



La macchina a collettore (o in corrente continua)

4° parte

Lucia FROSINI

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

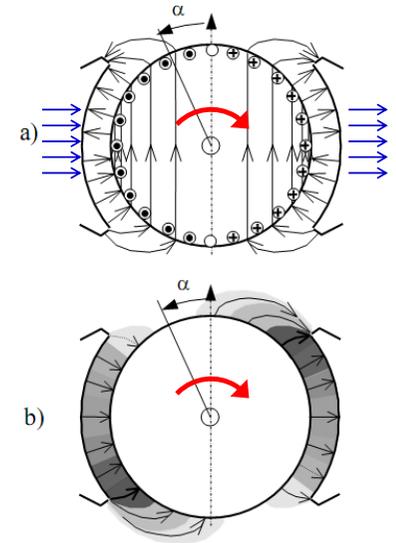
1

L. Frosini

Saturazione dovuta alla reazione di indotto

Abbiamo visto che, nel passaggio da vuoto a carico, il motore in c.c. subisce una smagnetizzazione parziale del flusso utile: poiché i campi di eccitazione e di armatura sotto metà espansione polare sono equiversi, mentre sotto l'altra metà sono opposti, il campo risultante al traferro si rafforza sotto mezzo polo e si indebolisce nella parte restante.

L'asse neutro (ossia l'asse geometrico passante per i punti dove si annulla il campo risultante al traferro) non coincide più con l'asse interpolare, ma risulta ruotato rispetto a quest'ultimo.



a) Linee di campo dovute separatamente all'induttore (in blu) e all'indotto.

b) Linee di campo risultanti da eccitazione e reazione d'indotto.

2

L. Frosini

Saturazione dovuta alla reazione di indotto

Idealmente, se fosse assente il fenomeno della saturazione, come conseguenza della simmetria dell'azione di eccitazione e della reazione d'indotto, l'entità del rafforzamento del campo sotto mezza espansione polare sarebbe compensata dal corrispondente indebolimento sotto l'altra metà.

Il flusso utile, cioè il flusso complessivo che attraversa il piano neutro, non verrebbe modificato.

In questa situazione, il flusso utile non dipenderebbe dalla corrente di armatura, ma solo da quella di eccitazione, ovvero $\Phi_u = \Phi_u(I_e)$.

Nella realtà, nelle zone di rafforzamento del campo possono subentrare fenomeni di saturazione che limitano localmente la crescita dell'induzione.

Questa saturazione locale implica che l'entità del rafforzamento del campo sotto mezza espansione polare è minore dal corrispondente indebolimento sotto l'altra metà.

3

L. Frosini

Saturazione dovuta alla reazione di indotto

La saturazione dovuta alla reazione di indotto comporta quindi una riduzione del flusso utile.

Si parla di effetto **smagnetizzante** e **distorcente** della reazione d'indotto, che si può riassumere nel seguente legame funzionale:

$$\Phi_u = \Phi_u(I_e, I_a)$$

Si osserva che:

- L'entità della smagnetizzazione è tanto maggiore quanto più è elevata la corrente di armatura.
- L'effetto smagnetizzante della reazione di indotto può essere quantificato come una riduzione equivalente della corrente di eccitazione.
- A causa della saturazione dovuta alla reazione d'indotto, i due avvolgimenti della macchina risultano magneticamente accoppiati.

4

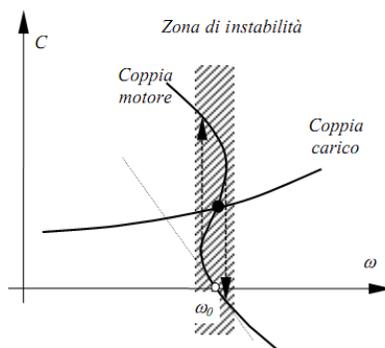
Saturazione dovuta alla reazione di indotto

Si ricorda che, in un motore ad eccitazione separata, una diminuzione di flusso utile produce una roto-traslazione della caratteristica di coppia e una rotazione della caratteristica di corrente.

In relazione al punto di lavoro a carico, diminuendo il flusso utile, aumenta generalmente la velocità di rotazione.

