

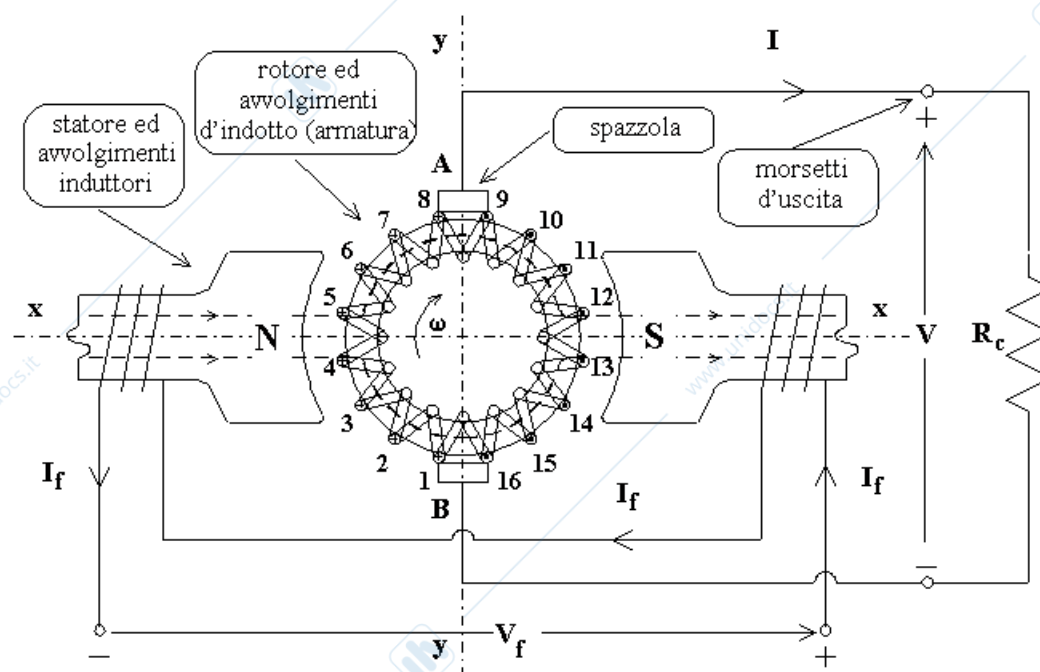
Capitolo 3

Macchina elettrica in corrente continua

Macchina elettrica in cc.

La macchina in corrente continua è reversibile cioè può funzionare sia come generatore sia da motore; essa è composta da due elementi principali detti statore e rotore, separati da un'intercapedine detta traferro, entrambi realizzati in acciaio dolce al 2% di silicio (area d'isteresi molto sottile e permeabilità molto elevata) e presentano una struttura interna a lamierini per ridurre le perdite nel ferro. Il rotore può avere due tipi di avvolgimento: ad anello o a tamburo. Lo statore, che può essere a magneti permanenti o ad avvolgimento di eccitazione, presenta l'avvolgimento attorno ai poli e ha lo scopo di generare il campo induttore quando viene eccitato con corrente continua I_f ; il rotore invece può avere due tipi di avvolgimento: ad anello o a tamburo. Per poter estrarre energia elettrica da un generatore è necessario che sull'albero motore ci sia un collettore costituito da diverse lamelle in rame collegato al circuito d'armatura tramite delle spazzole in grafite. I primi generatori erano caratterizzati da un rotore toroidale o ad anello di Pacinotti e venivano chiamati dinamo.

3.1 La dinamo



Dinamo con indotto ad anello

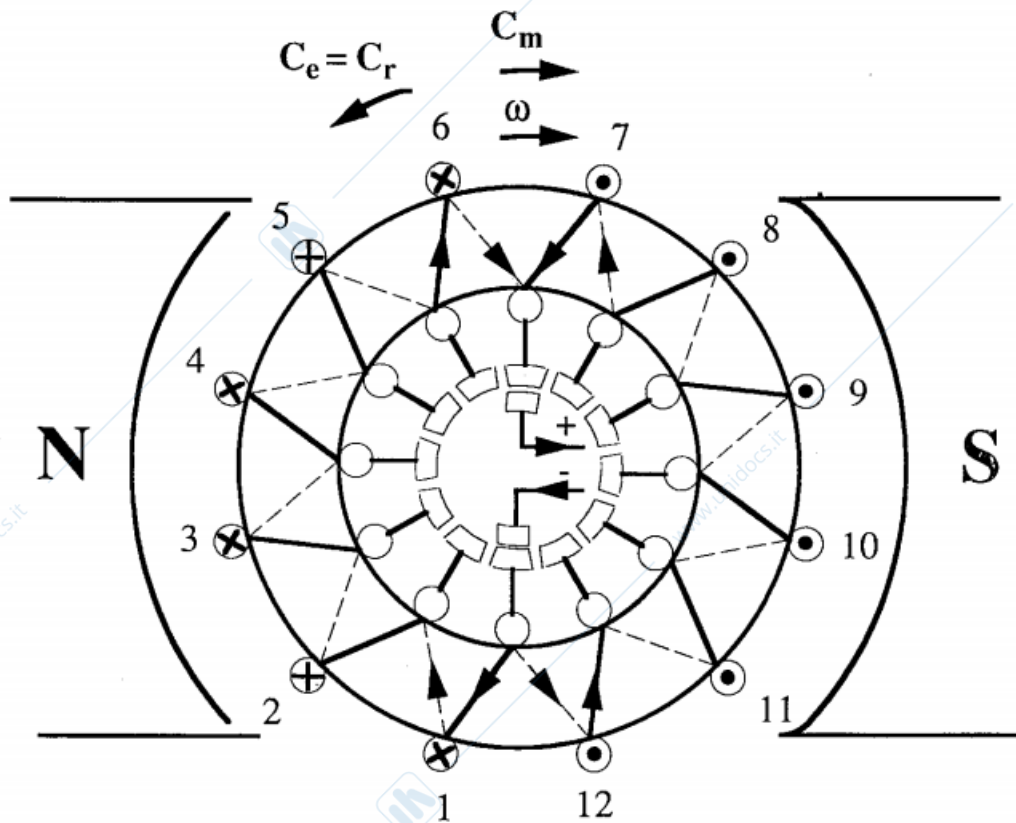
L'indotto di Pacinotti è un rotore ad anello costituito da un cilindro cavo di materiale ferromagnetico su cui sono avvolte a spirale un certo numero di spire in modo da creare un avvolgimento chiuso in cortocircuito. La corrente continua di armatura I_a è erogata mediante due spazzole che poggiano sui conduttori e realizzano un contatto strisciante sul rotore. Immaginiamo di mettere in rotazione il rotore con una velocità ω oraria grazie ad un motore primo esterno e che l'avvolgimento induttore sia alimentato da una tensione

continua V_f e che quindi sia percorso da una corrente continua I_f che genera il campo magnetico induttore. Sui conduttori situati nella parte esterna dell'anello si creerà una f.e.m. indotta che seguirà la regola della mano destra invece i conduttori che si trovano all'interno dell'anello non saranno sede di alcuna f.e.m. indotta; la f.e.m. sarà nulla quando il conduttore attraversa l'asse interpolare (asse y) mentre sarà massima quando attraversa l'asse polare (asse x). A causa della simmetria dell'anello la f.e.m. indotta alternata in ciascuno conduttore risulta sfasata di un angolo $\alpha = 360^\circ \frac{np \text{ (n.coppie polari)}}{N \text{ (n.conduttori)}}$. Ciascuno conduttore è collegato elettricamente con una lamella metallica riportata sul collettore e sugli interassi polari troviamo le spazzole di larghezza tale da cortocircuitare al massimo due lamelle contigue.

3.2 Indotto ad anello

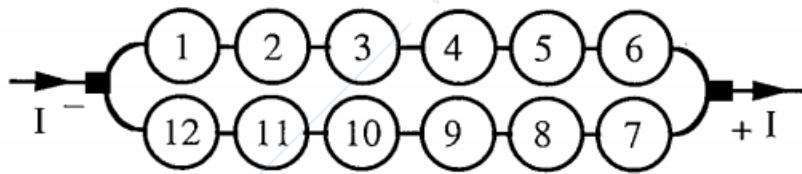
3.2.1 Generatore

Analizziamo il funzionamento della macchina in cc. come generatore.



Generatore con indotto ad anello

Fissiamo il verso di rotazione del rotore ω in senso orario. Sulle cariche q che si muovono a velocità v nel campo magnetico B agisce la forza di Lorentz che mette in moto le cariche dando origine alla corrente I che ha la stessa direzione della f.e.m. indotta E . La coppia elettromagnetica risultante C_e si oppone al moto e quindi è una coppia resistente. Dato che nei conduttori 1-6 e 7-12 le f.e.m. sono concordi e opposte tra loro possiamo considerare due vie in parallelo ciascuna delle quali collegate ad una spazzola.

