



La macchina a collettore (o in corrente continua)

1° parte

Lucia FROSINI

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

1

L. Frosini

La macchina in c.c.

La macchina elettrica in c.c. può essere impiegata sia come generatore che come motore, tuttavia attualmente il suo impiego come generatore elettrico è raro, più diffuso è invece il suo impiego come motore elettrico.

Anche come motore, la diffusione di questa macchina è comunque in lenta, ma continua riduzione.

Infatti, mentre in passato il motore in c.c. aveva dei campi di impiego specifici (trazione elettrica, regolazione di velocità, attuazione di posizione) in cui rappresentava la soluzione tecnicamente più valida, oggi questo tipo di motore subisce la concorrenza dei più robusti motori elettrici in corrente alternata.

Questo fatto è dovuto alla disponibilità di convertitori statici di energia elettrica in c.a., capaci di regolare la frequenza e l'ampiezza della tensione di alimentazione, con i quali si possono ottenere da motori asincroni o sincroni le stesse regolazioni tipiche del motore in c.c.

2

L. Frosini

La macchina in c.c.

La macchina elettrica in c.c. fu la prima macchina elettrica ad essere inventata, intorno al 1870, come derivazione dell'anello di Pacinotti (1860). Inizialmente la scoperta fu del suo impiego come generatore, ma nel giro di pochi anni si scoprì anche il suo impiego come motore e nel 1879 fu realizzato il primo treno con motore elettrico.

Attualmente, le potenze dei motori in c.c. vanno da circa 10 W a circa 10 MW.

Le potenze più basse sono quelle dei piccoli servomotori (motori le cui condizioni operative sono soggette ad ampie e repentine variazioni sia nel campo della velocità che della coppia motrice, alle quali si devono adattare con la massima rapidità e precisione) impiegati per robot, movimenti d'asse, accessori delle automobili, ecc.

Le potenze più elevate sono quelle dei motori per laminatoi.

I principali vantaggi offerti dal motore in corrente continua risiedono nella sua relativa semplicità di funzionamento a **velocità variabile** e nella disponibilità di una **elevata coppia all'avviamento**.

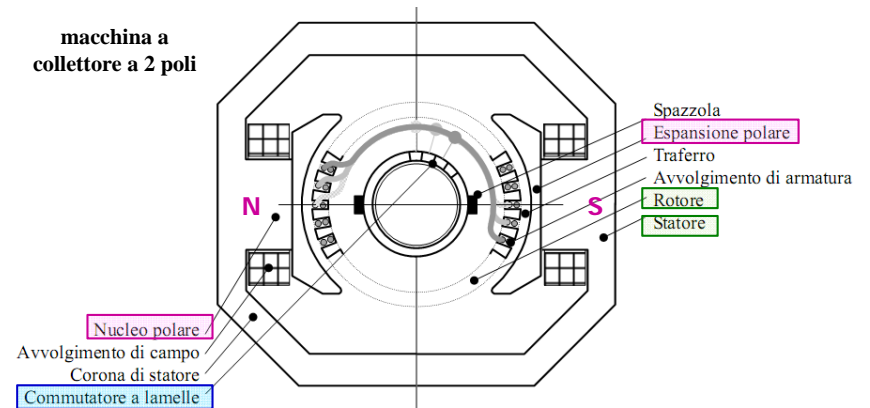
3

L. Frosini

Aspetti costruttivi

Le parti principali della macchina a collettore (o in corrente continua) sono:

- l'induttore (statore),
- l'indotto (rotore),
- **il commutatore a lamelle (o collettore).**



4

Aspetti costruttivi

Il suo funzionamento è basato essenzialmente sulla legge di Lorentz.

Lo statore (induttore) può essere a bobine (come in figura) o a magneti permanenti.

In entrambi i casi, lo statore produce un campo magnetico lungo una direzione costante: l'ampiezza del campo magnetico di statore può essere variabile solo se esso è prodotto tramite bobine, mentre coi magneti permanenti essa rimane costante.

Nel funzionamento da motore, l'avvolgimento di rotore (indotto) viene alimentato tramite le spazzole: in questo modo sono presenti spire percorse da corrente (sul rotore) all'interno di un campo magnetico (di statore).

Per la legge di Lorentz, sulle spire di rotore si manifestano forze meccaniche che danno origine a una coppia che porta il rotore in rotazione: il motore a collettore è auto-avviante, a patto che siano alimentati sia lo statore che il rotore.

Si osserva che il massimo valore della forza di Lorentz si ha quando la corrente scorre perpendicolarmente alle linee del campo magnetico.

5

Poli magnetici di induttore (statore) avvolto

Sull'induttore sono disposti i poli magnetici (alternativamente un nord e un sud).

Iniziamo a considerare il caso di statore avvolto, ossia con i poli realizzati tramite bobine, utilizzato generalmente per potenze > 5 kW (ma anche per potenze inferiori).

Ciascun polo è una struttura saliente costituita da:

■ nucleo polare attorno al quale è avvolta la bobina di eccitazione o di campo. Tali bobine, percorse nel verso opportuno da corrente continua, producono le polarità magnetiche richieste. Il nucleo polare può essere realizzato in forma massiccia o laminata.

■ espansione (o scarpa) polare, destinata a distribuire il campo magnetico in una porzione più ampia della circonferenza di traferro. Ove presente, l'espansione polare è sempre laminata a causa del fenomeno dello spennellamento di flusso (brusche variazioni di flusso che si hanno sulla superficie delle espansioni polari quando il rotore gira; tali variazioni sono dovute alla presenza delle cave di rotore).

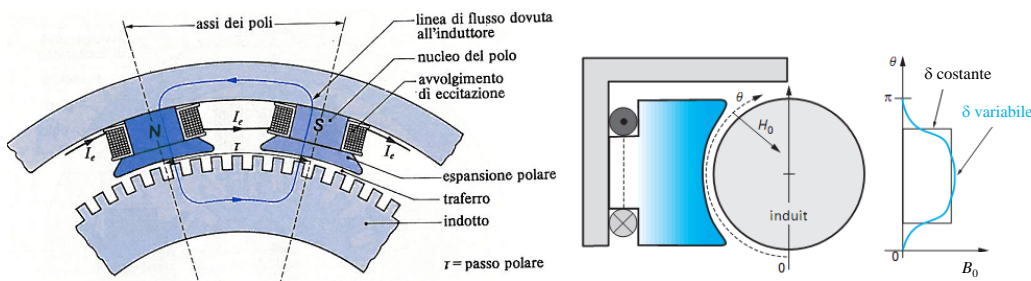
6

Poli magnetici di induttore (statore) avvolto

Il flusso magnetico prodotto dall'induttore si richiude attraverso una coppia di poli: la riluttanza del circuito magnetico percorso da questo flusso è dovuta per la maggior parte ai due traferri.

L'ampiezza del traferro δ varia da qualche millimetro a qualche centimetro all'aumentare della potenza della macchina e, generalmente, non è costante, al fine di modulare la distribuzione spaziale dell'induzione magnetica al traferro.

L'induzione massima al traferro varia da 0,6 a 1,2 T, all'aumentare della potenza.



7

Giogo di induttore (statore)

I poli magnetici sono tra loro collegati attraverso la corona o giogo di statore, che funge da strada preferenziale per la richiusura delle linee di campo.

Il giogo di statore è realizzato in materiale ferromagnetico con struttura che può essere massiccia, perché il campo magnetico che lo attraversa non è variabile.

Tuttavia, quando si prevede una alimentazione attraverso convertitori statici (chopper, ponti raddrizzatori, ecc.), lo statore deve essere totalmente laminato (lo stesso vale per i motori a eccitazione serie alimentati in alternata, come più avanti spiegato).

