



Zeno Martini (admin)

MACCHINA A CORRENTE CONTINUA - 1: TENSIONE E COPPIA

14 April 2015

Premessa

La [richiesta nel forum](#) di uno studente di chiarire il funzionamento del motore a corrente continua, cui s'è anche aggiunto un [altro topic](#) su uno degli inconvenienti tipici, mi ha portato a revisionare un [vecchio articolo](#).

Il motore a corrente continua è stato il principe degli azionamenti elettrici fino alla fine del secolo scorso, quando lo sviluppo dell'elettronica, sia di potenza che di controllo, ha in pratica permesso il progressivo imporsi, anche negli azionamenti, del motore asincrono. Un altro motore che sta avviando all'obsolescenza il tradizionale motore a corrente continua, è il [Brushless](#).

Sia l'asincrono che il brushless sono infatti privi del punto debole della macchina a corrente continua, costituito dall'usura di collettore e spazzole. La maggior semplicità del controllo elettronico della velocità mediante la tensione del tradizionale motore a corrente continua, è stata in pratica resa poco importante, dalla potenza di calcolo dell'elettronica moderna necessaria per il controllo in frequenza degli altri motori.

Ad ogni modo macchine a corrente continua tradizionali esistono ancora ed il loro studio ha comunque una valenza didattica importante.

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di ogni macchina elettrica è illustrato nelle fig. 1a ed 1b.

Motore

Se in un conduttore di lunghezza l perpendicolare alle linee di forza di un campo magnetico di induzione B , , si imprime una corrente I , agisce su di esso una forza trasversale F data da

$$F = IBl \quad [1]$$

Verso e direzione della forza si trovano con la regola della **mano sinistra**, come mostrato in fig.1a

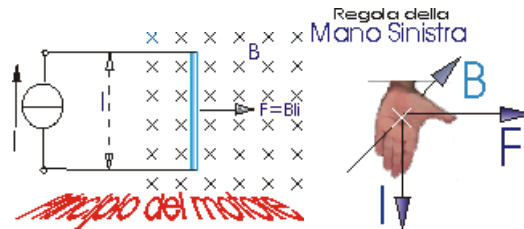


fig. 1a

Generatore

Se il conduttore è posto meccanicamente in movimento con velocità v , ai suoi capi si manifesta una forza elettromotrice data da

$$E = Blv \quad [2]$$

Verso e direzione della forza si trovano con la regola della **mano destra**, come mostrato in fig.1b

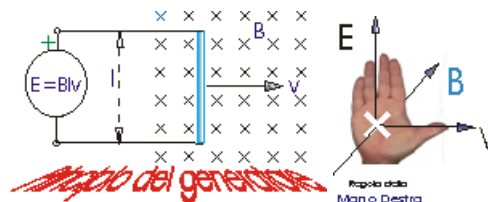


fig. 1b

Come realizzare la macchina

Immaginiamo che N conduttori siano distribuiti sulla superficie laterale di un cilindro di materiale ferroso che ruota con velocità angolare ω_m tra le espansioni polari di un magnete. L'induzione magnetica, costante nel tempo, è massima sull'asse polare del magnete e diminuisce fino a diventare nulla sull'asse interpolare.

Per effetto della rotazione i conduttori tagliano le linee di induzione magnetica ed in essi è perciò indotta una forza elettromotrice che, per i conduttori sotto il polo nord ha polarità opposta rispetto a quella dei conduttori sotto il polo sud. La tensione nei singoli conduttori è dunque alternata ed ha, per la [2] la stessa forma di B , quindi massima sull'asse polare, nulla sull'interpolare. E' ovvio che in ogni conduttore in transito nella stessa posizione fisica, è indotta la medesima tensione.

