

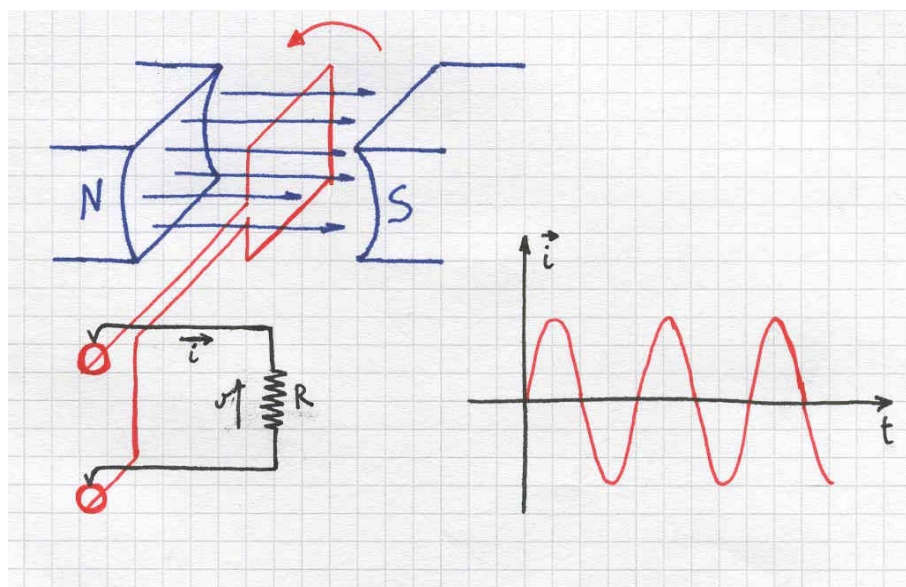
Macchine elettriche

Con questo capitolo si inizia a trattare delle **macchine elettriche** che si occupano di convertire energia meccanica in energia elettrica e viceversa. Queste, per loro natura non possono essere classificate macchine statiche come era, ad esempio, il trasformatore, in quanto devono necessariamente avere parti in movimento.

Una prima grande classificazione tra le macchine elettriche può essere fatta suddividendole in **macchine in corrente continua** e **macchine in corrente alternata**. Inoltre come si è detto esse possono funzionare o da **generatori**, quando convertono energia meccanica in energia elettrica, oppure da **motori**, quando operano la conversione opposta.

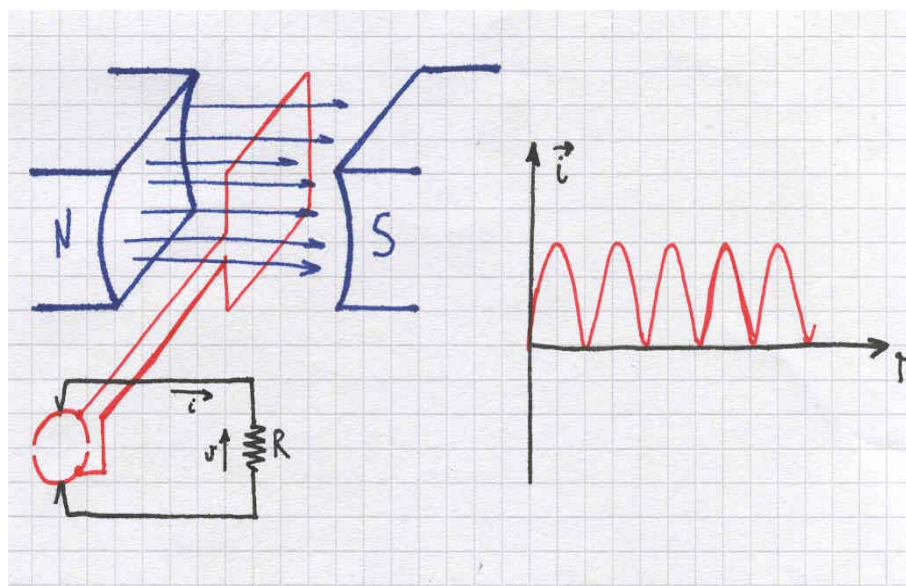
La dinamo

I generatori di corrente che si basano su principi elettromagnetici sono fondamentalmente costruiti con un avvolgimento posto in rotazione all'interno di un campo magnetico creato da un grosso magnete permanente. Osserviamo lo schema di figura che illustra per semplicità una spira immersa in un campo magnetico.