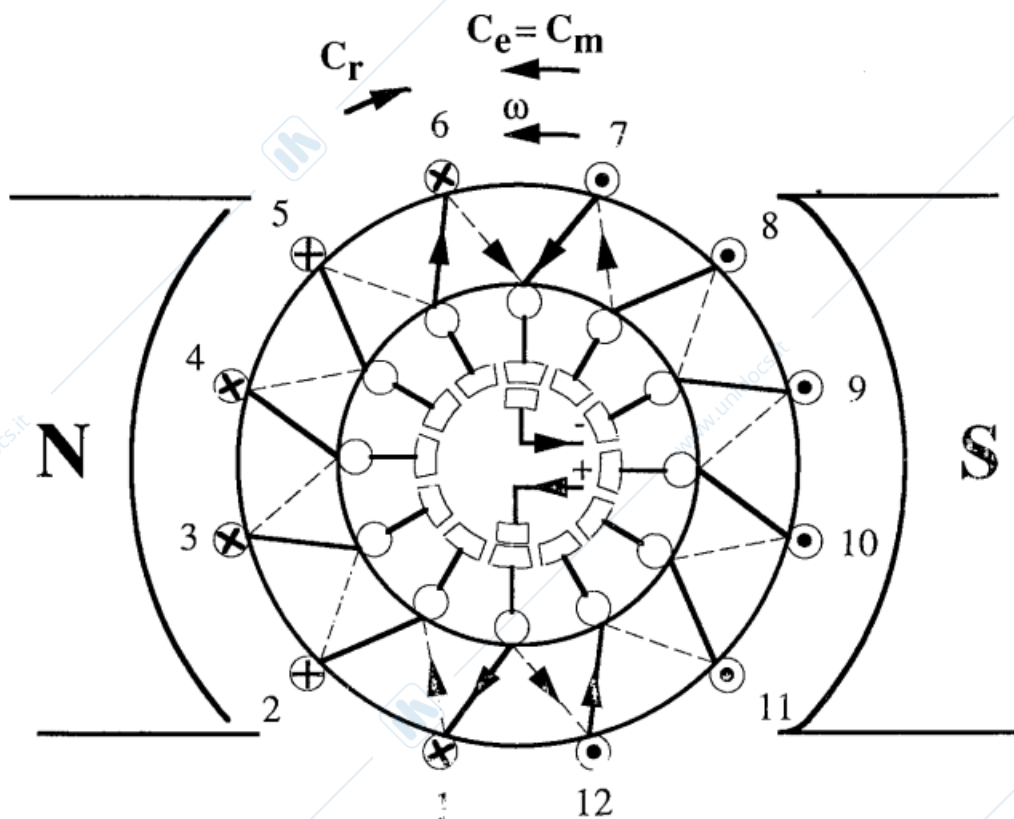


Vie in parallelo

Anche in questo caso il lato esterno delle spire è sede di una f.e.m. indotta mentre quello interno è schermato perciò questa configurazione, nonostante sia molto semplice, è svantaggiosa dal punto di vista del rendimento oltre che per il peso e il costo stesso della macchina. Una riduzione di materiale si può realizzare con un indotto a tamburo ad avvolgimento embricato che non presenta il difetto della schermatura del lato interno dei conduttori.

3.2.2 Motore

Analizziamo il funzionamento di una macchina in cc. come motore.



Motore con avvolgimento ad anello

Consideriamo di applicare alle spazzole una tensione di armatura V in modo da far circolare una corrente di armatura I così da mettere il rotore in rotazione; in tal caso la macchina sta trasformando la potenza elettrica in meccanica. I conduttori esterni sono soggetti alla forza meccanica di Laplace che genera una

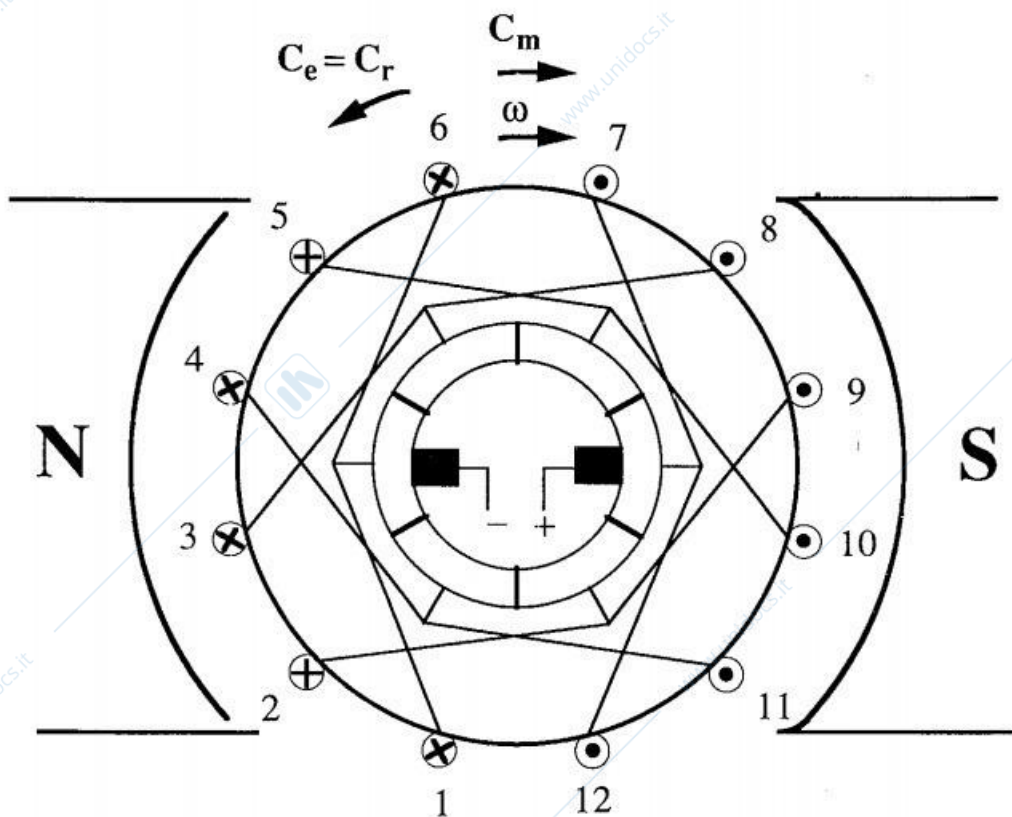
coppia motrice C_e concorde a ω alla quale si oppone la coppia resistente C_r . La coppia accelerante è pari a $C_e - C_r$.

3.3 Indotto a tamburo

Gli avvolgimenti a tamburo possono essere di due tipi:

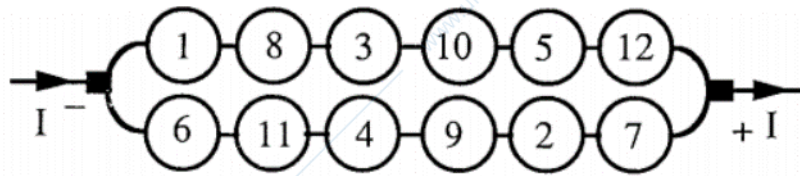
- avvolgimento embricato;
- avvolgimento ondulato.

3.3.1 Avvolgimento embricato



Indotto a tamburo con avvolgimento embricato

In questo caso i conduttori sono collegati tra loro in modo da costruire un circuito chiuso facendo sette passi in avanti e cinque indietro fin quando non si incontra una matassa con f.e.m. contraria dove si dispone una spazzola. Anche in questo caso si realizzano due vie in parallelo ciascuna delle quali eroga $I_a/2$.



Due vie in parallelo

Le spazzole sono collegate all'esterno del collettore sulle lamelle dei conduttori; con la rotazione del rotore può verificarsi un cortocircuito di una spira se la spazzola tocca contemporaneamente due lamelle perciò la f.e.m. ai capi delle spazzole non è perfettamente costante (si riduce per poi aumentare).

