senza equivoci il valore della f.e.m. indotta, è opportuno riferirsi al concetto di spira e di flusso concatenato.

In una macchina a 2 poli, ad ogni conduttore disposto su una metà del rotore, ne corrisponde un secondo sull'altra metà, in posizione diametrale; i due conduttori formano perciò una spira che si muove nel campo magnetico presente al traferro.

La variazione del flusso concatenato dalla spira, quando questa ruota di 180° a partire dal piano neutro, vale:

$$\Delta\Phi = 2\Phi_u$$

dove Φ_u è il flusso utile definito, come precedentemente, a partire dall'integrale dell'induzione media su un semiperiodo.

3

L. Frosini

Forza elettromotrice indotta

Sempre per la legge di Faraday, la f.e.m. media indotta nella spira vale:

$$E_{s\ media} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta T} = \frac{2\Phi_u}{\pi/\omega} = \frac{2\Phi_u\omega}{\pi} \text{ [V]}$$

dove ΔT è il tempo necessario per compiere la rotazione di 180° .

Se Z è il numero totale di conduttori dell'indotto e $Z/2$ è il numero di conduttori di ciascuna delle due vie interne in parallelo dell'avvolgimento, allora il numero complessivo di spire di una via interna vale $Z/4$.

Poiché le spire di una via interna sono in serie tra loro, la f.e.m. media complessivamente raccolta alle spazzole è data da:

$$E_{a\ media} = \frac{Z}{4} \cdot E_{s\ media} = \frac{Z}{4} \cdot \frac{2\Phi_u\omega}{\pi} = \frac{Z}{2\pi} \Phi_u\omega \text{ [V]}$$

4

Forza elettromotrice indotta

Nel caso di una macchina dotata di p_p coppie polari e di a coppie di vie interne, si ha:

$$E_{a\text{ media}} = \frac{Z}{2\pi} \cdot \frac{p_p}{a} \cdot \Phi_u \omega \rightarrow k$$

Analogamente a quanto visto per l'azione meccanica, introducendo la costante di avvolgimento k , la f.e.m generata alle spazzole diventa:

$$E_{a\text{ media}} = k \cdot \Phi_u \omega$$

Anche per la f.e.m., così come per la coppia, occorre distinguere tra f.e.m. istantanea e f.e.m. media: la presenza delle cave di rotore e la non uniforme distribuzione dell'induzione al traferro causano nella f.e.m. raccolta alle spazzole delle ondulazioni di disturbo.

5

Funzionamento come motore

In realtà, nel funzionamento della macchina come motore, si hanno entrambi gli effetti considerati:

- sui conduttori di rotore, percorsi da corrente e immersi in un campo magnetico, si sviluppano forze che danno origine alla coppia motrice;
- il rotore inizia a girare e quindi nei conduttori di rotore si induce una f.e.m. indotta, che per la legge di Lenz si oppone alla causa che l'ha prodotta (è quindi una forza contro elettromotrice).

$$E_a \cdot I_a = k \cdot \Phi_u \omega \cdot I_a = C \cdot \omega$$



Il motore raggiungerà quella velocità di rotazione ω alla quale la f.c.e.m. indotta E_a risulterà tale da fare assorbire quella corrente I_a necessaria e sufficiente per sviluppare la coppia motrice C richiesta dal carico.

6

Funzionamento come motore

All'aumentare della coppia motrice richiesta, il motore dovrà diminuire il valore della f.c.e.m. (e quindi della velocità: il motore rallenterà) al fine di consentire un aumento dell'intensità della corrente circolante nei conduttori di indotto.

- Φ_u è il flusso al traferro in corrispondenza a un passo polare della macchina;
- E_a è la f.c.e.m. prodotta alle spazzole del circuito di armatura in conseguenza della rotazione;
- C è la coppia prodotta all'albero dalla corrente I_a che viene addotta alle spazzole;
- k è la costante di avvolgimento.

7

Funzionamento come motore

Per un motore, è importante conoscere il modo in cui esso è in grado di esprimere l'azione meccanica in funzione dell'alimentazione e della velocità.

Questa caratterizzazione può essere fornita attraverso la caratteristica elettromeccanica.

Con questo termine si intendono generalmente le curve della coppia erogata e della corrente assorbita in funzione della velocità angolare dell'albero.

Le caratteristiche elettromeccaniche di un motore a corrente continua sono variabili in relazione alla sua eccitazione, all'alimentazione dell'armatura e al modo in cui i due circuiti possono essere interconnessi. Analizzeremo il comportamento del motore nei due casi di collegamento più frequenti:

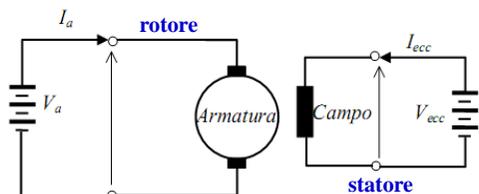
- Motore ad eccitazione separata.
- Motore ad eccitazione serie.

8

Motore ad eccitazione separata

Il motore ad eccitazione separata costituisce oggi la tipologia più comune di motore a corrente continua usato in ambito industriale.

Le tensioni e correnti che alimentano il circuito di armatura e il circuito di eccitazione sono regolabili in modo indipendente una dall'altra.



In questa tipologia di macchina rientrano anche i motori a magneti permanenti, in cui il circuito elettrico di eccitazione è sostituito da magneti permanenti (e quindi NON è regolabile).

