

MACCHINE ELETTRICHE

A cura del prof. Nicholas Fattori

1. GENERALITA'

Chiamiamo macchina elettrica un qualunque apparato funzionante sulle basi delle leggi dell'elettromagnetismo e più in generale, una macchina, che realizza la conversione di energia meccanica o simili in energia elettrica. Si tratta dunque di bipoli, che mettono a disposizione del circuito in cui sono inseriti, una certa quantità di energia elettrica. Chiamiamo motore un qualsiasi apparato che dualmente trasformi energia elettrica in meccanica.

Le macchine possono essere:

GENERATORI perché trasformano energia di varia natura in energia elettrica

MOTORI perché trasformano energia elettrica in energia meccanica

CONVERTITORI per trasformare un tipo di energia elettrica in altro tipo, con caratteristiche diverse

Vengono analizzate in base al tipo di corrente che attraversa i loro circuiti:

MACCHINE A CORRENTE CONTINUA (DC)

MACCHINE A CORRENTE ALTERNATA (AC)

solitamente monofase o polifase (come il trifase)

La prima grande importante divisione delle macchine è:

- **STATICHE** —> sono prive di parti di movimento, modificano il valore in ingresso di corrente o tensione senza modificare il valore della potenza, ad esempio il noto trasformatore

- **ROTANTI** —> è presente una parte che ruota attorno ad un asse e vengono classificate se

- A CORRENTE ALTERNATA

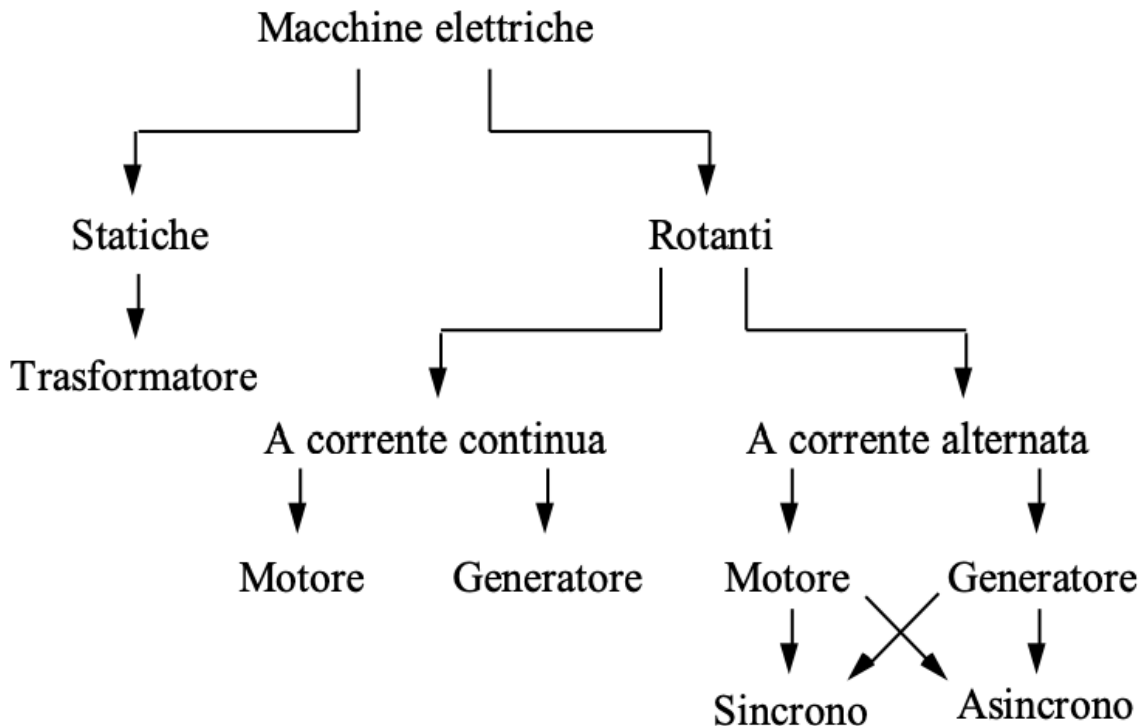
- > SINCRONO: opera in regime sinusoidale con velocità di rotazione costante

- > ASINCRONO: opera in regime sinusoidale con velocità di rotazione

dipendente dal campo magnetico

interno alla macchina, non legata alla frequenza di alimentazione, ma variabile con il carico

- A CORRENTE CONTINUA: opera in regime stazionario, l'energia fornita o prodotta è in corrente continua



Un motore elettrico è dunque costituito da una parte rotante solidale con l'albero, il ROTORE, e da una parte fissa, lo STATORE. S u di essi vi sono magneti permanenti o avvolgimenti capaci di generare flussi magnetici.