Immaginiamo che tutti i conduttori sotto uno stesso polo (quindi $N / 2$ nel caso rappresentato) siano in serie tra loro. Poiché le tensioni dei conduttori simmetrici rispetto all'asse interpolare sono uguali, si disporrà di due forze elettromotrici uguali in valore assoluto, prelevabili da contatti striscianti fissi posti agli estremi della serie, quindi in corrispondenza all'asse interpolare. Le due serie sono poste in parallelo e danno luogo ad un avvolgimento chiuso nel quale non esiste una corrente di circolazione essendo le due forze elettromotrici uguali e contrapposte. La fig. 2 schematizza quanto detto

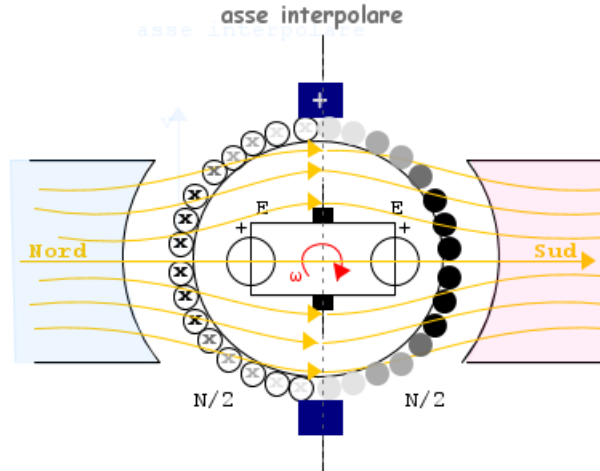


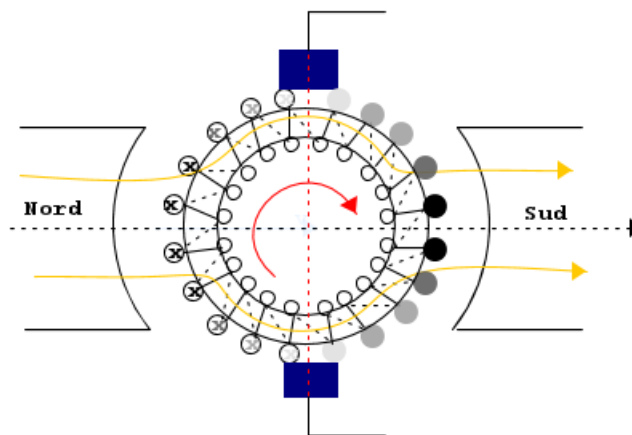
fig. 2

La configurazione descritta corrisponde in pratica all'

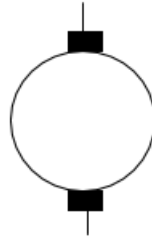
[anello di Pacinotti](#)

cioè alla prima realizzazione storica della macchina a corrente continua.

In essa i conduttori che forniscono tensione (attivi) ai contatti striscianti (spazzole) sono quelli esterni dell'avvolgimento toroidale. Quelli interni non sono sede di tensione (inattivi) in quanto non investiti dal flusso magnetico incanalato all'interno della corona cilindrica ferromagnetica e costituiscono, in pratica, solo il collegamento che pone in serie i conduttori attivi.



La configurazione Pacinotti dà origine al simbolo usato per le macchine CC: il cerchio rappresenta l'avvolgimento d'armatura, chiuso, con due vie interne ai capi delle quali sono poste le spazzole che stanno sull'asse interpolare, ortogonale all'asse polare.



Parti fondamentali di una macchina reale

Nelle macchine reali il cilindro di supporto dei conduttori è pieno e provvisto solo delle scanalature (cave) per contenerli. L'avvolgimento che si realizza è detto a tamburo. Lo schema della macchina è comunque sempre riconducibile alla "configurazione Pacinotti".

La figura 3 rappresenta una sezione longitudinale del rotore di una macchina d'esempio reale, con avvolgimento a tamburo, tagliata e rettificata; la figura 4 ne mostra la sezione frontale.

Il rotore ha sei cave entro le quali stanno due conduttori. Sono rappresentati due soli conduttori per semplicità. In realtà si tratta sempre di fasci di n conduttori, fasci che sono uno dei due lati di una matassa, cioè un avvolgimento predisposto per inserire i conduttori nelle cave.

I poli magnetici sono due nell'esempio considerato. Dal polo Nord escono, le linee di induzione che entrano nel polo Sud.