Se gli effetti della reazione di indotto sono intensi, si possono avere deformazioni delle caratteristiche elettromeccaniche del motore:

di conseguenza, carichi meccanici che intercettino la caratteristica del motore in corrispondenza di queste zone deformate possono dar luogo ad un funzionamento instabile e irregolare.



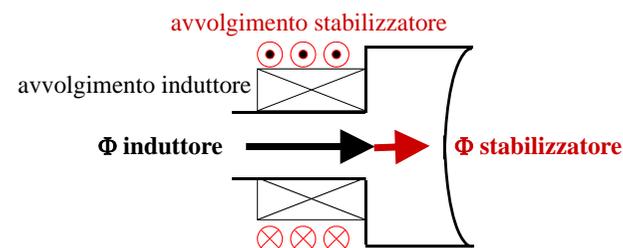
5

Metodi per compensare la reazione di indotto

Per eliminare o ridurre questi disturbi, possono essere adottate diverse soluzioni.

Per macchine **da 1 kW a 10 kW** (circa), l'impiego dei **poli di commutazione** produce non solo un miglioramento della commutazione, ma anche una compensazione della reazione di indotto.

Per macchine **da 10 kW a 150 kW** (circa), si utilizzano **avvolgimenti stabilizzatori**, sempre collegati in serie con l'avvolgimento di indotto, ma disposti sui nuclei polari di statore, in modo da produrre un flusso che si somma a quello dell'induttore:

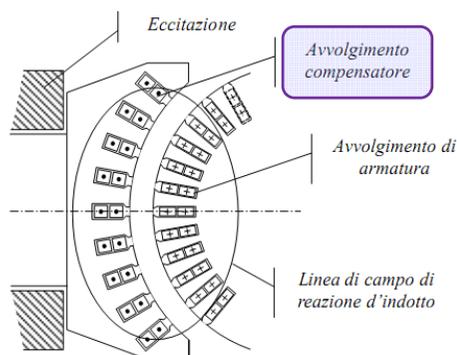


6

Metodi per compensare la reazione di indotto

Per macchine di grande potenza (**> 150 kW**), si adotta il metodo più efficiente (ma anche più costoso) per compensare la reazione di indotto: gli **avvolgimenti compensatori**.

Le espansioni polari della macchina vengono scanalate e nelle cave viene distribuito un avvolgimento percorso dalla stessa corrente di armatura, ma in modo tale che i suoi conduttori siano percorsi dalla corrente in verso opposto a quella dei conduttori di indotto affacciati.



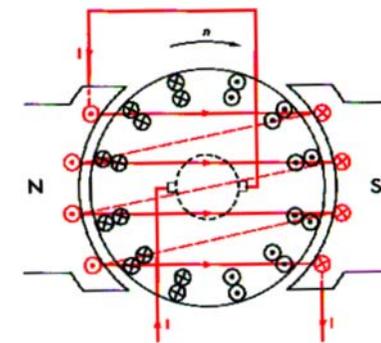
La f.m.m. prodotta dagli avvolgimenti compensatori è così uguale e contraria a quella dovuta alla reazione di indotto.

7

Avvolgimenti compensatori

Quindi, la presenza dei conduttori disposti nelle espansioni polari e percorsi da corrente di armatura fa in modo che le linee di campo, che sarebbero prodotte dalla reazione d'indotto, non siano più sostenute da alcuna f.m.m.

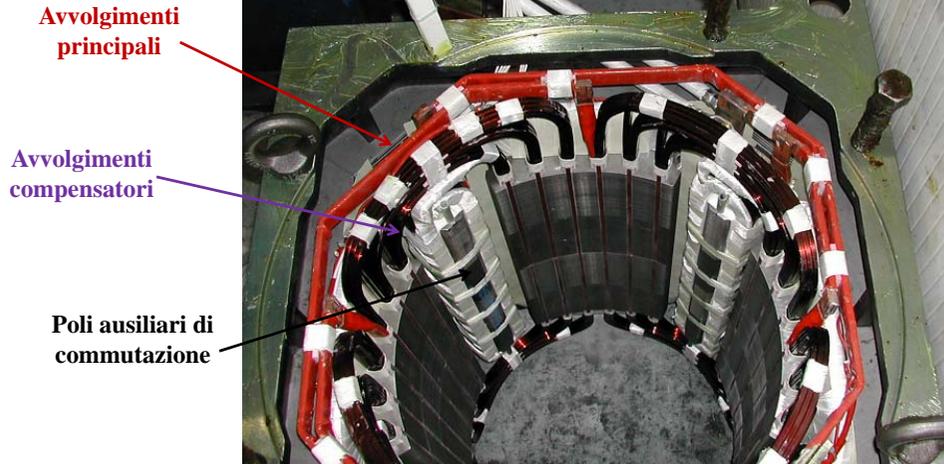
In pratica, gli avvolgimenti compensatori neutralizzano la reazione di indotto.