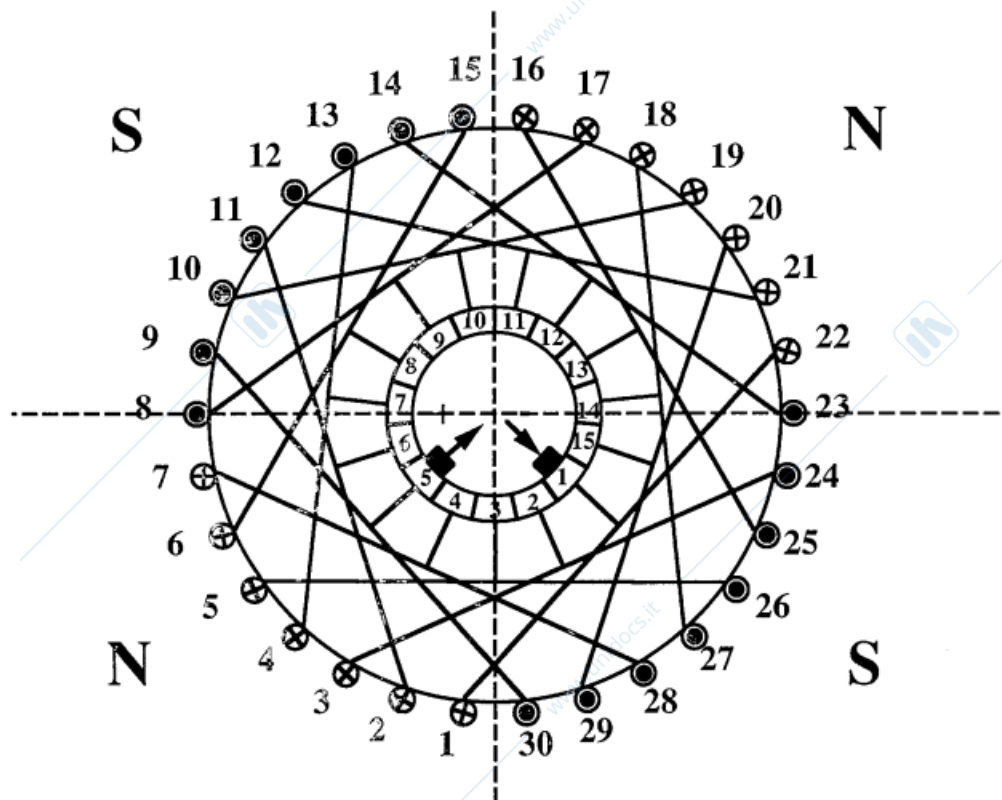
Lo stesso ragionamento si potrebbe fare per una macchina a quattro poli: si creeranno quattro vie in parallelo, distinte da quattro spazzole, ciascuna delle quali sarà percorsa da una corrente $I_a/4$. Tanto più alto è il numero di poli tanto maggiore è la corrente che si può erogare a parità di f.e.m. perciò più è alta la potenza richiesta più saranno i poli della macchina.

Quindi le caratteristiche principali dell'avvolgimento embricato sono:

- Ci sono tante spazzole quanti sono i poli, e si succedono con polarità alternate;
- Le spazzole dividono l'avvolgimento in tante vie interne, in parallelo fra loro, quanti sono i poli;
- Le spazzole con lo stesso nome vengono collegate tra loro a costruire i due morsetti della macchina dai quali si deriva il circuito esterno;
- La tensione che si rende disponibile tra i morsetti corrisponde pertanto a quella che si genera in ciascuna via interna;
- La corrente nel circuito esterno viene fornita in parti uguali da ciascuna via interna;
- Le connessioni con il collettore sono tali che, partendo da una lamella e seguendo l'avvolgimento, si arriva alla lamella vicina avendo percorso una sola spira;
- Utilizzati per carichi ad elevate correnti (grandi potenze) e basse tensioni.

3.3.2 Avvolgimento ondulato

A differenza dell'avvolgimento embricato in questo caso l'avvolgimento è costruito procedendo sempre in avanti; con l'avvolgimento ondulato l'inversione della corrente si verifica sempre e solo in due punti quindi sono necessarie solo due spazzole e quindi due vie indipendentemente dal numero di poli. Pertanto l'avvolgimento ondulato si usa quando sono richieste f.e.m. elevate a bassa corrente di armatura.



Avvolgimento ondolato (macchina a 4 poli)

Il punto più delicato della macchina è il punto di contatto tra spazzola-collettore in quanto la superficie di contatto è rugosa e strisciando essa si riduce a causa delle asperità con un conseguente aumento della resistenza e del riscaldamento. Quindi l'usura interessa anche il collettore in questo caso non solo le spazzole. Inoltre anche l'isolante che separa le lamelle risente degli sforzi meccanici. Perciò se vogliamo potenze elevate le correnti dovranno essere elevate ma è necessaria una superficie di contatto spazzola-collettore molto elevata ma per problemi di dimensioni le macchine a cc. non utilizzano potenze elevate. Quindi le caratteristiche principali dell'avvolgimento embricato sono:

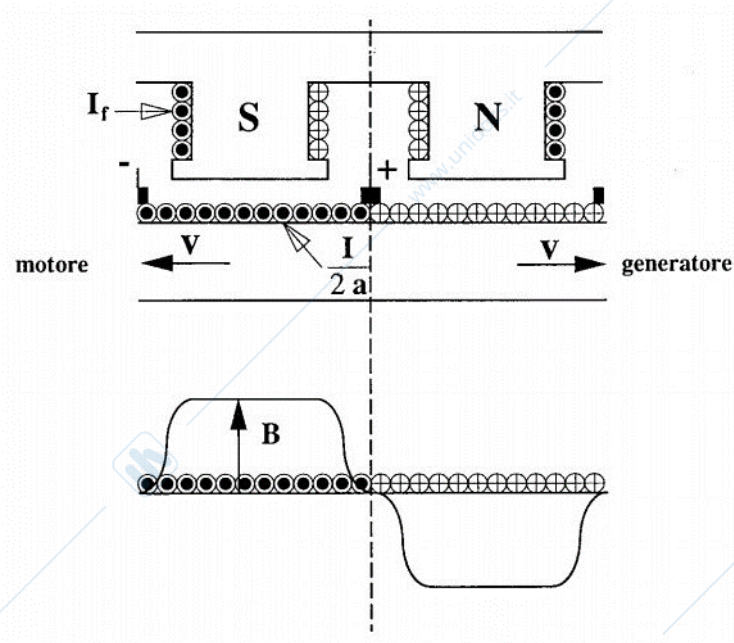
- Qualunque sia il numero di poli, sono necessarie solo due spazzole;
- Le due spazzole dividono l'avvolgimento in due vie interne;
- La tensione che si rende disponibile tra le spazzole corrisponde a quella che si genera in metà dei conduttori indotti;
- La corrente nel circuito esterno viene fornita in parti uguali dai due circuiti interni connessi fra loro in parallelo e perciò ogni via fornisce $I_a/2$
- Le connessioni al collettore sono tali che partendo da una lamella e seguendo l'avvolgimento si arriva alla lamella vicina dopo aver fatto un giro completo intorno all'indotto, percorrendo un conduttore per ogni polo.
- Utilizzati per carichi a basse correnti (piccole potenze) ed elevate tensioni.

3.4 Funzionamento di un generatore

Quando la macchina funziona da generatore viene collegata ad un motore primo che mette in rotazione il rotore alla velocità ω mentre l'avvolgimento di eccitazione viene alimentato da una sorgente di corrente continua I_f . La f.e.m. indotta per unità di lunghezza del conduttore nei singoli conduttori sarà pari a:

$$f.e.m. = vBL$$

La f.e.m. indotta quindi ha un andamento trapezoidale: si mantiene circa costante nella zona di espansione polare e diminuisce rapidamente in corrispondenza dei poli.



Andamento f.e.m. in una macchina cc. (generatore)

La f.e.m. nei conduttori è variabile nel tempo, ciò che non varia è la f.e.m. costante E che preleviamo ai capi delle spazzole. Definendo il passo polare τ l'arco sotteso da un polo, n_p il numero di paia di poli e n_a il numero di vie interne possiamo definire:

$$E = \frac{N}{2n_a} \frac{2n_p}{2\pi} \tau L B_m \omega = k\Phi\omega$$

$$\text{con } \tau = \frac{2\pi r}{2n_p} \rightarrow v = \omega r = \omega \frac{2n_p}{2\pi} r$$

I coefficienti k e Φ sono dati dal costruttore della macchina; se il circuito induttore è ad avvolgimenti:

$$k\Phi = k \frac{N_f I_f}{R} = L_{af} I_f \rightarrow E = L_{af} I_f \omega$$

dove N_f , I_f , R e L_{af} sono rispettivamente: il numero di conduttori di eccitazione, la corrente d'eccitazione, la riluttanza del flusso e la mutua induttanza tra avvolgimento d'armatura e d'eccitazione.