Infatti, i convertitori statici forniscono una tensione continua, ma ricca di disturbi ad alta frequenza: conseguentemente, le correnti e i flussi da essi generati sono affetti da pulsazioni che possono produrre nel ferro massiccio dell'induttore forti circolazioni di correnti parassite.

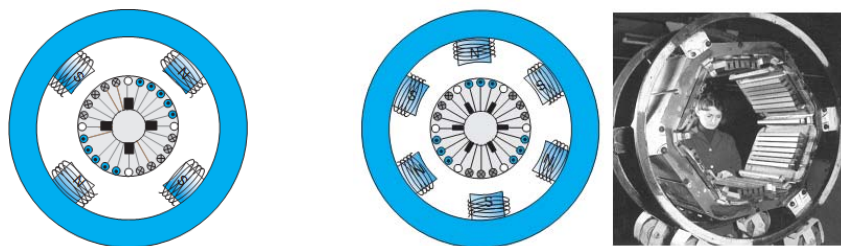


8

Numero di poli

Contrariamente alle macchine asincrone e sincrone, il numero di poli della macchina in c.c. non è legato alla velocità del rotore, ma alla potenza della macchina e ad altri parametri, per cui non è possibile definire un metodo standard per la sua scelta.

Generalmente il numero di poli è 2, 4 (per potenze medie da 1 a 10 kW), 6 o più (per potenze elevate, anche > 1 MW), ma può arrivare a qualche decina per macchine particolari.



9

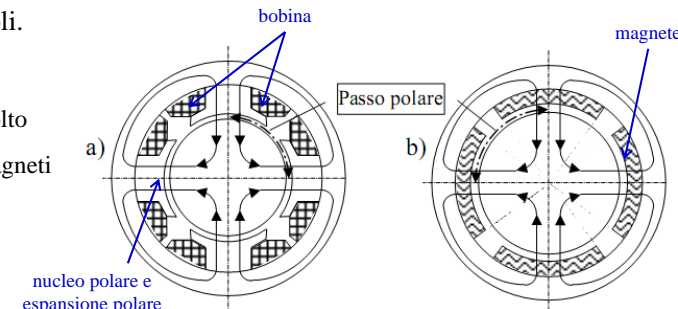
Numero di poli

Si definisce passo polare l'estensione angolare di una polarità magnetica dell'induttore:

$$\tau = \frac{2\pi}{p}$$

dove p è il numero di poli.

- a) motore con statore avvolto
b) motore con statore a magneti permanenti superficiali



Nei motori di piccola taglia (generalmente < 5 kW) il flusso magnetico di induttore può essere generato da magneti permanenti.

10

Magneti permanenti

I magneti permanenti usati nelle macchine in c.c. (e nelle macchine brushless, che studieremo in seguito) sono realizzati con **materiali magnetici duri**, caratterizzati quindi da **elevata induzione residua B_r** e da **elevata energia specifica $(B \cdot H)_{\max}$** .

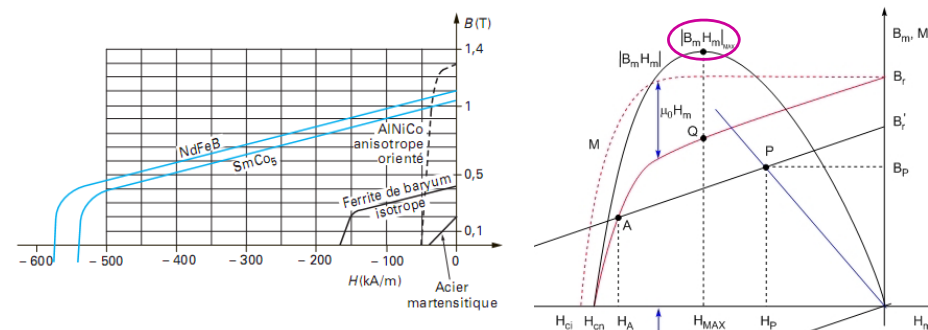
A seconda del tipo di materiale, questi parametri possono cambiare in funzione della temperatura. I materiali principali usati nelle macchine in c.c. sono i seguenti:

Materiale	Induzione residua a 120°C B_r [T]	Energia specifica $(B \cdot H)_{\max}$ [kJ/m³]	Temperatura limite di utilizzo [°C]
Ferrite di bario isotropa	0,4	8	350
AlNiCo anisotropo orientato	1,3	40	450
SmCo5	1	150	250
NdFeB	1,1	200	200

11

Magneti permanenti

I materiali per magneti permanenti sono dotati di un ampio ciclo di isteresi, che consente loro di mantenere valori di induzione elevati anche in assenza di eccitazione esterna. I parametri caratteristici di questi materiali si individuano nel secondo quadrante del ciclo di isteresi:



Caratteristiche di smagnetizzazione dei principali magneti permanenti a temperatura ambiente

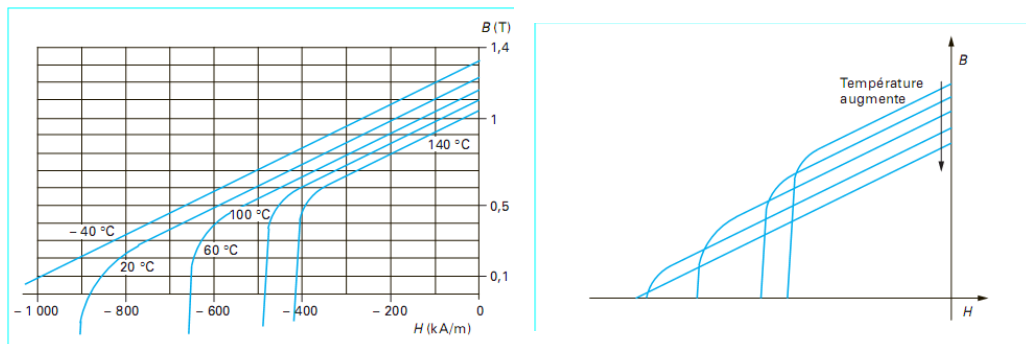
L'energia specifica $(B \cdot H)_{\max}$ è individuata tramite la curva sopraindicata.

12

Magneti permanenti

Purtroppo le caratteristiche di magnetizzazione di questi materiali cambiano in funzione della temperatura.

Di seguito sono riportati gli andamenti per il NdFeB e per una ferrite:



Caratteristiche di smagnetizzazione del NdFeB: si osserva che le prestazioni di questo materiale si riducono anche senza superare la sua T limite

Andamento della caratteristica di smagnetizzazione di una ferrite

13

Magneti permanenti

Dai grafici precedenti si osserva che i magneti si possono smagnetizzare in maniera importante anche prima di arrivare alla temperatura di Curie (al di sopra della quale il materiale si comporta come paramagnetico).

Per il NdFeB, all'aumentare della temperatura, diminuisce non solo B_r , ma anche l'energia specifica (che indicativamente è proporzionale alla lunghezza della curva del ciclo di isteresi nel secondo quadrante).

