

DISPENSE DI MACCHINE ELETTRICHE

IL TRASFORMATORE

IL TRASFORMATORE MONOFASE

Il trasformatore è una macchina elettrica statica (priva cioè di parti fondamentali in movimento) che permette di trasferire potenza elettrica tra due avvolgimenti (in corrente alternata) isolati tra di loro e funzionanti a tensioni diverse. I trasformatori che assolvono a questa funzione possono essere monofasi o trifasi. Questi trasformatori funzionano a 50 o 60 [Hz], rispettivamente a terra e sulle navi.



Fig. 1.1: Trasformatore per piccolo alimentatore



Fig. 1.2: Trasformatore da 25 MVA per sottostazione di distribuzione

Principio di funzionamento

Il suo funzionamento è basato sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, pertanto *il trasformatore può funzionare soltanto in regime sinusoidale; non può funzionare in corrente continua.*

Enunciamo il principio di funzionamento facendo riferimento al trasformatore "teorico" di figura 1.3 e 1.4, alimentato da un generatore collegato al *primario*, mentre un dispositivo da alimentare (*carico*), è connesso ai morsetti di uscita, definiti *secondario*.

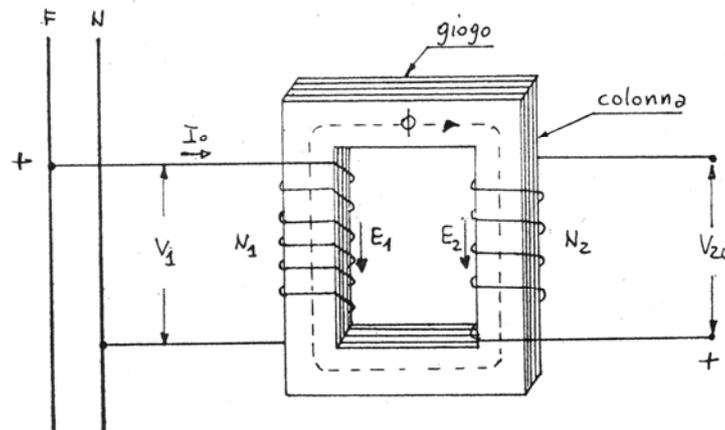


Fig. 1.3 – Struttura del trasformatore monofase ideale funzionante a vuoto.

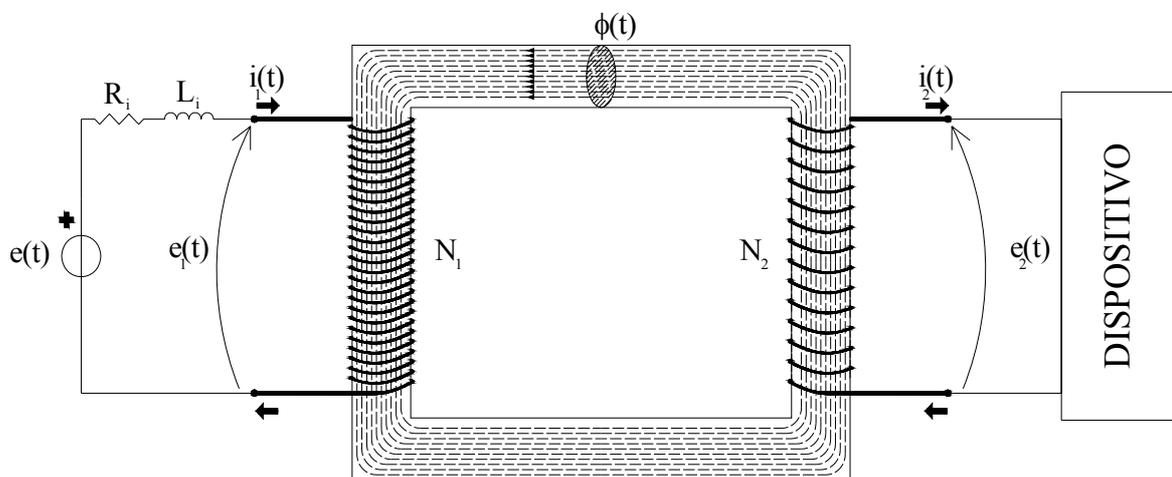


Fig. 1.4: Trasformatore monofase "teorico"

Esso è costituito da due bobine con numero di spire N_1 ed N_2 , avvolte su un nucleo di materiale ferromagnetico; si definisce *rapporto di trasformazione* $n = N_1 / N_2$.

Alimentando alla tensione sinusoidale V_1 il primario del trasformatore funzionante a vuoto (senza carico), composto di N_1 spire, in esso circolerà una corrente sinusoidale I_0 che creerà una *forza magnetomotrice* sinusoidale e un *flusso* sinusoidale Φ_0 .

Tale flusso si richiude quasi tutto attraverso il circuito magnetico e indurrà, per via della legge dell'induzione elettromagnetica, una forza elettromotrice sinusoidale in ciascuno dei due avvolgimenti. Tali f.e.m. valgono rispettivamente E_1 ed E_2 .

Struttura di un trasformatore monofase che alimenta un carico ohmico-induttivo:

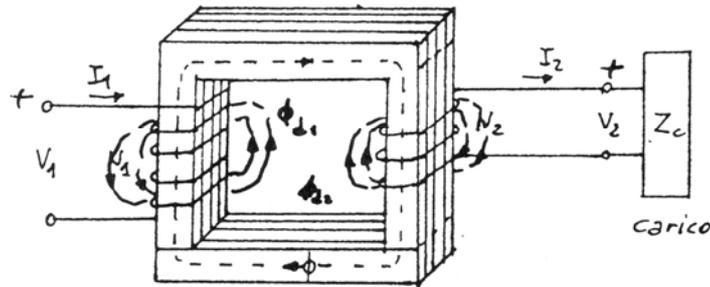


Fig. 1.5: Trasformatore monofase “teorico” a carico

Equazioni del trasformatore:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = n \\ \phi_1 = \phi_2 \\ P_1 = E_1 I_1 \cos(\phi_1) = E_2 I_2 \cos(\phi_2) = P_2 \\ Q_1 = E_1 I_1 \sin(\phi_1) = E_2 I_2 \sin(\phi_2) = Q_2 \\ A_1 = E_1 I_1 = E_2 I_2 = A_2 \end{array} \right.$$

Il trasformatore è in grado di far passare dalla tensione in ingresso ad un valore più alto (*trasformatore innalzatore*) o più basso (*trasformatore abbassatore*), variando nel contempo in modo opposto la corrente e mantenendo (praticamente) inalterata la potenza e costante la frequenza.

Il trasformatore è ampiamente usato per *adattare tensioni e correnti ai valori più adeguati*.

Se la nave è di grosse dimensioni e se è utilizzata la *propulsione diesel-elettrica*, sono presenti più livelli di tensione, essenzialmente perché al crescere della potenza dei motori elettrici oltre certi limiti, è necessario alimentarli a tensioni più elevate. Indicativamente:

- tensione nominale **440 V**: da frazioni di kVA ad alcune centinaia di kVA (sotto il MVA)
- tensione nominale **690 V**: centinaia di kVA; 1 - 2 MVA
- **3 kV - 6 kV - 6,6 kV - 10kV - 11kV**, ecc...: 1 MVA – decine di MVA

Il trasformatore è una macchina *reversibile*: ciascuno dei due avvolgimenti può funzionare da primario (quello collegato alla rete) o da secondario (quello collegato al carico); i ruoli possono essere scambiati. Per distinguere i due avvolgimenti quando il trasformatore non è collegato, si usa chiamare avvolgimento di alta tensione (**AT**) quello con tensione nominale maggiore e avvolgimento di bassa tensione (**BT**) l'altro.

Gli avvolgimenti sono formati da conduttori opportunamente isolati con apposite vernici; sono realizzati su più strati e in molte modalità; ogni strato è isolato dagli altri e/o dal nucleo in vari modi, ad esempio con carta impregnata d'olio o materiali sintetici.

Dati di targa del trasformatore.

Il trasformatore è caratterizzato da una targa che riporta i valori nominali di funzionamento, cioè i valori che le grandezze elettriche possono assumere senza danneggiare la macchina.

La temperatura a regime della macchina dipende dalle perdite di potenza interne, perdite nel ferro, che sono funzione del quadrato della tensione applicata, e perdite nel rame, che sono funzione del quadrato della corrente negli avvolgimenti.

Le grandezze nominali sono:

- *tensione nominale primaria U_{1n} e secondaria U_{2no} (a vuoto)*, definite come le *massime tensioni che gli avvolgimenti del trasformatore possono sopportare indefinitamente* senza problemi per gli isolamenti;
- *corrente nominale primaria I_{1n} e secondaria I_{2n}* , definite come le *massime correnti che gli avvolgimenti del trasformatore possono sopportare indefinitamente* senza che, a causa delle perdite per effetto Joule, la temperatura raggiunga valori tali da arrecare danno alla macchina, specialmente agli isolamenti; la corrente che effettivamente assorbe un trasformatore dipende da quella richiesta dal carico; può quindi variare ma non deve superare il valore nominale se non per tempi relativamente brevi (ad es. sovraccarichi del 30% possono essere sopportati per alcune ore)
- potenza nominale $A_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n}$; nota: è una potenza apparente, in [VA]
- frequenza nominale, quella per la quale il trasformatore è progettato (50Hz a terra e 60 Hz a bordo)
- il gruppo d'appartenenza, solo per i trasformatori trifase;
- la classe d'isolamento che definisce la temperatura convenzionale di riferimento;
- il tipo di servizio (continuo, di durata limitata, intermittente).

Fino ad ora si è considerato il trasformatore “ideale”; perché in realtà esistono alcuni fenomeni che ne alterano parzialmente il comportamento:

- i conduttori che formano gli avvolgimenti hanno resistenza non nulla: questo si traduce in perdite e cadute di tensione; le perdite sono chiamate *perdite nel rame P_{cu}* e dipendono dal quadrato del modulo della corrente assorbita

- i due avvolgimenti non sono perfettamente accoppiati: parte del flusso generato dal primario non si concatena con il secondario e viceversa; questi flussi vengono detti *dispersi*. Anche questo fenomeno si traduce in una caduta di tensione che può essere assimilata a quella su una induttanza (*induttanza di dispersione*)
- serve corrente al primario per creare flusso nel nucleo anche quando non c'è corrente a secondario; in questa condizione $I_1 = I_{10}$ *corrente a vuoto*
- ci sono perdite nel nucleo ferromagnetico, definite *perdite nel ferro* P_{fe} , che dipendono dal quadrato della tensione di alimentazione; esse sono dovute a correnti, dette *parassite*, indotte all'interno del nucleo (i materiali ferromagnetici sono anch'essi conduttori) e a un altro fenomeno magnetico dissipativo chiamato *isteresi che dipendono dal quadrato della frequenza*.

Esempio di trasformatori e relativi dati tecnici messi a disposizione dai costruttori:

Sn [KVA]	Po %	Io %	Pcc %	Vcc %	η %
0,3	5	20	7,5	9	89
3	3,1	6 □ 10	4,3	6	94
15	1,8	4 □ 7	2,6	5,2	95
50	0,66	3,1	2,2	4	96,6
100	0,43	2,9	1,9	4	97,2
500	0,24	2	1,27	4	98,2
1000	0,235	1,8	1,17	4,4	98,3

N.B.: la tabella fa riferimento ai trasformatori trifasi. Il rendimento è riferito al funzionamento a pieno carico e fattore di potenza d'uscita pari a 0,8r.

Bilancio energetico

Le potenze $P_0 = P_{fe}$ e P_{cc} vengono definite, rispettivamente, perdite a vuoto e perdite in cortocircuito perché rappresentano effettivamente potenza dissipata in calore e quindi persa; sono in genere piccole rispetto alla potenza nominale (che comunque, va ricordato, è una potenza apparente in KVA).

Può essere utile ricordare quanto segue:

- maggiori sono le perdite, minore è il rendimento del trasformatore e più il trasformatore dissipa potenza in calore e quindi si scalda
- le perdite nel ferro dipendono dalla tensione di alimentazione, che è sempre prossima al valore nominale, e quindi sono sempre praticamente uguali alla P_0 ; sono sempre presenti, anche quando il trasformatore è collegato ma non alimenta nulla (funziona a vuoto)
- le perdite nel rame variano con la corrente assorbita dal carico.

Rendimento

Per quanto riguarda il rendimento, si può dire quanto segue.

Supponendo che la macchina stia alimentando un carico di potenza P_2 avente fattore di potenza $\cos\phi$, si ha:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fe} + P_{cu}}$$

Il rendimento del trasformatore è in genere molto alto: se si escludono macchine di potenza limitata, può andare da circa 0.95 per trasformatori in bassa tensione e pochi kVA di potenza, sino a superare 0.99 per trasformatori media tensione – alta tensione con potenze di centinaia di MVA.

Curva del rendimento di un trasformatore monofase in funzione della corrente erogata:

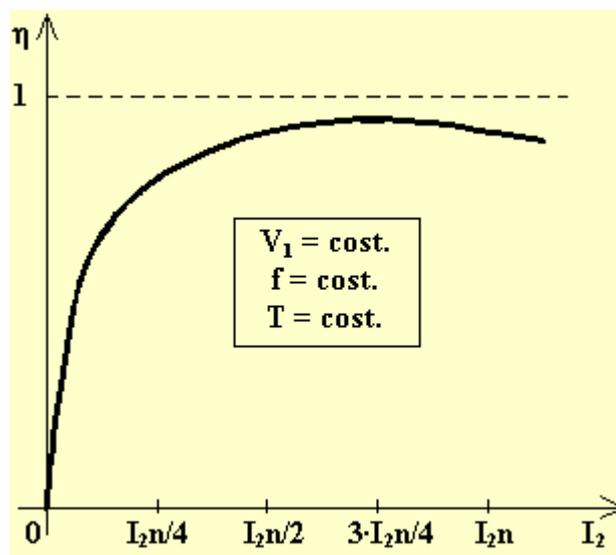


Fig. 1.6: Curva del rendimento di un trasformatore monofase in funzione della corrente erogata:

Il trasformatore dà il massimo rendimento intorno ai $3/4$ del pieno carico. Nei trasformatori ben costruiti e funzionanti a pieno carico il rendimento è sempre molto elevato, anche pari al **99,5%** per le macchine di elevata potenza.

Principali caratteristiche costruttive dei trasformatori.

Il nucleo ferromagnetico è costituito da una serie di lamierini (spessore 0,3 - 0,5 mm) isolati con apposita vernice e mantenuti pressati. La laminazione è necessaria per contenere le perdite per correnti parassite. Per ridurre ulteriormente questo fenomeno vengono utilizzate leghe particolari (al silicio: resistenza elettrica maggiore).

Le strutture costruttive tipiche sono il nucleo a colonne o a mantello (fig. 1.7).

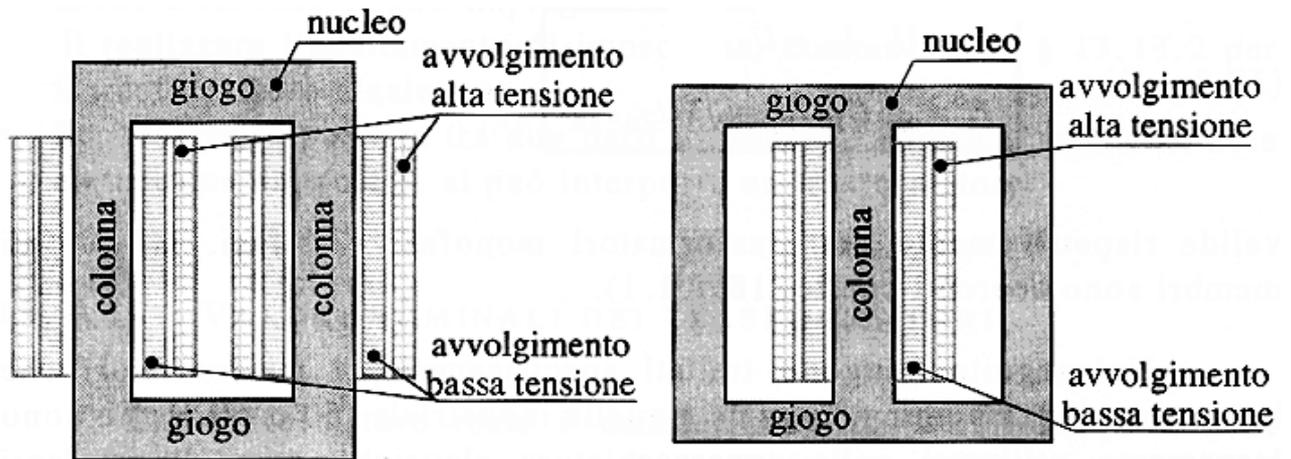


Fig. 1.7: Nuclei a colonna ed a mantello

Il nucleo ferromagnetico è composto da tratti verticali (colonne) ed orizzontali (gioghi). La struttura viene realizzata combinando colonne e gioghi mediante “giunti” di vario tipo (fig. 1.8).

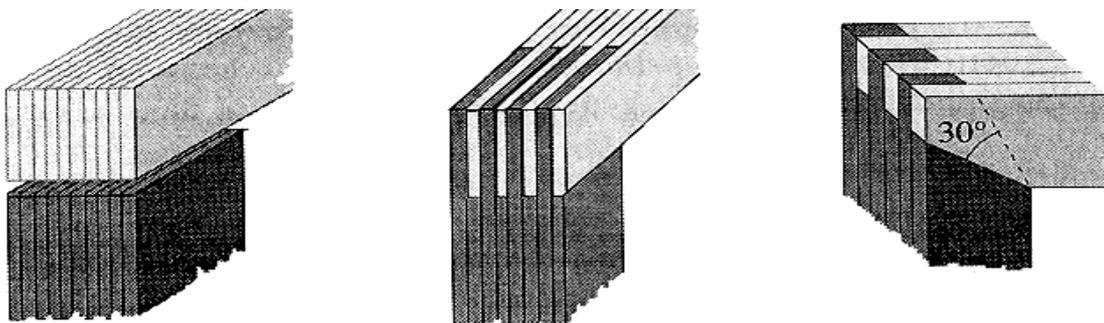


Fig. 1.8: Tipi di giunti

La sezione trasversale delle colonne viene realizzata in diverse maniere (fig.1.9): la struttura migliore è quella a gradini (più costosa ma più vicina alla sezione circolare \Rightarrow maggior sezione utile a parità di avvolgimento, migliore ancoraggio per gli avvolgimenti per contenere gli sforzi elettrodinamici).

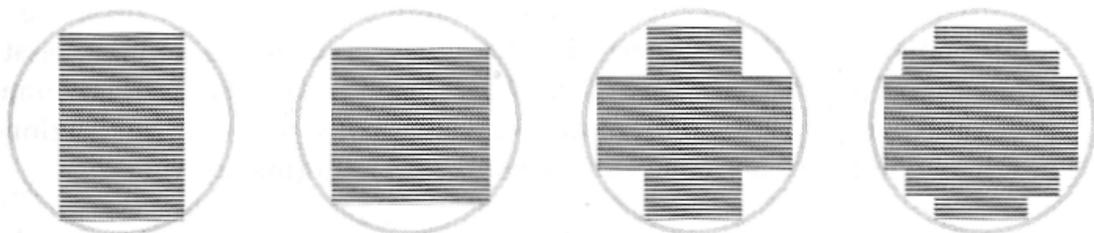


Fig. 1.9: Possibili sezioni di colonne

Gli avvolgimenti sono formati da “bobine” montate su una o più colonne (a seconda che il nucleo sia a colonne o a mantello); in quest’ultimo l’accoppiamento è migliore e si riducono le reattanze di dispersione. I conduttori, di rame o di alluminio, che costituiscono le spire sono elettricamente isolati verso le altre spire e verso il nucleo.

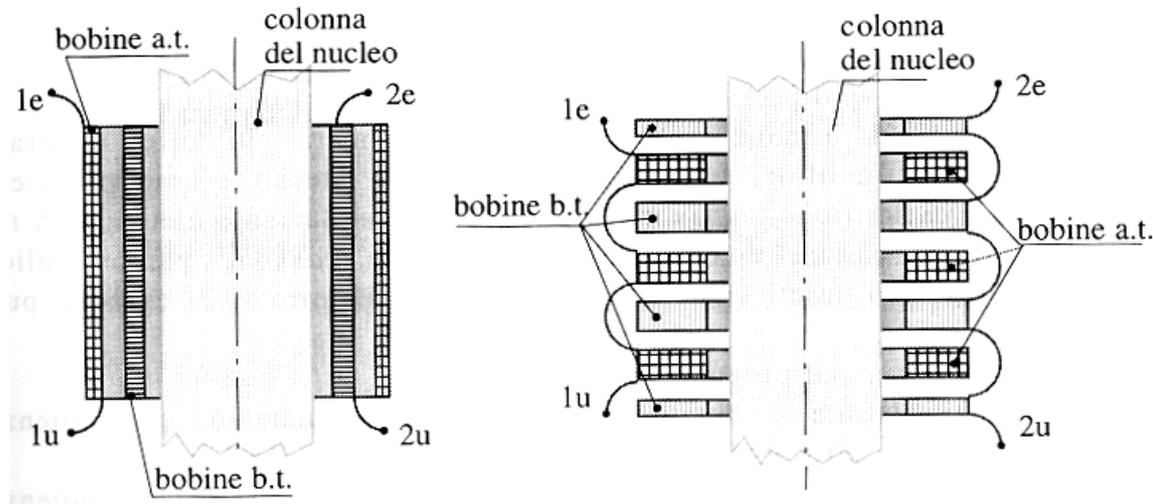


Fig. 1.10: Tipi di avvolgimenti: concentrici e alternati

La disposizione degli avvolgimenti può essere di tipo concentrico o alternato:

- concentrica: le bobine primarie e secondarie costituiscono due avvolgimenti concentrici di diametro differente: preferito nelle realizzazioni per tensioni elevate in quanto permette di isolare meglio il primario dal secondario e dal nucleo interponendo tubi isolanti ad alta rigidità dielettrica.
- alternata: le bobine primarie e secondarie hanno lo stesso diametro e sono montate in maniera intercalata: migliora l'accoppiamento e semplifica la costruzione delle bobine.

L'isolamento dei singoli conduttori che costituiscono gli avvolgimenti viene realizzato in funzione delle tensioni che debbono essere sopportate dai conduttori sia in condizioni di normale funzionamento che in condizioni di guasto.

Come si è visto, il trasformatore dissipa una certa quantità di potenza per effetto joule negli avvolgimenti e nei nuclei ferromagnetici. Necessita pertanto di un sistema di raffreddamento per estrarre il calore prodotto dalle perdite e contenere i valori di temperatura di esercizio entro limiti accettabili.

Tipi di raffreddamento

Il raffreddamento può essere realizzato in vari modi, a seconda della potenza nominale del trasformatore (fig. 1.11):

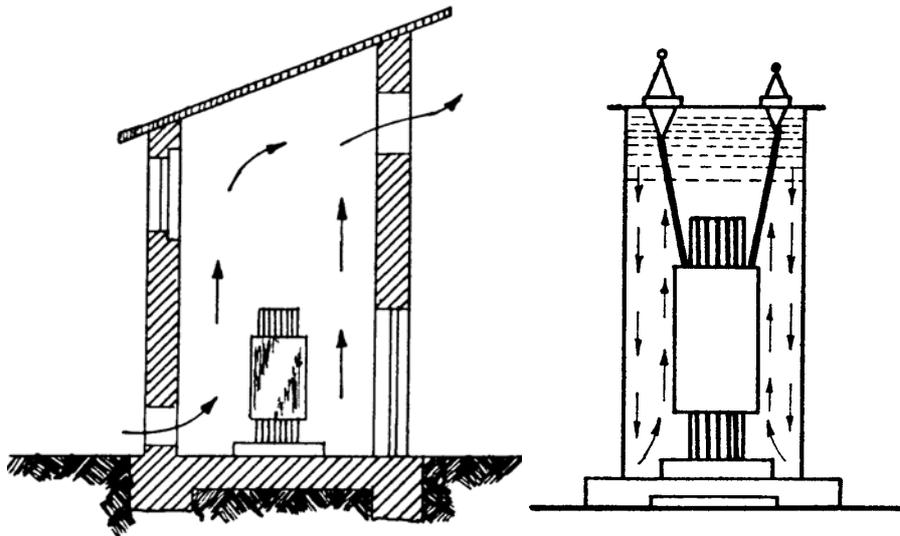


Fig. 1.11: Trasformatore in aria (sinistra) ed in olio (destra)

- in aria: il raffreddamento è lasciato all'aria ambiente; inadatte per grandi potenze, luoghi umidi o sporchi o inquinati
- in olio: le parti attive sono contenute in una cassa in lamiera metallica completamente riempita di olio minerale che ha funzioni di isolante elettrico, protezione da umidità e sporcizia, e fluido di raffreddamento, per la circolazione che si induce per effetto convettivo
- inglobati in resina.

Nelle macchine isolate in resina l'olio non c'è, e la protezione da umidità e sporcizia è assicurata da uno strato di resina epossidica. La macchina costa di più e si raffredda con maggiore difficoltà, il che limita la taglia dei trasformatori (per piccole potenze).

Il sistema di raffreddamento più semplice è detto *Olio Naturale – Aria Naturale (ONAN)*: sia la circolazione dell'olio all'interno della cassa che quella dell'aria all'esterno avvengono per convezione naturale.

Per potenze maggiori, si aggiungono dei ventilatori che soffiano l'aria sulla cassa o sui refrigeranti, migliorando la convezione (*macchine ONAF, Olio Naturale – Aria Forzata*).

Per macchine di potenza ancora più elevata, il passaggio dell'olio all'interno del cassone avviene mediante opportune pompe di circolazione: si ottiene così la macchina con raffreddamento *OFAF (Olio Forzato – Aria Forzata)*.

Il trasformatore deve essere adeguatamente protetto da guasti elettrici interni. Sono solitamente presenti sensori definiti *relè* che fanno aprire un interruttore a monte quando la corrente supera determinati valori per un tempo maggiore a prefissati limiti, al fine di proteggere, ad esempio, da cortocircuiti a valle del trasformatore; possono inoltre essere presenti sensori di temperatura che aprono l'interruttore quando il trasformatore ha raggiunto una temperatura troppo elevata.

Il relé Buchholz

Una protezione molto efficace contro i guasti dei trasformatori in olio è il relé Buchholz: esso è basato su un principio meccanico ed è installato sul tubo che porta al *conservatore* dell'olio - una specie di vaso di espansione - situato in una posizione più elevata rispetto alla cassa del trasformatore, che ha la funzione di mantenere sempre piena la cassa e consentire la dilatazione dell'olio dovuta alle variazioni di temperatura (fig. 1.12).

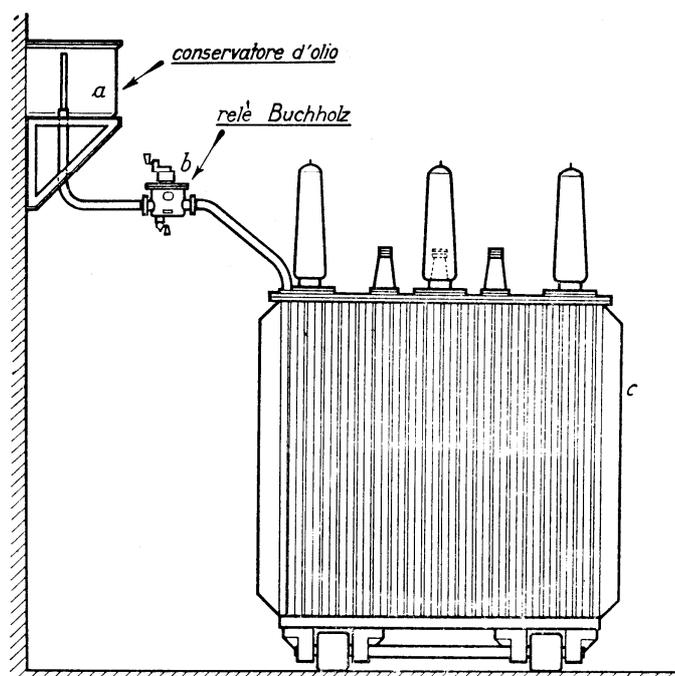


Fig. 1.12: Collocazione di conservatore, Buchholz e trasformatore trifase

Le dilatazioni avvengono perché nel conservatore d'olio l'aria può penetrare; per evitare contaminazioni o penetrazione di umidità dell'olio si cerca di ridurre la superficie di olio a contatto dell'aria, che comunque penetra dopo essere passata attraverso sali igroscopici.

Il cortocircuito può dare luogo a fortissimi riscaldamenti locali che provocano la decomposizione dell'olio per pirolisi; si formano delle bolle di gas che tendono a salire e si raccolgono nella parte superiore della cassa, per poi salire attraverso il tubo che porta al conservatore, passando attraverso il relé (fig. 1.13). Ciò provoca l'apertura dell'interruttore di macchina.