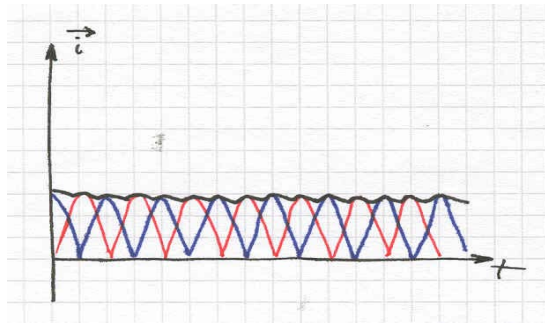
La corrente viene prelevata sui due anelli ed ha chiaramente andamento sinusoidale; infatti quando la spira si presenta perpendicolare alle linee di forza concatena in pieno il campo magnetico, mentre ruotando fino a presentarsi perpendicolare è investita da un campo nullo; poi risulta ruotata sottosopra e quindi la corrente che circola risulterà invertita, fino a presentarsi di nuovo perpendicolare e la corrente erogata ha valore istantaneo nullo.

Se lo schema costruttivo viene modificato come in figura:



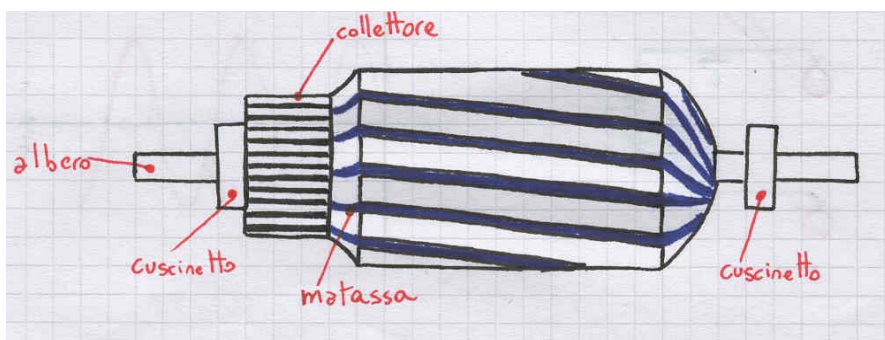
ovvero spezzando l'anello da cui si preleva la tensione, l'inversione di campo corrisponde anche ad un'inversione di corrente, sicchè si ottiene quella che viene definita un'onda sinusoidale **raddrizzata** o **pulsante**. Non assomiglia ad una corrente continua, ma quantomeno non presenta inversione di polarità.

L'apparecchiatura appena descritta è un primo esempio di **dinamo**, ovvero di una macchina elettrica che trasforma energia meccanica in energia elettrica, sottoforma di corrente continua. I due semianelli, sono la base di un organo meccanico chiamato **collettore**. Nelle moderne dinamo la spira viene sostituita, per ovvi motivi di rendimento, da una serie di avvolgimenti di spire chiamati **matasse**; le matasse vengono poste in apposite gole eseguite sulla parte rotativa, ovvero il **rotore**, chiamata **indotto a tamburo** o **indotto Siemens**. Il collettore fa capo alle estremità di ogni avvolgimento e la corrente di uscita viene prelevata mediante **spazzole** in carbone mantenute in pressione sul collettore da apposite molle. Poichè ogni singolo avvolgimento ha il comportamento concettuale di una spira, si ha che sui morsetti di uscita si ottiene una somma delle varie tensioni provenienti dagli avvolgimenti e si ottiene una forma d'onda molto più simile a quella in regime continuo, come si desume dalla figura, che mostra accade se già gli avvolgimenti sono 2, orientati a 90° tra loro:



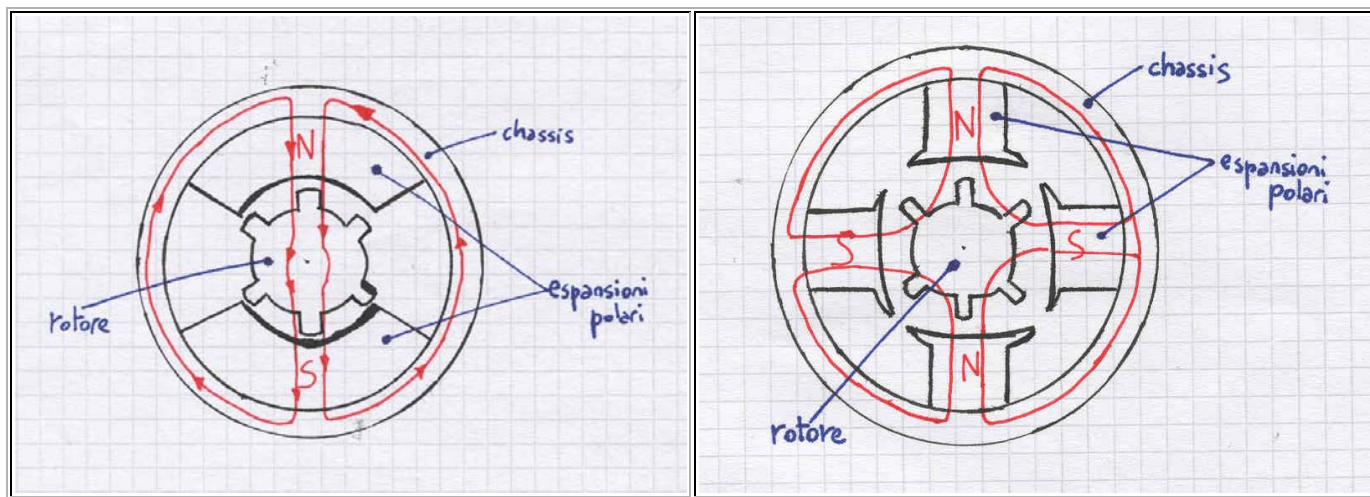
Nelle dinamo, l'induttore che essendo la parte fissa è chiamata **statore**, può essere un magnete permanente oppure un elettromagnete eccitato dalla stessa corrente continua generata dalla dinamo, in tal caso la dinamo viene definita **autoeccitata**. In taluni casi la corrente di eccitazione può essere fornita esternamente.

La figura mostra come è costruito un rotore di dinamo.

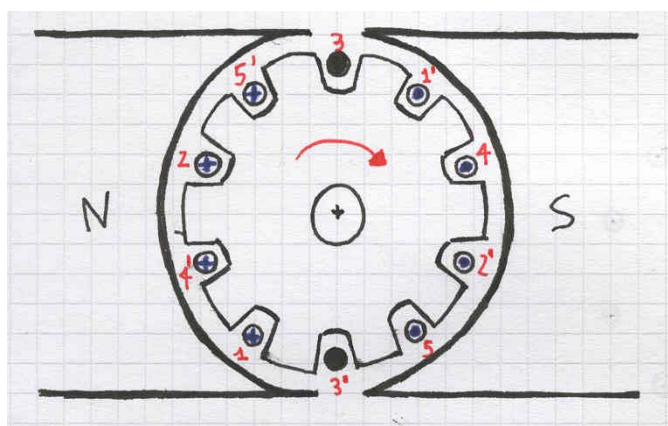


Le spazzole che vengono a trovarsi in pressione sul collettore possono consumarsi e lasciare un residuo sul collettore, che può creare problemi; manutenzione ordinaria di una dinamo sono la sostituzione dei cuscinetti, la pulizia del collettore e la sostituzione delle spazzole.

Vediamo ora, dalle figure sottostanti, come si ripartisce il flusso magnetico in una dinamo, vista in sezione, nel caso di una macchina a 2 o a 4 poli, ovvero che abbia internamente 2 o 4 espansioni polari del magnete permanente (stesse considerazioni valgono per dinamo con eccitazione a elettromagneti).

