

MACCHINE ELETTRICHE

8-1-2002

1) TRASFORMATORE come macchina elettrica

Lo scopo principale del Trasformatore è quello di cambiare il livello della tensione di alimentazione (per esempio in un utilizzatore!).

Il trasformatore funziona in regime alternato sinusoidale e vediamo tutto in regime alternato sinusoidale!

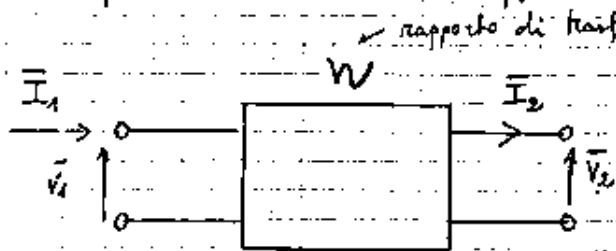
Ricordo che in regime alternato sinusoidale, la potenza elettrica:

$$P = R_e (\bar{V} \bar{I}) = \underbrace{V I}_{\text{valori efficaci}} \cos \varphi$$

angolo di fase

Il compito fondamentale del trasformatore è quello di trasmettere una potenza elettrica cambiando i rapporti tra tensione e corrente!!

Il trasformatore è un doppio bipolo:



rapporto di trasformazione

Mediante il rapporto di trasformazione n ,

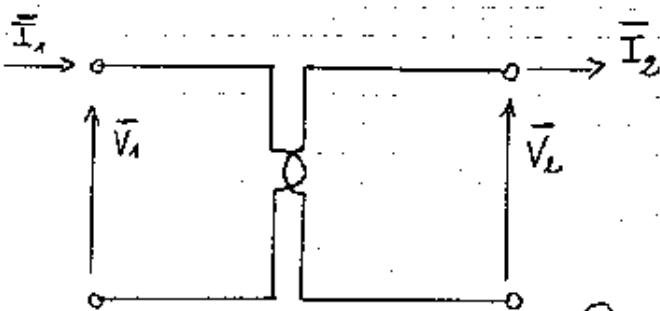
il trasformatore ideale ha lo scopo di cambiare

il valore numerico della tensione e della corrente, mantenendo costante il

prodotto delle due e quindi la potenza!!

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = n = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1}$$

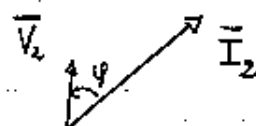
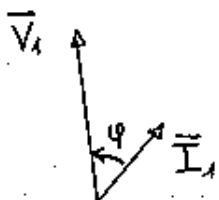
Ma questo l'abbiamo già visto: è il trasformatore ideale!!



Lo scopo primario del trasformatore è realizzare un trasformatore ideale!!



Questo conduce alla conservazione della potenza elettrica!!



φ è lo stesso angolo di fase!!

(così che $V \cdot I = \text{costante}$ alle 2 porte!!)

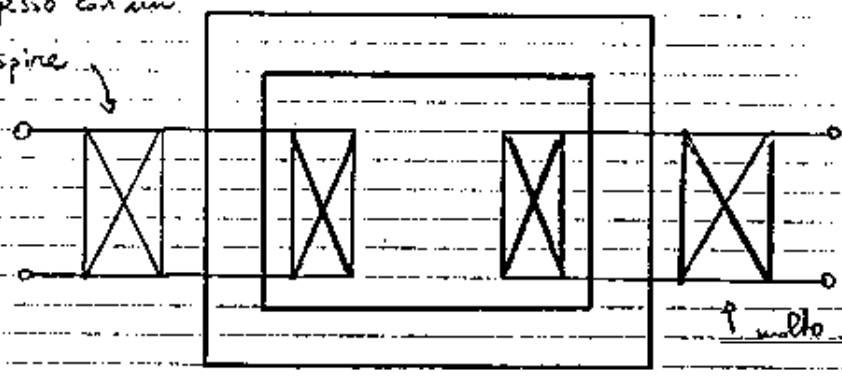
Come si realizza fisicamente il trasformatore?

Dal punto di vista fisico, il trasformatore è un unico induttore a coefficiente di accoppiamento elevato!

Tipicamente abbiamo:

bobine, spesso con un elevato n° di spire

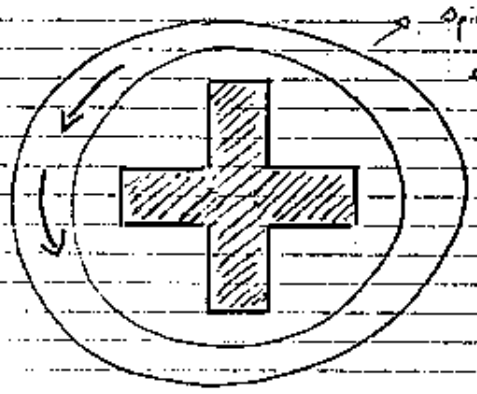
materiale ferromagnetico, laminato per contenere le perdite nel ferro!!



Circuito magnetico su cui sono avvolti 2 avvolgimenti, il primario e il secondario!!

↑ molto spesso le bobine sono concentriche!!

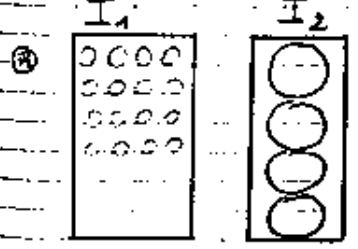
Visto in sezione:



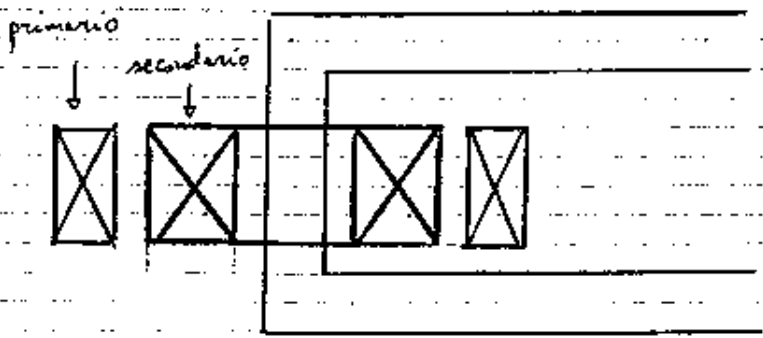
spire, cioè un certo n° di avvolgimenti elettrici avvolti intorno, impacchettati al materiale ferromagnetico!!

Se i 2 avvolgimenti sono concentrici, allora la struttura è questa:

primario secondario



50 conduttori 4 conduttori di sezione più grande



⊛ Certo numero di conduttori elettrici avvolti a spirale (avvolgimenti che sono delle spire in serie!!)

⊛ questo solo se il secondario è di bassa tensione!!! (Ho un n° di spire minore ma di sezione + grossa!!)

La corrente I_1 passa attraverso tutti gli avvolgimenti del primario, che sono messi in serie!!

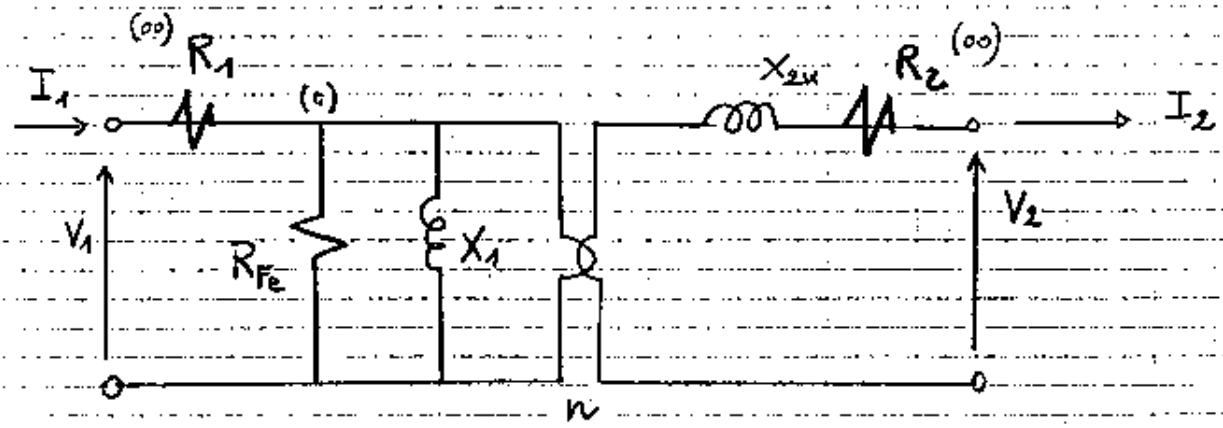
La corrente I_1 abbia un certo valore: nel trasformatore abbinatore, la corrente I_2 è maggiore della corrente I_1 del rapporto n ! (ecco perché abbiamo bisogno di conduttori di sezione più grande!). Inoltre la tensione è più bassa, e quindi il n° di spire (e quindi il n° di conduttori) è minore!!

molto vicino a

$$\begin{matrix} N_1 = 50 \\ N_2 = 4 \end{matrix} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{50}{4} \approx 12,5 \quad (\text{rapporto del n° di spire}) \approx n$$

Il rapporto spire del trasformatore è molto vicino come valore al rapporto di trasformazione n del trasformatore stesso!!

