

CAPITOLO 1

Motore a corrente continua ad eccitazione indipendente

1.1 - Struttura e principio di funzionamento

Una rappresentazione schematica della struttura di un motore a corrente continua a due poli è mostrata in Fig.1.1.1. Essa comprende una *parte fissa (statore)* che costituisce l'*induttore* della macchina (la struttura che produce il *campo magnetico principale*), dotata dei *poli induttori (o poli principali)*¹ su cui sono avvolte le *bobine di eccitazione* che, nell'insieme, formano l'*avvolgimento di eccitazione (o induttore o di campo)*. La *corrente di eccitazione* è indicata in figura con i_e .

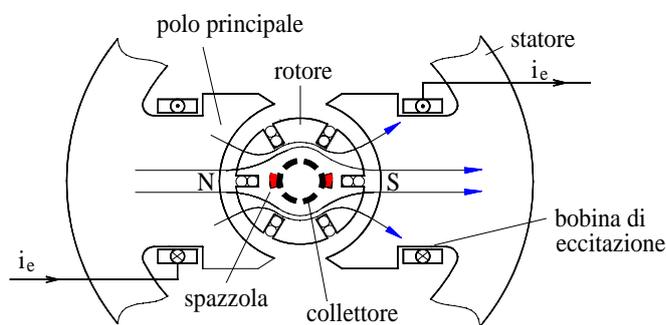


Fig.1.1.1 - Rappresentazione schematica di un motore c.c.

Esiste quindi una *parte rotante (rotore)* che rappresenta l'*indotto* della macchina il cui avvolgimento (*armatura*) ha i suoi conduttori, detti *conduttori attivi*, collocati entro canali (*cave*) ricavati lungo le generatrici del cilindro rotorico. L'armatura è alimentata dalla corrente i_a inviata attraverso contatti fissi (*spazzole*) striscianti su un sistema di *lamelle* solidale con il rotore (*collettore*). Statore e rotore sono separati da una sottile corona d'aria che prende il nome di *traferro*.

Per un miglior funzionamento della macchina a corrente continua possono esistere altri due componenti: i *poli ausiliari (o di commutazione)* disposti sull'asse interpolare e gli *avvolgimenti di compensazione*, distribuiti sulla scarpa polare dei poli principali, affacciati all'armatura. Essi sono per il momento ignorati per essere richiamati più avanti nel capitolo.

1.1.1 Funzionamento del sistema induttore

Quando una corrente i_e è inviata negli avvolgimenti di eccitazione, mentre i conduttori di indotto non sono sede di correnti (funzionamento a vuoto), si instaura nella macchina un campo magnetico principale, le cui linee di campo sono esemplificate in Fig.1.1.1, in cui il motore è rappresentato sviluppato e disteso su un piano.

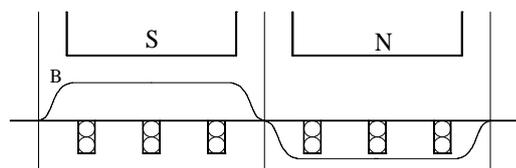


Fig.1.1.2 - Andamento di B lungo il traferro, a vuoto

Tale campo attraversa il traferro ed il rotore e si richiude nello statore; ad esso corrisponde una distribuzione lungo il traferro della componente radiale dell'induzione che presenta, in virtù della sagomatura dei poli stessi, l'andamento rappresentato in Fig. 1.1.2.

Assumendo la convenzione di segno degli utilizzatori, l'avvolgimento di eccitazione è retto dall'equazione

dinamica

¹ In figura la macchina ha una coppia di poli; nella pratica le macchine a corrente continua vengono realizzate anche e spesso con più di una coppia polare, con i poli che si succedono con polarità alterne. Anche con più coppie polari il principio di funzionamento resta quello illustrato in questo paragrafo.

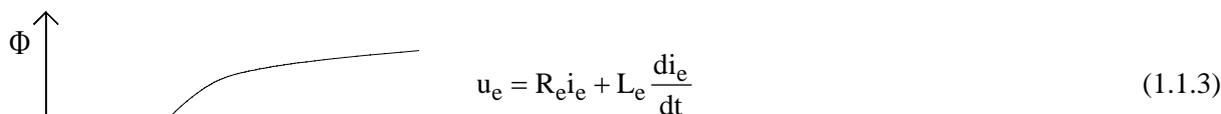
$$u_e = R_e i_e + \frac{d\lambda_e}{dt} \tag{1.1.1}$$

ove λ_e è il flusso concatenato. Se N_e è il numero di spire complessivo dell'avvolgimento di eccitazione, trascurando i flussi dispersi² vale $\lambda_e = N_e \phi$, ove ϕ (*flusso induttore*) è il flusso del campo induttore principale che è funzione della corrente di eccitazione i_e in accordo con la *caratteristica di magnetizzazione* $\phi(i_e)$ di Fig. 1.1.3 (tracciata per i soli valori positivi di i_e).