E' utile menzionare anche:

- CONVERTITORE: modifica la frequenza delle grandezze alternate, come? Trasformando la frequenza del segnale in ingresso o trasformando le grandezze alternate in grandezze continue
- INVERTITORE: trasforma grandezze continue in alternate
- RADDRIZZATORE: converte grandezze alternate in grandezze a valor medio non nullo, trovando una grandezza continua

2. PERDITE

I materiali costituenti i motori, sono soggetti a perdite di varia natura durante il funzionamento, di quale tipo?

Perdite nei conduttori —> gli avvolgimenti come il rame(1), ma anche perdite nel ferro(2)

(1) Possiamo considerare un conduttore percorso da corrente come un resistore (quindi Ohm —> $R = \rho (L/S)$)

Avendo le macchine elettriche molti avvolgimenti tipicamente in rame, abbiamo perdite per effetto Joule: $P_{cu} = R \times I^2$ N.B. Cu è il rame.

Operando in regime stazionario la I rappresenta la corrente passante per il resistore

Operando in regime sinusoidale la I rappresenta il valore stesso della corrente

Sempre nella forma vista di sopra, la R sarà il numero totale di tutti gli avvolgimenti

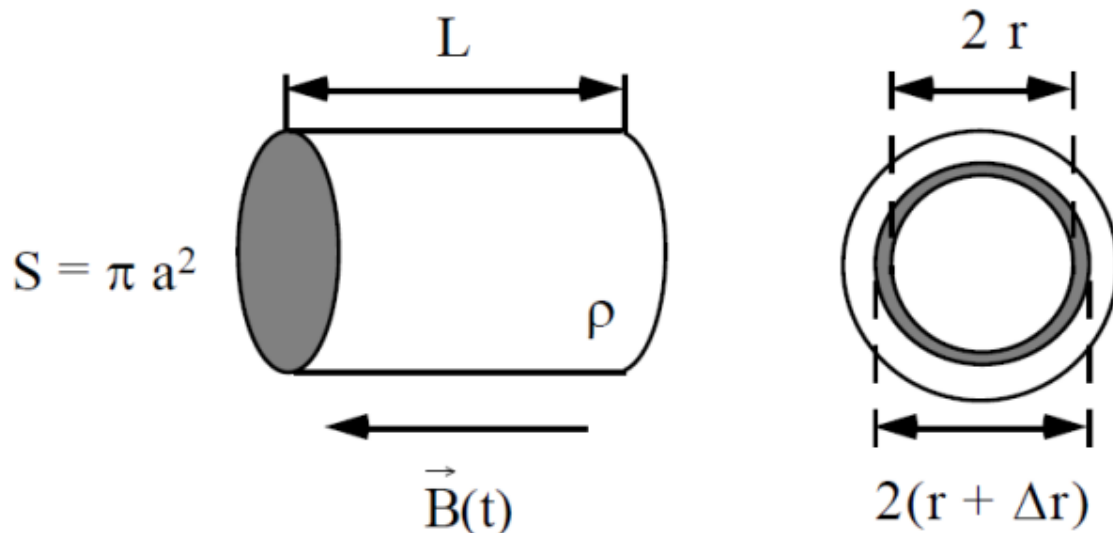
(2) Un materiale ferromagnetico, una volta immerso in un campo magnetico variabile, finisce per riscaldarsi, conseguenza di:

- perdite per correnti parassite

Considerato un cilindro conduttore di sezione πa^2 e resistività ρ , immerso in un campo di induzione magnetica, uniforme nello spazio e diretto parallelamente all'asse del cilindro.