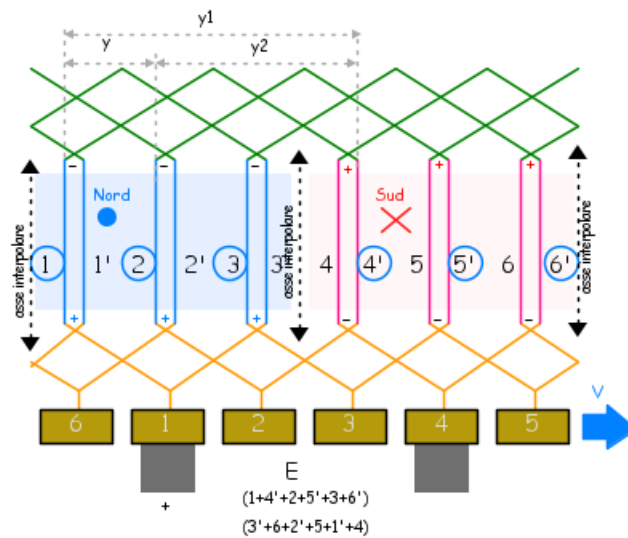


fig. 3

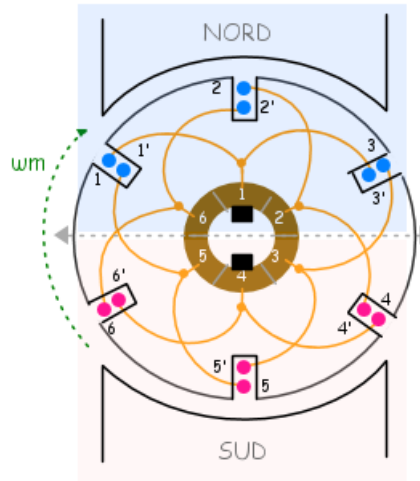


fig. 4

Si distinguono negli schemi le parti fondamentali della macchina.

- l'**eccitazione**, posizionata sullo statore, genera l'induzione magnetica B . Può essere realizzata con magneti permanenti o con avvolgimenti. Nella figura 4 sono mostrate le sole espansioni polari dello statore che è un cilindro cavo in ferro, sulla cui periferia interna sono posizionati i magneti.
- L' **armatura** costituita dai conduttori posizionati in apposite cave ricavate in direzione assiale nella periferia esterna di rotore, collegati in modo da formare un avvolgimento chiuso simmetrico rispetto all'asse, detto a tamburo. Essi sono sede della tensione indotta e la somma algebrica delle tensioni indotte percorrendo tutta l'armatura è nulla, il che significa che due insiemi di conduttori danno luogo a forze elettromotrici contrapposte. I due insiemi costituiscono le vie interne. La corrente circolante nei conduttori, che si richiude in un percorso esterno all'armatura, dà luogo alla coppia sul rotore, motrice nel caso di funzionamento come motore, frenante nel funzionamento come generatore.
- il **collettore**: organo fondamentale e caratteristico, nonché punto debole della macchina, consiste in un cilindro di lamelle conduttrici isolate tra loro e collegate a punti simmetricamente distribuiti sull'armatura. Ogni lamella è collegata a due fasci di conduttori, quindi sono in numero pari al numero di matasse.
- le **spazzole** di carbone, altro punto debole della macchina, sono fisse, e strisciando sul collettore stabiliscono il contatto tra i conduttori dell'armatura ed il circuito esterno. Una via interna è costituita dall'insieme dei conduttori che permettono di passare da una spazzola all'altra. In genere esse sono posizionate in modo che la via interna produca la massima tensione indotta. La corrente entrante ed uscente da esse, si distribuisce equamente tra le vie interne.

Nota

La differenza tra il numero d'ordine dei conduttori collegati si denomina *passo*;

nell fig. 3 sono rappresentati:

- y_1 : passo posteriore (parte opposta a quella del collettore)
- y_2 : passo anteriore. Se contrario ad y_1 è considerato negativo e l'avvolgimento si dice :embricato; se è nello stesso senso di y_1 è positivo
- $y = y_1 + y_2$: passo risultante. Se positivo l'avvolgimento si dice progressivo; regressivo se negativo.
- Nell'esempio di figura si ha: $y_1 = 3; y_2 = - 2; y = 1$

Collettore e spazzole rappresentano i punti deboli della macchina.

Sono infatti soggetti ad usura meccanica, sia per l'attrito tra spazzole e collettore, sia per la possibilità di scariche elettriche tra spazzole e lamelle e tra lamelle contigue durante il funzionamento.