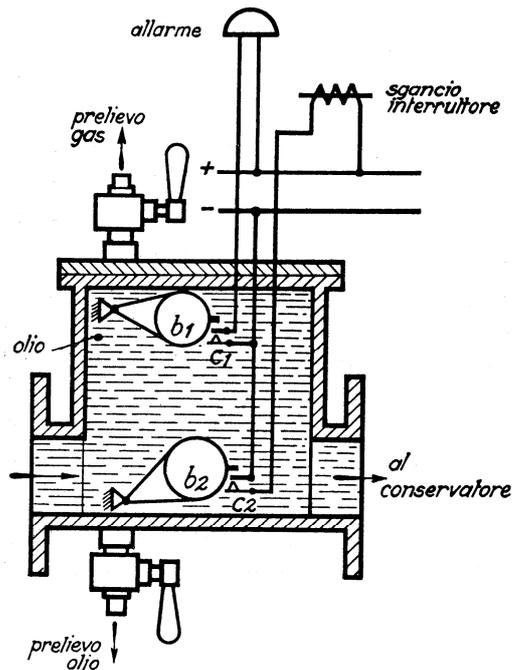


Fig. 1.13: Relé Buchholz

Il relé Buchholz è costituito da un recipiente che contiene due galleggianti, uno molto sensibile al passaggio delle bolle del gas (b_1 , di allarme), e l'altro meno sensibile (b_2 , di fuori servizio).

Quando si hanno poche bolle, il galleggiante di fuori servizio non ne risente, mentre quello di allarme si muove perché non è più sorretto dall'olio; si ha quindi l'attivazione di un segnale di allarme, senza la messa fuori servizio della macchina.

Quando lo sviluppo di gas è molto forte (guasto grave) le bolle fanno smuovere anche l'altro galleggiante, e quindi si ha la messa fuori servizio della macchina (apertura - "sgancio"- dell'interruttore a monte).

Il parallelo dei trasformatori

Due trasformatori si dicono funzionanti in parallelo quando sono alimentati da una stessa linea ed erogano potenza su uno stesso carico. Tali trasformatori permettono di trasformare una potenza maggiore di quella possibile con un trasformatore singolo, inoltre, garantiscono una buona continuità di servizio.

Noi facciamo riferimento al caso di trasformatori trifasi; quanto verrà detto è comunque valido anche per i trasformatori monofasi. Possiamo rappresentare due trasformatori in parallelo mediante uno schema semplificato unifilare (Fig. 1.14):

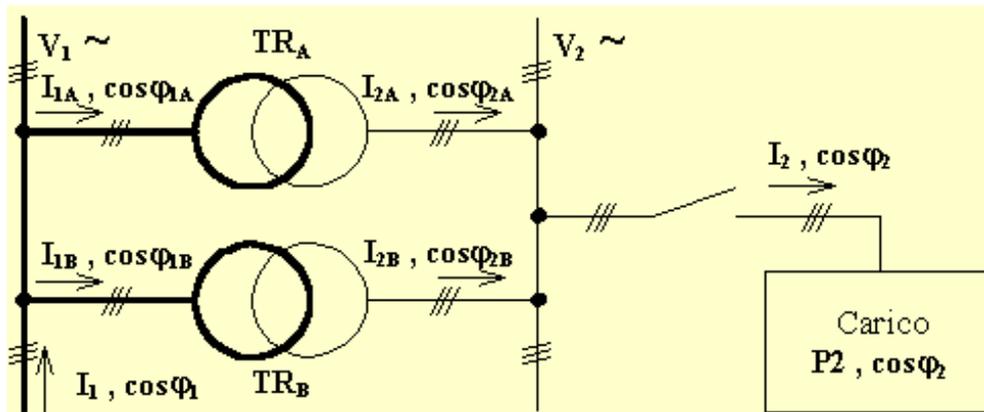


Fig. 1.14 – Schema semplificato unificare di due trasformatori trifase collegati in parallelo.

Nella pratica, si preferisce separare i carichi in gruppi alimentati ciascuno da un trasformatore, mediante sbarre diverse (Fig. 1.15).

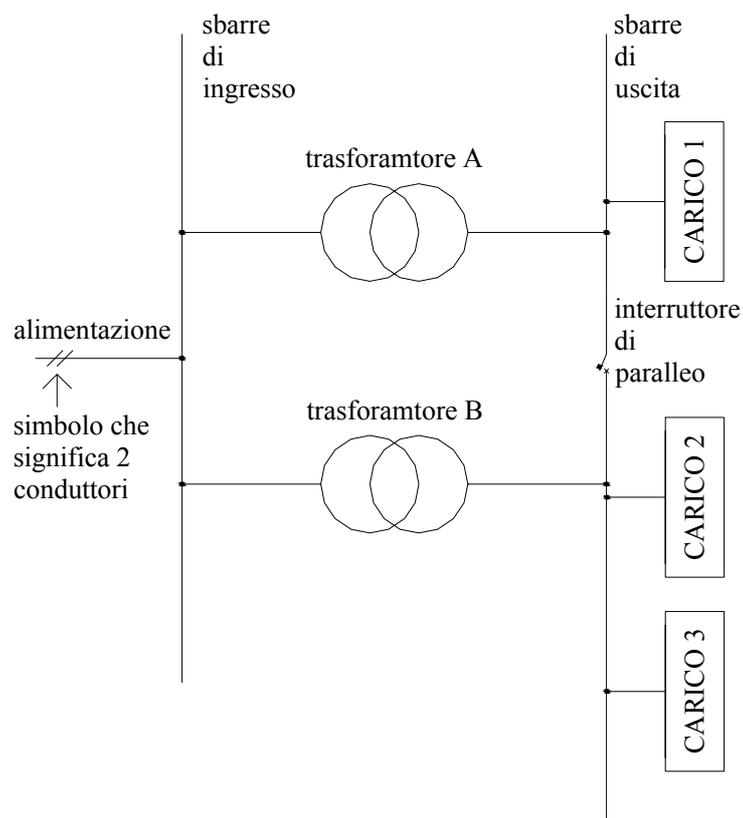


Fig. 1.15: Due trasformatori con sbarre di uscita divise in 2 sezioni: l'interruttore di parallelo normalmente è aperto

IL TRASFORMATORE TRIFASE

Concettualmente un trasformatore trifase può essere visto come un collegamento elettrico di tre trasformatori monofasi (fig. 1.16).

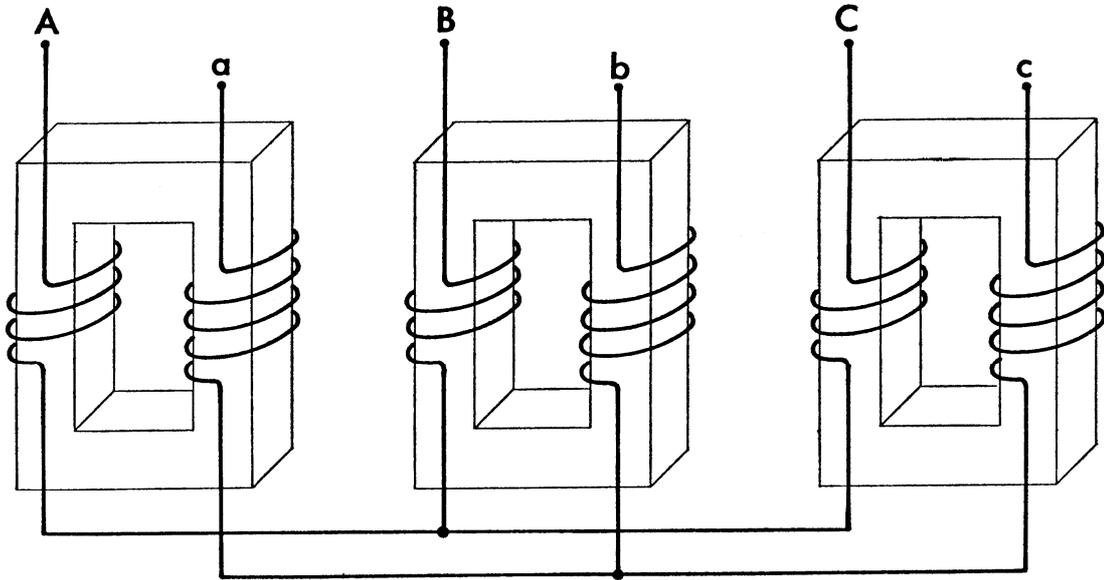


Fig. 1.16: Trasformatore tri-monofase

Esiste un'altra configurazione, che è basata su un nucleo magnetico particolare, ed ha tutti e sei gli avvolgimenti (tre primari e tre secondari) avvolti su di esso (figura 1.17).

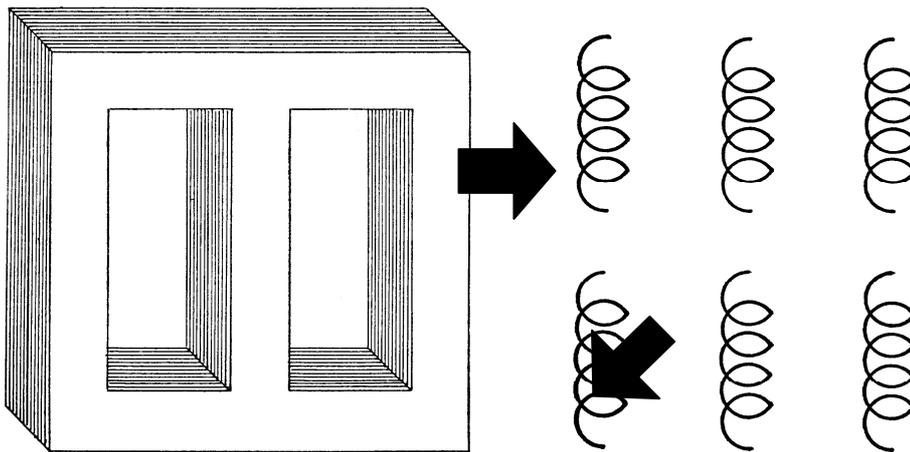


Fig. 1.17: Trasformatore trifase

La trattazione per il trasformatore trifase è del tutto analoga a quella del trasformatore monofase.

Collegamenti delle fasi e “gruppi”

Il collegamenti a stella o a triangolo sono i più diffusi e possono trovarsi indifferentemente sia al primario che al secondario del trasformatore.

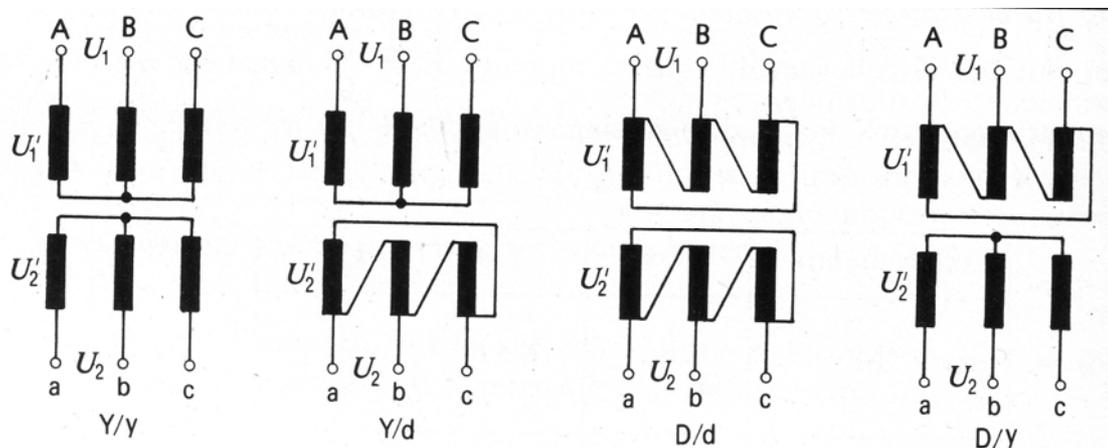


Fig. 1.18 – Connessioni interne nei trasformatori trifase.

Nella configurazione a sinistra (figura 1.18) entrambi gli avvolgimenti sono a *stella* e il trasformatore si comporta effettivamente come 3 trasformatori monofase.

Si definisce gruppo il numero ottenuto dividendo lo spostamento angolare tra le due terne di tensione (A.T. e B.T.) per 30° . I gruppi possibili sono 0, 1, 2, ..., 11.

Esempio: Yy11 = collegamento delle fasi a stella sul lato A.T. e ancora a stella sul lato B.T., con sfasamento pari a 330° tra le due terne di tensioni;

Dy5 = collegamento delle fasi a triangolo sul lato A.T. e a stella sul lato B.T., con sfasamento pari a 150° tra le due terne di tensioni.

I dati di targa di un trasformatore trifase sono gli stessi del trasformatore monofase.

Nelle figure che seguono sono riportati alcuni particolari costruttivi.

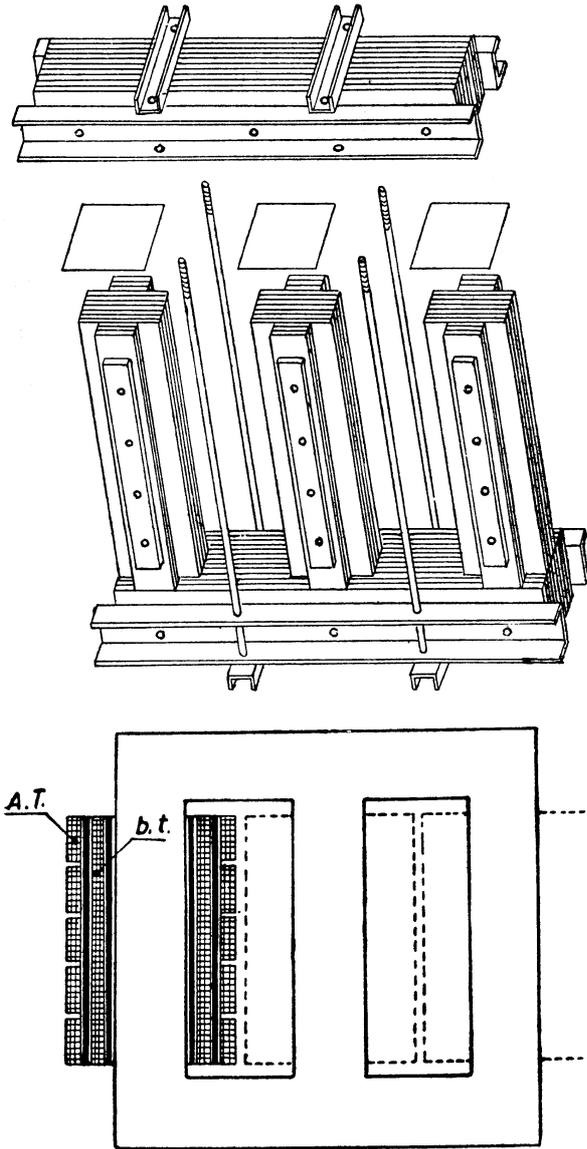


Fig. 3.19: Nucleo del trasformatore e disposizione degli avvolgimenti

TRASFORMATORI SPECIALI

AUTOTRASFORMATORE

L'*autotrasformatore* (fig.3.20) è un trasformatore particolare con un unico avvolgimento.

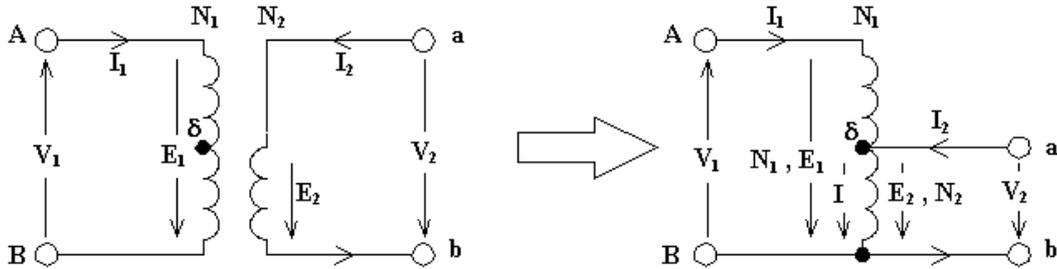


Fig. 3.20: Confronto tra lo schema di un trasformatore e quello di un autotrasformatore monofase

Il vantaggio è che la potenza dell'autotrasformatore A'_n è più ridotta rispetto a quella A_n del trasformatore necessario per la stessa applicazione, tanto più quanto il rapporto di trasformazione n tende all'unità: $A'_n = A_n(n-1)/n$

Il rendimento è maggiore perché le perdite nel rame sono minori (c'è un solo avvolgimento anziché due e le spire comuni sono percorse da una corrente minore di quella erogata); la riduzione delle perdite nel ferro, invece, è meno significativa.

E' molto usato per connettere reti a 220 e 380 kV tra di loro: $n = 1.73$, quindi A'_n è pari al 42.3% di A_n , con un notevolissimo risparmio. In B.T. questo trasformatore va usato con molta attenzione, perché ci possono facilmente essere problemi di sicurezza derivanti dal collegamento elettrico tra gli avvolgimenti. Infatti, mentre nel trasformatore i due avvolgimenti sono elettricamente separati, nell'autotrasformatore sono connessi tra di loro.

Gli autotrasformatori vengono anche costruiti in configurazione trifase. Il tipo di collegamento più usato è quello Yy. In esso la tensione secondaria V_2 può essere variata tra 0 [V] e V_1 [V] (gli autotrasformatori a rapporto variabile sono chiamati Variac). Il rapporto di trasformazione a vuoto vale sempre N_1/N_2 e lo spostamento angolare 0° .

L'autotrasformatore trifase è realizzato con il collegamento delle fasi a stella, secondo lo schema di figura.

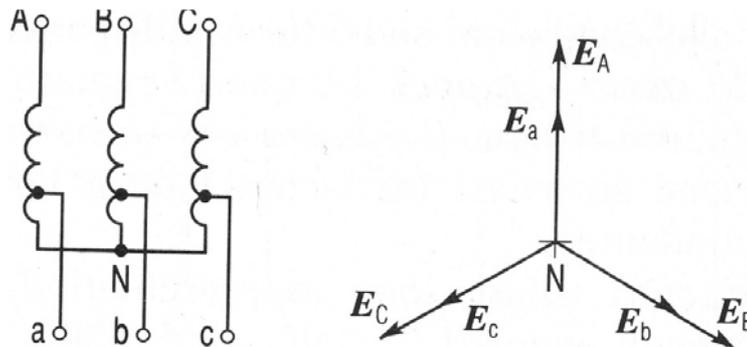


Fig. 3.21: Autotrasformatore trifase a stella e terne di tensioni

TRASFORMATORE D'ISOLAMENTO

Il *trasformatore di isolamento* è un oggetto completamente differente: è un trasformatore tradizionale, con rapporto di trasformazione unitario, che quindi non viene inserito per cambiare il valore di tensione, ma esclusivamente allo scopo di separare elettricamente due reti, solitamente per motivi di sicurezza elettrica (laboratori, applicazioni mediche, etc). Lo troviamo anche nel sistema di eccitazione dei motori sincroni di propulsione.

TRASFORMATORI DI MISURA

I trasformatori di misura (fig.3.22) sono dei trasformatori di piccolissima potenza, che hanno lo scopo di rendere possibile una misura elettrica quando i valori di corrente, tensione o potenza siano molto elevati; si dividono in TA, trasformatori di misura amperometrici, e TV, trasformatori di misura volumetrici.

Se si deve misurare una tensione di 11 kV sulla nave, è oggettivamente difficile connettere un voltmetro (che magari deve essere installato dentro un quadro elettrico) direttamente all'impianto; allora si connette in parallelo all'impianto il primario di un TV. Quando la tensione primaria assume il valore nominale, a secondario si avranno **100 V**, e c'è una proporzionalità diretta tra i valori di tensione. In questo modo, al quadro andrà una connessione a bassa tensione, senza problemi di sicurezza, e poco costosa.

Analogo problema per la misura di corrente: se si deve misurare una corrente di 1,2 kA si connette in serie all'impianto il primario di un TA. Il suo secondario sarà collegato ad un amperometro, ed il valore di corrente secondaria sarà pari a **5 A**, quando a primario si ha la corrente nominale

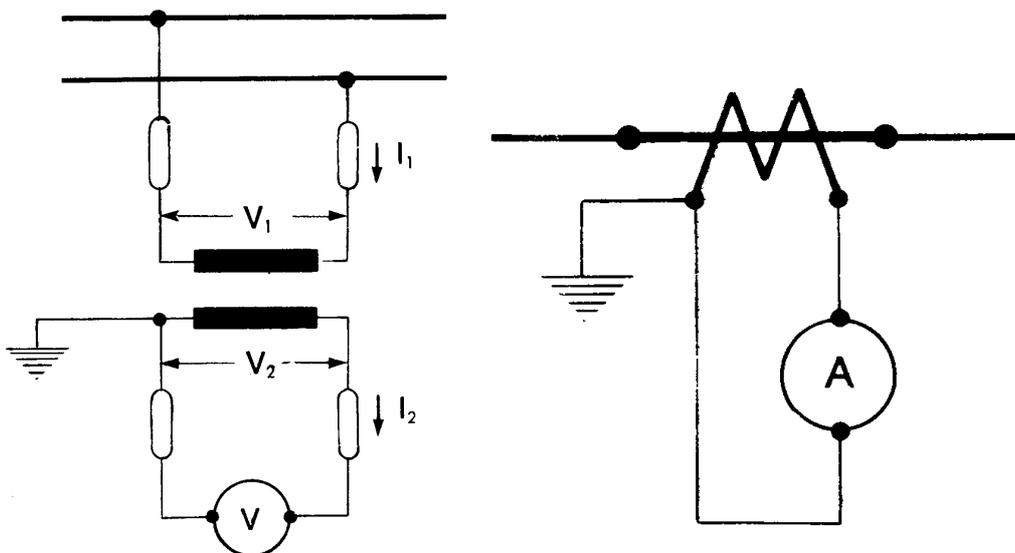


Fig. 3.22: TV (sinistra) e TA (destra)

Gli strumenti da quadro vengono forniti con la scala graduata che tiene già conto del TV o del TA usato.

Caratteristiche principali:

- Errore di rapporto (errore percentuale tra la grandezza secondaria vera e quella che si dovrebbe avere se il rapporto di trasformazione fosse rigorosamente costante) \Rightarrow classe del trasformatore
- Errore d'angolo (angolo introdotto dal trasformatore tra la grandezza primaria e secondaria); chiaramente interessa soltanto nel caso in cui si vadano ad alimentare wattmetri e contatori, che tengono conto della fase nella misura, in caso contrario è irrilevante
- Prestazione: è la massima potenza che può erogare il trasformatore di misura (qualche decina, massimo centinaio di W) senza che esso fuoriesca dalla classe di precisione a cui appartiene
- Classi di precisione: S – P – Q – R.

MANUTENZIONE E GUASTI NEI TRASFORMATORI

1) Principali operazioni di manutenzione

- controllo dei dispositivi di raffreddamento
- controllo dei dispositivi contro il sovraccarico (relé termico) ed il corto circuito (Buchholz) dei trasformatori e dei sensori di temperatura
- misura con ohmmetro (o megger per linee a tensione più elevata) della resistenza di isolamento tra avvolgimento e carcassa e tra i vari circuiti degli avvolgimenti; deve essere maggiore o uguale di 1 M Ω . La prova va fatta “a caldo”. Altre possibile cause di isolamento insufficiente: umidità.
- analisi periodiche dell'olio
- se un trasformatore è interessato frequentemente da correnti di cortocircuito per guasti a valle dello stesso, ogni due o tre anni gli avvolgimenti ed il nucleo devono essere estratti dalla cassa per accertarsi che i collegamenti interni non si siano allentati e che le saldature siano ancora in ordine.

2) Guasti, relativi sintomi e cause

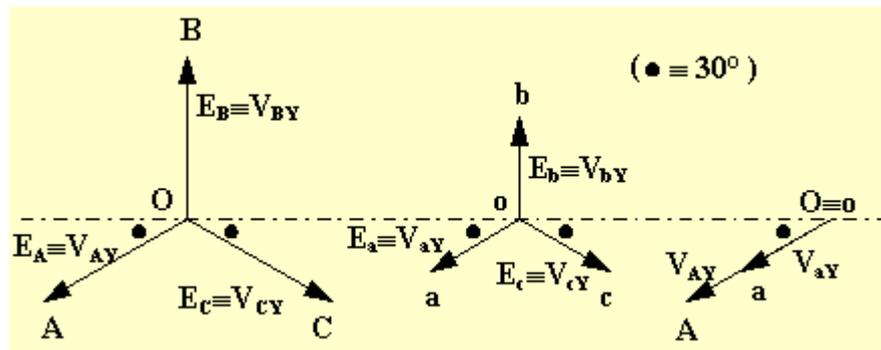
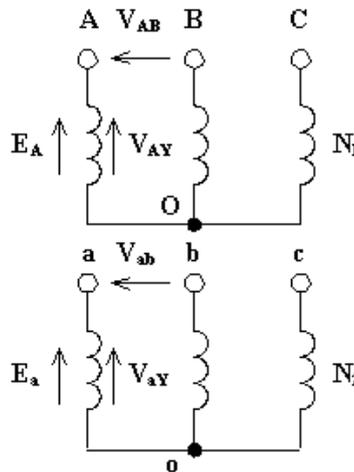
- corto circuito negli avvolgimenti:
 - corto circuito fra le spire adiacenti di una bobina, dovute alle vibrazioni meccaniche causate dalle forze magnetiche, se gli avvolgimenti non sono sufficientemente pressati tra loro: gli sfregamenti rovinano gli isolanti, causando contatto fra spire
 - deterioramento dell'olio di raffreddamento (a causa di umidità): l'olio può intaccare l'isolamento e l'umidità contenuta nell'avvolgimento e nell'olio può dar luogo a scariche e a cortocircuiti
 - nei trasformatori a secco surriscaldamenti locali, degrado degli isolanti e cortocircuiti possono essere causati da depositi di polvere;

- perforazione dell'isolamento, con contatto fra avvolgimento e nucleo o fra avvolgimento e cassa (*contatto a massa* - in genere, segue immediatamente un cortocircuito fra spire si per l'effetto locale dell'arco elettrico, sia per la perforazione dell'isolante dovuto alla sovratensione che il contatto stesso provoca); difficilmente riscontrabile con una verifica della resistenza d'isolamento; cause:
 - l'umidità
 - l'olio scadente o deteriorato, per esempio a causa verificare per un prolungato sovraccarico
 - la sporcizia o la presenza di corpi estranei.

- avarie nel circuito magnetico, in particolare rottura dell'isolamento dei bulloni di serraggio dei nuclei:
 - aumento delle correnti parassite nel nucleo, con conseguente aumento delle perdite e surriscaldamenti che possono provocare cortocircuiti negli avvolgimenti.

APPENDICE: Esempi di collegamenti tra fasi primarie e secondarie in un trasformatore trifase.

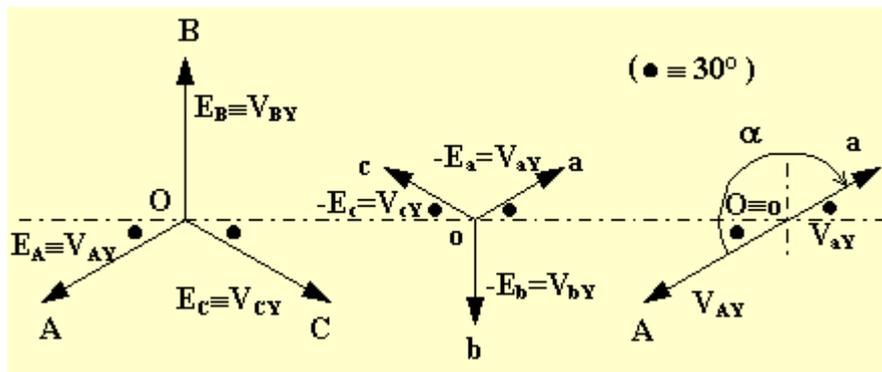
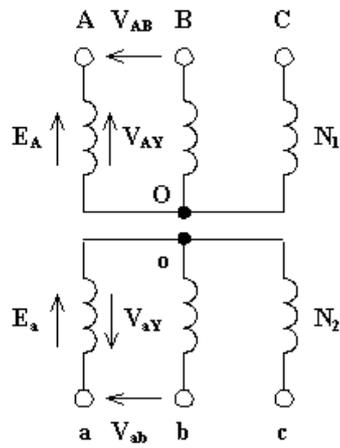
1) Yy0 (primario e secondario a stella)



Lo spostamento angolare vale $\alpha = 0^\circ$ e quindi il gruppo è lo 0.

