

TRASFORMATORI

1 GENERALITA'

Il trasformatore è una macchina elettrica statica, cioè priva di organi in movimento, il cui funzionamento è fondato sul principio dell'induzione elettromagnetica; esso può quindi funzionare solo in regime variabile.

Si può dire che un trasformatore è un doppio bipolo in grado di assorbire potenza ad una porta (detta "primario") e di renderla pressoché integralmente all'altra (secondario), modificando i livelli delle tensioni e delle correnti.

Consente quindi di variare i valori di tensione fra l'ingresso e l'uscita a parità di potenza

1.1 UTILIZZI:

- Per trasportare la potenza elettrica a grandi distanze è necessario ricorrere a linee di trasmissione funzionanti a tensioni molto maggiori sia di quelle convenienti per i generatori sia di quelle idonee alla distribuzione ai carichi utilizzatori. Per scambiare potenza tra le parti del sistema elettrico operanti a livelli di tensione diversi vengono utilizzati i trasformatori.
- Il livello di tensione al quale gli enti erogatori forniscono l'energia elettrica agli utenti è spesso diverso da quello richiesto dai dispositivi contenuti nelle apparecchiature elettriche; anche in questo caso si ottiene la tensione opportuna per mezzo di trasformatori
- Modificare il valore dell'impedenza vista tra due terminali: in talune applicazioni in cui occorre ottenere il massimo trasferimento di potenza da un generatore ad un determinato carico, si può impiegare un trasformatore che realizza l'adattamento di impedenza
- Applicazioni in cui l'assenza di contatto elettrico garantisce sicurezza per l'utente: Per trasferire potenza tra due parti di una rete elettrica, mantenendole elettricamente isolate, si interpone un trasformatore, detto trasformatore di isolamento

1.2 GRANDEZZE PRINCIPALI:

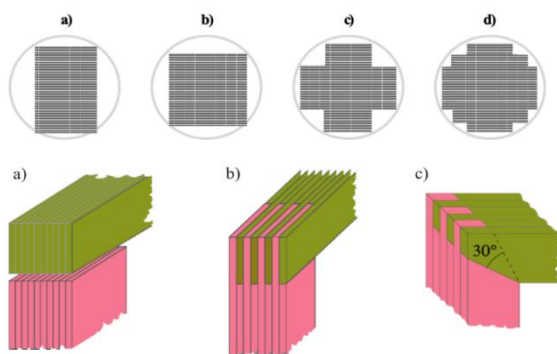
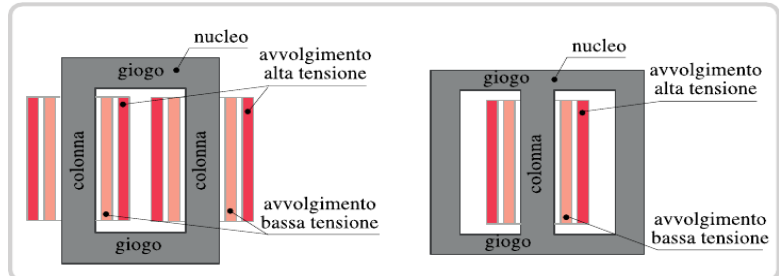
V_{1n}	Tensione nominale primaria (nominale = efficace)
V_{2n}	Tensione nominale secondaria
I_{1n}	Corrente nominale primaria
I_{2n}	Corrente nominale secondaria
P_n	Potenza nominale (potenza apparente S , in VA)
f_n	Frequenza nominale
n	Rapporto di trasformazione

2 TRASFORMATORE MONOFASE

Un trasformatore monofase è costituito da due induttori, detti avvolgimenti primario e secondario, magneticamente ben accoppiati tra loro, utilizzando un circuito magnetico ad elevata permeabilità, detto nucleo ferromagnetico.

Nucleo: il nucleo ferromagnetico è laminato per compensare il fenomeno delle correnti parassite.

- Nucleo a colonne (a): sia l'avvolgimento primario che il secondario sono suddivisi in due semi-avvolgimenti, avvolti sulle due colonne;
- Nucleo a mantello o corazzato (b)



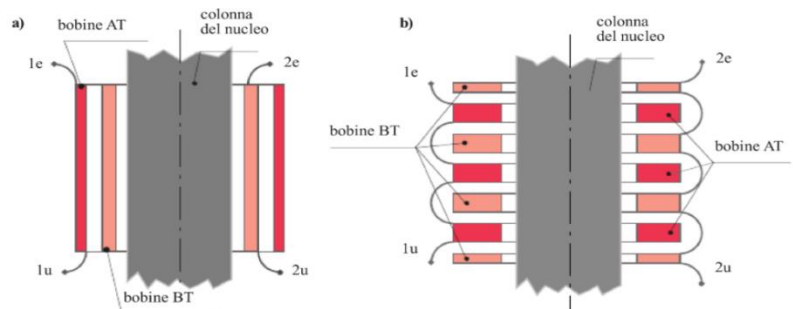
Per ragioni costruttive i nuclei laminati presentano quasi sempre un certo numero di giunti che, costituendo dei traferri, devono essere di minimo spessore per minimizzare la riluttanza del circuito magnetico

Colonne: Tratti di circuito magnetico lungo i quali sono alloggiati gli avvolgimenti

Gioghi: Tratti di raccordo

Avvolgimenti: Sono costituiti da conduttori di rame o di alluminio, isolati esternamente mediante smalto sintetico, oppure mediante fogli di polietilene o nastri di tessuto di vetro, impregnati con resina epossidica; I due avvolgimenti non si fanno uno a destra e uno a sinistra, su due colonne diverse, perché altrimenti se uno avesse molte spire in più rispetto all'altro avrei una dissimmetria scomoda: pertanto si dispongono avvolti l'uno sull'altro sulla stessa colonna

- Avvolgimento concentrico (a): se hanno diametro diverso, dispongo quello a tensione minore più internamente
- Avvolgimento alternato (b): se hanno lo stesso diametro

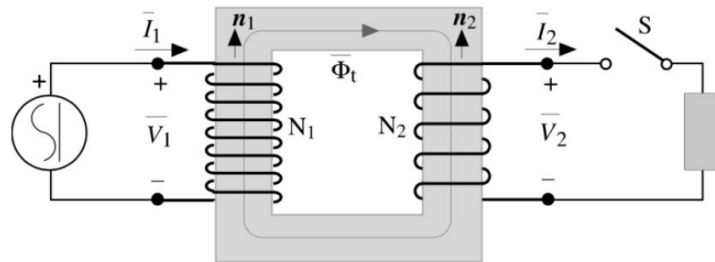


2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

2.2 TRASFORMATORE IDEALE

Il trasformatore ideale è il modello più semplice per lo studio di questi macchinari, che presenta le seguenti ipotesi di funzionamento:

- La riluttanza \mathfrak{R} del nucleo è nulla, poiché considero $\mu \rightarrow \infty$
- Non si hanno perdite per **isteresi** o per **correnti parassite** nel nucleo
- Si ha un **accoppiamento magnetico perfetto** tra i due avvolgimenti ($k=1$)
- Le **resistenze degli avvolgimenti** sono nulle



Flussi concatenati agli avvolgimenti

- $\Phi_{c,1} = N_1 \cdot \Phi_t$
- $\Phi_{c,2} = -N_2 \cdot \Phi_t$ (ci va il – perché il flusso concatenato al secondario è discorde con quello da lui prodotto, per la regola della mano destra)

Per la legge di Faraday (nel dominio dei fasori, in cui derivare significa moltiplicare per $j\omega$)

- $\dot{E}_1 = \dot{V}_1 = j\omega \Phi_{c,1} = j\omega N_1 \dot{\Phi}_t$
- $\dot{E}_2 = \dot{V}_2 = -j\omega \Phi_{c,2} = j\omega N_2 \dot{\Phi}_t$

ATTENZIONE: Perché \dot{V}_1 ha il segno + e \dot{V}_2 ha il segno –?

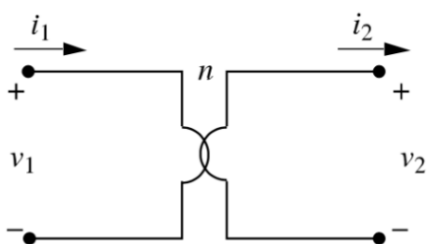
Quando noi scriviamo la legge di Faraday, mettiamo il meno perché ci poniamo dal punto di vista del generatore: infatti tale – rappresenta la corrente generata che si oppone alla variazione del flusso. Pertanto, la legge di Faraday utilizza i riferimenti non associati.

Nell'avvolgimento primario uso i riferimenti associati, e quindi cambio segno alla legge di Faraday

Nell'avvolgimento secondario uso i riferimenti non associati, e quindi il – resta

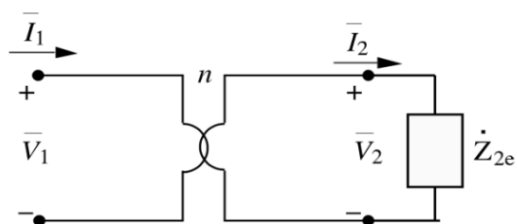
Per la legge di Hopkinson (vedendo il trasformatore ideale come un circuito magnetico)

- $N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = \mathfrak{R} \dot{\Phi}_t = 0$



La potenza istantanea erogata a secondario dal trasformatore ideale è uguale alla potenza istantanea assorbita a primario (conservazione delle potenze)
Vale anche per le potenze complesse:

$$\dot{S}_2 = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* = \dot{V}_1 \dot{I}_1^* = \dot{S}_1$$



Se i morsetti della porta 2 del trasformatore ideale vengono chiusi su un'impedenza esterna \dot{Z}_{2e} , vale la legge di Ohm

$$\dot{Z}_{2e} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2}$$

L'impedenza equivalente vista dalla porta 1 risulta essere:

$$\dot{Z}_{1eq} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \frac{n\dot{V}_2}{\frac{\dot{I}_2}{n}} = n^2 \dot{Z}_{2e}$$

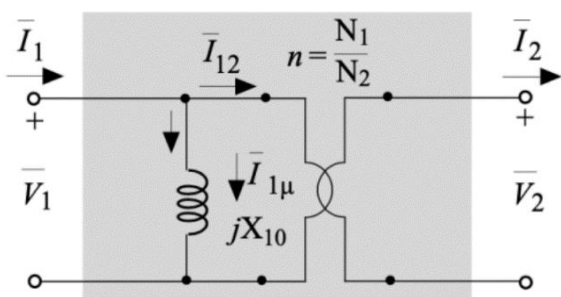
L'impedenza equivalente vista dal primario è n^2 volte l'impedenza vista dal secondario;
Questa proprietà del trasformatore ideale è detta **trasferimento di impedenza**.

2.3 TRASFORMATORE REALE

Andiamo adesso a rimuovere una per volta tutte le ipotesi che mi garantiscono l'idealità del trasformatore, per studiare quello che accade in un trasformatore reale. Ciò si fa sostituendo ognuno dei fenomeni che avevo trascurato con una componente elettrica, da inserire intorno al circuito base del trasformatore ideale

2.3.1 RILUTTANZA DEL NUCLEO NON NULLA

Si considera anzitutto che la permeabilità del nucleo ferromagnetico non sia infinita.



La riluttanza non nulla del nucleo viene rappresentata inserendo in parallelo al primario un induttore di impedenza interna jX_{10}

Le equazioni scritte in precedenza per il trasformatore ideale continuano a valere, nella parte centrale del circuito (che rappresenta, infatti, il trasformatore ideale)

FUNZIONAMENTO A VUOTO

Quando la corrente secondaria è nulla (come in figura) la corrente primaria verifica la legge di Hopkinson:

$$N_1 \dot{I}_{1\mu} = \Re \dot{\Phi}_t$$

Quindi, anche quando il trasformatore funziona col secondario aperto, esso assorbe un po' di corrente $\dot{I}_{1\mu}$ (che serve a creare flusso) che è detta *corrente di magnetizzazione*.

La corrente di magnetizzazione è in fase con il flusso $\dot{\Phi}_t$ ma non è nulla.

N_1 è il numero di spire dell'avvolgimento primario.

Applicando la legge di Faraday e ricordando che $L_1 = \frac{N_1^2}{\Re}$ ottengo:

$$\dot{V}_1 = j\omega N_1 \dot{\Phi}_t = j\omega N_1 \cdot \frac{N_1 \dot{I}_{1\mu}}{\Re} = j\omega L_1 \dot{I}_{1\mu} = jX_{10} \dot{I}_{1\mu}$$

Quindi nel caso di riluttanza del nucleo non nulla, il trasformatore si comporta a primario come un bipolo di impedenza jX_{10} , che corrisponde ad un induttore (ecco perché lo si rappresenta come un induttore sul circuito elettrico).

X_{10} è detta *reattanza di magnetizzazione*

FUNZIONAMENTO A CARICO

Quando la corrente secondaria non è nulla, e quindi collego un carico al secondario, le correnti primaria \dot{I}_1 e secondaria \dot{I}_2 devono verificare la seconda legge di Kirchhoff per i circuiti magnetici

$$N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = \Re \dot{\Phi}_t$$

In essa $\dot{\Phi}_t$ può ancora essere espresso per mezzo della legge di Hopkinson che avevo scritto per il funzionamento a vuoto, perché, essendo \dot{V}_1 imposta, essa ha lo stesso valore che ha a vuoto.

$$N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = \Re \cdot \frac{N_1 \dot{I}_{1\mu}}{\Re} = N_1 \dot{I}_{1\mu}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1\mu} + \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2$$

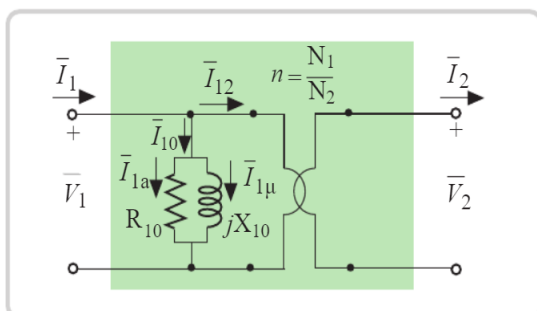
Equazioni del funzionamento a carico

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = n \bar{V}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{1\mu} + \frac{1}{n} \bar{I}_2 = \bar{I}_{1\mu} + \bar{I}_{12} \end{cases}$$

2.3.2 PERDITE NEL NUCLEO NON NULLE

Per considerare le perdite per isteresi e correnti parassite che si producono nel nucleo ferromagnetico, alla corrente magnetizzante $\dot{I}_{1\mu}$, va aggiunta la componente \dot{I}_{1a} in fase con essa:

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{1\mu} + \dot{I}_{1a}$$



La corrente \dot{I}_{10} è detta *corrente a vuoto*

Per rappresentare questa perdita di potenza attiva, aggiungo pertanto una resistenza in parallelo al primario e all'induttore che rappresenta la riluttanza non nulla.

L'impedenza totale data da L+R è detta *impedenza di magnetizzazione*

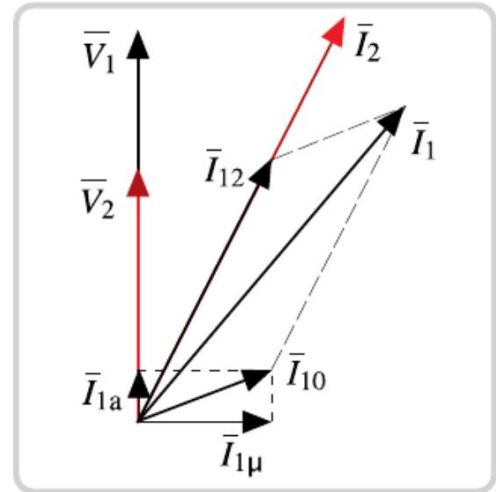
Equazioni del funzionamento a carico

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = n \bar{V}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \frac{1}{n} \bar{I}_2 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} \end{cases}$$

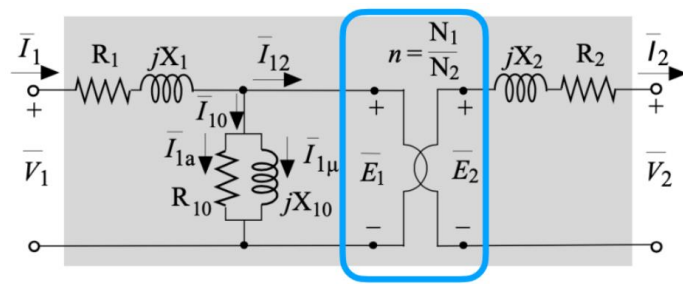
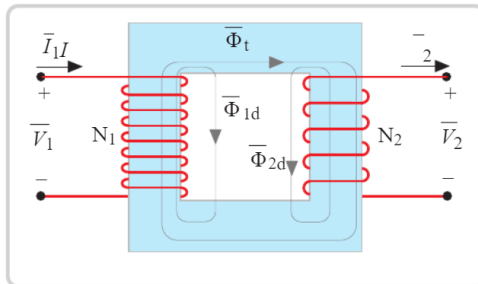
Funzionamento a vuoto

Se è a vuoto ho $\bar{I}_2 = 0$ e quindi anche \bar{I}_{12}

Pertanto, il modello di trasformatore qui considerato si comporta in modo ideale per quanto riguarda le tensioni alle porte, che sono proporzionali tra loro tramite il rapporto di trasformazione n , ma non per le correnti alle porte, che non lo sono a causa della corrente a vuoto $\bar{I}_{10} = \bar{I}_{1\mu} + \bar{I}_{1a}$



2.3.3 ACCOPPIAMENTO NON PERFETTO



L'accoppiamento non perfetto tra gli avvolgimenti è dovuto a linee di flusso che abbandonano il nucleo per richiudersi attraverso percorsi in aria, concatenandosi con un solo avvolgimento:

- Φ_t : flusso di mutua induzione concatenato con entrambi gli avvolgimenti
- Φ_{1d} : flusso di dispersione del primario (prodotto dal primario e non concatenato al secondario)
- Φ_{2d} : flusso di dispersione del secondario (prodotto dal secondario e non concatenato al primario)

Ammettendo che ciascun flusso di dispersione sia concatenato con tutte le spire del relativo avvolgimento, a tali flussi si possono associare le induttanze di dispersione:

- $L_{1d} = \frac{N_1 \Phi_{1d}}{I_1} \rightarrow X_1 = \omega L_{1d}$
- $L_{2d} = \frac{N_2 \Phi_{2d}}{I_2} \rightarrow X_2 = \omega L_{2d}$

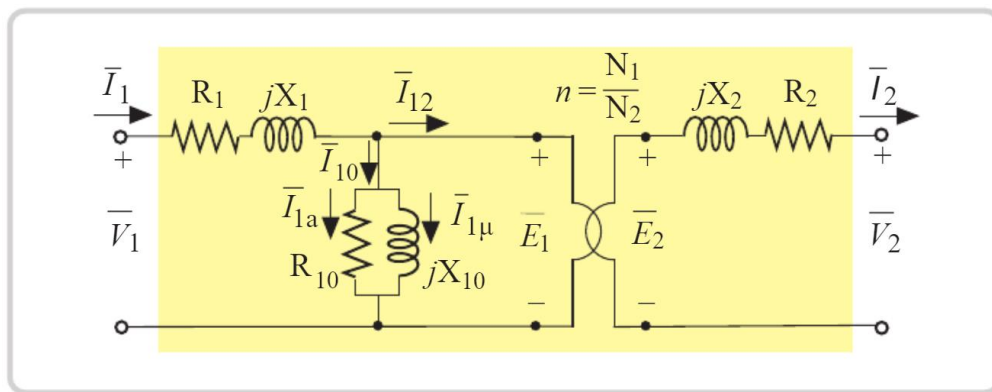
Le reattanze X_1 e X_2 sono dette "reattanze di dispersione".

Inserendo le reattanze in serie alle porte primaria e secondaria del circuito equivalente, danno conto delle tensioni indotte dovute ai flussi di dispersione

2.3.4 RESISTENZE DEGLI AVVOLGIMENTI NON NULLE

Si devono considerare infine le resistenze non nulle R_1 e R_2 degli avvolgimenti, che provocano dissipazione di potenza attiva in presenza di corrente. Esse, in serie alle porte primaria e secondaria del circuito equivalente, permettono di tenere conto delle tensioni resistive associate a tali dissipazioni.