Cerchiamo comunque di esaminarne l'azione combinata.

Posizione delle spazzole e tensione

Vista dalle spazzole l'armatura è il parallelo di gruppi di conduttori denominati vie interne, in parallelo tra loro. Sono come minimo due, sono sempre in numero pari, e possono coincidere con il numero di poli. I conduttori che compongono ogni via interna cambiano con la rotazione, ma la posizione fisica in cui i diversi conduttori vengono a trovarsi, è sempre la stessa. Dal punto di vista delle spazzole dunque non cambia nulla per quanto riguarda la tensione tra esse.

In fig. 3, le spazzole sono nella posizione tale per cui tutti i conduttori di una via hanno polarità concorde (il "+" del precedente è collegato al "-" del successivo"; la polarità si ottiene applicando la regola della mano destra.) Sono rispettivamente formate dai conduttori 1,4',2,5',3,6' e 3',6,2',5,1',4. Poiché l'andamento dell'induzione sotto il polo Nord è, in valore assoluto, identico a quello dell'induzione sotto il polo Sud, nei conduttori 1,1',4,4' è indotta un'identica tensione, che possiamo indicare con E_A ; nei conduttori 2,2',5,5' una tensione E_B ; in 3,3',6,6' una tensione E_C . Le due vie interne allora è come se fossero costituite dalla serie di tutti i conduttori che stanno sotto un polo: $(1 + 4' + 2 + 5' + 3 + 6') \rightarrow (1 + 1' + 2 + 2' + 3 + 3')$; $(3' + 6 + 2' + 5 + 1' + 4) \rightarrow (6' + 6 + 5' + 5 + 4' + 4)$

Se si spostano le spazzole di una lamella, ad es. verso destra come in fig. 5, le due vie sono formate dai conduttori $(2 - 5' - 3 - 6' - 4 - 1')$ e $(4' - 1 - 3' - 6 - 2' - 5)$. In ogni via interna si hanno conduttori con polarità opposte (6' e 4 nella prima; 1 e 3' nella seconda), quindi la tensione tra le spazzole è inferiore a quella della precedente posizione di fig. 3 ($E' < E$).

Se poi si spostano ancora di un'altra lamella, le vie interne sono formate da conduttori con tensioni contrapposte a due a due, quindi la tensione complessiva è nulla.

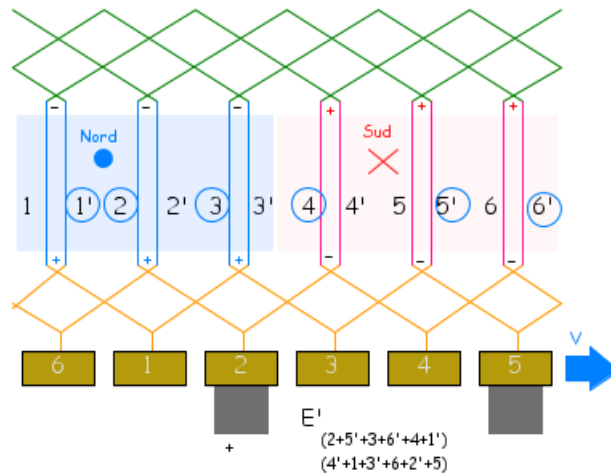


fig. 5

La prima posizione permette di avere tra le spazzole la tensione massima. Fisicamente esse sono posizionate sull'asse polare, però fanno capo a conduttori che stanno per attraversare il piano interpolare, che è anche il piano neutro, per quanto riguarda l'induzione prodotta dall'eccitazione, quindi la tensione in essi indotta. Tutto avviene come se le spazzole fossero collocate sull'asse interpolare e prelevassero la tensione della serie di conduttori che stanno sotto un polo, che è la situazione vista con l'anello di Pacinotti.

Posizione delle spazzole e distribuzione della corrente

Immaginiamo ora di imprimere una corrente I nella spazzola indicata con $+$ nel disegno di fig. 6. E' il caso della macchina funzionante come motore; nel caso di funzionamento come generatore il verso della corrente è opposto, quindi uscente dalla spazzola "+".