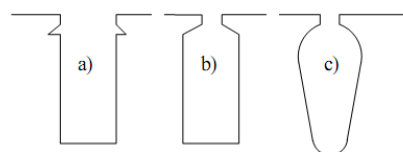
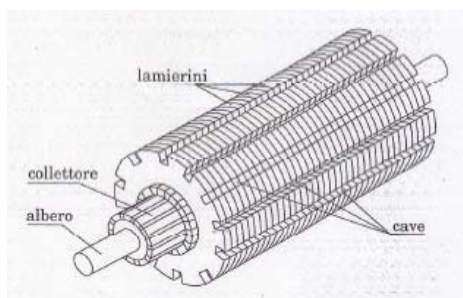
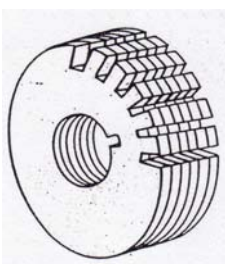
Il SmCo ha un comportamento simile al NdFeB, ma è meno sensibile alla temperatura. La ferrite invece reagisce diversamente: all'aumentare della temperatura, diminuisce B_r , ma aumenta H_c (quindi non c'è rischio di smagnetizzazione) e l'energia specifica rimane quasi costante; al diminuire della temperatura, aumenta B_r , ma diminuisce H_c (con rischio di smagnetizzazione). Per questo si dice che le ferriti si smagnetizzano raffreddandosi.

È quindi importante definire precisamente la temperatura massima di funzionamento.

14

Indotto (rotore)

L'indotto è costituito da un cilindro di materiale ferromagnetico formato da lamierini, al fine di ridurre le perdite per correnti parassite che si generano in esso durante la sua rotazione all'interno del campo magnetico induttore. I lamierini sono scanalati lungo la periferia: le scanalature sono dette cave, destinate a contenere i conduttori che costituiscono l'avvolgimento di indotto. Le parti in ferro tra due cave contigue sono denominate denti.



Lamierino di indotto e forme tipiche di cave

- cava rettangolare aperta
- cava rettangolare semichiusa
- cava semichiusa sub-trapezia.

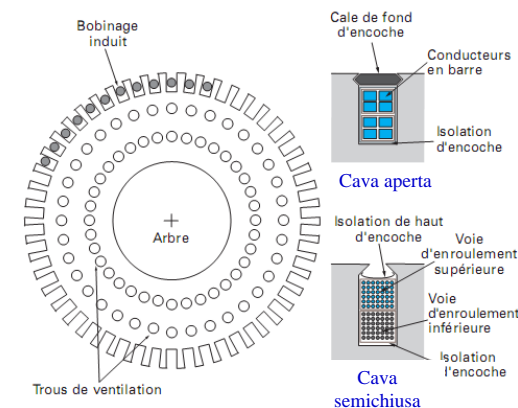
15

Indotto (rotore)

Per motori di potenza elevata, i lamierini presentano dei fori di ventilazione e le cave sono aperte, per permettere l'inserimento dei conduttori sotto forma di barre rigide preformate. Queste cave vengono poi chiuse con una bietta.

Le cave semichiusate possono essere di forma arrotondata o rettangolare e vengono riempite con conduttori a filo (per motori di piccola-media potenza).

La forma delle cave influenza la reattanza di dispersione di rotore: le cave aperte presentano una maggiore riluttanza del percorso del flusso disperso e quindi una minore induttanza (e reattanza) di dispersione.



16

Avvolgimento di indotto (rotore)

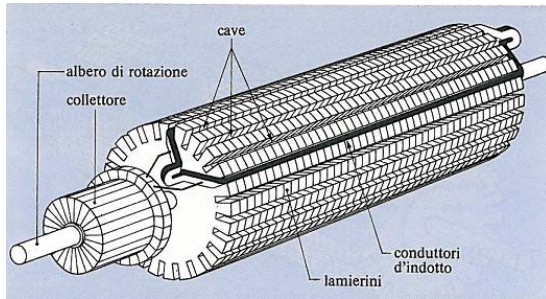
L'avvolgimento di indotto è quindi costituito da un certo numero di conduttori rettilinei posti nelle cave, che vengono collegati anteriormente e posteriormente.

I due metodi fondamentali per realizzare questi collegamenti sono:

- **embricato o parallelo;**
- **ondulato o serie.**

Si definiscono:

- **conduttore:** la parte elementare dell'avvolgimento, in cui il tratto **attivo** è inserito all'interno della cava, mentre il tratto rimanente costituisce la **connessione**.
- **spira:** parte dell'avvolgimento costituita da 2 conduttori collegati in serie, detti **lati** della spira.

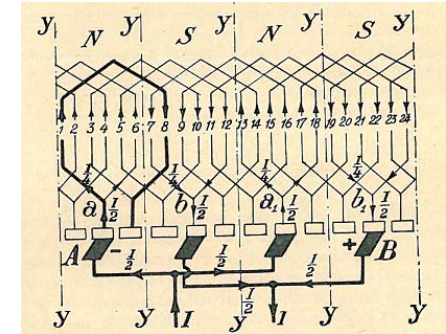


Avvolgimento embricato

L'avvolgimento **embricato** è realizzato unendo un primo conduttore attivo (1) che si trova sotto un polo (N) con un conduttore attivo (8) che si trova sotto il polo successivo (S), alla distanza di circa un passo polare τ .

Quindi, si torna indietro per collegarsi con un conduttore attivo (3) in prossimità del primo (1) e si va avanti collegandosi con un conduttore attivo (10) che si trova a circa un passo polare da quest'ultimo e così via.

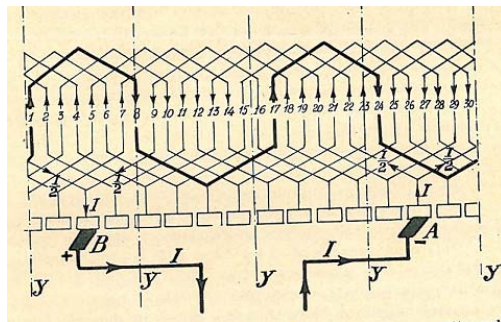
Dopo aver percorso due volte la periferia di rotore, si tornerà al punto di partenza.



Avvolgimento ondulato

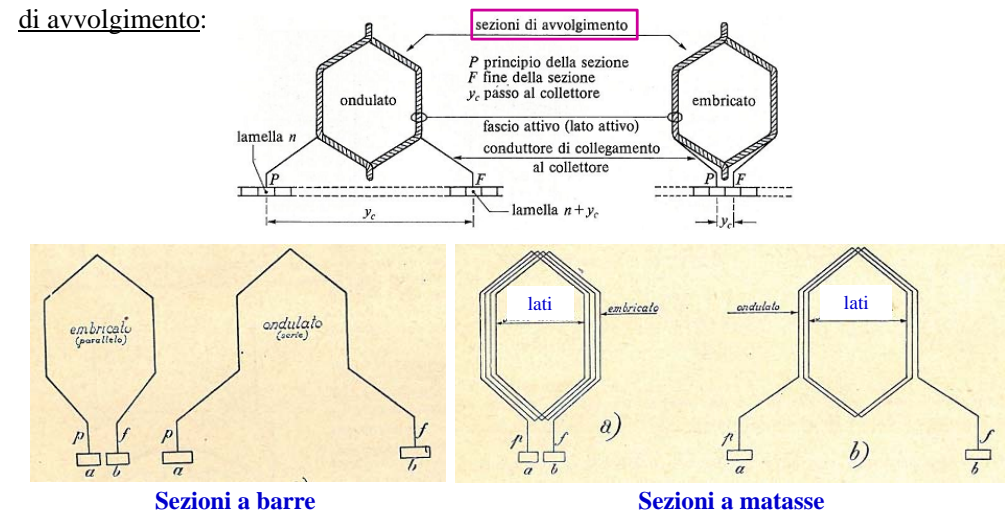
L'avvolgimento **ondulato** viene invece realizzato unendo un conduttore attivo (1) che si trova sotto un polo con uno (8) che si trova sotto il polo successivo a distanza di circa un passo polare τ .

Quest'ultimo (8) viene collegato con quello (17) che si trova sotto un polo successivo, sempre a distanza di circa un passo polare e così via.