Per comodità di trattazione, si accetta a volte di approssimare la caratteristica di magnetizzazione con una retta (trascurando l'effetto della saturazione magnetica), in modo che

$$\phi(i_e) \cong K_{###} i_e \tag{1.1.2}$$

Di conseguenza la (1.1.1) può essere riscritta nella forma



$$u_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} \tag{1.1.3}$$

ove L_e è costante e pari a $N_e K_{###}$.

Fig.1.1.3 - Curva di magnetizzazione

1.1.2 Funzionamento del sistema indotto in quiete

Per descrivere il funzionamento del sistema indotto, si faccia riferimento alla Fig.1.1.4, ove il semplice rotore con 6 cave e 12 conduttori è rappresentato con maggior dettaglio ed è supposto, per il momento, fermo.

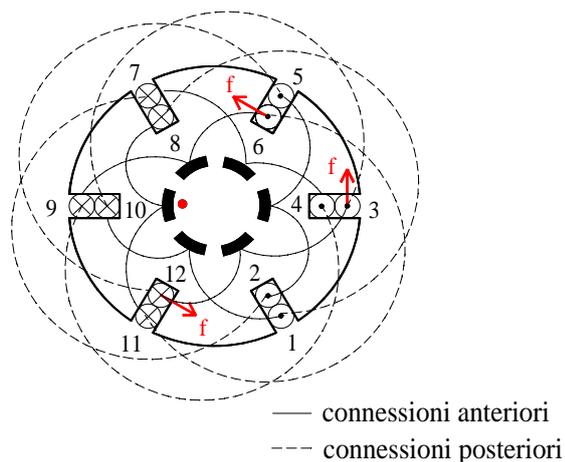


Fig.1.1.4 - Schema di indotto a 6 cave

Si immagini che il conduttore attivo 3 di figura sia sede di una corrente positiva i con il verso indicato. Se B è l'induzione radiale al traferro nella posizione occupata dal conduttore in esame, su di esso verrà ad agire la forza tangenziale mostrata in figura, di intensità $f = Bli$ essendo l lo sviluppo assiale del conduttore.

Se la stessa corrente i percorre anche tutti gli altri conduttori sotto il polo S e, con il verso contrario come evidenziato in figura, anche quelli sotto il polo N, su tutti verranno ad agire forze tangenziali di versi concordi (alcune indicate in figura), proporzionali al valore dell'induzione radiale al traferro nella posizione occupata dai conduttori stessi. In queste condizioni il rotore è

sottoposto ad una coppia risultante diversa da zero che tende a metterlo in rotazione. Opportune connessioni fra i diversi conduttori e l'alimentazione degli stessi attraverso contatti striscianti spazzole-

² In presenza di flussi dispersi si può ancora usare la relazione soprascritta assumendo che N_e sia un coefficiente un po' maggiore del reale numero di spire di eccitazione.

lamelle fanno sì che la distribuzione delle correnti rispetto ai poli sia sempre quella di Fig.1.1.4 qualunque sia la posizione del rotore sicché la coppia prodotta per una data corrente mantiene sempre lo stesso valore e segno. Per comprendere come ciò sia possibile si faccia riferimento alla schematizzazione di Fig. 1.1.5 che illustra, sviluppato e disteso su un piano, l'avvolgimento indotto della macchina di Fig. 1.1.4. Sulla stessa figura sono pure mostrati i collegamenti fra le lamelle del collettore e l'avvolgimento indotto, nonché la posizione che devono avere delle spazzole.