2.3.5 MODELLO DEL TRASFORMATORE REALE COMPLETO



Le tensioni legate al solo flusso di mutua induzione Φ_t valgono:

$$\begin{cases} \bar{E}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_t \\ \bar{E}_2 = j\omega N_2 \bar{\Phi}_t \end{cases}$$

Esse coincidono con le tensioni alle porte del trasformatore ideale del circuito equivalente;
A causa delle tensioni sulle resistenze e sulle reattanze di dispersione degli avvolgimenti esse non coincidono con le tensioni \bar{V}_1 e \bar{V}_2 effettivamente presenti alle porte del trasformatore reale, che valgono:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{E}_1 + (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 \\ \bar{V}_2 = \bar{E}_2 - (R_2 + jX_2)\bar{I}_2 \end{cases}$$

Applicando al circuito equivalente completo rispettivamente la seconda e la prima legge di Kirchhoff:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + n(R_2 + jX_2)\bar{I}_2 + n\bar{V}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \frac{1}{n}\bar{I}_2 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} \end{cases}$$

Queste equazioni descrivono il comportamento del trasformatore reale, che pertanto risulta diverso da quello del trasformatore ideale sia per quanto riguardale tensioni alle porte, che non sono proporzionali tra loro a causa delle tensioni sulle resistenze e sulle reattanze di dispersione, sia per quanto concerne le correnti alle porte, che non lo sono a causa della corrente a vuoto.

Nel trasformatore reale il rapporto tra le tensioni ai terminali V_1 e V_2 non coincide, in una condizione di funzionamento generica, con il rapporto di trasformazione n , e quindi con il **rapporto spire N_1/N_2** come accadeva nelle condizioni ideali

2.4 PROVE DI FUNZIONAMENTO SUI TRASFORMATORI

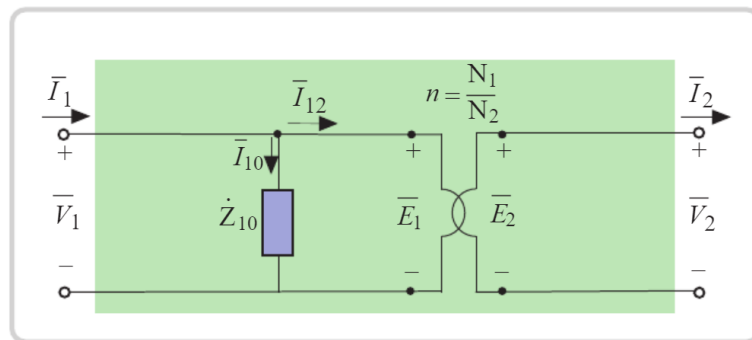
Per determinare i parametri del circuito equivalente, si utilizzano due tipologie di prova:

- Prova a vuoto
- Prova in cortocircuito

2.4.1 PROVA A VUOTO

La prova a vuoto si effettua con il secondario aperto, e valgono le seguenti condizioni:

- La corrente \dot{I}_2 vale 0 e di conseguenza anche la corrente \dot{I}_{12}
- Ho che $\dot{I}_1 = \dot{I}_{10}$, quindi l'impedenza di magnetizzazione e quella di dispersione 1 sono in serie
- $\dot{Z}_{10} \gg \dot{Z}_1$, quindi posso trascurare l'impedenza di dispersione 1
- Posso trascurare anche l'impedenza di dispersione 2 perché si trova su un ramo con corrente nulla
- Chiamo la tensione del secondario \dot{V}_2 in condizioni di messa a vuoto come \dot{V}_{20}



Otengo le seguenti equazioni/grandezze:

- $\dot{V}_1 = n\dot{V}_{20}$
- $I_{10} = \frac{V_{1n}}{Z_{10}}$ corrente a vuoto primario
- $i_{10}\% = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \cdot 100$ corrente a vuoto primario percentuale

Quindi il trasformatore reale a vuoto si comporta come un trasformatore ideale per quanto riguarda le tensioni, ma non per le correnti.

A cosa serve la prova a vuoto?

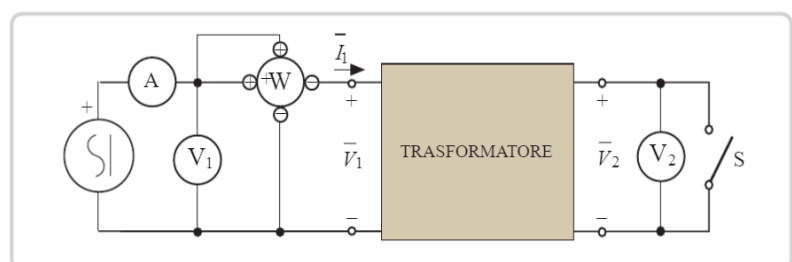
Alimentando il primario, gli strumenti di misura quali amperometro, voltmetro e wattmetro forniscono le misure di I_{10} , V_1' , V_2' , P' .

Grazie ad essi calcolo il modulo dell'impedenza Z_{10} e il fattore di potenza

- $Z_{10} = \frac{V_1'}{I_1'}$
- $\cos(\varphi) = \frac{P'}{V_1' \cdot I_1'}$

Da cui ottengo i valori di R_{10} e X_{10}

- $R_{10} = \frac{1}{Y_{10} \cdot \cos(\varphi)}$
- $X_{10} = \frac{1}{Y_{10} \cdot \sin(\varphi)}$

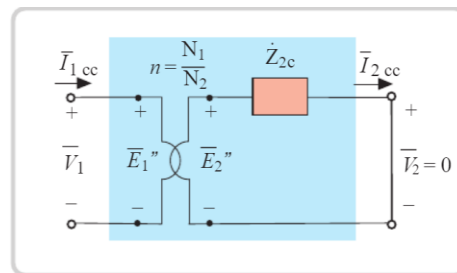
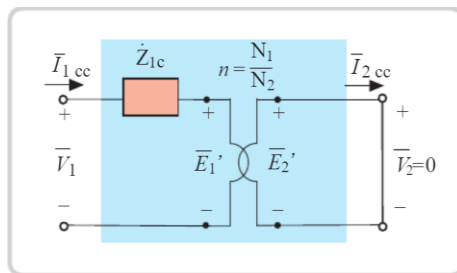
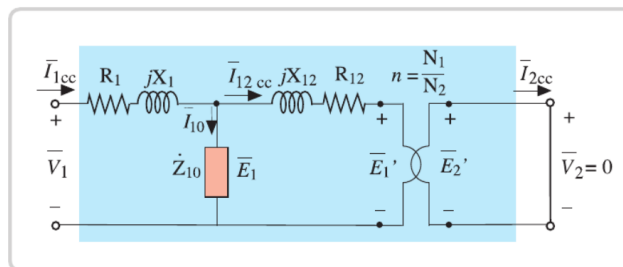


Dato che il trasformatore a vuoto non ha comportamento lineare, conviene effettuare la prova a vuoto con valore efficace della tensione primaria pari alla tensione nominale ($V'_1 = V_{1n}$) in modo da determinare il valore di Z_{10} nelle condizioni in cui il trasformatore è destinato a funzionare.

2.4.2 PROVA IN CORTOCIRCUITO

La prova in cortocircuito si effettua con il secondario cortocircuitato, e valgono le seguenti condizioni:

- Nel circuito equivalente si utilizza la proprietà di *trasferimento di impedenza* del trasformatore ideale; infatti, l'impedenza di dispersione \dot{Z}_2 al secondario viene sostituita da un'impedenza al primario che chiamo \dot{Z}_{12} avente parametri $R_{12} = n^2 R_2$ e $X_{12} = n^2 X_2$
- La tensione \dot{V}_2 vale 0 e di conseguenza anche $\dot{E}_1 = 0$
- Poiché $\dot{E}_1 = 0$, \dot{Z}_{10} e \dot{Z}_{12} sono sottoposte entrambe alla tensione e quindi sono in parallelo
- Poiché tipicamente $\dot{Z}_{10} \gg \dot{Z}_{12}$ posso trascurare \dot{Z}_{10}
- Considero quindi in serie \dot{Z}_1 e \dot{Z}_{12} che danno luogo a \dot{Z}_{1c}



Sempre grazie al trasferimento di impedenza, so che il circuito equivalente che ho trovato con \dot{Z}_{1c} può tranquillamente essere trasformato in un altro circuito con impedenza \dot{Z}_{2c} al secondario tale che

$$\dot{Z}_{1c} = n^2 \cdot \dot{Z}_{2c}$$

Otteniamo le seguenti equazioni/grandezze

- $V_{1c} = Z_{1c} I_{1n}$
 - Si definisce *tensione primaria di cortocircuito* il valore efficace della tensione primaria che, con il secondario in cortocircuito, comporta una corrente primaria di valore efficace pari alla corrente nominale I_{1n}
- $V_{2c} = Z_{2c} I_{2n}$
 - Si definisce *tensione secondaria di cortocircuito* il valore efficace della tensione secondaria che, con il primario in cortocircuito, comporta una corrente secondaria di valore efficace pari alla corrente nominale I_{2n}
 - Dalle relazioni $I_{2n} = n I_{1n}$ e $Z_{1c} = n^2 \cdot Z_{2c}$ si deduce $V_{1c} = n \cdot V_{2c}$
- $v_{1c} \% = \frac{V_{1c}}{V_{1n}} \cdot 100$
- $v_{2c} \% = \frac{V_{2c}}{V_{2n}} \cdot 100$
- $v_{1c} \% = v_{2c} \% = v_{cc} \%$

In definitiva, dato che si ha con ottima approssimazione $\dot{I}_1 = \dot{I}_{12}$, allora $\dot{I}_{1cc} = c = \frac{\dot{I}_{2cc}}{n}$

Quindi il trasformatore in cortocircuito si comporta come un trasformatore ideale con ottima approssimazione per quanto riguarda le correnti, ma non per le tensioni

A cosa serve la prova in cortocircuito?

Alimentando il primario, gli strumenti di misura quali amperometro, voltmetro e wattmetro forniscono le misure di $\dot{I}_1'', \dot{V}_1'', \dot{V}_2'', P''$

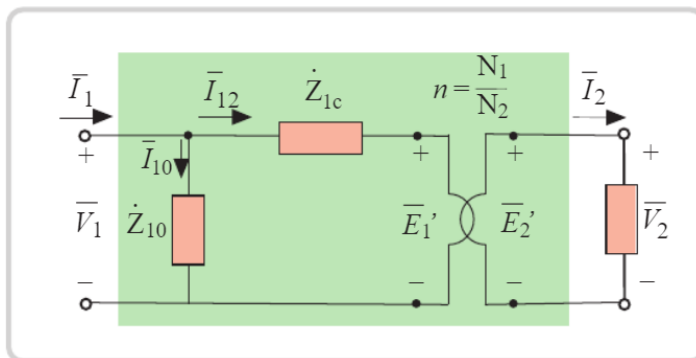
Essi permettono di determinare le impedenze in cortocircuito a primario

$$Z_{1c} = \frac{V_1''}{I_1''}, \quad Z_{2c} = \frac{Z_{1c}}{n^2}, \quad \cos\phi_{cc} = \frac{P''}{V_1'' I_1''}$$

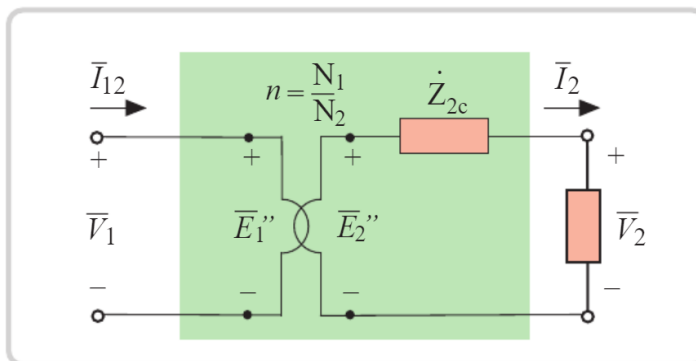
Le resistenze di cortocircuito e le reattanze di cortocircuito, le serie delle quali costituiscono rispettivamente \dot{Z}_{1c} e \dot{Z}_{2c} valgono:

$$\begin{cases} R_{1c} = Z_{1c} \cos\phi_{cc}, & X_{1c} = Z_{1c} \sin\phi_{cc} \\ R_{2c} = Z_{2c} \cos\phi_{cc}, & X_{2c} = Z_{2c} \sin\phi_{cc} \end{cases}$$

2.4.3 CIRCUITO EQUIVALENTE SEMPLIFICATO

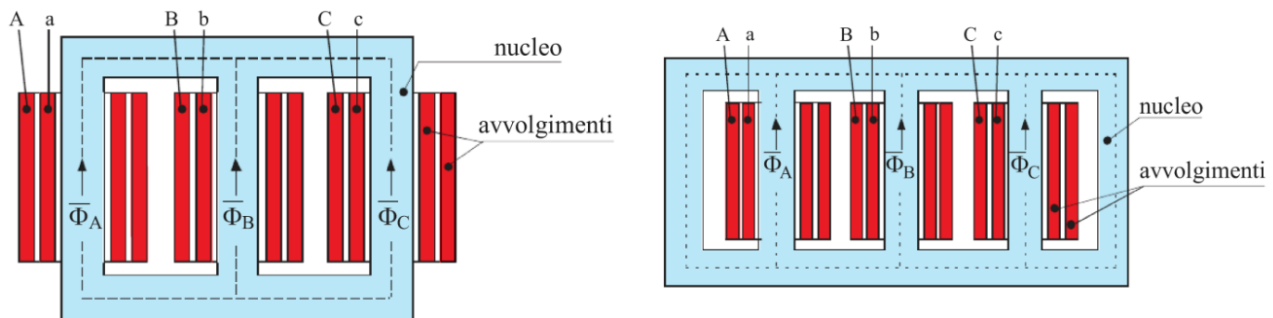


Posso applicare il “trasferimento di impedenza” come visto precedentemente, e poiché $\dot{V}_1 \approx \dot{E}_1$ e $\dot{I}_{12} \approx \dot{I}_1$ posso spostare l'impedenza \dot{Z}_{10} a monte di quella di cortocircuito (L'impedenza \dot{Z}_{10} viene così sottoposta a \dot{V}_1 invece che a \dot{E}_1 , mentre l'impedenza \dot{Z}_1 viene attraversata da \dot{I}_{12} invece che da \dot{I}_1 , e può così essere messa in serie con \dot{Z}_{12} per formare \dot{Z}_{1c})



Se poi vogliamo ulteriormente semplificare il circuito, nel caso in cui la tensione primaria \dot{V}_1 sia imposta, abbiamo che \dot{Z}_{10} è totalmente ininfluente e può essere omessa. Trascurando \dot{I}_{10} è presente solo \dot{I}_{12} .

3 TRASFORMATORI TRIFASE



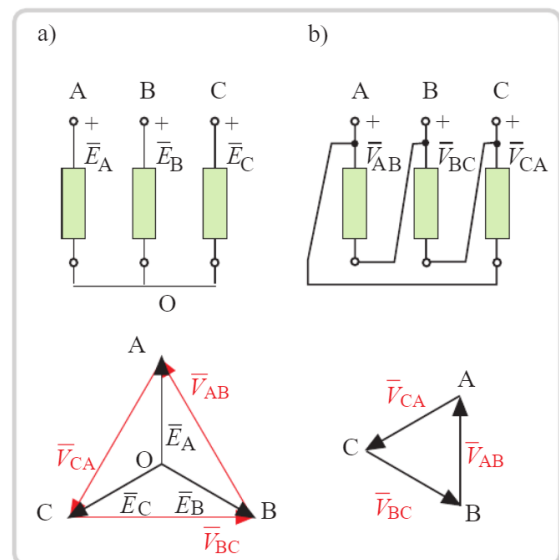
Un trasformatore trifase dispone di una terna di avvolgimenti primari, una terna di avvolgimenti secondari e di un solo nucleo ferromagnetico: il suo equivalente monofase è un normale trasformatore come quelli visti finora, per cui le tensioni a vuoto e in cortocircuito vengono riferite alle tensioni e correnti di linea (c'è un $\sqrt{3}$ in giro)

La somma dei flussi delle 3 colonne da 0

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$$

I tre avvolgimenti (primari o secondari) possono essere collegati tra loro in diversi modi, per realizzare le tre fasi interne (primarie o secondarie).

- **Collegamento a stella**, in cui i terminali con riferimento – dei tre avvolgimenti sono connessi in un unico nodo. Si indica col simbolo **Y** per i primari e **y** per i secondari.
- **Collegamento a triangolo**, in cui il terminale con riferimento – di ogni avvolgimento è connesso con quello con riferimento + dell'avvolgimento consecutivo nella sequenza ciclica delle fasi. Tale collegamento è indicato con i simboli **D** per i primari e **d** per i secondari
- **Collegamento a zig-zag**, in cui ogni avvolgimento è suddiviso in due parti uguali e ciascuna fase interna è ottenuta connettendo in serie rovesciata due parti di due avvolgimenti



Il collegamento dei primari non è necessariamente coincidente con il collegamento dei secondari

3.1 GRUPPO DEI TRASFORMATORI TRIFASE

Si definisce *gruppo dei trasformatori trifase* il numero che si ottiene dividendo per 30 lo sfasamento in ritardo della tensione secondaria rispetto alla corrispondente tensione primaria.

In quali casi la tensione secondaria è sfasata rispetto alla tensione primaria?

- Il collegamento tra primari e secondari è misto (stella-triangolo)
- Il collegamento è lo stesso ma invertito le connessioni dei secondari, cosicché le loro tensioni concatenate risultano in opposizione di fase (180°) rispetto alle corrispondenti tensioni concatenate primarie.

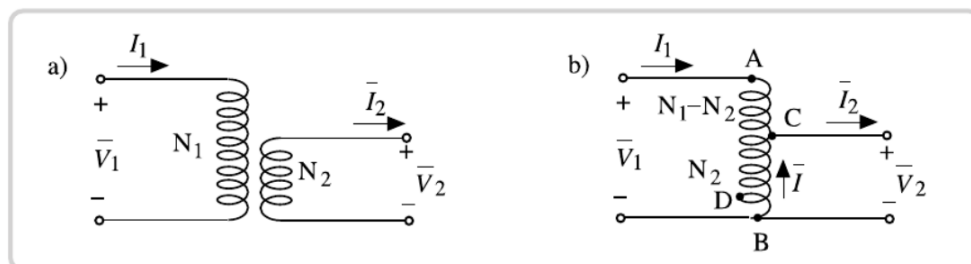
Esempio:

- Yy0: Avvolgimenti primari e secondari collegati a stella, con sfasamento nullo tra le tensioni di linea dei primari e dei rispettivi secondari
- Yy6: Avvolgimenti primari e secondari collegati a stella, con sfasamento di 180° tra le tensioni di linea dei primari e dei rispettivi secondari
- Dyn5: Avvolgimenti primari collegati a triangolo, avvolgimenti secondari collegati a stella, presenza del 4 filo neutro di collegamento e sfasamento di 150° tra le tensioni di linea dei primari e dei rispettivi secondari

4 AUTOTRASFORMATORI

Un autotrasformatore è un dispositivo realizzato a partire da un classico trasformatore monofase, in cui però le N_2 spire del secondario sono realizzate con lo stesso conduttore che realizza le $N_2 + N = N_1$ spire del primario

In sostanza, si realizza un trasformatore sfruttando il **concetto di partitore di tensione induttivo**, anziché resistivo: Si consideri infatti un trasformatore monofase con $N_1 > N_2$, nel quale le N_2 spire dell'avvolgimento secondario sono strettamente affiancate ad altrettante spire dell'avvolgimento primario. In questo modo ogni spira dell'uno, concatenando lo stesso flusso della corrispondente spira dell'altro, ha la stessa fem indotta: posso direttamente costruire le N_2 coppie di spire di primario e secondario con lo stesso filo



Facendo strisciare C sull'induttore posso regolare la tensione V_2 sul secondario

Una interruzione dell'avvolgimento secondario (ex: D) porta la tensione secondaria a quella primaria

La corrente nel tratto di avvolgimento comune risulta:

$$I = I_2 - I_1 = I_2 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) I_2$$

La corrente che scorre nel tratto comune degli avvolgimenti sarà tanto minore quanto più τ è vicino a 1

4.1.1 VARIAC

Il *Variac* è un autotrasformatore con secondario variabile, ottenuto con un contatto strisciante su un nucleo toroidale. Non garantisce alcun isolamento tra la rete di alimentazione e il dispositivo in prova

CONVERTITORI STATICI

5 DEFINIZIONI

Il convertitore è un dispositivo capace di variare le grandezze elettriche in vari modi

Raddrizzatore: dispositivo in grado di effettuare la conversione da *corrente alternata* a *continua*

→ Viene indicato con la sigla AC/DC

Inverter: dispositivo che converte una grandezza continua in una grandezza alternata, in modo da alimentare un utilizzatore funzionante in corrente alternata.

→ Viene indicato con la sigla DC/AC

Convertitore AC-AC: dispositivo in grado di produrre una grandezza con ampiezza e frequenza diversa da quelle della rete di alimentazione.