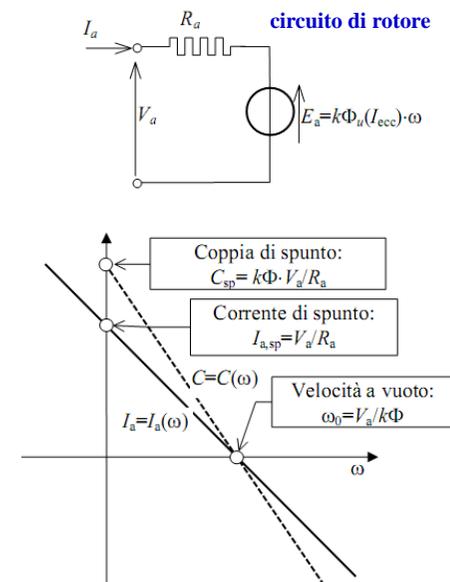
9

Motore ad eccitazione separata

$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + E_a = R_a I_a + k \cdot \Phi_u \cdot \omega \\ C = k \cdot \Phi_u \cdot I_a \\ \Phi_u = \Phi_u(I_{ecc}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_a = \frac{V_a - k \cdot \Phi_u \cdot \omega}{R_a} \\ C = k \cdot \Phi_u \cdot \frac{V_a - k \cdot \Phi_u \cdot \omega}{R_a} \\ \Phi_u = k_1 \cdot I_{ecc} \end{cases}$$

(ipotesi: lontani dalla saturazione)



10

Motore ad eccitazione separata

La corrente di spunto del motore dipende dalla tensione di armatura:

$$I_{a,sp} = V_a / R_a$$

Essa è limitata esclusivamente dalla resistenza dell'avvolgimento di indotto e dalla caduta di tensione al contatto spazzola-lamella (che per ora riteniamo compresa nella resistenza R_a): il valore della corrente di spunto è tipicamente elevato e non risulta supportabile per troppo tempo dal motore.

Nel caso di motori con eccitazione a magneti permanenti, occorre spesso ridurre l'entità di tale corrente per evitare danni al magnete.

In quest'ultimo caso, a fronte ai vantaggi di non dover provvedere ad una alimentazione esterna e alla assenza di dissipazione termica sulla resistenza dell'avvolgimento di eccitazione, si perde la possibilità di regolare il flusso utile di macchina.

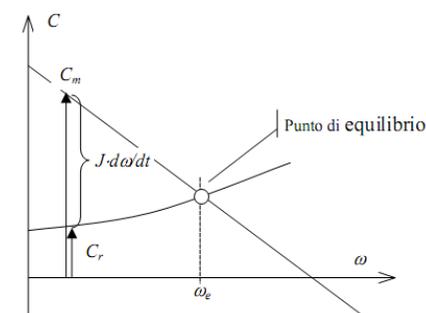
11

Motore ad eccitazione separata

In generale, quando la coppia motrice e la coppia resistente sviluppata dal carico si uguagliano, ci si trova nel punto di lavoro a carico, che può essere un punto di equilibrio stabile o instabile.

Poiché i carichi meccanici tipicamente esercitano coppie resistenti costanti o crescenti con la velocità di rotazione, le loro intersezioni con la caratteristica del motore ad eccitazione separata sono tutte stabili.

Ne deriva l'affermazione che la caratteristica di coppia del motore ad eccitazione separata è una caratteristica stabile.



12

Regolazione motore ad eccitazione separata

Il motore a corrente continua con eccitazione separata presenta una doppia possibilità di regolazione delle grandezze di alimentazione:

- regolazione di armatura**: variazione della tensione di alimentazione V_a .
- regolazione di campo**: variazione del flusso utile Φ_u attraverso la regolazione della tensione di eccitazione (per statori avvolti).

La **regolazione di armatura** V_a provoca una **traslazione delle caratteristiche di coppia e di corrente**; aumentando la tensione di alimentazione:

➤ aumentano la coppia allo spunto, la corrente allo spunto e la velocità di funzionamento a vuoto della macchina.

Si osserva che il coefficiente angolare delle caratteristiche non dipende dalla tensione di alimentazione e quindi rimane costante.

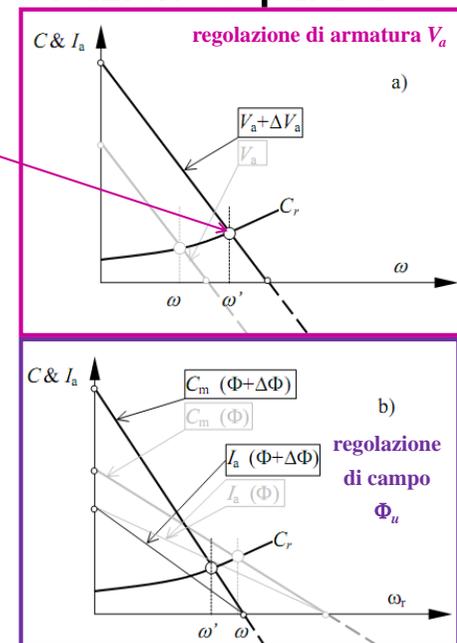
13

Regolazione motore ad eccitazione separata

In relazione al punto di lavoro a carico, aumentando la tensione di armatura V_a , aumenta la velocità di rotazione ($\omega' > \omega$).

La **regolazione di campo** Φ_u produce invece una **roto-traslazione della caratteristica di coppia** e una **rotazione della caratteristica di corrente**. Aumentando il flusso di eccitazione:

- diminuisce la velocità di funzionamento a vuoto del motore,
- aumenta la sua coppia di spunto,
- la corrente di spunto non viene modificata.



14

Regolazione motore ad eccitazione separata

In relazione al punto di lavoro a carico, diminuendo il flusso utile di macchina, aumenta generalmente la velocità di rotazione ($\omega > \omega'$).

La diminuzione del flusso, attuata tramite la diminuzione della corrente di eccitazione, viene indicata con il termine "deflussaggio".