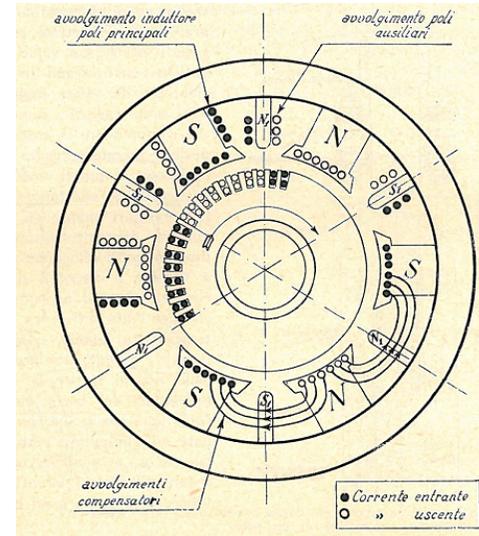
Pertanto, l'effetto distorcitore sotto le espansioni polari viene eliminato e con esso decadono i problemi di saturazione e smagnetizzazione locale.

8

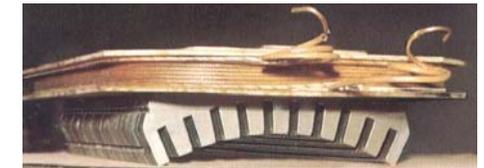
Avvolgimenti compensatori e poli ausiliari



Avvolgimenti compensatori e poli ausiliari



Avvolgimento principale:



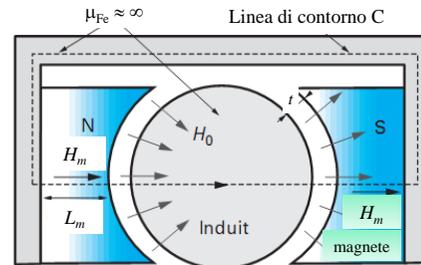
Reazione di indotto coi magneti permanenti

Riprendiamo le considerazioni fatte su una macchina in c.c. a magneti permanenti. Avevamo considerato la legge di circuitazione magnetica, ipotizzando che l'induzione al traferro fosse uguale a quella nel magnete: in generale, è il flusso che rimane costante e l'induzione si conserva se le superfici di traferro S_t e di magnete S_m sono uguali:

$$\begin{cases} H_m L_m + H_0 t = 0 \Rightarrow H_0 = -\frac{H_m L_m}{t} \\ \Phi = B_m S_m = B_0 S_t \end{cases}$$

$$\Rightarrow B_m = B_0 \frac{S_t}{S_m} = \mu_0 H_0 \frac{S_t}{S_m} = -\mu_0 H_m \frac{L_m \cdot S_t}{t \cdot S_m}$$

Se: $S_m = S_t \Rightarrow B_m = -\mu_0 H_m \frac{L_m}{t}$
retta di traferro



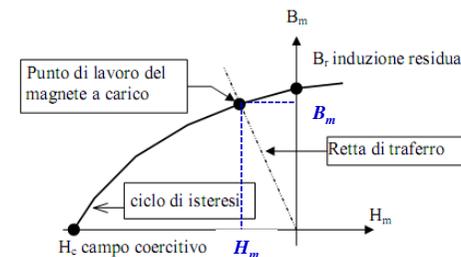
In generale: $B_m = -\mu_0 H_m \frac{L_m}{t} \cdot \frac{S_t}{S_m}$

Reazione di indotto coi magneti permanenti

Un magnete permanente utilizzato per l'eccitazione di un motore in c.c. lavora nel 2° quadrante del piano $B-H$ del suo ciclo di isteresi.