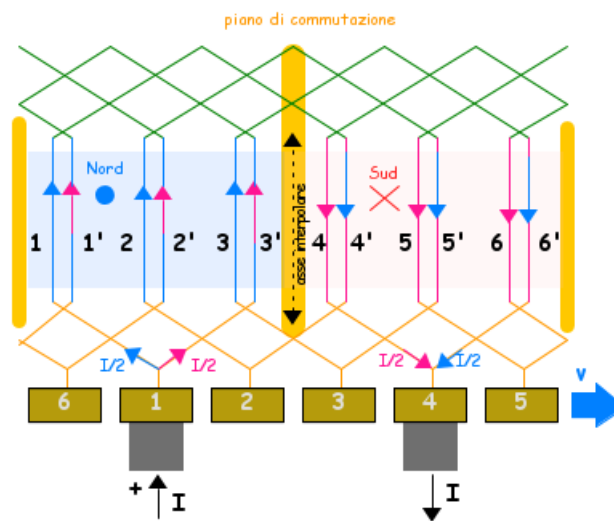
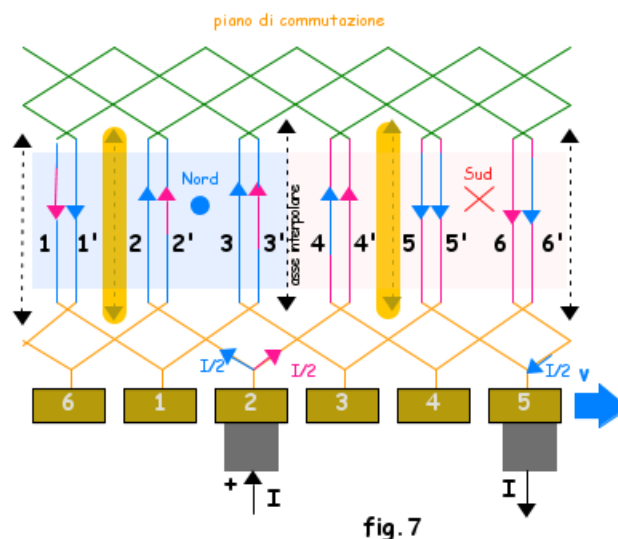


fig. 6

La corrente si divide tra le due vie in modo identico, poiché le due vie sono equivalenti. A sinistra e a destra dell'asse interpolare i versi delle correnti sono opposti.

I conduttori ruotano, quindi attraversando l'asse interpolare la corrente in essi si inverte (3 e 3' prendono il posto di 4 e 4'; 6 e 6' di 1 ed 1' ad esempio), e per questo, quella zona di transito è detta **piano di commutazione**.

Se si spostano le spazzole, ad esempio sulle lamelle 2 e 5 come in fig. 7, esiste ancora una zona passando attraverso la quale la corrente nei conduttori si inverte (4 e 4' prendono il posto di 5 e 5'; 1 ed 1' di 2 e 2'), per cui è sempre detta piano di commutazione; in questo caso però il piano interpolare che, ricordiamo, definisce il cambio di polarità della tensione indotta a vuoto, non coincide il piano di commutazione che è spostato in avanti, nel senso del moto.



Il piano di commutazione, definito dalla posizione delle spazzole, divide dunque i conduttori in gruppi in cui la corrente ha verso opposto.

In genere esso è fatto sempre mantenuto coincidente con il piano interpolare.