Sezioni di avvolgimento di indotto

Si osserva che, in entrambi i tipi di collegamento, l'avvolgimento di indotto è costituito da una successione di elementi costruttivi uguali fra loro, denominati **sezioni di avvolgimento**:



Sezioni a barre

Sezioni a matasse

Avvolgimento di indotto

Una **sezione** può essere formata da una sola spira (**sezione a barre**) oppure da un insieme di spire collegate in serie tra loro (**sezione a matassa**).

I **capi** della sezione (o della spira) sono le estremità della sezione (o della spira), indicati come principio (P) e fine (F), collegati alle lamelle di collettore.

Il collettore ha sempre tante lamelle quante sono le sezioni di avvolgimento.

Nel caso di sezioni a matassa, si definisce **lato di sezione** l'insieme dei conduttori appartenenti a quella sezione posti in una stessa cava.

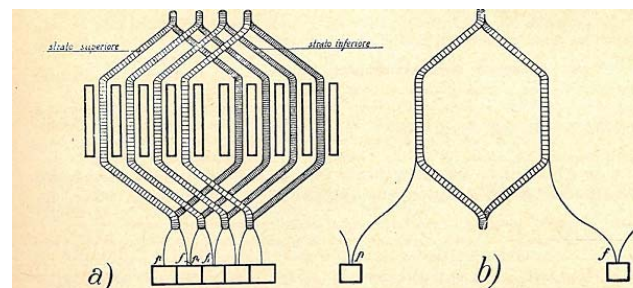
Per evitare incroci tra le connessioni di sezioni contigue, il procedimento costruttivo prevede che l'avvolgimento di indotto sia realizzato con due strati di conduttori in ciascuna cava: uno superiore vicino al traferro e uno nella parte più interna della cava.

Per permettere la costruzione dell'avvolgimento di indotto su due strati, le sezioni a matassa vengono realizzate con una piegatura normale al piano delle spire nel punto di mezzo delle connessioni frontali.

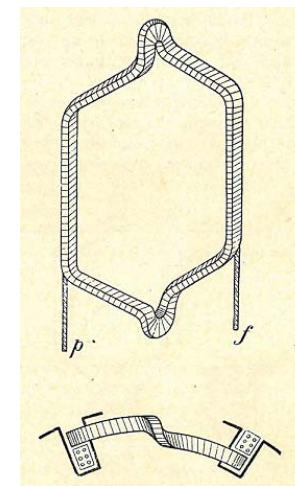
21

Sezioni a matasse

La **sezione a matassa** assume la seguente forma caratteristica e i due tipi di avvolgimento (embricato o ondulato) si differenziano solo all'atto di eseguire i collegamenti delle sezioni alle lamelle del collettore.



Sezioni a matasse: a) embricato, b) ondulato

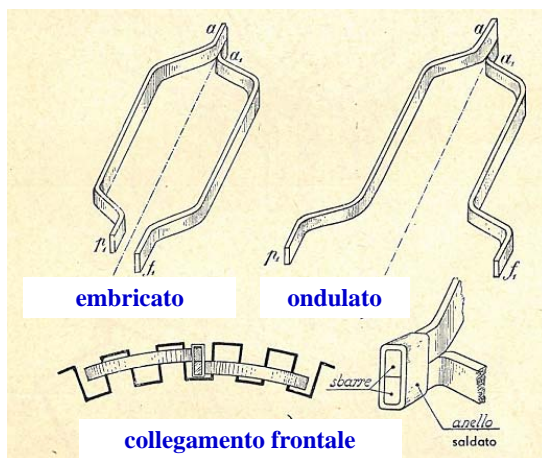


22

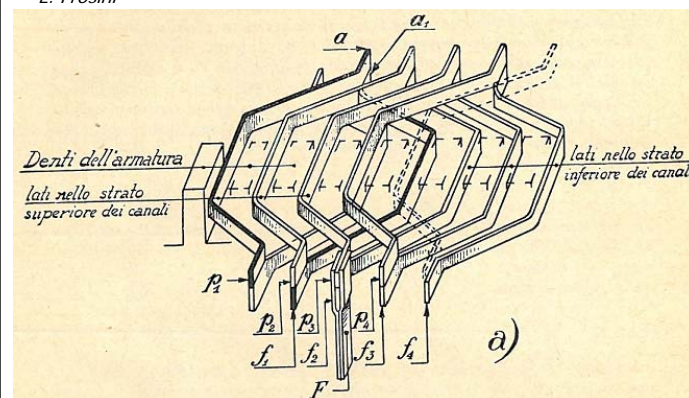
Sezioni a barre

Nel caso di **sezioni a barre**, a partire dalle piattine di rame, si costruiscono le mezze sezioni, che assumono forma diversa a seconda che l'avvolgimento sia embricato o ondulato.

Le mezze sezioni vengono quindi successivamente collegate tra loro per formare le sezioni complete, distribuendo un lato nello strato superiore e un lato in quello inferiore.

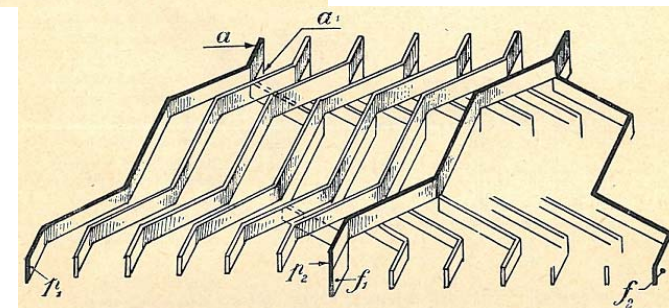


23



Avvolgimento a barre embricato

Avvolgimento a barre ondulato



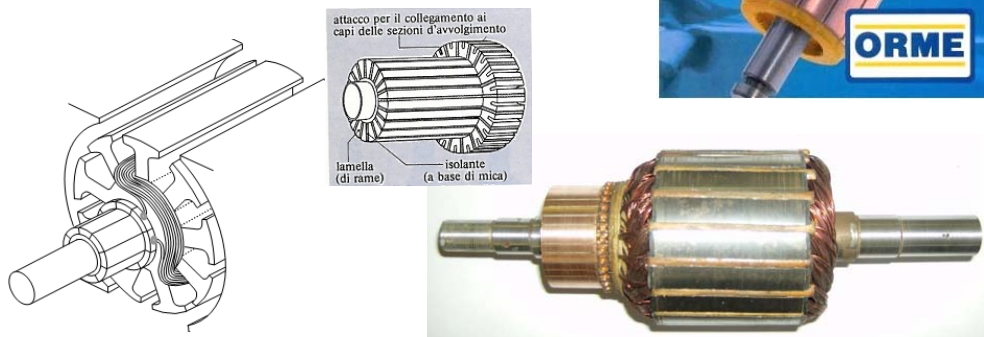
24

Collettore a lamelle

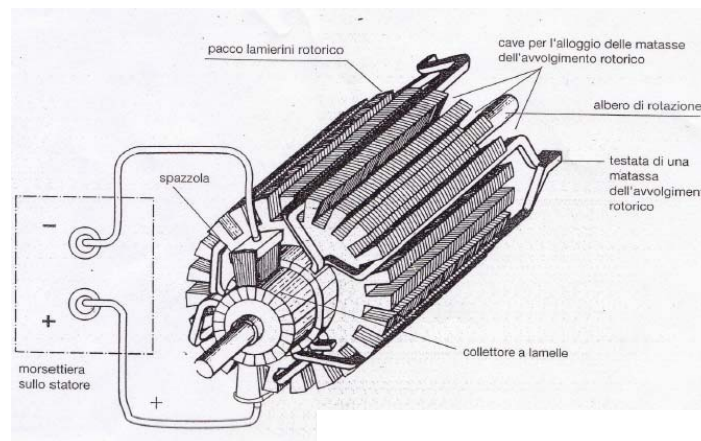
Il principio e la fine di ogni sezione sono collegati ad una lamella del collettore (o commutatore) a lamelle, che, insieme alle spazzole, rappresenta l'organo di adduzione della corrente all'avvolgimento di indotto.