Si osserva che, in assenza di coppia resistente, se il flusso venisse annullato mantenendo applicata la tensione di armatura, il motore ruoterebbe ad una velocità teoricamente infinita.

Tale condizione, assolutamente da evitare, viene indicata come fuga in velocità del motore a corrente continua.

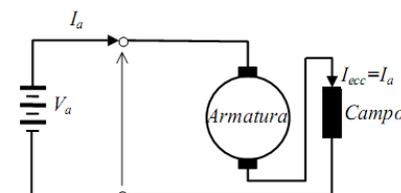
Per i motori a magneti permanenti è, ovviamente, possibile la sola regolazione di armatura.

15

Motore ad eccitazione serie

Nel motore ad eccitazione serie i due avvolgimenti (armatura, campo) sono collegati in serie ed alimentati attraverso un'unica sorgente; essi sono quindi percorsi dalla stessa corrente.

Questo tipo di collegamento condiziona le dimensioni dei conduttori dell'avvolgimento di eccitazione, che dovranno essere adeguate a sopportare l'intera corrente di armatura.



16

Motore ad eccitazione serie

Tipicamente la f.m.m. di eccitazione è in questo caso ottenuta con un numero contenuto di spire di grande sezione.

Al contrario, nel caso di eccitazione separata, lo stesso valore di f.m.m può essere realizzato con un numero maggiore di spire percorse da corrente più piccola e quindi la sezione dei conduttori risulta contenuta e le bobine di eccitazione possono essere realizzate con minore difficoltà.

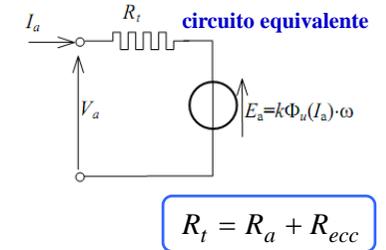
Come spiegheremo nel seguito, una particolarità del motore ad eccitazione serie è quella di poter funzionare sia in corrente continua che in corrente alternata.

Come motore in c.a. esso trova oggi una discreta diffusione nel campo delle motorizzazioni monofase per applicazioni domestiche o per apparecchiature portatili (es. aspirapolvere, asciugacapelli, frullatori, trapani): con questo tipo di alimentazione, esso è noto come **motore universale** (o motore monofase a collettore).

17

Regolazione del motore ad eccitazione serie

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_u = \Phi_u(I_a) \\ C = k \cdot \Phi_u \cdot I_a \\ V_a = R_t I_a + E_a = R_t I_a + k \cdot \Phi_u(I_a) \cdot \omega \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_u = k_2 I_a \quad (\text{ipotesi: lontani dalla saturazione}) \\ C = k \cdot k_2 \cdot I_a^2 \\ V_a = R_t I_a + E_a = R_t I_a + k \cdot k_2 \cdot I_a \cdot \omega \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_a}{R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega} \\ E_a = k \cdot k_2 \cdot \omega \cdot \frac{V_a}{R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega} \\ C = k \cdot k_2 \cdot \left(\frac{V_a}{R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega} \right)^2 \end{array} \right.$$

18

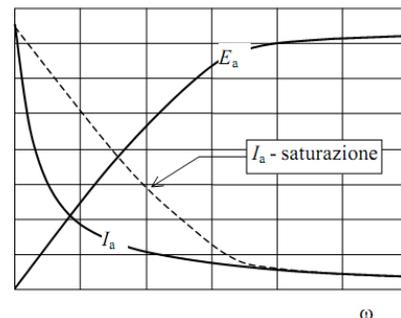
Regolazione del motore ad eccitazione serie

Nella figura seguente è riportato l'andamento della corrente di armatura assorbita da un motore ad eccitazione serie al variare della velocità di rotazione (linea continua).

Nelle equazioni precedenti, la dipendenza del flusso Φ_u dalla corrente I_a è stata approssimata in modo lineare (coefficiente k_2 costante).

In realtà, la legge che lega il flusso Φ_u alla corrente I_a è non lineare.

Per tenere conto della non linearità della relazione tra flusso e corrente, è possibile approssimare l'effetto della saturazione con una riduzione del coefficiente k_2 : la linea a tratti approssima questo effetto nell'andamento della corrente.

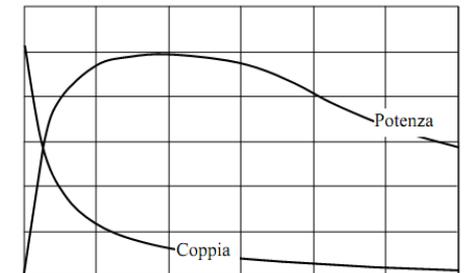


19

Regolazione del motore ad eccitazione serie

In figura sono illustrati gli andamenti della coppia e della potenza meccanica erogata al variare della velocità di rotazione.

All'avviamento, questo motore può sviluppare una coppia motrice molto elevata: questo è uno dei vantaggi principali del motore a eccitazione serie (utile ad es. per apparecchi di sollevamento).



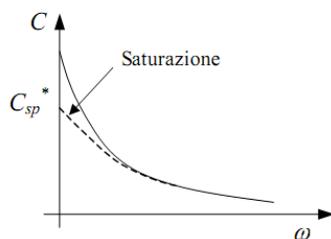
Caratteristiche di coppia e di potenza per un motore ad eccitazione serie.

Se si tiene conto della saturazione (riduzione del coefficiente k_2), la coppia di avviamento fornita dal motore diminuisce rispetto al caso di legame lineare tra flusso e corrente: ciò è desumibile dall'espressione della coppia, imponendo velocità nulla ed osservando che in presenza di saturazione (correnti di armatura elevate) il coefficiente k_2 diminuisce.