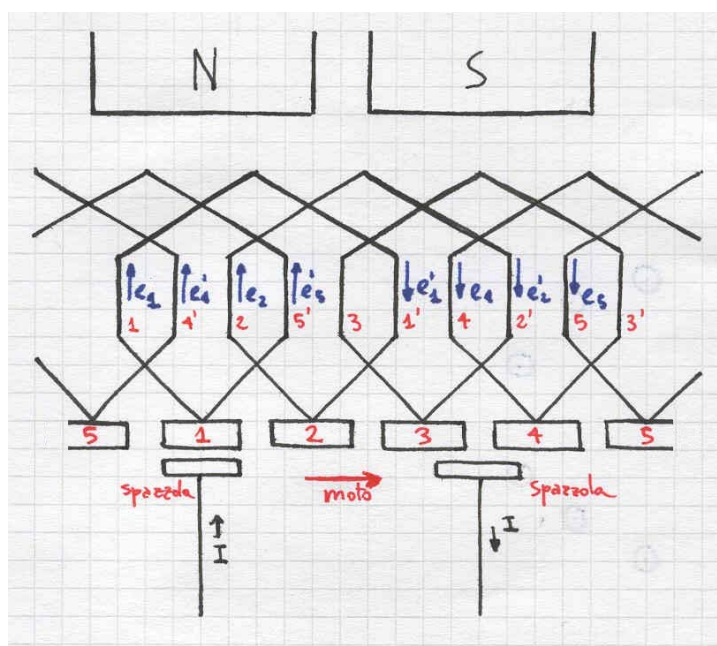


Per analizzare il funzionamento della dinamo osserviamo in un dato istante cosa accade nei conduttori, durante la rotazione dell'indotto. La figura sottostante mostra la sezione del dinamo, mettendo in risalto le correnti circolanti.



Con il verso di rotazione indicato i conduttori 1', 4, 2', 5 si trovano attraversanti da una corrente indotta uscente (indicata con un punto), mentre i conduttori 1, 4', 2, 5' si trovano attraversati da una corrente indotta entrante (indicata con una croce). Per i conduttori 3 e 3' si deve considerare che si stanno muovendo parallelamente alle linee di forza provocate dal magnete permanente; pertanto non si alcuna induzione in essi: si dice che si trovano in **zona neutra**.

La figura sottostante invece sviluppa in piano l'indotto, mostrando come sono collegati i conduttori, tenendo presente che il conduttore 1-1' è una spira, e 1 e 1' sono in pratica le due estremità e lo stesso vale per le altre quattro spire. Le lamelle numerate sono i punti di contatto che formano il collettore; nell'esempio abbiamo presupposto 5 avvolgimenti e quindi il collettore ha 5 lamelle.



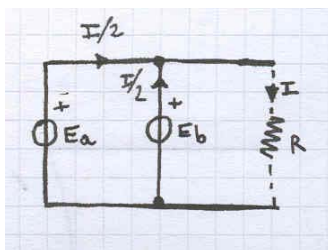
Dalla figura si nota che l'avvolgimento 1 inizia sulla lamella 1 e finisce sulla 2; dalla lamella 2 parte l'avvolgimento 2 che finisce sulla 3 e così via. In particolare in questa posizione la tensione prelevata ai capi delle spazzole è la somma di e_1 , e_1' , e_2 ed e_2' , che, grazie al collegamento adottato, risultano tutte concordi; parallelamente la stessa tensione viene originata anche dai conduttori $5', 5, 4', 4$. Poiché la macchina è simmetrica si ha che:

$$e_1 = e_5 ; e_1' = e_5' ; e_2 = e_4 ; e_2' = e_4'$$

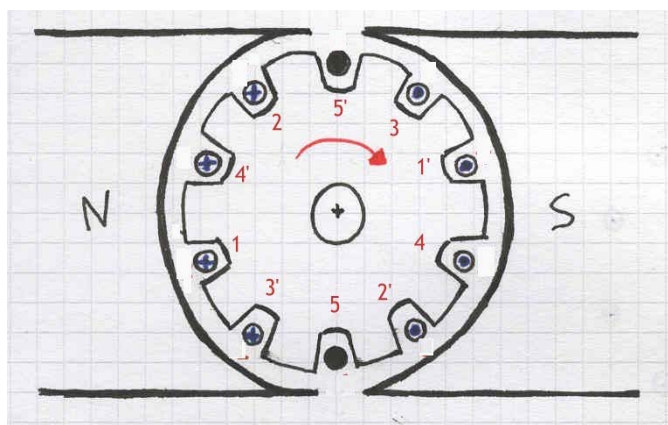
Così si può dire che

$$E_a = e_1 + e_1' + e_2 + e_2' \text{ e } E_b = e_5 + e_5' + e_4 + e_4' \text{ e } E_a = E_b$$