Il circuito equivalente più usato per il trasformatore è:



X_1 = reattanza di magnetizzazione perché legata alle dispersioni, cioè al fatto che l'accoppiamento tra i 2 circuiti non è totale!!

X_{2k} = reattanza di corto circuito (di dispersione) del secondario

Parliamo di reattanze anziché di induttanze perché siamo in regime alternato sinusoidale!!

n = rapporto di trasformazione $\approx \frac{N_1}{N_2}$ ← rapporto spire

coefficiente di accoppiamento

$$K = \sqrt{\frac{L_m^2}{L_1 L_2}} \quad \begin{matrix} \text{Se } k=1 \Rightarrow X_{2k}=0 \\ \text{Se } k<1 \Rightarrow X_{2k} \neq 0 \end{matrix}$$

Questo perché $X_{2k} = \sigma X_2$, dove $\sigma = 1 - k^2$!!

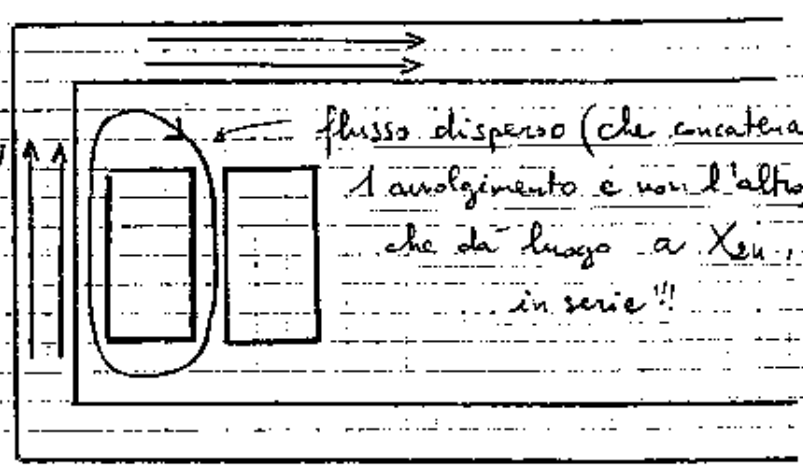
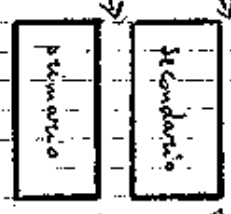
(o) Questa resistenza in parallelo alla reattanza di magnetizzazione tiene conto delle perdite nel ferro, dovute all'isteresi e alle correnti parassite!!

(oo) R_1, R_2 = resistenze del primario e del secondario (poiché i circuiti elettrici hanno le loro resistenze!!)

Che differenza c'è nell'aver gli avvolgimenti concentrici o nel non averli?

Gli avvolgimenti concentrici ci danno X_{ex} minore!!!
↑
reattanza di dispersione

qui abbiamo degli isolanti elettrici



flusso disperso (che attraversa solo 1 avvolgimento e non l'altro) e che dà luogo a X_{ex} , che è in serie!!!

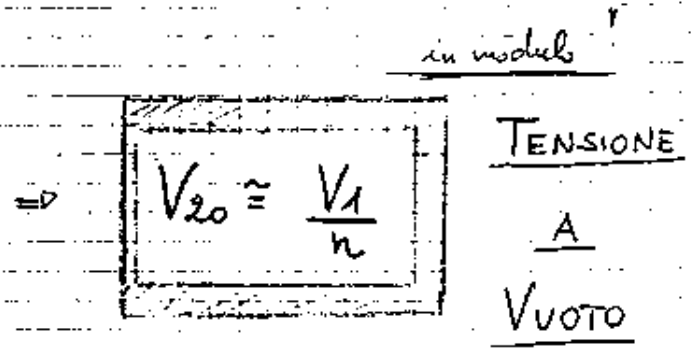
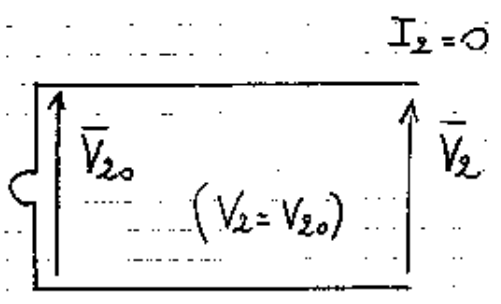
qui c'è un isolamento minore, poiché $V_2 < V_1$!!

A vuoto cosa succede?

L'avvolgimento primario si considera alimentato da una tensione costante esterna!!

Quindi a Vuoto significa che $I_2 = 0$

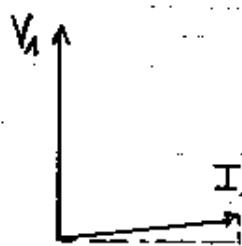
Allora:



Posso ritenere trascurabile la caduta di tensione nella resistenza R_1 !!

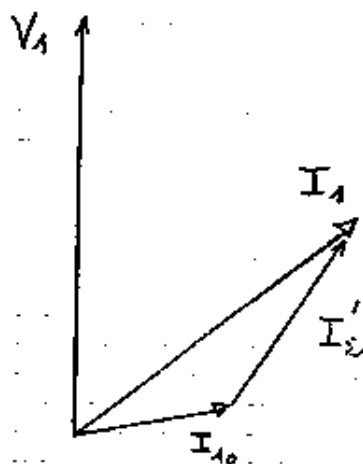
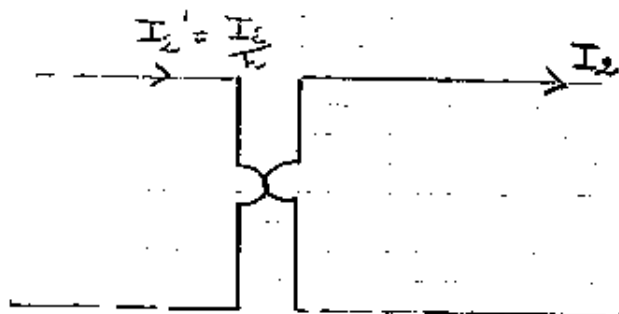
Sul diagramma fasoriale, a vuoto:

(5)



I_{10} che è molto piccola perché X_1 e R_{Fe} sono molto grandi !!

a CARICO: $I_2 \neq 0$



a CARICO: $V_2 \neq V_{20}$

ma

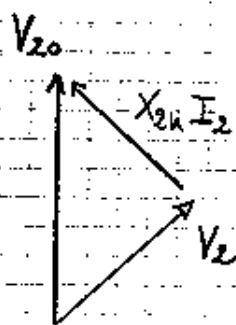
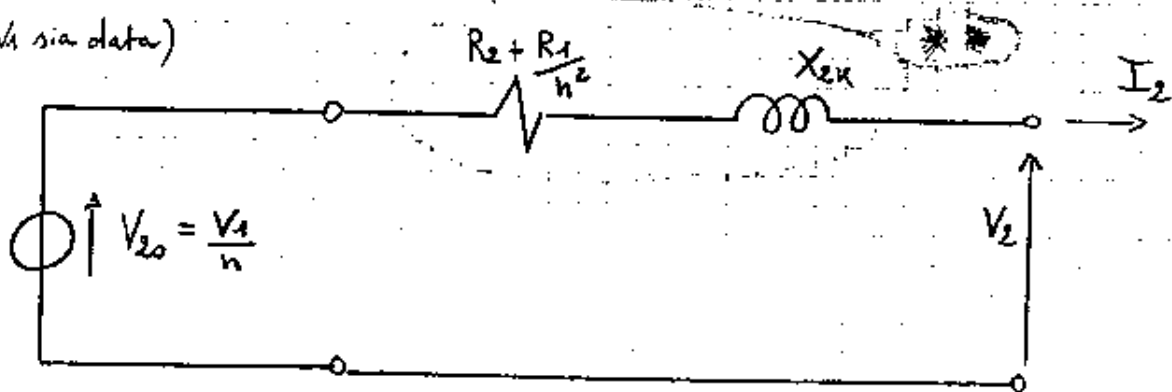


grafico in 1° approx.
(trascurando la resistenza)