20

Regolazione del motore ad eccitazione serie

In figura sono illustrati gli andamenti qualitativi della caratteristica di coppia in presenza (linea tratteggiata) o meno (linea continua) di saturazione magnetica.



IMPORTANTE: La coppia e la corrente di una macchina a eccitazione serie sono sempre positive al variare della velocità (con alimentazione in c.c.).

La potenza erogata resta in pratica costante in un ampio intervallo di velocità di rotazione e la macchina funziona sempre come motore. Per queste caratteristiche il motore ad eccitazione serie è stato a lungo utilizzato per la trazione elettrica.

Si noti che la caratteristica di coppia non passa nel quarto quadrante del piano $C-\omega$; ne consegue che questo motore, al contrario di quello a eccitazione separata, non è in grado di frenare il carico meccanico.

21

Regolazione del motore ad eccitazione serie

Questo tipo di motore produce sempre coppia, qualunque sia la velocità di rotazione e, pertanto, in assenza di coppia resistente applicata all'albero rischia di raggiungere velocità eccessive che possono provocarne la distruzione (problema della fuga in velocità): è da evitare il funzionamento a vuoto.

IMPORTANTE: i motori ad eccitazione serie possono funzionare anche in corrente alternata, grazie al fatto che il segno della coppia non dipende dal segno della tensione di alimentazione.

Il motore deve essere appositamente progettato per essere alimentato in alternata:

- il circuito magnetico di statore e quello di rotore devono essere totalmente laminati per limitare le perdite nel ferro.
- occorre tener conto dell'induttanza di dispersione.

Il risultato è comunque un motore meno efficiente di un motore analogo alimentato in corrente continua.

22

Motore universale a collettore

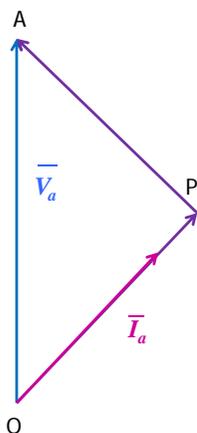
L'equazione elettrica in regime sinusoidale di pulsazione ω_e (in generale $\omega_e \neq \omega$) è:

$$\bar{V}_a = (R_t + j\omega_e L_t) \cdot \bar{I}_a + k \cdot k_2 \cdot \bar{I}_a \cdot \omega$$

$$\bar{V}_a = \underbrace{(R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega) \cdot \bar{I}_a}_{OP'} + \underbrace{j\omega_e L_t \cdot \bar{I}_a}_{P'A}$$

Tale equazione può essere rappresentata attraverso un diagramma vettoriale: in ogni condizione di funzionamento, il vettore tensione di alimentazione è equilibrato da due cadute di tensione ortogonali OP' e $P'A$.

Il termine L_t rappresenta l'induttanza complessiva dei due avvolgimenti di armatura e di eccitazione disposti in serie: naturalmente tale termine si annulla nel funzionamento in corrente continua.



23

Motore universale a collettore

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{V}_a}{(R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega) + j\omega_e L_t} \quad |\bar{I}_a| = \frac{|\bar{V}_a|}{\sqrt{(R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega)^2 + (\omega_e L_t)^2}}$$

Il bilancio di potenze è:

$$P_e = \bar{V}_a \times \bar{I}_a = \underbrace{R_t \bar{I}_a \times \bar{I}_a}_{\text{Perdite Joule}} + \underbrace{j\omega_e L_t \bar{I}_a \times \bar{I}_a}_{\text{Potenza reattiva (valor medio nullo)}} + \underbrace{k \cdot k_2 \cdot \omega \cdot \bar{I}_a \times \bar{I}_a}_{\text{Potenza meccanica}}$$

Dividendo la potenza meccanica per la velocità ω si ottiene la seguente espressione per la coppia media:

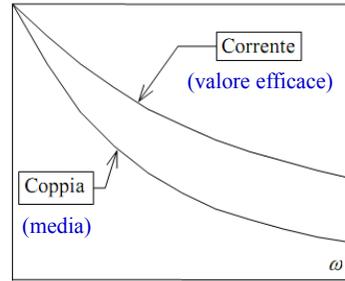
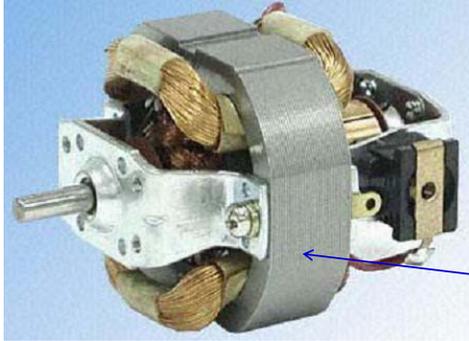
$$C = k \cdot k_2 \cdot I_a^2 = \frac{k \cdot k_2 \cdot V_a^2}{(R_t + k \cdot k_2 \cdot \omega)^2 + (\omega_e L_t)^2}$$

24

Motore universale a collettore

L'andamento della coppia media è quello rappresentato in figura.

La coppia istantanea risulta pulsante e l'ondulazione di coppia è a frequenza doppia di quella dell'alimentazione.



Motore universale a collettore: diagramma della coppia media e della corrente efficace.

Esempio di motore universale: da osservare in particolare lo statore laminato.

Avviamento del motore a collettore

Per limitare la corrente di avviamento, le strade percorribili sono due:

- Diminuzione della tensione di alimentazione V_a tramite una sorgente di alimentazione regolabile.
- Aumento della resistenza del circuito (R_a o R_p , a seconda del tipo di eccitazione) tramite l'interposizione di un reostato di avviamento tra l'alimentazione e il motore.