Il campo varia nel tempo secondo la funzione sinusoidale di pulsazione $\omega = 2\pi f$

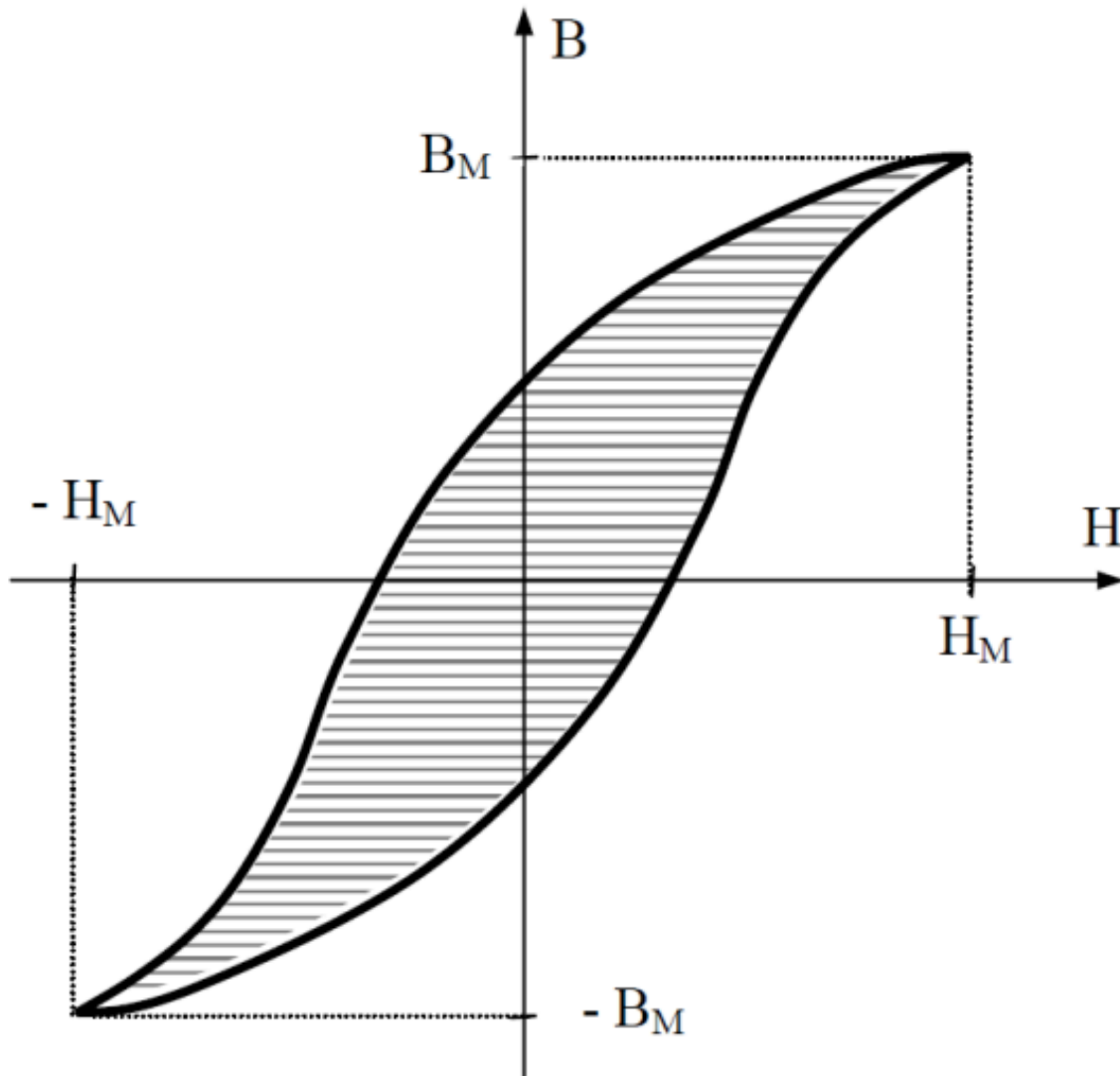
Immaginiamo poi il conduttore composto da tanti tubi cilindrici coassiali di piccolo spessore, indicati con Δr . Questo tubo di raggio interno generico r , spessore Δr e lunghezza L , possiamo pensarlo come una spira concatenata con il flusso $\Phi(t)$ sinusoidale.



- perdite per isteresi

Come appena discusso, il materiale non solo dispone di una certa conduttività che determina correnti parassite dunque di una potenza perduta non trascurabile, ma è anche sede di potenza perduta per isteresi.