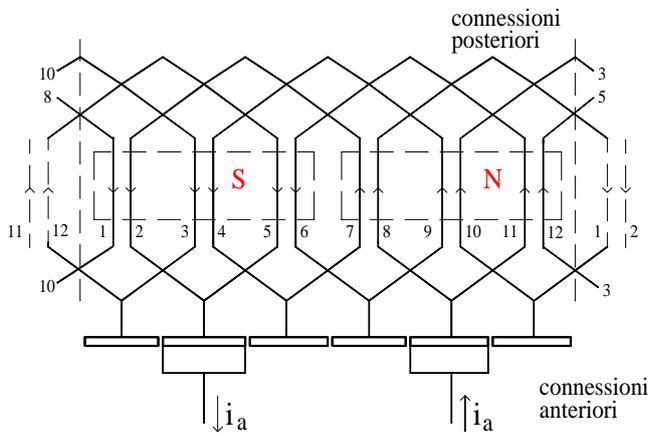


Fig.1.1.5 - L'avvolgimento indotto sviluppato in un piano

Si riconosce che l'avvolgimento d'indotto collega tra loro i diversi conduttori attivi così da formare un avvolgimento chiuso, condizione essenziale per garantire la necessaria simmetria rotazionale all'avvolgimento. Alcune di queste connessioni sono mostrate anche in Fig.1.1.4. La corrente di armatura i_a inviata e prelevata attraverso le spazzole si suddivide nelle due vie interne identiche, ciascuna formata da sei conduttori, che si possono individuare percorrendo l'indotto da una spazzola all'altra. Si riconosce altresì che tutti i conduttori che giacciono sotto lo stesso polo sono percorsi da correnti equiverse, anche se essi appartengono per metà ad una delle due vie interne e per i rimanenti all'altra³.

Spostando il rotore di un sesto di giro (per esempio in senso antiorario in Fig.1.1.4, verso destra in Fig.1.1.5, corrispondente ad un movimento verso sinistra delle spazzole e della proiezione dei poli) rimane inalterata la distribuzione delle correnti sotto ogni polo. In particolare nelle coppie di conduttori 11,12 e 5,6 si ha un'inversione della corrente ed essi prendono il posto che già era delle coppie 1,2 e 7,8 rispettivamente.

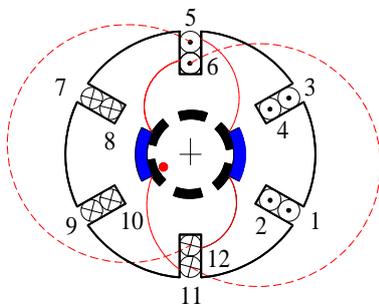


Fig.1.1.6 - Spire in commutazione

(formate dai conduttori 11,6 e 12,5) si ha un graduale rovesciamento di corrente la quale passa per lo zero nel momento in cui le spire in questione transitano per il piano interpolare (*piano di commutazione o delle spazzole*) ove l'induzione del campo induttore è nulla.

Durante ogni spostamento di questo tipo si ha una *commutazione* della corrente delle spazzole da una lamella alla successiva, che riporta le condizioni operative della macchina del tutto equivalenti a quelle di partenza, con conseguente costanza della coppia prodotta.

Posizionando invece il rotore in una posizione intermedia, come rappresentato in Fig.1.1.6, ogni spazzola alimenta due lamelle adiacenti, con correnti proporzionali alle relative superfici di contatto⁴.

Durante la commutazione si ha allora una graduale riduzione della corrente nelle lamelle uscenti dalle spazzole, una graduale crescita in quelle entranti mentre nelle due *spire in commutazione*

³ Nelle macchine multipolari i criteri di realizzazione dell'avvolgimento di armatura sono molteplici e portano a configurazioni che possono avere più coppie di spazzole e nelle quali la corrente di armatura si suddivide in più di due vie interne, sempre comunque identiche fra di loro.

⁴ Ciò è vero se si suppone che la resistenza di contatto spazzola-lamella sia dominante rispetto alle altre resistenze in gioco.

Se il numero di cave è sufficientemente alto, si può senz'altro assumere che anche durante la commutazione si venga a produrre sempre la stessa coppia. Essa sarà proporzionale all'intensità delle correnti nei conduttori, e quindi ad i_a , e all'induzione media sotto ciascun polo, e quindi a ϕ , e potrà in ultima analisi essere espressa con la

$$\tau = K_{\tau} \phi i_a \quad (1.1.4)$$

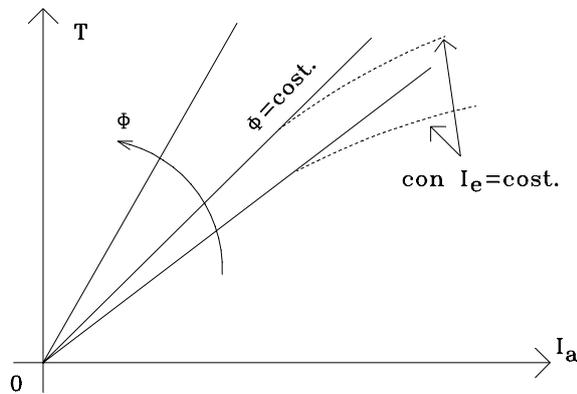


Fig.1.1.7 - Caratteristica elettromeccanica

ove K_{τ} è un coefficiente che dipende dal tipo di avvolgimento e dal numero di conduttori attivi.