Le lamelle di rame sono isolate tra loro.

Il collettore è rotante solidalmente con l'albero.



Collettore a lamelle



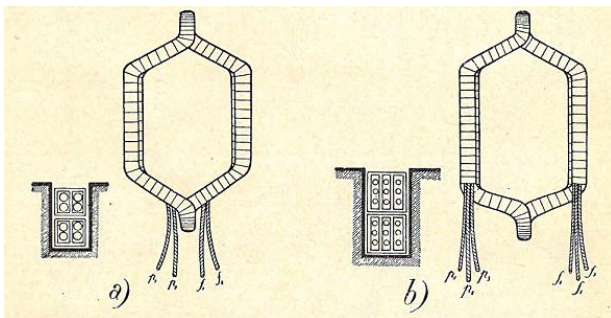
Dettagli dell'avvolgimento di indotto

Fino ad ora abbiamo considerato disposizioni con due lati per cava.

Si possono avere anche più di due lati per cava (ad es. 4 o 6) e di conseguenza si avranno più sezioni nella stessa cava (ad es. 2 o 3).

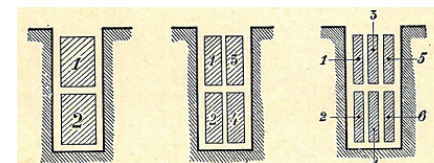
A loro volta, ciascun lato potrà essere costituito da più conduttori (in questo caso si può parlare di **fascio**, che può essere costituito da un numero qualsiasi di conduttori).

In ogni caso, ciascuna sezione sarà sempre costituita da un lato nello strato superiore e l'altro in quello inferiore.

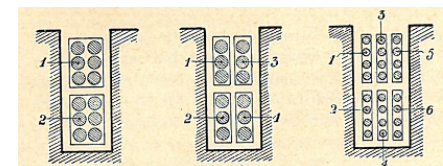


Dettagli dell'avvolgimento di indotto

Sezioni frontali di cave di avvolgimenti a barre a 2, 4 e 6 lati:



Sezioni frontali di cave di avvolgimenti a matasse a 2, 4 e 6 lati (fasci):



I lati (o fasci) sono numerati in modo che in uno strato si trovino tutti i numeri pari e nell'altro tutti i numeri dispari.

Ogni sezione risulterà quindi costituita da un lato di posto pari collegato a un lato di posto dispari, per avere sempre un lato nello strato inferiore e uno nello strato superiore.

Avvolgimento di indotto

Quindi, una sezione è costituita da due lati di conduttori appartenenti alternativamente allo strato esterno e allo strato interno.

I lati di ciascuna sezione sono detti attivi perché responsabili della conversione elettromeccanica.

L'estensione angolare di una sezione è la distanza tra due lati di conduttori direttamente collegati tra loro: deve essere prossima al passo polare τ dell'induttore, in modo da concatenare il maggior flusso possibile.

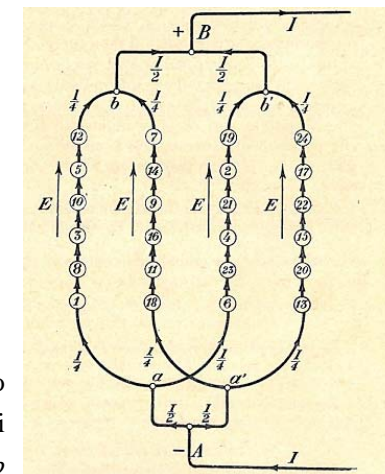
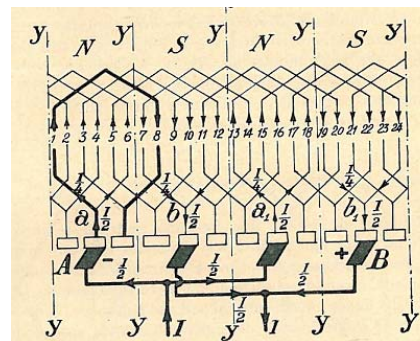
L'avvolgimento embricato si sviluppa in modo che sezioni successive giacciono sotto la stessa coppia polare.

Invece, nell'avvolgimento ondulato le sezioni successive si trovano sotto coppie polari successive.

29

Avvolgimento embricato

Vediamo un esempio di avvolgimento embricato per una macchina a 4 poli:



Partendo dal punto a e percorrendo l'avvolgimento verso il conduttore 1, si trovano collegati in serie i conduttori 1-8-3-10-5-12 e si arriva al punto b : tra b ed a si ha una tensione E , pari alla somma delle f.e.m. in tali conduttori.

Nota: per semplicità, consideriamo le sezioni costituite da singole spire.

30

Avvolgimento embricato

Proseguendo dal punto b si arriva in a_1 percorrendo i conduttori 7-14-9-16-11-18, i quali hanno f.e.m. concordi tra loro, ma opposte di segno rispetto alle precedenti (perché la corrente scorre in verso opposto).

Quindi tra b ed a_1 si ha una tensione uguale a quella tra b ed a : i punti a ed a_1 sono allo stesso equipotenziale.

Discorso analogo vale per la serie di conduttori che va da a_1 a b_1 e per quella che da b_1 torna ad a .

Collegando fra loro i due punti equipotenziali a e a_1 , e fra loro b e b_1 , si può derivare un circuito esterno tra A e B rispetto al quale le 4 tensioni considerate risultano collegate tra loro in parallelo.

Tra A e B si ha una tensione corrispondente alla tensione di ciascuna serie di conduttori, mentre la corrente che circola nel circuito esterno è uguale a 4 volte quella fornita da ciascuna serie.

31

Avvolgimento embricato

Sul collettore si hanno quindi 4 spazzole alternativamente positive e negative: le spazzole omonime sono direttamente collegate tra loro e il circuito esterno è collegato tra i morsetti A e B così ottenuti.

Si può dire che le 4 spazzole dividono l'avvolgimento in 4 **vie interne** (o circuiti distinti uguali) e ciascuna via interna comprende $\frac{1}{4}$ del numero totale dei conduttori.

Le vie interne sono collegate fra loro in parallelo e quindi la tensione che si rende disponibile sul circuito esterno corrisponde alla tensione complessiva che si ottiene su ciascuna via interna, mentre la corrente nel circuito esterno è 4 volte quella che circola nei conduttori dell'avvolgimento.

Queste considerazioni si estendono ad avvolgimenti embricati con qualsiasi numero di poli e con sezioni costituite da più spire (in questo caso si parla propriamente di *lati*, anziché di *conduttori*).

32

Riassunto sull'avvolgimento embricato

In generale, con un avvolgimento EMBRICATO, sul collettore si hanno tante spazzole quanti sono i poli.

Le spazzole dividono l'avvolgimento in tante vie interne, uguali fra loro e collegate tra loro in parallelo, quanti sono i poli.

Ogni via interna comprende un numero di conduttori pari al numero totale dei conduttori diviso per il numero di poli.

Partendo da una spazzola, si arriva alla spazzola vicina di segno contrario dopo aver percorso metà dei conduttori sotto un polo e metà sotto il polo seguente.

Partendo da una lamella, si giunge alla lamella successiva dopo aver percorso una singola sezione, formata da un lato sotto un polo e da un lato sotto il polo successivo.