Volendo calcolare la coppia magnetica si ottiene:

$$F_m = \frac{I_a}{2n_a} LB_m$$

$$C = NF_{mr} = k\Phi I_a$$

Se il circuito induttore è ad avvolgimenti allora:

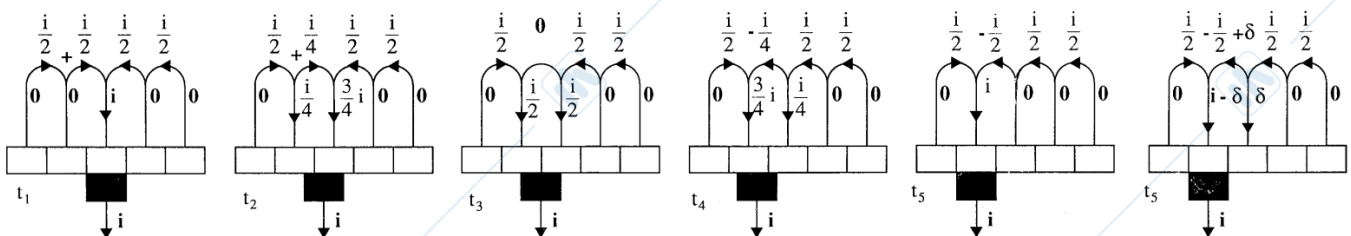
$$E = L_{af} I_a i_f$$

3.4.1 Reazione d'indotto

Consideriamo il caso di un motore sotto carico che eroga corrente ad un circuito esterno collegato ai suoi morsetti; poiché il campo magnetico induttore principale H_f si sovrappone al campo magnetico d'indotto H si verifica una distorsione del campo magnetico a carico rispetto al campo magnetico a vuoto. In tale condizione di funzionamento l'avvolgimento di armatura provoca una reazione d'indotto o d'armatura che determina una significativa caduta di f.e.m. con una conseguente riduzione di flusso. Inoltre in tali condizioni, poiché le lamelle sono molto vicine tra loro, potrebbero esserci delle scariche tanto più probabili quanto più è grande la distorsione del campo magnetico e l'intensità della corrente erogata; tali scariche portano al deterioramento delle lamelle e dell'isolante interposto con una conseguente distruzione del collettore.

3.4.2 Commutazione

Consideriamo una macchina a due poli e assumiamo che il rotore sia fermo e che le spazzole si muovano sulle lamelle del collettore.



Cammino della spazzola

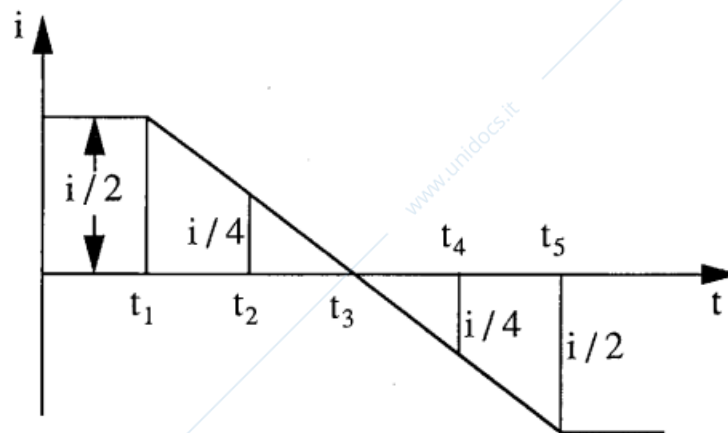
t1 → la spazzola si trova interamente su una lamella da cui preleva la corrente i . Le due spire in contatto con la lamella sono percorse dalla corrente $+i/2$.

t2 → la spazzola ricopre per $1/4$ la lamella successiva, così preleva $i/4$ da questa lamella e i

restanti $(3/4)i$ da quella che sta abbandonando. La spira in commutazione è percorsa ora dalla corrente $+i/4$.

- $t_3 \rightarrow$ la spazzola preleva $i/2$ da entrambe le lamelle. La spazzola è a cavallo delle due lamelle e quindi nelle spire ad essa collegate non circola corrente.
- $t_4 \rightarrow$ la spazzola si è sovrapposta per $3/4$ sulla nuova lamella prelevando da questa $(3/4)i$ e da quella precedente $i/4$. Nella prima spira la corrente si è invertita, circola infatti una $-i/4$.
- $t_5 \rightarrow$ la spazzola si trova completamente sulla nuova lamella da cui preleva la i . Nella spira scorre la stessa corrente che avevamo all'inizio, ma in verso opposto: $-i/2$.

L'andamento della corrente che percorre la spira nel tempo sarà del tipo:



Andamento della corrente

In realtà sulla spira interagiscono sia la fem di autoinduzione che quella indotta che si oppongono all'inversione della corrente ritardando la commutazione nella sezione cortocircuitata:

- $t_{52} \rightarrow$ la corrente non si è completamente invertita. Esiste ancora una corrente residua δ che arriva alla lamella precedente, mentre la corrente prelevata dalla nuova lamella è $i - \delta$. Tra la spazzola e la lamella precedente si crea un arco elettrico che danneggia il collettore. La commutazione è accompagnata da un vivace scintillio tra spazzola e lamella che provoca il rapido deterioramento di tali organi, rendendo impossibile il funzionamento della macchina. Per favorire la commutazione ed evitare lo scintillio è possibile inserire poli ausiliari (o di commutazione).

3.4.3 Poli ausiliari

Al fine di evitare lo scintillio dovuto al contatto spazzola-lamella si possono inserire poli ausiliari di dimensione ridotta che favoriscano la commutazione. Gli avvolgimenti ausiliari vengono adottati in un numero pari al numero dei poli principali ed interposti tra i poli principali in modo da creare un campo che si opponga a quello trasversale dell'indotto. L'intensità di tale campo deve essere tale da annullare e invertire il campo risultante prima del piano di commutazione. In tal modo la f.e.m. indotta non si oppone

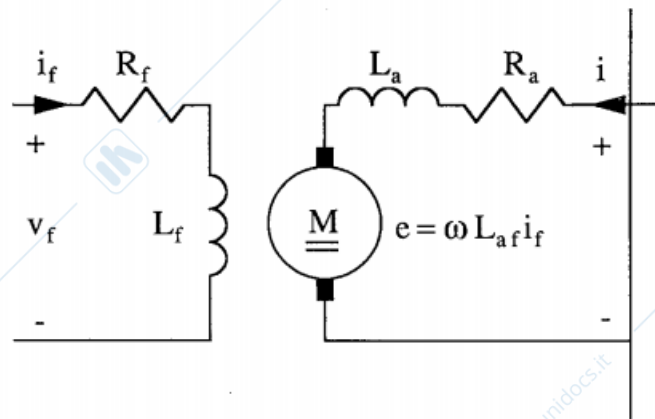
alla commutazione ma la favorisce provocando l'inversione della corrente in anticipo. Tuttavia resta il pericolo che si generi una scarica tra le lamelle perciò si utilizzano speciali avvolgimenti compensatori.

3.4.5 Avvolgimenti compensatori

Gli avvolgimenti compensatori sono posti sulle espansioni polari principali e anch'essi sono attraversati dalla corrente di armatura; essi hanno lo scopo di compensare l'induzione prodotta dall'avvolgimento di armatura in corrispondenza delle espansioni polari. Tuttavia nelle zone interpolari la compensazione non è totale e quindi sono ancora necessari ulteriori poli ausiliari. Grazie all'azione combinata di poli ausiliari e avvolgimenti compensatori si ottiene un'induzione costante.

3.5 Funzionamento da motore

Nel funzionamento da motore bisogna alimentare sia l'avvolgimento di eccitazione (che si trova sui poli) sia quello di armatura (che si trova sul rotore) rappresentato da un cerchio su cui poggiano le spazzole che prelevano energia dalla rete.



Schema macchina in cc. funzionamento da motore

Le equazioni della macchina sia per l'avvolgimento di eccitazione (f) sia di armatura (a) saranno:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_f = R_f i_f + \frac{d}{dt}(L_f i_f) \\ v_a = R_a i_a + \frac{d}{dt}(L_a i_a) + E \\ J \frac{d}{dt} \omega = C_e - B\omega - C_r \\ C_e = L_{af} i_f i_a \end{array} \right. \xrightarrow[\text{Funzionamento a Regime}]{\text{A magneti permanenti}} \left\{ \begin{array}{l} v_f = R_f i_f \\ v_a = R_a i_a + E \\ C_e = C_r \end{array} \right.$$

3.5.1 Funzionamento a regime

Ricordando che R_a è la resistenza d'armatura, E è la forza contro elettromotrice, Φ_n è il flusso nominale le equazioni della macchina saranno:

$$V_n = R_a I_a + E$$

$$E = k\Phi_n \omega$$

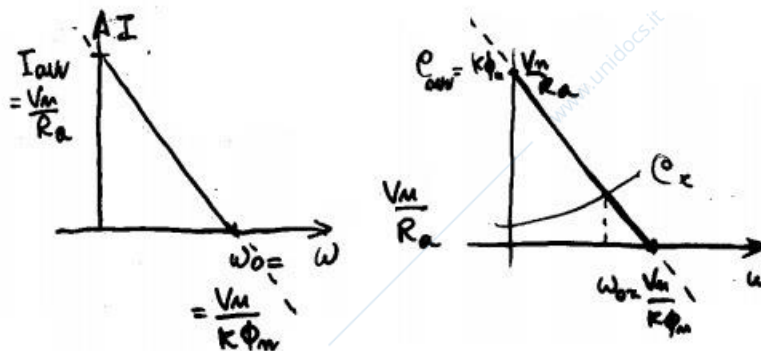
Da queste due equazioni è possibile ricavare la corrente di armatura da fornire in condizioni nominali per avere una potenza meccanica in uscita all'albero. A vuoto ($\omega = 0$) si ottiene:

$$\begin{cases} I_{avv} = \frac{k\Phi_n \omega_0}{R_a} = \frac{V_n}{R_a} \\ C_{avv} = \frac{k^2 \Phi_n^2}{R_a} \omega_0 = k\Phi_n \frac{V_n}{R_a} \end{cases}$$

dove ω_0 è detta velocità a vuoto e rappresenta la velocità del rotore in assenza di coppia resistente

$$I_a = 0 \rightarrow \omega_0 = \frac{V_n}{k\Phi_n}$$

Quindi la caratteristica meccanica sarà del tipo:



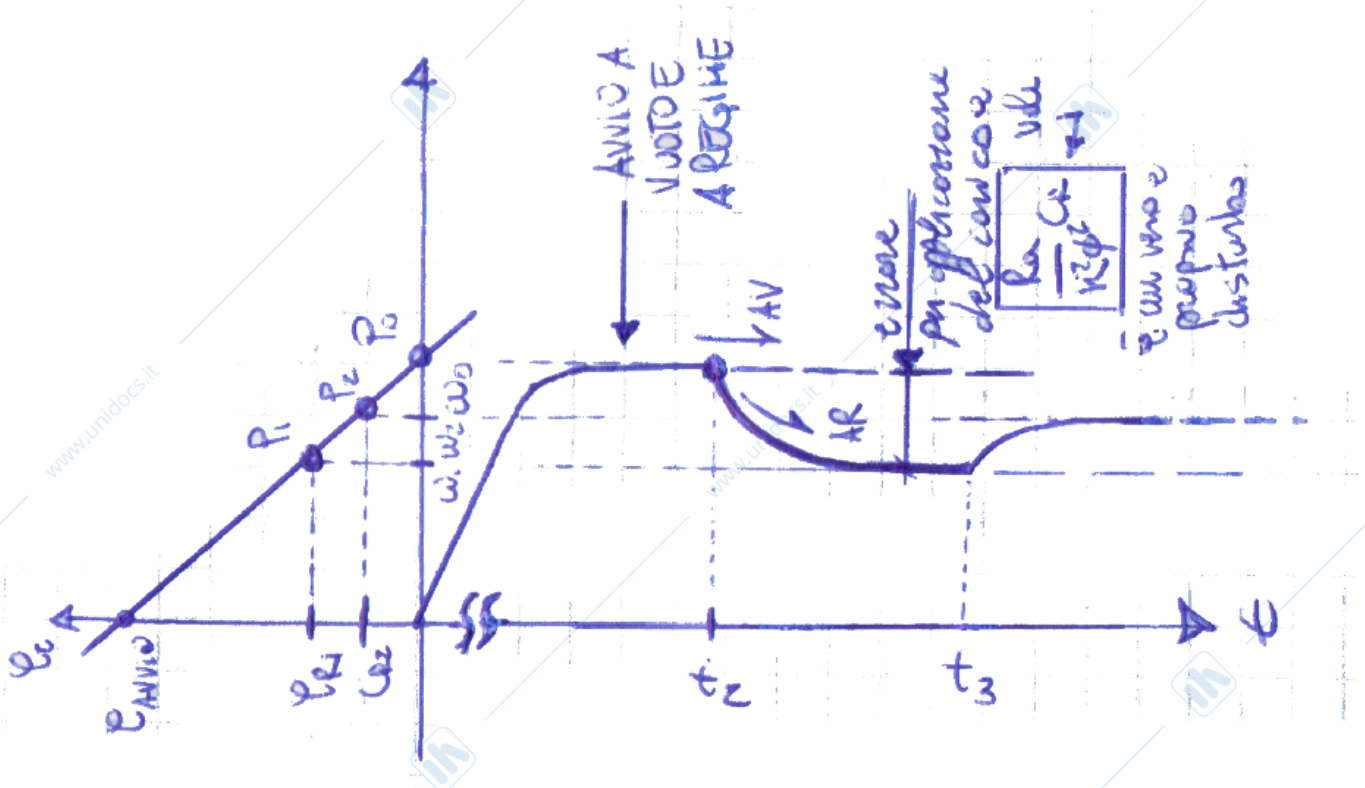
Caratteristica meccanica di un motore in cc. a regime

In fase di avviamento $C_{avv} \gg C_n$ e quindi la corrente richiesta $I_{avv} \gg I_n$ ma ciò può provocare danni alla macchina e quindi all'avviamento si inserisce un reostato che verrà poi disinserito gradualmente.

L'intersezione della caratteristica meccanica con quella della coppia resistente rappresenta il punto di lavoro P.

3.5.2 Funzionamento in transitorio

Durante l'avviamento della macchina a vuoto essa raggiunge gradualmente la velocità a regime definita dalla propria caratteristica. A seguito dell'applicazione di un carico resistente però la velocità subisce nuovamente un transitorio portandosi ad un nuovo punto di funzionamento stabile. La differenza tra la velocità angolare a vuoto e quella a carico è definita come errore a regime dovuto alla coppia resistente.



Transitorio all'avvia e all'applicazione di un carico

- t1 → avvio il motore a vuoto ($C_r = 0$), l'albero si porta in rotazione accelerando fino alla velocità a regime, che in questo caso è proprio ω_0 ;
- t2 → applico il carico C_{r1} all'albero: il motore rallenta e si porta al nuovo punto di funzionamento P_1 a cui corrisponde la velocità ω_1 ;
- t3 → applico il carico C_{r2} all'albero: il motore rallenta e si porta in un altro punto di funzionamento P_2 a cui corrisponde la velocità ω_2 ;

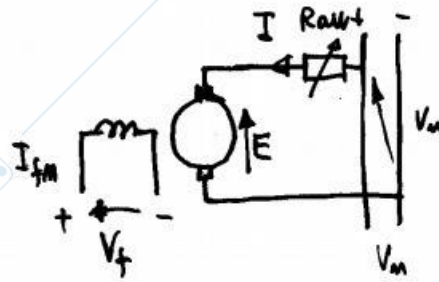
Appare evidente che, anche variando il carico, non si riesce mai a raggiungere la velocità massima ottenibile a vuoto ma per sopperire a tale problema si adottano particolari controlli elettrici.

3.6 Regolazioni di velocità

Esistono vari sistemi di regolazione di velocità ognuno con le sue caratteristiche.

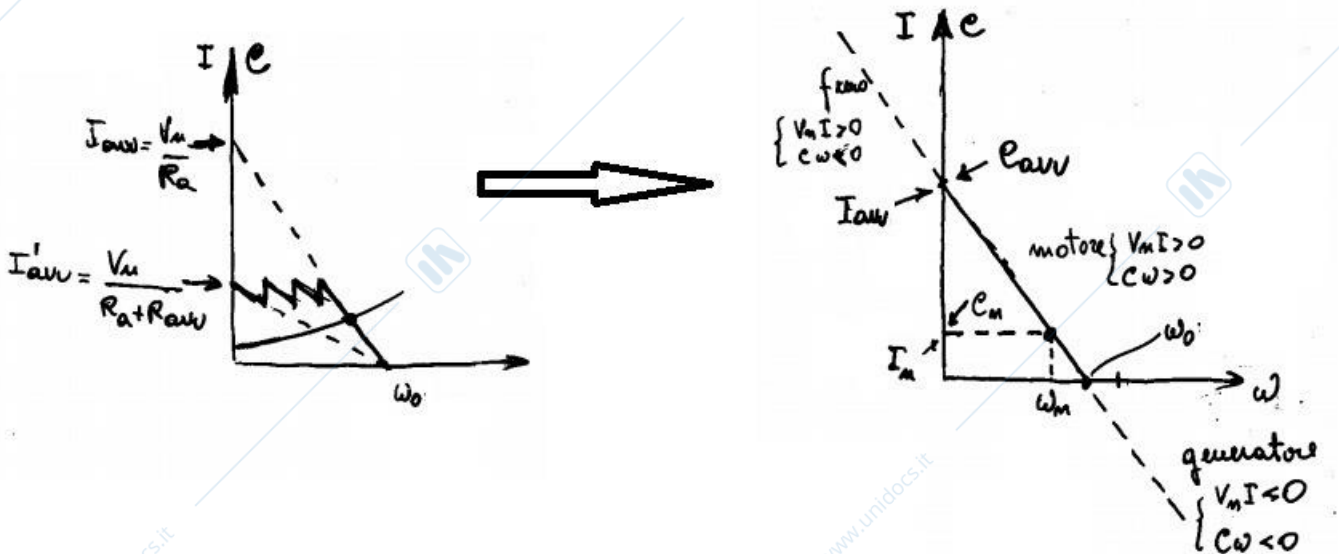
3.6.1 Reostato di avviamento

Per evitare il problema dell'elevata corrente all'avviamento il motore viene avviato inserendo in serie al circuito di indotto un adeguato reostato di avviamento R_{avv} .