Il punto di lavoro del magnete (H_m, B_m) è determinato dall'intersezione tra il ciclo di isteresi del magnete e la cosiddetta *retta di traferro*, in relazione alla geometria del circuito magnetico in cui è inserito.

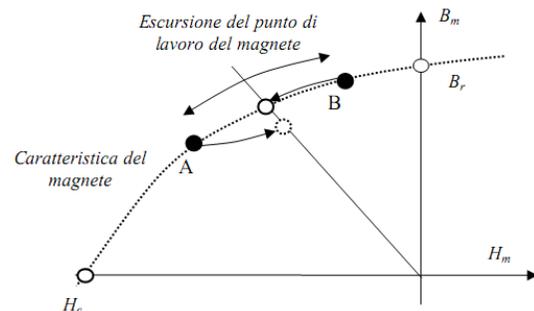
Oppure, una volta fissato il punto di lavoro (H_m, B_m), è possibile determinare il volume ($S_m \cdot L_m$) di magnete necessario a produrre al traferro il flusso desiderato.



Reazione di indotto coi magneti permanenti

Quando il motore viene caricato, la reazione d'indotto modifica la distribuzione dell'induzione sotto i poli di statore, per cui le diverse porzioni del magnete affacciate al traferro sono sottoposte ad una azione di magnetizzazione-smagnetizzazione.

Il punto di lavoro del magnete nel piano (B_m , H_m) non è più unico, ma una porzione del magnete tenderà a sovra-magnetizzarsi per l'azione concorde della reazione d'indotto (punto B) e l'altra porzione subirà, invece, una smagnetizzazione per la corrispondente azione discorde della reazione d'indotto (punto A).



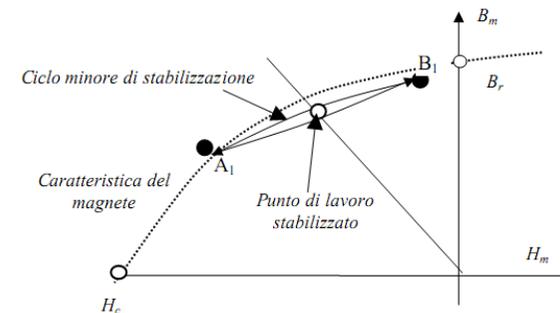
13

Reazione di indotto coi magneti permanenti

Quando il motore torna al funzionamento a vuoto e la reazione d'indotto scompare, la porzione di magnete che aveva subito la smagnetizzazione (A) non riesce a tornare esattamente alle condizioni iniziali a causa dell'isteresi magnetica del materiale: la curva di ritorno del magnete dal punto A risulta più bassa della curva di andata.

Come conseguenza, il flusso prodotto dal magnete permanente subisce una attenuazione definitiva: si dice che il motore si è (parzialmente) "smagnetizzato".

Solitamente i costruttori di motori sottopongono il magnete, montato sulla macchina, ad un ciclo di stabilizzazione, sottoponendolo a successive fasi di lavoro con correnti di armatura di segno opposto.



14

Reazione di indotto coi magneti permanenti

In conseguenza a questa operazione, il magnete non lavorerà più sulla sua caratteristica originaria, ma su un ciclo di isteresi parziale (ciclo minore) leggermente più basso.

Pertanto, se si ha cura di mantenere l'impiego del motore con assorbimenti contenuti di corrente, il magnete non subirà alcun degrado significativo delle sue prestazioni.

Se invece la corrente assorbita supera i limiti consentiti dal processo di stabilizzazione, l'effetto smagnetizzante risulterà permanente e il magnete recupererà solo una parte della sua induzione al cessare dell'azione smagnetizzante. In questo caso il motore non sarà più in grado di funzionare correttamente alla sua potenza di targa.

I costruttori forniscono il valore di corrente massima tollerabile dal motore da questo punto di vista sotto la voce "massima corrente prima della smagnetizzazione".