La (1.1.4) è graficamente rappresentata a tratto continuo dalla *caratteristica elettromeccanica di coppia a flusso costante* di Fig.1.1.7.

Se il flusso induttore è costante, essa è una retta con inclinazione proporzionale al flusso stesso.

1.1.3 Reazione d'indotto

La corrente di armatura, che si suddivide e distribuisce nei conduttori attivi collocati nelle varie cave, produce a sua volta un campo magnetico (*campo di reazione di indotto*), che si sovrappone a quello induttore modificando la distribuzione dell'induzione al traferro rispetto a quella che si ha a vuoto: *distorsione a carico del campo al traferro*. Le linee di flusso del campo di reazione d'indotto sono schematizzate in Fig. 1.1.8.

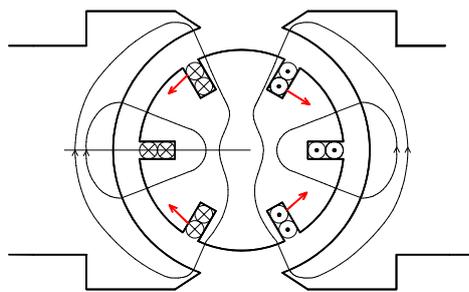


Fig.1.1.8 - Campo di reazione d'indotto

La distribuzione delle correnti di indotto e le linee del campo di reazione evidenziano che l'avvolgimento di indotto è equivalente ad un solenoide con l'asse magnetico nel piano che contiene le spire in commutazione e quindi in quadratura con l'asse del flusso induttore. Fra i due circuiti, induttore e indotto (quest'ultimo con piano di commutazione in posizione interpolare) non sussiste perciò alcun mutuo accoppiamento.

L'esame delle forze elementari agenti sui conduttori di Fig. 1.1.8 immersi nel campo di reazione d'indotto (alcune sono indicate in figura) mostra anche che metà di esse produce una coppia in un certo segno mentre l'altra metà produce una coppia identica ma di segno opposto, con coppia risultante quindi nulla. Si conclude che la coppia non dipende dal campo di reazione d'indotto ma solo dal campo induttore e perciò resta valida la (1.1.4)

Un esame più attento del circuito magnetico mostra che il campo di reazione di indotto causa di fatto una riduzione del flusso per polo. Si osserva infatti che sovrapponendo la reazione d'indotto al campo induttore si ha un aumento dell'induzione magnetica al traferro sotto metà espansione polare e una riduzione sotto l'altra metà. Se il circuito magnetico fosse esente dal fenomeno della saturazione magnetica, aumento e diminuzione sarebbero uguali e nessuna variazione si avrebbe sul valor medio dell'induzione al traferro sotto ciascun polo, ovvero sul valore del flusso per polo ed anche, attraverso questo, sulla coppia sviluppata ad una data corrente. La saturazione delle scarpe polari fa sì invece che la diminuzione sia più marcata dell'aumento cosicché si ha, a

Nel funzionamento a vuoto ciò tuttavia non provoca alcuna corrente di circolazione all'interno della spira in cortocircuito in quanto essa non è sede di f.e.m., essendo i suoi conduttori attivi disposti esattamente sul piano interpolare ove l'induzione magnetica radiale è nulla (Fig.1.1.6). Significativamente diversa è la situazione a carico nella quale la reazione di indotto produce un'induzione magnetica proprio là dove giace la spira in commutazione, ed essa ha l'effetto di produrvi una f.e.m.

Il par.1.2 affronta più dettagliatamente le problematiche connesse alla distorsione del campo e alla commutazione a carico.

La fem indotta di armatura è abbinata ad un assorbimento di potenza pari a

$$p = e_a i_a \tag{1.1.6}$$

Avendo adottato la convenzione di segno dei motori, il prodotto

$$p = \tau \omega \tag{1.1.7}$$

fornisce il valore della potenza meccanica sviluppata dalla macchina.