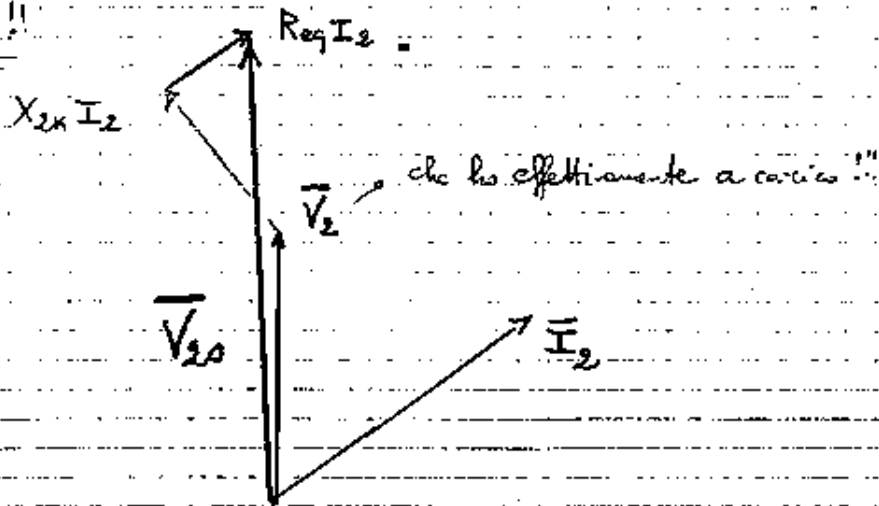
Vediamo il secondario attraverso l'equivalente di Thevenin della rete: a noi interessa il comportamento del trasformatore a questi morsetti:

(V_1 sia data)



3 termini in parallelo R_{Fe} e X_1 , essendo molto grandi, contano molto poco !! Per cui, in 1° approx. posso trascurarli !!

Perché è importante questo circuito equivalente? Perché un carico elettrico collegato ad un trasformatore, vede il trasformatore come la propria alimentazione!!



La differenza di tensione tra vuoto e carico è la differenza di tensione che mi trovo quando il carico assorbe potenza (e quindi assorbe corrente) dal trasformatore!!

Per i valori numerici (in valore relativo):

$$I_0 = 1-5\% I_n$$

↑
corrente a vuoto

corrente nominale (o di normale funzionamento)
è la corrente che circola nell'apparecchiatura!!

ω_0 significa che i parametri R_F e X_L sono molto elevati!!!

Se negli avvolgimenti circola una corrente $I > I_n$, tutto si riscalda e BOOM!!!

I valori nominali di corrente sono i valori che non possono essere superati; in caso contrario le perdite nella macchina diventano eccessive, la macchina si riscalda eccessivamente e si rompe tutto!

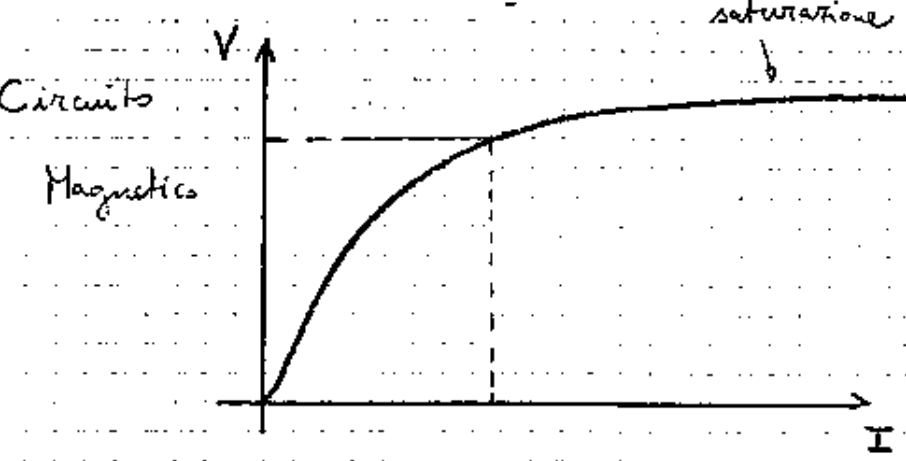
Dati le correnti e le tensioni nominali al primario e al secondario:

$$\begin{cases} I_{1n} \\ I_{2n} \end{cases} \Rightarrow \boxed{I_{1n} = \frac{I_{2n}}{n}}$$

$$\begin{cases} V_{1n} \\ V_{2n} \end{cases} \Rightarrow \boxed{V_{1n} = n V_{2n}}$$

Tensioni che non possono essere superate dalla macchina stessa.

Vediamo altri motivi per cui non possono essere superate le correnti e le tensioni nominali di funzionamento:



Per tensioni che arrivano fino a valori \approx al giacchio ho una certa corrente. Per valori di tensione superiori, entro nella zona di saturazione!!

Se andiamo in saturazione, la corrente aumenta molto fortemente! Sto ovviamente parlando della corrente magnetizzante (quella cioè che circola in X_1).

Le 2 tensioni e le 2 correnti danno luogo alla potenza del trasformatore: espressa in termini di potenza apparente nominale!!

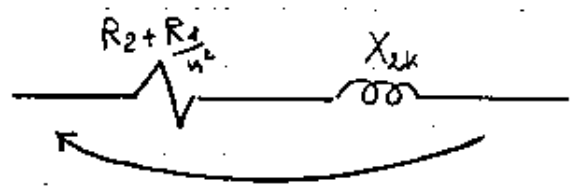
$A_n = V_n I_n$ e' la stessa, sia per il primario sia per il secondario!!

$$A_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n}$$

I valori nominali che vengono dati dal costruttore sono:

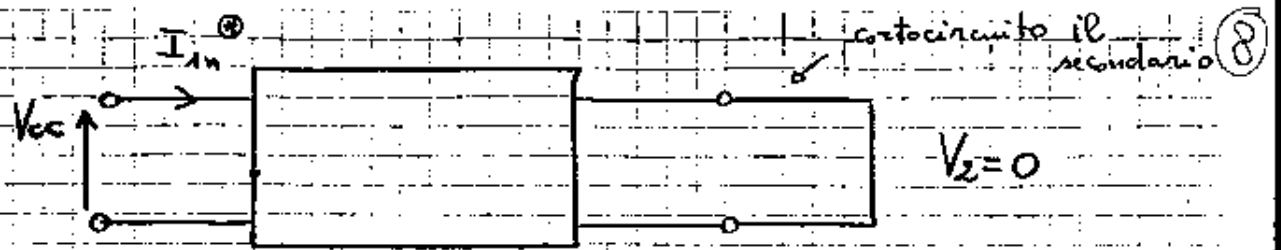
- V_{1n}
 - V_{2n}
 - A_n
- da cui si ricavano le correnti nominali
- f_n - frequenza nominale di lavoro

****** Parametro che da' la variazione di tensione da vuoto a carico:



$$Z_{ek} = \left(R_2 + \frac{R_1}{n^2} \right) + j X_{ek}$$

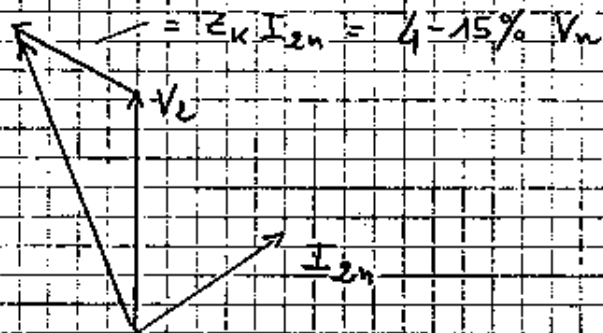
V_{cc} = tensione di corto circuito!
(che ottengo ai morsetti del primario cortocircuitando il secondario!)



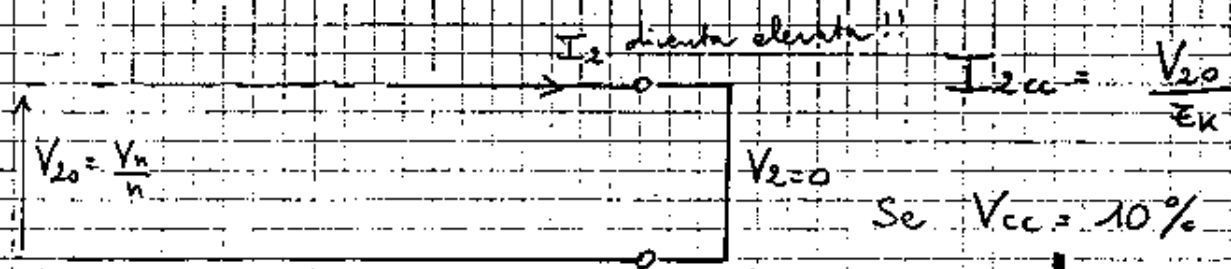
$$V_{cc} = 4-15\% V_n$$

⊕ mettiamoci nella condizione che la corrente I_1 sia la corrente nominale!!

V_{cc} = tensione di corto circuito, cioè tale che in condizione di corto circuito la corrente sia nominale!!