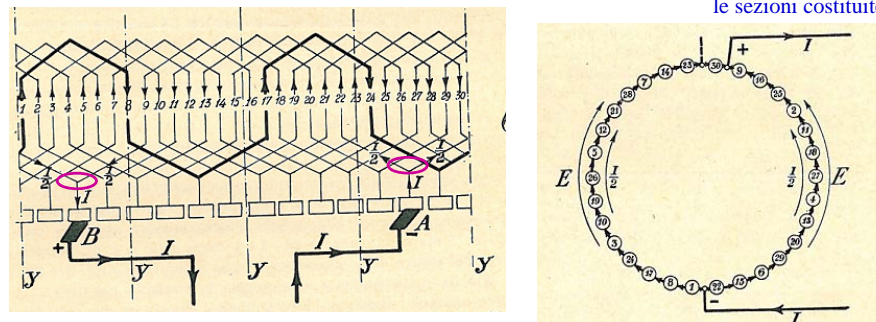
La f.e.m. complessiva disponibile al rotore è quella relativa a una via interna.

I lati dell'avvolgimento sono percorsi da una corrente pari a quella del circuito esterno divisa per il numero di poli.

33

Avvolgimento ondulato

Vediamo ora un esempio di avvolgimento ondulato a 4 poli: *Nota: per semplicità, consideriamo le sezioni costituite da singole spire.*



Sulla connessione 30-9 i versi delle f.e.m. convergono verso il centro della connessione e perciò sulla lamella corrispondente appoggia una spazzola positiva (B).

Sulla connessione 22-1 i versi delle f.e.m. divergono dal centro della connessione verso i due conduttori 1 e 22 e perciò sulla lamella corrispondente si appoggia la spazzola negativa (A).

34

Avvolgimento ondulato

Le due spazzole dividono l'avvolgimento in due **vie interne** (o circuiti distinti) in ciascuna delle quali si trovano collegati in serie metà dei conduttori.

Si deduce che la tensione fra le spazzole corrisponde a quella che si ha in metà dei conduttori, mentre la corrente nel circuito esterno è uguale a 2 volte quella che percorre i conduttori dell'avvolgimento.

Lo stesso principio si estende a un avvolgimento ondulato con un numero di poli qualsiasi: qualunque sia il numero di poli, sono necessarie due sole spazzole, che dividono l'avvolgimento in due vie interne, ognuna delle quali comprende metà dei conduttori di indotto.

La tensione disponibile tra le spazzole è pari a quella che si ha su metà dei conduttori.

La corrente nel circuito esterno è doppia di quella che percorre i singoli conduttori.

Partendo da una lamella, si arriva alla lamella vicina dopo aver fatto un giro completo, percorrendo un conduttore per ogni polo e tante sezioni quante sono le coppie polari.

35

Sintesi sull'avvolgimento di indotto

Avvolgimento embricato	
n. poli	p
n. spazzole	p
n. vie interne ($2a$)	p
n. lati per via interna	$(n. \text{ lati totali})/p$
Tensione totale = quella che si ha su $1/p$ conduttori	
Corrente totale = p volte quella che percorre i conduttori	

Avvolgimento ondulato	
n. poli	p
n. spazzole	2
n. vie interne ($2a$)	2
n. lati per via interna	$(n. \text{ lati totali})/2$
Tensione totale = quella che si ha su $1/2$ conduttori	
Corrente totale = 2 volte quella che percorre i conduttori	

36

Sintesi sull'avvolgimento di indotto

Si può quindi concludere che:

■ l'avvolgimento embricato è adatto per macchine con tensione di armatura modesta e corrente elevata (a parità di corrente nei conduttori di indotto, la corrente ricavata dalla macchina è la somma delle correnti provenienti da ciascuno dei paralleli).

■ l'avvolgimento ondulato, a parità di numero complessivo di conduttori, è invece in grado di fornire f.e.m. più elevate e pertanto questo avvolgimento si adatta a macchine per tensioni alte.

Solitamente, le macchine in c.c. di bassa potenza sono ad avvolgimento embricato, mentre quelle di elevata potenza sono ad avvolgimento ondulato e con sezioni a barre.

In generale, se l'avvolgimento di rotore è articolato in **a coppie di vie interne** e I_a è la **corrente totale al rotore**, la **corrente I_z nei singoli conduttori dell'avvolgimento** vale:

$$I_z = \frac{I_a}{2a}$$

37

Osservazioni sulle perdite Joule di rotore

Da quanto detto, si potrebbe pensare che, per un numero di paia poli p_p maggiore di uno, le perdite per effetto Joule di rotore siano minori per un avvolgimento embricato che per uno ondulato, perché la corrente nei singoli conduttori è minore.

In realtà, a parità di corrente totale I_a e di tensione totale al rotore, le perdite Joule in un avvolgimento embricato o ondulato sono approssimativamente le stesse. Infatti, mantenendo la stessa densità di corrente J , per l'avvolgimento embricato si ha:

$$J = \frac{I_z}{S} = \frac{I_a}{2p_p \cdot S}$$

Quindi la sezione S dei conduttori deve essere inversamente proporzionale a p_p .

Per avere la stessa tensione totale al rotore, con l'embricato occorre un numero di conduttori pari a quello dell'ondulato moltiplicato per p_p .

Poiché le perdite Joule sono proporzionali al peso del rame e questo è proporzionale al n° di conduttori per S , il prodotto di questi rimane invariato e quindi anche le perdite.

38

Versi delle correnti di indotto

Consideriamo una macchina a 2 poli (quindi 2 vie interne), con un indotto embricato a 6 cave e 12 conduttori.

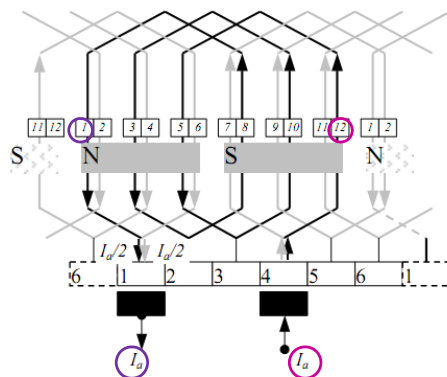
Ad un dato istante, la corrente I_a di una spazzola si distribuisce a metà ($I_a/2$) nelle due parti dell'avvolgimento che hanno origine dalla lamella a contatto con la spazzola.

Ad es., la corrente $I_a/2$ entra nel conduttore 12 ed esce, attraverso un collegamento posteriore, dal conduttore 5.

Dal conduttore 5 entra, attraverso un collegamento anteriore, nel conduttore 10.

Dal conduttore 10 esce dal conduttore 3 e da qui entra nel conduttore 8.

Dal conduttore 8 entra nel conduttore 1 e da qui va verso l'altra spazzola.



39

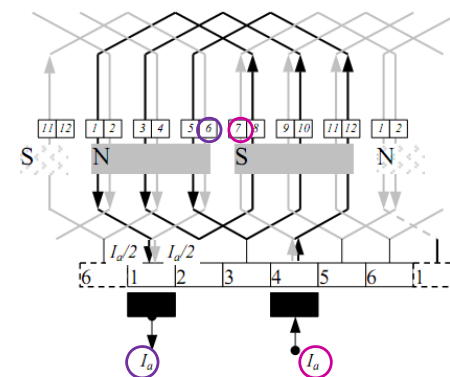
Versi delle correnti di indotto

Analogamente, la corrente $I_a/2$ entra nel conduttore 7 ed esce, attraverso un collegamento posteriore, dal conduttore 2.

Dal conduttore 2 entra, attraverso un collegamento anteriore, nel conduttore 9.

Dal conduttore 9 esce dal conduttore 4 e da qui entra nel conduttore 11.