Chopper: Dispositivo che consente di eseguire la conversione da una grandezza continua d'ingresso ad una grandezza continua di diverso valore.



Raddrizzatore



Inverter



Chopper



Convertitore AC-AC

Componenti elettronici di potenza: Componenti circuitali a semiconduttori al silicio, che possono essere assimilati a degli **interruttori ideali** (con ridotto tempo di intervento in apertura o chiusura)

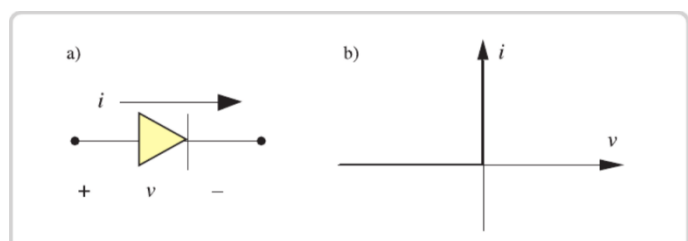
- Componenti **NON CONTROLLATI** (Diodi): Non posso controllare io l'apertura o chiusura, lasciano passare o meno la corrente a seconda di condizioni esterne
- Componenti **CONTROLLATI IN CHIUSURA** (tiristori): Posso decidere io quando vengono chiusi, ma non quando si aprono
- Componenti **CONTROLLATI** (transistor): Decido io quando aprirli o chiuderli

6 COMPONENTI ELETTRONICI DI POTENZA

6.1 DIODO

Il **diodo** ideale è un dispositivo che **conduce corrente** presentando resistenza nulla (corto circuito) **quando la tensione ai suoi capi è positiva**, ed un **circuito aperto** quando la **tensione ai suoi capi diventa negativa**. Di base si comporta come un interruttore che commuta spontaneamente nelle seguenti condizioni:

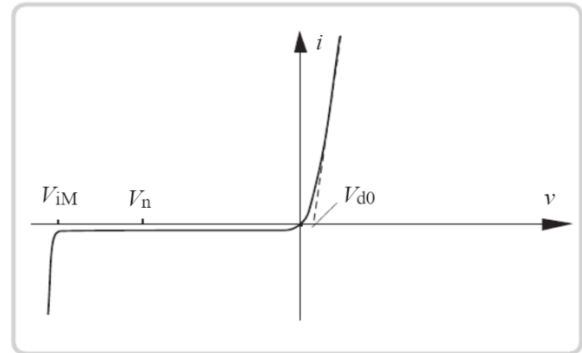
- Chiude non appena la tensione da valori negativi si annulla;
- Apre non appena la corrente da valori positivi si annulla



Se applico una **tensione diretta** si dice che il diodo è in conduzione e l'andamento di V in funzione di I può essere approssimato nel primo quadrante dalla retta tratteggiata, che ha equazione:

$$V = V_{d0} + R_d I$$

- $V_{d0} = 0,3 \div 0,5$: tensione di polarizzazione
- R_d : resistenza differenziale del diodo, dell'ordine dei $m\Omega$
- Il valore massimo di I corrisponde alla corrente nominale che può essere dell'ordine di parecchi kA
- Con tensione V negativa (tensione inversa) si ha una debole corrente I negativa
- Se la tensione inversa supera la tensione di rottura o di breakdown V_{iM} si ha una scarica, ossia un brusco aumento di corrente inversa, che porta a rottura

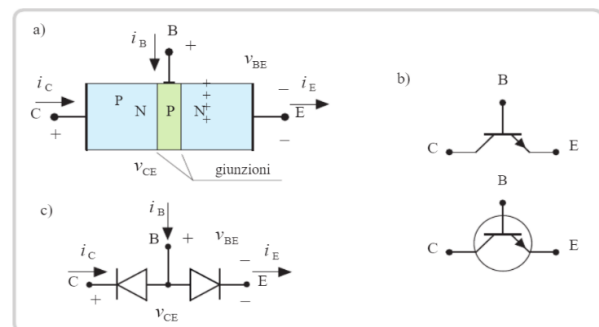


Io non decido quando far condurre o meno la corrente: lo decide il diodo stesso in base alla tensione

6.2 BJT (BIPOLAR JUNCTION TRANSISTOR) – TRANSISTOR BIPOLARE A GIUNZIONE

Nel simbolo del BJT abbiamo anche una freccia che indica il verso di scorrimento della corrente

- **Collettore (C)**
- **Base (B)**
- **Emettitore (E)**



Funzionamento:

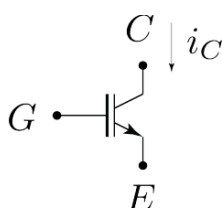
- ✚ **BASE APERTA:** tengo la **base aperta** ($I_B = 0$)
 - Non ho corrente che entra dal collettore a prescindere dalla tensione V_{CE}
- ✚ **BASE CHIUSA:** Applico la **tensione** $V_{BE} > 0$ tra B ed E, producendo una corrente $I_B > 0$ da B a E
 - $V_{CE} > 0$: Il transistor conduce corrente I_E con $I_E = I_C + I_B > 0 \approx I_C$
 - $V_{CE} < 0$: Il transistor non conduce perché $I_C = 0$ per qualsiasi valore di I_B

Pertanto, il dispositivo tra C ed E si comporta come un interruttore unidirezionale ($I_C > 0$) che può essere chiuso e aperto agendo sulle grandezze di controllo V_{BE} e I_B , tipicamente molto minori di quelle di funzionamento V_{CE} e I_{CE} (ecco perché controllato)

$f \sim (1 \div 10)$ kHz è la frequenza con la quale posso aprire e chiudere il dispositivo

È una grandezza fondamentale perché questi dispositivi devono aprirsi e chiudersi in continuazione per poter trasformare una grandezza da sinusoidale a continua

6.3 IGBT (TRANSISTOR BIPOLARE A GATE ISOLATO)



Sono simili ai BJT ma con alcuni vantaggi

- Bassissima corrente al terminale di controllo (chiamato gate), per cui la commutazione avviene con la sola applicazione di tensione tra gate ed emettitore (la grandezza di controllo diventa V_{GE})
- $f \approx 1 \div 100$ kHz

6.4 SCR (SILICON CONTROLLED RECTIFIER) - RADDRIZZATORE CONTROLLATO AL SILICIO

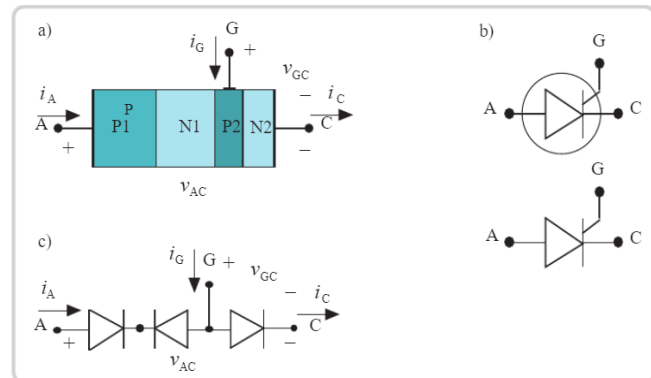
Il simbolo è molto simile a quello del diodo ma è presente un terminale in più G

Il [tiristore](#) è un dispositivo a quattro zone con diverso drogaggio.

- **CASO $I_G = 0$**
 - Il tiristore non conduce
- **CASO $I_G > 0$**
 - $V_{AC} > 0$: Applicando un breve impulso di corrente al gate $I_G \approx 100\text{mA}$ (detta *corrente di latching impulsiva*), il diodo centrale inizia a condurre con V_{AC} ; L'SCR continua a condurre anche quando I_G si annulla, purché I_A sia superiore ad un valore minimo (*corrente di holding* $\approx 100\text{ mA}$); non appena I_A scende sotto tale limite, esso smette di condurre
 - $V_{AC} < 0$: anche se applico l'impulso $I_G > 0$ l'SCR non conduce

L'apertura dell'SCR avviene solo quando la corrente $I_A \approx I_G$ diviene nulla

In altre parole, l'SCR si comporta come un diodo, in cui posso controllare la chiusura e quindi la conduzione

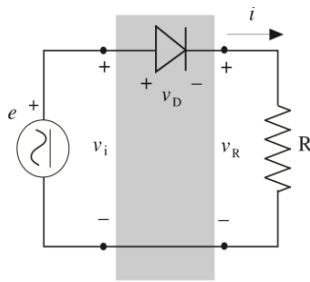


7 RADDRIZZATORE MONOFASE

La conversione alternata/continua consiste nel trasformare tensioni e correnti alternate in tensioni e correnti unidirezionali.

- **Conversione AC/DC:** Circuiti più semplici, che impiegano soltanto diodi, consentono di ottenere tensioni e correnti unidirezionali di valore non regolabile
- **Conversione controllata AC/DC:** Circuiti più complessi, che utilizzano ad esempio tiristori, permettono di ottenere tensioni e correnti di valore regolabile entro un certo campo.

7.1 RADDRIZZATORE A SINGOLA SEMIONDA

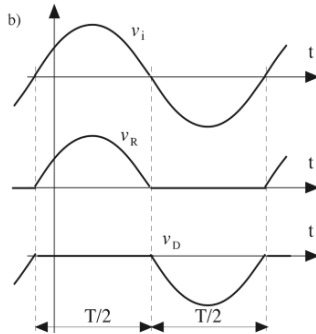


$$V_i(t) = V_D(t) + V_R(t)$$

- $V_D(t)$ è la tensione applicata ai terminali del diodo
- $V_R(t)$ è la tensione sul resistore R
- $i(t)$ la corrente che circola nel semplice anello

Quando $V_i(t)$ è positiva, il diodo è in conduzione ($V_D(t) = 0$) e quindi $V_R(t) = V_i(t)$; la corrente $i(t)$ è data da $v_i(t)/R$.

Quando $V_i(t)$ è negativa, il diodo è in interdizione per cui la corrente $i(t)$ è nulla e di conseguenza anche la tensione $V_R(t) = V_i(t)$ è nulla e la tensione $V_D(t)$ è uguale a $V_i(t)$



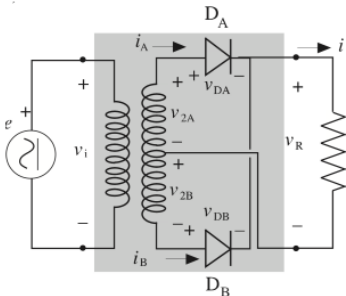
Se noto l'andamento di $V_R(t)$ noto che non è esattamente continua, ma almeno ha valore medio positivo e non 0 come in una sinusoide

Per avere una stima calcolo tale valore medio

- ❖ **Valore medio della $V_R(t)$:** $V_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V_R(t) dt = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E \approx 0.45E$
- ❖ **Differenza tra valore max e min della tensione:** $\delta_{VM} = \sqrt{2}E$
- ❖ **Fattore di ondulazione:** $k_0 = \frac{\delta_{VM}}{2V_m} = \frac{\pi}{2}$

Il fattore di ondulazione indica quanto buono è il raddrizzamento (più basso è meglio è)

7.2 RADDRIZZATORE A DOPPIA SEMIONDA CON TRASFORMATORE



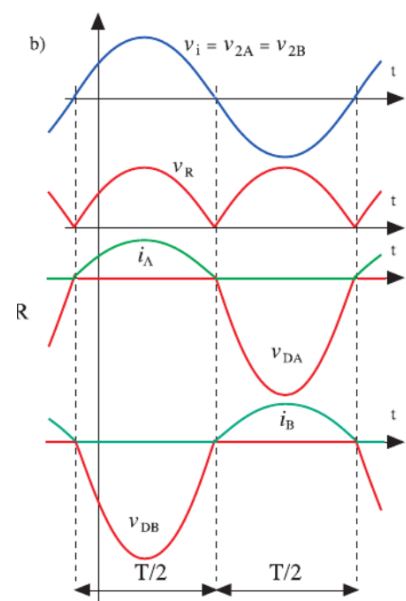
Il circuito comprende due diodi uguali ed un trasformatore con secondario a presa centrale: il terzo terminale rende disponibili due tensioni secondarie uguali, che si assumono uguali alla primaria $V_{2A}(t) = V_{2B}(t) = V_i(t)$

Applicando il secondo di Kirchhoff alle due maglie del secondario:

$$\begin{cases} v_i(t) - v_{DA}(t) - v_R(t) = 0 \\ v_i(t) + v_{DB}(t) + v_R(t) = 0 \end{cases}$$

I diodi sono alternativamente in conduzione o in interdizione

- $V_i(t) > 0$ (prima semionda)
 - D_A è in conduzione, mentre D_B è interdetto
 - $V_{DA}(t) = 0$ e $i_B(t) = 0$
 - $V_i(t) = V_R(t)$
$$\begin{cases} v_{DA}(t) = 2v_i(t) \\ v_R(t) = -v_i(t) \end{cases}$$
- $V_i(t) > 0$ (seconda semionda)
 - D_B è in conduzione, mentre D_A è interdetto
 - $V_{DB}(t) = 0$ e $i_A(t) = 0$
 - $V_i(t) = -V_R(t)$
$$\begin{cases} v_i(t) = v_R(t) \\ v_{DB}(t) = -2v_i(t) \end{cases}$$



La tensione media sul resistore R è data da: $V_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V = 0.9V$

7.3 RADDRIZZATORE A DOPPIA SEMIONDA (A PONTE DI GRAETZ)

Questo circuito comprende quattro diodi connessi nella configurazione nota come ponte di Graetz monofase.

$$\begin{cases} V_{DA'} - V_{DB'} = V_I \\ -V_{DA''} + V_{DB''} = V_I \end{cases}$$

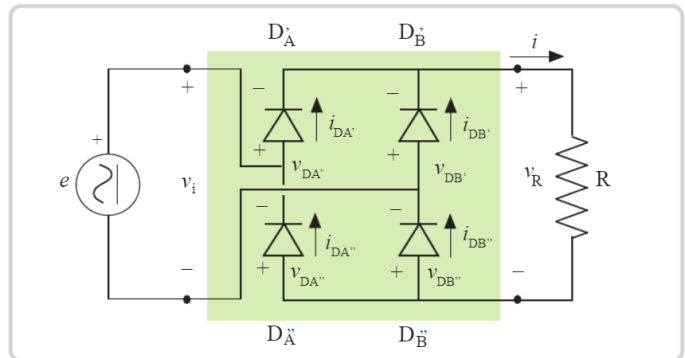
A seconda della polarità di V_I ho una differenza tra due tensioni che possono essere o nulle o negative.

Quindi se $V_I(t) > 0$ per forza avrò che $V_{DA'}(t) = V_{DB''}(t) = 0$ (i due diodi fossero in conduzione)

Quindi se $V_I(t) < 0$ per forza avrò che $V_{DB'}(t) = V_{DA''}(t) = 0$

All'alternarsi della polarità della tensione del generatore **entrano in conduzione le coppie di diodi $D_A' - D_B''$ e $D_B' - D_A''$** consentendo così il passaggio di una corrente unidirezionale nel resistore R.

- ✚ Se applico una tensione $V_i > 0$ la corrente passa dai diodi DA' e DB''
- ✚ Se applico una tensione $V_i < 0$ la corrente passa dai diodi DA'' e DB'



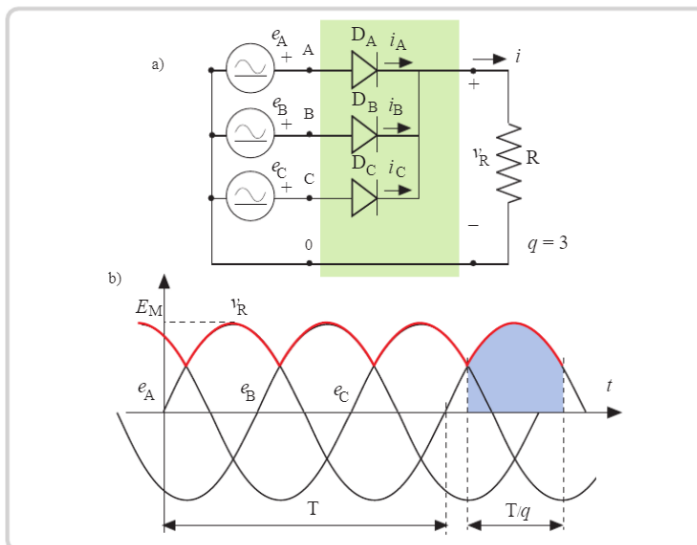
Gli altri 2 diodi in ciascun caso sono aperti perché la tensione ai loro capi è negativa

Il grafico dell'andamento è uguale al caso di trasformatore e anche i valori noti.

8 RADDRIZZATORE TRIFASE

Per migliorare ancora di più la qualità della grandezza continua si ricorre a sistemi trifase

8.1 RADDRIZZATORE A GRUPPI DI COMMUTAZIONE



Abbiamo un circuito trifase collegato a stella, e su ogni fase mettiamo un generatore e un diodo

Vale sempre che

$$\begin{cases} v_{DA}(t) = e_A(t) - v_R(t) \\ v_{DB}(t) = e_B(t) - v_R(t) \\ v_{DC}(t) = e_C(t) - v_R(t) \end{cases}$$

Se la $V_d = 0$ allora la $V_r = E$

Se la $V_d < 0$ allora la $E < V_r$

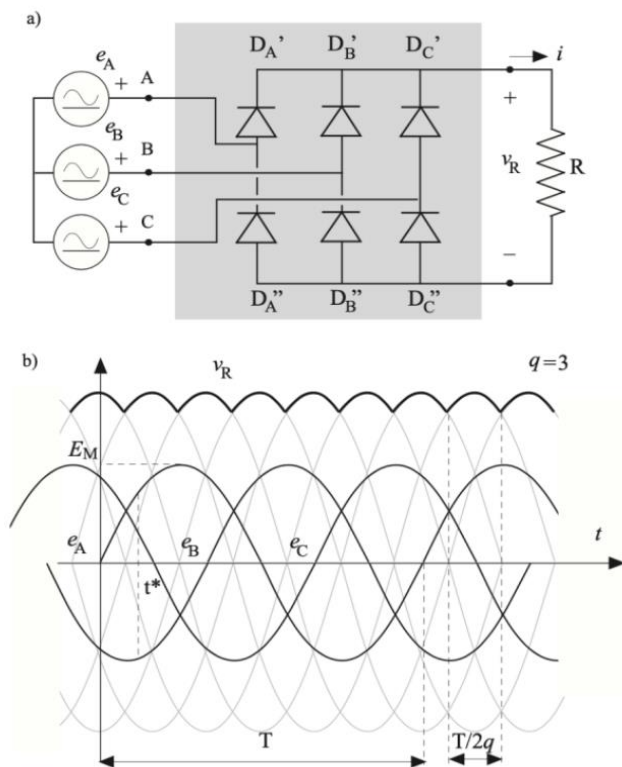
Se rappresento su un piano le 3 tensioni E_a, E_b, E_c di fatto la tensione V_r coincide in ogni istante con la tensione maggiore tra le 3

Ogni 120° ho una commutazione: All'inizio conduce A, dopo 120° conduce B, dopo altri 120° conduce C

Ho una tensione raddrizzata molto più continua del raddrizzatore monofase

$$k_0 \approx 0.3$$

8.2 RADDRIZZATORE A PONTE DI GRAETZ



Nello stesso modo, se ho una terna trifase di tensioni utilizzo il ponte di Graetz per tutte e tre le fasi e realizzo che in ogni istante la tensione di uscita non è pari a quella massima ma è la differenza tra la tensione stellata più alta e più bassa

Infatti, per ogni percorso posso scrivere sempre le stesse equazioni

$$t = t^* : \begin{cases} v_R(t) = e_A(t) - e_B(t) = v_{AB}(t) \\ v_{DA'}(t) = v_{DB''}(t) = 0 \end{cases}$$

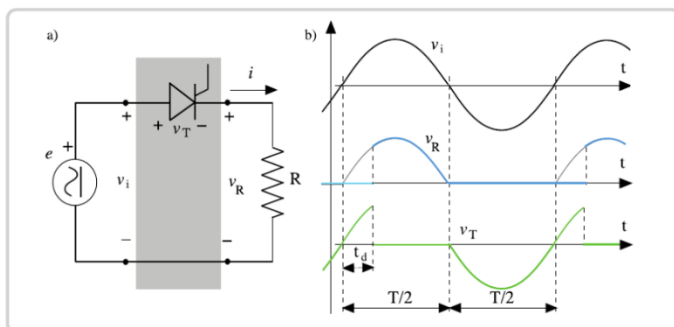
All'istante t^* ho che $V_r = E_a - E_b$ che coincide con la V_{ab} , e quindi i diodi che conducono sono il DA' e il DB''

Ho una commutazione ogni 60°

La forma d'onda è ancora più continua
 $k_0 \approx 0.07$

9 RADDRIZZATORI CONTROLLATI

Se sostituiamo al diodo del raddrizzatore a singola semionda, un tiristore, si ottiene un raddrizzatore controllato, capace di produrre tensioni in uscita a valore medio regolabile.