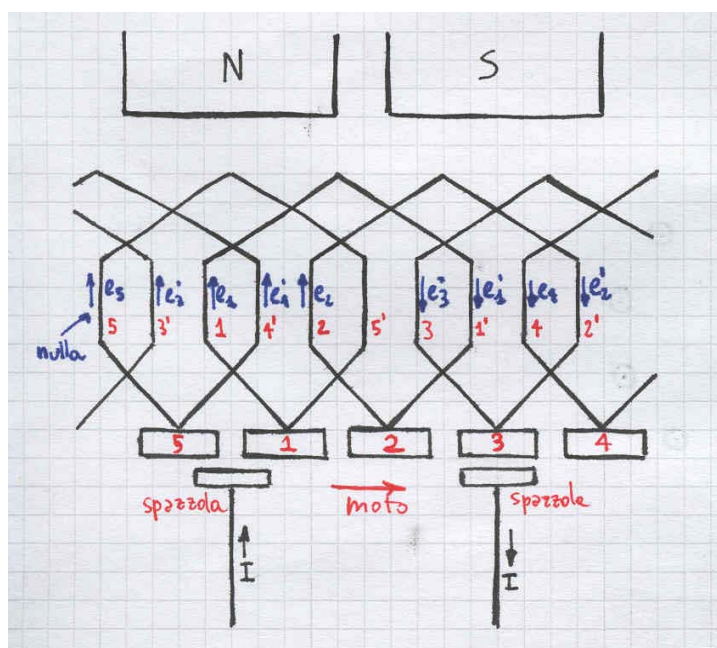
Questo sta ad indicare che il circuito equivalente della dinamo nell'istante preso in esame è composto da due generatori di tensione E_a ed E_b posti in parallelo, ognuno di essi eroga una corrente pari a $I/2$, come nello schema di figura:



Immaginiamo ora la situazione in un istante successivo, quando il rotore gira e si portano in zona neutra i conduttori 5 e $5'$, i conduttori 3 e $3'$ si portano rispettivamente sotto il polo sud e il polo nord.



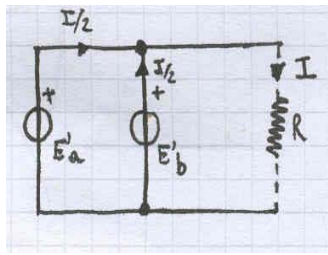
La nuova situazione a livello di tensioni si presenta come in figura sottostante:



In queste condizioni si ha che

$$E_a' = e_1 + e_1' + e_2 + e_2' \quad e \quad E_b = e_3 + e_3' + e_4 + e_4'$$

E_a' e E_b' si trovano come prima in parallelo e la tensione ai capi delle spazzole resta invariata, in quanto è variata la posizione dei conduttori, ma il risultato è sempre lo stesso; il circuito equivalente diviene:



La tensione ai capi delle spazzole è quindi invariata durante la rotazione, attraverso le varie posizioni delle spire immerse nel campo.

Ogni qualvolta un conduttore esce attraverso la zona neutra inverte il senso della tensione generata; tale fenomeno è detto **commutazione**. Per ovvi motivi dovuti alla [legge di Lenz](#), l'energia ha carattere conservativo e quindi l'interruzione della corrente e addirittura un'inversione di polarità si traducono in una scintilla sul collettore; per questo motivo e anche per la velocità con la quale ruota il collettore si ha che l'organo è molto sollecitato e soggetto a usura, allo stesso modo delle spazzole.

Il numero z di lamelle sul collettore dipende dalla potenza di targa della macchina; si parte da un minimo di 3 fino ad arrivare ad alcune centinaia. Tra due lamelle successive è difficile che si metta una sola spira, ma in generale si montano bobine di n spire. Sicché il numero totale N di spire dell'avvolgimento è dato dalla relazione:

$$N = nz$$

Poiché ogni spira è composta da 2 conduttori attivi, il numero complessivo dei conduttori attivi è pari a $2N$.