La prima soluzione richiede l'impiego di un convertitore elettronico di potenza e costituisce un tecnica energeticamente efficiente.

La seconda soluzione, più economica, ha il difetto di dissipare potenza nel reostato di avviamento e quindi, nel caso di frequenti avviamenti, di ridurre il rendimento del motore.

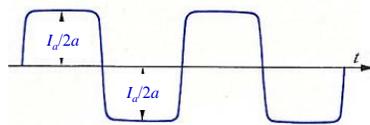
La commutazione

Abbiamo visto che, in generale, se l'avvolgimento di rotore è articolato in **a coppie di vie interne** e se **I_a è la corrente totale al rotore**, la corrente che entra da ciascuna spazzola vale:

$$I = \frac{I_a}{a}$$

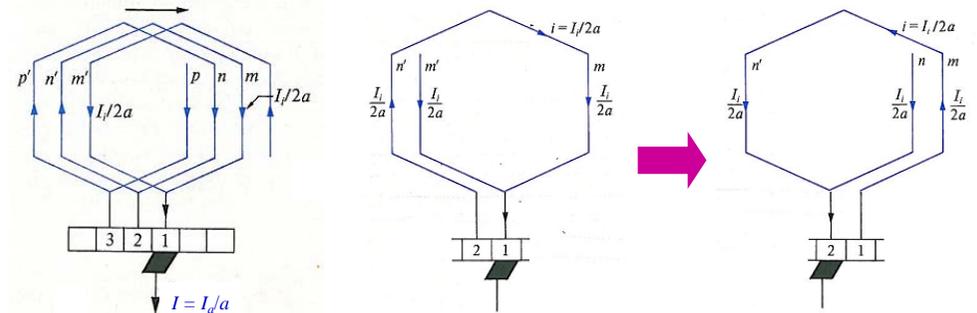
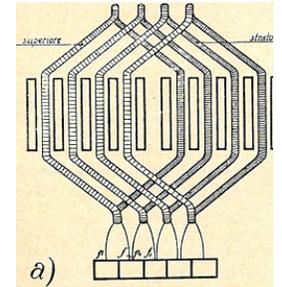
A sua volta, la corrente entrante da una spazzola si divide a metà nelle due vie interne collegate alla lamella del collettore con cui la spazzola è in contatto in un determinato istante di tempo.

Poiché i conduttori facenti parte di una via interna girano con il rotore, essi passeranno periodicamente dalla zona in cui la corrente è entrante a quella in cui è uscente, per cui, periodicamente, la corrente che circola in essi cambierà verso.



La commutazione

Se le spazzole sono posizionate lungo l'asse interpolare, nella sezione facente capo alle due lamelle che si trovano a contatto con una spazzola in un certo istante, si avrà il **rovesciamento della corrente**. Questo è il fenomeno della **commutazione**.



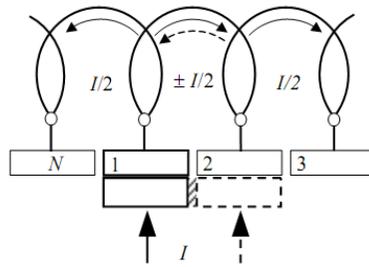
La commutazione

Le spazzole e il collettore forniscono il mezzo con cui addurre la corrente all'avvolgimento di armatura.

Durante il moto, le spazzole strisciano sulla superficie del collettore e mediante questo contatto la corrente è commutata tra le diverse lamelle agli istanti appropriati.

Il termine commutazione indica l'inversione della corrente nei conduttori dell'avvolgimento di armatura quando la spira (o la sezione) a cui appartengono viene messa in cortocircuito attraverso il contatto simultaneo dei suoi terminali con la spazzola.

Questo ragionamento è valido per l'avvolgimento embricato, mentre per l'ondulato la situazione è diversa, ma il fenomeno della commutazione si manifesta comunque.



29

La commutazione ideale o per resistenza

Per comprendere il fenomeno, analizziamo per prima la possibilità che la commutazione avvenga in modo ideale.

Supponiamo cioè che, durante il moto di rotazione della macchina, nella spira che commuta non siano presenti f.e.m. indotte di alcun genere.

In questo caso il fenomeno ideale sarà regolato esclusivamente dalla resistenza.

Per la trattazione si assumeranno le seguenti ulteriori ipotesi semplificative:

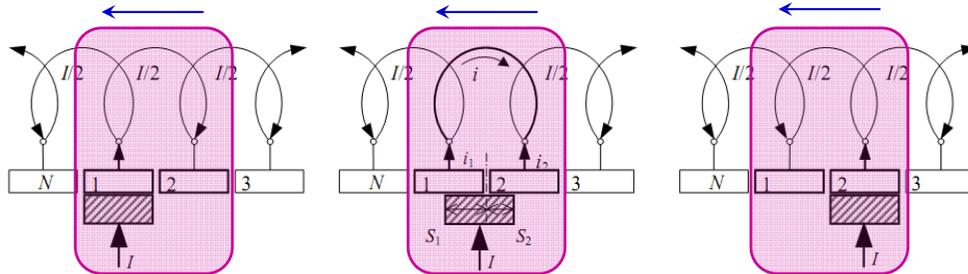
- La larghezza della spazzola è uguale alla larghezza di una lamella.
- L'unica resistenza presa in considerazione è la resistenza di contatto tra lamelle e spazzola, che è in ogni istante inversamente proporzionale alla superficie di contatto tra la spazzola e ciascuna lamella.
- Il regime di correnti nella restante parte dell'avvolgimento non è perturbato dalla commutazione.