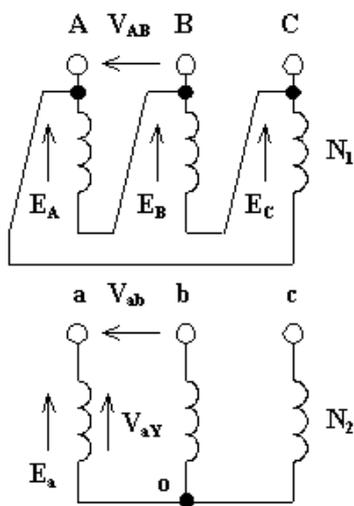
2) Yy6 (primario e secondario a stella, con la stella al secondario rovesciata)

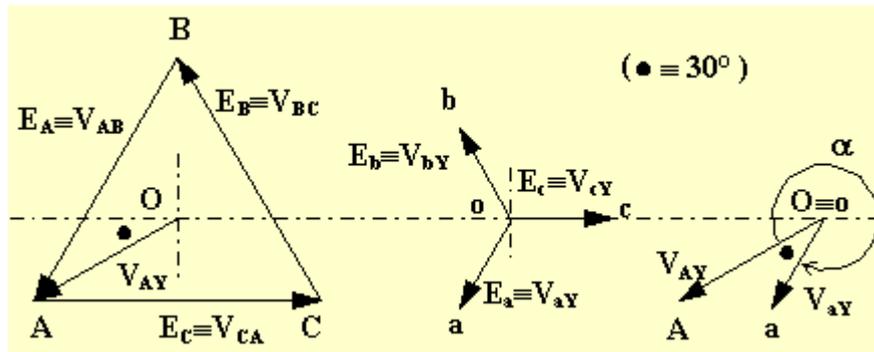
Questo collegamento si può pensare ottenuto dal precedente spostando il centro della stella al secondario dalla parte opposta delle bobine, oppure lasciando inalterato il centro della stella e cambiando il senso di avvolgimento delle bobine dal lato secondario rispetto al senso di avvolgimento delle bobine dal lato primario.



Lo spostamento angolare vale $\alpha = 180^\circ$ e quindi il gruppo è il 6.

2) Dv11 (primario a triangolo e secondario a stella)





Lo spostamento angolare vale $\alpha = 330^\circ$ e quindi il gruppo è l' 11.

LA MACCHINA IN CORRENTE CONTINUA

La macchina in corrente continua può funzionare indifferentemente come generatore (dinamo) o come motore (motore in continua). In genere è utilizzata come motore di piccola e media potenza in applicazioni particolari. Sulle navi, per esempio, il motore in corrente continua si impiega per l'avviamento dei gruppi elettrogeni di emergenza (DGE) mentre come dinamo si impiega nei telefoni magnetofonici e nel Megger, strumento per la misura della resistenza degli isolamenti negli impianti a media tensione.

La struttura della macchina in c.c. è costituita da un avvolgimento induttore allocato sullo statore ed un avvolgimento indotto allocato sul rotore. Sullo statore, realizzato in ferro massiccio (i campi sono statici, perché prodotti da corrente continua), si trovano le espansioni polari ed il relativo avvolgimento induttore. Solo le *scarpe polari* vengono a volte laminare: la rotazione del rotore con le relative cave provoca in questa zona una piccola variazione di flusso.

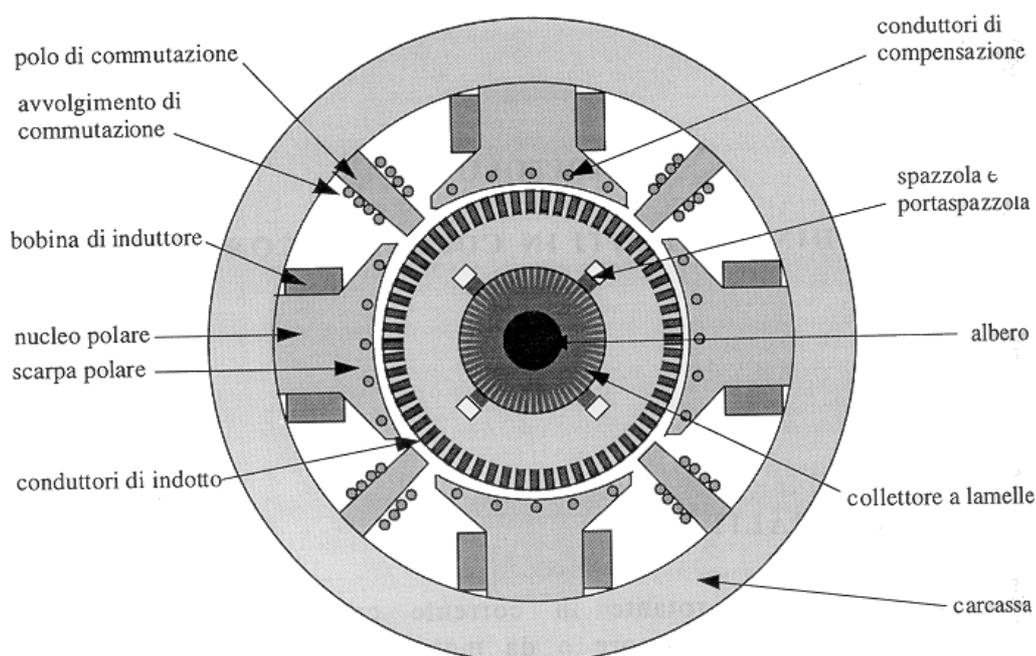


Fig. 2.1: Struttura di una macchina a corrente continua

Nelle macchine di potenza significativa sono presenti delle piccole espansioni polari sull'interasse tra due poli consecutivi: sono i poli di commutazione (o ausiliari). Nelle macchine di potenza più elevata sono anche presenti delle cave sulle scarpe polari in cui sono alloggiati gli avvolgimenti compensatori. Entrambi questi avvolgimenti sono percorsi dalla corrente di indotto.

I conduttori sul rotore sono connessi sulle testate realizzando delle matasse (spire) simili a quelle delle macchine sincrone. Le matasse sono poi connesse tra loro realizzando un

avvolgimento chiuso. Si accede dall'esterno a questi avvolgimenti chiusi con il *collettore a lamelle*.

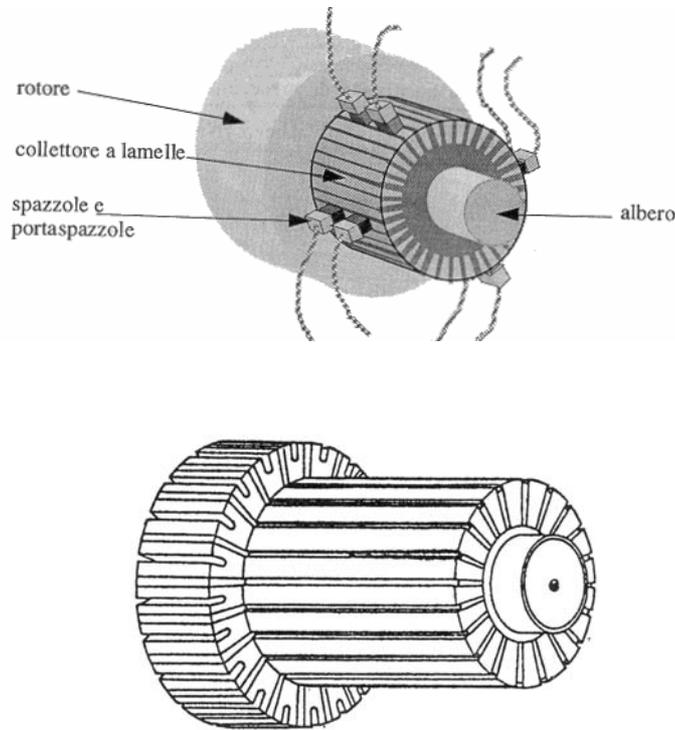


Fig. 2.2: Collettore a lamelle

Il collettore è un dispositivo meccanico montato sul rotore che *realizza la conversione delle tensioni e correnti alternate indotte sugli avvolgimenti rotorici in tensione e corrente continua*. È realizzato mediante una serie di lamelle di rame crudo isolate tra loro con la mica e connesse alle matasse degli avvolgimenti di indotto. Le lamelle sono connesse all'esterno mediante contatti striscianti realizzati con spazzole di metal grafite (due o più per un miglior contatto).

I valori nominali caratteristici (dati di targa) delle macchine in c.c. sono riportati in tabella:

P_n	Potenza nominale [W]
U_n	Tensione nominale [V]
I_n	Corrente nominale [A]
n_n	Velocità di rotazione nominale [giri/m]
C_n	Coppia nominale [Nm]

Il legame tra la potenza e le altre grandezze nominali è:

$$P_n = U_n I_n = C_n \frac{2\pi}{60} n_n \quad (6.1)$$

LA DINAMO

Principio di funzionamento

La dinamo è un generatore di corrente continua. La schematizzazione in figura rappresenta un sistema induttore bipolare entro il quale ruota, a velocità angolare Ω costante, il sistema indotto.

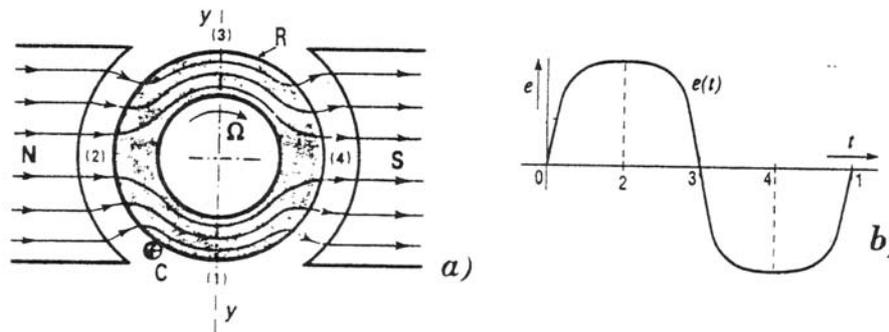


Fig. 2.3: Macchina a c.c. elementare: a) con indotto rotante; b) F.e.m. indotta alternata.

Quando il conduttore attivo C dell'indotto ruota all'interno del campo magnetico creato dallo statore, per la legge di Faraday-Lenz diventa sede di una f.e.m. indotta alternata che compie un periodo completo ad ogni giro del rotore e tale risulta quindi la tensione fra le due lamelle;

Il piano y-y, passante per le posizioni (1) e (3), ove il campo magnetico è nullo e la f.e.m. si inverte, prende il nome di piano neutro.

In pratica, si distribuiscono uniformemente nelle cave poste sulla periferia del rotore più conduttori attivi (matasse), opportunamente collegati fra di loro in modo da sommarne le f.e.m. indotte nei singoli conduttori, mentre il commutatore (contatti striscianti: spazzole-collettore a lamelle) è capace di prelevare una f.e.m. leggermente pulsante e riportarla su due morsetti esterni (+) e (-).

Ciascun conduttore attivo (matasse) viene saldato alla parte alta della lamella detta bandiera. Le spazzole sono solidali con lo statore.

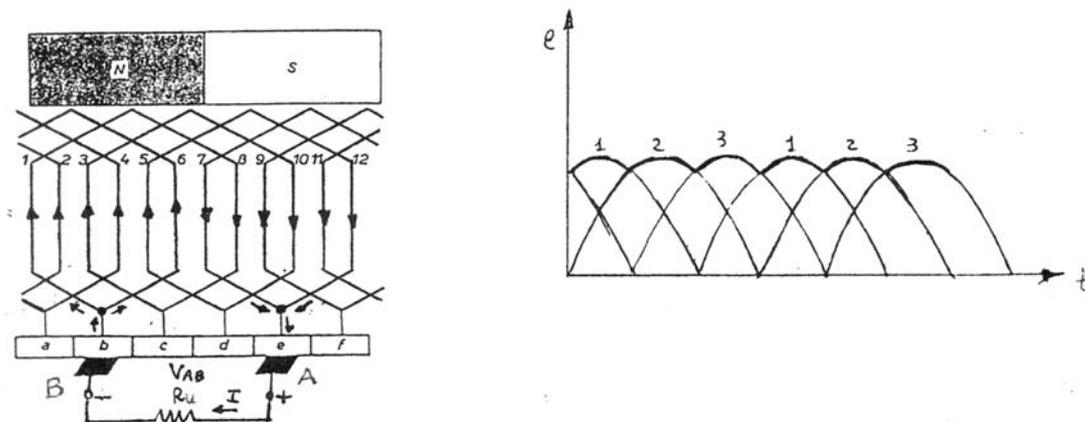


Fig. 2.4: Dinamo elementare: tensione ai capi delle spazzole

La tensione indotta nel funzionamento a vuoto può essere espressa dalla formula:

$$E = K_e \Phi_0 n \quad (6.2)$$

dove n è la velocità di rotazione in giri/min, Φ_0 è il flusso creato dagli avvolgimenti di eccitazione, proporzionale alla corrente di eccitazione, e K un coefficiente di proporzionalità.

La macchina in corrente continua nel funzionamento a carico presenta alcuni problemi caratteristici:

- la corrente d'indotto (sul rotore) crea un flusso magnetico che si somma al flusso dell'avvolgimento di eccitazione (quello sullo statore), modificando la tensione indotta sull'avvolgimento rotorico (*reazione d'indotto*); per porre rimedio a questo problema, nelle grandi macchine si usano gli avvolgimenti compensatori che, percorsi dalla stessa corrente d'indotto in uscita dalle spazzole, creano un ulteriore flusso che tende ad annullare quello creato dalla corrente sul rotore, cosicché il flusso totale rimane pari a quello dovuto all'avvolgimento di eccitazione;
- si possono verificare scariche tra lamelle e spazzole (scintillio al collettore); si pone rimedio a questo fenomeno spostando leggermente la posizione delle spazzole e/o con l'uso dei poli di commutazione.

Schemi elettrici della macchina in corrente continua

In questa macchina, sia la corrente di eccitazione che la corrente indotta in uscita dalle spazzole sono continue; i due circuiti (d'induttore e d'indotto) possono essere collegati opportunamente tra loro:

- macchina con eccitazione parallelo o derivata: i due circuiti sono in parallelo
- macchina con eccitazione serie: i due circuiti sono in serie
- macchina con eccitazione composta.

Nelle piccole dinamo dove il sistema induttore è costituito da un magnete permanente.

1) con eccitazione derivata

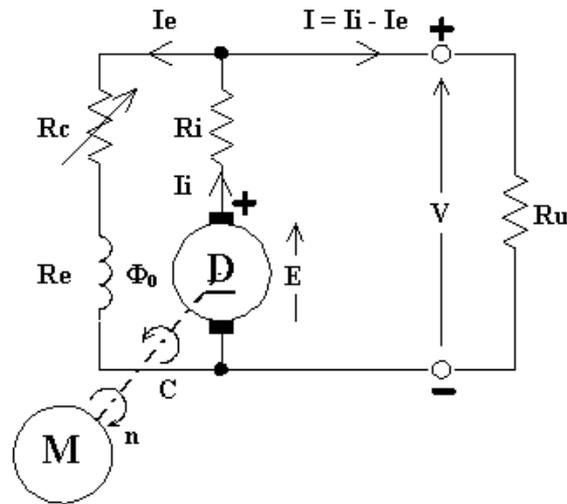


Fig. 2.5 – Schema elettrico di una dinamo con eccitazione derivata.

Se utilizzata come dinamo, la macchina ad eccitazione derivata può essere fatta partire a vuoto, senza erogare corrente all'esterno: inizialmente, anche in assenza di corrente di eccitazione c'è una piccola tensione indotta dovuta alla magnetizzazione residua dei poli; questa tensione fa circolare corrente nel circuito di eccitazione e la tensione indotta aumenta sino a raggiungere il valore nominale.

2) Con eccitazione serie

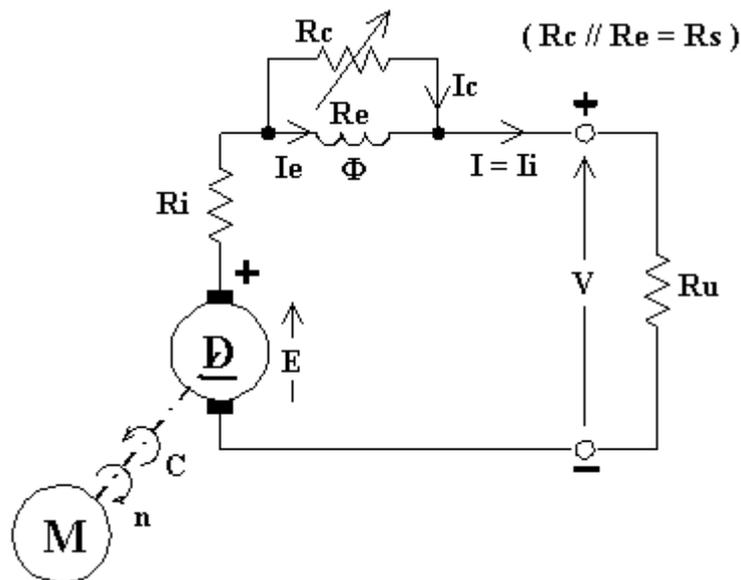


Fig. 2.6: – Schema elettrico di una dinamo con eccitazione serie.

Anche in questo caso la macchina può funzionare solo se in essa è presente un adeguato magnetismo residuo.

Per ridurre la tensione occorre diminuire R_c in modo tale che diminuisca la corrente di eccitazione I_e , viceversa per aumentare la tensione.

Al crescere della corrente erogata (cioè al variare della resistenza di carico da infinito a zero) cresce anche la corrente di eccitazione e, quindi, E_0 e, con essa, la tensione d'uscita V .

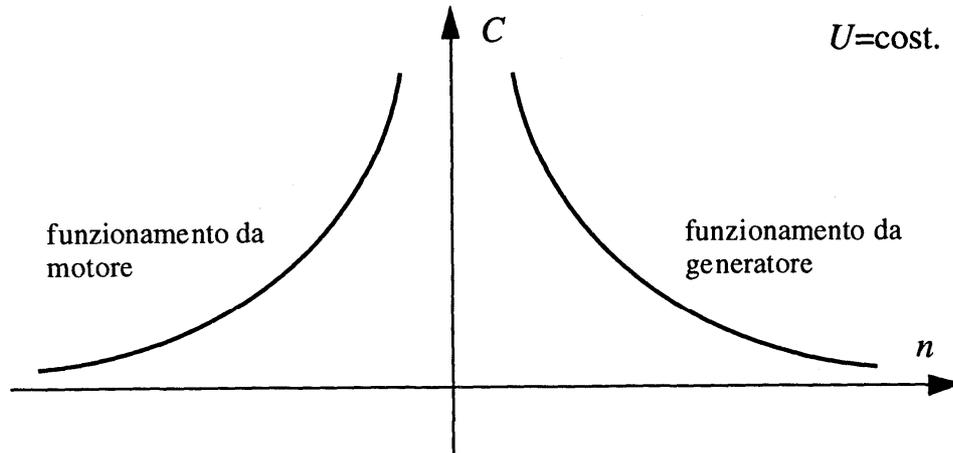


Fig. 2.7: Coppia in funzione della velocità in macchina con eccitazione serie

Data la caratteristica coppia-velocità di figura, la macchina ad eccitazione serie era molto usata per azionamenti a velocità variabile ed in trazione elettrica: quando un treno incontrava grandi pendenze ed aveva quindi bisogno di coppie elevate, il motore rallentava “naturalmente”; in piano, ove la coppia richiesta era bassa, il motore si portava invece a funzionare a velocità elevate; la potenza richiesta dal motore variava poco.

3) con eccitazione composta

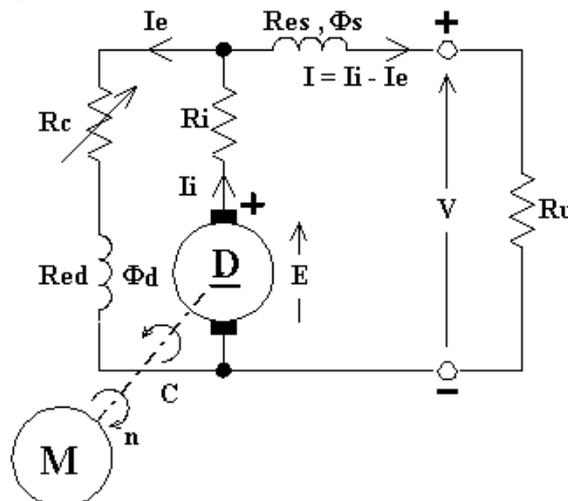


Fig. 2.8 – Schema elettrico di una dinamo con eccitazione composta.

Su ciascun polo induttore della dinamo vengono poste due bobine anziché una; la prima **Red** composta di molte spire di piccola sezione eccitata in derivazione, la seconda **Res** composta di poche spire di grande sezione eccitata in serie (è percorsa dalla stessa corrente assorbita dal carico).

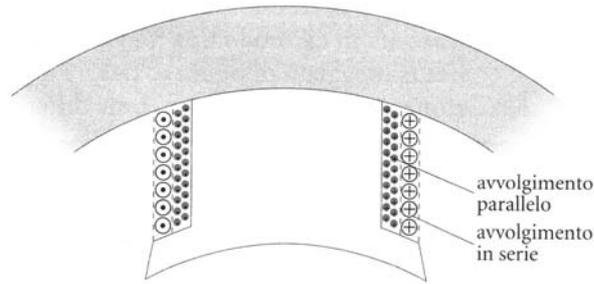


Fig.2.9 – Disposizione degli avvolgimenti induttori serie e parallelo sul polo.

Perdite e rendimento

P_m, perdite meccaniche per attrito e ventilazione;

P_{fe}, perdite nel ferro a vuoto; sono localizzate nell'indotto, interessato da un flusso variabile, e nelle testate delle espansioni polari;

P_{ec}, perdite per eccitazione, dovute all'effetto Joule negli avvolgimenti induttori e nel reostato di campo: **P_{ec} = (R_e + R_c)·I_e²** ;

P_j, perdite Joule negli avvolgimenti d'indotto: **P_j = R_i·I_i²** ;

P_s, perdite nelle spazzole;

P_{ad}, perdite addizionali; sono perdite nel ferro dell'indotto che si aggiungono a quelle a vuoto a causa della distorsione dovuta alla reazione d'indotto, pari all'1% della potenza nominale erogata.

Si definisce rendimento:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{V \cdot I}{V \cdot I + \sum \text{Perdite}}$$

P = V·I potenza elettrica erogata. **P_a** = potenza meccanica fornita dal motore primo. Il **η** massimo cade a 3/4 del pieno carico.

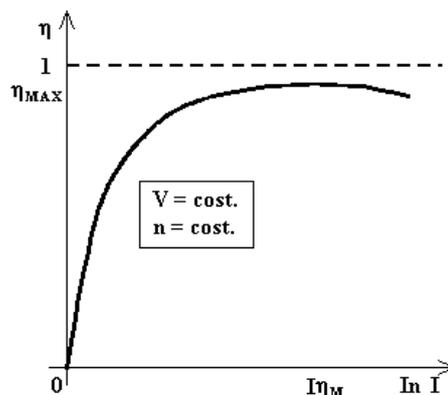


Fig.2.10 – Curva del rendimento della dinamo in funzione della corrente di carico.

IL MOTORE IN CORRENTE CONTINUA

Principio di funzionamento

La macchina in corrente continua, quando funziona come motore, inverte il senso della corrente che circola nell'indotto, così che la f.e.m. E è da intendersi come contro elettromotrice e la coppia elettromagnetica generata C è da intendersi come motrice.

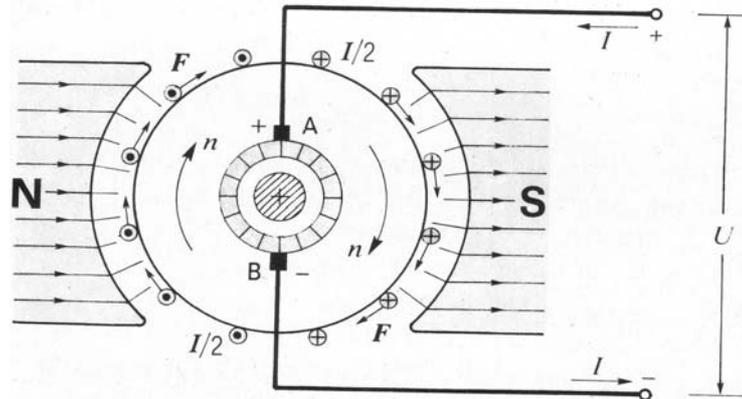


Fig.2.11 – Alimentazione del motore e distribuzione delle correnti nei conduttori d'indotto.

In ciascun conduttore attivo dell'avvolgimento indotto (quello rotorico), essendo percorso da corrente, nasce una forza $F = BLI$, quindi una coppia elementare che contribuisce alla nascita della coppia motrice risultante che assicura la rotazione del motore.

Il verso di rotazione del motore si inverte mediante l'inversione della corrente dell'indotto, oppure dell'induttore.

Perdite e rendimento

Il rendimento è dato dall'espressione:

$$\eta = P / P_a$$

dove $P_a = V \cdot I$ [W] è la potenza elettrica assorbita;

$P = P_a - \text{Perdite}$ [W] è la potenza meccanica utile sull'albero.

Le perdite sono le stesse della dinamo. Per avere un elevato rendimento è necessario che il motore lavori ad una velocità prossima a quella a vuoto e che la resistenza d'indotto sia notevolmente minore di quella del circuito d'eccitazione.

Avviamento

La corrente assorbita all'avviamento è molto elevata, in quanto limitata dalla sola resistenza d'indotto che è per sua natura molto piccola; tale corrente determina un'elevata coppia allo spunto che può dar luogo ad avviamenti eccessivamente bruschi.

Per ovviare a tali inconvenienti si dispone in serie all'indotto un **reostato di avviamento**, la cui resistenza viene progressivamente disinserita mano a mano che cresce, assieme alla velocità, la f.c.e.m. che provvede a limitare la corrente stessa. Il reostato deve essere del tutto escluso (cortocircuitato) ad avviamento completato, al fine di rendere massimo il rendimento.

La figura 6.11 mostra un avviamento mediante reostato, nel quale la coppia di spunto, col reostato inserito al massimo valore R_{A1} , vale C_{AV}^* mentre la velocità, ad avviamento completato e con il reostato cortocircuitato, vale n_n in corrispondenza di una coppia resistente Cr_n .

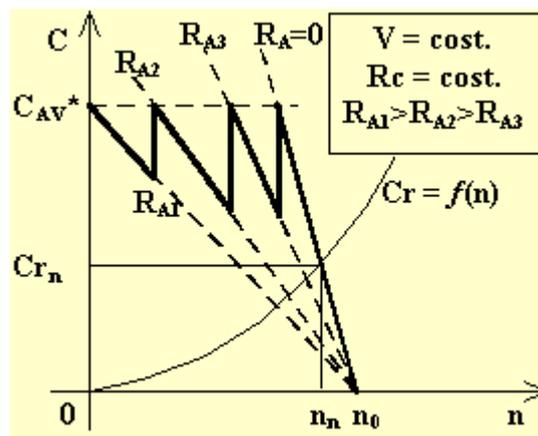


Fig.2.12 – Andamento della caratteristica meccanica del motore con eccitazione derivata avviato mediante reostato collegato in serie all'avvolgimento indotto.

Regolazione della velocità:

Si può ottenere o agendo sulla tensione di alimentazione (col reostato di campo costante) oppure sul reostato di campo (con tensione d'alimentazione costante).

IL MOTORE ASINCRONO TRIFASE

La quasi totalità dei motori elettrici trifase sono macchine asincrone; sulle navi essi sono ampiamente usati in un intervallo di potenze che va dalle poche decine di watt a qualche megawatt (thusters di manovra).

La macchina asincrona è chiamata anche *ad induzione*, perché le correnti sul rotore non provengono da una sorgente esterna in corrente continua, come nel caso della macchina sincrona, ma sono *indotte dalle correnti statoriche in maniera simile a quanto avviene tra primario e secondario in un trasformatore trifase*.

Sebbene in teoria l'asincrona sia una macchina reversibile, in pratica sono rarissime le sue applicazioni come generatore. Sulle navi a volte la troviamo nei sistemi di eccitazione brushless al posto dell'alternatore ausiliario (prende il nome improprio di trasformatore rotante).

Un motore asincrono ed i relativi simboli negli schemi impiantistici sono riportati in figura 3.1 e 3.2. rispettivamente.



Fig. 3.1: Un tipico motore asincrono

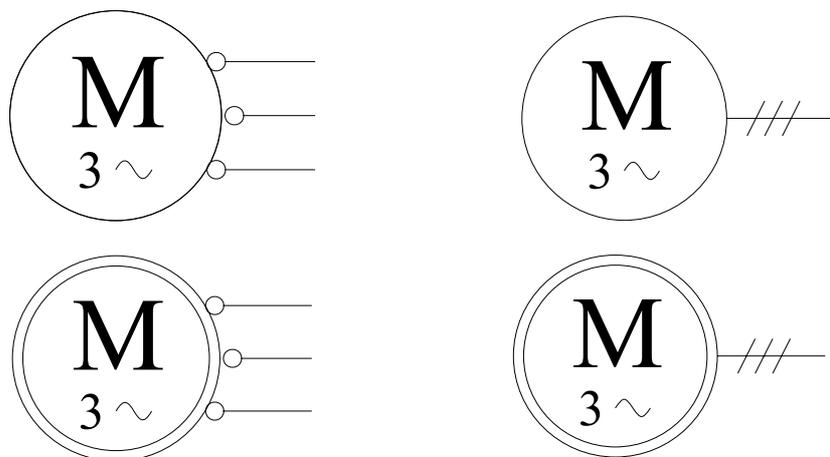


Fig. 3.2: Simbolo per gli schemi multifilari (sinistra) e unifilari (destra) di motori a gabbia (sopra) e a rotore avvolto (sotto)

Nella figura 3.3 è schematizzata una sezione trasversale di una macchina asincrona, costituita da una parte fissa, denominata *statore*, e da una rotante, denominata *rotore*.