La tensione sul resistore è ritardata di un tempo t_d , che è il tempo che faccio trascorrere prima di accendere il tiristore

Ho diminuito il valore medio della tensione in uscita

Se V_m è la tensione media col ponte a diodi e $\alpha = \omega t$ il nuovo valor medio è

$$V_{m,nuova} = V_m \cdot \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}$$

CONSIDERAZIONI SUI RADDRIZZATORI

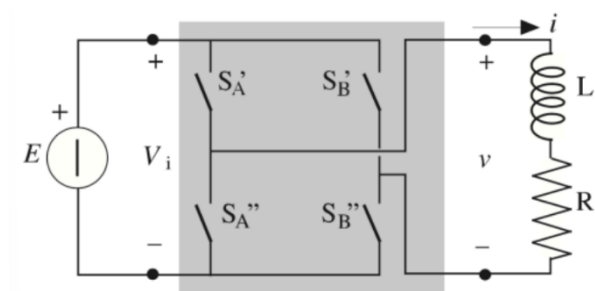
Noi abbiamo considerato diodi e tiristori ideali, capaci di commutare istantaneamente; in realtà si hanno brevi istanti di tempo in cui uno o più dispositivi a semiconduttore si trovano contemporaneamente in conduzione, dissipando potenza

Indipendentemente dal tipo di raddrizzatore che utilizzo, ho visto che in realtà la grandezza in uscita è comunque oscillante: se utilizzassi il raddrizzatore su un dispositivo che necessita di una grandezza continua "pulita", potrebbe non essere sufficiente;

Sono costretto ad interporre un **FILTRO**, cioè un circuito la cui risposta in frequenza tende a non far passare tutte le grandezze sinusoidali superiori ad un certo valore, ma fa passare solo la frequenza continua (utilizza la Serie di Fourier per selezionare, circuito risonante che seleziona solo una certa frequenza)

10 INVERTER DC/AC MONOFASE

Gli inverter hanno in ingresso una grandezza continua e in uscita una grandezza sinusoidale con buona approssimazione

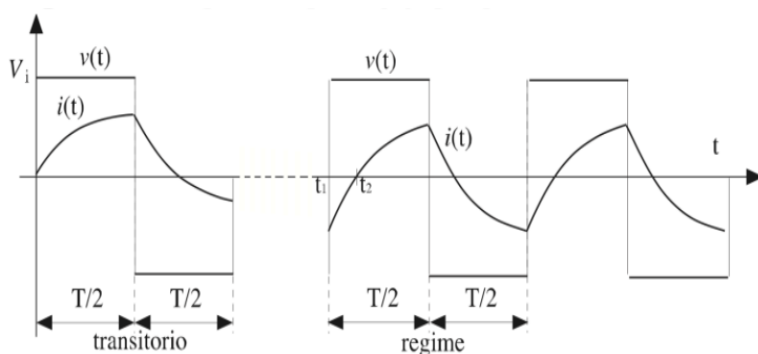


Viene ipotizzato un generatore costante e la presenza di un carico RL; Ci sono inoltre 4 interruptori realizzati con uno dei componenti studiati in precedenza

Se chiudiamo $S_{A'}$ e $S_{B''}$ la tensione V ai capi del carico RL coincide con V_i

Se chiudiamo $S_{A''}$ e $S_{B'}$ la tensione V ai capi del carico RL vale $-V_i$

Supponendo un periodo T , per $T/2$ faccio chiudere $S_{A'}$ e $S_{B''}$ e per l'altro $T/2$ $S_{A''}$ e $S_{B'}$, ottengo al carico una forma d'onda quadra di tensione, che si ripete periodicamente



Se il carico fosse puramente resistivo allora per la legge di Ohm, la corrente avrebbe la stessa forma d'onda.

Non siamo esattamente davanti ad una forma d'onda sinusoidale, ma comunque periodica: grazie all'espansione in serie di Fourier so che qualsiasi forma d'onda periodica è rappresentabile come la somma di tante sinusoidi

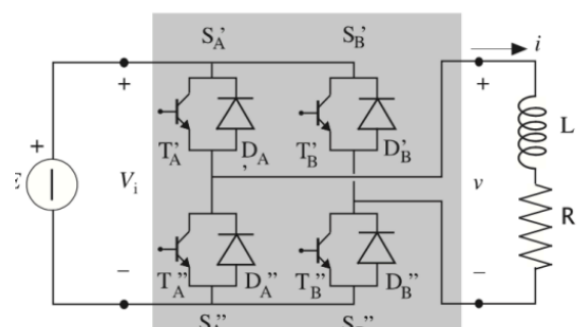
Si può prevedere un filtraggio per selezionare solo alcune sinusoidi ed ottenere l'onda necessaria

COME È REALIZZATO L'INVERTER?

Poiché dobbiamo decidere quando far chiudere/aprire gli interruptori utilizzeremo dei transistor: però ci sono anche dei diodi in **antiparallelo**, perché?

Guardando il grafico dell'andamento a regime soprastante, noto che quando $V(t)$ è positiva, e quindi sono chiusi $S_{A'}$ e $S_{B''}$ c'è un tratto in cui la corrente è comunque negativa; ma nei transistor, la corrente può fluire solo in una direzione.

Mettendo il diodo in "antiparallelo", cioè in modo che la corrente fluisca in senso opposto sui due rami, faccio in modo che se $S_{A'}$ e $S_{B''}$ sono chiusi, la corrente può fluire sia in un senso che nell'altro.



- Valore V della tensione efficace ai capi del carico: $V = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E$

11 INVERTER DC/AC TRIFASE

Abbiamo il generatore (per comodità è rappresentato con due generatori di valore $E/2$), il ponte è un ponte trifase dove sono collegate le 3 fasi del carico RL

Chiamando E_a, E_b, E_c le tensioni ai capi del carico posso scrivere le seguenti equazioni:

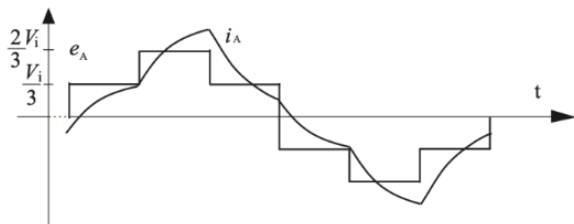
$$\begin{cases} e_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} = v_{AM} - v_{OM} \\ e_B = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} = v_{BM} - v_{OM} \\ e_C = Ri_C + L \frac{di_C}{dt} = v_{CM} - v_{OM} \end{cases}$$

Analogamente a quanto visto prima, le coppie $S_{a'}$ e $S_{a''}$ sono comandate alternativamente, cioè quando una conduce l'altra è interdetta

Le tre coppie S_a, S_b, S_c si susseguono ogni 120°

La somma delle tre tensioni è sempre istantaneamente nulla in un sistema trifase, quindi dalle equazioni a lato ricavo

$$V_{om} = \frac{V_{am} + V_{bm} + V_{cm}}{3}$$



Su ogni singola fase ho questo tipo di tensione:

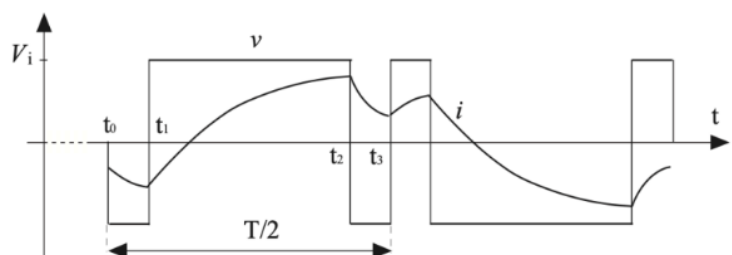
Le tre tensioni sui 3 carichi somigliano ancora di più ad una sinusoide

Nel disegno omettiamo i circuiti elettrici che servono a comandare l'apertura/chiusura dei transistor

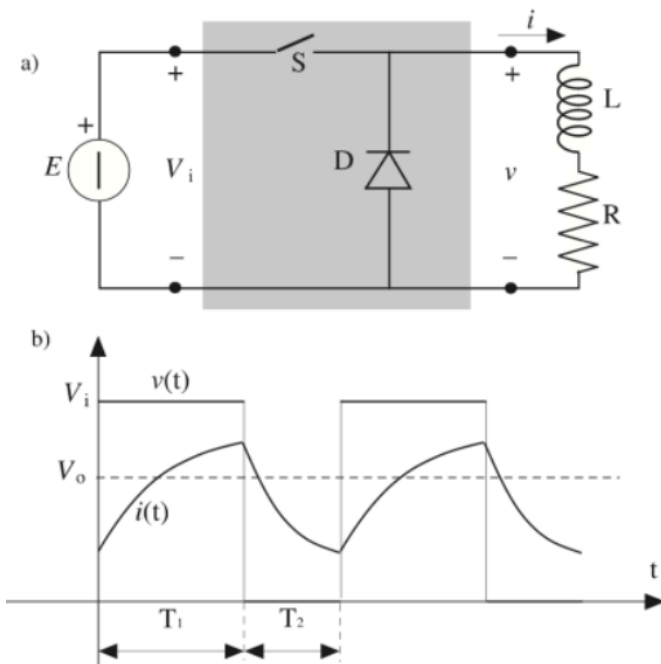
CONSIDERAZIONI

Variando l'istante in cui si accendono e spengono, questi dispositivi permettono di variare la frequenza dell'onda in uscita.

Anche negli inverter ho comunque il fenomeno della commutazione, quindi riscaldamento e necessità di filtraggio.



12 CHOPPER DC/DC



Un trasformatore non può funzionare in corrente continua, quindi questo dispositivo ci consente di avere una tensione continua in uscita quando in ingresso ho una tensione continua di tipo diverso;

Abbiamo carico RL e un diodo di ricircolo (ha la stessa funzione che aveva nell'inverter)

Il componente attivo che opera in apertura e chiusura (S) è realizzato con un transistor o con un tiristore

Quando S è chiuso la tensione v coincide con V_i
Quando S è aperto la tensione $v = 0$ perché il circuito è cortocircuitato dal diodo

Non ho in uscita una forma d'onda perfettamente continua, ma comunque ho un valor medio $V_o = V_i \cdot \frac{T_1}{T_1 + T_2} = \delta V_i$

- δ si chiama "duty cycle" del chopper

Alla fine, si tratta di dispositivi che fanno un taglio della tensione continua e di conseguenza consentono di ottenere un valore diverso in uscita rispetto a quella in ingresso.

🚦 STEP DOWN CHOPPER: La tensione in uscita è minore di quella in ingresso

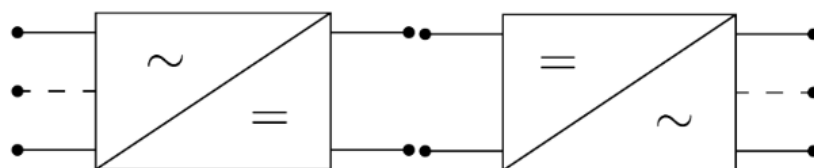
13 CICLOCONVERTITORI AC/AC

Hanno un'architettura non troppo diversa dagli inverter e consentono di ottenere una forma d'onda alternata la cui frequenza è legata alla frequenza della forma d'onda in ingresso

- Proprio per questo limite (il legame tra frequenza in uscita e in ingresso) tendono ad essere usati sempre meno

Ormai quando ho bisogno di alimentare un dispositivo con una frequenza diversa da quella della rete ciò che si fa è prendere un raddrizzatore e metterlo in serie ad un inverter (eventualmente frappongo un chopper nel mezzo per variare il valore della grandezza se mi serve)

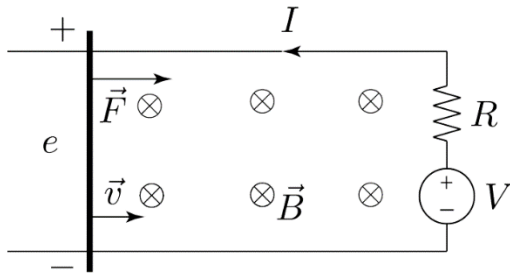
In questa **configurazione "in cascata"** riesco a trasformare grandezze sinusoidali con frequenza f_1 in una sinusoide a frequenza diversa f_2 completamente svincolata



INTRODUZIONE MACCHINE ROTANTI

14 MACCHINA RUDIMENTALE

Una macchina elettrica è in generale un dispositivo in grado di trasformare una potenza meccanica in potenza elettrica e viceversa



La “macchina rudimentale” serve per capire il generale comportamento di una macchina elettrica: si considerano due binari privi di resistenza su cui si muove una barretta conduttrice di lunghezza L alla velocità v ;

Agli estremi dei due binari sono collegati una resistenza R e un generatore V in serie;

L'intero sistema è immerso in un campo B ortogonale

Sappiamo che si genera una fem ai lati della sbarretta che vale: $fem = BLv$

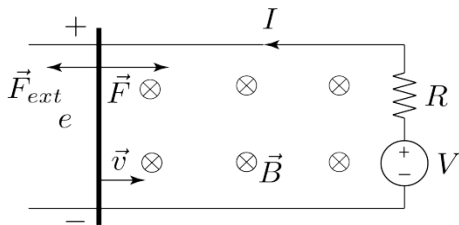
E poiché la sbarretta è percorsa da corrente su di essa agisce una forza $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$ il cui verso dipende dal senso di percorrenza della corrente che si genera.

La corrente che circola nel sistema vale: $I = \frac{V - fem}{R}$

Supponendo che ci sia anche una F_{ext} applicata alla barretta, per avere equilibrio meccanico è necessario che $\vec{F}_{ext} + \vec{F} = ma$

Poiché noi lavoriamo in condizioni di regime in cui $a = 0$ avrò che $F_{ext} = F$

FUNZIONAMENTO DA MOTORE



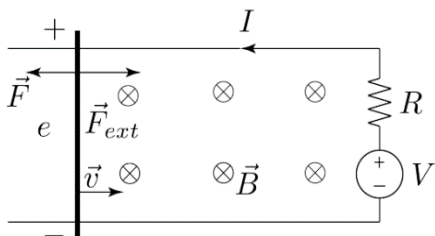
Il funzionamento da motore si ha quando $V > fem$

In tal caso $I > 0$ e scorre nel verso indicato in figura

Pertanto il generatore eroga potenza elettrica VI che si trasforma in potenza meccanica $\vec{F} \cdot \vec{v}$

La forza esterna che devo applicare per mantenere l'equilibrio è una forza resistente (va in senso opposto alla direzione del moto)

FUNZIONAMENTO DA GENERATORE



Il funzionamento da generatore si ha quando $fem > V$

In tal caso $I < 0$ e scorre nel verso opposto a quello in figura

Pertanto il generatore assorbe potenza elettrica VI , immessa nel circuito sottoforma di forza meccanica $\vec{F}_{ext} \cdot \vec{v}$

La forza esterna che devo applicare per mantenere l'equilibrio è una forza motrice (spinge nella direzione del moto)

Quindi, il funzionamento da motore o da generatore dipende dai versi in cui forza meccanica e corrente fluiscono nel dispositivo, e le equazioni che governano il funzionamento del dispositivo risultano essere:

$$\begin{cases} BLI - F = ma \\ V - fem = RI \end{cases}$$

VELOCITA' V_0 DI EQUILIBRIO DINAMICO IDEALE

Ipotizziamo il caso in cui la barretta si muova a velocità tale da avere $fem = V$

In quel caso la corrente diventa nulla e si ha il caso ideale di moto rettilineo uniforme

$$V = fem \rightarrow I = 0 \rightarrow \vec{F} = 0 \rightarrow V = Blv_0$$

E quindi posso trattare il caso generico (quando le forze non sono 0) nel seguente modo:

$$F_{ext} = F = BLI = BL \cdot \frac{V - e}{R} = \frac{BL}{R} (Blv_0 - Blv) = \frac{(BL)^2}{R} \cdot (v_0 - v)$$
$$v = v_0 - \frac{F_{ext}}{(BL)^2/R}$$

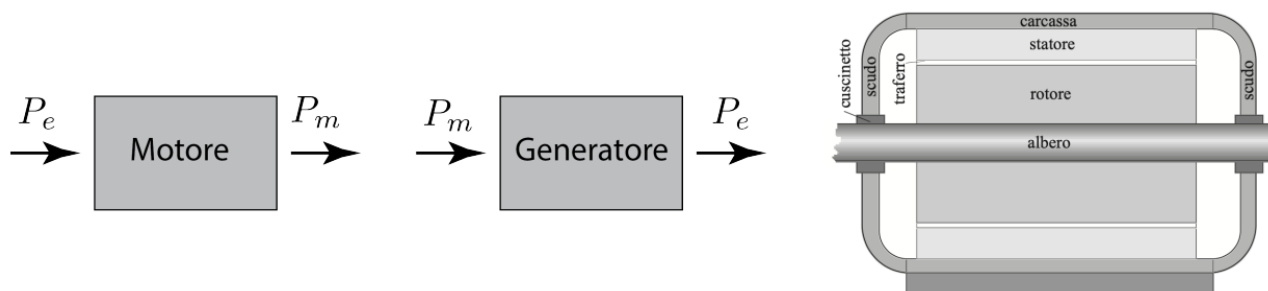
Se la forza esterna è positiva, se essa aumenta allora la velocità della barretta diminuisce;

Pertanto in questo caso la forza esterna si dice resistente mentre quella magnetica è motrice, e la macchina funziona da motore

Se la forza esterna è negativa, se essa aumenta allora la velocità della barretta aumenta

Pertanto in questo caso la forza esterna si dice motrice mentre quella magnetica è resistente, e la macchina funziona da generatore

15 MACCHINE ROTANTI



Le macchine elettriche rotanti realizzano la **conversione elettromeccanica dell'energia**: possono convertire potenza meccanica in potenza elettrica (*funzionamento da generatore*) oppure potenza elettrica in potenza meccanica (*funzionamento da motore*);

La maggior parte delle macchine rotanti può svolgere entrambe le funzioni → **MACCHINA REVERSIBILE**

- **ALBERO**: Supporto rotante cilindrico su cui è costruita la macchina
- **ROTORE**: Parte mobile solidale all'albero che ruota
- **STATORE**: Parte fissa più esterna, separata dal rotore grazie ad un traferro

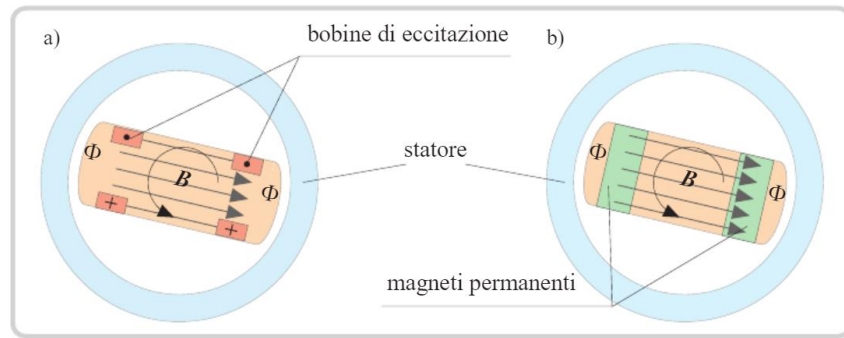
Rotore e statore vanno a costituire il circuito magnetico, comportandosi da induttore e indotto:

Uno dei due produce il campo magnetico (induttore) grazie all'utilizzo di fili percorsi da corrente o magneti permanenti, mentre l'altro ne subisce le conseguenze.

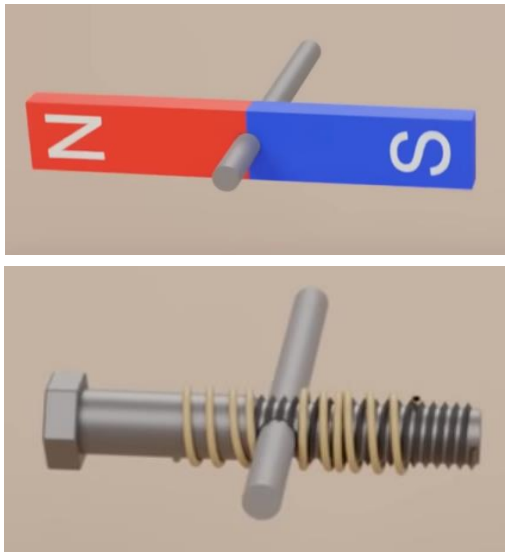
In alcune macchine l'induttore è il rotore, in altre lo statore.