La tensione generata vale come sappiamo dal capitolo relativo all'[induzione elettromagnetica](#):

$$e = \mathbf{B} * \mathbf{l} * \mathbf{v}$$

nel caso di moto circolare uniforme, ovvero con dinamo a regime, la velocità del conduttore corrisponde alla velocità periferica:

$$\mathbf{v} = \omega \mathbf{r}$$

dove ω e r sono rispettivamente la velocità angolare e il raggio del rotore.

Si ha così che la tensione in un dato istante generata in un conduttore attivo è:

$$e = \mathbf{B} * \mathbf{l} * \omega * \mathbf{r}$$

In pratica, come si vedeva dalle figure precedenti, la tensione ottenuta è pari alla somma dei contributi di metà degli avvolgimenti attivi, in parallelo all'altra metà.

Però si deve considerare che le tensioni nei singoli conduttori non sono, come già visto, tutte uguali e dipendono dalla posizione di essi, in particolare in almeno due di essi la tensione risulta nulla, quando essi si muovono parallelamente alle linee di forza. Si considera così una tensione media e_m generata da un valore anch'esso medio dell'induzione B_m e si scrive la relazione:

$$E = N * e_m = N * B_m * \mathbf{l} * \omega * \mathbf{r}$$

dove N è la metà dei conduttori attivi.

Viene definita **flusso di macchina** Φ la somma dei flussi presenti all'interno della macchina; in particolare se la macchina è a 2 poli, il flusso di macchina è pari al doppio del flusso prodotto da ciascun polo.

Secondo una relazione già introdotta si ha che l'induzione media vale:

$$B_m = \Phi / S = \Phi / (2\pi * \mathbf{r} * \mathbf{l})$$

dove S è la superficie cilindrica del rotore.:

Così la nuova relazione per calcolare la tensione ai capi delle spazzole diviene:

$$E = N * \Phi * l * \omega * r / (2\pi * r * l) = N * \Phi * \omega / 2\pi$$

Poiché $\omega = 2\pi f$ e $f = 1/T$ si ha che $\omega = 2\pi/T$ e quindi $\omega/2\pi = 1/T$;

esprimendo il numero di giri al secondo $n = 1/T$, si ha che il numero di giri al minuto è $n/60$ e quindi la formula per calcolare la tensione può essere anche espressa come:

$$E = N * \Phi * n/60$$

che ci dice che la tensione di uscita è proporzionale al numero di conduttori, al flusso di macchina e al numero di giri al minuto con cui ruota il rotore.

Si è soliti raggruppare le costanti costruttive della dinamo N e Φ in un unico fattore denominato costante di tensione e indicato con K_E :

$$K_E = N * \Phi / 2\pi$$

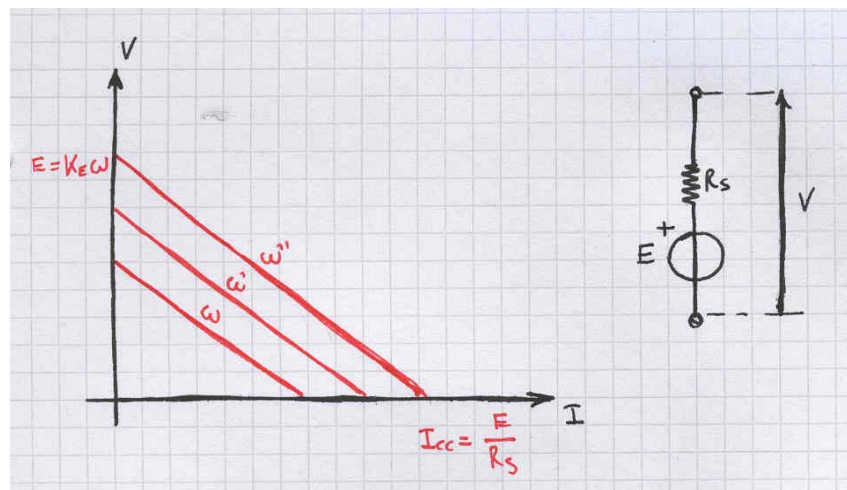
e si esprime in Volt*secondi / radianti = Wb/rad.