30

La commutazione ideale o per resistenza

Riferendosi alla sequenza temporale illustrata in figura, si indichi con T_c la durata di una commutazione, cioè l'intervallo di tempo impiegato, nel moto di rotazione, dalla lamella 2 del collettore a sostituirsi alla lamella 1 sotto la spazzola: in questo intervallo di tempo, la corrente nella spira che fa capo alle lamelle 1 e 2 si inverte di segno.

A partire dall'istante in cui la lamella 2 entra in contatto con la spazzola, la corrente entrerà dalla spazzola al collettore non solo dalla lamella 1, ma anche dalla 2.



T_c è nell'ordine dei millisecondi

31

La commutazione ideale o per resistenza

La **corrente I entrante dalla spazzola si ripartisce tra le lamelle 1 e 2 nelle quote i_1 e i_2** proporzionali alle aree di spazzola affacciate alle due lamelle (S_1 e S_2):

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

Considerato che all'istante 0: $i_1 = I$ e $i_2 = 0$, mentre all'istante T_c : $i_1 = 0$ e $i_2 = I$, in un generico istante t compreso tra 0 e T_c si ha.

$$i_1 = I \left(1 - \frac{t}{T_c} \right) \quad i_2 = I \frac{t}{T_c}$$

In questo caso si parla di commutazione lineare, in quanto l'andamento delle correnti coinvolte nella commutazione ha un andamento lineare nel tempo.

La **corrente i nella spira in commutazione** cambia segno nel tempo T_c , ossia passa da $+I/2$ a $-I/2$:

$$i = i_1 - \frac{I}{2} = \frac{I}{2} - i_2 = \frac{I}{2} \left(1 - 2 \frac{t}{T_c} \right)$$

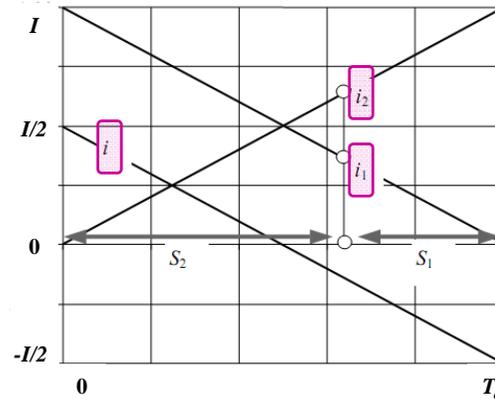
32

La commutazione ideale o per resistenza

Poiché le correnti i_1 e i_2 entranti nelle lamelle risultano in ogni istante proporzionali alla rispettiva sezione di contatto con la spazzola, la densità di corrente sul contatto spazzola-collettore rimane costante durante tutta la commutazione:

$$\frac{i_1}{S_1} = \frac{i_2}{S_2} = \frac{I}{S} = \text{cost.}$$

Quando la spazzola abbandona la lamella 1, nello stesso istante si annulla la corrente nella lamella 1: una commutazione che avvenga secondo questa regola viene detta commutazione completa.

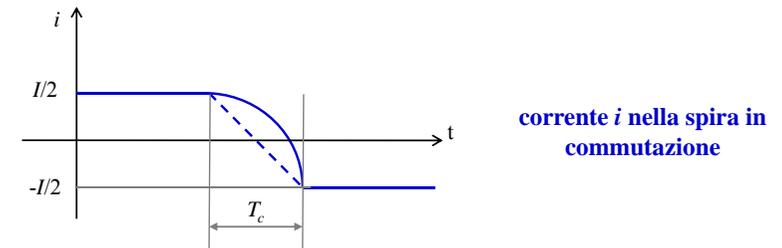


33

La commutazione con fenomeni induttivi

In realtà, nella spira (o sezione) in commutazione si manifestano fenomeni di natura induttiva, che modificano le condizioni ideali di commutazione per resistenza: questo accade perché nella spira in commutazione la corrente non è costante, ma varia da $+I/2$ a $-I/2$ (o viceversa) nell'intervallo di tempo T_c (nell'ordine dei millisecondi).

A causa di questa variazione di corrente, la spira (o sezione) diventerà sede di una f.e.m. indotta e di conseguenza la commutazione non sarà lineare, ma avrà un andamento del tipo indicato in figura:



corrente i nella spira in commutazione

34

La commutazione con fenomeni induttivi

In pratica, nella spira (o sezione) in commutazione risultano presenti due tipi di f.e.m. che tendono a ritardare l'inversione della corrente i .

Una **prima f.e.m.** è causata dall'autoinduttanza della spira (o sezione): i suoi lati sono immersi nelle cave, e quindi nel ferro, perciò essa costituisce un circuito fortemente induttivo ($L \propto \mu$).

Durante la commutazione, la corrente che circola nella spira (o sezione) varia da $+I/2$ a $-I/2$ e quindi varia il flusso magnetico concatenato con essa: di conseguenza, in essa si induce una f.e.m. di autoinduzione che, secondo la legge di Faraday-Lenz, si oppone alla variazione del flusso prodotto dalla corrente, ossia si oppone a qualunque variazione della corrente stessa (tende a mantenere la corrente al valore iniziale, quindi ritarda la variazione della corrente). La sua espressione è del tipo:

$$E_L = L \frac{di}{dt} \quad \text{f.e.m. di autoinduzione}$$

35

La commutazione con fenomeni induttivi

Una **seconda f.e.m.** è invece causata dalla presenza di campo magnetico radiale nella zona di commutazione, generato dalla reazione d'indotto nel piano interpolare della macchina.

Esso produce nella sezione in fase di commutazione, a causa della rotazione del rotore, una f.e.m. che tende a impedire l'inversione della corrente nella sezione, ossia che ritarda anch'essa la commutazione.