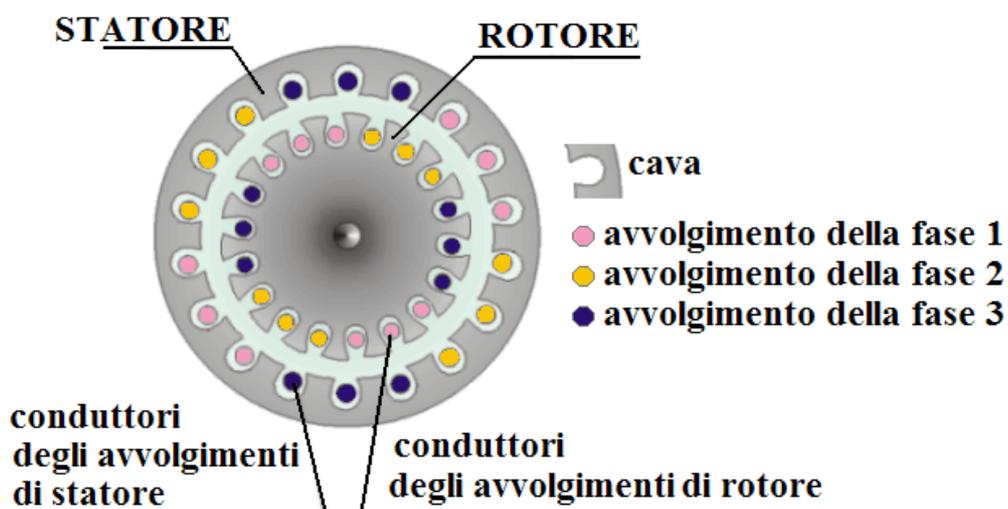


Fig. 3.3: Schematizzazione della sezione di un motore asincrono: i tre colori identificano le tre fasi

Statore e rotore sono costruiti con lamierini di materiale ferromagnetico.

Sulla superficie interna dello statore ed esterna del rotore sono presenti *cave* dove vengono alloggiati i conduttori, che per motori di elevata potenza sono piattine di rame opportunamente sagomate, mentre per motori di piccola potenza sono fili smaltati raccolti in gruppi di spire denominate *matasse*, come schematizzato nelle figure successive. Per

ciascuna fase, mediante collegamenti sulle testate, i conduttori nelle varie cave sono messi in serie a formare gli avvolgimenti.

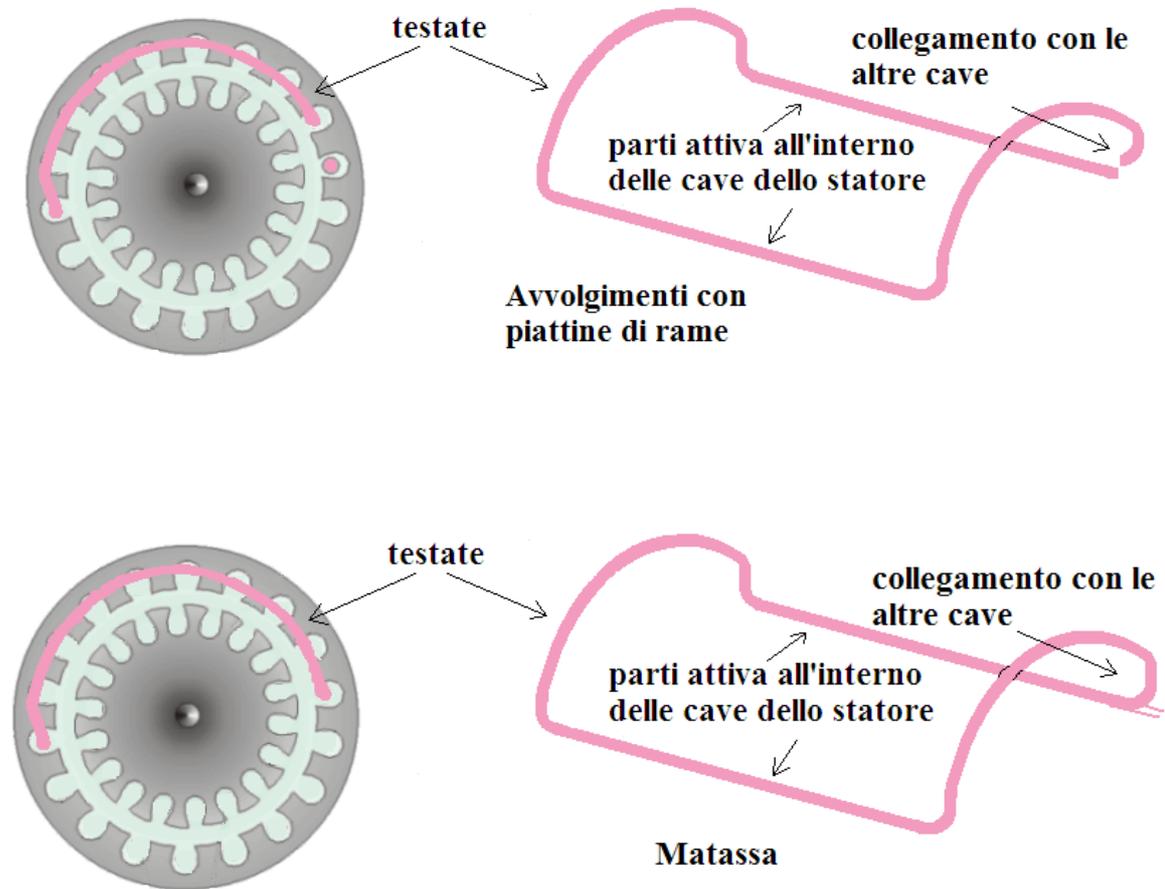


Fig. 3.4: Avvolgimenti di un asincrono per grandi potenze e per piccole potenze (in matasse)

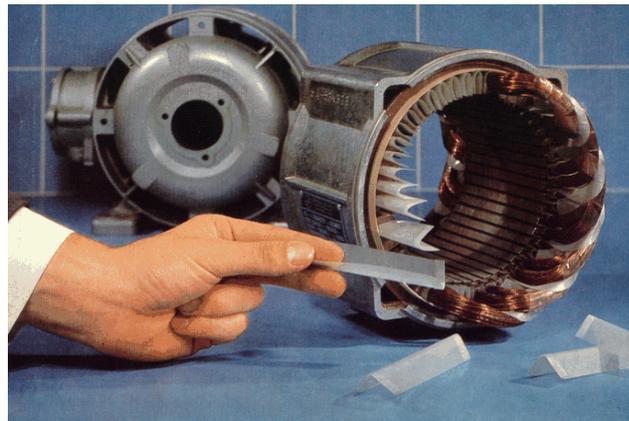
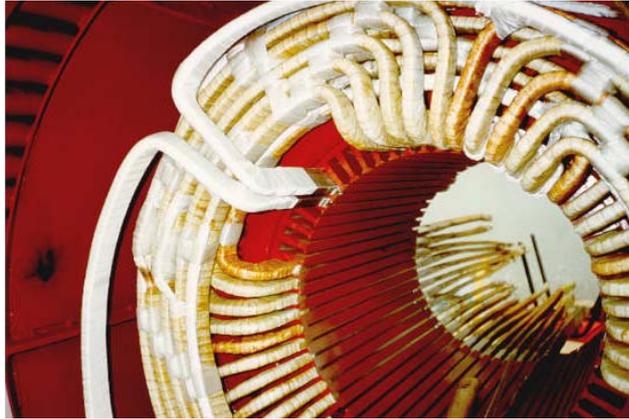


Fig. 3.5: Immagini di avvolgimenti per grande (sinistra) e piccola (destra, a matasse) potenza

Lo spazio in aria tra statore e rotore, necessario per permettere la rotazione di quest'ultimo, è detto *traferro*.

Principio di funzionamento

Consideriamo innanzitutto un avvolgimento statorico (fig. 3.6, sinistra): se non fosse per il fatto che è distribuito in cave e per la presenza del tra ferro tra rotore e statore, sarebbe del tutto simile all'avvolgimento di un trasformatore.

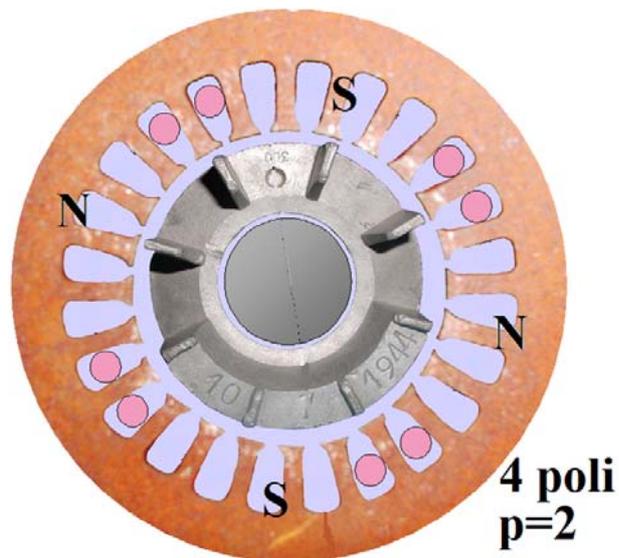
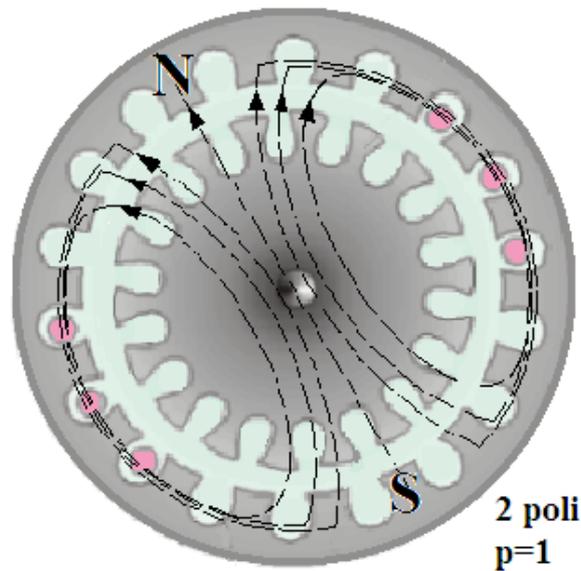


Fig. 3.6: Induzione magnetica creata dall'avvolgimento di una fase statorica: avvolgimenti a 2 e 4 poli

Un avvolgimento di questo tipo è *ad una coppia polare*. Il numero di coppie polari è indicato con p . Nella stessa figura, a destra, è riportato un avvolgimento *a 4 poli, due coppie polari*: si hanno quattro gruppi di cave per ogni fase, in cui la corrente è alternativamente entrante ed uscente dalla figura, in modo da formare 4 poli.

Fissiamo la nostra attenzione sul tipo più semplice, ad una coppia polare.

Se facciamo percorrere l'avvolgimento da corrente alternata avremo: l'intensità dell'induzione magnetica in ogni punto sarà massima quando la corrente avrà il valore massimo, si ridurrà a zero all'annullarsi della corrente, poi, cambiando il segno della corrente, i poli si invertiranno e così via: avremo un campo magnetico "pulsante".

Motore asincrono trifase

I tre avvolgimenti sono sfasati fra loro di 120° nello spazio. Supponiamo di farli percorrere da una terna trifase sinusoidale equilibrata di correnti (sfasate tra loro di 120°): i campi di induzione dei tre avvolgimenti interagiscono in modo tale che la loro somma dà origine ad un campo di induzione totale che ha ancora la forma di figura 2.6 (solo una volta e mezzo più intenso), ma anziché pulsare, manterrà costante il suo valore massimo e ruoterà ad una velocità dipendente dalla frequenza delle correnti (e, in generale, dal numero di coppie polari).

La situazione è schizzata in figura 3.7, dove il campo magnetico è “fotografato” in tre istanti successivi.

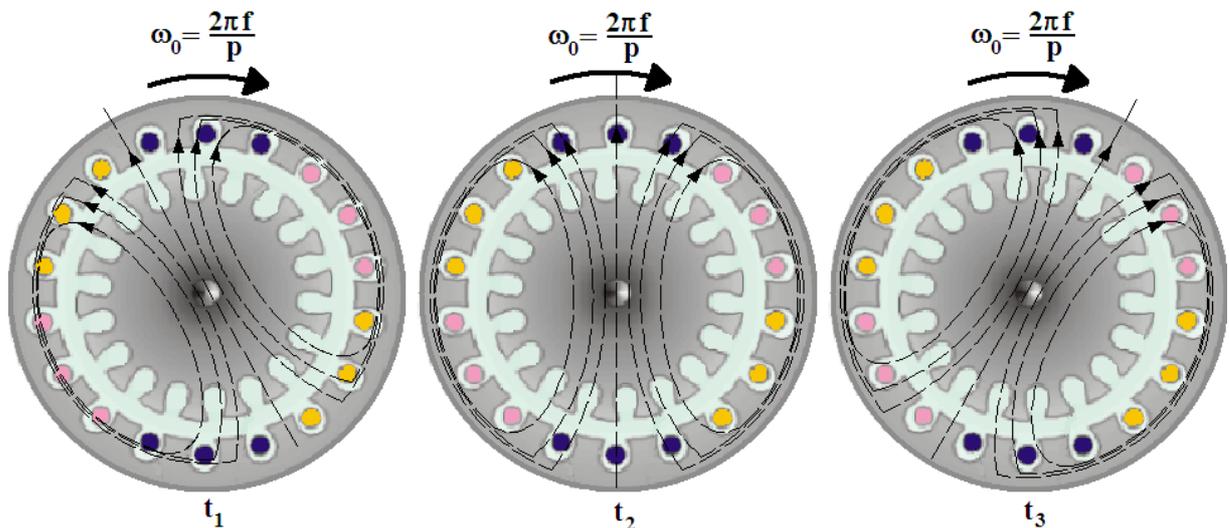


Fig. 3.7: Il campo d'induzione magnetica rotante

La velocità n_1 del campo di induzione magnetica rotante, detta *velocità di sincronismo*, è data dalla formula:

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \quad [g / l']$$

Oppure: $\omega_0 = 2\pi f/p$ (2.1)

Gli avvolgimenti rotorici, chiusi in cortocircuito, “vedono” un campo di induzione magnetica variabile per effetto della rotazione e pertanto, per la Legge di Faraday-Lenz risultano sede di tensioni indotte ed essendo chiusi, in essi possono circolare correnti che come in un trasformatore, richiamano correnti maggiori al primario, cioè sullo statore.

Inoltre, si generano delle forze elettrodinamiche $F = \mathbf{B} \mathbf{I}_2$ fra conduttori di rotore e statore che determinano una coppia motrice. Quest'ultima mette in movimento il rotore in

maniera tale da *opporsi* alla causa che ha determinato la variazione di flusso, cioè la velocità di rotazione del campo di induzione magnetica rispetto al rotore.

In altri termini, il rotore “si mette in rotazione per inseguire il campo di induzione magnetica”, quindi nello stesso senso di quest’ultimo. Non potrà però raggiungere la stessa velocità del campo, cioè *entrare in sincronia con quest’ultimo*, poiché in tal caso non ci sarebbe movimento relativo e quindi le correnti sul rotore si annullerebbero, annullando anche la coppia.

Mentre la velocità n_2 del rotore aumenta, le correnti su statore e rotore, la coppia ed anche la *frequenza delle correnti di rotore, che dipende dalla differenza fra velocità del campo di induzione magnetica rotante e rotore*, diminuiscono fino al raggiungimento di una velocità n alla quale la coppia agente sul rotore equilibra le perdite meccaniche e l’eventuale carico.

A regime, il rotore ruoterà quindi sempre ad una velocità *minore di quella di sincronismo*, da cui il nome “asincrono”.

Si introduce il concetto di:

- *scorrimento assoluto* $n_1 - n_2$;
- *scorrimento relativo* $s = (n_1 - n_2) / n_1$;
- *scorrimento relativo percentuale*: $s\% = 100 \cdot s$

Esempio: $s\% = 3 \%$ vuol dire il rotore perde 3 giri per ogni 100 del campo magnetico rotante statorico.

Il senso di rotazione dipende dalla sequenza delle correnti nelle fasi; se si scambiano fra loro due delle tre correnti che percorrono le fasi, il verso si inverte.

In una macchina asincrona lo statore è anche detto “induttore”, mentre il rotore è detto è anche “indotto”.

Un motore asincrono del tipo di questo esaminato si dice *a rotore avvolto* o *ad anelli*. I tre avvolgimenti sono sempre connessi fra loro a stella. Il capo non connesso al centro stella è collegato ad un sistema di anelli metallici e spazzole di metalgrafite (*collettore ad anelli*) che realizzano un contatto strisciante permettendo così di collegare in serie agli avvolgimenti rotorici una terna di resistori variabili (figura 3.9).

In questo caso il reostato trifase (tre reostati connessi a stella) è detto *di avviamento* perché viene inserito in serie all’avvolgimento di rotore in fase di avviamento.

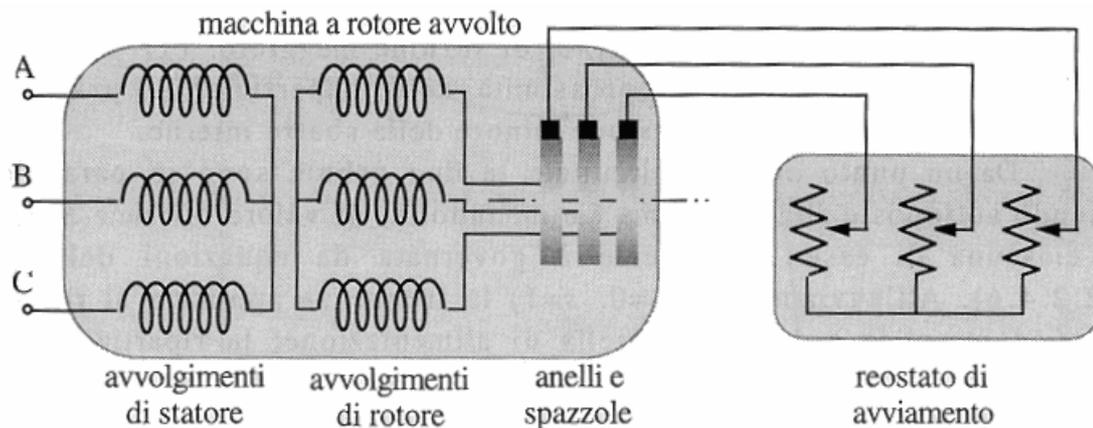


Fig. 3.8: Schema dei collegamenti in un motore trifase a rotore avvolto

Esiste un'altra tipologia costruttiva per il rotore: *esso può essere realizzato con un insieme di sbarre, normalmente di alluminio, cortocircuitate alle estremità mediante anelli* (figure 3.9, dove è visualizzata la sola gabbia di scoiattolo, e 3.10 dove si vede una sezione trasversale del rotore, con due tipi di gabbia differenti).

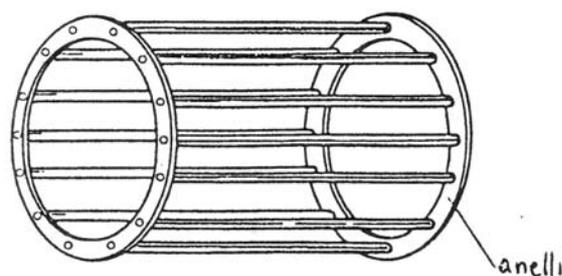


Fig. 3.9: Gabbia di scoiattolo

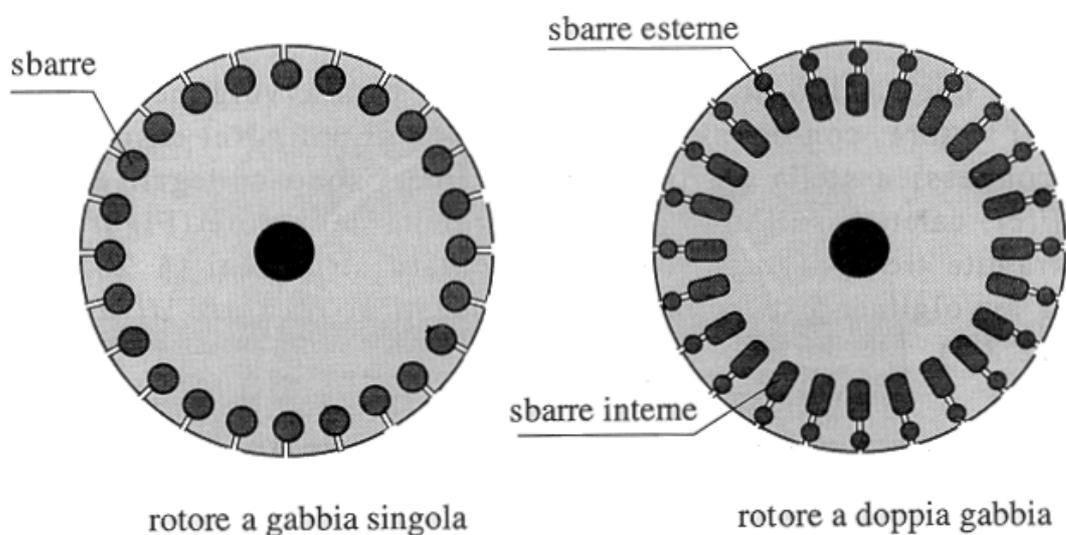


Fig. 3.10: Sezione del rotore di un motore a gabbia singola e a doppia gabbia

Il funzionamento è del tutto analogo a quello del rotore avvolto, *ma la realizzazione è molto più semplice ed economica*: si “impaccano” i lamierini a formare il rotore e poi si inietta dentro le cave alluminio fuso in pressione (gabbia realizzata in *pressofusione di alluminio*); per macchine di grande potenza si usano sbarre di rame. In tal caso, si parla di *motore a gabbia di scoiattolo*.

Dati di targa

I dati nominali di un motore asincrono sono riassunti nella tabella che segue.

P_n	Potenza nominale [W]
U_n	Tensione nominale [V]
I_n	Corrente nominale [A]
$\cos\varphi_n$	Fattore di potenza nominale
f_n	Frequenza nominale [Hz]
n_n	Velocità nominale di rotazione [giri/min]
C_n	Coppia nominale all'albero [Nm]
s_n	Scorrimento nominale [% o assoluto]
η_n	Rendimento nominale [% o assoluto]

Potenze e rendimento convenzionale

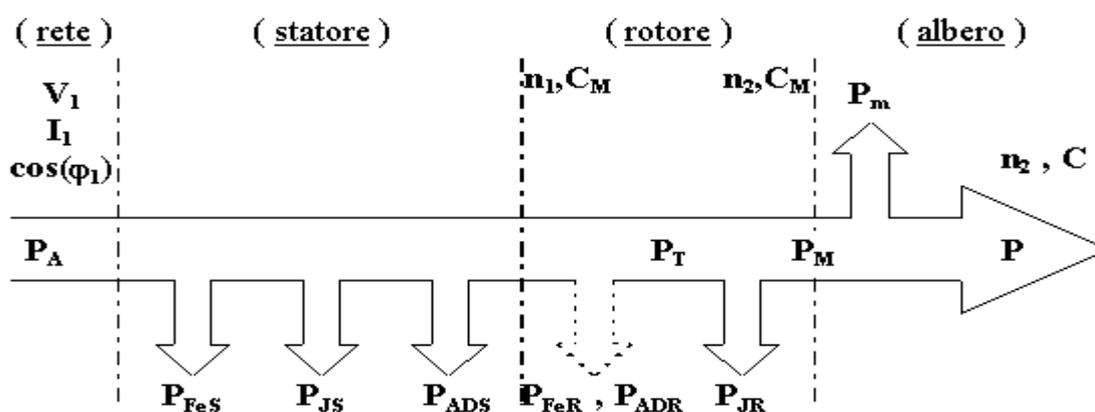


Fig. 3.11 - Diagramma di flusso delle potenze nel motore

La Fig. 3.11 rappresenta il diagramma di flusso delle potenze nel motore, a partire dalla potenza elettrica assorbita P_A fino alla potenza meccanica utile P erogata all'albero.

- Potenza elettrica assorbita: $P_A = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)$ [W]

- Perdite nel ferro di statore: $P_{FeS} [W]$

Le perdite nel ferro di rotore sono trascurabili a regime, o a vuoto, essendo piccolissime le frequenze rotoriche: $f_2 = s \cdot f_1$

- Perdite nel rame di statore $P_{JS} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 [W]$, dove R_1 è la resistenza ohmica di una fase statorica.
- Perdite addizionali: $P_{AD} = 0,5\% P_A$
- Potenza trasmessa al rotore: $P_T = P_A - P_{FeS} - P_{JS} - P_{ADS} = P + P_m + P_{JR}$
- Perdite nel rame di rotore: $P_{JR} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = P_T - P_M = s \cdot P_T [W]$
- Potenza meccanica generata: $P_M = P + P_m = P_T - P_{JR} = P_T \cdot (1-s) [W]$
- Perdite meccaniche: $P_m [W]$ dipendono dalla velocità.
- Potenza meccanica utile: $P = P_M - P_m [W]$ è la potenza meccanica resa all'asse dal motore.
- Potenza nominale: $P_n [W]$ è la potenza meccanica utile in condizioni nominali di funzionamento (dato di targa).
- Rendimento convenzionale:

$$\eta_c = \frac{P}{P_A} = \frac{P}{P + P_{FeS} + P_{JS} + P_{AD} + P_{JR} + P_m}$$

Osservazione : le perdite nel ferro e le perdite meccaniche rimangono costanti al variare del carico; le perdite per effetto joule negli avvolgimenti e le perdite addizionali, invece, dipendono dal carico e perciò variano con esso.

Nelle tabelle che seguono sono riportate alcune velocità di sincronismo in giri/min (al variare del numero di coppie polari) ed alcuni range “tipici” indicativi per i dati nominali, al variare della potenza. In particolare, il fattore di potenza $\cos\phi$ è sempre induttivo, di ritardo: un impianto con molti motori asincroni può necessitare di rifasamento.

	$p=1$	$p=2$	$p=3$	$p=4$	$p=5$
$f=50 \text{ Hz}$	3000	1500	1000	750	600
$f=60 \text{ Hz}$	3600	1800	1200	900	620

P_n	$n_n (p=1)$	η_n	$\text{Cos}(\phi_n)$	V_n	I_s / I_n
0.1 kW ÷ 1 kW	2800 ÷ 2850	0.65 ÷ 0.75	0.65 ÷ 0.8	400 V	3 -5
1 kW ÷ 100 kW	2900 ÷ 2970	0.8 ÷ 0.95	0.8 ÷ 0.9	400 V, 690 V	6 -10
0.1 MW ÷ 10 MW	oltre 2970	Oltre 0.95	Oltre 0.9	400 V, 690 V, 3 ÷ 10 kV	8 -10

I_s è la corrente che il motore assorbe allo spunto, cioè quando si avvia.

Curva caratteristica meccanica del motore asincrono

Nelle figure che seguono si vede come variano la coppia motrice e la corrente assorbita in funzione della velocità del motore.

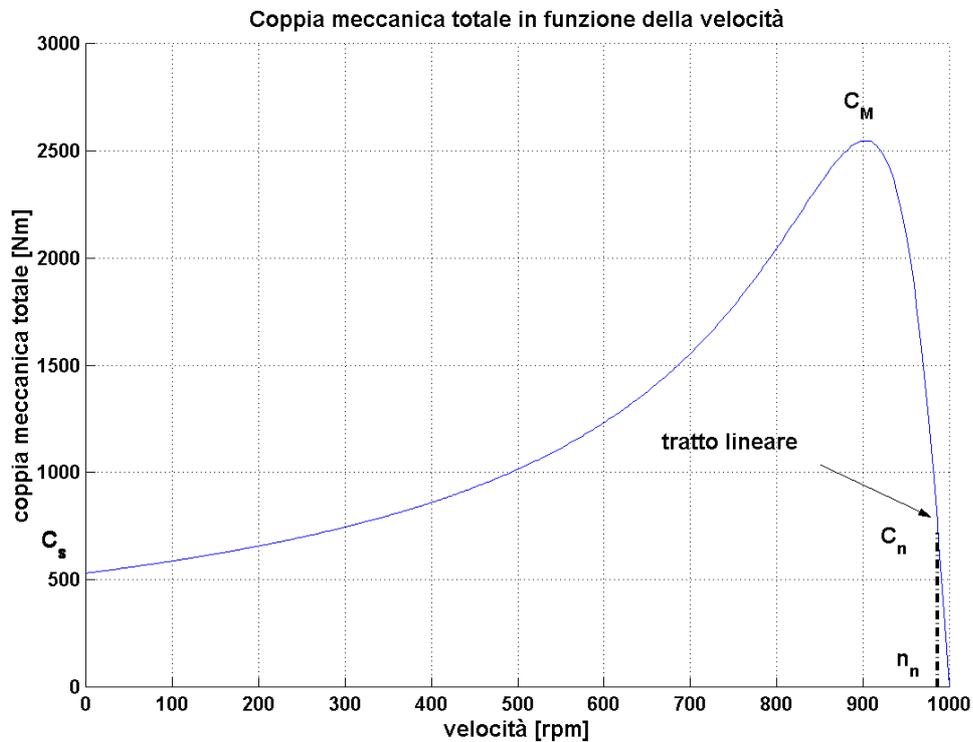


Fig. 3.12: Andamento della coppia meccanica del motore asincrono trifase a gabbia semplice o a rotore avvolto in funzione della velocità

Nel grafico la coppia meccanica è definita "totale" perché è quella corrispondente alla potenza convertita in meccanica; per ottenere la coppia utile all'albero, occorre sottrarre la frazione di coppia relativa alle perdite per attrito e ventilazione.