Nella grande maggioranza delle macchine elettriche rotanti, il campo magnetico prodotto dall'induttore è rotante attorno all'asse della macchina: nel prossimo paragrafo viene descritto in linea di principio come si possa creare un campo magnetico rotante, la cui realizzazione concreta verrà poi illustrata nei capitoli successivi.

15.1 CAMPO MAGNETICO PRODOTTO DAL ROTORE



Un oggetto rotante può produrre un campo magnetico rotante in due modi diversi:

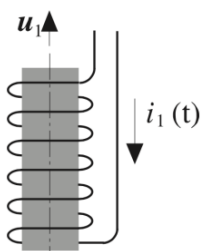


- Magnete permanente
- Avvolgimento percorso da corrente

In entrambi i casi, lo scopo è quello di trasformare il rotore in un magnete avente asse magnetico ortogonale all'albero di macchina e lo mettiamo in rotazione alla velocità angolare ω_r , e ciò può essere fatto tramite l'utilizzo di un magnete permanente, oppure avvolgendo attorno al rotore stesso un filo percorso da corrente (che sappiamo creare un campo magnetico lungo l'asse)

Il magnete realizza una **coppia polare** con un polo Nord e un polo Sud e quindi produce un campo magnetico rotante con l'albero alla velocità angolare $\omega = \omega_r$

15.2 CAMPO MAGNETICO PRODOTTO DALLO STATORE

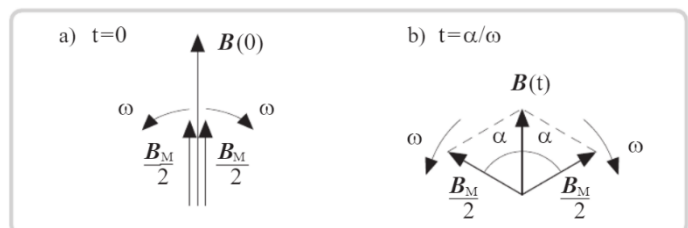


Esiste anche la possibilità di produrre un campo magnetico rotante tramite lo statore. Com'è possibile produrre un campo che ruota a partire da un oggetto che sta fermo?

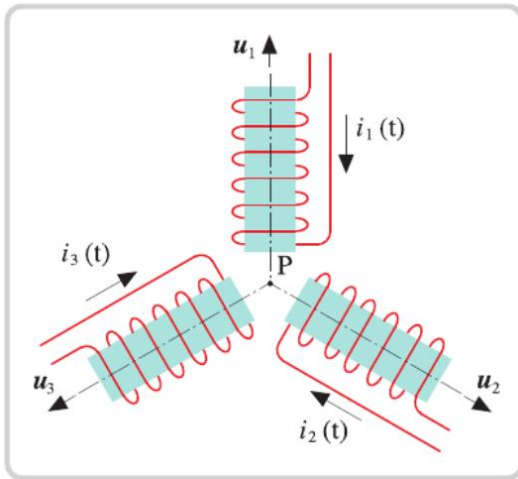
Osserviamo l'oggetto in figura, ossia un induttore avvolto da un filo percorso da corrente variabile nel tempo; sappiamo che esso produce un campo magnetico in direzione dell'asse, che sarà costante in direzione ma cambierà modulo e verso in base all'intensità e al verso della corrente

Noi possiamo pensare al campo B prodotto come risultato di una somma di due campi rotanti, l'uno in senso orario e l'altro antiorario, di intensità $B/2$ e con velocità angolare costante ω .

In ogni istante i due **vettori controrotanti** si compongono dando luogo ad un vettore di direzione fissa, coincidente con l'asse dell'induttore, e di ampiezza variabile con legge sinusoidale e pulsazione ω .



Adesso prendo 3 di questi solenoidi e li dispongo a 120° , attraversati da una terna simmetrica di correnti

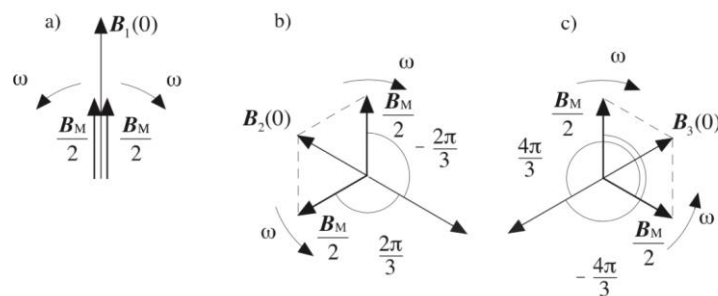


$$\begin{cases} i_1(t) = I_M \cos(\omega t) \\ i_2(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3(t) = I_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

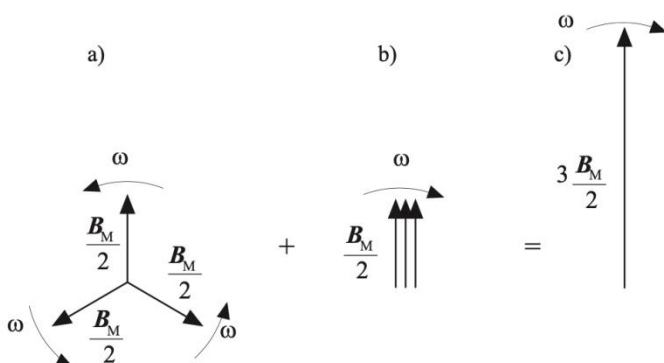
$$\begin{cases} B_1(t) = B_M \cos(\omega t) \mathbf{u}_1 \\ B_2(t) = B_M \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \mathbf{u}_2 \\ B_3(t) = B_M \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \mathbf{u}_3 \end{cases}$$

Ogni corrente (su ogni induttore) produce un campo magnetico diretto lungo il proprio asse: pertanto anche i 3 campi B_1 , B_2 e B_3 sono sfasati di 120°

Scomponendo come fatto in precedenza ogni campo B_i nei rispettivi due controcampi rotanti (al tempo $t = 0$) otteniamo:



- Il vettore B_1 , parallelo all'asse della bobina 1, è composto dai vettori controrotanti che, all'istante $t=0$, sono paralleli all'asse della bobina
- Il vettore B_2 , parallelo all'asse della bobina 2, è composto dai vettori controrotanti che sono in ritardo di $2\pi/3$ rispetto a quelli relativi alla bobina 1 e perciò, all'istante considerato $t = 0$, il vettore che ruota in senso orario forma un angolo di $-2\pi/3$ con l'asse della bobina 2, mentre il vettore che ruota in senso antiorario forma un angolo di $+2\pi/3$ con l'asse della bobina stessa
- Il vettore B_3 , parallelo all'asse della bobina 3, è composto dai vettori controrotanti che sono in ritardo di $4\pi/3$ rispetto a quelli relativi alla bobina 1 e perciò all'istante considerato $t = 0$, il vettore che ruota in senso orario forma un angolo di $-4\pi/3$ con l'asse della bobina 3, mentre il vettore che ruota in senso antiorario forma un angolo di $+4\pi/3$ con l'asse della bobina stessa;



Facendo la somma vettoriale e ri assemblando tutti i vettori controrotanti si ottengono **due terne di vettori**: una costituita dai vettori rotanti sincroni in senso orario e l'altra costituita dai vettori rotanti sincroni in senso antiorario.

- Quelli **antiorari** si annullano in ogni istante
- Quelli **orari** formano un unico vettore con modulo $3/2 B_M$ che ruota con velocità angolare ω costante

15.3 CAMPO PRODOTTO DA PIU' COPPIE POLARI

LEGENDA

ω_c	Velocità angolare del campo prodotto dal rotore con più poli
ω_r	Velocità angolare del rotore con 1 solo polo
p	Numero di poli

CASO 1:

Posso prevedere **sul rotore** un numero di coppie di magneti maggiore di 1, ottenendo p coppie polari
In tal caso la velocità del rotore con più poli è data da:

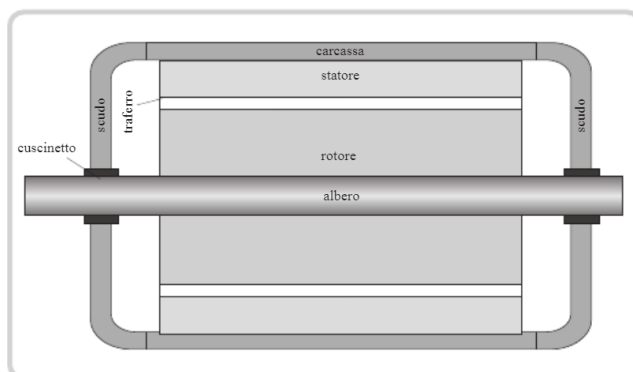
$$\omega_c = p \cdot \omega_r$$

CASO 2:

Posso prevedere sullo statore un numero p di terne di avvolgimenti alimentati dalla stessa corrente.
In tal caso la velocità di rotazione del campo magnetico è data da:

$$\omega_c = \frac{\omega}{p}$$

15.4 STRUTTURA DELLE MACCHINE ROTANTI



Nell'induttore gli avvolgimenti vengono alimentati per produrre il flusso di eccitazione (che in alternativa sappiamo essere prodotto da magneti permanenti);
Nell'indotto viene generata la tensione elettrica voluta (funzionamento come generatore) o viene fatta circolare una corrente (in modo da sviluppare le azioni elettrodinamiche che consentono il funzionamento da motore).

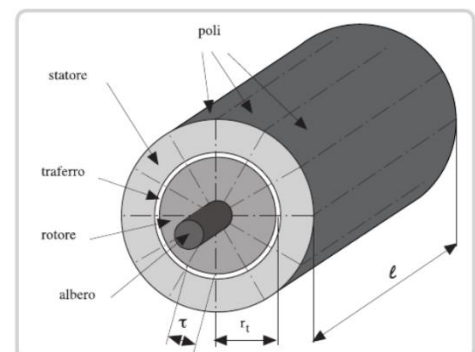
In generale è indifferente quale delle due parti della macchina svolge le funzioni di induttore (e quindi di indotto) e la scelta avviene in base al criterio di rendere meno complesse le configurazioni circuitali, di ridurre le perdite elettriche o meccaniche e ad altre considerazioni di carattere pratico.

Per massimizzare le prestazioni:

- Rotore e statore sono realizzati in ferro ad alta permeabilità per massimizzare il flusso Φ di ciascun polo;
- Il traferro è il più sottile possibile per ridurre la riluttanza
- Si utilizzano materiali ferromagnetici dolci per minimizzare le perdite per isteresi;
- Si utilizzano materiali lamellati per minimizzare le perdite per correnti parassite

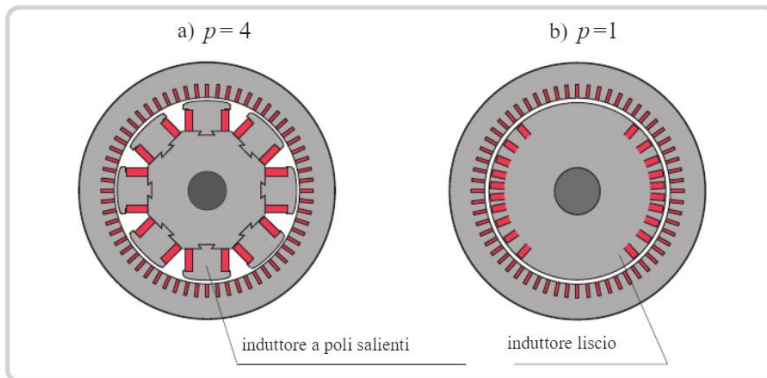
Sull'induttore, il numero delle alternanze definisce il numero $2p$ dei poli, ovvero il numero p delle coppie polari, che si susseguono con polarità alternate.

Le coppie polari, identiche tra di loro salvo che per la posizione angolare, sono caratterizzate dallo stesso valore di flusso polare Φ



Ciascun polo occupa un settore angolare cilindrico di lunghezza L e di ampiezza angolare $2\pi/2p$:

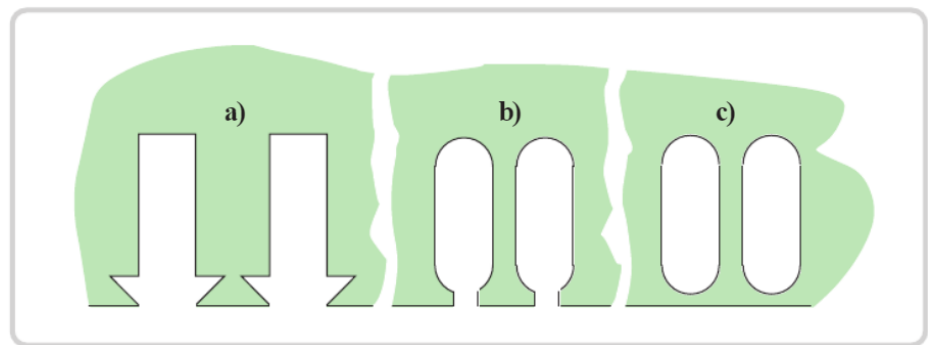
- Semipasso polare: lunghezza dell'arco al traferro $\tau = \frac{2\pi r_t}{2p}$
- Flusso medio polare ($\Phi = \tau l B_m$)



L'induttore, in base al suo profilo al traferro, può essere classificato come:

- Induttore a poli salienti
- Induttore liscio

L'indotto è sempre di tipo liscio ed è costituito da più conduttori di indotto alloggiati in scanalature longitudinali (dette cave di indotto) realizzate in corrispondenza della superficie del ferro rivolta al traferro.



Le macchine elettriche rotanti sono dei convertitori elettromeccanici. La potenza meccanica P_{mecc} è trasmessa attraverso l'albero di macchina e vale sempre:

$$P_{mecc} = C \omega_r \quad (3.2.3.1)$$

La potenza elettrica è trasmessa attraverso la morsettiera. La conversione elettromeccanica riguarda la potenza attiva P , che vale rispettivamente:

$$\begin{aligned} P &= VI && \text{per una macchina in corrente continua} \\ P &= VI \cos\varphi && \text{per una macchina monofase} \\ P &= \sqrt{3} VI \cos\varphi && \text{per una macchina trifase} \end{aligned} \quad (3.2.3.2)$$

RENDIMENTO

- Formula generale: $r = \frac{\text{Potenza in uscita}}{\text{Potenza in ingresso}}$
- Rendimento da generatore: $r = \frac{P}{P_{mecc}} = \frac{P}{P + P_{dis}}$
- Rendimento da motore: $r = \frac{P_{mecc}}{P} = \frac{P_{mecc}}{P_{mecc} + P_{dis}}$

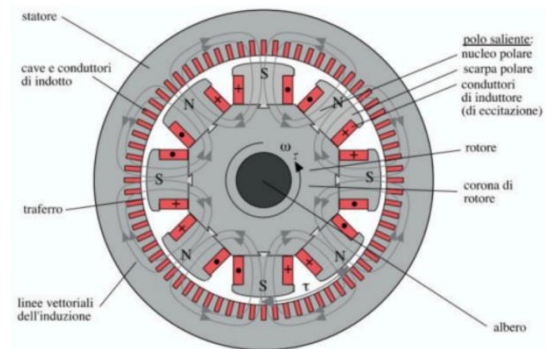
MACCHINA SINCRONA

16 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

L'aggettivo "sincrona" si riferisce al fatto che in questa macchina la velocità di rotazione del rotore e la velocità di campo rotante di statore sono strettamente collegate

Queste macchine vengono solitamente utilizzate in qualità di generatori (ad esempio delle centrali elettriche), e sono definite anche "alternatori".

- **Induttore:** Rotore
- **Indotto:** Statore



Il rotore crea un campo magnetico che ruota in modo solidale al rotore stesso, grazie all'utilizzo di magneti permanenti o avvolgimenti attraversati da corrente continua detti "avvolgimenti di eccitazione".

Le macchine in cui il rotore viene magnetizzato per mezzo di magneti permanenti sono chiamate *brushless*. Non è necessario che sia laminato perché non è sottoposto ad un campo variabile visto che esso è solidale al rotore;

Il rotore può essere sia a poli salienti che liscio:

- **Poli salienti:** Ho 2p bobine identiche tra loro
- **Liscio:** Gli avvolgimenti sono alloggiati nelle cave

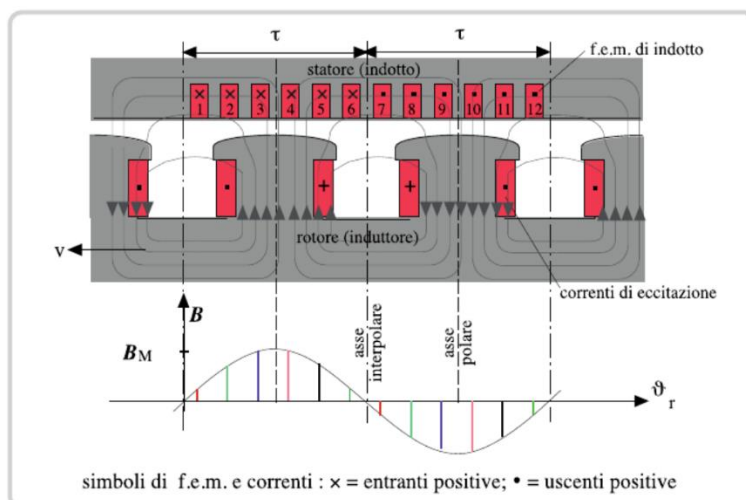
Lo statore invece presenta una serie di cave longitudinali uniformemente spaziate sulla faccia interna, che alloggiavano i conduttori di statore, collegati sulle due testate di macchina a realizzare 3 avvolgimenti.

I terminali degli avvolgimenti sono connessi a triangolo o a stella ad una rete in regime sinusoidale trifase

VALORI DI TARGA

- P_n : Nell'alternatore ha significato di potenza elettrica apparente erogata ed è espressa in VA
- V_n e I_n : Tensione e corrente nominale di indotto, hanno significato di valori efficaci
- $\omega_r = \frac{\omega}{p}$: velocità del rotore

17 FUNZIONAMENTO



In figura è rappresentato il rotore in sezione disteso su una linea dritta. I suoi avvolgimenti sono alimentati a corrente di eccitazione costante I_e ;

Sappiamo che l'andamento dell'induzione magnetica B sullo statore ha un andamento pressoché sinusoidale a causa dell'alternarsi di assi polari e interpolar:

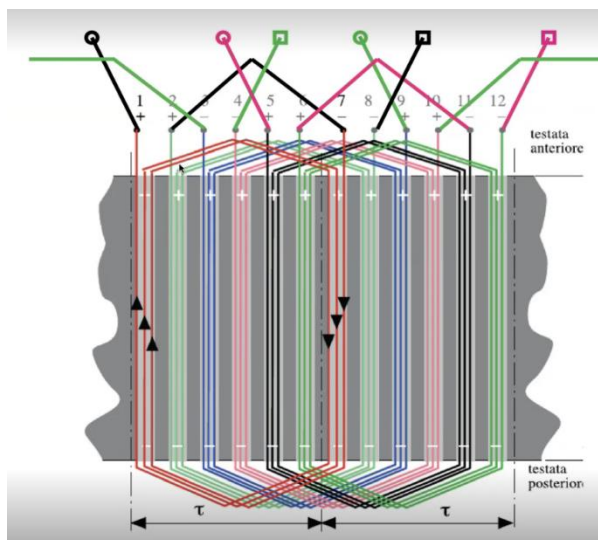
$$B(\theta_r) = B_M \cdot \sin(p\theta_r)$$

In cui B_m è il valore massimo (si ha in corrispondenza dell'asse polare) e θ_r è la coordinata angolare di un sistema di riferimento solidale con il rotore

Da ciò possiamo concludere che **ogni singolo conduttore che sta nelle cave di statore diventa sede di una fem indotta**, in quanto soggetto ad un campo B indotto variabile

Sia che io abbia rotore liscio o a poli salienti io ho questo campo circa sinusoidale al traferro nel momento in cui metto in moto il rotore.