15

Reazione di indotto coi magneti permanenti

Poiché il ciclo di stabilizzazione del magnete è approssimabile con un andamento rettilineo e il traferro equivalente (aria+magnete) è molto alto, nelle macchine a magneti permanenti non si osservano vistosi fenomeni di riduzione del flusso utile tipici del funzionamento a carico dei motori con eccitazione elettrica.

Per questo motivo, nei motori a magneti permanenti è possibile definire, indipendentemente dal carico e con una certa precisione, un coefficiente di proporzionalità tra corrente d'armatura e coppia e un coefficiente di proporzionalità tra velocità e f.e.m. di armatura:

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

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

$$C = K_T \cdot I_a$$

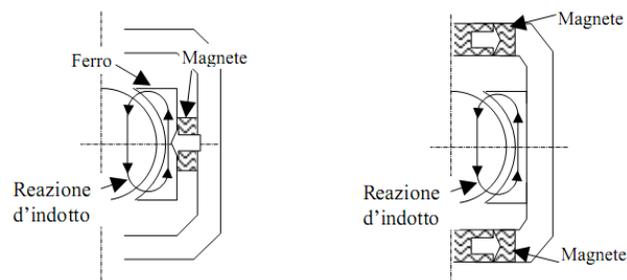
$$E_a = K_V \cdot \omega$$

motori a collettore a magneti permanenti

16

Reazione di indotto coi magneti permanenti

Per rendere più robusti i motori contro i rischi di smagnetizzazione, sono state proposte ed adottate diverse soluzioni costruttive, basate sull'allontanamento del magnete dalla zona in cui si manifesta l'effetto distorcente della reazione d'indotto.



Queste forme costruttive sono in grado di proteggere il magnete contro il rischio di smagnetizzazione, ma consentono una più facile saturazione della dentatura di rotore e una maggiore variabilità della costante di coppia nel passaggio da vuoto a carico (perché il traferro equivalente è più piccolo).

17

Osservazione sul numero dei poli

Vediamo ora perché, in generale, a parità di potenza prodotta, una macchina a 4 poli ha un peso minore e quindi un costo minore di una macchina a 2 poli.

Se si adotta l'avvolgimento ondulato, si hanno sempre 2 vie interne ($a = 1$), sia nella macchina a 4 poli, come in quella a 2 poli: quindi la corrente totale sarà la stessa per la macchina a 2 o a 4 poli e così anche la sezione dei conduttori di indotto.

Per avere la stessa tensione, nella macchina a 4 poli occorre però un flusso per polo pari alla metà di quello necessario per una macchina a 2 poli:

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

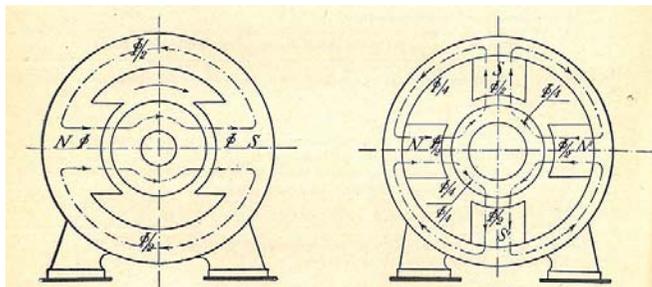
Mantenendo invariata l'induzione nel ferro B , se si dimezza il flusso per polo, potranno essere ridotte a metà tutte le sezioni dei nuclei polari, della corona di statore e della corona di rotore: il peso del ferro non si dimezza, ma risulta notevolmente ridotto.

18

Osservazione sul numero dei poli

Se si adotta l'avvolgimento embricato, il prodotto $V_a \cdot I_a$ rimane costante al variare del numero di poli ($a = p_p$): nella macchina a 4 poli si hanno 4 vie interne e la corrente totale sarà doppia rispetto a quella della macchina a 2 poli, mentre la tensione sarà la metà rispetto a quella di una macchina a 2 poli. Questa tensione si potrà ottenere con un flusso per polo pari alla metà della macchina a 2 poli, ottenendo complessivamente la stessa potenza:

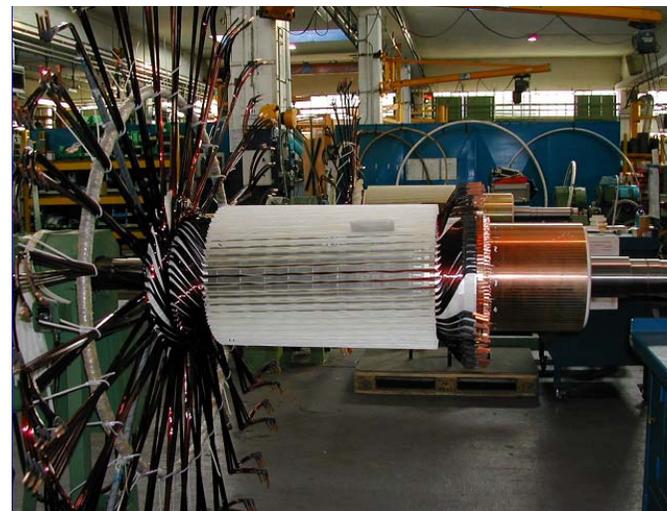
$$E_{a\text{ media}} = \frac{Z}{2\pi} \cdot \frac{p_p}{a} \cdot \Phi_u \omega = \frac{Z}{2\pi} \cdot \Phi_u \omega$$



19

Altri aspetti costruttivi

Costruzione dell'avvolgimento di rotore:



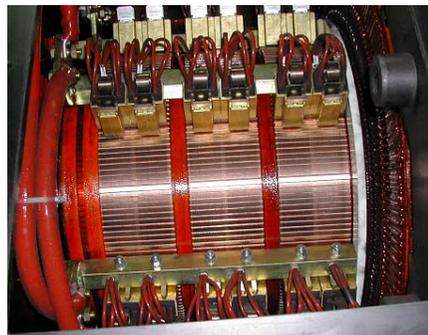
20

Altri aspetti costruttivi

Per macchine di elevata potenza il collettore può assumere grandi dimensioni; nella foto, il rotore di un motore da 1 MW ha una parte attiva che ricopre poco più della metà della lunghezza assiale complessiva. Questo è uno dei motivi che porta a preferire altre tecnologie di macchine elettriche, rispetto a quella a collettore.



Di conseguenza, anche le spazzole occupano una superficie notevole, come illustrato in questa foto, in cui il collettore risulta suddiviso in 3 sezioni.



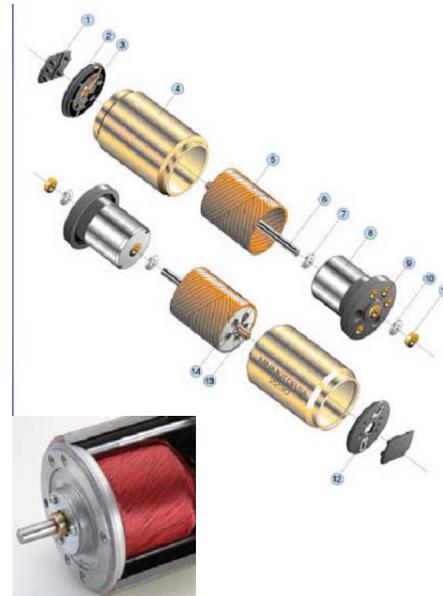
21

Motori in c.c. con rotore senza nucleo

Un particolare tipo di motore in corrente continua è quello detto senza nucleo (o senza ferro):

- l'avvolgimento di indotto è su un supporto speciale in fibra di vetro a forma di campana, in modo che l'avvolgimento sia attaccato ad esso da un solo lato;
- il ferro di indotto è attaccato all'altra estremità all'induttore (statore), che è a magneti permanenti, : quindi ruota solo l'avvolgimento.

Questa struttura permette di arrivare a potenze molto basse (0,25÷260 W).



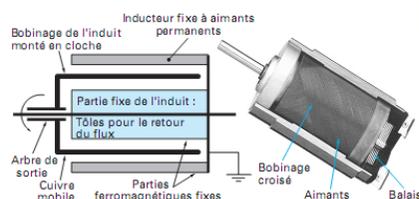
22

Motori in c.c. con rotore senza nucleo

I motori *coreless* (o *ironless*) hanno il vantaggio di ottenere rapide accelerazioni, perché hanno una massa (e quindi un'inerzia meccanica) rotorica molto bassa.