Quando abbiamo un carico alimentato da un trasformatore, dobbiamo stare attenti a non commettere il seguente errore: se, come sopra, circuitiamo i morsetti tale che $V_2 = 0$, I_2 diventi molto elevata e



Se $V_{cc} = 10\%$

$$I_{cc} = \frac{1}{10\%} = 10 I_n \text{ !!!}$$

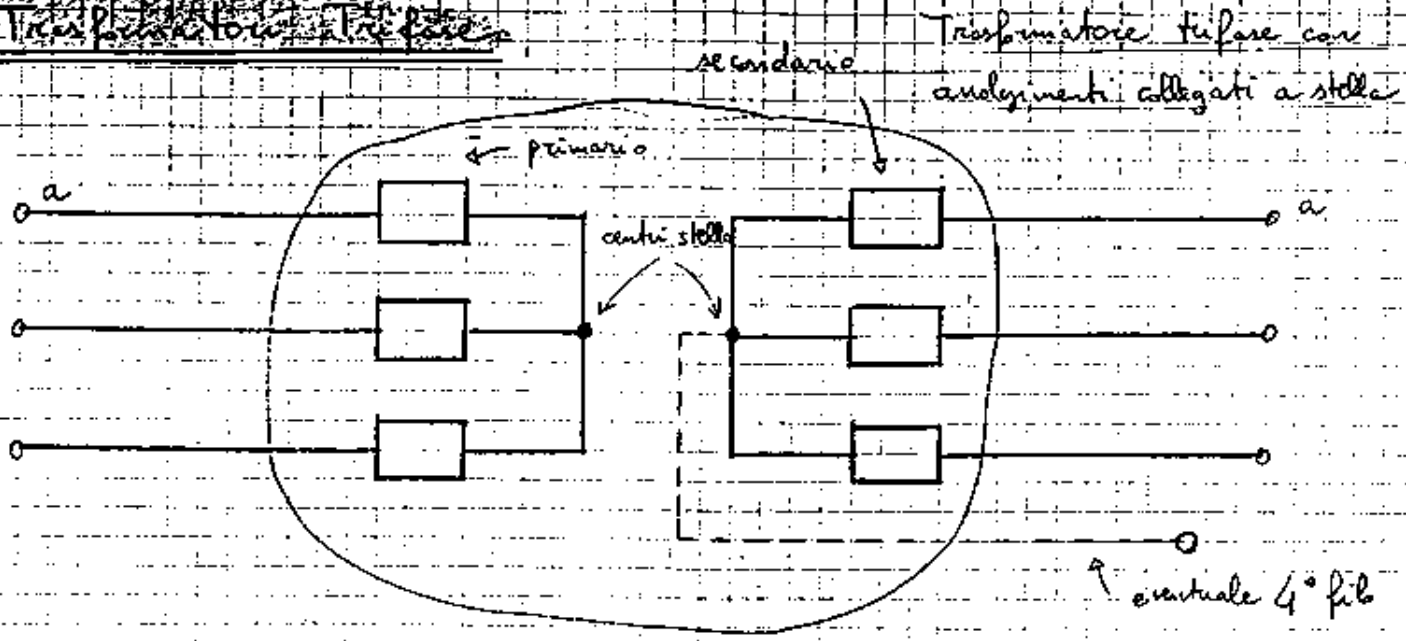
in guardo!!

Questo è il trasformatore come macchina elettrica.

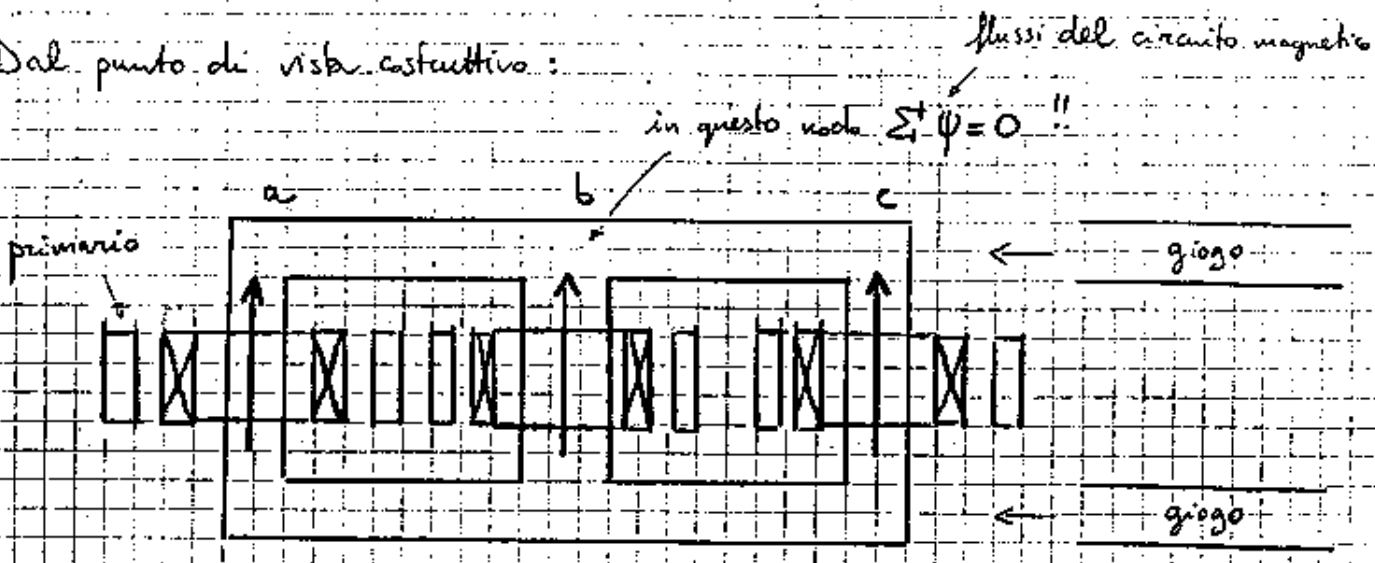
Le reti elettriche però sono reti tipo trifase.

Vediamo ora perciò i trasformatori trifase!

Trasformatore trifase

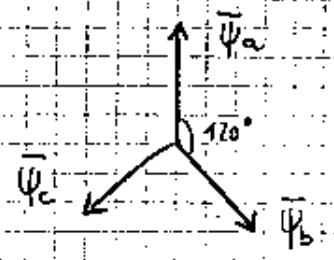


Dal punto di vista costruttivo:

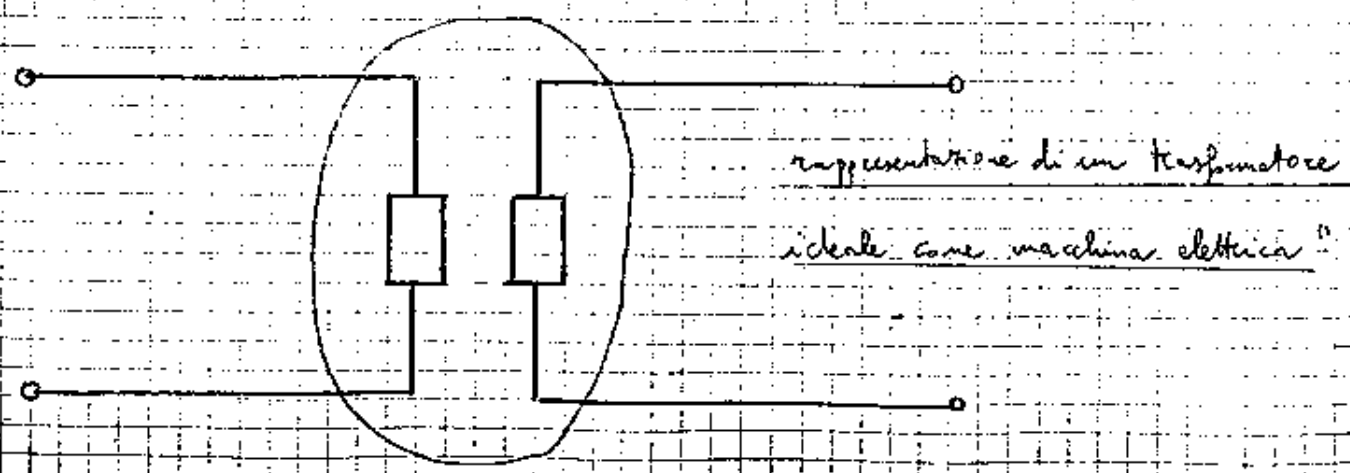


I tre avvolgimenti del primario sono tipicamente coaxiali con i tre avvolgimenti secondari !!