Per le macchine a magnete permanente K_E è una costante, mentre nelle macchine a campo avvolto, il flusso può essere variato, agendo sulla corrente che magnetizza gli elettromagneti.

In fase di progetto si cercano i valori di N e Φ in modo da realizzare la costante di tensione richiesta.

Invece in fase di analisi di una dinamo già costruita si può risalire alla sua costante di tensione, sottoponendo il rotore ad una rotazione alla velocità costante ω e misurare a vuoto la tensione ai suoi morsetti.

Una dinamo reale ha la resistenza degli avvolgimenti non nulla e può essere quindi vista come un generatore di tensione reale, avente tensione nominale pari a E e resistenza serie pari a R_s , indicando con R_s il valore di resistenza degli avvolgimenti interni. La caratteristica è indicata in figura; si noti che sono presenti diverse curve di funzionamento a diverse velocità rotoriche, in quanto, come si è detto aumentando la velocità rotorica, aumenta la tensione di uscita.



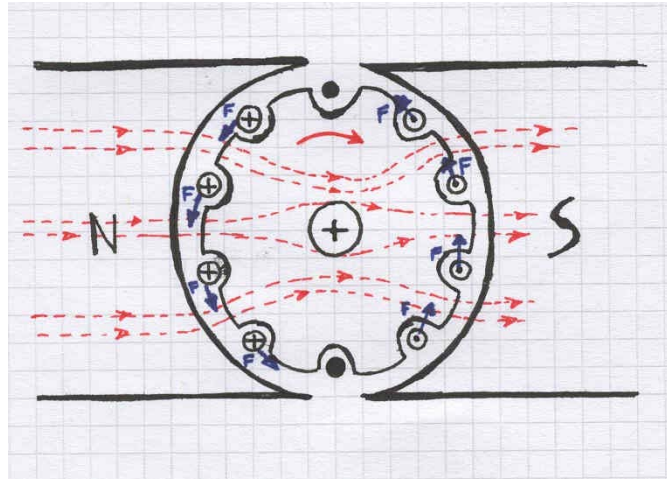
Una dinamo reale ha quindi come tensione di uscita reale:

$$V = E - R_s * I$$

Come già visto la corrente I circolante in uscita si suddivide internamente a metà negli avvolgimenti; ogni conduttore è sottoposto ad una forza

$$f = B * l * I/2$$

f risulta sempre perpendicolare alle linee di forza come illustrato in figura:



Le linee di forza risultano deformate in quanto vengono, ovviamente, ad attraversare il rotore anziché passare nel traferro, che ha riluttanza maggiore. Sui conduttori in zona neutra non si origina alcuna forza, perchè come già detto non sono attraversati da corrente. Per ovvie ragioni, dovute ancora al principio di conservazione dell'energia, in particolare alla legge di Lenz, le forze si sviluppano in verso tale da opporsi alla causa che le ha generate.

La forza risultante è la sommatoria delle singole forze e vale:

$$F = 2 * N * B_m * I * l/2 = N * B_m * I * l$$

Ovviamente la forza che si sviluppa oltre ad essere contraria è direttamente proporzionale alla corrente generata;

La forza sviluppata si trova essere tangenziale al motore e genera conseguentemente una coppia C pari a:

$$C = F * r = N * B_m * I * l * r = K_E * I$$

Per mantenere il rotore in rotazione ad una velocità costante ω è quindi necessario applicare una coppia motrice $C_m = C$.

Questo significa che all'aumento della corrente circolante, corrispondente all'aumentare del carico applicato, sarà necessario applicare una coppia maggiore e ancora una volta questo ha riscontro nel principio di conservazione dell'energia.

La costante di tensione viene denominata, nel contesto del calcolo della coppia di una dinamo, come **costante di coppia** e indicata con K_T ; tuttavia è sempre lo stesso valore, che si può anche genericamente indicare con K .

Consideriamo ora una dinamo priva di resistenza interna sugli avvolgimenti.