L'avvolgimento può essere in rame o in alluminio (inerzia meccanica ancora più bassa).

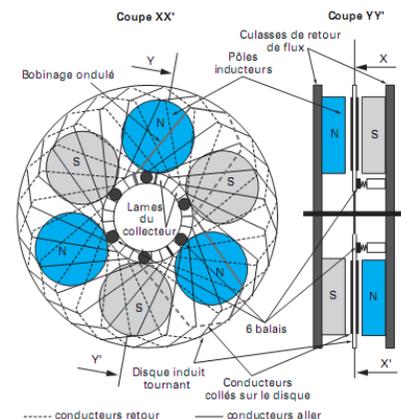
Lo svantaggio è che, proprio perché il rotore non ha il nucleo in ferro, la sua inerzia termica è molto bassa e quindi si scalda rapidamente (per questo le potenze ottenibili sono molto basse).



23

Motori in c.c. con rotore a disco

Un altro motore in c.c. dalla costruzione particolare e senza ferro di rotore è quello con indotto a disco (*printed armature* o *pancake DC motor*): il rotore è costituito da un disco in fibra di vetro e i suoi conduttori si trovano su ciascuna delle sue due facce.



Le correnti di rotore sono radiali e interagiscono con un'induzione assiale di statore (a magneti permanenti), per dare origine a una forza motrice tangenziale, e quindi a una coppia.

I fianchi laterali del motore servono per la richiusura del flusso e come supporto meccanico.

Le inerzie meccanica e termica sono molto basse.

Le potenze ottenibili vanno da 50 W a 5 kW.

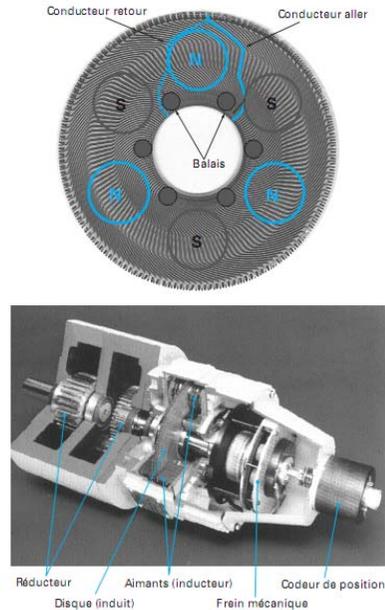
24

Motori in c.c. con rotore a disco

Il principio di funzionamento rimane lo stesso: ciascuna spira di rotore è costituita da due conduttori che vedono alternativamente un polo Nord e un polo Sud.

Questo motore presenta una grande regolarità della velocità, grazie all'elevato numero di lamelle del collettore (una per ciascun conduttore) e all'assenza di ferro di rotore (nessun effetto di attrazione tra ferro di statore e di rotore).

Questo motore garantisce un'eccellente precisione di posizionamento e un'eccellente commutazione e quindi esso è tuttora di interesse in robotica.



25

Perdite nel motore in c.c.

In generale, le perdite di una macchina in corrente continua si distinguono in:

- P_{ja} = perdite Joule di armatura
- P_{je} = perdite Joule di eccitazione (ove presente)
- P_{fe} = perdite nel ferro
- P_{mecc} = perdite meccaniche

Pertanto il bilancio energetico può essere scritto, secondo il funzionamento da motore:

$$P_{input} = P_{output} + \sum \text{perdite}$$

$$P_{el} = P_u + \sum \text{perdite} = P_u + P_{ja} + P_{je} + P_{fe} + P_{mecc}$$

potenza elettrica complessiva di alimentazione dei due circuiti di armatura P_a e di eccitazione P_e

potenza meccanica utile resa disponibile all'albero della macchina

26

Perdite Joule nel circuito di armatura

Queste perdite sono sostanzialmente legate alla resistenza presentata dall'avvolgimento di armatura R_a e il loro valore cresce quadraticamente con la corrente assorbita dal circuito I_a :

$$P_{ja} = R_a I_a^2$$

Se all'avvolgimento di armatura sono collegati in serie altri avvolgimenti (quello di eccitazione, nel caso di eccitazione serie, e gli eventuali avvolgimenti ausiliari di commutazione, stabilizzatori, compensatori) la loro resistenza deve essere compresa nella R_a .