Letteralmente “isteresi” (che deriva dal greco) significa perdita, in relazione al fatto che il campo di induzione non si annulla insieme a quello magnetico, ma con ritardo.



L'area racchiusa nel tratteggio in figura, rappresenta l'energia perduta in calore, nel volume del materiale, per isteresi magnetica. Aspetto e ampiezza del ciclo sono variabile e collegati a temperatura (se aumenta, diminuisce i valori di induzione magnetica) e dal tipo di materiale.

Curiosità: con << magneticamente duri >> intendiamo materiali che presentano valori elevati di magnetismo residuo e di forza coercitiva con un'area di ciclo di isteresi ampia.

Entrambi i due sopracitati fenomeni dissipativi, comportano una trasformazione dell'energia del campo elettromagnetico in energia termica, ecco il motivo dell'innalzamento della temperatura.

Ovviamente questo processo non è utile a scopi di funzionamento della macchina nel suo progetto ideale, ecco perché un eccesso di energia termica rappresenta un problema notevole per le macchine elettriche, soprattutto quando lavorano ad elevati valori di potenza, che danneggerebbe irreversibilmente il comportamento dell'intero apparato. Quindi un buon progetto di macchina, non può non considerare il sistema di raffreddamento.

Perdite meccaniche —> nelle macchine rotanti si parla di perdite per attrito o ventilazione

3. RENDIMENTO

Di qualunque tipo esse siano, una macchina elettrica è sede di perdite, e dobbiamo necessariamente quantificarle per saper definire il rendimento di una macchina

Parliamo di potenza assorbita durante il funzionamento: la differenza tra P_{in} (potenza in ingresso) e P_{us} (potenza in uscita) determina la P_{ass} (potenza assorbita) —> $P_{ass} = P_{in} - P_{us}$

Il rendimento si quantifica con η (eta, settima lettera dell'alfabeto greco), come rapporto tra potenza in uscita e quella in ingresso.

$$\eta = P_{us} / P_{in}$$

in caso di rendimento percentuale —> $\eta \% = 100 \eta = 100 (P_{us} / P_{in})$

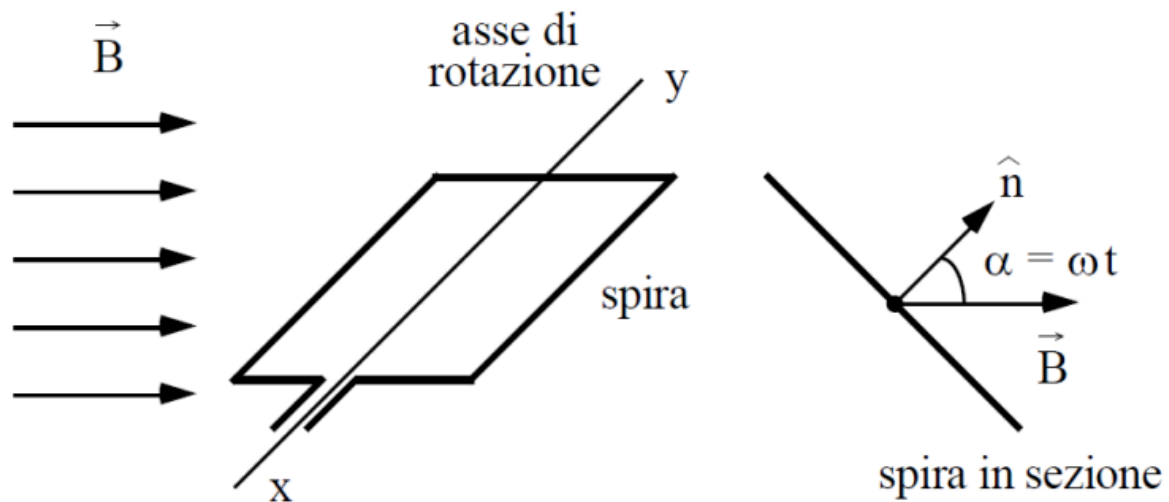
Precisiamo che il rendimento sarà sempre un numero $0 < \eta < 1$, motivato dal fatto che, essendo un dispositivo passivo, la potenza in uscita è obbligatoriamente più piccola di quella in ingresso.

4. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Effettuiamo una panoramica sui principi di funzionamento delle principali macchine rotanti.

Alla base del funzionamento di un motore vi è la legge di Faraday, che si verifica in quanto è presente una corrente che scorre in un conduttore immerso in un campo magnetico, manifestando una forza sul conduttore stesso. In una spira, in rotazione, con velocità angolare costante, attorno ad un asse di rotazione appunto, immersa in un campo magnetico uniforme, avremo una coppia meccanica.

Aumentando il numero di spire, eccitandole opportunamente, otterremo una coppia con continuità e conseguente rotazione dell'albero motore.



L'asse x - y rappresenta l'asserisco attorno al quale ruota la spira. Proprio a causa di questa rotazione, secondo la legge dell'induzione elettromagnetica, nella spira si genera una fem che, varia sinusoidalmente nel tempo.

5. SCELTA DEL MOTORE

Per ogni tipo di motore esiste una tecnologia più adatta di altre. La scelta ricade fra tre tipi principali di motori elettrici:

- **SINCRONO** —> per raggiungere velocità elevate
- **ASINCRONO** —> moto continuo e con poche variazioni di velocità
- **PASSO-PASSO** —> per un posizionamento preciso

Sarò inoltre necessario definire le specifiche tecniche del motore come potenza, coppia e velocità ed altri fattori come dimensione (il volume) ed il tipo di montaggio, come inserire il motore nel sistema da azionare.

La resistenza del motore dipende anche dall'ambiente in cui questo dovrà operare come particolari condizioni ambientali di umidità, corrosione, alte temperature,...

Si precisa che i motori destinati ad ambienti delicati sono protetti da alloggiamenti rinforzati, impermeabili, resistenti agli urti ed anche allo sporco.

Negli ultimi anni è diventato molto importante il criterio di efficienza energetica per il basso impatto energetico ed il minore impatto ambientale.

Come si sceglie tra un motore DC ed uno AC?

Sappiamo che i motori AC sono alimentati a corrente alternata mentre i DC a corrente continua.

Precisazioni:

- la velocità di un motore AC si controlla variando la corrente nel motore
- la velocità di un motore DC si controlla variando la frequenza, con un convertitore di frequenza ad esempio

Motivo per il quale i motori AC raggiungono una velocità di rotazione maggiore di quelli DC

6. MOTORI AC

Il principio di funzionamento risale a Galileo Ferraris: creazione di un campo rotante per mezzo di circuiti fissi, percorsi da correnti trifasi (per piccole potenze anche monofase).

Nel 1885 Ferraris dimostra in pubblico il risultato dei suoi studi: la generazione di un campo magnetico rotante da due bobine fisse tra loro perpendicolari e percorse da correnti isofrequenziali in quadratura.

Nel dettaglio: un piccolo cilindro di rame (il rotore), immerso nel campo magnetico generato dallo statore ferromagnetico, si muove grazie alle forze elettrodinamiche tra campo rotante e correnti indotte.

Abbiamo una spira di materiale conduttore percorsa da corrente, immersa in un campo magnetico libera di ruotare attorno ad un asse. Il campo magnetico B è uniforme e complanare con la spira.

Con la spira ferma, il flusso concatenato ad essa, essendo B uniforme e rotante con velocità ω , sarebbe variabile nel tempo con legge sinusoidale di pulsazione ω .

E' proprio questa variazione di flusso ad indurre nella spira chiusa una f.e.m. con conseguente circolazione di corrente sinusoidale di pulsazione ω . Questa, secondo la legge di Lenz, si opporrà alla causa che l'ha generata, cioè al moto rotatorio fra campo magnetico e spira. La corrente indotta annulla (o per lo meno riduce) l'entità del moto, la spira tenderà a far ruotare la spira nello stesso verso del campo rotante (ad opera delle forze elettromagnetiche).

La spira arriva a ruotare fino a 90° prima di fermarsi: quando il piano della spira è perpendicolare al campo magnetico, la forza sulla spira è nulla e dunque si ferma: ma grazie all'inerzia, la spira percorre in realtà un angolo leggermente superiore a 90° e la nuova coppia prodotta dal campo magnetico in nuova posizione, la costringe a tornare indietro (cambio verso del momento).