Lamelle cortocircuitate

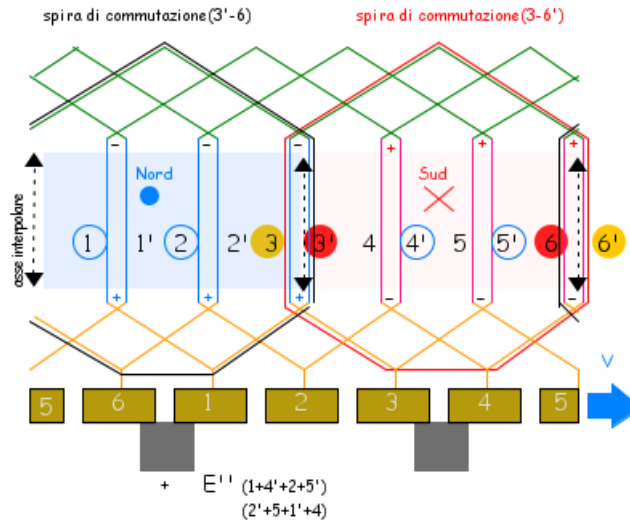


fig. 8

Quando, durante il moto, ciascuna spazzola tocca due lamelle, ad esempio 1 e 6, 3 e 4, i conduttori 3'-6 e 3-6' formano una spira chiusa. Tali conduttori sono quelli nei quali la corrente cambia verso. La corrente che si ha nella spira cortocircuitata, quindi la modalità con cui si inverte la corrente nei conduttori che la formano, influisce sul buon funzionamento della macchina, in particolare sulla possibilità che si formino archi elettrici dannosi nel momento in cui la lamella abbandona la spazzola. I fenomeni elettrici che avvengono, vanno sotto il nome di "commutazione", sono di una certa complessità e saranno discussi con maggiore dettagli in un successivo articolo.

La tensione indotta a vuoto

Consideriamo nulla la corrente alle spazzole, quindi nell'armatura, erogata (generatore) o assorbita (motore). Ne terremo conto nel paragrafo sulla reazione di indotto.

Riconsideriamo la situazione già in parte discussa in figura 3. Il campo magnetico induttore (o di eccitazione) è prodotto o da magneti permanenti o da elettromagneti. Può avere una o più coppie polari, indicate con p . Indicheremo con Φ_0 il flusso magnetico prodotto da un polo.

Nell'avvolgimento d'armatura si possono individuare almeno due vie interne. Si chiamano così gli insiemi di conduttori che portano da una spazzola all'altra. Sono sempre pari, in genere indicate con $2a$, e vanno da un minimo di 2 (nel qual caso l'avvolgimento si dice di tipo serie) ad un massimo di $2p$ (avvolgimento parallelo).

Nella figura 3 e 4 i conduttori delle due vie interne sono

- 1 - 4' - 2 - 5' - 3 - 6';
- 3' - 6 - 2' - 5 - 1' - 4.

I conduttori sottoposti ad identica induzione hanno, in valore assoluto, la stessa tensione. Possiamo quindi porre:

- E_A la tensione dei conduttori 1',1,4',4 ;
- E_B la tensione dei conduttori 2',2,5,5' ;
- E_C la tensione dei conduttori 3',3,6,6'.

Si ha allora che le tensioni delle due vie sono uguali, e ciascuna corrisponde alla somma delle tensioni dei conduttori che stanno sotto un polo.

$$\bullet (1 - 4' - 2 - 5' - 3 - 6') \rightarrow (1 - 1' - 2 - 2' - 3 - 3') \rightarrow$$

$$E_1 = 2(E_A + E_B + E_C)$$

$$\bullet (3' - 6 - 2' - 5 - 1' - 4) \rightarrow (4 - 4' - 5 - 5' - 6 - 6') \rightarrow$$

$$E_2 = 2(E_A + E_B + E_C)$$

L'insieme dei conduttori sotto un polo si può perciò considerare come sorgente di un'unica f.e.m. che chiameremo *tensione di polo* E_p .

Indicando con E_m la tensione media in un conduttore (che varia per il variare di B nei diversi punti del traferro) e con N il numero totale dei conduttori, la tensione di polo vale

$$E_p = \frac{N}{2p} E_m \quad [2]$$

Per velocità di rotazione v costante si avrà

$$E_m = B_m l v \quad [3]$$

dove

- l è la lunghezza assiale del conduttore;
- v è la velocità periferica legata alla velocità angolare ω_m , da $v = \omega_m \frac{D}{2}$ con D diametro del rotore;
- $B_m = \frac{\Phi_0}{S_p}$ dove $S_p = \frac{l\pi D}{2p}$ è la superficie occupata da un polo magnetico mentre Φ_0 è il flusso del polo.

Sostituendo in [3] si ha:

$$E_m = \frac{\Phi_0}{S_p} l \omega_m \frac{D}{2} = \frac{\Phi_0}{\frac{\pi D}{2p}} \omega_m \frac{D}{2} = p \frac{\Phi_0}{\pi} \omega_m = \frac{\Phi_0}{\pi} \omega_e \quad [4]$$

avendo posto $\omega_e = p\omega_m$ dove ω_e la pulsazione elettrica.