Dal conduttore 11 esce dal conduttore 6 e da qui va verso l'altra spazzola.



Quindi, le due metà dell'avvolgimento terminano nella lamella diametralmente opposta a quella di ingresso, dove si trova la spazzola destinata al recupero della corrente I_a .

40

Versi delle correnti di indotto

Durante il moto di rotazione dell'avvolgimento, essendo fissa la posizione delle spazzole, le varie lamelle verranno, in successione, a passare in contatto con le spazzole e, per questo, i punti di immissione e di emissione della corrente varieranno in riferimento all'avvolgimento di rotore, ma resteranno fissi rispetto alla struttura di statore.

Per una macchina a 2 poli:

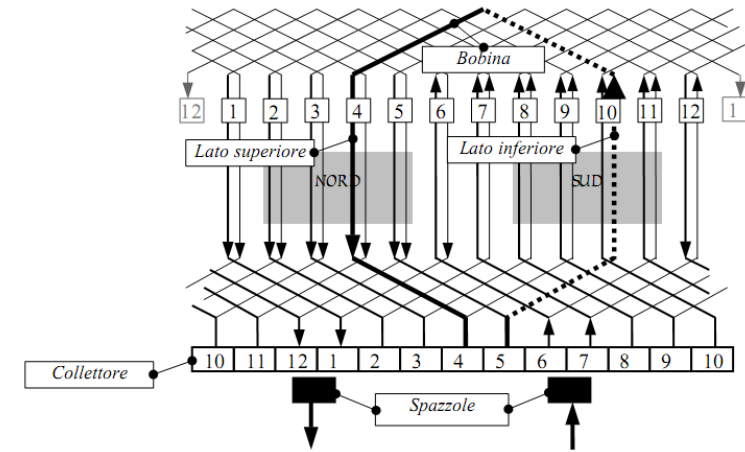
in ogni istante e per qualunque posizione del rotore, in una sezione trasversale dell'armatura vi saranno conduttori percorsi da corrente entrante in metà circonferenza della macchina e conduttori percorsi da corrente uscente nell'altra metà.

Per un numero di poli maggiore di due, i conduttori saranno percorsi da corrente entrante e uscente alternativamente per ogni passo polare.

41

Versi delle correnti di indotto

Questo è un esempio di avvolgimento di indotto embricato a 2 poli, con 12 cave, dove sono evidenziati i due lati di una sezione, uno nello strato superiore e uno in quello inferiore:



(in questa figura, la posizione delle spazzole è nell'istante di commutazione tra 2 lamelle)

42

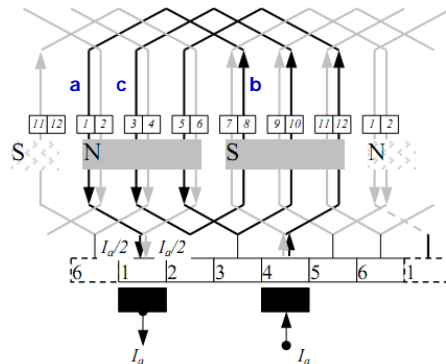
Dettagli sugli avvolgimenti: embricato

Riprendiamo il rotore con 2 poli, 6 cave e 12 conduttori.

Siano **a** e **b** due lati di sezione (che in questo caso coincidono con i lati di spira) collegati tra loro con un collegamento posteriore. Il lato **a** sia dispari (**n. 1**, esterno) e il lato **b** pari (**n. 8**, interno).

Naturalmente **a** e **b** si trovano a distanza di un passo polare τ l'uno dall'altro, sotto due poli diversi.

Per costruire l'avvolgimento **embricato**, a partire da **b**, si "torna indietro" e si collega **b** al lato di sezione **c** (dispari, **n. 3**, esterno) adiacente ad **a**.



43

Dettagli sugli avvolgimenti: embricato

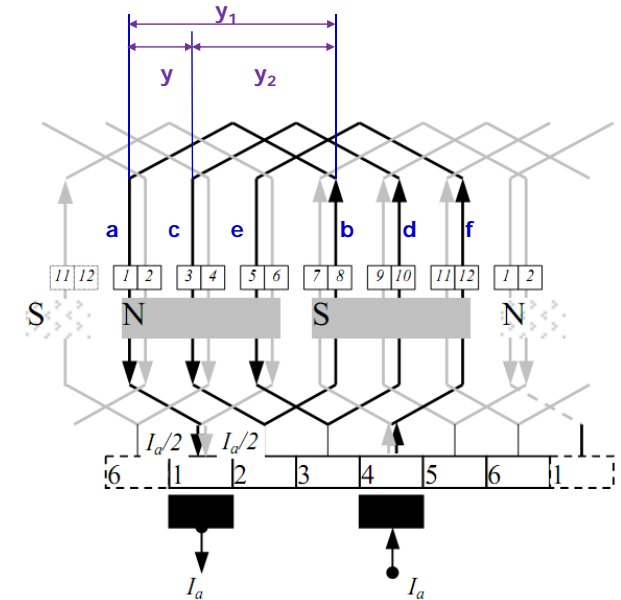
A sua volta il lato **c** è collegato al lato **d** (pari, **n. 10**, interno), sotto il polo successivo, a distanza di un passo polare τ .

Da **d** si torna ad **e**, che a sua volta è collegato ad **f**.

Si definisce:

y_1 = passo posteriore tra i lati di una sezione

y_2 = passo anteriore tra la fine di una sezione e l'inizio della successiva.



44

Dettagli sugli avvolgimenti: embricato

$y = y_1 + y_2 =$ passo risultante tra due lati di sezione consecutivi appartenenti allo stesso strato.

Nel caso esaminato si ha:

$$y_1 = b - a = 8 - 1 = 7 \quad \rightarrow \quad \text{DISPARI}$$

$$y_2 = c - b = 3 - 8 = -5 < 0 \quad \rightarrow \quad \text{DISPARI}$$

$$y = y_1 + y_2 = c - a = 3 - 1 = 2 \quad \rightarrow \quad \text{PARI}$$

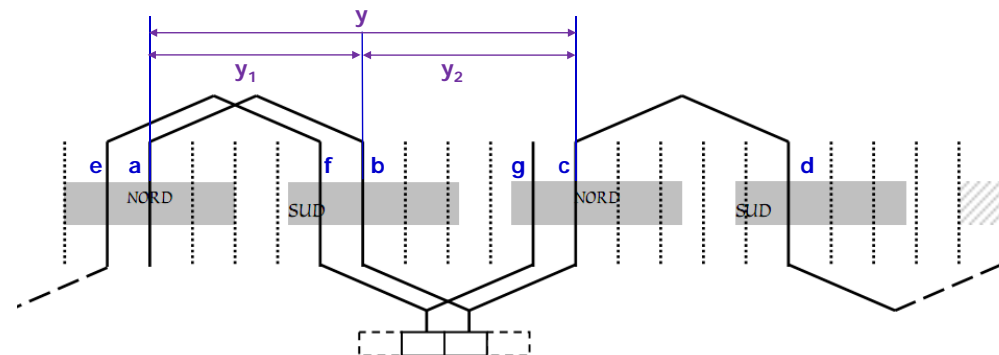
Nota: con y , y_1 o y_2 pari si rimane sullo stesso strato, altrimenti si cambia strato.

L'avvolgimento **embricato** (detto anche **parallelo**) è caratterizzato da: $y_2 < 0$

45

Dettagli sugli avvolgimenti: ondulato

Per costruire l'avvolgimento **ondulato** invece, a partire da **b**, si “va avanti” e si collega **b** al lato di sezione **c** che si trova a distanza di un passo polare, sotto il polo successivo. Si procede a collegare tutti i lati di sezione fra loro in questo modo.