Questa f.e.m. risulta proporzionale all'induzione e alla velocità di rotazione:

$$E_R = K_R B_R \omega \quad \text{f.e.m. di reazione di indotto}$$

(del tipo: $e = B \cdot l \cdot v$)

ω = velocità angolare del motore

K_R = costante che dipende dalla lunghezza complessiva dei conduttori in fase di commutazione e dal raggio del rotore

B_R = valore di induzione magnetica prodotto dalla reazione d'indotto nella zona di commutazione

36

La commutazione con fenomeni induttivi

Le f.e.m. di autoinduzione e quella di reazione di indotto (dette complessivamente **tensioni di reattanza**) provocano gli effetti illustrati nel grafico precedente, ossia:

- La densità di corrente sul contatto spazzola-collettore non è più costante durante la commutazione: in particolare, nella zona posteriore della spazzola (che sta abbandonando la lamella) la densità di corrente è molto grande (elevata corrente, piccola area di contatto);
- La corrente nella spira in commutazione si inverte molto rapidamente durante gli ultimi istanti della commutazione: in questi istanti, la tensione di autoinduzione ($L \cdot di/dt$) nella spira (o sezione) in commutazione è molto elevata.

Il primo fenomeno provoca un fortissimo riscaldamento e un aumento del campo elettrico nella zona di spazzola a contatto con la lamella che viene abbandonata (la relazione $E = \rho J$ lega il campo elettrico E alla densità di corrente J e alla resistività ρ del contatto spazzola-lamella).

37

La commutazione con fenomeni induttivi

Se il campo elettrico supera la rigidità del dielettrico circostante (aria) si ottiene l'innesco di un arco elettrico tra spazzola e lamella ancor prima che il contatto reciproco sia cessato (ionizzazione dell'aria, effetto corona).

Anche il secondo fenomeno contribuisce a far scoccare la scintilla fra l'esterno della spazzola e la lamella del collettore che ha appena abbandonato.

Si può dire che entrambi i fenomeni provocano un aumento della differenza di potenziale tra la spazzola e la lamella che sta per essere abbandonata: se la rigidità dielettrica dell'aria viene superata dal campo elettrico presente tra spazzola e lamella, si possono verificare piccole scariche elettriche, che prolungano il passaggio della corrente attraverso la lamella uscente sotto forma di un piccolo arco elettrico.

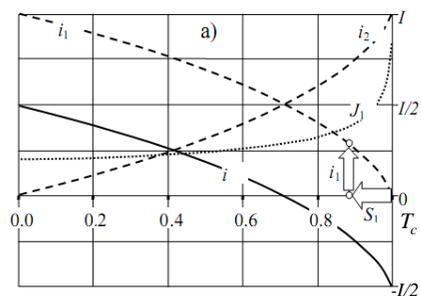
Le scintille prodotte da questo fenomeno potrebbero provocare in breve tempo l'usura delle spazzole e del collettore.

38

La commutazione con fenomeni induttivi

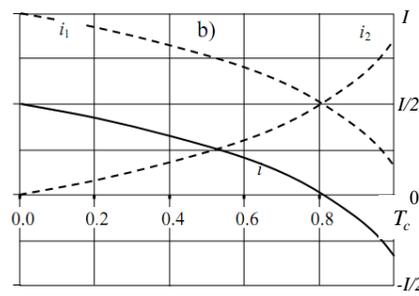
In conseguenza ai fenomeni induttivi, la commutazione può essere completa o meno.

Nel 1° caso, all'istante finale T_c in cui la spazzola abbandona la lamella 1, nonostante il ritardo introdotto dai fenomeni induttivi, la corrente nella lamella 1 si annulla.



commutazione completa

Nel 2° caso, quando la spazzola abbandona la lamella 1, la corrente di lamella non si è ancora annullata: il transitorio perdura oltre il tempo T_c ed è ancora più facile che si manifesti un arco elettrico (oltre alle considerazioni già esposte).



commutazione incompleta

39

Metodi per migliorare la commutazione

La presenza di arco elettrico (scintille) in fase di commutazione crea un serio problema per il corretto funzionamento della macchina a corrente continua, in quanto accelera l'usura di spazzole e collettore, e, in casi estremi, può portare al cortocircuito tra le due spazzole di polarità opposta attraverso la propagazione degli archi elettrici lungo tutto il collettore (flash al collettore).

Per evitare questi fenomeni, è necessario introdurre degli accorgimenti per rendere la commutazione più possibile lineare, ossia per ridurre (compensare) la tensione di reattanza:

- 1) Scelta di **spazzole di maggiore resistività**: può consentire di risolvere i problemi di cattiva commutazione, ma peggiora necessariamente le perdite del motore.
- 2) **Riduzione dell'induttanza** della spira in commutazione o **aumento del tempo T_c di commutazione**.

40

Metodi per migliorare la commutazione

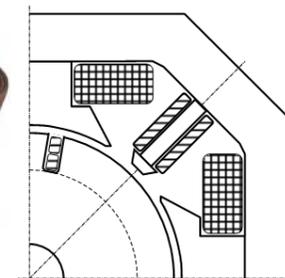
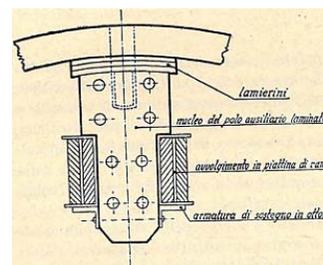
2.1) La **riduzione dell'induttanza** può essere ottenuta: attraverso un opportuno disegno delle cave di rotore, ossia tramite cave aperte che aumentano la riluttanza del percorso del flusso disperso e quindi ne riducono l'induttanza; attraverso l'adozione di circuiti di indotto in aria (iron-less rotor), che è realizzabile solo nel campo delle piccole potenze (da pochi Watt ad al massimo centinaia di Watt);

2.2) L'**aumento del tempo di commutazione** (a pari velocità di rotazione) si ottiene dimensionando la spazzola in modo che sia estesa per più di una lamella (generalmente una lamella e mezza). Con questo si ha anche il vantaggio di ridurre la densità di corrente nella spazzola. Se però la spazzola ricopre più di una lamella, la commutazione non riguarda più una sola spira alla volta e la descrizione del fenomeno di commutazione si complica ulteriormente: infatti, sulla spira in commutazione agiscono, oltre alla f.e.m. di auto induttanza, le f.e.m. di mutua induttanza prodotte dalle altre spire vicine, anch'esse in fase di commutazione.