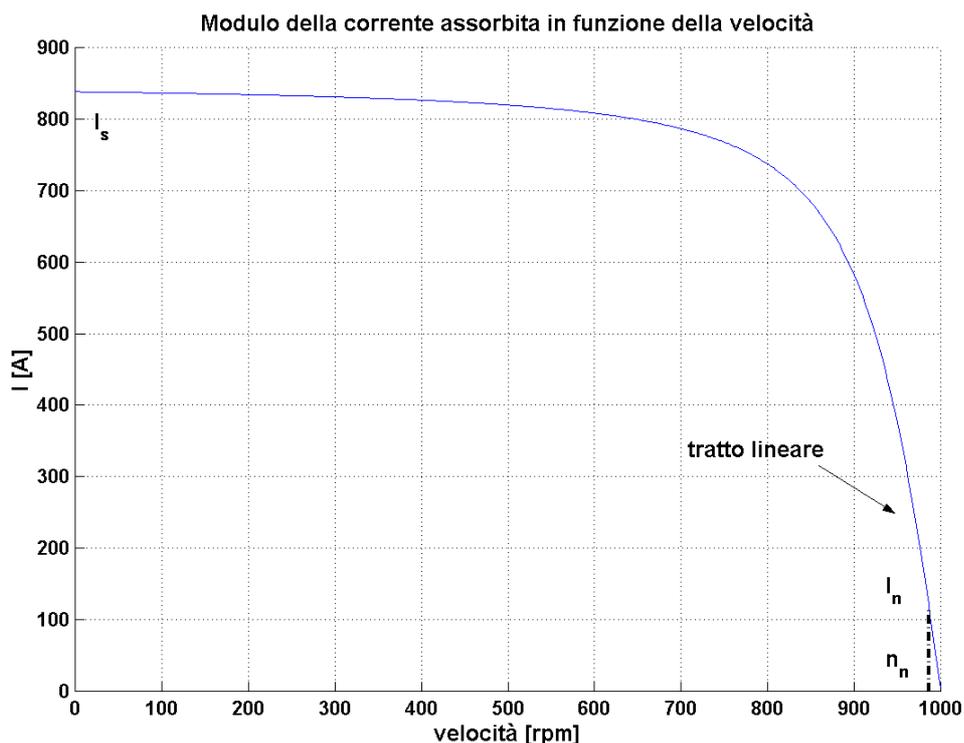


Fig. 3.13: Andamento della corrente assorbita in funzione della velocità

I valori “fondamentali”, oltre a quelli nominali, e le osservazioni importanti sono:

- *la coppia di spunto C_s , a velocità nulla, che deve superare la coppia del carico meccanico allo spunto affinché il motore si avvii*
- *la corrente di spunto I_s , che come si vede è molto elevata: 6-8, a volte 10 volte la corrente nominale; questo è uno dei principali problemi del motore asincrono*
- *la coppia massima C_M che si ottiene in corrispondenza di un valore di scorrimento indicato con s_M*
- *accoppiato ad un carico, il motore sarà chiamato ad erogare una coppia compresa tra 0 e la coppia nominale (non si può superare questo valore, altrimenti lo si sovraccarica); il punto di funzionamento sarà determinato dall'intersezione fra la curva di coppia motrice del motore e quella di coppia resistente del carico*
- *tenendo conto che n_n è vicinissima a n_l , che dipende dal numero di poli del motore e dalla frequenza di alimentazione e fissati questi parametri non è modificabile, il motore non si presta alla regolazione di velocità*
- *la curva di coppia dipende dal quadrato della tensione: se ad es. la tensione di alimentazione si abbassa del 10%, la curva di coppia si abbassa in ogni suo punto di circa il 20%*
- *il tratto di funzionamento stabile del motore è quello che va dall'origine (funzionamento a vuoto) allo scorrimento di massima coppia, cioè il tratto lineare della curva caratteristica*
- *il corretto dimensionamento del motore deve prevedere una coppia nominale C_n inferiore a $C_{MAX}/2$; così la macchina è in grado di far fronte a temporanei sovraccarichi (aumenti della coppia resistente) perfino superiori al 100%.*

Come si vede dal grafico della coppia, per motori a gabbia semplice o a rotore avvolto, *la coppia di spunto è piuttosto bassa*. Con una curva di coppia di questo genere è facile che si verifichi la situazione di figura 2.14, dove alla curva di coppia motrice del motore abbiamo sovrapposto quella resistente di un ipotetico carico meccanico.

Si può notare che benché esista un punto di funzionamento a velocità leggermente maggiore della nominale con coppia inferiore alla nominale, in *realtà il motore non si avvia perché la sua coppia di spunto è inferiore a quella del carico*. L'unica soluzione sarebbe quella di usare un organo meccanico, ad esempio una frizione, o un altro sistema, che permetta al motore di avviarsi a vuoto, per poi collegare il carico quando il rotore ha raggiunto una velocità prossima alla nominale.

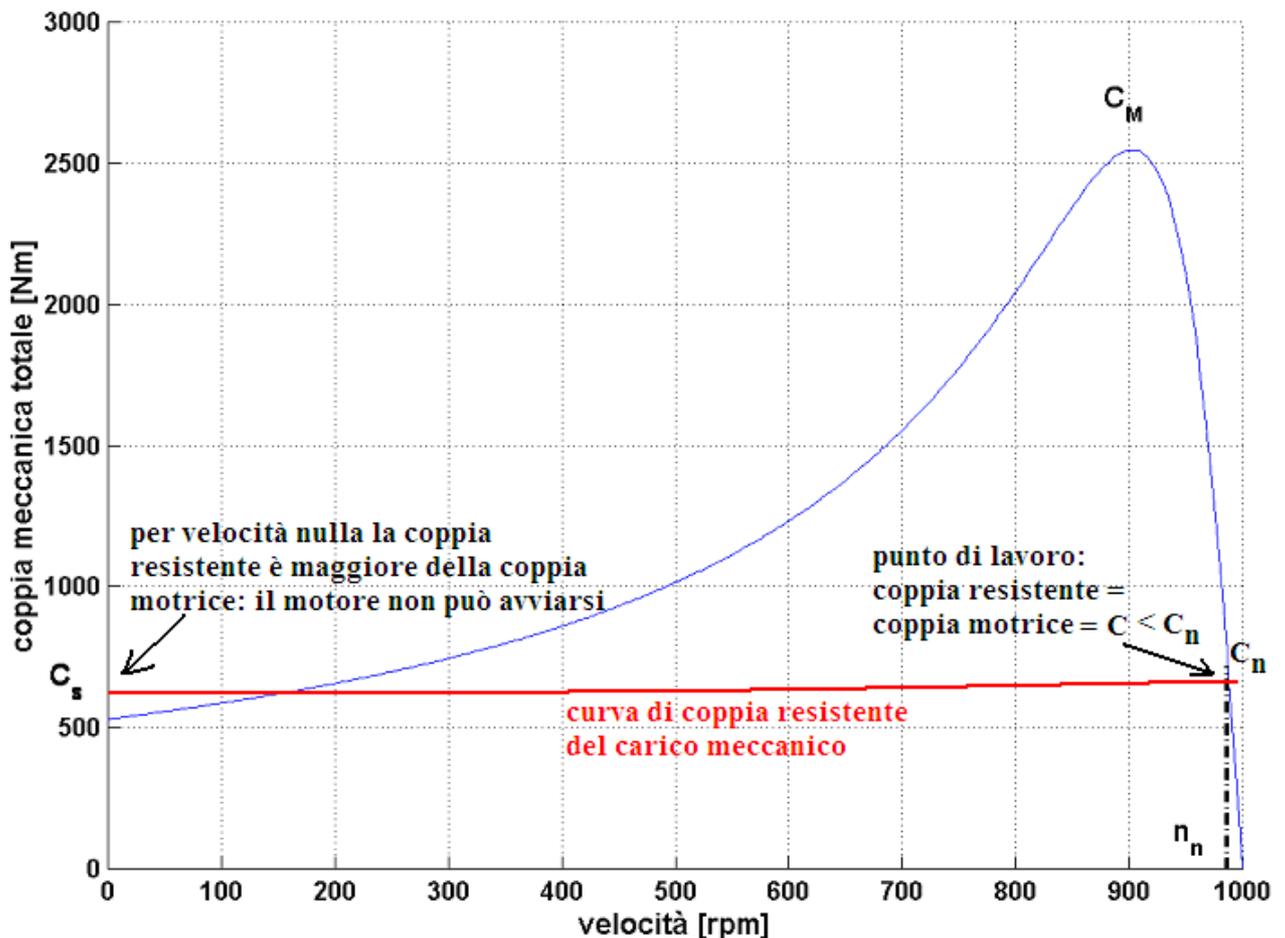


Fig. 3.14: Accoppiamento motore carico non in grado di avviarsi

Supponiamo che il motore sia ad anelli, cioè con rotore avvolto; si può dimostrare che, aumentando "artificialmente" la resistenza rotorica mediante il reostato, la curva di coppia del motore varia come indicato in figura 3.15:

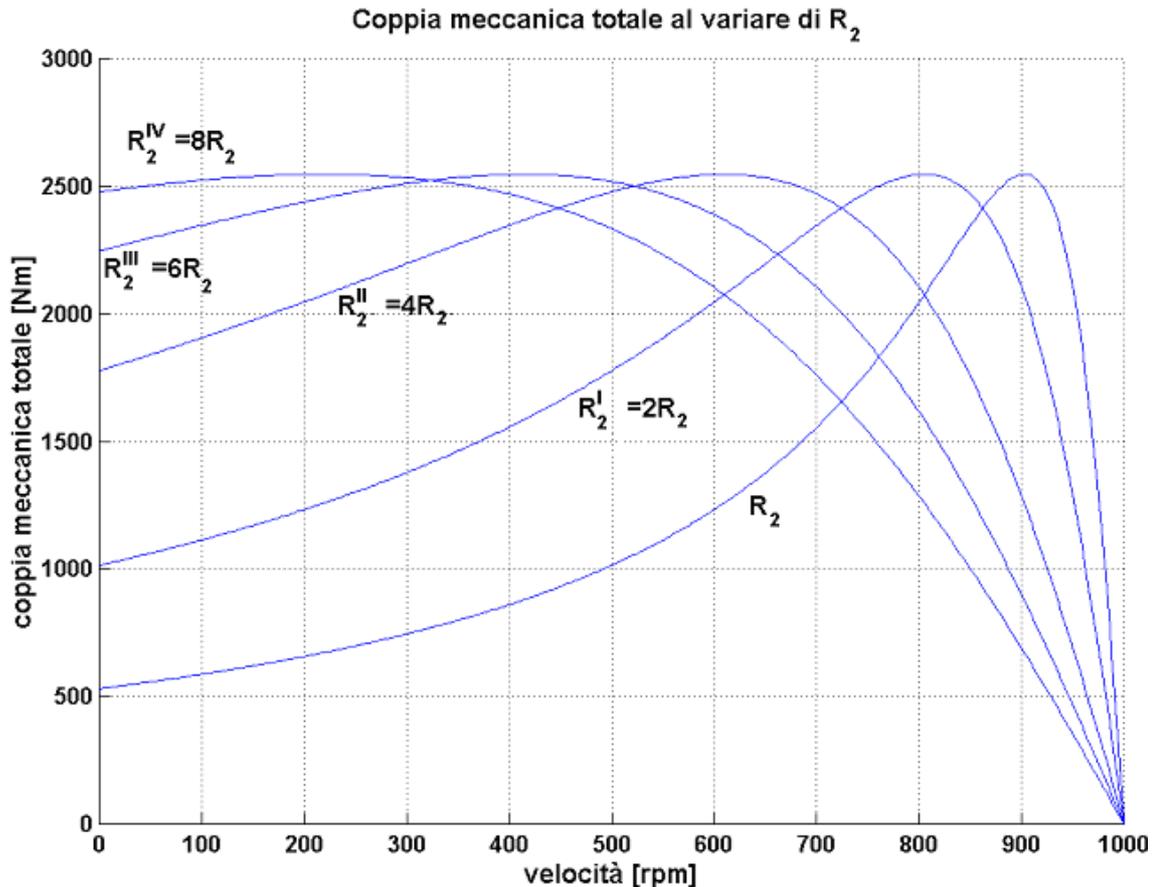


Fig. 3.15: Caratteristiche di coppia al variare della resistenza rotorica (R_2 senza apici: valore “naturale” del motore)

Con valori alti della resistenza rotorica otteniamo coppie di spunto molto elevate; la coppia massima si sposta a sinistra senza variare apprezzabilmente; esiste un valore di resistenza rotorica per cui allo spunto si ha proprio la coppia massima.

All'avviamento il reostato è tutto inserito; una volta raggiunta una velocità sufficiente, le resistenze vanno diminuite fino ad essere escluse totalmente: in caso contrario, la velocità di lavoro sarebbe molto bassa ed inoltre il rendimento del motore sarebbe molto basso: si avrebbero perdite inutili.

Anche nei motori a doppia gabbia si verifica qualcosa del genere, come mostra la figura 3.16. Si può immaginare che le due gabbie diano luogo a due curve di coppia che, sommate, determinano la coppia offerta dal motore. *La gabbia esterna ha una resistenza molto elevata*, in quanto la sezione è piccola: darà luogo ad una curva di coppia del tipo di quella ottenuta dal motore precedente con R_2^{IV} ; *la gabbia interna ha una resistenza bassa* e dà luogo ad una coppia del tipo di quella di un motore a semplice gabbia; la somma porta ad una caratteristica del tipo di quella di figura 2.16:

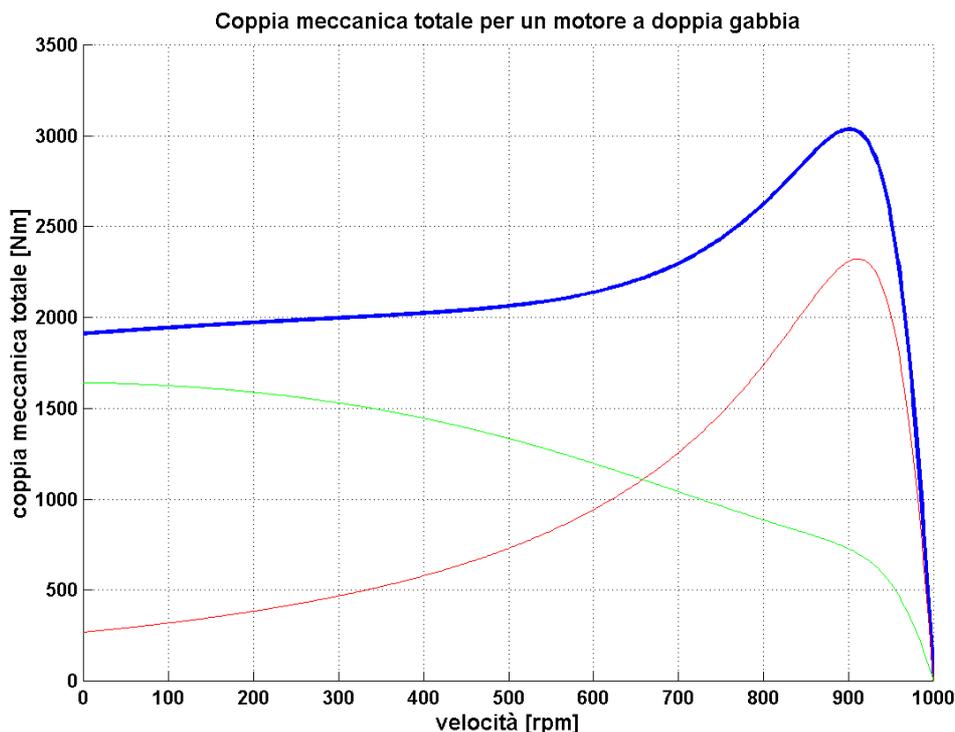


Fig. 3.16: Caratteristica di coppia di un motore a doppia gabbia

Si può dimostrare che la gabbia esterna “conta” all’avviamento, determinando una elevata coppia di spunto, mentre a velocità prossime alla nominale “conta” praticamente soltanto quella interna: ad avviamento concluso il funzionamento è quello di un motore a singola gabbia con R_2 piccola, quindi il rendimento è elevato.

Se il motore è di media o grande potenza, la corrente di spunto può dare grossi problemi:

- *possibilità di cali di tensione in linea troppo elevati* (se la linea è dimensionata per la corrente nominale, ma durante l’avviamento la corrente stessa è, per esempio, 8 volte più elevata, anche la caduta di tensione in linea sarà 8 volte più elevata rispetto alla nominale; ciò causa abbassamenti della luce delle lampade, e può dare problemi ad eventuali apparati elettronici o ad altri motori asincroni collegati allo stesso impianto; *in casi limite si può avere una caduta così forte da far ridurre la tensione – e quindi la coppia motrice, che dipende del quadrato della tensione di alimentazione – a tal punto da rendere impossibile l’avviamento del motore stesso.*
- *possibilità di interventi intempestivi delle protezioni a massima corrente*: se la corrente è superiore alla corrente nominale per un tempo sufficiente, possono intervenire le protezioni (relè termico o fusibile), causando la disalimentazione di tutto l’impianto, a fronte di un guasto inesistente.

Questo problema può essere particolarmente grave su una nave, il cui sistema elettrico è di limitata estensione e potenza. L’avviamento di un grosso asincrono può provocare notevoli problemi ai generatori elettrici che alimentano l’impianto, compreso il blackout con conseguenti gravi disservizi.

L'ideale sarebbe trovare un metodo che contemporaneamente permetta di ridurre la corrente di spunto e di aumentare la coppia di spunto; *l'unico metodo che consente di risolvere contemporaneamente i due problemi è quello che si basa sulle resistenze addizionali*: si può vedere che aumentando R_2 la corrente assorbita all'avviamento si riduce. Questo metodo è applicabile solo per il motore con rotore avvolto, cioè ad anelli.

I motori asincroni possono essere avviati a piena tensione, se di piccola potenza, oppure a tensione ridotta, se di media o grande potenza. In tal caso, *insieme alla corrente, purtroppo si riduce anche la coppia di spunto*.

1) Avviamento a piena tensione di linea

All'avviamento ($s=1$) si ha negli avvolgimenti rotorici la stessa frequenza degli avvolgimenti statorici ($f_2 = s f_1$) ed una perfetta analogia col trasformatore in cortocircuito.

Nel caso di un motore a gabbia, tutto questo determina l'assorbimento di una corrente molto più grande di quella nominale, con un bassissimo fattore di potenza.

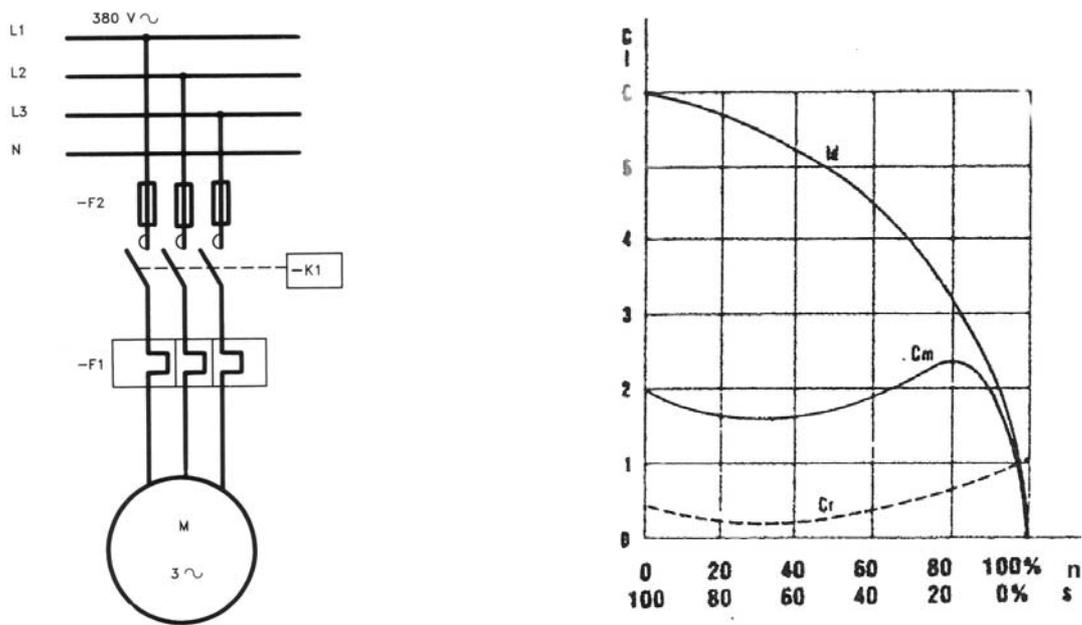


Fig. 3.17 – Avviamento a piena tensione: a) Schema di potenza; b) Diagramma della coppia e della corrente in funzione del numero di giri e dello scorrimento.

Per tali motivi, l'avviamento a piena tensione, specie se il motore è di media o grande potenza, provoca forti cadute di tensione nella rete di distribuzione cui esso è allacciato con serie conseguenza anche sugli altri motori in funzione.

2) Sistemi di avviamento a tensione ridotta

I metodi “classici” di avviamento a tensione ridotta sono:

- *si inseriscono in serie all'avvolgimento statorico del motore delle reattanze induttive* che sommandosi alle impedenze di fase riducono la corrente assorbita dalla rete; se la caduta di tensione provocata dalle reattanze riduce la tensione ai morsetti del motore di un fattore k , la corrente assorbita dal motore è ridotta di k e la coppia di spunto si riduce di k^2 ; le reattanze sono preferibili alle resistenze per evitare inutili dissipazioni di potenza; esse vengono escluse (eventualmente in maniera progressiva) ad avviamento avvenuto
- *si usa un autotrasformatore di avviamento*: si alimenta il motore con un autotrasformatore trifase che ne riduce la tensione ai morsetti; se la tensione è ridotta di un fattore k , la corrente assorbita dal motore è ridotta di k e la corrente assorbita al primario dell'autotrasformatore è ridotta di un fattore k^2 per effetto del rapporto di trasformazione; anche la coppia di spunto si riduce di k^2 ; un sistema automatico o manuale di collegamenti lo esclude ad avviamento avvenuto; utilizzato per motori di grande potenza.
- sistemi soft-starter: si tratta di dispositivi basati sull'elettronica di potenza, che permettono di variare la velocità dei motori con continuità al variare della frequenza della tensione di alimentazione del motore.
- avviamento con commutazione stella – triangolo.

Per realizzare l'avviamento stella – triangolo è necessario avere a disposizione un motore che, anziché avere il collegamento cablato al suo interno, *rende accessibili sulla morsettiera i 2 capi di ciascuna delle 3 fasi mediante 6 morsetti*, in modo che il collegamento stesso possa essere cambiato dall'esterno.

Le tre fasi di alimentazione vengono dette normalmente L_1 , L_2 ed L_3 oppure R , S , T . I morsetti del motore vengono chiamati U_1 , V_1 , W_1 e U_2 , V_2 , W_2 .

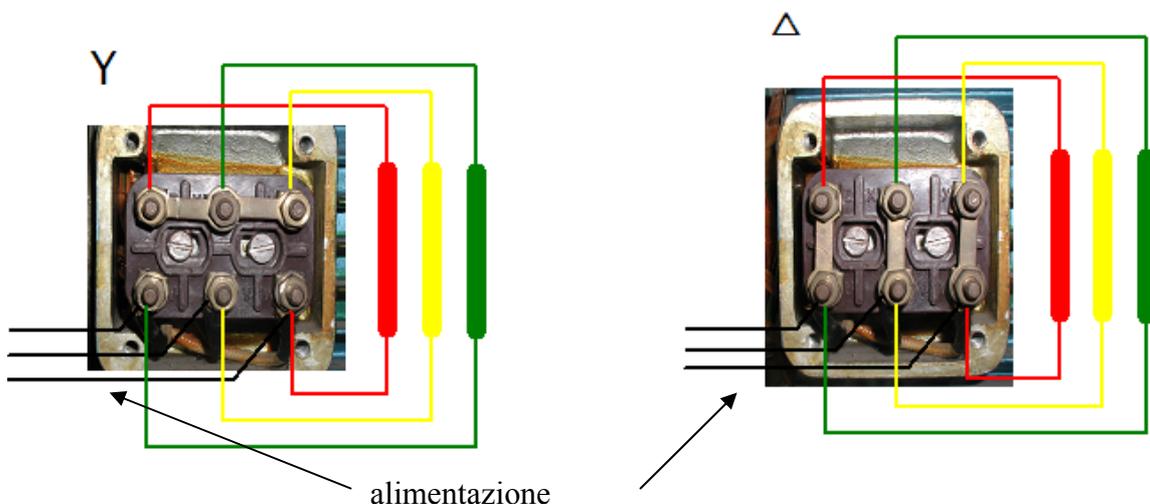


Fig. 3.18: Morsettiera con i due possibili collegamenti realizzate con apposite piastrelle

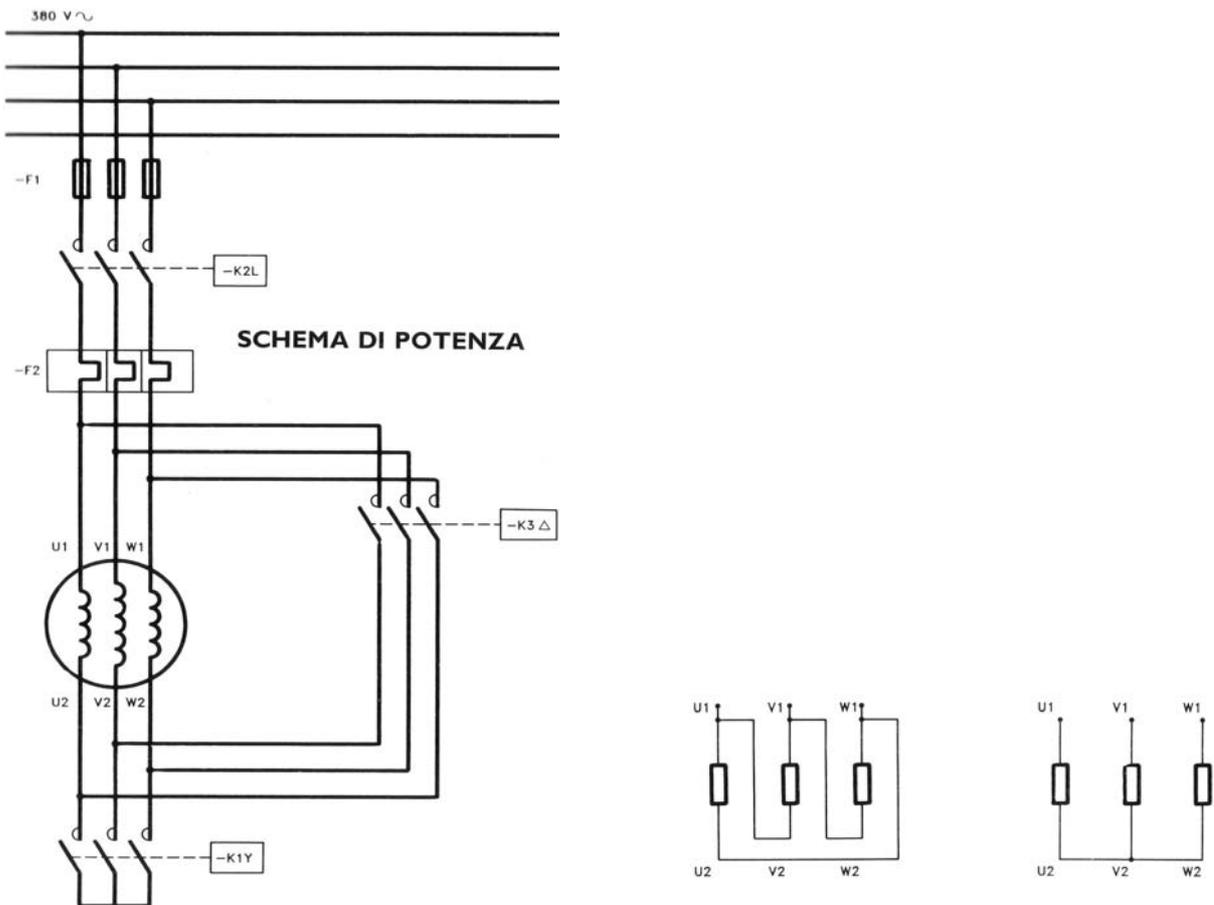


Fig. 3.19 – Avviamento Y/D: a) Schema di potenza; b) Diagramma della coppia e della corrente a Y e a D; c) collegamenti delle fasi a D e a Y.