Le potenze (1.1.6) e (1.1.7) devono essere evidentemente coincidenti in quanto forza elettromotrice e coppia rappresentano la manifestazione elettrica e meccanica dello stesso fenomeno, quello della conversione elettromeccanica dell'energia che avviene all'interno della macchina elettrica.

Dall'uguaglianza della (1.1.6) con la (1.1.7) e utilizzando le (1.1.1) e (1.1.5) si ricava che

$$K_\tau = K_e \tag{1.1.8}$$

ed in seguito si farà uso solo di K_e .

Per completare la descrizione elettrica dell'indotto occorre tener conto anche della resistenza propria dell'avvolgimento e della sua induttanza. L'equazione elettrica d'armatura sarà pertanto

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{1.1.9}$$

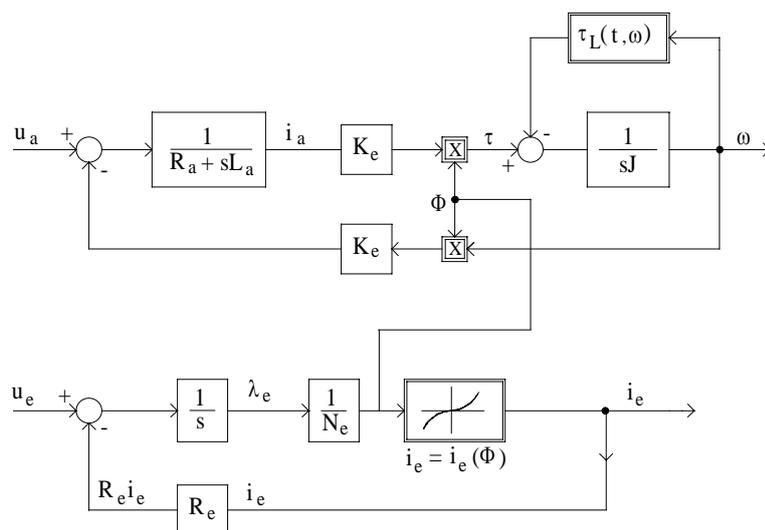


Fig.1.1.10 - Schema a blocchi nel dominio del tempo

(lineari) sono contrassegnati con la funzione di trasferimento (f.d.t.) in s che li descrive.

Per le interessanti comparazioni che potranno essere fatte con altre macchine elettriche, è utile tracciare anche lo schema a blocchi del motore a corrente continua alimentato a corrente impressa.

Le relazioni (1.1.1), (1.1.4), (1.1.5) e (1.1.9) descrivono il comportamento dinamico del motore. Ad esse deve essere aggiunta l'equazione meccanica del carico che in generale sarà

$$\tau = J \frac{d\omega}{dt} + \tau_L(\omega) \tag{1.8.2}$$

dove J è il momento d'inerzia totale riferito all'albero motore e τ_L è la coppia di carico, in generale dipendente sia dalla velocità del motore che dal tempo.

Alle equazioni sopra scritte corrisponde lo schema a blocchi di Fig.1.1.10, valido nel dominio del tempo, anche se alcuni blocchi

Esso si ottiene da quello di Fig.1.1.10 assumendo direttamente come grandezza d'ingresso la corrente di armatura piuttosto che la tensione. Se inoltre si considerano le equazioni lineari approssimate per il circuito di campo lo schema a blocchi risultante è quello di Fig.1.1.11.

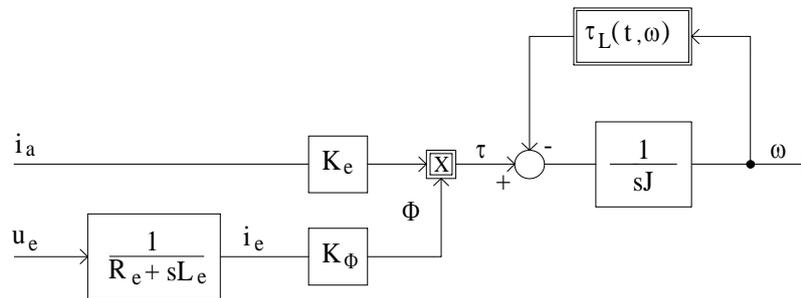


Fig.1.1.11 - Schema a blocchi per il motore c.c a corrente impressa

Esso evidenzia come la corrente di armatura consenta di agire direttamente sulla coppia, mentre la tensione di campo agisce sul flusso induttore attraverso la costante di tempo del circuito di eccitazione.