Rappresentando i flussi in termini di fasori:

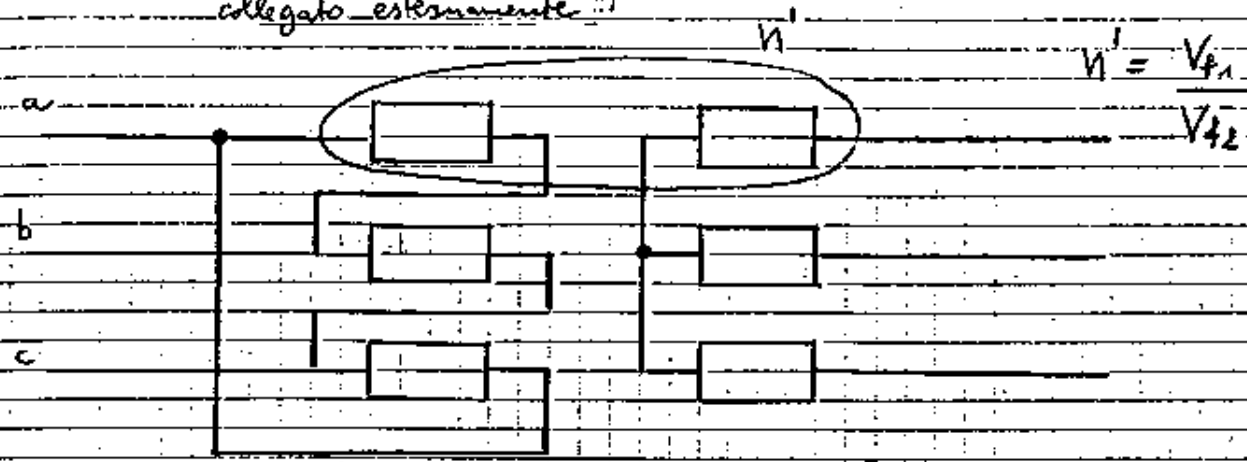


Ma abbiamo visto che i circuiti trifase simmetrici ed equilibrati si riducono a un circuito equivalente monofase:



YY = rappresentazione a stella (sistema trifase con primario stella e secondario stella !!)

YY_1 = collegamento stella-stella con il centro stella del secondario collegato esternamente !!



In questo caso ho un collegamento ΔY
 (triangolo stella)

n' = rapporto di trasformazione fisico

n = rapporto di trasformazione esterno

Cambiando i collegamenti, cambia il rapporto di trasformazione esterno n !!

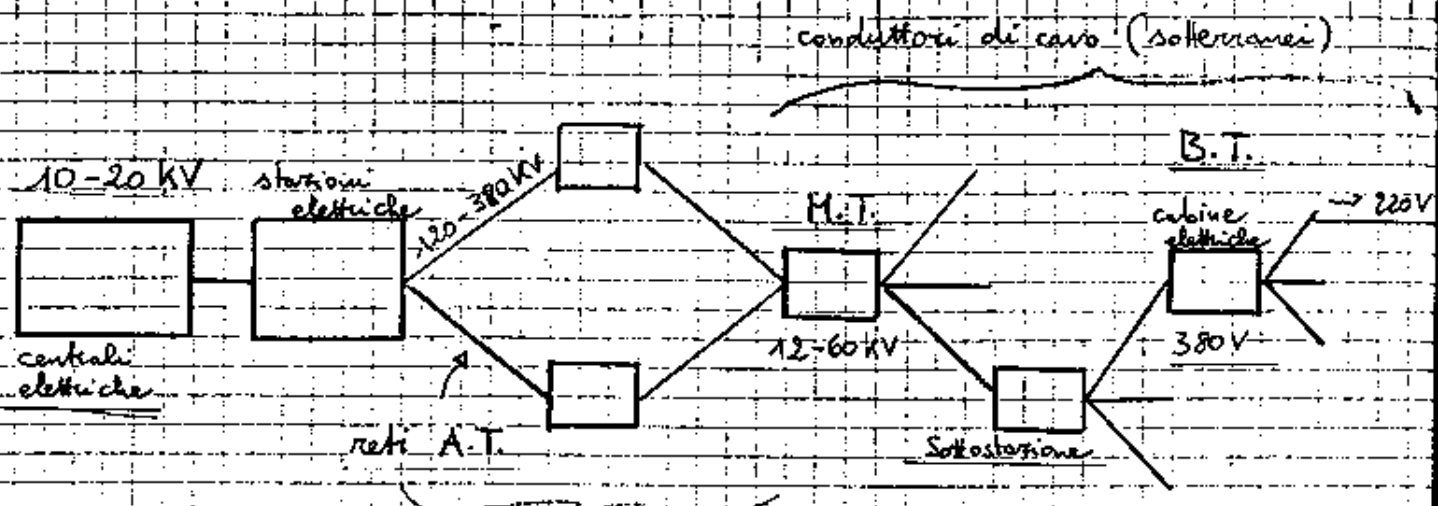
Ho queste possibilità:

- 1) $YY \Rightarrow n = n'$
- 2) $DD \Rightarrow n = n'$
 ho diminuito il rapporto di trasformazione di $\sqrt{3}$
- 3) $DY \Rightarrow n = \frac{n'}{\sqrt{3}}$ ($D \Rightarrow V_1 = V_{f1} \Rightarrow V_1 = \frac{V_{f1}}{\sqrt{3} V_{f2}} \Rightarrow n = \frac{n'}{\sqrt{3}}$)
 ($Y \Rightarrow V_2 = \sqrt{3} V_{f2}$)
- 4) $YD \Rightarrow n = \sqrt{3} n'$

Cambiando i collegamenti, con la stessa macchina, ho diversi rapporti di trasformazione !!

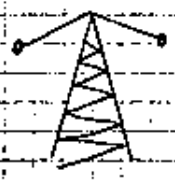
IMPIANTI ELETTRICI

(9-1-2002) 11



linee aeree in alta tensione (palificazioni a traliccio)

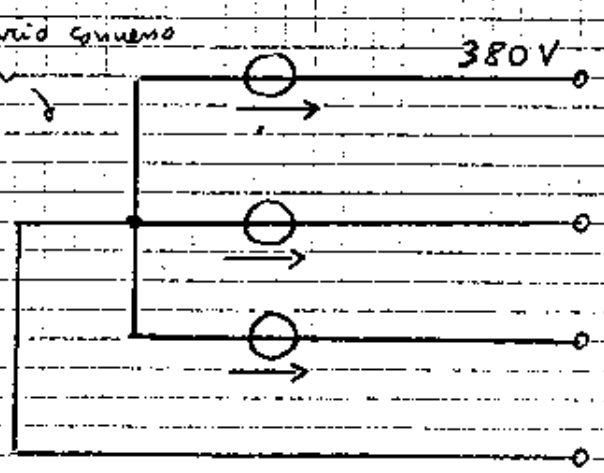
- A.T. = Alta Tensione
- M.T. = Media Tensione
- B.T. = Bassa Tensione



Centrali Elettriche = sono centrali di produzione
Stazioni Elettriche = elevano la tensione delle centrali elettriche

ENEL → 370 MVA
 centrali idroelettriche ≈ 40-60 MVA

Una cabina elettrica può essere così schematizzata:



La rete elettrica è strettamente connessa!!
 (cioè tutte le centrali sono connesse fra di loro a formare un unico sistema!!)

Ma un'altra sua proprietà è che è e non sempre si può
ottenere potenza elettrica!! (una caratteristica della potenza elettrica è di essere "pulita")

La potenza elettrica viene fornita istantaneamente, nel momento in cui viene richiesta!!

La rete elettrica europea ha frequenza unica (50Hz) e il sistema deve regolare la tensione in tutti i punti della rete!!

Da notare che se abbiamo degli induttori, aumentando la frequenza, aumento la reattanza di L induttore!!

L

∞

$$X = \omega L$$

↑ aumentando la frequenza, aumenta la reattanza, cioè aumenta la "pulcritudine"!!

MACCHINE ELETTRICHE ROTANTI

1) GENERATORE SINCRONO - detto anche ALTERNATORE

Le macchine elettriche rotanti convertono potenza da potenza elettrica a potenza meccanica o viceversa!! (in un senso o nell'altro!!)

Vi sono 3 tipi di Macchine Elettriche Rotanti:

1) Macchina Sincrona (alternatore)

2) Macchina ad induzione (macchina asincrona)

3) Macchina in corrente continua (di cui però non parliamo!)

Tutte le macchine in linea di principio sono perfettamente reversibili (possono cioè lavorare nei 2 sensi di trasformazione della potenza!)

1) Quando una macchina sincrona è usata come generatore elettrico, prendi il nome di alternatore!!
potenza meccanica → potenza elettrica

2) Prevalentemente utilizzata come motore elettrico!

3) Prende anche il nome di macchina a collettore a lamelle !!