All'avviamento, il contattore K1Y deve essere chiuso così il motore parte con gli avvolgimenti statorici collegati a stella. Dopo aver chiuso il contattore di linea, K2L, si dovrà attendere che il motore abbia raggiunto circa l'80 % della velocità a vuoto prima di aprire il contattore K1Y e chiudere K3D per realizzare il collegamento delle fasi a triangolo. E' importante che K3D venga chiuso solo dopo che si siano spenti gli archi di corrente di K1Y per evitare il cortocircuito tra due fasi. Per circa 75 millisecondi viene a mancare l'alimentazione al motore, così che nell'istante in cui essa si ripristina, si registra una punta di corrente assorbita che può provocare un calo di tensione in linea.

L'avviamento del motore con le fasi collegate a Y comporta:

- la riduzione della tensione di alimentazione sulle fasi di $\sqrt{3}$ volte rispetto quella che si avrebbe con il collegamento a triangolo;
- la riduzione di 3 volte della I_{AVV}: questo é un risultato molto positivo.
- la riduzione di 3 volte della coppia allo spunto, che dipende da V₂. Bisogna fare attenzione che la riduzione di V e di C_{AVV}, non sia eccessiva perché potrebbe anche impedire l'avviamento del motore.
- se la commutazione non avvenisse, il motore funzionerebbe male, con scorrimento elevato e rendimento basso.

Vantaggi

Data la robustezza, l'economicità e la quasi totale assenza di necessità di manutenzioni (fare attenzione solo ai cuscinetti), il motore asincrono a gabbia è largamente utilizzato nella pratica.

Il motore ad anelli costa molto di più e necessita di maggiore manutenzione per garantire il corretto funzionamento del collettore; per questo i suoi utilizzi sono limitati.

Un ulteriore vantaggio del motore asincrono (rispetto, per esempio, al motore sincrono), è la sua "dinamica": in risposta a variazioni del carico (aumento o diminuzione della coppia resistente), il motore rallenta, richiamando più corrente dalla rete, o accelera, assorbendo meno corrente, fino a portarsi ad un nuovo punto di funzionamento, senza dare luogo ad oscillazioni ("pendolazioni") attorno alla velocità di equilibrio e fenomeni di instabilità.

Svantaggi

Per anni il principale svantaggio dei motori asincroni è stata la mancanza di metodi efficienti per regolarne la velocità a piacimento.

L'unica parziale soluzione era costituita da motori asincroni costruiti in maniera tale da avere un numero di coppie polari variabile fra due possibili valori, ad esempio 1 o 2 (Metodo Dahlander); se alimentato a 60 Hz, un motore costruito in questo modo può avere una velocità di sincronismo di 3600 o di 1800 giri al minuto, e non si può certo parlare di regolazione della velocità.

Il problema è stato superato con lo sviluppo di dispositivi di *elettronica di potenza*, adatti a pilotare forti correnti e tensioni.

Tra questi dispositivi ne esistono alcuni, denominati sincroconvertitori o cicloconvertitori, che alimentati dalla tensione di rete, permettono di ottenere in uscita una terna di tensioni con *valore efficace e frequenza regolabili con continuità entro un certo intervallo* in funzione di un comando esterno.

AZIONAMENTI E APPLICAZIONI SPECIALI

In figura 2.23 è schematizzato un motore alimentato da un *convertitore statico* e le curve di coppia che si possono ottenere al variare della frequenza, mantenendo costante il rapporto fra valore efficace della tensione e frequenza.

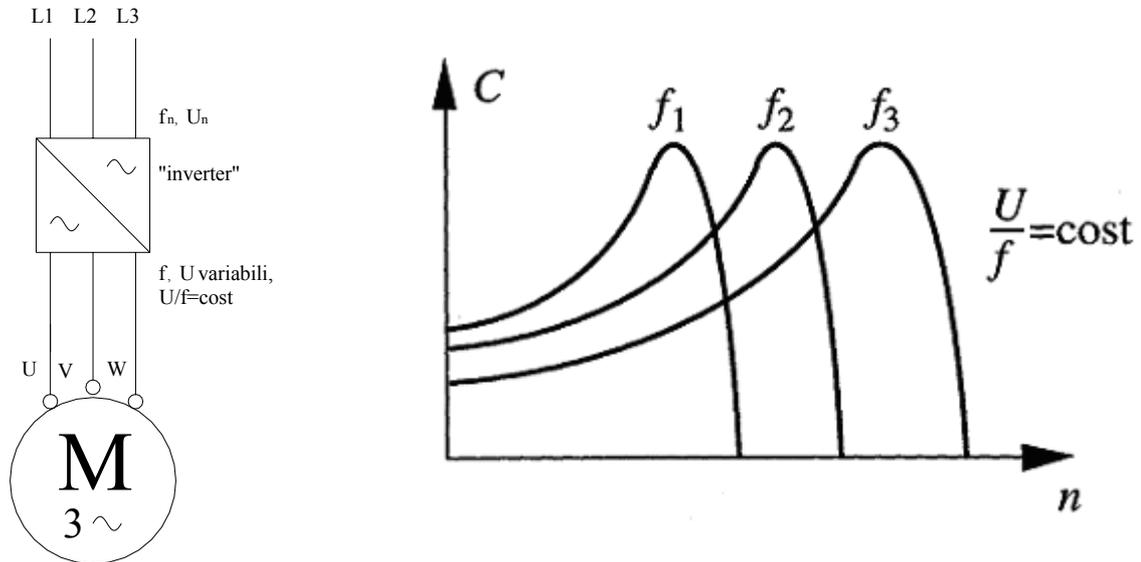


Fig. 3.20: Motore asincrono alimentato da inverter: $f_1 < f_2 < f_3$

Un motore asincrono alimentato in questo modo diventa estremamente flessibile; inoltre all'avviamento, aumentando gradualmente tensione e frequenza a partire dal valore nullo si può mantenere la corrente di avviamento entro valori limitati: il *convertitore statico* risolve quindi anche questo problema.

Esistono dispositivi basati su questo principio di funzionamento, ma che servono unicamente a limitare la corrente di spunto: sono i *soft starter* ai quali si è accennato in precedenza; essendo relativamente semplici e poco costosi sono sempre più diffusi.

Generatore asincrono (cenni)

La macchina asincrona funziona da generatore quando è trascinata a velocità superiori al sincronismo (scorrimento negativo): quando accade, la coppia meccanica cambia segno e la macchina trasforma potenza meccanica in elettrica alternata (fig. 3.21).

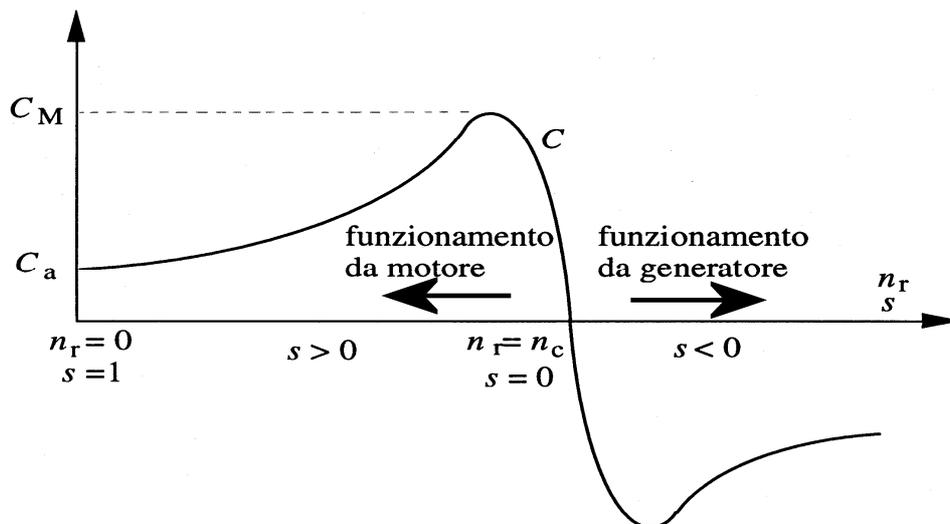


Fig. 3.21: Caratteristica meccanica oltre il sincronismo

Le applicazioni sono limitatissime: è abbastanza intuitivo che la macchina funzioni solo su rete mantenuta in tensione da altri generatori: non può mettere in tensione una rete da sola; inoltre, anche da generatore, continua ad avere un comportamento induttivo: continua ad assorbire potenza reattiva.

Motore asincrono monofase

Se un motore asincrono è alimentato con due soli conduttori, in *monofase*, si ha una distribuzione di campo d'induzione magnetica pulsante simile a quello di figura 3.22.

Si può dimostrare che esso può essere visto come due campi "rotanti" in senso opposto. Il motore si comporta così come se sul rotore agissero due coppie contrapposte come quelle di figura 3.22:

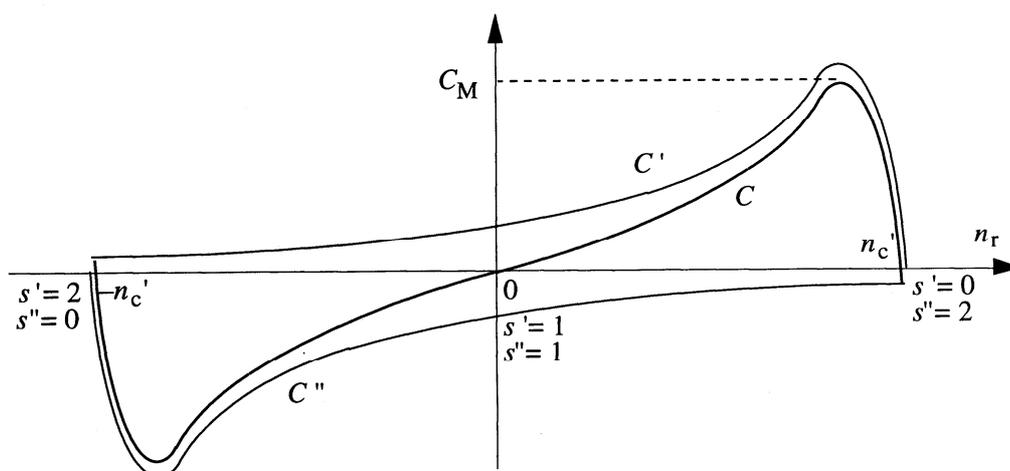


Fig. 3.22: Curve di coppia di un asincrono alimentato in monofase

La curva totale è data dalla somma delle due. E' evidente che il motore non può avviarsi, ma se posto in rotazione in uno dei due sensi, in modo che una delle due coppie prevalga, è poi in grado di trascinare un carico. Esistono "trucchi" (avvolgimenti ausiliari collegati a condensatori in maniera particolare, ecc...) che creano dissimmetrie che permettono di far prevalere una delle due coppie sull'altra, rendendo l'azionamento autoavviante.

Se un motore asincrono in trifase, mentre è in rotazione, subisce la disalimentazione di una fase a causa di un guasto, la curva di coppia di figura ci dice che rimane in rotazione; assorbe però una corrente più elevata dalle fasi restanti ed inoltre ha una rotazione irregolare: è una condizione potenzialmente pericolosa; se non intervengono protezioni (relè termico) o un operatore, il motore può danneggiarsi.

Principali operazioni di manutenzione

- controllo dei cuscinetti
- nei motori con rotore avvolto, controllo e pulizia anelli e portaspazzole; sostituzione spazzole usurate
- controllo sistema di lubrificazione dei cuscinetti (ad intervalli regolari)
- misura con ohmmetro o Megger della resistenza di isolamento tra avvolgimento e carcassa e tra i vari circuiti degli avvolgimenti; deve essere maggiore o uguale di 1 MΩ. La prova va fatta "a caldo". Possibile cause di isolamento insufficiente: umidità.

Guasti e relativi sintomi e cause

- riscaldamento anormale:
 - carico eccessivo
 - anomalie del sistema di raffreddamento
 - interruzione di un conduttore di alimentazione (funzionamento come monofase)
- cortocircuiti fra spire negli avvolgimenti in genere:
 - polveri conduttrici nell'ambiente
 - allentamento dei serraggi delle parti meccaniche che danno origine a sfregamenti di queste con conduttori, con conseguente perdita dell'isolamento
- corto circuito nell'avvolgimento statorico:
 - si può individuare dal riscaldamento dell'avvolgimento nella zona del cortocircuito, accompagnato da rumore, da un forte assorbimento di corrente disuguale sulle tre fasi e da una diminuzione della coppia
- corto circuito nell'avvolgimento rotorico (se di tipo avvolto):
 - in questo caso il motore, se fermo, non riesce ad avviarsi
 - se è in rotazione, avrà una rotazione a bassa velocità, molto irregolare e accompagnata da un forte rumore e da riscaldamento
- interruzioni nell'avvolgimento statorico e rotorico:
 - il motore o non si avvia, o si avvia con coppia debolissima
 - se è già in movimento, riduce la velocità e assorbe una maggiore corrente.

LA MACCHINA SINCRONA

La macchina *sincrona* è una macchina elettrica rotante e reversibile. Può funzionare come generatore elettrico di corrente alternata - “*alternatore*”- trasformando energia meccanica in elettrica; oppure come *motore sincrono*: trasforma energia elettrica alternata in meccanica. E' impiegato nella propulsione diesel-elettrica delle grandi navi da crociera, dove si richiedono motori di grandi potenze (decine di megawatt) e un elevato numero di coppie polari (8 coppie di poli e velocità di rotazione limitate).

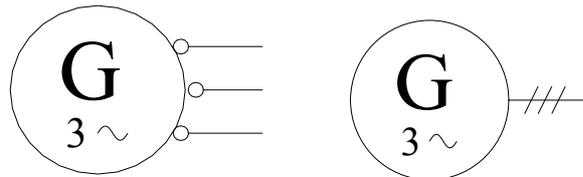


Fig. 4.1: Simbolo multifilare ed unifilare del generatore sincrono



Fig. 4.2: Esempio di un rotore a poli salienti di un alternatore con 12 coppie polari

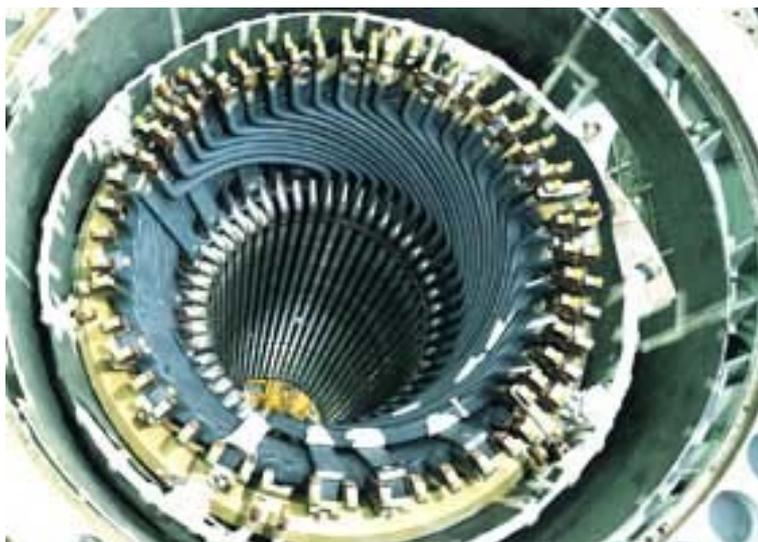


Fig. 4.3: Esempio di statore di un alternatore

Principio di funzionamento di un generatore

Se mettiamo in rotazione una spira in un campo d'induzione magnetica uniforme, per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica - Legge di Faraday-Lenz - si ha una f.e.m. indotta ai suoi capi.

Si può dimostrare che se il campo è uniforme, la tensione è sinusoidale, con frequenza f dipendente dalla velocità di rotazione n e dal numero delle coppie polari p :

$$p n = 60 f$$

Il campo d'induzione può essere dovuto ad un elettromagnete (un avvolgimento percorso da corrente continua realizzato su un nucleo di materiale ferromagnetico) o a magneti permanenti.

L'alternatore in genere è realizzato seguendo la seconda modalità: l'induttore è il rotore e l'indotto è lo statore e anziché una spira sola, avremo tre avvolgimenti (le tre fasi) ciascuno costituito da più spire distribuite in cave.

Le fasi di statore sono sempre collegate a stella (Y) con centro stella isolato oppure, a seconda dei casi, collegato a massa tramite una opportuna resistenza. Ciascuna fase risulta sottoposta alla tensione stellata, $\sqrt{3}$ volte più piccola di quella concatenata e questo comporta un risparmio sugli isolamenti degli avvolgimenti. Inoltre, questo tipo di collegamento permette l'eliminazione delle componenti di 3^a armonica, e suoi multipli, dalle tensioni di linea (essendo tali tensioni date dalla differenza di due forze elettromotrici le cui eventuali componenti di terza armonica risultano in fase tra di loro e quindi si eliminano con la sottrazione).

In figura 4.4 è schematizzata la macchina "completa", con un po' di nomenclatura.

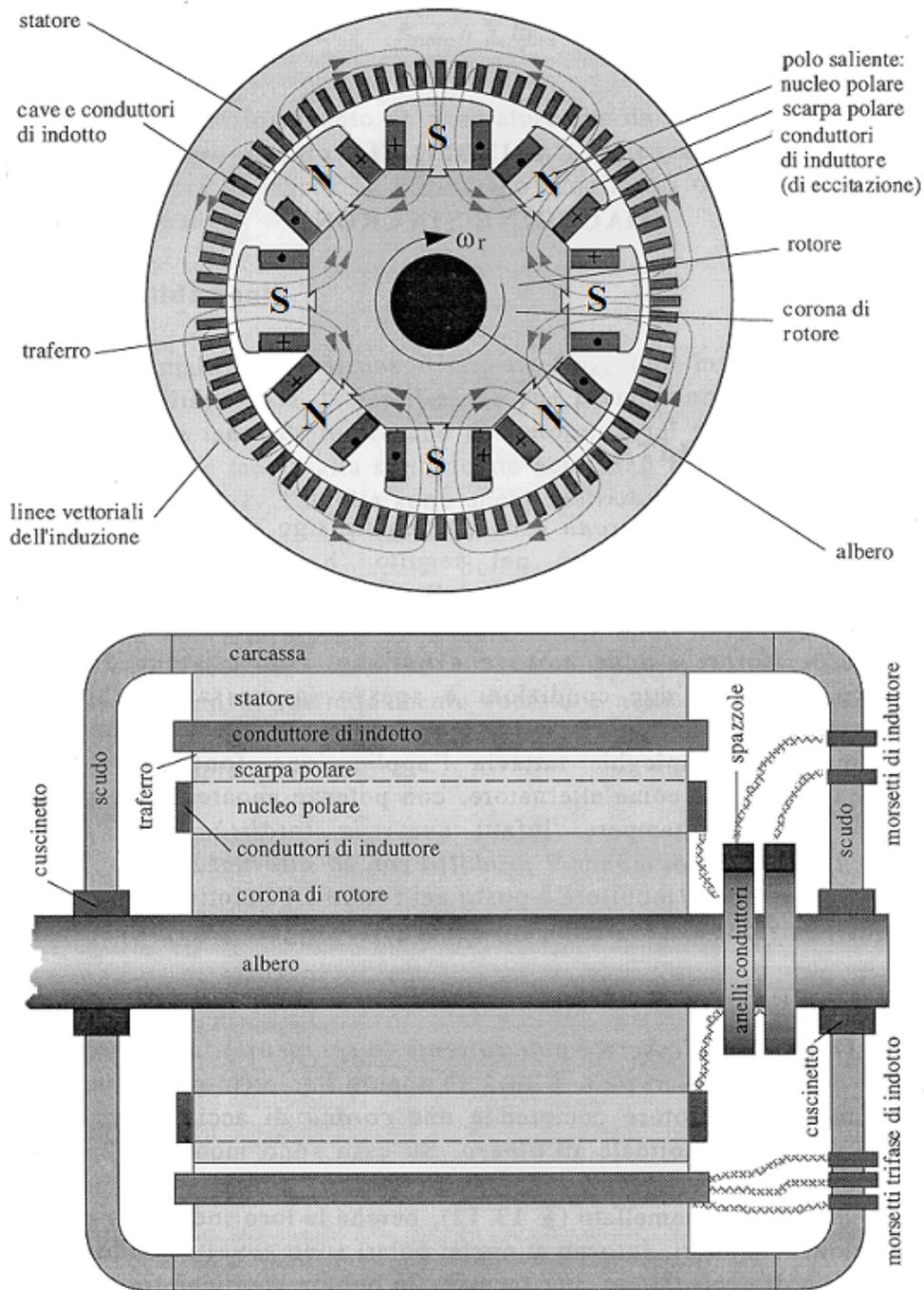


Fig. 4.4: Schema costruttivo di un alternatore

Le diverse bobine che costituiscono gli avvolgimenti induttori sono alimentate in serie (invertendo il senso ad ogni avvolgimento per avere N e S) e l'alimentazione viene fornita da un generatore esterno di piccola potenza (alternatore a magneti permanenti o con induttore alimentato dalla rete tramite un *raddrizzatore* statico - posto sulla parte fissa - e con *raddrizzatore* rotante) calettato sullo stesso albero della macchina sincrona. La corrente che circola negli avvolgimenti di induttore è chiamata *corrente di eccitazione*. Il

circuito magnetico rotorico è massiccio (non laminato: la corrente di eccitazione è continua ed il rotore non è interessato da alcun flusso variabile).

Lo statore è realizzato con lamierini opportunamente impaccati. I conduttori utilizzati per gli avvolgimenti sono tipicamente di rame isolato (indotto ed induttore); quelli di induttore sono di sezione elevata, mentre quelli di indotto sono realizzati con conduttori isolati, connessi in parallelo alle estremità.

Caratteristica vuoto

La tensione indotta negli avvolgimenti statorici dipende dall'intensità della corrente di eccitazione: *l'andamento del valore efficace della forza elettromotrice a vuoto* (quando la macchina non sta alimentando alcun carico) varia in funzione della corrente di eccitazione, come dimostra la caratteristica di eccitazione di fig. 4.5.

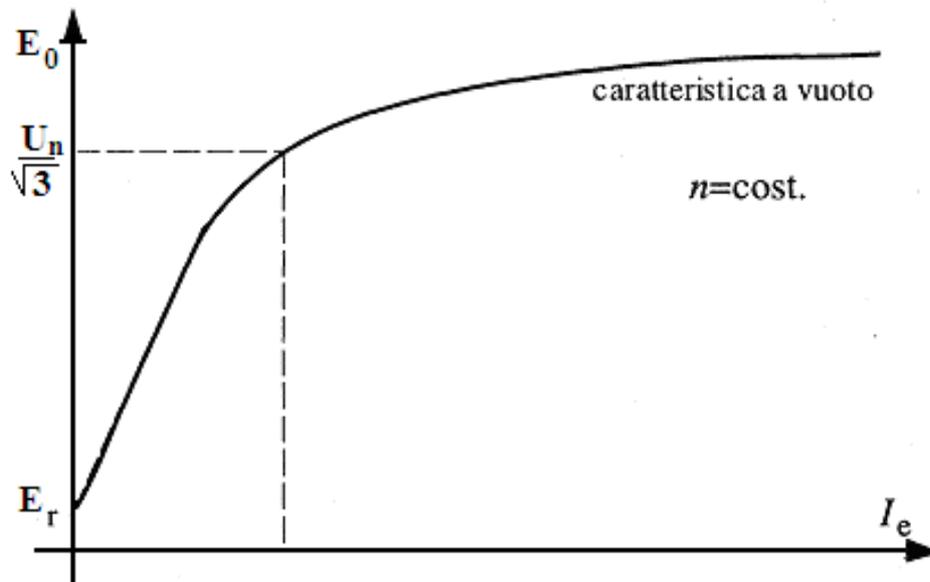


Fig. 4.5: Caratteristica di eccitazione (a vuoto)

Si può notare che:

- anche con corrente di eccitazione nulla c'è una piccola tensione ai morsetti, a causa dell'induzione residua dei poli del rotore: i poli rimangono un po' "magnetizzati" anche in assenza di corrente
- la caratteristica non è lineare: satura (superato un certo valore, la tensione aumenta poco anche aumentando di molto la corrente di eccitazione): questo fenomeno è correlato a caratteristiche del materiale ferromagnetico (non linearità).

Funzionamento dell'alternatore a vuoto

L'alternatore funziona a vuoto quando, essendo regolarmente eccitato in corrente continua, ruota alla velocità nominale ed ha il circuito statorico aperto, cioè non eroga corrente al carico (interruttore di macchina aperto).

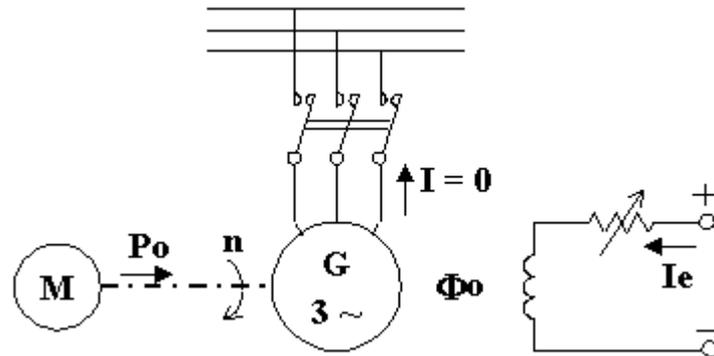


Fig. 4.6 – Schema elettrico di un alternatore trifase eccitato e funzionante a vuoto.

In tali condizioni, l'unico campo presente nella macchina è quello induttore Φ_0 (prodotto dai poli rotorici) che genera in ciascuna fase dell'avvolgimento indotto (quello statorico) la f.e.m. sinusoidale:

$$E_0 = K_A \cdot \Phi_0 \cdot f \cdot N \text{ [V]}$$

dove:

$$f = p n / 60$$

Φ_0 [Wb] = flusso per polo

N = numero dei conduttori della fase

K_A = fattore di Kapp (valore fornito dal costruttore).

Funzionamento dell'alternatore a carico - reazione d'indotto

La corrente erogata produce due effetti:

- le cadute di tensione sulla resistenza e sulla reattanza di dispersione degli avvolgimenti
- *la corrente nello statore crea un campo d'induzione magnetica rotante che "interagisce" con quello di rotore, sommandosi o sottraendosi ad esso e facendo quindi aumentare o diminuire la forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti*

Il secondo fenomeno è chiamato *reazione d'indotto*; il suo effetto dipende anche dal fattore di potenza del carico fig. 4.7

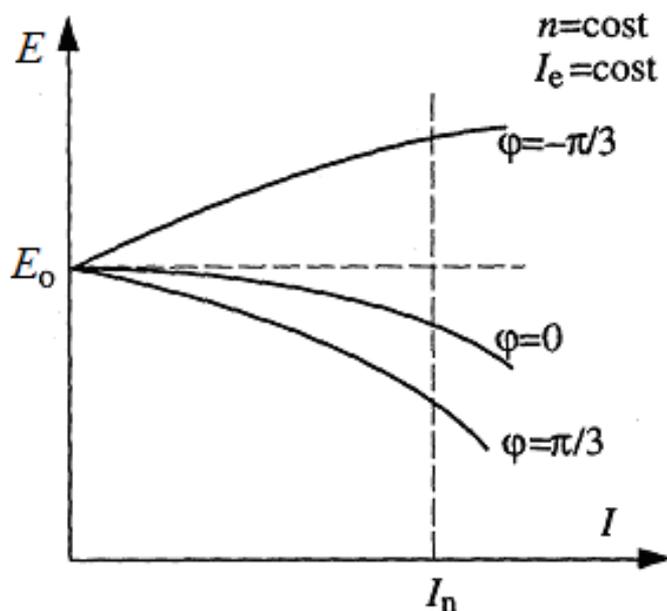


Fig. 4.7: Tensione a carico

Quando il generatore alimenta una rete, si ha una forte variazione della tensione ai morsetti in funzione della corrente erogata, cioè in funzione del carico. Sono necessari, pertanto, appositi dispositivi di regolazione automatica della tensione ai morsetti della macchina, in grado di mantenere la tensione pressoché costante al variare del carico.

Dato che i carichi di solito hanno un comportamento ohmico-induttivo, la tensione ai morsetti del generatore tende a calare e bisogna quindi aumentare la corrente di eccitazione per compensare tale calo: *in questo modo l'alternatore può fornire la potenza reattiva necessaria ai carichi.*

L'altro aspetto da controllare è la *frequenza*, correlata alla *potenza* fornita dalla macchina: *istante per istante la potenza meccanica che il "motore primo" (ad esempio: un motore diesel) fornisce all'alternatore deve uguagliare, a meno del rendimento dell'alternatore, la potenza che questo fornisce al carico.*

Se il carico elettrico aumenta o diminuisce, la velocità di rotazione dell'alternatore e la frequenza rispettivamente si riducono, nel primo caso, e aumentano nel secondo; anche qui, saranno necessari dispositivi di controllo automatici che, agendo sulla potenza meccanica fornita dal motore primo (es. aumentando o diminuendo l'ammissione del combustibile nel motore diesel) mantengono la velocità, e quindi la frequenza, al valore desiderato.