L'avvolgimento **ondulato** (detto anche **serie**) è caratterizzato da: $y_2 > 0$

46

Dettagli su avvolgimento embricato semplice

Torniamo all'avvolgimento **embricato**.

Si chiama SEMPLICE, l'avvolgimento embricato del tipo quello esaminato, in cui il lato di sezione **c** è adiacente al lato di sezione **a**, ossia il passo risultante è: $y = y_1 + y_2 = c - a = 3 - 1 = 2$.

A sua volta, questo avvolgimento può essere:

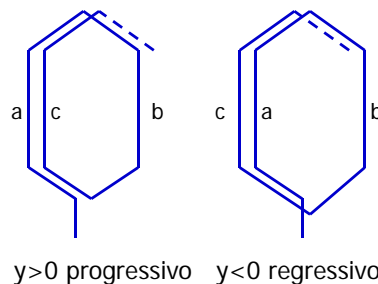
- **progressivo**, come nel caso esaminato, quando $|y_2| < y_1$ e $y > 0$ ($y=2$)

In questo modo l'avvolgimento risulta NON incrociato.

- **regressivo**, quando $|y_2| > y_1$ e $y < 0$ ($y=-2$)

L'avvolgimento risulta incrociato.

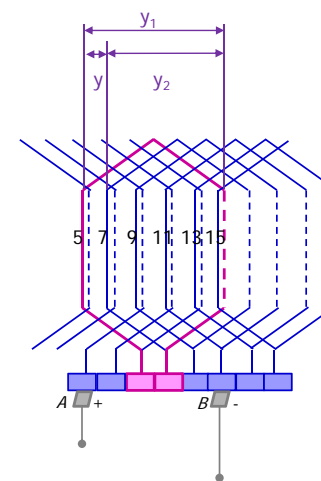
Nota: il tipo di passo, progressivo o regressivo, determina il senso di rotazione della macchina.



47

Dettagli su avvolgimento embricato semplice

Preferendo un avvolgimento con i capi non incrociati, per una maggiore facilità di isolamento, si utilizzano prevalentemente avvolgimenti embricati progressivi.



Consideriamo un avvolgimento embricato progressivo, con 2 lati attivi di sezione per cava, 4 poli, 20 cave e quindi 40 lati attivi (L_s) in tutto.

Il passo posteriore è dato da:

$$y_1 \approx \frac{L_s}{p} = \frac{40}{4} = 10$$

In realtà, si vuole che y_1 sia dispari, per avere un lato nello strato esterno e uno in quello interno.

48

Dettagli su avvolgimento embricato semplice

Quindi si definisce il passo posteriore come:

$$y_1 = \frac{L_s - h}{p} \pm 1$$

dove h è un numero intero positivo ≥ 0 (solitamente il più piccolo) tale che y_1 sia dispari. Inoltre, si aggiunge 1 nel caso di avvolgimento progressivo e si toglie 1 nel caso di avvolgimento regressivo.

Dovendo essere il passo risultante $y = \pm 2$, il passo anteriore è dato da:

$$y_2 = y - y_1 = \pm 2 - \left(\frac{L_s - h}{p} \pm 1 \right) = -\frac{L_s - h}{p} \pm 1$$

Nel nostro caso si ha:

$$y_1 = \frac{L_s - h}{p} + 1 = \frac{40}{4} + 1 = 11$$

$$y = 2$$

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 11 = -9$$

49

Dettagli su avvolgimento embricato semplice

Le connessioni anteriori di ogni sezione dell'avvolgimento di rotore sono saldate alle rispettive lamelle del collettore: ciascuna lamella è in contatto con le due connessioni anteriori di due sezioni di avvolgimento contigue (la fine di una e il principio dell'altra).

Il collettore possiede quindi tante lamelle quante sono le sezioni dell'avvolgimento:

$$N_{lam} = \frac{L_s}{2}$$

Si definisce il passo al collettore come: $y_c = \frac{y_1 + y_2}{2} = \pm 1$

col segno + se l'avvolgimento è progressivo, - se è regressivo.

Questo significa che il principio e la fine delle connessioni anteriori di una sezione sono collegati a due lamelle contigue.

50

Dettagli su avvolgimento embricato semplice

Le spazzole sono pari al numero di poli e sono equidistanti tra loro di un angolo meccanico pari a $360^\circ/p$:

$$N_{spaz} = p$$

A partire dalla **corrente di linea I_a** , questa si suddivide nelle diverse coppie di spazzole, per cui la corrente su ciascuna spazzola vale:

$$I_{spaz} = \frac{I_a}{N_{spaz}/2} = \frac{I_a}{p_p}$$

La corrente che percorre una spazzola si suddivide all'interno dell'avvolgimento in due vie parallele.

La **corrente I_z che percorre ciascuna via** è pari alla metà della corrente che entra in ciascuna spazzola:

$$I_z = \frac{I_{spaz}}{2} = \frac{I_a}{2p_p} = \frac{I_a}{p}$$

51

Dettagli su avvolgimento ondulato semplice

Torniamo all'avvolgimento **ondulato**.

Si chiama SEMPLICE, se, partendo da un lato di sezione e dopo un giro attorno al rotore, si perviene a un lato adiacente a quello iniziale.

Il lato iniziale e quello finale, dopo un giro (cioè dopo p_p passi y), devono distare 2 lati, ovvero:

$$y \cdot p_p = L_s \pm 2 \quad \rightarrow \quad y = \frac{L_s \pm 2}{p_p} \quad \text{PARI}$$

Il segno + vale per gli avvolgimenti progressivi, il segno - per i regressivi.

Poiché y deve essere pari, questa relazione è soddisfatta solo per determinati valori di L_s .

Per quanto riguarda y_1 e y_2 , si cerca di assumerli uguali, per meglio utilizzare l'avvolgimento:

$$y_1 \approx y_2 = \frac{y}{2} \quad \text{entrambi DISPARI}$$

52

Dettagli su avvolgimento ondulato semplice

Il numero di lamelle è sempre pari al numero di sezioni dell'avvolgimento:

$$N_{lam} = \frac{L_s}{2}$$

Sono sempre sufficienti due spazzole, distanti N_{lam}/p lamelle.

Per passare da una spazzola all'altra, sono quindi percorribili sempre e soltanto due vie di corrente, indipendentemente dal numero di poli.

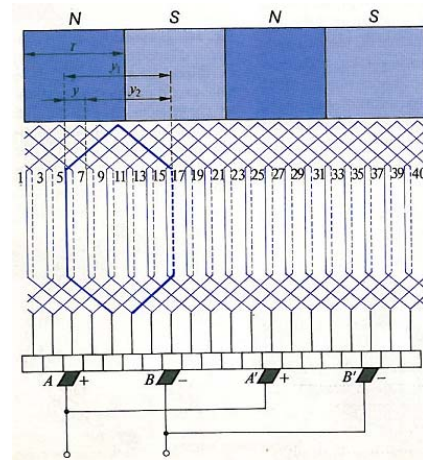
La corrente I_z che percorre ciascuna via è pari alla metà della corrente di linea I_a , mentre la corrente nelle spazzole I_{spaz} è uguale alla corrente di linea:

$$I_z = \frac{I_{spaz}}{2} = \frac{I_a}{2} \quad I_{spaz} = I_a$$

Per ridurre questi valori, è possibile usare un numero di spazzole più elevato (al massimo p), in parallelo a coppie.

Dettagli su avvolgimenti embricati e ondulati

Avvolgimento embricato progressivo,
4 poli, 40 lati, 2 lati per cava.



Avvolgimento ondulato progressivo,
4 poli, 38 lati, 2 lati per cava.