La potenza meccanica P_m che viene fornita all'albero vale:

$$P_m = C * \omega = K_T * I * \omega$$

La potenza elettrica, invece, con $R_s = 0$, vale:

$$P_{el} = V * I = E * I = K_E * I * \omega$$

E questo fa capire che la potenza meccanica fornita sull'albero, in una dinamo ideale, eguaglia la potenza erogata; infatti a vuoto, non esiste circolazione di corrente e la potenza elettrica è nulla; in una dinamo ideale, la messa in rotazione dell'albero non richiede alcun apporto di energia, tranne l'accelerazione iniziale.

In una dinamo reale, invece, gli attriti meccanici e l'eventuale ventilazione richiedono una potenza non nulla che chiamiamo P_α .

In oltre parte della potenza applicata viene dispersa per perdite magnetiche e denominiamo questa aliquota P_μ .

Se la velocità di rotazione della dinamo è costante, queste perdite hanno un valore costante e vengono definite **perdite costanti** P_0 :

$$P_0 = P_\alpha + P_\mu$$

Tenendo conto di queste perdite, la **potenza in ingresso** P_i da applicare all'albero, perchè la potenza elettrica in uscita resti invariata, diviene ovviamente la somma della potenza meccanica e delle perdite costanti:

$$P_i = P_m + P_0$$

La **potenza di uscita** P_u , però non rimane uguale alla potenza elettrica prevista nella dinamo ideale, ma, a causa della resistenza degli avvolgimenti R_s , viene ad essere pari a:

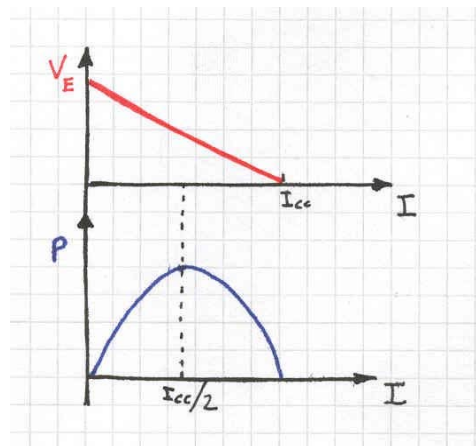
$$P_u = V * I = (E - R_s * I) * I = E * I - R_s * I^2$$

Come si era già detto $E * I$ corrisponde alla potenza elettrica P_{ei} che si aveva in caso di dinamo ideale, mentre $R_s * I^2$ rappresenta le perdite di potenza per effetto joule negli avvolgimenti. Si noti che le perdite di potenza per effetto joule sono fortemente influenzate dal carico, infatti variano addirittura con il quadrato della corrente.

A questo punto si può definire il **rendimento** η visto come il rapporto tra la potenza erogata in uscita e la potenza applicata in ingresso:

$$\eta = P_u / P_i = (EI - R_s I^2) / (EI + P_0)$$

A velocità costante si può mettere in comparazione l'andamento della tensione e della potenza erogata al variare della corrente secondo i due grafici di figura:



Dai grafici si capisce che la **potenza massima di uscita** P_{UM} si ottiene in corrispondenza di una corrente pari a metà del valore della corrente di cortocircuito; in particolare la potenza ha l'andamento di una parabola simmetrica. Infatti a vuoto essa è nulla, poichè non vi è corrente circolante; in regime di cortocircuito è massima la corrente, ma la tensione è nulla e la potenza risulta ancora nulla.

In corrispondenza di $I = I_{cc}/2$ si ha che anche la tensione di uscita è metà della tensione nominale E e quindi:

$$P_{UM} = V * I = E/2 * I_{cc}/2 = E/4 * (E/R_s) = 1/4 E^2/R_s$$

In linea teorica quindi, la massima potenza di uscita si ottiene per una corrente erogata, pari alla metà della corrente di cortocircuito; in pratica però l'uso di una dinamo in queste condizioni porterebbe i suoi avvolgimenti a temperature molto elevate, provocando alla lunga danni permanenti alla macchina.

In condizioni normali, la corrente nominale dalla dinamo è quindi molto minore della corrente di cortocircuito e la potenza nominale molto minore della potenza massima di uscita.

Si ha quindi

$$I_n \ll I_{cc} \text{ e } P_n \ll P_{UM}$$



prossimo capitolo



torna alla pagina dell'elettronica

); //-->