La rotazione della spira viene trasmessa ad un albero girevole facendo funzionare l'apparecchio elettrico.

Sono i più diffusi nell'industria grazie ai loro molteplici vantaggi:

- struttura più semplice;
- più economici per il meno consumo nell'avviamento;
- più robusti, avendo una durata di vita solitamente maggiore;
- sviluppo (spontaneo ed automatico) al variare della velocità, di una coppia motrice

per controbilanciare la coppia resistente applicata all'albero motore, determinando un funzionamento stabile (aumentando il carico rallenta);
- richiedono poca manutenzione.

La sincronizzazione tra rotazione del rotore e frequenza di corrente rende la velocità di questi motori costante.

E come dicevamo, sono particolarmente adatti per operazioni con movimento continuo e pochi cambi di velocità.

Il loro più grande ostacolo (che non ne permette una diffusione universale) è l'impossibilità di regolare velocità e coppia in ampi intervalli, soprattutto a costi contenuti.

Dove si usano? Il loro impiego riguarda piccoli motori per lavatrici, frigoriferi o montacarichi, ascensori, ventilatori,...

6.1. MOTORE AC ASINCRONO TRIFASE

Teorema del campo magnetico rotante

Un sistema polifase di correnti che scorre in un sistema di conduttori genera un campo magnetico di intensità costante con direzione di rotazione uniforme, generando appunto, un campo magnetico rotante, simile a quello ottenuto dalla rotazione di un magnete permanente da un motore primario (fornendo energia meccanica).

Il campo magnetico è pari alla somma dei tre campi generati dalle tre bobine. Le bobine sono collegate tra loro con un angolo di 120° , il sistema trifase è per definizione elettricamente disposto ad angolo pari a 120° elettrici, dunque il campo magnetico che si genererà come spiegato non sarà statico, ma bensì dinamico: rotazione di frequenza del campo a 50 Hz.

Il motore asincrono è un motore elettrico in AC con velocità angolare del rotore inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dagli avvolgimenti dello statore, da cui l'asincronismo.

E' noto come motore a induzione.

Sullo statore si genera un campo rotante mediante alimentazione trifase dei tre avvolgimento (uno per fase). Spontaneamente si crea un flusso statico rotante (il flusso induttore). Sul rotore ci sono gli avvolgimenti che, grazie al campo magnetico derivante dallo statore, generano un flusso rotorico trascinato da quello statorico, con una velocità inferiore (da cui asincrono) dipendente dal carico applicato.

Prova a rotore bloccato: a cosa serve?

Nella prova a rotore bloccato si alimenta il motore a tensione ridotta in modo da far circolare una corrente pari a quella nominale I_{1n} .

E' un analogia alla prova di cortocircuito di un trasformatore con V_{1cc} e I_{1n} .
Quando la macchina asincrona funziona con il rotore bloccato, gli avvolgimenti statorici e quali rotorici possono essere considerati il primario ed il secondario di un trasformatore.

I due avvolgimenti sono magneticamente accoppiati e le correnti alternate nello statore inducono correnti alternate di uguale frequenza nel rotore. Da qui il nome di macchine ad induzione cioè asincrone.

La macchina asincrona con rotore bloccato ed il trasformatore differiscono unicamente per la diversa struttura magnetica del circuito primario e secondario interno.

In entrambi i casi il circuito magnetico è realizzato in maniera tale da ridurre il più possibile la riluttanza (l'opposizione di un materiale al transito di un flusso magnetico) ed i flussi dispersi, ma nel motore asincrono tutto questo è relativo alla necessità di garantire un traferro (intervallo d'aria che interrompe la continuità del materiale in un circuito ferromagnetico) di adeguato spessore tra statore e rotore per permettere la rotazione di quest'ultimo. Le equazioni interne della macchina asincrona per il relativo circuito si risolvono con le leggi di Kirchhoff. Le espressioni per la reattanza magnetizzante X_0 e la corrente magnetizzante I_0 :

Lo scopo della prova è determinare il fattore di potenza e relativo $\cos \varphi$ e la corrente assorbita dal M.A.T. durante il funzionamento a vuoto. Dai risultati ottenuti è possibile calcolare le perdite meccaniche e le perdite nel ferro.