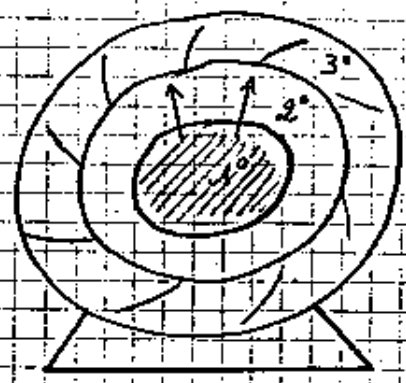
Può essere utilizzata come $\left\{ \begin{array}{l} \text{generatore (dinamo)} \\ \text{motore} \end{array} \right.$

A differenza di 1) e 2) che funzionano in regime alternato sinusoidale la macchina a collettore a lamelle funziona in continua !!

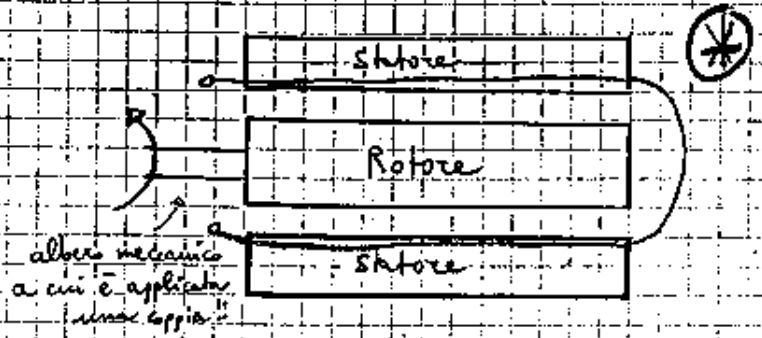
Non ne parliamo perché l'uso di 1) e 2) insieme all'utilizzo di convertitori statici adempie ai compiti di 3) !!

1) MACCHINA SINCRO

È una macchina rotante, costituita da una parte fissa (statore) e da una parte mobile (rotore).



- 1° = rotore (parte mobile)
- 2° = intercapedine di aria (traferro)
- 3° = statore (parte fissa)



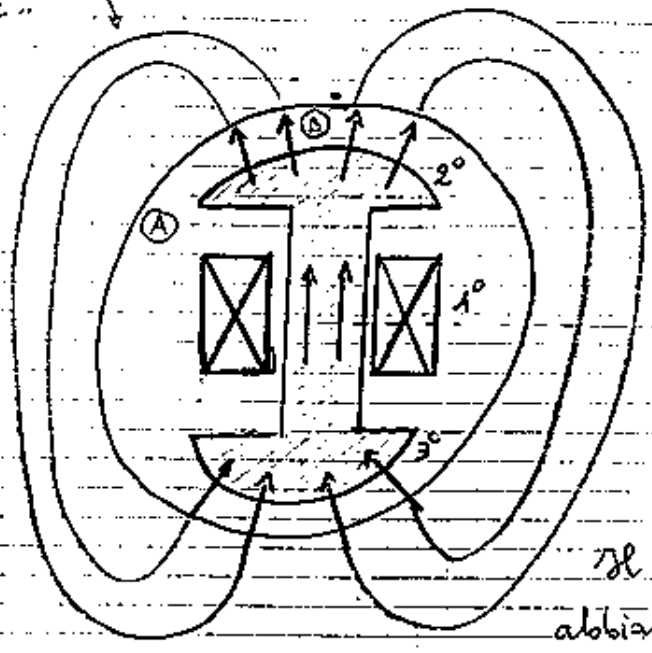
Sia il rotore, sia lo statore sono di materiale ferro-magnetico, per sostenere il flusso del campo di induzione magnetica, che è sempre di tipo radiale, e che passa attraverso il traferro (2°).

In linea di principio, le macchine elettriche rotanti si basano sempre sulla conversione elettromeccanica mediata dal campo di induzione magnetica. Per cui abbiamo un avvolgimento (cioè un insieme di conduttori) che genera il campo magnetico e un altro avvolgimento che lo sfrutta !!

Ora, nella macchina elettrica sincrona, il rotore costituisce l'induttore, che è la parte di macchina che crea il campo di induzione magnetica.

ROTORE = induttore con struttura a poli salienti

linee di flusso che passano attraverso lo statore!!



1° = avvolgimento elettrico percorso da corrente continua, chiamato anche avvolgimento di eccitazione (= genera una forza magnetomotrice e quindi un flux magnetico)

2° = polo nord (l'induzione è radiale verso l'esterno)

3° = polo sud (l'induzione è radiale verso l'interno)

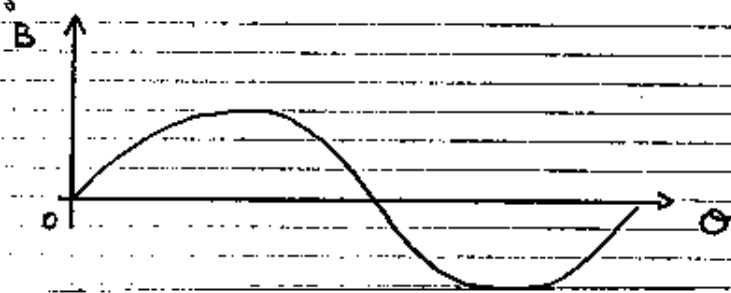
STRUTTURA A POLI SALIENTI

Il risultato è che lungo il traferro abbiamo una distribuzione di induzione magnetica!!

Un A ha una minore intensità del flusso rispetto a B!! (a parità di fem)

Alla fine si vede un andamento che non sia troppo diverso da un andamento sinusoidale nello spazio!! (non nel tempo!!)

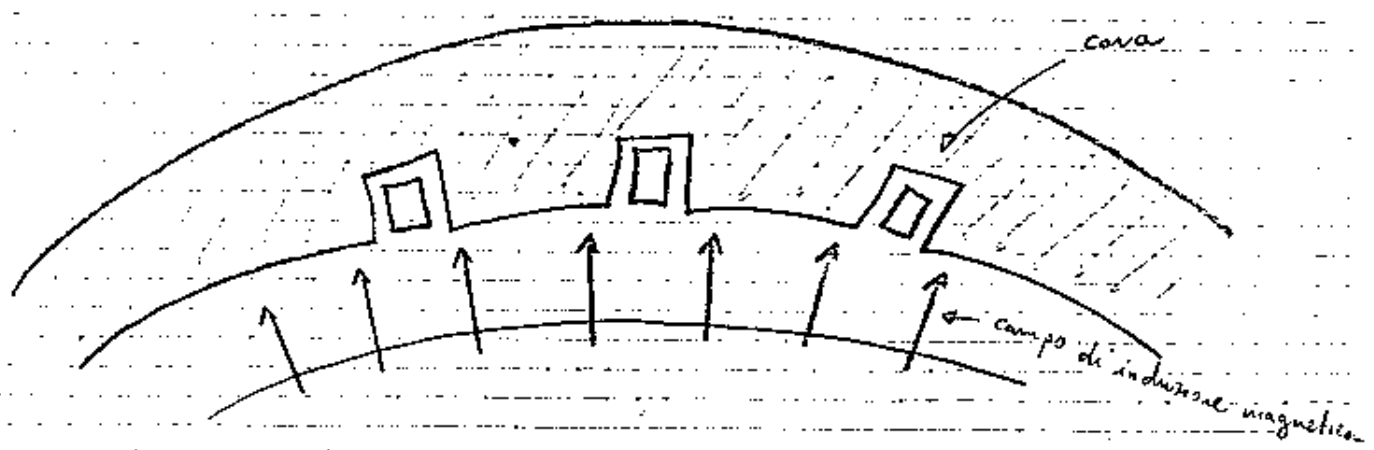
flux del campo di ind. magnetico



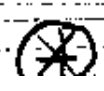
fem

Il rotore ruota rispetto allo statore e si può generare una fem!!

All'interno dello statore, nella sua parte interna, sono alloggiati i conduttori di statore!