Inserimento del reostato di avviamento

La resistenza del reostato di avviamento deve essere variabile così che si possa disinserirla gradualmente all'aumentare della velocità evitando perdite per effetto Joule notevoli. La caratteristica meccanica del motore cambierà al variare di R_{avv} assumendo un andamento a dente di sega.

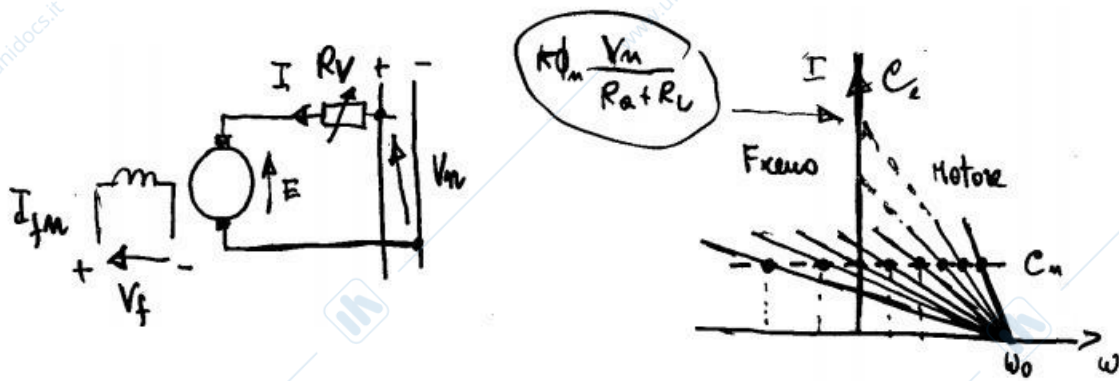


Caratteristica meccanica con reostato

Il valore di R_{avv} si sceglie in modo tale che $I_{avv} \approx 2I_n$; una corrente superiore a quella nominale è consentita solo in questo caso poiché l'avviamento della macchina ha una durata molto breve. Di conseguenza si genera una coppia di avviamento che è accelerante $C_e - C_r = \omega^* > 0$. Man mano che ω cresce, cresce anche la f.e.m. e quindi diminuisce la corrente assorbita così da poter disinserire il reostato gradualmente fino ad escluderlo del tutto.

3.6.2 Reostato di velocità

La regolazione della velocità tramite reostato R_v , a differenza del reostato R_{avv} , consiste nell'uso del reostato per tempi prolungati funzionante a corrente nominale (costo maggiore).

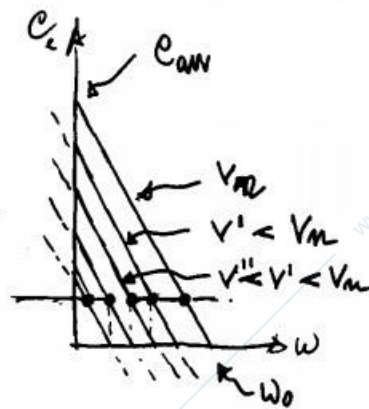


Reostato di velocità

Il reostato R_v viene messo in serie alla resistenza di armatura creando un fascio di rette passanti per ω_0 così da portare la macchina a lavorare a velocità minori a parità di carico. Si può raggiungere così un punto P in cui $\omega = 0$ e la coppia motrice uguaglia la coppia resistente. Aumentando ulteriormente R_v avremmo $\omega < 0$ cioè la macchina funzionerebbe da freno.

3.6.3 Regolazione di velocità tramite variazione della tensione di alimentazione

Utilizzare un reostato di velocità, tuttavia, ha lo svantaggio di aumentare troppo le perdite perché deve rimanere sempre inserito e perciò è ottimale regolare la velocità variando la tensione di alimentazione mediante un raddrizzatore controllato che produca la tensione desiderata.

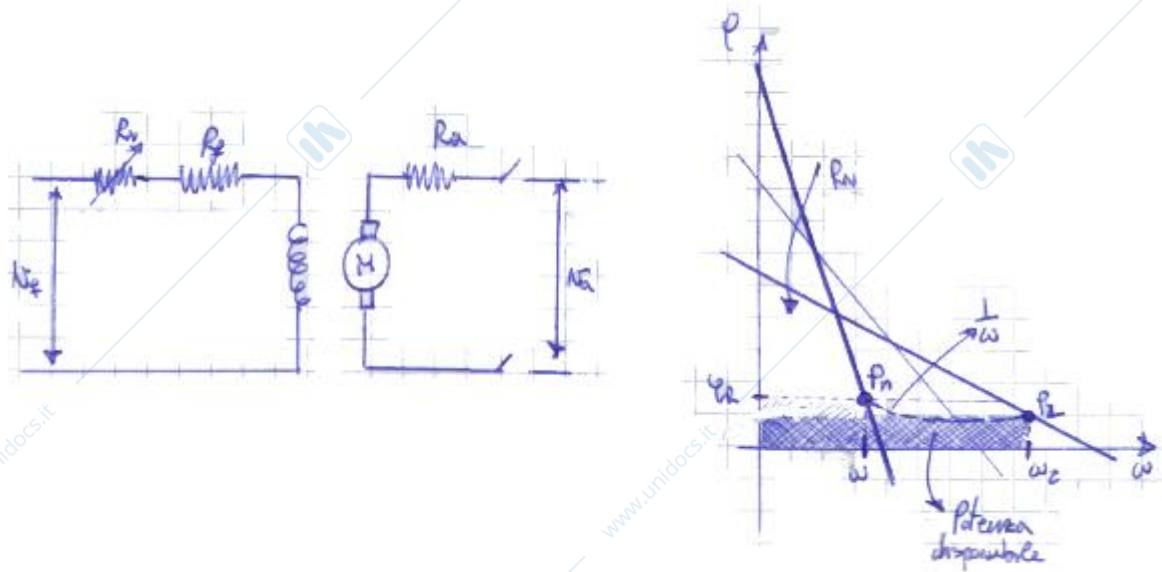


Variazione della tensione di alimentazione

Per una coppia resistente costante al diminuire della tensione applicata il punto di funzionamento si sposta verso sinistra lungo la curva di coppia resistente avendo così un ampio range di regolazioni e zero dissipazioni (applicando una tensione negativa si può ottenere anche la marcia opposta o il funzionamento da freno). Tuttavia con questo metodo non possiamo aumentare la velocità oltre il valore nominale ma a tal scopo si potrebbe agire sull'eccitazione piuttosto che sulla tensione.

3.6.5 Regolazione di velocità tramite indebolimento di campo

Si inserisce nel circuito un reostato che serve a ridurre il flusso; quando si lavora a flusso indebolito la coppia di avviamento diminuisce ma la velocità aumenta e quindi la caratteristica si riposa.



Indebolimento di flusso

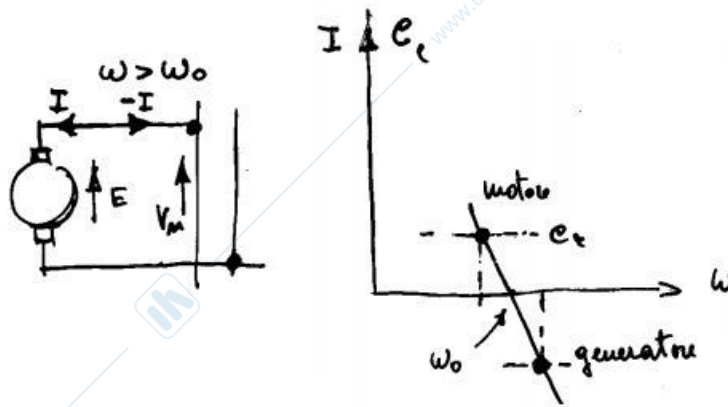
- per $0 < \omega \leq \omega_n$ si eroga $C_n = \text{cost}$ perché $\Phi_n = \text{cost}$, mentre la potenza cresce linearmente con ω ;
- per $\omega > \omega_n$ l'andamento della coppia è iperbolico e quindi si eroga una coppia $C_e < C_n$ mentre la potenza rimane costante perché la macchina non può erogare una $P_e > P_n$, la coppia quindi decresce come $1/\omega$ mentre ω aumenta: la macchina non produce più la coppia nominale.