17.1 FEM INDOTTE SULLO STATORE



In figura è rappresentato lo statore disteso su una linea retta in sezione, in modo da osservare il modo in cui sono disposti e collegati gli avvolgimenti

Descrizione:

Gli avvolgimenti di statore sono tali che ogni spira copre un semipasso polare: In totale devo ottenere 3 terminali (di ingresso e uscita), che nel nostro caso sono quello nero, rosa e verde. L'avvolgimento della fase 1 (nera) abbraccia due cave consecutive, sono 6 spire. A 120° ho l'avvolgimento della fase 2 a partire dalla cava 5 (rosa). Così ho gli inizi le fini dell'avvolgimento delle tre fasi distribuiti lungo tutta la periferia del rotore

Per ognuna di queste singole spire ho una fem indotta pari alla derivata del flusso rispetto al tempo, che va moltiplicata poi per quante sono le spire in una singola cava (in questo caso per tre) ma poi anche sommata in questo caso a quella verde perché sono in serie (quindi 6) per un coefficiente moltiplicativo anche minore di uno che tiene conto del fatto che, ad esempio per la fase 1, le spire rosse e le verdi sono leggermente sfasate:

$$e(t) = -k_s N_s \cdot \frac{d\phi_0(t)}{dt} = \omega k_s N_s \Phi_{0M} (\sin \omega t + \alpha)$$

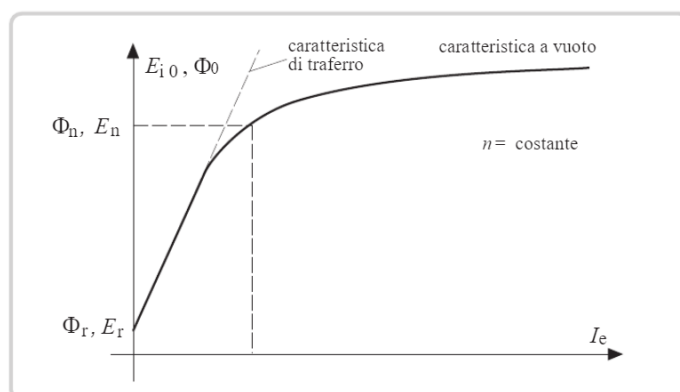
- Φ_{0M} massimo flusso concatenato ad una spira
- k_s coefficiente che tiene conto del fatto che le spire non sono tutte concentriche ma sono sfasate nello spazio, quindi non concatenano tutte il flusso massimo nello stesso istante

17.2 FUNZIONAMENTO A VUOTO

Se i terminali dello statore sono lasciati aperti si ha il funzionamento a vuoto, in cui il rotore è fatto ruotare alla velocità ω_r costante a cui corrisponde una pulsazione delle fem indotte sugli avvolgimenti pari a $\omega = p\omega_r$

Nel funzionamento a vuoto ho solo una fem indotta sullo statore, ma non vi circola corrente perché i terminali sono aperti

La fem indotta negli avvolgimenti di statore cresce inizialmente in modo lineare all'aumentare della corrente di eccitazione, ma poi si evidenzia il fenomeno della saturazione.



17.3 FUNZIONAMENTO A CARICO

I tre terminali dello statore (collegati a stella o triangolo) saranno collegati ad un carico esterno, quindi a 3 impedenze: Una volta che la macchina sincrona è chiusa al carico, sugli avvolgimenti di statore circola corrente, e si viene a creare un campo magnetico rotante prodotto dallo statore come quello studiato dal Teorema di Galileo-Ferraris

Ho quindi due campi magnetici

- campo prodotto dal rotore che vale $\frac{\omega}{p}$
- campo rotante di statore che ruota alla velocità $\frac{\omega}{p}$

I due campi si sommano vettorialmente, e ruotano in sincronia perché la loro velocità di rotazione è la stessa.

Flusso di reazione Φ_r : è il flusso collegato al campo di statore che si manifesta non appena lo statore è chiuso su un carico

Alla fine per sovrapposizione degli effetti:

- Flusso totale: $\Phi = \Phi_r + \Phi_0$
in cui Φ_0 è il flusso prodotto dal campo del rotore
- Fem totale indotta: $E = E_0 + E_r$
in cui E_r è la fem prodotta dal flusso di reazione

Come posso esprimere E_r ?

Essa è la fem prodotta dal flusso di reazione, quindi dalla corrente di statore e quindi in sostanza dalla reattanza stessa dello statore; quindi è possibile esprimere la fem indotta di reazione come caduta di tensione sulla reattanza equivalente degli avvolgimenti dello statore

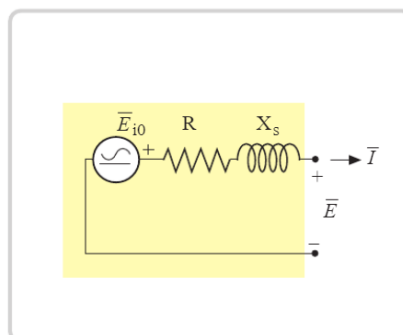
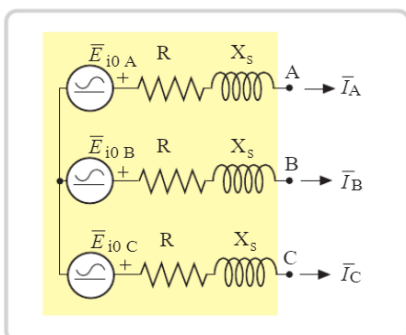
❖ X_i : Reattanza di reazione di indotto

Esprimiamo quindi la fem totale indotta sullo statore come E_0 meno una caduta di tensione sugli avvolgimenti stessi dello statore (chiaramente E_r è zero se non c'è corrente sullo statore)

$$E = E_0 - jX_i I$$

CIRCUITO EQUIVALENTE

Circuito trifase (e equivalente monofase) costituito da:



❖ Generatore E_0 : rappresenta la fem a vuoto

❖ X_s : reattanza sincrona, è la somma fra la reattanza di reazione e la reattanza di dispersione degli avvolgimenti

❖ R : resistenza dei fili (trasc.)

$$\text{Kirchhoff} \rightarrow \dot{E} = \dot{E}_{i0} - j\dot{I}X_i - (R + jX)\dot{I} = \dot{E}_{i0} - (R + j\dot{I}X_s)\dot{I} \cong \dot{E}_{i0} - j\dot{I}X_s$$

DIAGRAMMA FASORIALE

Preso I a fase nulla ho che E è sfasata rispetto ad I di un angolo φ che dipende dal carico collegato

La tensione ai capi di X_s (induttore) è in anticipo di 90° rispetto a I

La tensione ai capi di R è in fase con I

E_{i0} è data dalla somma vettoriale di E , $R\bar{I}$ e $jX_s\bar{I}$

Posso disegnare 3 tipologie di diagramma fasoriale a seconda del carico che ho:

1. Carico RL: E ed I sono sfasati con E che è in anticipo rispetto ad I
2. Carico resistivo: E ed I sono in fase
3. Carico RC: E è in ritardo rispetto a I

Mi accorgo che a parità di I , a seconda del carico mi cambia lo sfasamento che c'è tra E_0 e I e anche il modulo di E_0

Mi accorgo che a parità di fem E_0 , quindi mantenendo la corrente di eccitazione costante, se cambio il tipo di carico cambia il valore di E ai terminali

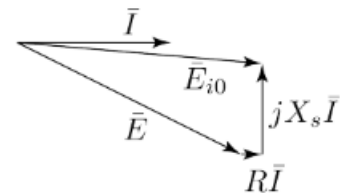
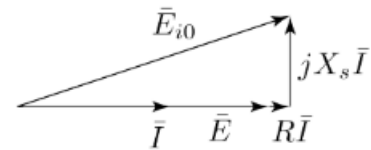
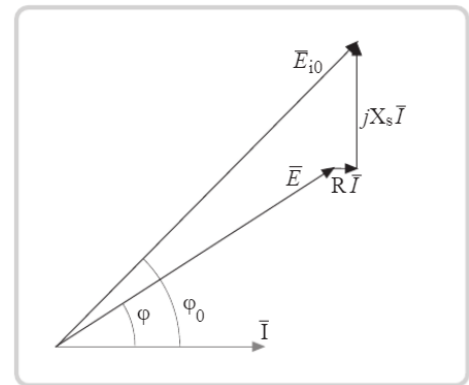
➔ Comportamento da generatore non ideale

BILANCIO DI POTENZA

- $P_g = 3E_{i0}I \cos \varphi_0$, potenza elettrica generata dalla macchina, uguale alla potenza meccanica in ingresso
 $P_m = C\omega_r$

- $P = 3EI \cos \varphi$, potenza elettrica erogata dalla macchina.

Con un bilancio di potenza ho uguaglianza tra la potenza erogata dalla macchina e la potenza meccanica.



17.4 FUNZIONAMENTO IN PARALLELO AD UNA RETE

Cosa accade se voglio collegare la mia macchina alla rete elettrica nazionale in cui la tensione E è fissata?

Noi sappiamo da una delle prime lezioni che due generatori di tensione non possono essere collegati in parallelo a meno che non abbiano la stessa tensione; quindi, affinché io possa collegare la macchina (inizialmente ha terminali aperti, non ci scorre I) devo avere $E = E_{i0}$

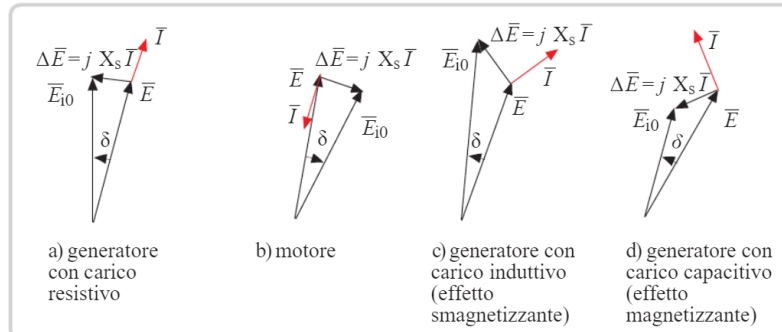
A questo punto ho effettuato il parallelo del generatore con la rete esterna e adesso posso variare il valore di E_{i0} e far iniziare a scorrere una corrente $I = \frac{E_{i0} - E}{jX_s}$

In queste condizioni posso:

- ➔ Aumentare o diminuire l'eccitazione E_{i0}
- ➔ Sfasare E_{i0} in anticipo e quindi immettere nella macchina potenza meccanica che viene erogata alla rete come potenza elettrica
- ➔ Sfasare in ritardo E_{i0} e quindi far assorbire potenza elettrica dalla rete e fornisce una coppia frenante esterna funzionando da motore

Funzionamento a vuoto

Se la fem indotta a vuoto E_{i0} eguaglia la tensione E della rete non passa corrente, quindi sono nulle pure le potenze attiva e reattiva erogate. La potenza meccanica assorbita all'albero è nulla e l'eccitazione produce una terna di fem a vuoto pari alle tensioni stellate della rete.



Funzionamento da generatore e da motore

(Figura a) Se il generatore alimenta un carico resistivo, la corrente I è in fase con E ; La fem indotta è in anticipo rispetto ad E di un angolo δ ($\delta > 0$) e i due valori efficaci sono quasi uguali, cosicché **la potenza erogata P è positiva** e la macchina funziona da **generatore**.

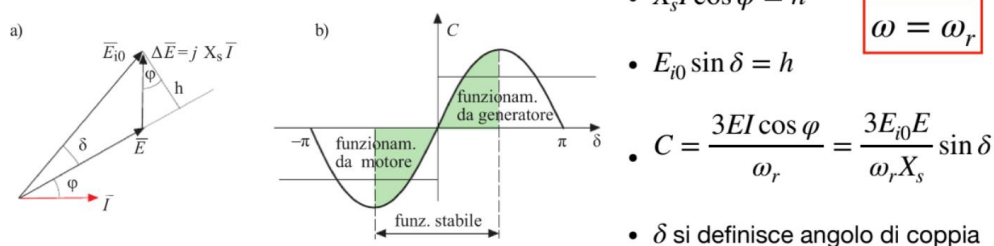
Per mantenere questa condizione di funzionamento con velocità angolare costante è necessario l'equilibrio delle coppie: essendo la coppia elettromeccanica resistente della macchina elettrica $C > 0$, al suo albero deve essere collegato un motore primo che, applicando un'uguale coppia motrice, tenga in rotazione la macchina, fornendo la potenza meccanica necessaria.

(Figura c) Se il generatore alimenta un carico RL, esso ha un effetto smagnetizzante, per compensare il quale la macchina deve essere sovraeccitata aumentando E_{i0} e la corrente di eccitazione

(Figura d) Viceversa, un carico RC ha un effetto magnetizzante, per compensare il quale la macchina deve essere sottoeccitata riducendo E_{i0} e la corrente di eccitazione.

(Figura b) Se la fem indotta E_{i0} ritarda su E (angolo $\delta < 0$) e i due valori efficaci sono quasi uguali, la corrente I risulta non nulla e circa in opposizione di fase rispetto a E , cosicché la potenza erogata P è negativa e la macchina funziona da motore. Per mantenere questa condizione di funzionamento con velocità angolare costante è necessario l'equilibrio delle coppie: essendo la coppia elettromeccanica resistente della macchina elettrica $C < 0$, al suo albero deve essere collegato un carico meccanico che, applicando un'uguale coppia resistente, ne freni la rotazione, assorbendo la potenza meccanica che il motore rende disponibile.

17.5 EQUILIBRIO MECCANICO



- L'equilibrio meccanico è garantito in un intervallo dell'angolo di coppia
- $$-\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2}.$$

ANGOLO DI COPPIA

L'angolo di coppia di una macchina sincrona è l'angolo tra il campo magnetico rotante generato dallo statore della macchina e il campo magnetico rotante generato dal rotore. Questo angolo è anche conosciuto come angolo di carico, poiché rappresenta il carico meccanico applicato alla macchina sincrona.

L'angolo di coppia è determinato dalla differenza di fase tra la tensione di alimentazione trifase e la corrente di eccitazione del rotore. In una macchina sincrona funzionante in condizioni di regime, l'angolo di coppia è costante e determina la posizione relativa del campo magnetico rotante del rotore rispetto a quello del campo magnetico rotante dello statore. Questa posizione relativa determina la coppia elettrica generata dalla macchina sincrona.

L'angolo di coppia è un parametro importante per la regolazione e il controllo della macchina sincrona. Se l'angolo di coppia varia a causa di variazioni di carico o di altre cause, la macchina può perdere la sincronia con la rete elettrica e causare problemi di stabilità del sistema di alimentazione. Per questo motivo, i controlli automatici della macchina sincrona, come i regolatori di tensione e gli stabilizzatori di frequenza, sono progettati per regolare l'angolo di coppia e mantenere la stabilità del sistema di alimentazione.

Variare il modulo di E_{i0} (quindi variare la corrente di eccitazione) varia la potenza reattiva che eroga alla rete, mentre l'angolo δ è responsabile della potenza attiva

Nel funzionamento da generatore, se aumento la coppia motrice fornita, il rotore tende ad accelerare, aumenta lo sfasamento tra E_{i0} ed E e quindi **l'angolo δ aumenta**. Di conseguenza, **aumenta anche la potenza elettrica** attiva erogata alla rete e così pure la coppia elettromeccanica resistente della macchina C , cosicché si raggiunge una nuova situazione di equilibrio. Questo è vero solamente se la coppia motrice rimane inferiore al valore massimo della coppia resistente (che si ottiene per $\delta = \pi/2$); se la coppia motrice supera tale valore, la macchina perde il sincronismo, la coppia elettromeccanica si annulla e l'alternatore accelera fino all'intervento di una protezione. Se invece la coppia motrice fornita dalla turbina diminuisce, il rotore tende a decelerare, δ diminuisce e si instaura nuovamente una situazione di equilibrio con una coppia resistente più bassa.

FUNZIONAMENTO DA MOTORE: CONSIDERAZIONI

Lo statore viene alimentato con una terna di correnti trifasi e si instaura un campo magnetico rotante, che trascina il flusso di rotore, il quale risulta in ritardo. L'angolo δ è negativo, la macchina produce una coppia motrice uguale alla coppia meccanica resistente entrambe negative. In tali condizioni la macchina assorbe potenza elettrica e la converte in potenza meccanica, mantenendo in rotazione l'albero a velocità costante. Se la coppia frenante esterna aumenta, l'angolo δ diviene ancor più negativo, e si raggiunge un nuovo equilibrio in cui la macchina assorbe una potenza elettrica maggiore. Questo è vero solamente se la coppia meccanica resistente rimane in modulo inferiore al valore massimo della coppia elettromeccanica (che si ottiene per $\delta = -\pi/2$); se la coppia resistente supera in modulo tale valore, la macchina perde il sincronismo, la coppia elettromeccanica si annulla e il motore si ferma.

17.6 FUNZIONAMENTO DA CONDENSATORE ROTANTE

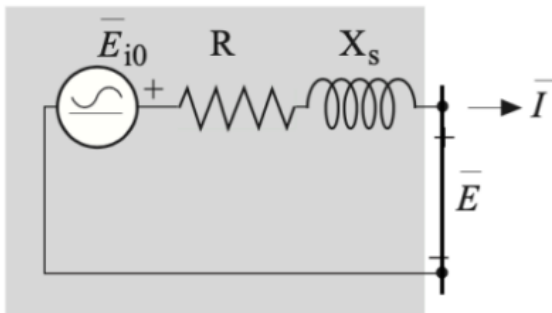
Se metto la macchina in parallelo alla rete so che devo avere $E = E_{i0}$

Supponiamo di non fornire coppia meccanica (non vario la potenza attiva scambiata con la rete) ma aumento la corrente di eccitazione e quindi E_{i0}

Chiaramente scorre corrente $I = \frac{E_{i0} - E}{X_s}$

La macchina eroga potenza reattiva alla rete, e di fatto si comporta come un condensatore nei confronti della rete (i condensatori erogano la potenza reattiva assorbita in precedenza, sono bipoli con memoria)

17.7 CIRCUITO EQUIVALENTE



Per determinare i parametri del circuito equivalente:

Prova a vuoto: Corrisponde al grafico della caratteristica a vuoto

Prova in cortocircuito: Mi serve per trovare il valore della X_s , infatti cortocircuito la macchina, alimento con una E_{i0} bassa per non bruciarla (E_{cc}), scorre una corrente bassa

Se trascuro R ho che $X_s = \frac{E_{cc}}{I_{cc}}$

MACCHINA ASINCRONA

18 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

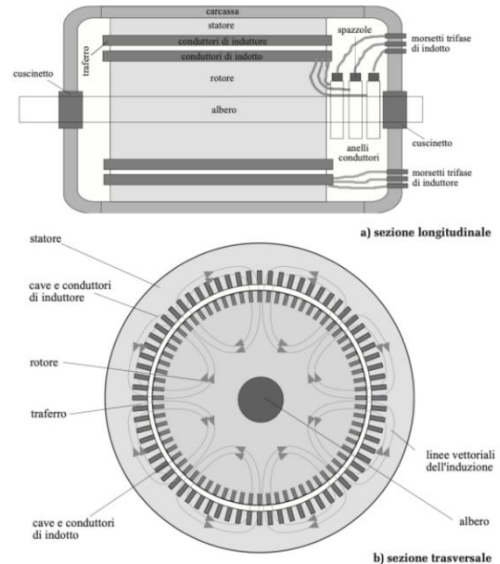
Il suo principio di funzionamento si basa su una differenza di velocità che c'è tra velocità del campo di statore e velocità del rotore.