Principio di funzionamento del motore sincrono

Alimentando lo statore con una terna equilibrata di correnti sinusoidali, queste creano un campo magnetico rotante (come quello del motore asincrono) che, interagendo con quello creato dal rotore, trascina il rotore stesso alla velocità sincrona data dalla formula:

$$n = 60 f / p.$$

Caratteristica meccanica (coppia in funzione di velocità) di un motore sincrono:

Dato che un motore sincrono non può che ruotare alla velocità di sincronismo, la sua caratteristica è semplicemente un segmento parallelo all'asse della coppia passante per la velocità di sincronismo, come mostrato in figura 4.8:

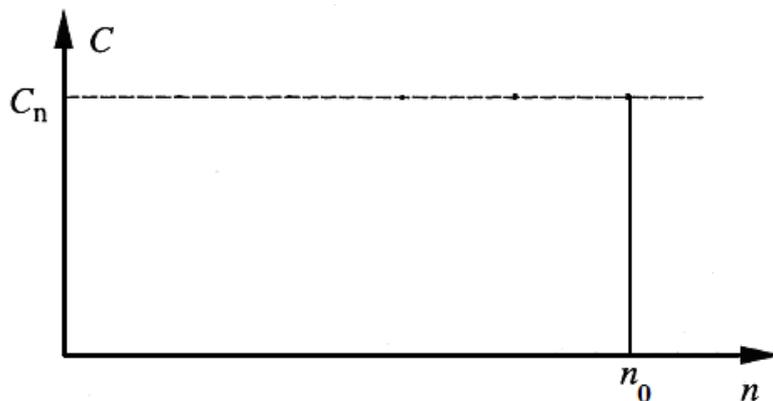


Fig. 4.8: Caratteristica motore sincrono

E' evidente che il motore sincrono non è autoavviante.

Il problema può essere risolto in vari modi:

- sfruttando, se disponibile, un motore di lancio ed eseguendo la manovra di parallelo come se fosse un generatore; una volta in parallelo, si può collegare il carico meccanico
- equipaggiando il rotore del motore con una *gabbia d'avviamento*: una gabbia di scoiattolo simile a quella di un motore asincrono; lo si fa appunto partire come asincrono, poi, fornendo corrente di eccitazione al rotore, lo si trasforma in sincrono.
- alimentando il motore attraverso un inverter o dispositivo analogo (sincroconvertitore o cicloconvertitore) che, alimentato a frequenza di rete, abbia in uscita una terna di tensioni a frequenza variabile tra 0 e 20 Hz (teoricamente).

Quest'ultimo metodo costituisce, assieme al motore, un azionamento a velocità variabile (figura 4.9).

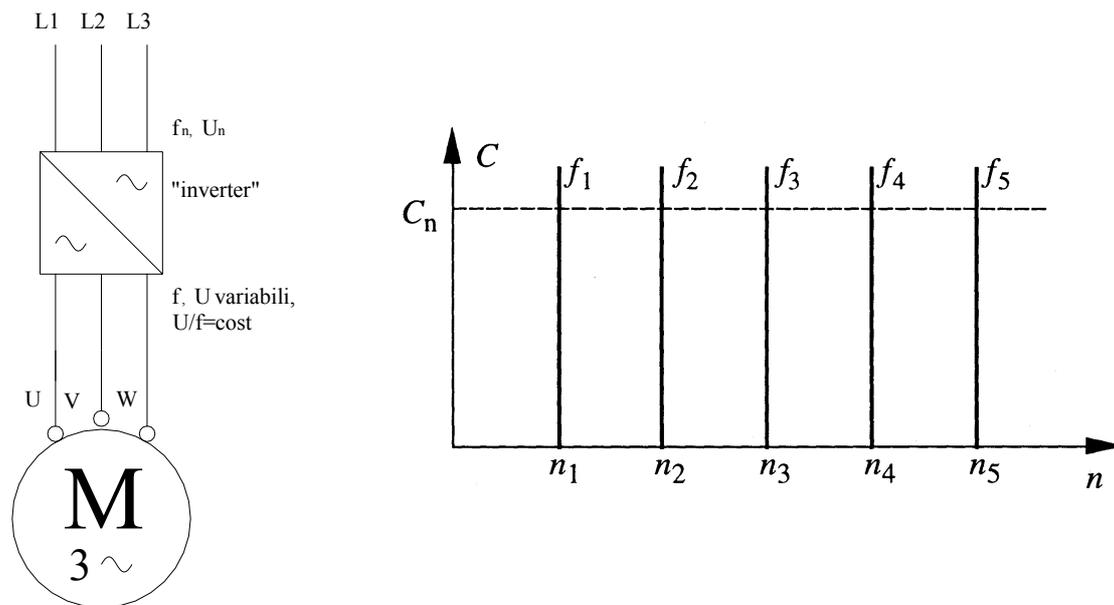


Fig. 4.9: Motore sincrono alimentato da inverter

Le caratteristiche di coppia sono segmenti paralleli all'asse delle ordinate, che intersecano quello delle ascisse in corrispondenza delle varie velocità di sincronismo dipendenti dalle frequenze.

Con questo sistema il motore può essere messo in movimento a partire da fermo aumentando gradualmente tensione, corrente negli avvolgimenti e velocità.

Se il carico meccanico applicato ad un motore sincrono aumenta repentinamente: il rotore rallenta; la macchina richiede alla rete più potenza elettrica, per effetto della quale il rotore accelera superando la velocità di sincronismo; di conseguenza, la potenza elettrica cala, determinando un nuovo rallentamento e così via con oscillazioni successive della velocità, dette oscillazioni pendolari, sempre più piccole, fino ad arrivare ad un nuovo equilibrio. Analogo problema si ha se il carico diminuisce.

Se l'entità della variazione del carico è troppo grande, il rotore rallenta troppo e non riesce più a recuperare il sincronismo: si ha la cosiddetta perdita di passo; si possono verificare correnti e sollecitazioni molto intense: la macchina va esclusa della rete (intervengono opportune protezioni).

Un comportamento analogo hanno i generatori, a seguito di variazioni di potenza del motore primo o del carico elettrico. Esistono sistemi di controllo che governano per quanto possibile queste dinamiche. I rotori delle macchine sincrone sono poi solitamente equipaggiati con gabbie simili alle gabbie di scoiattolo degli asincroni, dette gabbie di smorzamento: durante le oscillazioni queste gabbie sono sede di correnti indotte che tendono a smorzare le oscillazioni stesse.

Mentre in una rete di elevata estensione una perturbazione (ad esempio l'inserzione di un grosso carico o la perdita di un generatore per un guasto) può essere "assorbita" abbastanza agevolmente, dato che la sua entità si "ripartisce" su tutti i generatori, in una rete "piccola"

una variazione del tipo dell'inserzione di un asincrono di grande potenza, interessando un numero limitato di generatori, può innescare oscillazioni troppo elevate e portare al distacco dei generatori.

Mentre per la generazione di energia gli alternatori sono praticamente l'unica opzione dalle piccole fino alle grandi potenze (centinaia di megawatt), i problemi succitati ed il maggior costo della macchina sincrona ne limitano l'uso come motore a quelle applicazioni in cui sia richiesta una velocità rigorosamente costante e precisamente controllata, e, come si diceva all'inizio, alle applicazioni di grande potenza (a partire dalle decine di megawatt), specialmente con velocità di rotazione basse (grande numero di coppie polari) nella propulsione diesel-elettrica delle grandi navi da crociera.

Perdite e rendimento negli alternatori

Si definisce *rendimento*: $\eta = P / P_A$

dove P [W] è la potenza elettrica erogata e P_A [W] la potenza meccanica assorbita dall'alternatore.

La potenza meccanica assorbita vale $P_A = P_m + P_{fe} + P_{ec} + P_{JS} + P_{AD} + P = P_P + P$ [W]:

- le perdite meccaniche P_m , dovute all'attrito dei cuscinetti e alla ventilazione;
- le perdite nel ferro P_{fe} che, con un carico Ohmico-induttivo, aumentano all'aumentare del carico. In tal caso, per mantenere costante la tensione d'uscita è necessario aumentare l'eccitazione, quindi la f.e.m. E_0 ; poiché le P_{fe} dipendono dal quadrato della f.e.m., all'aumentare dell'eccitazione aumentano anche le P_{fe} ;
- le perdite per eccitazione P_{ec} aumentano col quadrato della corrente di eccitazione, quindi aumentano all'aumentare del carico;
- le perdite negli avvolgimenti dell'indotto, P_{JS} , dipendono dal quadrato della corrente erogata;
- le perdite addizionali, P_{AD} , caratterizzano tutti gli avvolgimenti in corrente alternata, a causa dell'effetto pelle, e sono pari a **0,5%** della potenza erogata P .

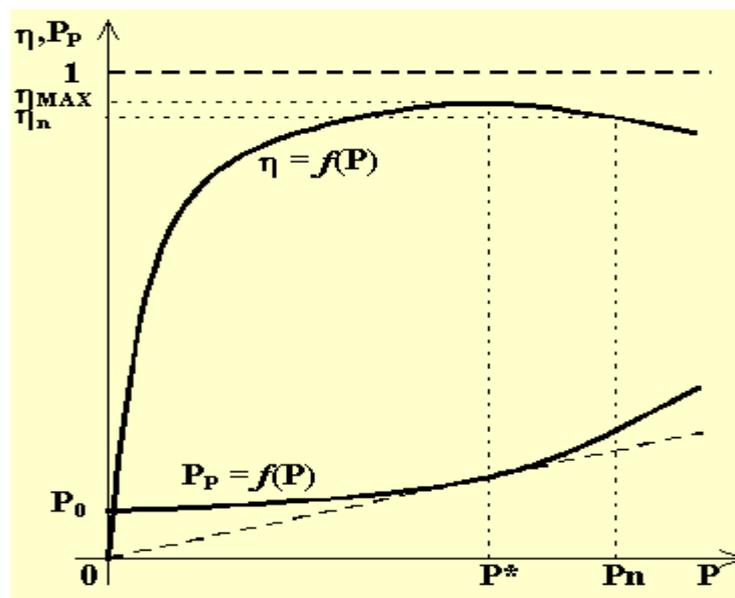


Fig. 4.10 – Curva del rendimento e delle potenze perse dell'alternatore.

E' significativo osservare che il rendimento dell'alternatore è massimo quando è minimo il rapporto tra le perdite e la potenza erogata: P_p / P .

Questo fatto può anche essere dedotto dal grafico di Fig.4.10, dove P^* rappresenta la potenza erogata per la quale si ha il massimo rendimento.

L'alternatore viene dimensionato per dare il massimo rendimento a circa $\frac{3}{4}$ della potenza di pieno carico P_n , come indicato in figura. Nella pratica, l'alternatore di bordo viene fatto lavorare intorno all'80% di P_n (la curva del η è quasi rettilinea in quel tratto) per sfruttare una potenza maggiore, a fronte di un modesto aumento dei consumi specifici di combustibile.

Infine, il η dell'alternatore diminuisce al diminuire del fattore di potenza, $\cos\phi$, cioè, man mano che aumenta la componente reattiva del carico ohmico-induttivo.

Dati di targa di un alternatore

P_n	Potenza attiva nominale [W]
A_n	Potenza apparente nominale [VA]
A_n	Potenza apparente nominale [VA]
U_n	Tensione nominale di indotto [V]
I_n	Corrente nominale di indotto [A]
f_n	Frequenza nominale [Hz]
I_e	Corrente di eccitazione nominale [A]
U_e	Tensione di eccitazione nominale [V]
n_n	Velocità nominale di rotazione [giri/min]
η_n	Rendimento nominale [%]
C_n	Coppia nominale all'albero [Nm]

Sistemi di eccitazione

Gli avvolgimenti di eccitazione servono a creare il flusso magnetico induttore principale nella macchina sincrona. Essi sono posti attorno ad ogni polo formando degli elettromagneti, risultano collegati tra di loro in serie in modo da essere percorsi dalla stessa corrente continua I_e [A] e sono avvolti in modo da formare alternativamente poli Nord e Sud. La corrente di eccitazione viene fornita alla macchina sincrona (motore o generatore) con modalità diverse a seconda dei casi.

1) Eccitazione statica con tiristori (e spazzole)

Si impiega negli alternatori (certamente non quelli navali che sono più piccoli) con potenze superiori a 60 [MVA]. Tale sistema (Fig. 4.11a) converte in tensione continua V_e la tensione alternata trifase prelevata dai morsetti dell'alternatore stesso, sfruttando il fenomeno della magnetizzazione residua dei poli. Questo sistema è dotato di un dispositivo

spazzole-anelli che permette di inviare la corrente continua ottenuta tramite il ponte di raddrizzamento a tiristori.

La presenza delle spazzole di metal grafite rappresenta un limite perché necessitano di frequente manutenzione e vanno sostituite periodicamente.

Sulle grandi navi da crociera, il sistema di eccitazione statica viene impiegato soltanto nei motori sincroni del sistema di propulsione azimutale.

Trattandosi di un sistema elettronico, i dispositivi automatici di regolazione e controllo **RV** possono realizzare facilmente qualsiasi tipo di regolazione purché al controllo pervengano, tramite i trasformatori di misura **TV** ed i **TA**, i segnali proporzionali alla tensione ed alla corrente dell'alternatore. Il trasformatore di potenza **TP** serve ad adattare la tensione prelevata ai morsetti dell'alternatore a quella ottimale per il convertitore statico.

DI rappresenta il dispositivo per l'innesco dell'eccitazione (una semplice batteria di accumulatori) quando la magnetizzazione residua nei poli è insufficiente per l'avviamento.

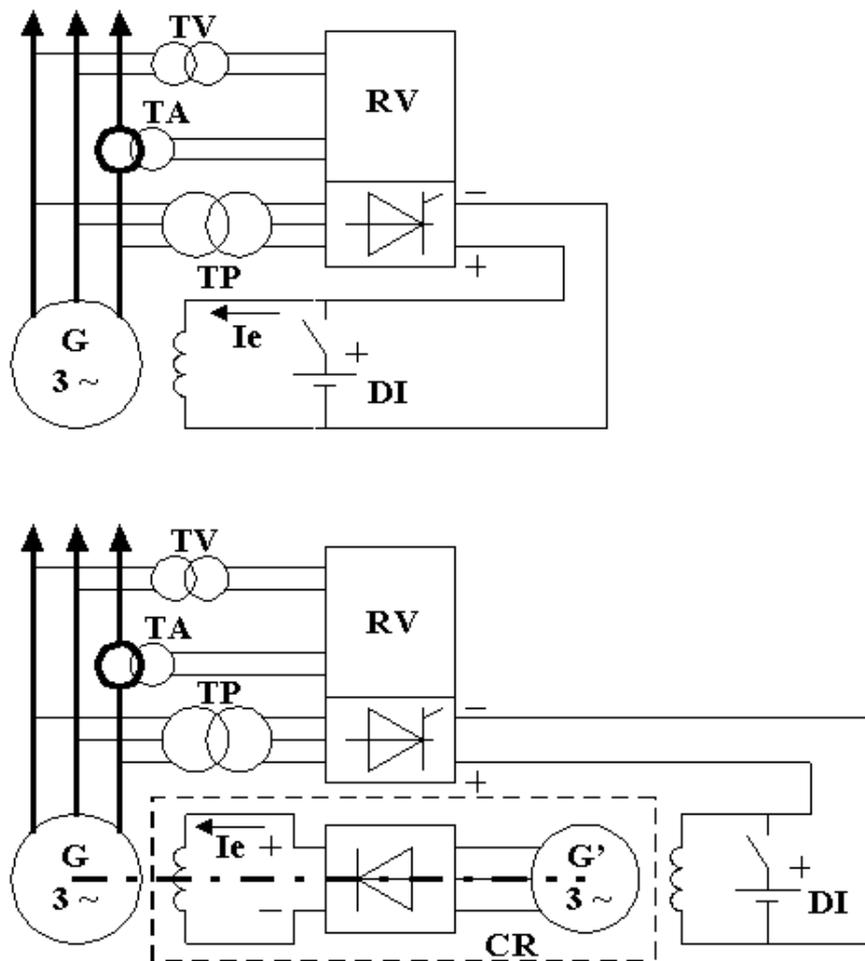


Fig.4.11 – Sistemi di eccitazione statica: a) con spazzole; b) senza spazzole (brushless)

2) Sistema di eccitazione brushless (senza spazzole)

E' impiegato sulle navi (motori sincroni di propulsione, tranne nella versione azipod, e alternatori) e prevede l'impiego di un'eccitatrice coassiale costituita da un alternatore trifase ausiliario di piccola potenza, il cui avvolgimento indotto ruota (è questa la particolarità del sistema) assieme al ponte di diodi controllati (SCR), per questo detto rotante, e agli avvolgimenti d'eccitazione (induttore) dell'alternatore principale, formando un unico complesso rotante **CR**.

La regolazione della corrente di eccitazione dell'alternatore principale viene realizzata intervenendo sulla corrente di eccitazione dell'alternatore ausiliario, che ha gli elettromagneti (i poli) posti sullo statore, alimentati tramite un convertitore statico dedicato con SCR, alimentato con la tensione trifase prelevata dai morsetti dall'alternatore principale, tramite il trasformatore **TP**.

La potenza richiesta per l'eccitazione di un alternatore varia tra il **5%** e lo **0,2%** della potenza nominale, passando dagli alternatori di piccola potenza a quelli di grande potenza.

Anche in questo caso si sfrutta la magnetizzazione residua dei poli dell'alternatore principale ma anche quella dell'alternatore ausiliario.

Se la macchina non ha mai lavorato, oppure è stata ferma per lungo tempo, per poterla avviare si utilizza la batteria di accumulatori **DI** che alimenta direttamente il circuito di eccitazione dell'alternatore ausiliario.

Sulle navi moderne, al posto dell'alternatore ausiliario si può trovare un generatore asincrono di piccola potenza, montato sempre sullo stesso asse dell'alternatore principale, il cui avvolgimento induttore, distribuito nelle cave statoriche come nell'alternatore, viene alimentato direttamente con la tensione alternata prelevata ai morsetti della macchina, tramite un ponte di diodi controllati.

Questo sistema viene anche chiamato a trasformatore rotante,

Comportamento di una macchina sincrona allacciata ad una rete

1) Macchina sincrona allacciata singolarmente ad una rete elettrica:

- se la macchina funziona da motore, richiede alla rete una potenza attiva pari (a meno delle perdite) alla potenza meccanica richiesta dal carico
- se la macchina funziona da generatore, cede alla rete una potenza attiva pari (a meno delle perdite) alla potenza meccanica fornita dal motore primo (in genere un motore diesel o una turbina a gas)
- in entrambi i casi – funzionamento da motore o da generatore -, *agendo sull'eccitazione si può regolare la potenza reattiva erogata*: con corrente di eccitazione bassa – regime sotto eccitato - la macchina sincrona assorbe potenza reattiva (come se fosse un induttore); con corrente di eccitazione alta – regime sovraeccitato - la macchina sincrona genera potenza reattiva (come fosse un condensatore)

Il fatto che un motore sincrono possa generare potenza reattiva (possa cioè comportarsi da condensatore) può essere una proprietà molto utile: visto che gli altri apparati (asincroni e trasformatori) assorbono potenza reattiva, un motore sincrono può essere utilizzato, oltre

che come motore in senso stretto, anche per generare potenza reattiva – compensatore sincro - per gli altri carichi (*rifasamento*).

2) Generatore (alternatore) allacciato ad una rete prevalente – operazioni di parallelo:

In questo caso è importante effettuare una corretta *manovra di parallelo*, ovvero quella sequenza di operazioni che, a partire dall'alternatore fermo, diseccitato e scollegato, portano a collegarlo alla rete:

- agendo sul motore primo, si porta l'alternatore alla velocità di sincronismo, corrispondente alla frequenza di rete
- si aumenta l'eccitazione della macchina, fino a quando i valori efficaci delle tensioni di macchina non uguagliano quelli delle tensioni di rete: $E_0(I_e) = E_{RETE}$
- agendo sempre sul motore primo, si modifica leggermente la velocità, in maniera da far variare lo sfasamento fra la tensione di macchina e quella di rete sino ad annullarlo: tensioni di macchina in fase con quelle di rete

Strumentazione per realizzare il parallelo degli alternatori: è costituita da due frequenzimetri, da due voltmetri (per misurare, rispettivamente, le frequenze e le tensioni di rete e di macchina), e dal sincronoscopio (a indice o a luci rotanti) che permettono di cogliere l'istante in cui le terne di tensioni di rete e di macchina sono in fase. Esistono oggi sistemi automatici in grado di gestire completamente questa manovra.

Quando le tensioni di macchina sono isofrequenziali, uguali in modulo ed uguali in fase a quelle di rete, si può chiudere l'interruttore che collega la macchina alla rete senza che circoli corrente. A parallelo effettuato, si può aumentare gradualmente la potenza del motore primo e l'alternatore comincia ad erogare potenza attiva.

3) Un limitato numero di generatori che alimentano una rete di modesta estensione (è il caso delle navi):

- qualora un generatore si aggiunga ad un numero di generatori già in funzione, è necessario effettuare la manovra di parallelo
- ogni variazione di potenza di uno dei motori primi che trascinano gli alternatori e ogni variazione di potenza elettrica richiesta dai carichi si ripercuote su tutti i generatori e sulla frequenza di rete e deve essere compensata da logiche di controllo
- i generatori concorrono a fornire la potenza reattiva richiesta dai carichi, regolando le relative correnti di eccitazione

Una rete di questo tipo è molto più sensibile ad eventuali perturbazioni rispetto ad una rete estesa con molti generatori.

Principali operazioni di manutenzione sulle macchine sincrone:

- controllo dei cuscinetti
- controllo sistema di lubrificazione dei cuscinetti (ad intervalli non superiori a 3 mesi)
- misura con ohmmetro della resistenza di isolamento tra avvolgimento e carcassa e tra i vari circuiti degli avvolgimenti; deve essere maggiore o uguale di 1 M Ω . La prova va fatta "a caldo". Possibile cause di isolamento insufficiente: umidità.

Guasti e relativi sintomi e cause:

- instabilità della tensione con brusche variazioni, della stessa:
 - avaria regolatore di tensione
 - instabilità del ponte raddrizzatore che alimentano il circuito di eccitazione
 - brusche variazioni del carico (questa causa si riconosce staccando momentaneamente il carico e controllando la tensione a vuoto)
- tensione a vuoto (ed a carico) insufficiente:
 - macchina funzionante a basso regime di giri
 - alcune spire del circuito di eccitazione sono in cortocircuito
 - alcune spire dell'avvolgimento statorico sono in cortocircuito (questo guasto produce, a carico, vibrazioni, rumore e riscaldamento locale delle spire in corto)
- tensione a vuoto normale, ma tensione a carico insufficiente:
 - basso fattore di potenza del carico: quando l'alternatore dà a carico una tensione insufficiente, può dipendere dal fattore di potenza del carico, che è più basso di quello per il quale il generatore è stato previsto (l'alternatore non riesce a fornire sufficiente potenza reattiva)
- la macchina non dà tensione:
 - se su una sola fase: potrebbe essere interrotta
 - corto circuito ai capi del circuito d'eccitazione (non arriva corrente agli avvolgimenti rotorici)
- squilibrio fra le fasi: in generale è causato dal carico, che è troppo squilibrato; basta vedere se le tensioni a vuoto sono simmetriche
- oscillazioni pendolari.

CONVERTITORI STATICI

I convertitori statici sono realizzati utilizzando componenti elettronici di potenza quali i *diodi*, i *transistori* ed i *tiristori*; essi hanno caratteristiche di funzionamento, valori massimi per tensioni, correnti e potenze nominali e costi differenti.

Diodo raddrizzatore

Il diodo raddrizzatore a semiconduttore (*a giunzione P-N*) è costituito da un elemento semiconduttore tetravalente di silicio (quattro elettroni esterni legati al reticolo cristallino) che viene modificato (*drogato*) inserendo atomi di elementi trivalenti (*drogaggio di tipo P*) e pentavalenti (*drogaggio di tipo N*) in due zone contigue (*giunzione*) dell'elemento. Le due zone drogate sono connesse a terminazioni esterne che sono dette A (*anodo*) e C (*catodo*).

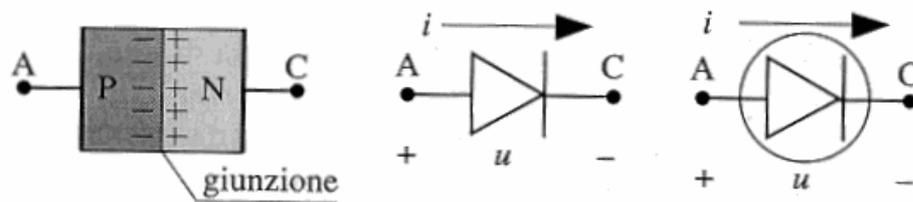


Fig. 5.1 - Diodo raddrizzatore: struttura e relativi e relativi simboli

Questa struttura fa sì che:

- applicando una tensione positiva (polarizzazione diretta), il componente conduce corrente dall'anodo al catodo
- applicando una tensione negativa (polarizzazione inversa), il componente si comporta come un isolante

La caratteristica esterna del diodo reale è rappresentata in figura 5.2, dove viene anche riportata la caratteristica esterna del diodo ideale.

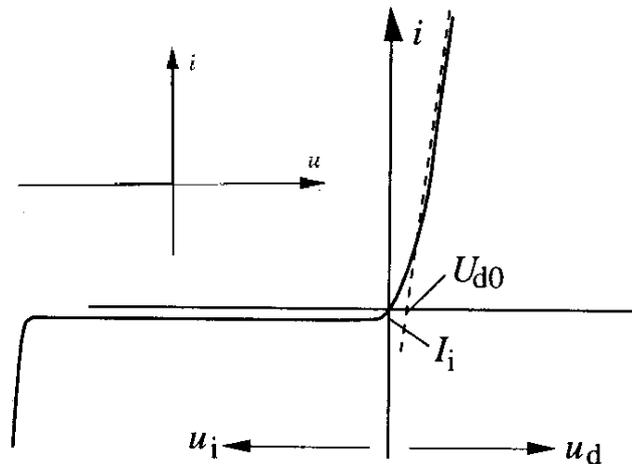


Fig. 5.2: caratteristiche esterne ideali e reali

Con corrente diretta (*nel senso della freccia*) si ha una piccola caduta di tensione ai morsetti del diodo (*tensione diretta*).

Il valore massimo della corrente diretta è la corrente nominale del diodo che può arrivare ad alcuni kA (diodi di potenza). Se la tensione è negativa (*tensione inversa*) si ha il passaggio di una debole *corrente inversa* ($10^{-6} \div 10^{-7} I_n$). La tensione negativa massima applicabile è la tensione nominale del diodo, superata la quale si ha un repentino incremento della corrente inversa con effetti tipicamente distruttivi (*scarica*). Valori massimi raggiungibili 2÷3kV (*diodi di potenza*).

Transistore BJT

Il transistore bipolare a giunzione (*BJT – Bipolar Junction Transistor*, figura 5.3) è realizzato con un elemento di silicio in cui vengono create mediante drogaggio tre diverse zone. Si realizzano transistori di tipo NPN o PNP. Il transistore di tipo NPN è realizzato con una zona N con debole drogaggio (*collettore-C*) seguita da una zona P di spessore molto modesto (*base-B*) ed una zona N con forte drogaggio (*emettitore-E*). Il transistore PNP è realizzato in analoga maniera con drogaggi invertiti.

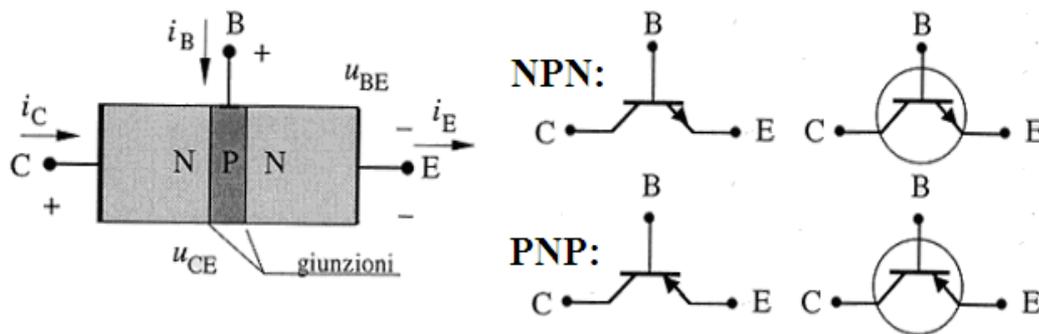


Fig.5.3: Transistore bipolare con relativi simboli (alto: NPN, basso: PNP)

Con riferimento al transistor NPN, se si applica una tensione positiva tra collettore ed emettitore (u_{CE}) e la base è aperta ($i_B=0$) non fluisce corrente (teoricamente, in realtà c'è una corrente molto piccola); se invece, con $u_{CE} > 0$ si applica una tensione positiva tra base ed emettitore ($u_{BE} > 0,7$ volt), cioè se si inietta una corrente nella base ($i_B > 0$), si ha circolazione di corrente anche da C verso E ed i valori delle correnti sono tali che:

$$i_E = i_C + i_B \cong i_C.$$

Se la tensione applicata tra C ed E è negativa, il transistor risulta interdetto per qualsiasi valore di corrente di base (i_B). La massima tensione inversa ammissibile tra C ed E è limitata ad alcuni volt, superata tale tensione si ha una scarica distruttiva (il comportamento asimmetrico è dovuto ai diversi drogaggi delle zone N).