Inoltre, la presenza del contatto strisciante spazzola-lamella introduce una caduta di tensione anomala ΔV_s nel circuito, che non rispetta la legge di Ohm: per determinarla, occorre rilevare sperimentalmente la tensione applicata e la corrente assorbita alle spazzole del motore fermo o rotante molto lentamente.

27

Perdite Joule nel circuito di armatura

Sperimentalmente, si osserva una dipendenza lineare tra tensione e corrente di armatura, che però non passa per l'origine: l'intercetta sull'asse delle tensioni può essere interpretata come la caduta di tensione di contatto spazzola-lamella ΔV_s , nell'ordine di $0,3 \div 3$ V.

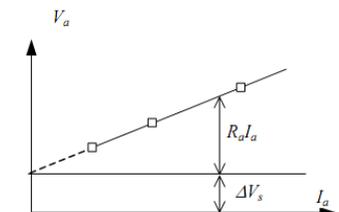
Il diagramma risponde alla seguente approssimazione:

$$\Delta V_a = \Delta V_s + R_a I_a \quad \Rightarrow \quad P_{ja} = R_a I_a^2 + \Delta V_s I_a$$

Le perdite nel circuito di eccitazione, qualora non comprese nelle perdite di armatura (come nel caso del motore ad eccitazione serie), sono determinabili attraverso l'espressione:

$$P_{je} = R_e I_e^2$$

Queste perdite sono identicamente nulle nel caso di motori a magneti permanenti.



28

Perdite nel ferro

Le perdite nel ferro sono dovute ai fenomeni di isteresi e correnti parassite e i distinguono in:

- ✚ Perdite rotazionali: costituiscono il termine principale delle perdite nel ferro e sono dovute al moto del rotore nel campo magnetico originato complessivamente dalla macchina. Questo tipo di perdite ha sede principalmente nel rotore; tuttavia anche sulle espansioni polari dello statore possono esistere perdite dovute alle pulsazioni locali prodotte dal moto dei denti di indotto sotto le espansioni polari. Per ridurre questa tipologia di perdite i motori a corrente continua sono costruiti con rotore ed espansioni polari laminate.
- ✚ Perdite trasformatoriche: quando il motore a corrente continua è alimentato tramite convertitore statico, la forma d'onda della corrente che circola nel circuito di rotore possiede un contenuto armonico non trascurabile.

Perdite nel ferro

Come conseguenza, il flusso concatenato con l'avvolgimento di rotore non è costante nel tempo.

Questo flusso concatenato interessa nel suo percorso non solamente il rotore, ma anche i gioghi e le espansioni polari di statore.

Se questo flusso è variabile nel tempo, esso induce variazioni di induzione in queste parti della macchina e conseguenti perdite per isteresi e correnti parassite di tipo trasformatorico.

Per contenere queste perdite, i motori a collettore destinati ad alimentazione tramite convertitori elettronici o ad alimentazione in alternata (motori universali) hanno, oltre al rotore, anche lo statore completamente laminato.

Le perdite nel ferro di tipo trasformatorico non dipendono dalla rotazione del motore: esse sono presenti nella macchina anche a rotore fermo.

Perdite meccaniche

Quando il rotore è in movimento si hanno delle perdite meccaniche, che si suddividono in:

- perdite per attrito (alle spazzole e ai cuscinetti),
- perdite per ventilazione (dovute all'aria posta in rotazione dal motore).

Le coppie d'attrito sono poco influenzate dalla velocità di rotazione, mentre quelle di ventilazione dipendono, in prima approssimazione, dal quadrato della velocità di rotazione.

Ne consegue che le perdite meccaniche dalla velocità secondo le seguenti relazioni:

$$P_{\text{attrito}} = C_{\text{attrito}} \cdot \omega \Rightarrow P_{\text{attrito}} \propto \omega$$

$$P_{\text{ventilaz.}} = C_{\text{ventilaz.}} \cdot \omega \Rightarrow P_{\text{ventilaz.}} \propto \omega^3$$