Anche questa macchina è reversibile, ma è più comunemente utilizzata da **motore** (motore asincrono o motore a induzione)

Nella macchina sincrona ho due campi; quello del rotore e quello dello statore non appena passa corrente

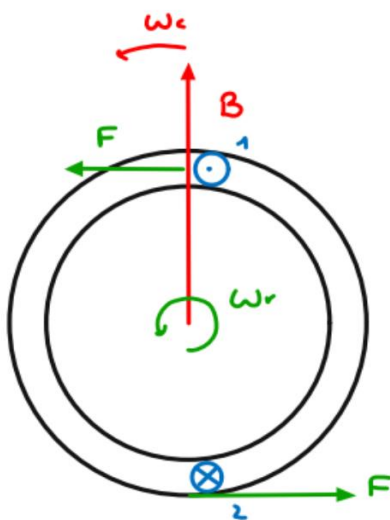
Nella asincrona esiste solo il campo di statore; ho bisogno solo di un circuito di alimentazione

- **Statore:** Avvolgimento trifase con p coppie polari che produce un campo grazie a Galileo-Ferraris. Possiede i 3 terminali per essere alimentato
- **Rotore:** Rotore ferromagnetico, la sua periferia esterna è dotata di cave in cui sono alloggiati i conduttori chiusi in cortocircuito creando di fatto un unico avvolgimento



Rotore a gabbia di scoiattolo: nelle macchine più economiche in ogni cava viene messa una sbarra di materiale conduttore, e queste sbarre sono chiuse poi da due anelli. Esiste anche il motore a doppia gabbia

Principio di funzionamento:



Prendo un cilindro cavo di materiale conduttore e lo immergo in un campo magnetico rotante (assimiliamolo al campo prodotto dallo statore grazie al Teorema di Galileo-Ferraris)

$$\begin{cases} F = qvB \\ F = ilB \end{cases}$$

Una generica carica q posta nel punto 1 tende ad essere spinta verso l'esterno del foglio

Si crea una corrente uscente

Una generica carica q posta nel punto 2 tende ad essere spinta verso l'interno del foglio

Si crea una corrente entrante

Su metà cilindro ho corrente in una direzione, sull'altra metà nel verso opposto

Queste correnti che si creano interagiscono col campo che le ha create creando una coppia meccanica che fa ruotare il cilindro nella stessa direzione di rotazione del campo B

Precisamente: Gli avvolgimenti di rotore diventano sede di fem una volta investiti dal campo di statore. Essendo gli avvolgimenti in cortocircuito sono attraversati da corrente che interagiscono col campo B dando origine alla coppia motrice

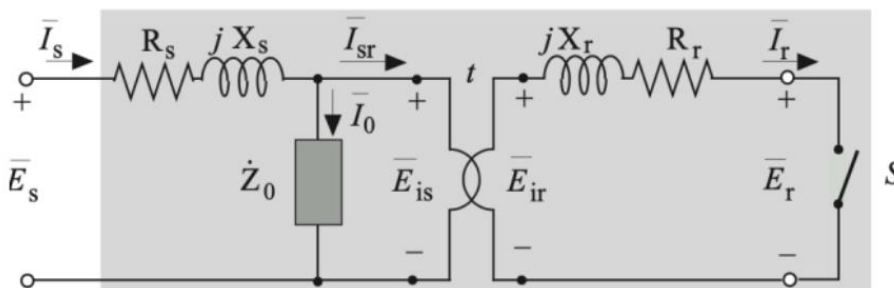
DATI DI TARGA

La potenza nominale è data in W e non in VA

Questa macchina è infatti pensata per funzionare da motore; quindi, la potenza è quella meccanica

19 CIRCUITO EQUIVALENTE TRASFORMATORE

Supponiamo di tagliare l'avvolgimento di rotore: non è più chiuso a cortocircuito, pertanto sarà solo sede di una fem ma non vi scorrerà una corrente: ho realizzato un oggetto che a fronte di un'alimentazione (sullo statore) produce una fem indotta a distanza (sul rotore) → **TRASFORMATORE**



Quando il rotore è aperto una macchina asincrona somiglia ad un trasformatore, in cui le tensioni E_1 ed E_2 sono E_s e E_r

- ✚ I_s : corrente dello statore (della fase 1 si intende)
- ✚ R_s, jX_s : resistenza e reattanza di dispersione dell'avvolgimento di statore
- ✚ Z_0 : impedenza di magnetizzazione che tiene conto delle perdite per isteresi/correnti parassite in statore e rotore
- ✚ Il trasformatore ideale centrale tiene conto del rapporto tra le tensioni/flussi in statore e rotore
- ✚ R_r, jX_r : resistenza e reattanza di dispersione dell'avvolgimento di rotore
- ✚ t : rapporto di trasformazione (ci importa poco)

In realtà però il rotore è chiuso in cortocircuito: chiudo S

Corrente che circola sul rotore: $I_r = \frac{E_{ir}}{R_r + jX_r}$



Col rotore libero di ruotare esso si mette in moto seguendo il campo di rotazione di statore: se non c'è niente che lo frena, lui accelera fino al punto in cui raggiunge la stessa velocità del campo di statore

Se la velocità del rotore è uguale alla velocità del campo di statore, non ho fem indotte sul rotore, quindi non ho correnti sul rotore, non ho interazione tra correnti di rotore e campo di statore, non ho coppia meccanica: il funzionamento della macchina si basa proprio sulla differenza di velocità

Si raggiunge la condizione ideale di $\omega_c = \omega_r$ che prende il nome di "rotore libero"

- Rotore libero = Trasformatore a vuoto
 - Infatti, in entrambi i casi non scorre corrente sul rotore
- Scorrimento di una macchina asincrona: $\frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_c}$
 - $s = 1$: Rotore fermo, se questo viene tenuto bloccato meccanicamente oppure ogni volta nell'istante in cui la macchina viene avviata
 - $s = 0$: Rotore libero, se raggiungo la velocità di sincronismo

Legame tra le frequenze:

ω è la pulsazione con cui alimento lo statore; le fem indotte sul rotore sono proporzionali alla velocità relativa, ma questo vale anche la pulsazione stessa delle fem indotte.

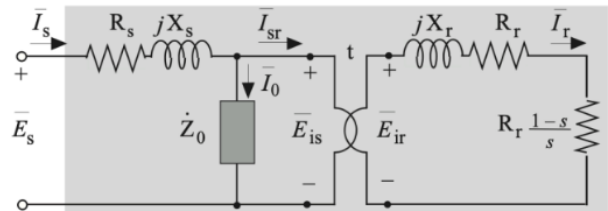
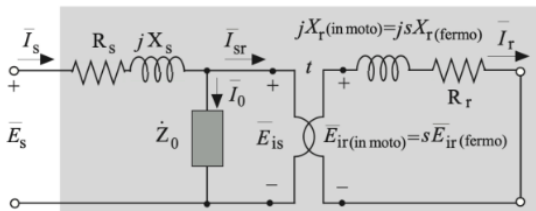
Le fem indotte sul rotore e (quindi anche le correnti) non hanno come pulsazione ω ma $s\omega$ che è appunto di fatto legata alla velocità relativa tra il campo di statore e il rotore

Se il rotore è fermo vede il campo che ruota a 50Hz ed è sede di fem con pulsazione 50Hz

Quando il rotore gira le fem indotte sul rotore sono più piccole e vanno anche più lentamente

Quando ω_r è vicino a ω_c le fem indotte sono molto più piccole e hanno frequenza di oscillazione minore.

19.1 CIRCUITO EQUIVALENTE



La pulsazione delle fem dipende dallo scorrimento

Quindi nell'equazione della fem indotta sostituisco ad ω la grandezza $s\omega$

- $E_{ir(moto)} = -j(s\omega)k_r N_r \Phi$
 - $E_{ir(moto)} = sE_{ir(fermo)}$
- $X_{s(moto)} = j(s\omega)L$
 - $X_{s(moto)} = sX_{s(fermo)}$

Il circuito equivalente col rotore in moto lo posso rappresentare mettendo in evidenza la s ed esprimerle con le loro grandezze a rotore fermo

So che questo circuito equivalente va bene per calcolarmi i moduli delle tensioni e delle correnti ma non le forme d'onda che sono a frequenza diversa

Scrivo l'espressione della corrente sul secondario (rotore)

$$\begin{aligned} \bar{I}_r &= \frac{s\bar{E}_{ir}}{R_r + jsX_r} = \frac{\bar{E}_{ir}}{\frac{R_r}{s} + jX_r(\pm R_r)} = \\ &= \frac{\bar{E}_{ir}}{R_r + jX_r + R_r \frac{1-s}{s}} \\ &\bullet \quad R_r \frac{1-s}{s} = R_c: \text{resistenza di carico} \end{aligned}$$

Se guardo questa espressione della corrente è: tensione da fermo diviso resistenza + reattanza da fermi + un'unica grandezza che dipende da s

❖ Resistenza di carico; non esiste fisicamente

Questo accorgimento mi serve per trasformare il circuito equivalente, in modo che non si perda l'informazione relativa alla frequenza diversa fra grandezze di rotore e di statore

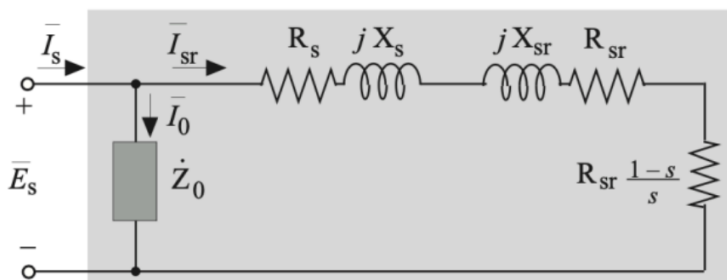
$$\bullet \quad s = 0 \implies R_c \rightarrow \infty$$

$$\bullet \quad s = 1 \implies R_c = 0$$

Interpretazione fisica:

In un motore, la potenza elettrica in ingresso diventa potenza meccanica. Nel nostro circuito equivalente, la potenza elettrica in ingresso va un po' su R_r , su Z_0 , su R_s e il grosso si dissipa su R_c

La potenza assorbita da R_c è la potenza meccanica prodotta dalla macchina come motore



Riportando le impedenze del secondario (rotore) al primario (statore) posso usare il circuito semplificato (moltiplico per t^2 le grandezze del rotore e metto in evidenza Z_0)

- Z_0 è più piccola che nei trasformatori perché c'è il traferro

Questo circuito equivalente quantifica la potenza meccanica: $P = 3R_{sr} \frac{1-s}{s} I_{sr}^2$

- $0 < s < 1$: funzionamento da motore
- $s < 0$: funzionamento da motore
 - o Sto spingendo il rotore ad una velocità superiore al campo di statore
- $s > 1$: funzionamento da freno elettromagnetico
 - o Inizialmente alimento la macchina, il rotore si mette in movimento nella direzione del verso di statore. Poi cambio istantaneamente la direzione di rotazione del campo di statore e ho ω_r e ω_c discordi. Il campo tende a trascinare il rotore in direzione opposta a quello in cui il rotore si sta muovendo, e lo frena

20 CARATTERISTICA MECCANICA

Posso ricavare un'espressione della coppia meccanica in funzione di parametri costruttivi tra cui p , dalla tensione di alimentazione e dalla frequenza di alimentazione

$$P_m = C\omega_r \Rightarrow C = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{3R_{sr} \frac{1-s}{s} I_{sr}^2}{\frac{\omega}{p}(1-s)} =$$

$$= 3 \frac{p}{\omega} \frac{R_{sr} I_{sr}^2}{s} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{E_1^2}{t^2} \frac{R_r}{\frac{R_r^2}{s} + sX_r^2}$$

$$C(s) = 3 \frac{p}{\omega} \frac{E_1^2}{t^2} \frac{R_r}{\frac{R_r^2}{s} + sX_r^2}$$

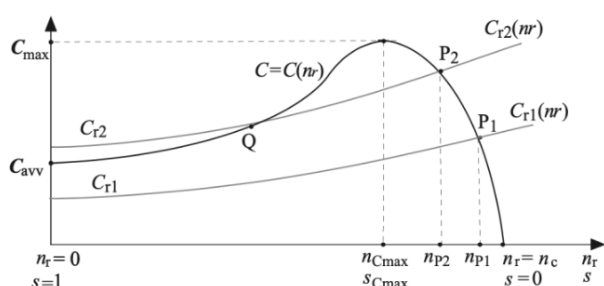
$$\bullet \quad \eta = \frac{P_m}{P} = \frac{P_m}{P_m + P_{Fe} + P_{Cus} + P_{Cur}}$$

- Parametri costruttivi: R_r , p , X_r
- Tensione di alimentazione: E_1
- Frequenza di alimentazione: ω
- Scorrimento: s

Noi consideriamo come noti e fissi tutti i parametri costruttivi, e anche E_1 e ω

Definendo la frequenza di alimentazione definiamo la velocità del campo, e quindi il limite massimo di velocità del rotore

Facendo lo studio di funzione di $C(s)$ viene fuori:



L'asse x va da $s=1$ (rotore fermo) a $s=0$ (rotore libero).
Notare che per scorrimento nullo (rotore libero) ho coppia nulla.

Quando la macchina è ferma e la collego alla rete elettrica si produce la “**coppia di avviamento**”, ossia la coppia che la macchina produce quando è ferma

$$C_{tot} = C_{motrici} - C_{resistenti} = J \frac{d\omega_r}{dt}$$

La coppia motrice è quella che la macchina genera (funzionando da motore) la coppia resistente è quella del carico meccanico.

Se la mia coppia resistente è C_{r1} la macchina si ferma quando $C_m = C_r$, ossia nel punto P1

Se la mia coppia resistente è C_{r2} la macchina si ferma nel punto P2

Suddivisione del grafico

- $s > s_{max}$: Tratto di funzionamento stabile
 - a. Se nel punto P1 aumento leggermente la coppia resistente, ho un rallentamento della macchina e risalgo la curva; così facendo però la coppia meccanica aumenta e quindi compensa il rallentamento
- $s < s_{max}$: Tratto di funzionamento instabile
 - a. Se in un punto in questa zona aumento la coppia resistente, ho un rallentamento della macchina e scendo lungo la curva; così facendo diminuisce anche la coppia meccanica. La macchina tende a rallentare, la coppia diminuisce e questo rallentamento viene sempre di più accentuato fino a che la macchina non si ferma.

Lo spartiacque lo fa il punto di massimo, che mettendo la derivata uguale a zero può essere calcolato

$$s_{Cmax} = \frac{R_r}{X_r}, C_{max} = \frac{3pE_1^2}{2t^2\omega X_r}$$

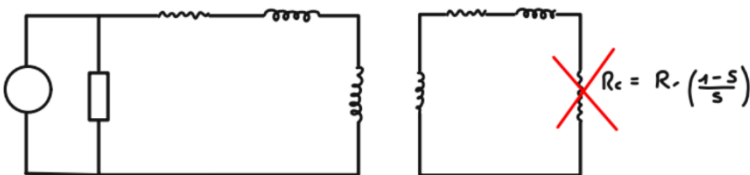
21 AVVIAMENTO DELLA MACCHINA ASINCRONA

La macchina asincrona presenta 2 problemi all'avviamento:

Problema 1:

Se all'avvio ho una coppia resistente (C_{r1}) più piccola della coppia di avviamento la macchina parte

Se all'avvio ho una coppia resistente (C_{r2}) più grande della coppia di avviamento la macchina non ce la fa



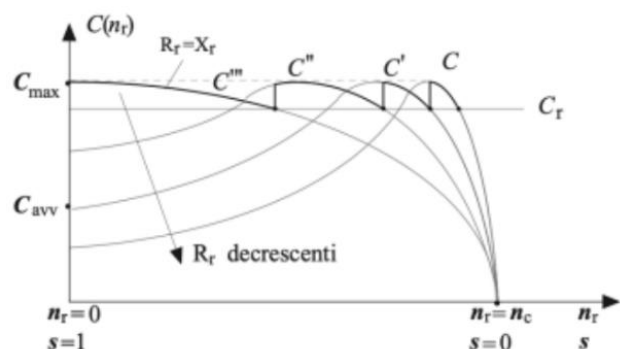
Problema 2:

All'avviamento ho $s=1$ quindi la resistenza $R_c=0$ e quindi il rotore è cortocircuitato: è il momento in cui le correnti sono maggiori; quindi, la macchina ha un grande stress termico

21.1 AVVIAMENTO CON REOSTATO

Noto che la coppia massima non dipende dalla resistenza del rotore, mentre lo scorrimento s_{Cmax} sì; Se io riesco ad aumentare R_r , aggiungendo una resistenza R_a aggiuntiva sul rotore, il punto di massimo cresce e si sposta verso sinistra mentre il valore massimo resta uguale.

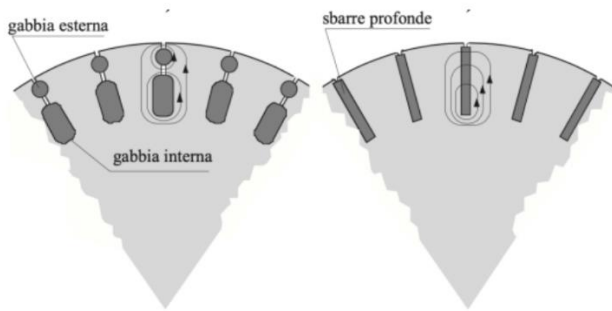
Aumentando la resistenza di rotore le curve variano come in figura → Aumenta la coppia di avviamento



$$s_{cmax} = \frac{Rr + Ra}{Xr}$$

- La resistenza aggiuntiva si può ottenere con l'aggiunta di **contatti striscianti sul rotore**
- Nel circuito equivalente la resistenza **Ra va aggiunta in serie a Rr**
- Dopo che la macchina è partita rimuovo la resistenza** addizionale per avere maggior rendimento ed evitare inutili perdite di potenza

21.2 ROTORE A DOPPIA GABBIA



Nei rotori a gabbia di scoiattolo il posizionamento di una resistenza aggiuntiva è complicato; pertanto, per sopperire al problema dell'avviamento si utilizza una “**rotore a doppia gabbia**”, in cui entrambe le gabbie sono chiuse in un proprio cortocircuito.

La gabbia interna ha:

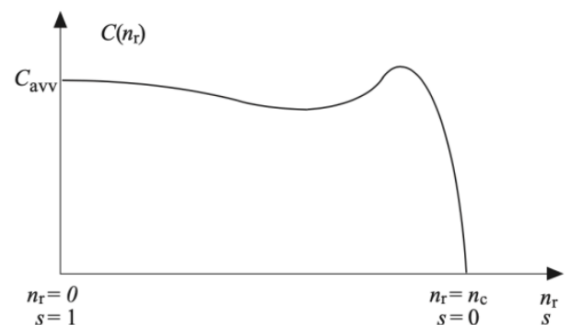
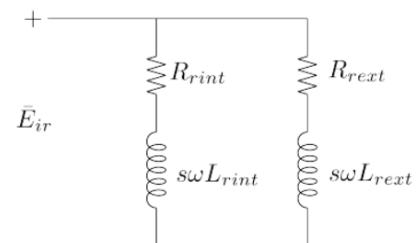
- Xr maggiore: Ha più linee di campo che si richiudono dentro la gabbia ma non si concatenano con lo statore, cioè un maggior flusso disperso
- R minore: La realizzo con sezione maggiore di quella esterna

Per $s = 1$ (all'avviamento) i termini delle reattanze hanno un peso maggiore: la corrente scorre sulla gabbia ad impedenza più bassa (quella esterna) anche se ha resistenza più alta

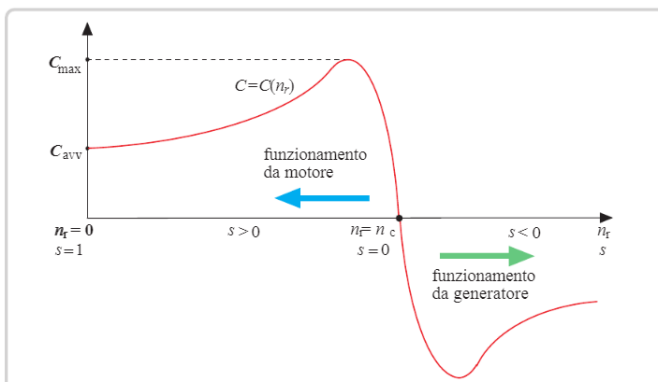
→ È come mettere un reostato

Per $s = 0$ prevalgono i termini resistivi, quindi la corrente passa dalla gabbia con resistenza minore

→ È come togliere il reostato



22 FUNZIONAMENTO DA GENERATORE



Per $\omega_r > \omega_c$ ho $s < 0$ e la macchina asincrona funziona da generatore

Prendo la caratteristica meccanica precedente e la prolungo oltre $s=0$

La coppia fornita dalla macchina diventa frenante e io spingo dall'esterno

La **resistenza di carico diventa negativa**: su questa resistenza si dissipa una potenza negativa, cioè la potenza attiva viene ceduta alla rete

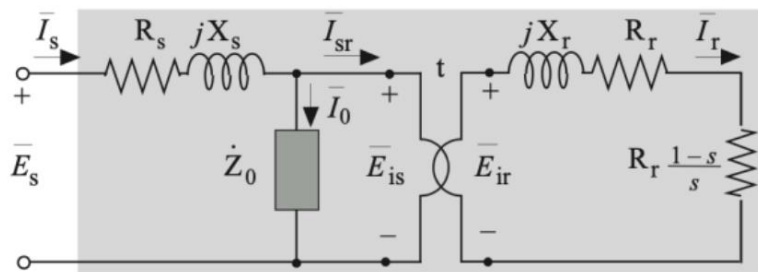
Perché si usa poco?

Se io fornisco una coppia esterna al rotore, e collego i terminali dello statore ad un carico che voglio alimentare, cosa accade? Niente!

Il campo magnetico nella macchina asincrona è creato dallo statore, ma se io ci collego 3 resistenze senza alimentarlo dall'esterno, esso non crea alcun campo magnetico e la macchina non funziona, non si crea corrente.