La caratteristica esterna del transistor è quindi funzione della corrente di base (i_B) e viene solitamente rappresentata come in figura rispetto alla coppia di morsetti C-E.

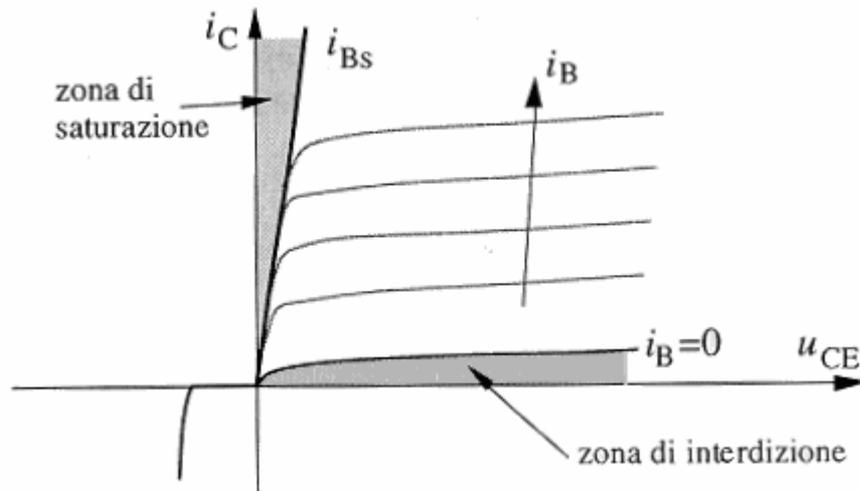


Fig. 5.4: Caratteristica esterna di un transistore bipolare

Nella figura si distinguono una zona di saturazione (i_B sufficientemente elevata da avere u_{CE} piccola qualsiasi sia i_C), una di interdizione (i_B nulla: i_C molto piccola qualunque sia u_{CE} , purché inferiore ad un valore massimo ammissibile), ed una zona in cui i_C è proporzionale a i_B quasi indipendentemente da u_{CE} : il transistore si comporta come un amplificatore.

Transistori di potenza

Sono utilizzati nei convertitori elettronici e vengono fatti lavorare nella zona di interdizione o nella zona di saturazione, realizzando un interruttore unidirezionale controllato: in presenza di una tensione u_{CE} positiva, se si impone una corrente di base maggiore di quella di saturazione si ottiene la commutazione del transistore, cioè questi inizia a condurre tra C ed E, con una caduta u_{CE} modesta e poco dipendente da i_C .

Se viene annullata la corrente di base, il transistore commuta nuovamente e si porta a lavorare nella zona di interdizione: non circola più corrente tra C ed E.

Quindi agendo sulla base del transistore, si ottiene un comportamento da interruttore comandato. Si tenga presente che la tensione u_{BE} e la corrente i_B necessarie per le operazioni viste sono molto minori della tensione nominale diretta u_{CE} (*in interdizione*) e della corrente nominale diretta i_C (*in conduzione*).

Comportamento analogo hanno i **transistori IGBT** (Insulated Gate Bipolar transistor), che presentano alcune interessanti caratteristiche:

- assorbono una bassissima corrente al morsetto di controllo (*gate-G = base-B*) per cui la commutazione avviene con l'applicazione di una opportuna tensione tra G ed E (*dispositivo controllato in tensione*);
- presentano una elevata velocità di commutazione (fino a 10 kHz).

I transistori di potenza sono realizzati per potenze nominali che vanno dal kVA alle centinaia di kVA.

Tiristori

Il **tiristore** (*thyristor* o *SCR - Silicon Controlled Rectifier*) è realizzato mediante un elemento di silicio suddiviso in quattro zone con drogaggi diversi.

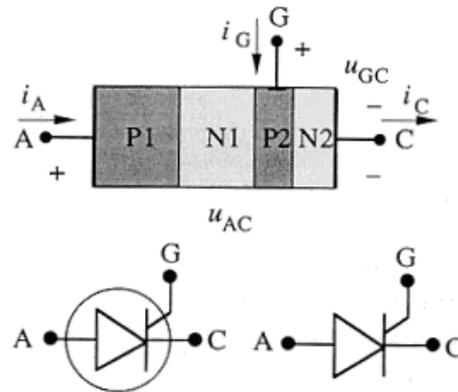


Fig. 5.5: Tiristore con relativo schema equivalente e simboli

Il componente presenta tre terminali A (*anodo*), C (*catodo*) e G (*gate*). Questa struttura determina un comportamento simile a quello del diodo, come lo stesso simbolo evidenzia: un diodo con un morsetto in più, il gate.

Polarizzato inversamente (C positivo rispetto ad A), si comporta come un diodo: conduce una debole corrente inversa; in pratica è un circuito aperto.

Polarizzato direttamente (A positivo rispetto a C), *continua a non condurre*; per mandarlo in conduzione è necessario fornire un *impulso di corrente* (una forte corrente di breve durata) al gate G; l'impulso lo fa entrare in conduzione e rimane in conduzione (anche se la corrente in ingresso al gate si annulla) fino a quando non viene polarizzato negativamente. Si comporta quindi come un diodo controllato in accensione.

Esiste anche una componente analogo al tiristore che si può controllare anche in spegnimento (**GTO: Gate Turn-off Thyristor**), iniettando nel gate un impulso di corrente negativo durante la fase di conduzione; a parità di potenza costa di più; i valori di potenza e di correnti massime per cui viene costruito sono per ora inferiori a quelli del tiristore.

Esistono delle limitazioni nell'utilizzo di tali componenti in termini di tensione applicata e di corrente di conduzione:

- la *tensione nominale* rappresenta la massima tensione inversa sostenibile dal componente elettronico; se viene superata, il componente elettronico si distrugge (scarica);
- la *corrente nominale* rappresenta la massima corrente di conduzione diretta supportabile dal componente elettronico; se viene superata, il componente non è in grado di dissipare l'energia corrispondente alle proprie perdite joule ed anche in questo caso il fenomeno è distruttivo.

Convertitori statici: raddrizzatori e invertitori

I componenti appena visti servono per costruire i *convertitori statici*. Ne esistono di differenti tipi: i circuiti che realizzano la conversione **ac/dc** sono detti *raddrizzatori* mentre quelli che realizzano la conversione **dc/ac** sono detti *invertitori*.

In alcuni casi si effettua anche una doppia conversione per passare da corrente continua a corrente continua con diverso valore di tensione (**dc/dc**); in questo caso si utilizza un invertitore seguito da un raddrizzatore con eventuale interposizione di un trasformatore; in alcune applicazioni si utilizza una macchina statica detta *chopper* che può realizzare la doppia conversione.

Le macchine statiche possono anche essere utilizzate per la conversione **ac/ac** con variazione della frequenza: in questo caso si ha lo schema inverso del precedente con un raddrizzatore seguito da un invertitore: è la macchina che abbiamo visto essere utilizzata per la realizzazione di azionamenti a velocità (tipo *sincroconvertitori ac/dc/ac*).

Una soluzione analoga, senza variazione della frequenza, costituisce lo schema di principio di un sistema di continuità (**UPS**, Uninterruptible Power Supply): quando la rete elettrica alimenta normalmente i carichi, le batterie di accumulatori sono mantenute in carica; in caso di mancanza di tensione sulla rete, i carichi continuano ad essere alimentati dalle batterie tramite l'inverter (gruppi di continuità).

Ove le potenze, le correnti e le tensioni lo richiedono, il singolo dispositivo (diodo, transistor, tiristore, ecc...) indicato negli schemi che seguono potrebbe essere in realtà realizzato con più componenti in parallelo e/o in serie.

Raddrizzatori monofase a semplice semionda

Il raddrizzatore più semplice che si può realizzare a partire da una alimentazione sinusoidale monofase è il raddrizzatore ad una semionda, costituito da un solo diodo inserito in configurazione serie tra rete e carico.

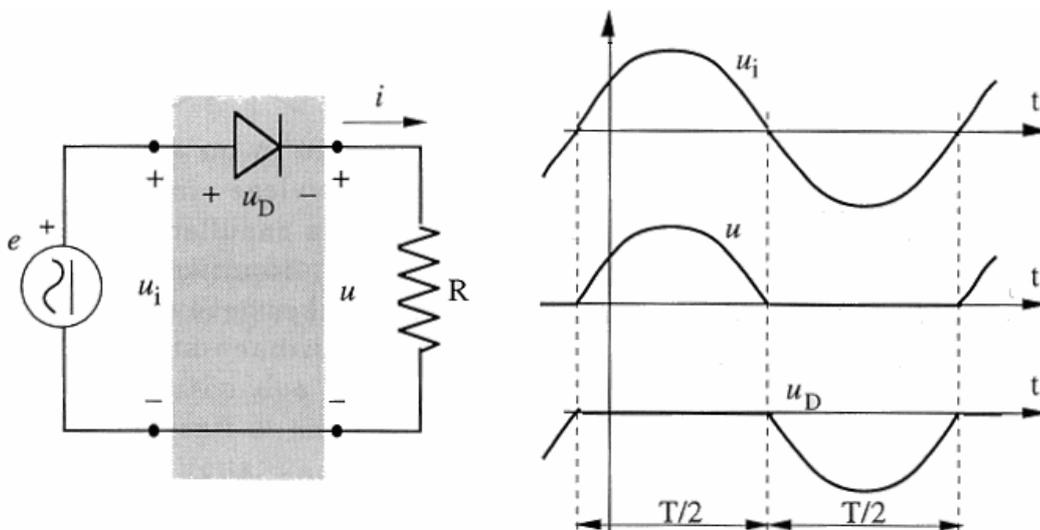


Fig. 5.6: raddrizzatore monofase a singola semionda

L'andamento della tensione sul carico rappresenta, ovviamente, anche l'andamento della corrente (si divide per R). Il funzionamento del dispositivo è estremamente semplice in quanto:

- $u_i > 0$: il diodo è in conduzione e la sua caduta u_D è nulla (diodo ideale) e pertanto la tensione sul carico è $u = u_i$ e la corrente $i = u/R$;
- $u_i < 0$: il diodo risulta interdetto e pertanto la corrente che fluisce nella maglia è nulla, la caduta sul diodo è $u_D = u_i$ (diodo ideale) e la tensione sul carico è nulla.

Si vede quindi che corrente e tensione sul carico sono unidirezionali; il valore medio della tensione risulta $U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_i \cong 0,45U_i$, dove U_i è il valore efficace di u_i .

Raddrizzatori monofase a due semionde a ponte di Graetz

Raddrizzatore a due semionde realizzato utilizzando quattro diodi in una configurazione circuitale detta ponte di Graetz:

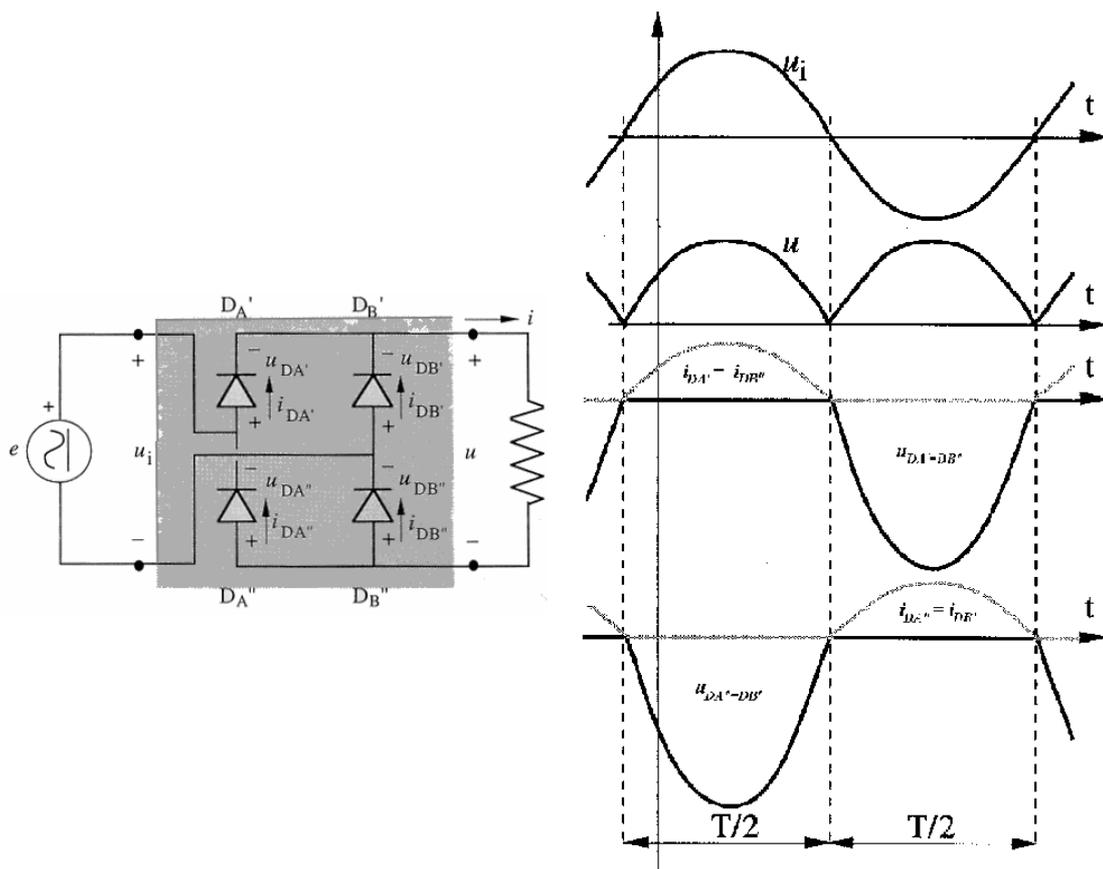


Fig. 5.7: raddrizzatore monofase a ponte di Graetz

I diodi conducono a coppie in maniera incrociata realizzando:

- $u_i > 0$: i diodi DA' e DB'' sono in conduzione mentre i diodi DA'' e DB' sono in interdizione, e pertanto la tensione sul carico è $u = u_i$ e la corrente $i = u/R$
- $u_i < 0$ i diodi DA'' e DB' sono in conduzione, mentre i diodi DA' e DB'' sono in interdizione: $u = -u_i (>0)$, $i = u/R$

In questo caso:
$$U_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_i \cong 0,9U_i$$

Raddrizzatore trifase a ponte di Graetz

Permette di ottenere tensioni e correnti unidirezionali con fluttuazioni molto più contenute (si riduce il fattore di ondulazione).

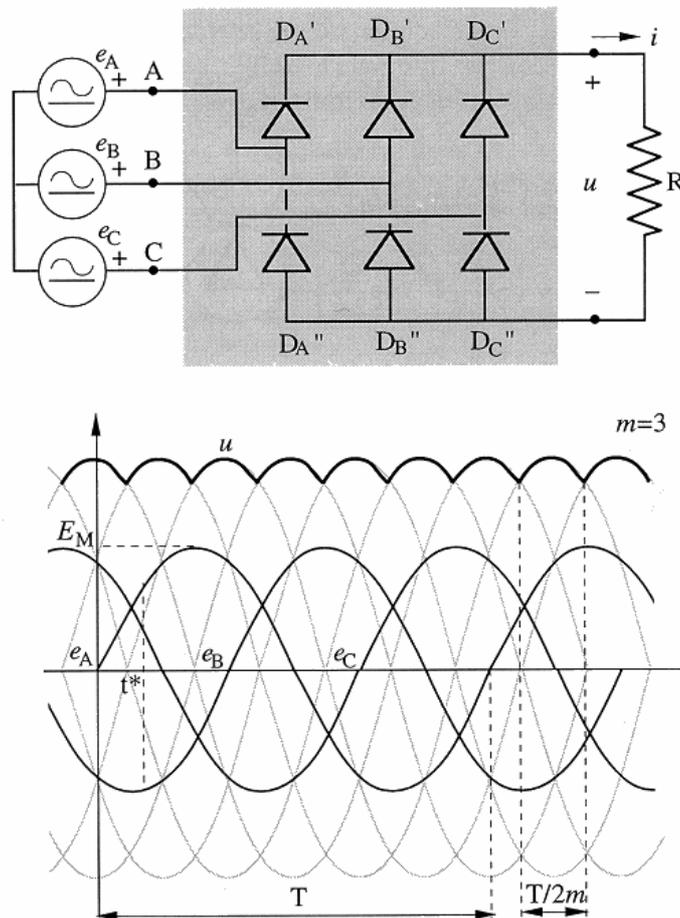


Fig. 5.8: raddrizzatore trifase a ponte di Graetz

La relazione fra valore medio della tensione in uscita e valore efficace della tensione in ingresso risulta $U_0 \cong 2,34U_i$.

Raddrizzatore controllato

Gli schemi circuitali precedentemente proposti possono essere realizzati sostituendo ai normali diodi raddrizzatori dei tiristori; si ottengono così dei raddrizzatori controllati: cioè raddrizzatori in cui può essere variato a piacimento il valor medio della tensione di uscita.

Consideriamo, a titolo esemplificativo, il raddrizzatore ad una semionda. Variando l'accensione del tiristore (*rispetto all'istante di commutazione del diodo*) si ottiene una tensione di uscita unidirezionale differente da quella ottenibile con un semplice diodo.

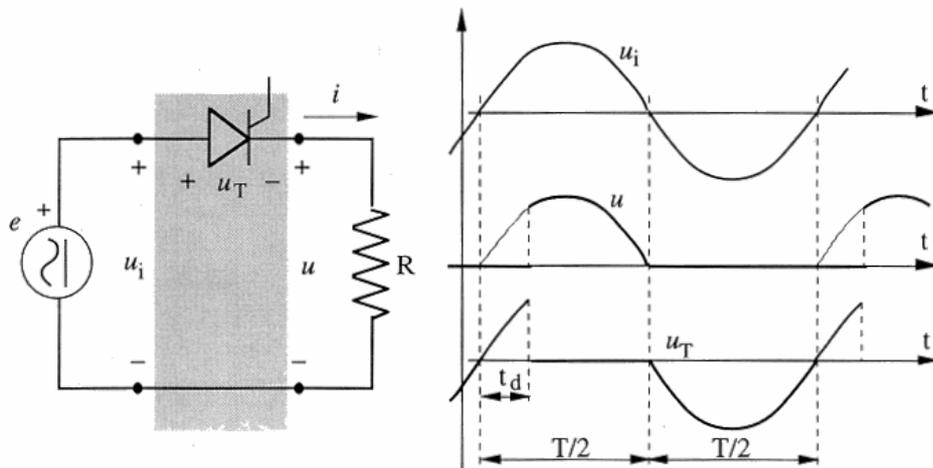


Fig. 5.9: raddrizzatore a singola semionda controllato

A valle dei raddrizzatori vanno usati *filtri* (circuiti formati da induttori e condensatori) per livellare la tensione, cioè per ridurre le oscillazioni entro limiti prestabiliti.

Invertitori (inverter) monofase

Uno schema tipicamente utilizzato è quello a ponte con interruttori ideali.

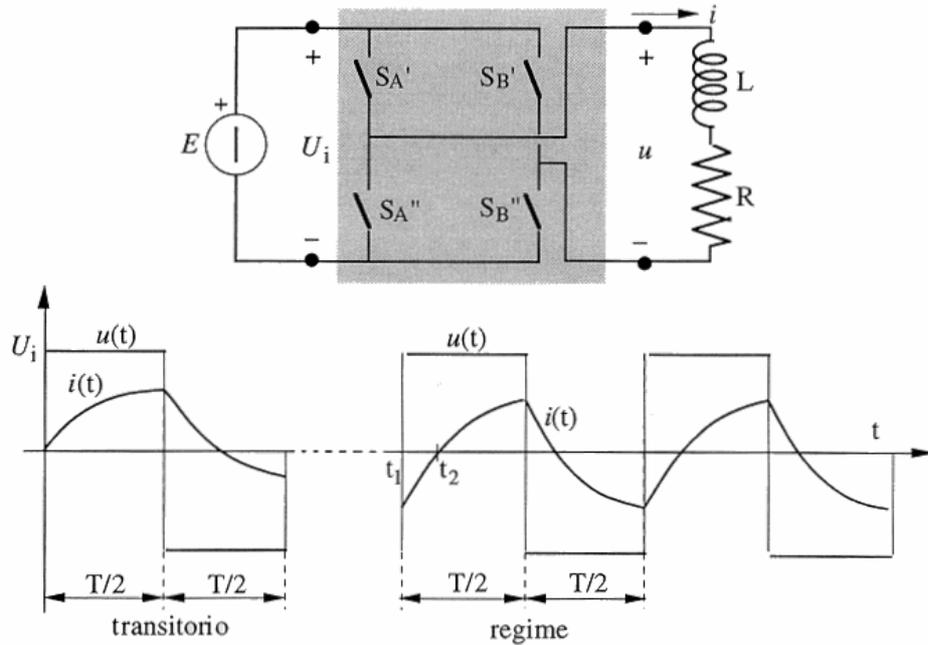


Fig. 5.10: Invertitore monofase con interruttori ideali

Se si ipotizza di realizzare la sequenza:

- per un tempo pari a $T/2$ chiusura della coppia di interruttori $S_{A'}$ e $S_{B''}$, mantenendo aperti $S_{A''}$ e $S_{B'}$, allora si applica al carico la tensione costante fornita dal generatore ($u = U_i = E$)
- per un tempo pari a $T/2$ apertura della coppia di interruttori $S_{A'}$ e $S_{B''}$, chiudendo simultaneamente gli interruttori $S_{A''}$ e $S_{B'}$, allora si applica al carico la tensione costante fornita dal generatore ma invertita ($u = -U_i = -E$);

In questo modo si ottiene in uscita una tensione alternata anche se “rettangolare”; l'andamento della corrente negli istanti iniziali ed a regime dipende dal fatto che il carico è un R-L che si carica e scarica ad ogni periodo. Per ottenere una forma d'onda sinusoidale si usano appositi filtri.

Gli interruttori ideali ipotizzati nello schema a ponte si possono realizzare mediante interuttori elettronici costituiti da transistori (si portano in conduzione ed interdizione “comandando” la base).

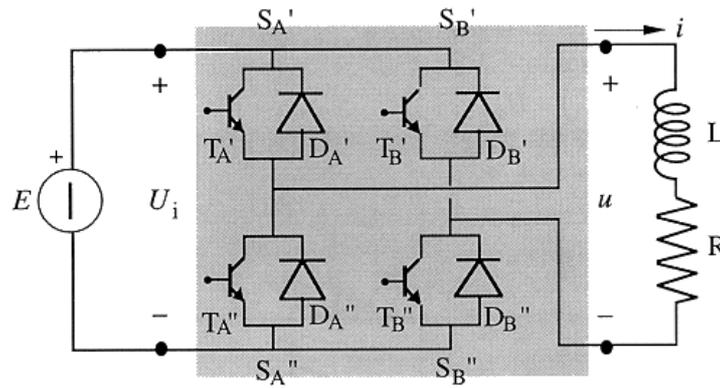


Fig. 5.11 - Invertitore monofase: realizzazione con 4 interruttori controllati

Dato che la corrente che attraversa ciascun transistor a regime si inverte durante la fase di conduzione (*se il carico è R-L*), e questo non sarebbe accettabile per un transistor che ammette solo corrente nel verso collettore - emettitore, è necessario realizzare l'interruttore statico combinando in parallelo un interruttore ed un diodo in contofase (*diodo di libera circolazione*).

In tal modo quando il transistor è comandato in accensione e la corrente è ancora negativa questa viene condotta dal diodo; al momento del cambio di segno della corrente, questa inizierà a percorrere il transistor ed il diodo terminerà spontaneamente di condurre.

Attraverso un opportuno circuito di controllo (*realizzato mediante opportuni amplificatori operazionali ovvero con microprocessori dedicati*) si effettua il comando delle coppie di transistori in conduzione ovvero in interdizione ad ogni intervallo di tempo ($T/2$).

Invertitore trifase

In analogia con gli schemi realizzati per il raddrizzamento, è possibile realizzare un invertitore trifase, sempre nella configurazione a ponte:

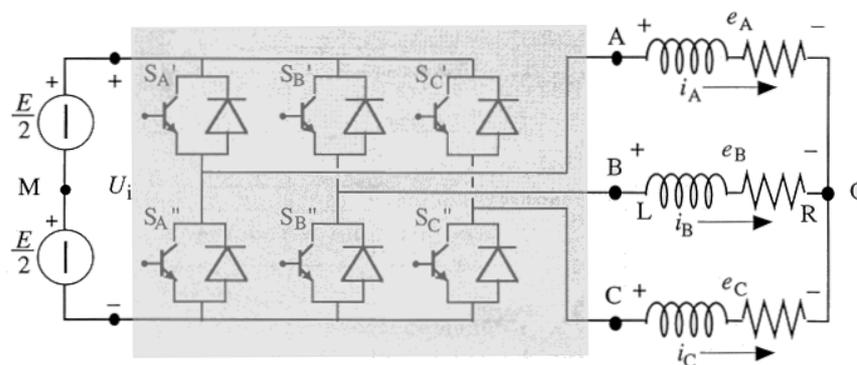


Fig. 5.12: invertitore trifase

Gli schemi proposti per la realizzazione di invertitori permettono con facilità di realizzare un dispositivo a frequenza di uscita variabile ed a tensione costante.

Se si vuole regolare anche il valore della tensione di uscita si debbono adottare delle tecniche di controllo dell'accensione e dello spegnimento degli interruttori elettronici differenti da quelle proposte.

In particolare una tecnica molto utilizzata è quella del **PWM** (*Pulse Width Modulation*) che prevede diverse commutazioni degli interruttori nel semiperiodo ($T/2$) realizzando forme d'onda che possono essere "filtrate con facilità" per ottenere sinusoidi e con valore efficace variabile con continuità.

E' possibile realizzare **convertitori ac/ac** collegando opportunamente due ponti di Graetz controllati (con tiristori): si possono usare solo in alcuni casi, ad es. se in entrambe le reti ac collegate sono presenti macchine *sincrone*: sono detti *sincroconvertitori (ac/cc/ac)*, utilizzati per pilotare motori sincroni di propulsione nelle grandi navi da crociera.

Con tecniche analoghe, infine, si possono realizzare **conversioni dirette ac/ac** con frequenza e tensione variabili in uscita: sono detti *cicloconvertitori* utilizzati anch'essi per pilotare motori sincroni di propulsione nelle moderne navi da crociera.

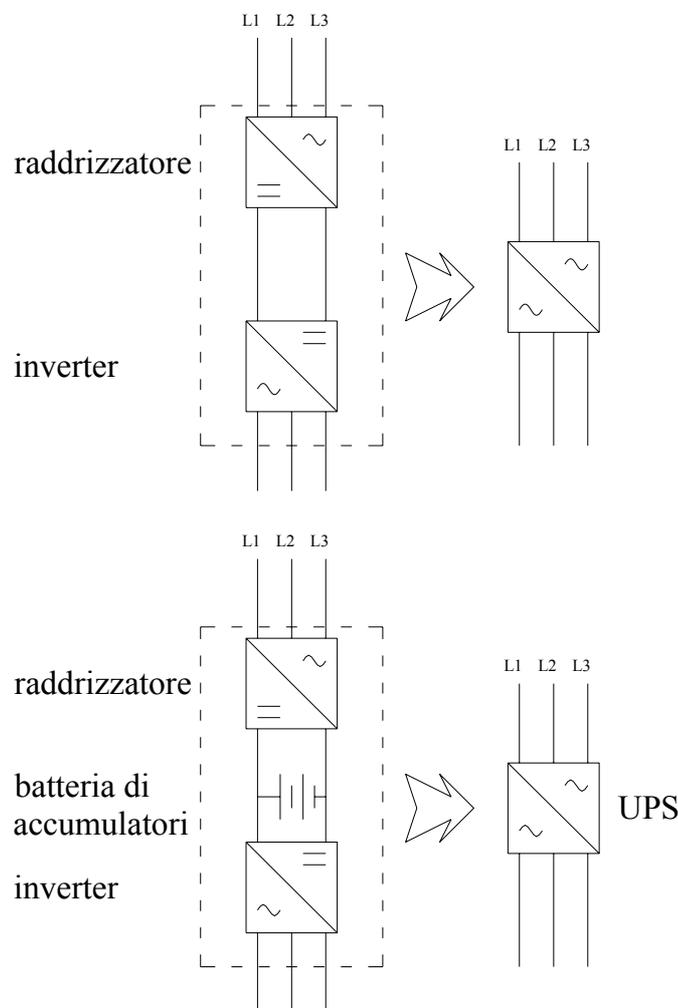


Fig. 5.13: Simboli e "schemi di principio" di convertitori ac/ac con raddrizzatore/inverter.