6.2. MOTORE AC SINCRONO TRIFASE (Brushless)

Sullo statore si genera un campo magnetico rotante alimentato da tre avvolgimenti (uno per fase). Sul rotore ci sono magneti permanenti (detti anche brushless sinusoidali) per generare il flusso rotorico trascinato da quello statico ad una velocità identica a quella dello statorico.

Sono motori nati per "andare" a 220V / 50Hz.

Non può avviarsi da solo, ma deve essere aiutato (solitamente si trova un rotore addizionale asincrono sull'albero).

Se il flusso rotorico è generato da avvolgimenti in DC e non da magneti, ci possono essere spazzole per l'alimentazione del rotore.

7. MOTORI DC

Trovano largo impiego anche in campo industriale e presentano vantaggi importanti:

- sono precisi;
- velocità controllabile variando la tensione di alimentazione;
- facili da installare (anche in sistemi mobili);
- esecuzione rapida delle varie fasi.

Adatti per applicazioni dinamiche ad alta precisione, come ascensori, ma anche per il posizionamento, come robot e macchine utensili.

Tra i principali svantaggi: meno adatti per alte potenze, composti da molte parti soggette ad usura e costose da sostituire.

7.1. MOTORI DC BRUSHED

Lo statore produce un campo magnetico fisso e costante ed è costituito da magneti permanenti.

Il flusso rotorico è prodotto dagli avvolgimenti alimentati da CC. Il collettore a spazzole (dispositivo di commutazione) alimenta gli avvolgimento del rotore durante la rotazione, in base a come richiesto.

E' il primo motore sviluppato nella storia. Sono economici.

Il controllo della velocità di rotazione avviene con semplicità.

La coppia erogata è proporzionale alla corrente circolante negli avvolgimenti rotorici.

Il più grande limite riguarda la commutazione a spazzole, perché si usavano e possono generare archi voltaici.

La vita media delle spazzole è compresa tra 1000 e 10000 ore di funzionamento.

I motori a spazzole sono meno efficienti dei motori brushless (75-80% di rendimento contro 85-90%).

7.2 MOTORI DC BRUSHLESS

Tutto uguale ai precedenti, tranne per la commutazione delle fasi che viene elettronicamente sulla misura della posizione dell'albero motore. Per questo motivo sono dotati di un encoder, cioè un sensore che rende possibile la commutazione elettronica determinando la posizione del rotore.

Non soffre dei problemi dovuti alle spazzole, non avendole

Elevati motori con elevata coppia, ma più costosi

Necessitano di elettronica di potenza e controllo abbastanza complessa

Nelle applicazioni di trasmissione devono essere associati ad un riduttore.

Hanno una vita lunga oltre le 10000 ore di funzionamento e risultano più affidabili/efficienti, funzionando a velocità più elevate (fino a 100000 giri/min. a fronte dei motori a spazzole)

Adatti ad esempio per smerigliatrici, ventilatori e seghe.

8. MOTORI PASSO-PASSO

Sono motori elettrici sincroni che mantengono con precisione la propria velocità di rotazione e posizione senza l'ausilio di trasduttori di feedback (come encoder o dinamo tachimetriche).

Non modificano la velocità di rotazione in funzione del carico, ma la mantengono costante.

In caso di sforzo eccessivo richiesto al motore (quindi supera la coppia massima erogabile), il motore si ferma.

Per ruotare i motori passo-passo è necessaria un'elettronica di controllo, detta di razionamento.

Non è possibile fornire semplicemente tensione a questo motore per utilizzarlo, come faremmo con un motore CC. A parità di volume, la coppia erogata da un passo-passo è molto più alta di quella di un motore brushless o CC.

Il motore pp è in grado di mantenere il carico fermo in posizione senza vibrazioni o pendolamento. Le applicazioni che richiedono accelerazioni e frenate repentine, traggono vantaggio dal rapporto coppia/inerzia elevato del rotore.

Per la costruzione semplice e robusta ed il basso costo di produzione, i motori passo-passo sono impiegati sia in applicazioni consumer che industriali, come macchina automatiche di riempimento/confezionamento, CNC, telai, ecc...

La totale assenza di componenti delicati nel motore o a rapida usura, rendono questo motore privo di manutenzione e perfetto per condizioni ostili.

Il motore pp non è adatto per un uso continuativo ad alta velocità.