Affinché io possa erogare potenza attiva alla rete **devo comunque alimentarla con un generatore di tensione** che mi fornisca potenza reattiva: osservando infatti il circuito equivalente, noto che oltre alle resistenze (che globalmente sono < 0 e quindi la potenza è erogata alla rete) la somma delle reattanze è positiva

23 FUNZIONAMENTO DA FRENO ELETTROMAGNETICO



In queste condizioni la velocità di rotazione del rotore è opposta a quella del campo

- $s = \frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_c}$ con $\omega_r < 0$ e quindi $s > 1$

La resistenza di carico è anche in questo caso negativa

Tutta l'energia cinetica immagazzinata nel rotore è dissipata sulle resistenze di rotore e statore (R_s e R_r)
Come un freno meccanico dissipa energia cinetica per attrito, un freno elettromagnetico la dissipa per effetto joule sulle resistenze di rotore e di statore

24 MOTORE ASINCRONO MONOFASE

Lo statore ha un unico avvolgimento:

Non si crea il campo rotante

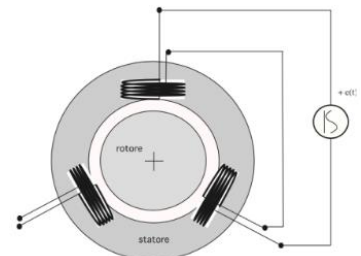
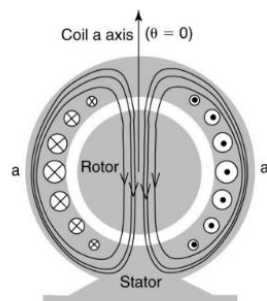
Però un campo fisso lo posso vedere come la somma di due campi controrotanti

Penso al campo alternativo prodotto dall'avvolgimento di statore come due campi controrotanti: la macchina

all'inizio non sa in che verso andare, ma se in qualche modo le do una direzione di moto allora:

Il campo in tale direzione (diretto) sarà il campo rotante che la fa funzionare da motore ($0 < s < 1$)

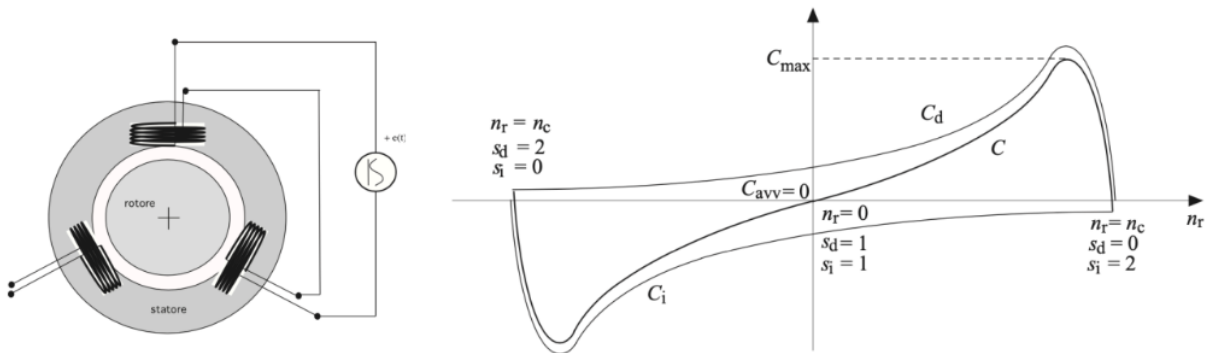
Il campo nella direzione opposta (inverso) sarà il campo rotante che la fa funzionare da freno ($s > 1$)



$$s_d = \frac{n_c - n_r}{n_c}, s_i = \frac{-n_c - n_r + \pm n_c}{-n_c} = 2 - s_d$$

Posso **sommare algebricamente le due caratteristiche meccaniche**: Il grafico risultante ha coppia all'avviamento nulla.

Una volta avviata la macchina essa si mette in moto (indistintamente) in un verso o nell'altro

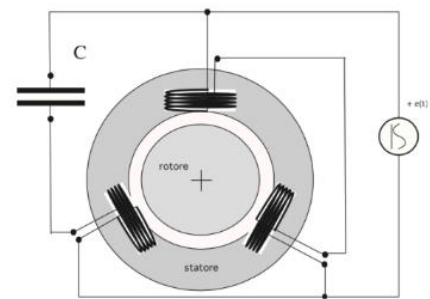


24.1 AVVIAMENTO

CONDENSATORE

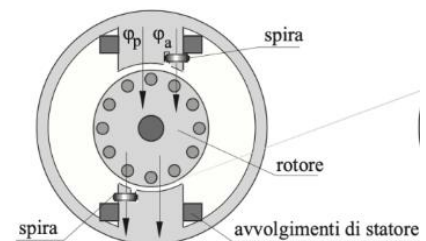
Da un impulso iniziale creando un secondo avvolgimento sul rotore, collegando un condensatore, perché in questo modo il campo alternativo si somma ad un altro campo sfasato rispetto al precedente.

La somma di questi due campi mi crea un campo rotante un po' brutto che mi serve solo a far partire la macchina: una volta partita posso lasciarlo o toglierlo.



POLI SCHERMATI

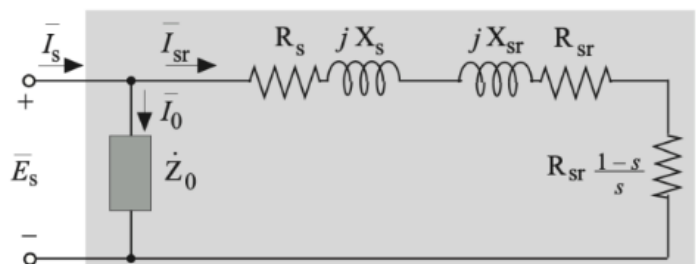
Lo statore ha il suo unico avvolgimento e quindi il campo di statore lo attraversa lungo l'asse; se io sul polo ci ricavo un dente e ci metto una piccola bobina di rame, induco una fem che crea un piccolo campo sfasato rispetto all'altro e fa l'effetto di simil-campo rotante che mi mette in rotazione la macchina



25 PROVE PER LA VALUTAZIONE DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

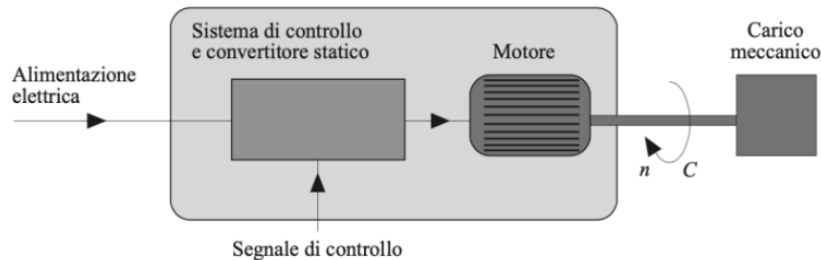
Come determino il circuito equivalente?

- **Prova a vuoto:** Sostituita dalla "prova a rotore libero" che ha lo stesso significato perché non ho corrente
 - Determino Z_0
- **Prova in cortocircuito:** Sostituita dalla "prova a rotore bloccato" perché $s=1$
 - Determino Z_{cc} che in questo caso è $Z_s + t^2 Z_r$



AZIONAMENTI E MACCHINE SPECIALI

26 GENERALITA'

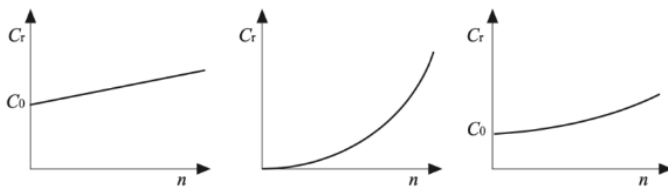


Fino ad ora noi abbiamo considerato motore + carico meccanico, e il motore veniva alimentato dalla rete elettrica

In realtà quando parliamo di azionamento si dà in ingresso al motore non soltanto un'alimentazione, ma al motore si dà in ingresso una tensione un po' più elaborata, ad esempio a frequenza o a tensione variabile, eseguito attraverso i convertitori

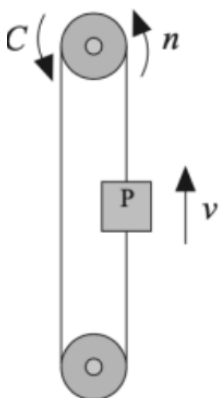
In più, per consentire una regolazione delle condizioni di funzionamento del motore ci sono anche dei sensori che misurano la prestazione del motore, andando a creare un circuito chiuso di controllo: l'alimentazione è funzione anche del funzionamento in ogni istante del motore

In questo modo riesco a regolare tutte le grandezze meccaniche ed elettriche del funzionamento

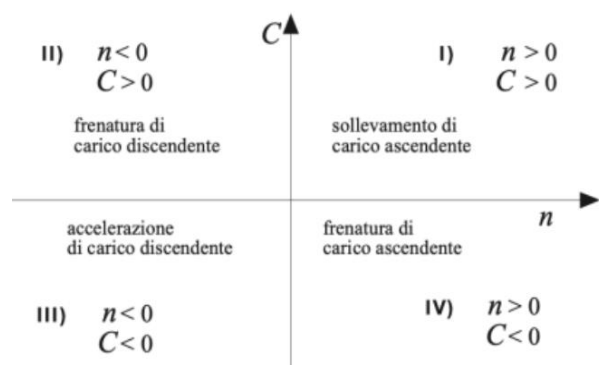


AZIONAMENTO = Motore + Alimentazione opportunamente controllata

A seconda del tipo di caratteristica meccanica del carico io devo scegliere il motore, considerando avviamento e punto di lavoro

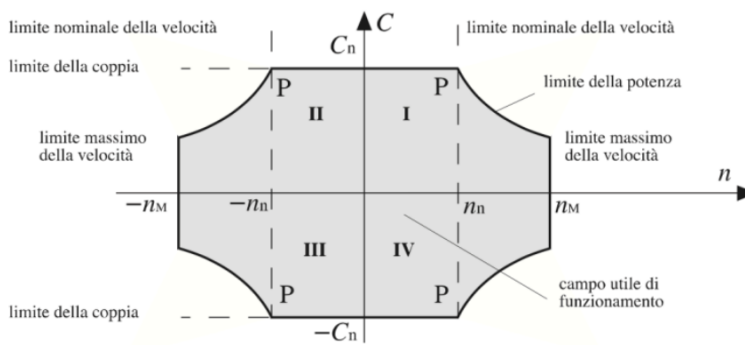


Per i motori spesso si accoppia la caratteristica meccanica con la caratteristica della coppia resistente, per delineare una zona di piano in cui la macchina funziona;
In un sistema come quello a lato, la coppia meccanica spinge in rotazione e muove il carico



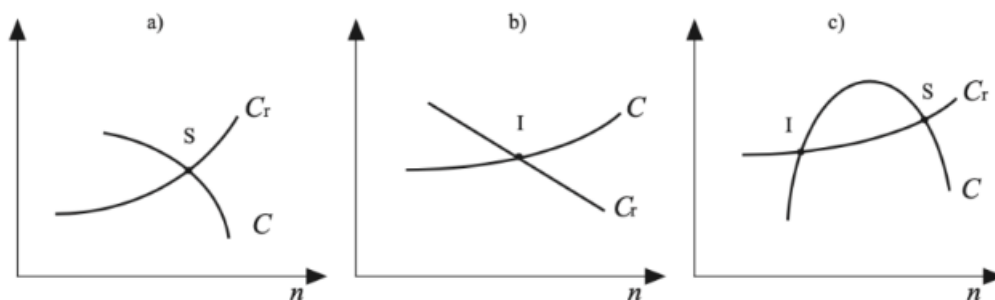
Posso avere 4 diverse zone di funzionamento in base al segno della coppia e della velocità di rotazione.

Spesso guardando i cataloghi dei motori si trovano grafici in cui sono indicati questi 4 quadranti



- Limiti massimi della velocità (linee verticali) dovute alle caratteristiche del motore stesso o dei componenti
- Limiti massimi delle coppie (linee orizzontali)
- Potenza meccanica che nel piano Coppia-velocità ha un andamento iperbolico essendo costante il prodotto

Altre caratteristiche di cui dobbiamo tener conto è la stabilità meccanica nel punto di lavoro (lo avevamo visto nella macchina asincrona)



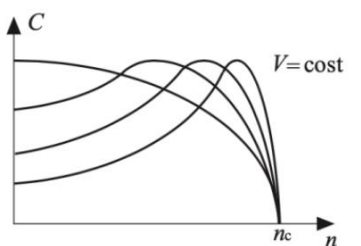
Ma esiste anche un altro tipo di stabilità, ossia la stabilità dinamica:

Io sto lavorando in un certo punto di lavoro: decido di variare la velocità, oppure di variare la coppia

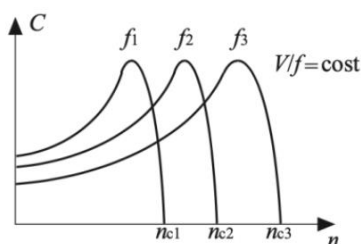
Ad una variazione meccanica corrisponde un transitorio meccanico, cioè corrisponde un'oscillazione del numero di giri che poi si riassettano al nuovo valore. Alla fine del transitorio meccanico ho uno smorzamento delle oscillazioni e un ritorno alle condizioni di lavoro iniziali

27 AZIONAMENTI CON MOTORI CONVENZIONALI

27.1 MACCHINA ASINCRONA



Sappiamo che per azionare una macchina asincrona potrei utilizzare un reostato di avviamento, utile anche per regolare la velocità: però è chiaro che aggiungere una resistenza sul rotore e lasciarcela significa diminuire il rendimento, perché se la potenza in uscita è $C \cdot \text{velocità meccanica}$, la potenza diminuisce a spese di una dissipazione per effetto joule della resistenza che ho aggiunto



Che succede se invece, attraverso un convertitore DC/AC, cambio la frequenza con cui alimento la macchina? Cambia la velocità del campo di statore: faccio funzionare la macchina a velocità minore

Posso ottenere tante curve diverse a seconda della velocità di alimentazione: poiché la caratteristica meccanica è quella, per avere lo stesso C_{max} variando ω devo variare E

27.2 MACCHINA SINCRONA

I problemi dell'utilizzo della macchina sincrona sono due:

- Non si avviano da soli: serve la procedura di parallelo
- Hanno la velocità di rotazione costante: La caratteristica coppia-numero di giri è costante, è una retta verticale

Ma se io la alimento con un convertitore che fornisce alla macchina tensione e corrente regolabili con continuità, parto da frequenza nulla e piano piano aumento la velocità di rotazione del campo, riesco a far partire la macchina

Io sto spostando la caratteristica meccanica sul piano, verso valori di velocità minori

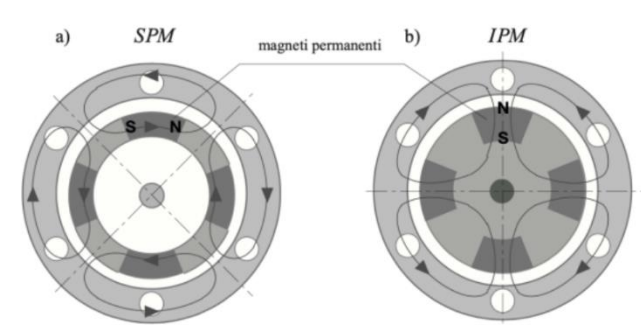
La macchina riesce ad adeguare la coppia motrice alla coppia resistente, fino ad un valore massimo

Macchina sincrona + inverter di alimentazione = Motore brushless

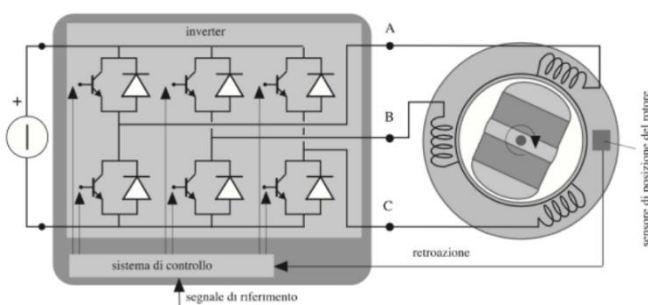
27.2.1 MOTORE BRUSHLESS

È un motore dove l'alimentazione è data attraverso un inverter e dove di fatto il rotore ha dei magneti permanenti che forniscono il campo di rotore

Non ci sono le spazzole che consentono l'alimentazione del rotore, perché non c'è l'avvolgimento



- ❖ Se i magneti sono montati in superficie e il campo segue un andamento tangenziale il motore è detto SPM
- ❖ Se i magneti sono montati internamente e il campo segue un andamento radiale il motore è detto IPM



Nell'immagine accanto c'è il rotore con i magneti e lo statore alimentato attraverso un inverter. Inoltre i motori brushless hanno il controllo in retroazione, cioè si misura la posizione e la velocità del rotore in ogni istante, questo segnale ritorna ad un processore che riceve il comando e quindi l'inverter regola tensione e frequenza di alimentazione sulla base di cosa dico io e sulla condizione di lavoro (controllo a circuito chiuso)

Un'altra classificazione è tra

- ❖ Brushless DC motor: In uscita dall'inverter ho funzioni d'onda di tensioni rettangolari, e gli avvolgimenti statorici sono concentrati nelle 3 classiche bobine
- ❖ Brushless AC motor: In uscita dall'inverter ho funzioni d'onda sinusoidali e gli avvolgimenti sono distribuiti

28 AZIONAMENTI CON MOTORI SPECIALI

28.1 MOTORE A PASSO

Il motore a passo serve quando ho necessità di far compiere al motore dei movimenti non continuativi ma a step di un delta di rotazione che so che deve essere preciso, accurato.

Pensando alle stampanti 3D

Principio di funzionamento (riluttanza variabile):

Abbiamo uno statore con poli salienti (6 in tutto) e un rotore con 4 poli. Il rotore è nella posizione in figura, e io di colpo alimento la fase A. Sappiamo che alimentando la fase A le linee di campo restano intrappolate dentro lo statore di materiale ferromagnetico seguendo il percorso indicato dalla freccia, e si richiudono seguendo il traferro a riluttanza più piccola.

Si crea un nord e sud tra i poli di rotore e statore e il rotore ruota di un certo angolo fino ad arrivare in posizione verticale.

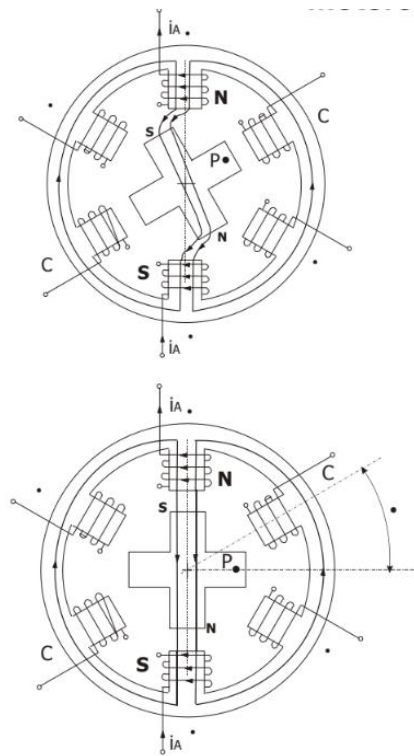
Alimento la fase B con un impulso e accade la stessa cosa, faccio compiere un altro angolo di giro al rotore.

Alimentando una coppia di poli di statore, si crea un campo statico alla quale il rotore si allinea.

Riesco a garantire una rotazione a scatti di un angolo opportuno.

- Non ha problemi di avviamento
- Velocità regolabile: dipende da quanto velocemente switcho da una fase all'altra
- Non è necessario un sistema di controllo dato che ad ogni impulso il rotore ruota di angolo noto

Se lo statore non è alimentato il rotore rimane "ciòdoloni" perché non c'è la cosiddetta coppia di tenuta. Se ho bisogno che anche senza alimentazione lo statore riesca a mantenere entro certi limiti una certa coppia, posso montare dei magneti permanenti sui poli del rotore, che mi mantengono la macchina in una data posizione anche se non è alimentata.



28.2 MOTORE SWITCHED RELUCTANCE

E' il motore passo a riluttanza variabile, ma con potenza elevata.

C'è tutto un sistema di controllo che può regolarne la frequenza e si trasforma in un motore che pur andando a scatti ha la sua velocità imposta dall'utente.

28.3 MOTORE SINCRONO A RILUTTANZA VARIABILE

Abbiamo descritto il motore brushless come motore sincrono alimentato con inverter e magneti sul rotore.

Una sua evoluzione consiste nel costruire il rotore che non abbia né magneti né avvolgimento.

Come faccio a far sì che il campo nel rotore segua una direzione preferenziale e ricrei l'effetto del motore?

Creo un rotore anisotropo: verso l'interno ci sono delle barriere di flusso (di ferro)

Le linee di flusso devono quindi seguire un certo andamento, ossia quello del materiale ferromagnetico, e il rotore tende ad allinearsi assecondando il campo di statore in accordo alle sue direzioni preferenziali