Sostituendo ora in [2] avremo

$$E_p = \frac{N}{2p} p \frac{\Phi_0}{\pi} \omega_m = \frac{N}{2} \frac{\Phi_0}{\pi} \omega_m = K_{\pi\omega} \Phi_0 \omega_m \quad [5]$$

Con

$$K_{\pi\omega} = \frac{N}{2\pi}$$

La tensione in una via è sempre un multiplo della tensione di polo pari al numero delle tensioni di polo che compongono una via, che è $\frac{p}{a}$ con p numero di coppie polari e a numero di coppie di vie

$$\text{interne } E = E_p \frac{p}{a}.$$

In definitiva la tensione alle spazzole è

$$E = K_{\omega} \Phi_0 \omega_m \quad [6]$$

$$\text{Con } K_{\omega} = \frac{p}{a} K_{\pi\omega} = \frac{Np}{2\pi a}$$

NB: invece della velocità angolare si usa spesso il numero di giri al minuto n .

Si ha che $\omega_m = 2\pi \frac{n}{60}$. Allora si scrive

$$E = K_n \Phi_0 n \quad [7]$$

con

$$K_n = \frac{2\pi}{60} K_{\omega} = \frac{p}{a} \frac{N}{60}$$

Quando l'eccitazione è costante, in particolare nel caso di motori a magneti permanenti, si ha

$$E = K \omega_m \quad [8]$$

La costante $K = K_{\omega} \Phi_0$, che si misura in $\frac{\text{V s}}{\text{rad}}$, è generalmente fornita con i dati tecnici del motore ed è detta *costante di tensione* o anche costante di macchina

La coppia

La coppia motrice si può ricavare dalla considerazione che ogni conduttore vi contribuisce con la sua forza media trasversale, ma può essere ottenuta anche applicando il principio di conservazione dell'energia.

Supponendo nulle le perdite per effetto Joule nell'avvolgimento di armatura, la tensione indotta, contro elettromotrice od elettromotrice rispettivamente, nel funzionamento come motore o come generatore, è esattamente uguale alla tensione applicata $U = E$, e la potenza elettrica, assorbita come motore, erogata come generatore, $P = UI$, coincide esattamente con la potenza meccanica, $P_m = C_m \omega_m$, se escludiamo anche le perdite per attrito, avendo indicato con C_m la coppia meccanica, motrice nel caso del motore, frenante nel caso del generatore.

Si può allora scrivere a regime, quando la velocità angolare è costante, indicando con C_{em} la coppia elettromagnetica, esattamente uguale alla coppia meccanica per l'assenza di attriti, ed assumendo che il flusso magnetico sia uguale a quello a vuoto:

$$P = UI = C_{em}\omega_m = EI = K_\omega\Phi_0\omega_m I \quad [9]$$

Da cui immediatamente

$$C_{em} = K_\omega\Phi_0 I \quad [10]$$

Anche in tal caso se l'eccitazione è costante si avrà

$$C_{em} = KI \quad [11]$$

K è la stessa *costante di macchina* definita in precedenza in [8].

Le [6] e la [10] costituiscono le equazioni cardine, nel funzionamento a regime, della macchina a corrente continua ideale, quindi nelle ipotesi $U = E$; $C_{em} = C_m$

Per la macchina reale invece, dovendo tener conto della caduta di tensione e delle coppie di attrito si avrà:

$$U = E \pm \Delta U$$

$$C_{em} = C_m \pm C_a$$

Dove ΔU e C_a rappresentano, rispettivamente, la caduta di tensione dovuta alla resistenza dell'avvolgimento d'armatura la coppia d'attrito.

Le espressioni di E e C_{em} sono sempre le stesse.

Il segno " + " vale nel funzionamento come motore; il " - " nel funzionamento come generatore

Bibliografia e Link

- Appunti di Macchine elettriche, Ciro di Pieri - Ed. CLEUP 1991
- Macchine elettriche, Giovanni Someda - Ed Patron (BO), 1967
- [Motor Control](#)

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Admin:il-motore-a-corrente-continua>"