3.7 Frenatura della macchina in cc.

Anche per quanto riguarda i sistemi di frenatura ne esistono vari tipi con personali caratteristiche

3.7.1 Frenatura con recupero di energia

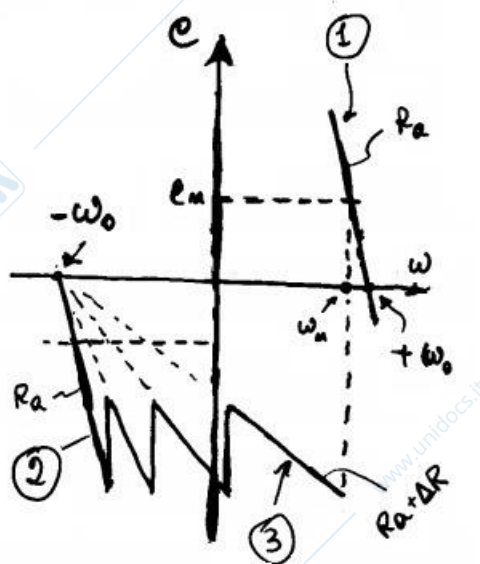
Immaginiamo che il motore sia montato in un'auto elettrica; finché c'è una coppia resistente C_r il motore assorbe corrente dalla batteria e ruota alla velocità corrispondente al punto di funzionamento nel primo quadrante. Se l'automobile si trova in discesa, alla coppia elettromagnetica si aggiunge la coppia dovuta alla componente della forza peso secondo la direzione della strada. La coppia risultante, quindi è motrice, e di conseguenza la velocità aumenta fino a superare ω_0 e la corrente si inverte. In questo caso quindi la macchina si comporta da generatore: la corrente è erogata dal motore e la coppia si inverte e quindi la macchina sta frenando in quanto la coppia è opposta al moto ma sta anche recuperando energia (il motore ricarica la batteria).



Frenatura con recupero di energia

3.7.2 Frenatura tramite inversione dell'alimentazione

Invertendo l'alimentazione V_n ω cambia verso e con esso anche il verso di ω_0 .



Inversione dell'alimentazione

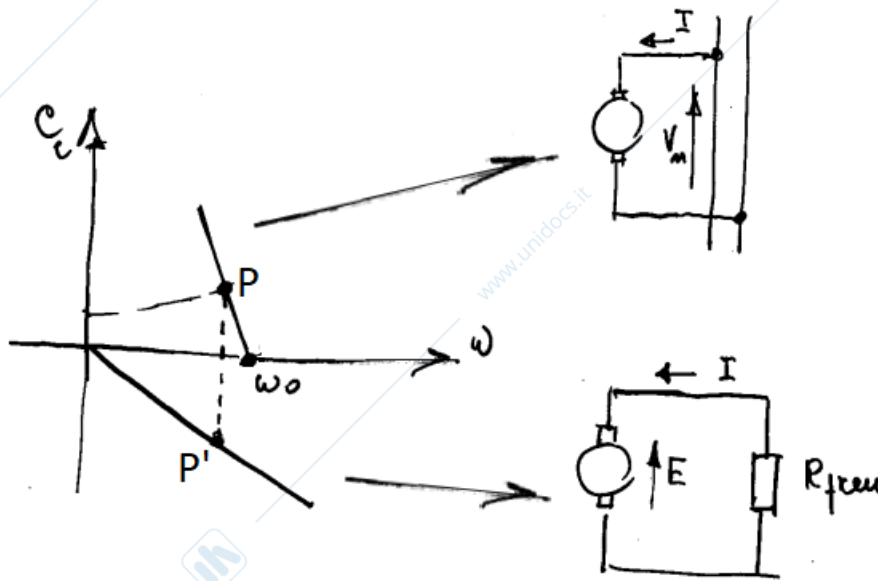
1. Caratteristica iniziale, la macchina funziona da motore: $P_m > 0$ erogata e $P_e > 0$ assorbita;
2. Caratteristica invertita, la macchina funziona da motore a marcia indietro:
 $P_m > 0$ erogata e $P_e > 0$ assorbita;
3. Caratteristica invertita, la macchina funziona da freno:
 $P_m < 0$ assorbita e $P_e > 0$ assorbita.

Quindi se durante il normale funzionamento della macchina si inverte la polarità della tensione di alimentazione il punto di funzionamento si sposta improvvisamente in un punto con una coppia altissima che corrisponde ad un'elevata corrente assorbita molto dannoso; per evitare questo tipo di problema viene usato un reostato di resistenza regolabile ΔR che limita l'assorbimento di corrente negli istanti successivi

l'inversione. Il reostato sarà poi disinserito gradualmente fino a raggiungere $\omega = 0$ momento in cui si stacca la macchina dall'alimentazione (in caso contrario la macchina accelera).

3.7.3 Frenatura dinamica senza recupero di energia

Questo metodo consente di frenare rapidamente la macchina senza invertire il moto. Si effettua una frenatura elettrica scollegando l'alimentazione della macchina dalla rete e collegando i morsetti ad una resistenza frenante R_{fren} .



Frenata senza recupero

La corrente I circola in senso contrario essendo generata dalla f.e.m. E e quindi la coppia generata sarà una coppia frenante. Questa tecnica è detta senza recupero di energia perché tutta la potenza elettrica viene completamente dissipata sulla resistenza frenante.

Capitolo 4

Modelli di controllo

4.1 Cenni di controlli automatici

- Un azionamento elettrico è un sistema che converte energia elettrica in meccanica con l'ausilio di apparecchiature elettroniche di potenza in accordo con una funzione di comando.
- Si definisce sistema o processo un insieme di più elementi interagenti tra loro, connessi in modo tale da costituire un'unica entità e organizzati al fine di ottenere un obiettivo prefissato.
- I problemi di controllo consistono nell'imporre una modalità di funzionamento desiderato ad un processo assegnato, ovvero imporre un valore pari al segnale di riferimento ad una variabile.
- Si definisce modello di un sistema una rappresentazione matematica che descriva il comportamento dinamico del sistema in modo sufficientemente accurato per progettare il sistema di controllo.
- Si definisce sistema di controllo (manuale o automatico) un insieme di più elementi connessi tra di loro e interagenti in modo tale da autoregolarsi. Può essere in anello aperto (feedforward) o chiuso (feedback).

4.2 Algebra dei diagrammi a blocchi

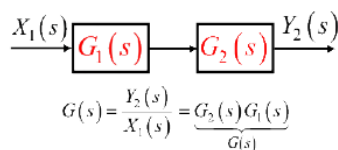


Figura 4.2: Blocchi in serie

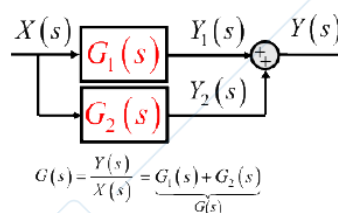


Figura 4.3: Blocchi in parallelo

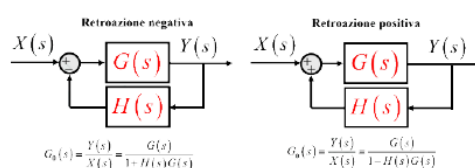
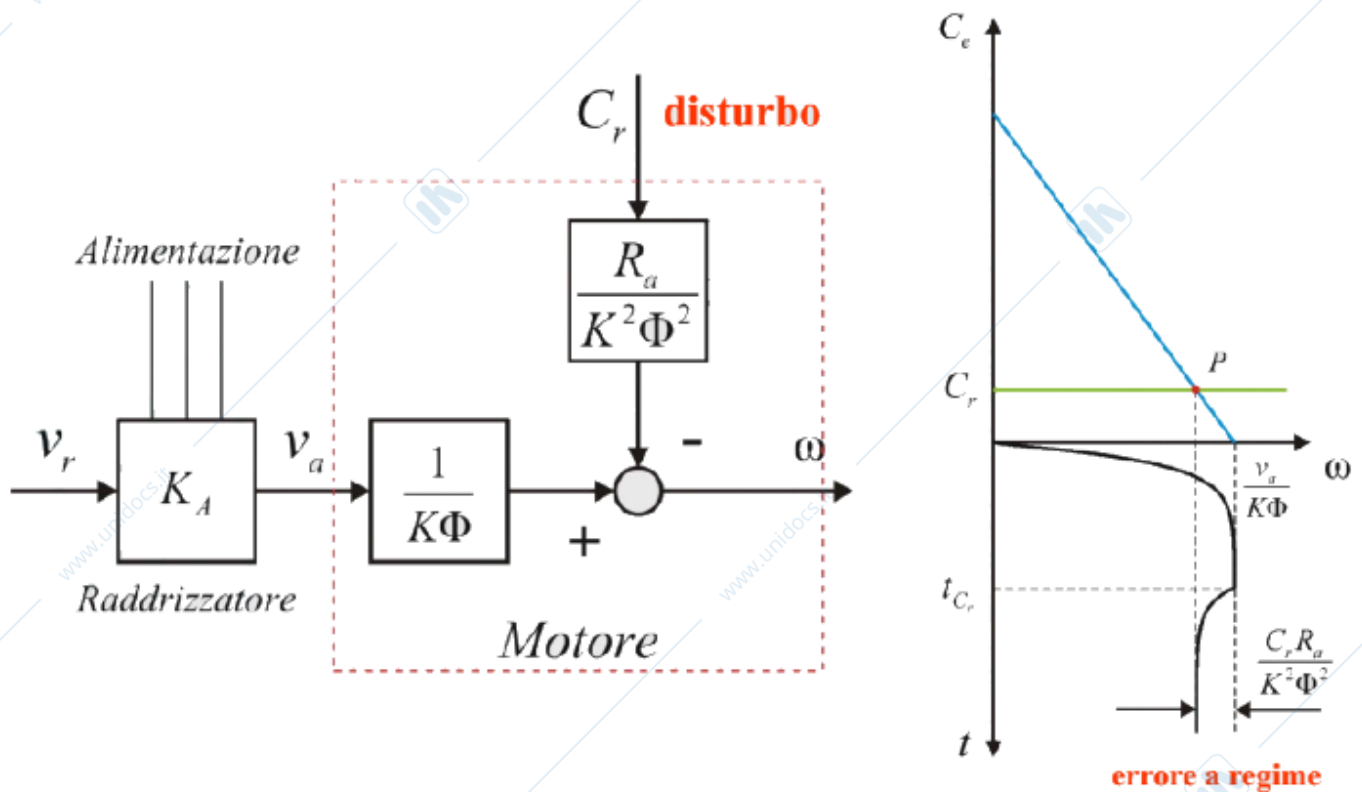