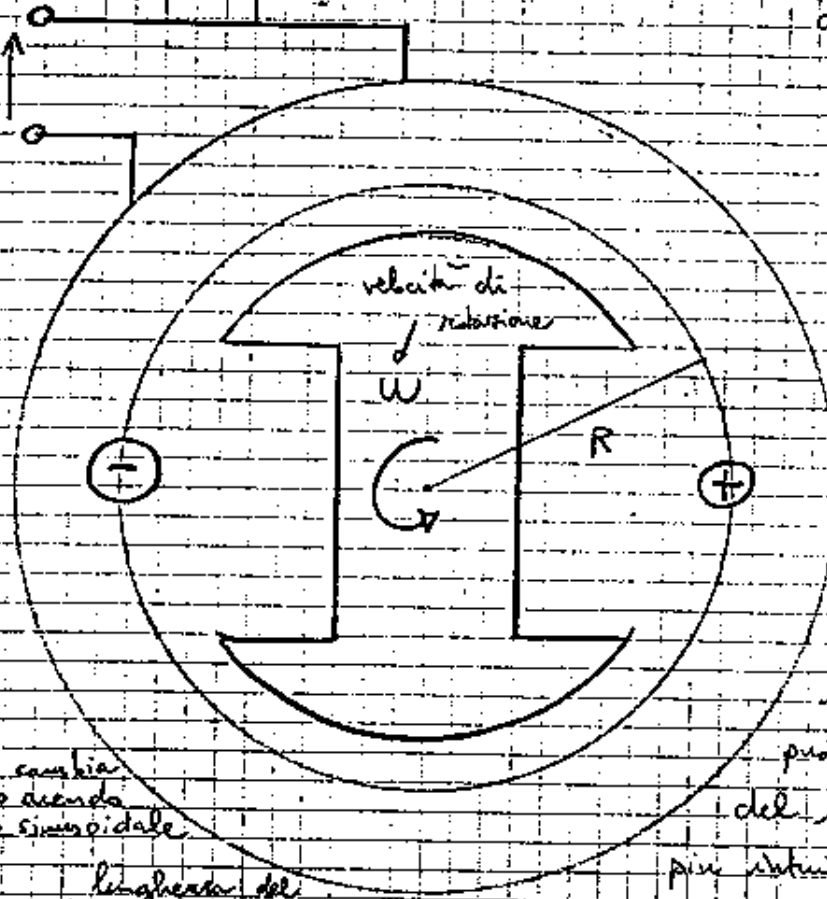


Tutti i conduttori di statore sono collegati tra di loro, generalmente in serie!!



Vediamo come si genera la forza elettromotrice: ho il rotore che ruota, e immagino di avere nello statore solo due conduttori (collegati in serie e tra di loro con i morsetti portati fuori !!)

fem ↑



Ho un flusso magnetico sinusoidale che ruota!

Appare una fem E_c dovuta ai due

conduttori, che si può vedere in 2 modi: attraverso la legge della induzione elettromagnetica può essere vista come derivata del flusso concatenato, oppure più intuitivamente come

induzione che cambia punto per punto secondo un andamento sinusoidale nello spazio

lunghezza dei conduttori

$E_c = B l v_m$ data $v_m = \omega R$

velocità del conduttore rispetto al campo magnetico visto come fisso

Questa formula vale per il singolo conduttore!

Da qui si capisce che se il rotore ruota, l'andamento nel tempo di questa forza elettromotrice è sinusoidale nel tempo!! alla pulsazione ω dovuta alla velocità di rotazione della macchina!

Considerando più conduttori:

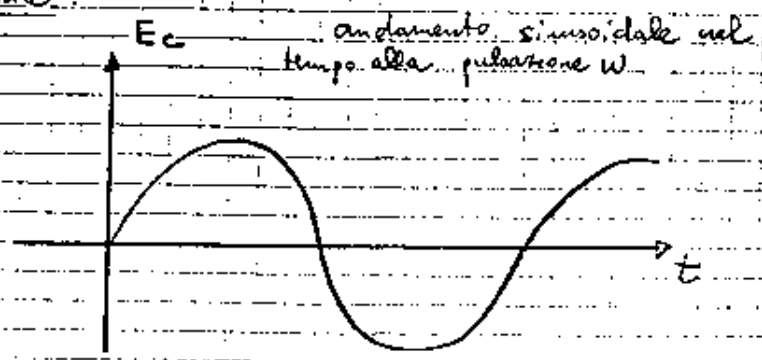
$E(t) = K \omega B(t)$

meglio rappresentarla come fasore:

$\vec{E} = j \omega \vec{\Psi}_m$ ← flusso (fasore)

← frequenza

$f = \frac{\omega}{2\pi}$; $\Psi_m = L_m I$ ← in continua, che noi imponiamo alla macchina!!

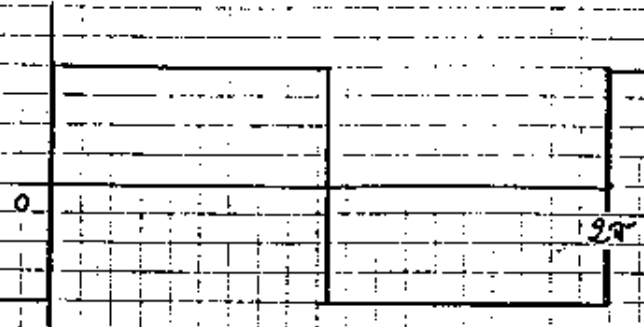
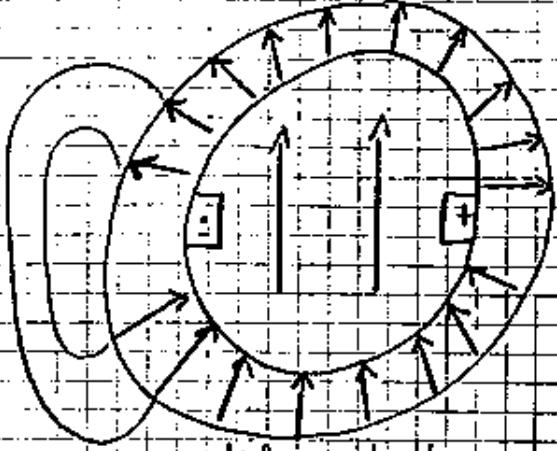


Al variare della velocità di rotazione, cambia la fem E_c !!

Altra alta possibilità di creare un campo radiale in questo modo è quella di avere dei conduttori elettrici assiali anche sul rotore!! (in serie tra di loro e percorsi da corrente costante)
 Per esempio si può avere il rotore cilindrico

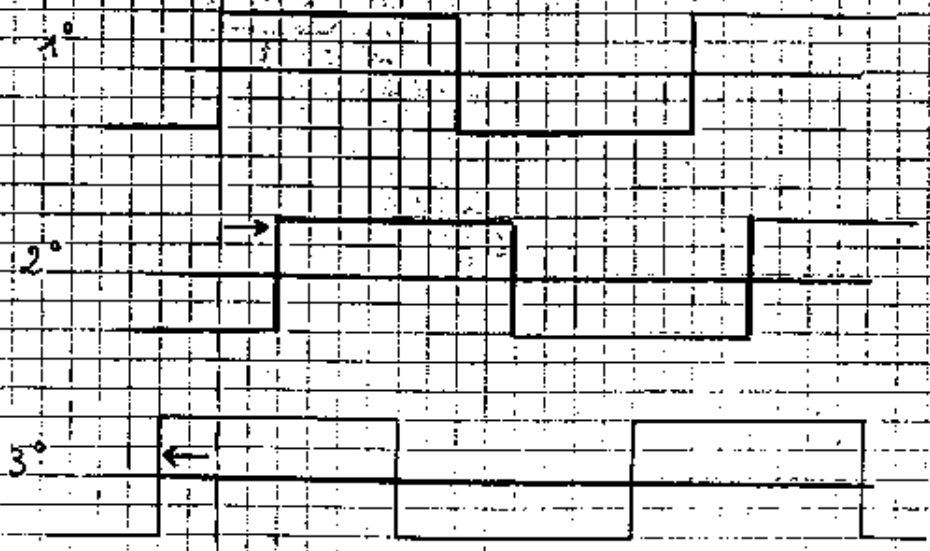
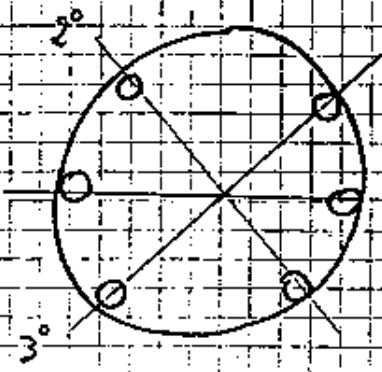
radiale uscente e costante

Andamento del campo di tipo onda quadrata (frang. d'onda nello spazio di induzione...)



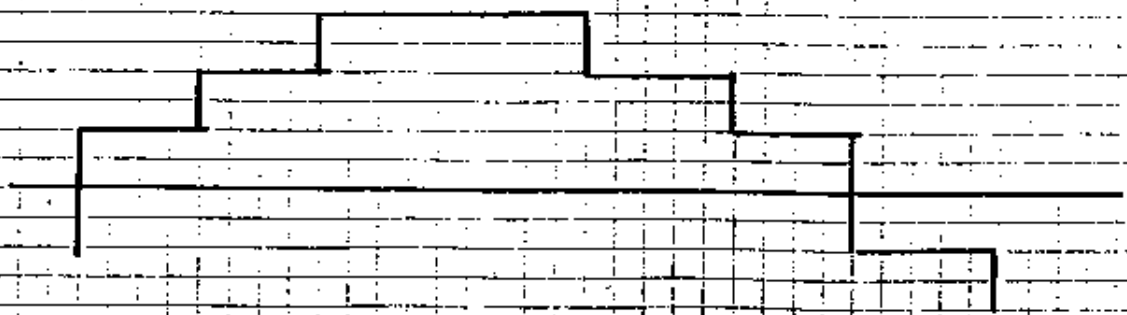
radiale entrante e costante

Consideriamo ora più conduttori all'interno del rotore:



Sommando i 3 andamenti ottengo:

questo andamento si approssima meglio all'andamento sinusoidale rispetto alla singola onda quadrata



In questo modo, pur avendo un'onda a gradino, tutto si avvicina rapidamente ad una sinusoidale e si riesce così a creare un andamento lungo il traferro di induzione abbastanza sinusoidale.