41

Poli ausiliari di commutazione

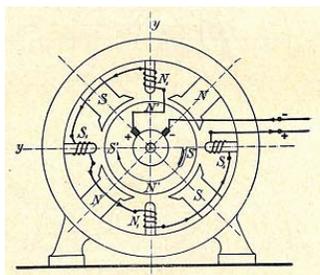
- 3) Predisposizione di **poli ausiliari di commutazione**, che inducono nella spira in commutazione una f.e.m. atta a favorire l'inversione della corrente. Essi vengono disposti con asse coincidente con l'asse interpolare, hanno piccole dimensioni trasversali e il loro numero è generalmente uguale a quello dei poli principali. In questo modo si ottiene una riduzione sensibile della densità di corrente al termine della commutazione e un corrispondente miglioramento delle condizioni di commutazione. Questo metodo è quasi sempre usato per potenze > 1 kW.



42

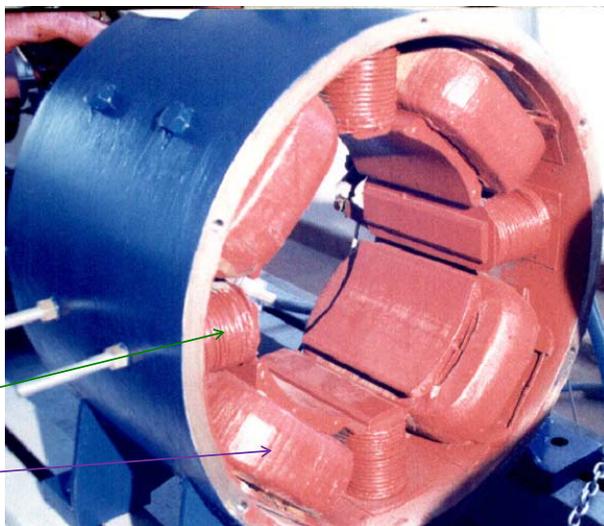
Poli ausiliari di commutazione

Macchina in c.c. a 4 poli,
con poli ausiliari di
commutazione:



poli ausiliari

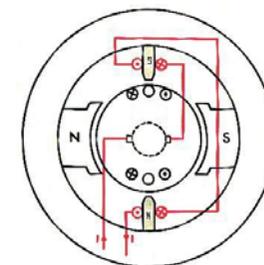
poli principali



43

Poli ausiliari di commutazione

I **poli di commutazione** sono eccitati attraverso un avvolgimento percorso dalla stessa corrente di armatura (in serie). In questo modo essi producono, nella zona di commutazione, un campo magnetico di verso e intensità tali da indurre nelle sezioni in commutazione delle f.e.m. in grado di controbilanciare le tensioni di reattanza.



Le tensioni di reattanza assumono valori notevoli e i poli di commutazione non riescono da soli a determinare una buona commutazione quando:

- la potenza della macchina è molto grande (elevata corrente di armatura, elevata coppia),
- la velocità di rotazione è elevata,
- le variazioni di carico sono notevoli e rapide.

In questi casi (> 150 kW) occorre predisporre anche gli avvolgimenti compensatori.

44

Spostamento delle spazzole

4) Per macchine di potenza < 1 kW, in anni passati si ricorreva allo **spostamento delle spazzole** dall'asse interpolare all'asse neutro (ossia l'asse geometrico passante per i punti dove si annulla il campo risultante al traferro).

Questa soluzione aiuta l'inversione della corrente nella spira (o sezione) in commutazione, ma determina una forte smagnetizzazione della macchina, con una conseguente vistosa diminuzione della f.e.m. da vuoto a carico.

Infatti, lo spostamento delle spazzole dall'asse interpolare all'asse neutro determina uno spostamento del campo d'indotto rispetto ai poli induttori e fa sì che il campo d'indotto non sia più trasverso rispetto al campo induttore.

Quindi, sotto ciascun polo induttore viene ad agire una componente significativa di campo d'indotto, che si oppone al campo induttore e determina una smagnetizzazione del polo molto più grande di quella dovuta alla distorsione del campo.

La soluzione dello spostamento delle spazzole attualmente è stata abbandonata.

La commutazione

In conclusione, la commutazione è un evento molto delicato nel funzionamento della macchina in corrente continua. Tra i fattori che influenzano il fenomeno vi sono:

- tipo di materiale della spazzola,
- tipo di materiale del collettore,
- pressione delle spazzole sulle lamelle,
- densità di corrente nella zona di contatto spazzola-lamella,
- condizioni ambientali come temperatura, umidità, ecc.

Si osserva che il fenomeno della commutazione, se non opportunamente corretto, limita in potenza la macchina in c.c. in quanto:

- la commutazione peggiora all'aumentare della velocità di rotazione ω ;
- la commutazione peggiora all'aumentare della corrente di armatura I_a (e di conseguenza della coppia prodotta C).