Figura 4.4: Retroazione

4.3 Schema del motore a regime in anello aperto



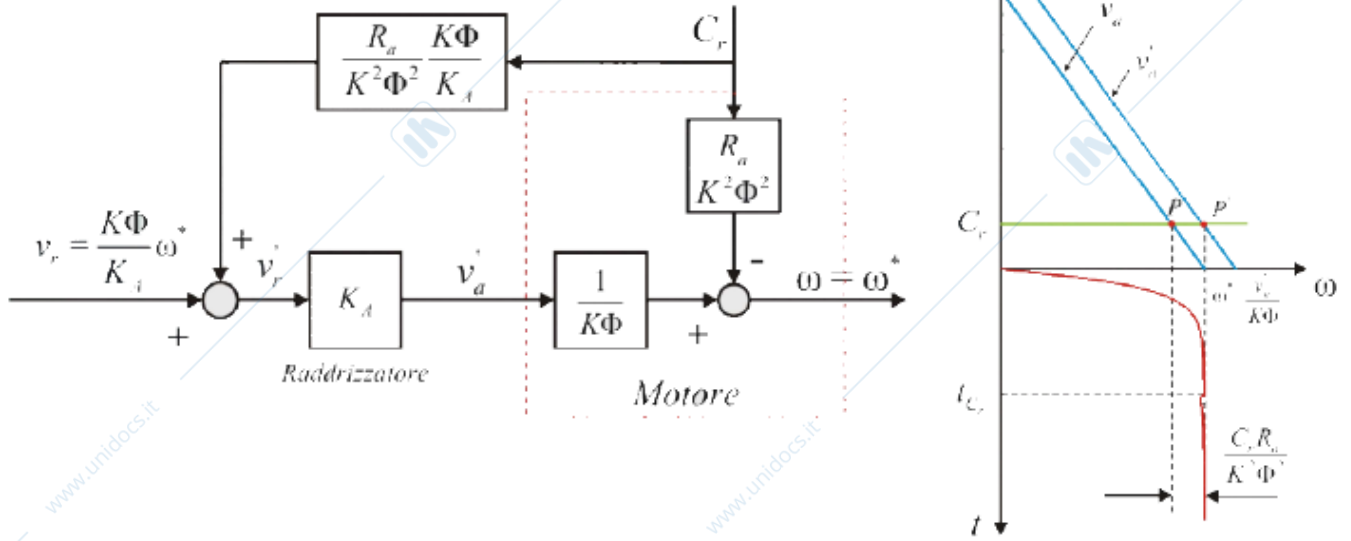
Motore a regime in anello aperto

La tensione di armatura è fornita dal raddrizzatore rappresentato dalla funzione di trasferimento K_A . In assenza di C_r basta variare v_r per variare la tensione di alimentazione ottenendo un semplice controllo di velocità. A vuoto avremo che $\omega = \omega^*$ mentre se C_r non è nullo sarà presente un certo errore a regime

$$\omega = \omega^* - \frac{R_a}{K^2 \Phi^2} C_r.$$

4.4 Schema del motore a regime in feedforward

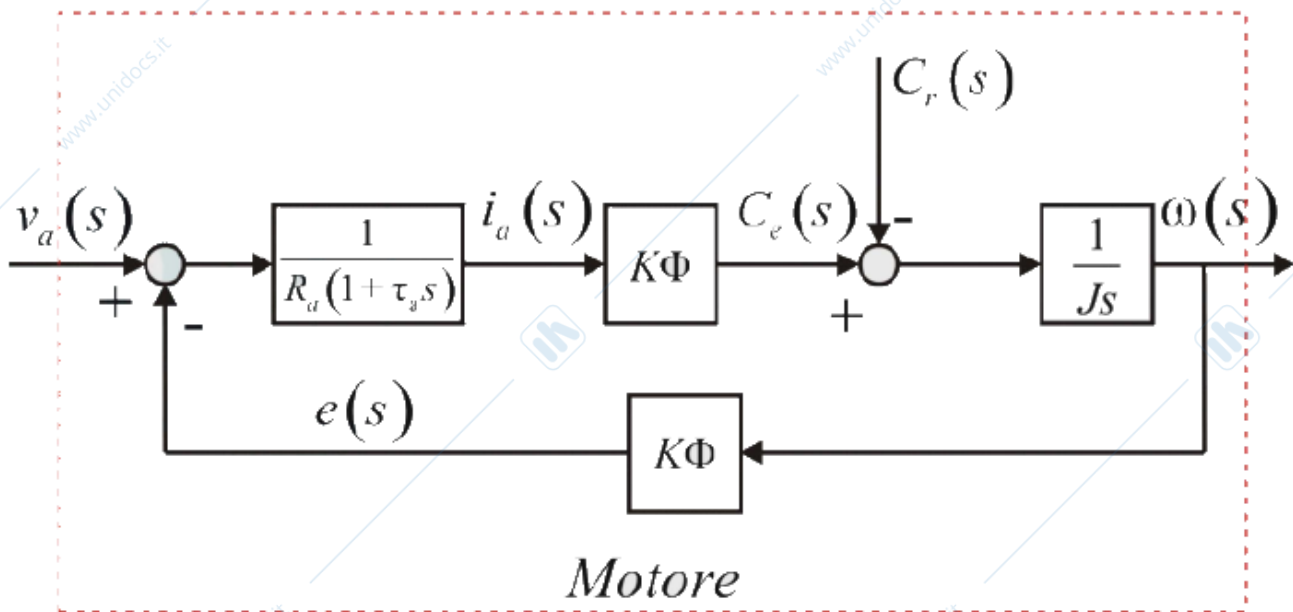
La compensazione in avanti ci permette di ottenere una velocità ω^* anche in presenza di carico resistente incrementando la tensione del motore.



Motore a regime in feedforward

Tuttavia poiché non si conoscono esattamente tutti i coefficienti si ha comunque un piccolo errore a regime.

4.5 Schema del motore valido anche in transitorio



Schema del motore valido anche in transitorio

Sommario

Macchina elettrica in cc.	1
3.1 La dinamo	1
3.2 Indotto ad anello	2
3.2.1 Generatore.....	2
3.2.2 Motore.....	3
3.3 Indotto a tamburo.....	4
3.3.1 Avvolgimento embricato	4
3.3.2 Avvolgimento ondulato	5
3.4 Funzionamento di un generatore	7
3.4.1 Reazione d'indotto.....	8
3.4.2 Commutazione.....	8
3.4.3 Poli ausiliari.....	9
3.4.5 Avvolgimenti compensatori.....	10
3.5 Funzionamento da motore	10
3.5.1 Funzionamento a regime.....	11
3.5.2 Funzionamento in transitorio.....	11
3.6 Regolazioni di velocità	12
3.6.1 Reostato di avviamento.....	12
3.6.2 Reostato di velocità.....	13
3.6.3 Regolazione di velocità tramite variazione della tensione di alimentazione	14
3.6.5 Regolazione di velocità tramite indebolimento di campo	14
3.7 Frenatura della macchina in cc.	15
3.7.1 Frenatura con recupero di energia	15
3.7.2 Frenatura tramite inversione dell'alimentazione	16
3.7.3 Frenatura dinamica senza recupero di energia.....	17
4.1 Cenni di controlli automatici	18
4.2 Algebra dei diagrammi a blocchi.....	18
4.3 Schema del motore a regime in anello aperto.....	19
4.4 Schema del motore a regime in feedforward	19
4.5 Schema del motore valido anche in transitorio.....	20