⇒ Quando tutto gira, genero una fem sinusoidale !!

Ricordiamoci inoltre che nello statore abbiamo i conduttori di indotto in cui si genera una fem. I conduttori di indotto sono tanti, e quindi, dovute alla rotazione del rotore !!

sovrapposto tra di loro tutte le forze elettromotrici prodotte nello statore e sul rotore, il risultato migliora ulteriormente la forma d'onda, facendola avvicinare sempre di più ad una sinusoidale !!

Parliamo ora della frequenza di questa forza elettromotrice :

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

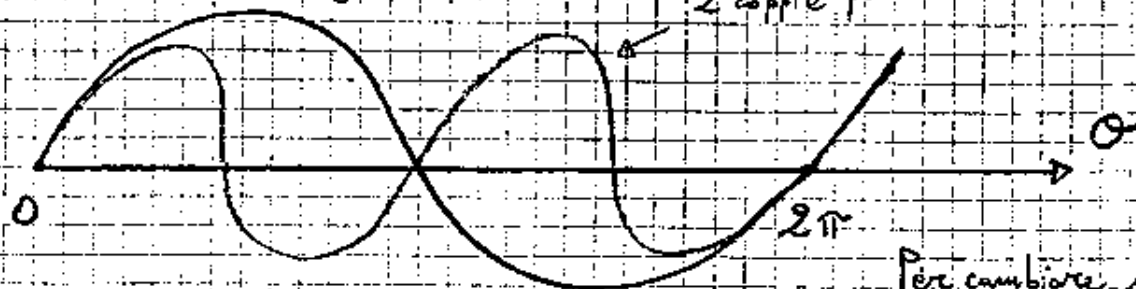
Introduciamo ora il concetto di coppie polari della macchina :



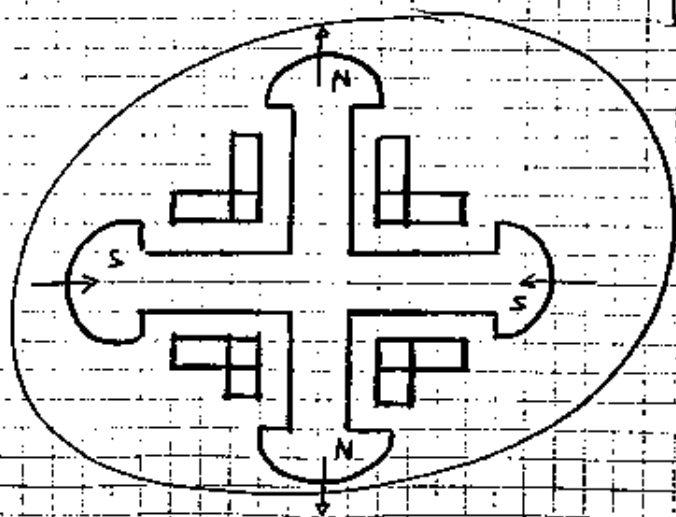
⇒ 2 poli ⇒ 1 coppia polare !!

1 coppia polare

2 coppie polari



Per cambiare la periodicità, basta costruire una macchina con più coppie polari !!



⇒ Ho 4 poli, cioè 2 coppie polari (l'induzione nel traferro è ancora sinusoidale però di periodo doppio !!)

La fem ha frequenza doppia rispetto alla rotazione della macchina !!

Sia data una frequenza di 50 Hz. Per mantenere

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

una frequenza costante di 50 Hz (50 giri al secondo), a seconda del numero di coppie poli della mia macchina:

se ho una macchina:

a 2 poli \longrightarrow 50 Hz \longrightarrow 3000 g/m^{minuto}

4 poli \longrightarrow 50 Hz \longrightarrow 1500 g/m

6 poli \longrightarrow 50 Hz \longrightarrow 1000 g/m

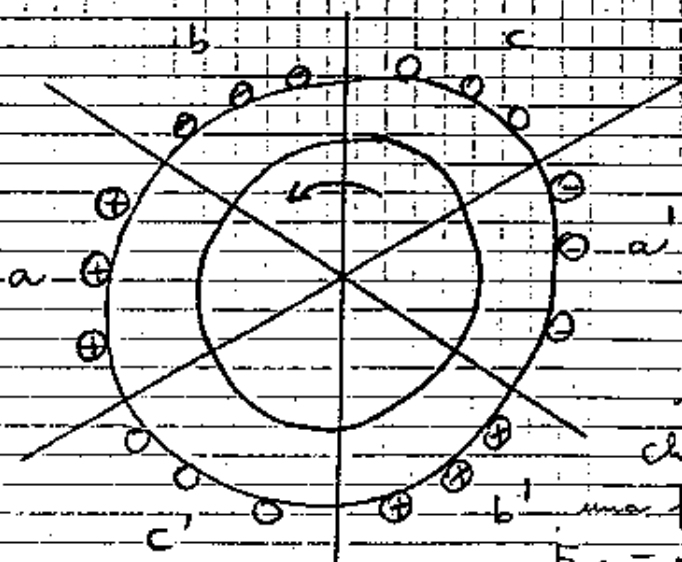
8 poli \longrightarrow 50 Hz \longrightarrow 750 g/m

10 poli \longrightarrow 50 Hz \longrightarrow 600 g/m

Per ora abbiamo parlato della macchina magnetica!!

Per costruire una macchina elettrica trifase, basti mettere nello statore 3 avvolgimenti elettrici indipendenti e spostati tra di loro spazialmente!!

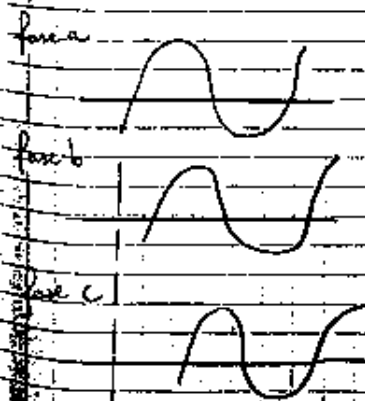
Consideriamo un rotore vuoto e uno statore diviso in 6 settori: il rotore, girando vuoto, genera un'onda di induzione magnetica che è vista!



⊕ = entrante
⊖ = uscente

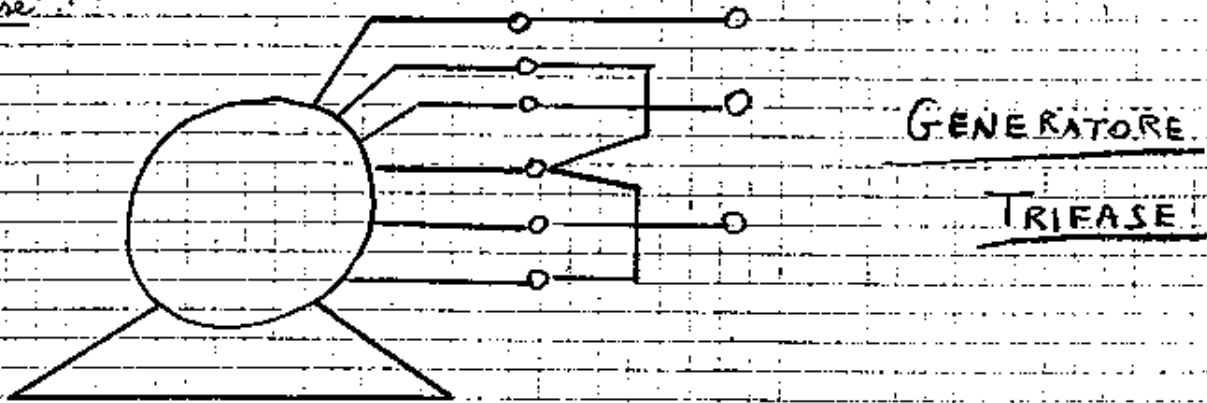
Siano tutti i conduttori collegati in serie tra di loro!!

Il rotore gira, e induce nella fase (a) una fem sinusoidale; nella fase (b), che è spostata nello spazio di 120°, genera una fem sinusoidale spostata nel tempo di 120° E così per la fase (c)!!!

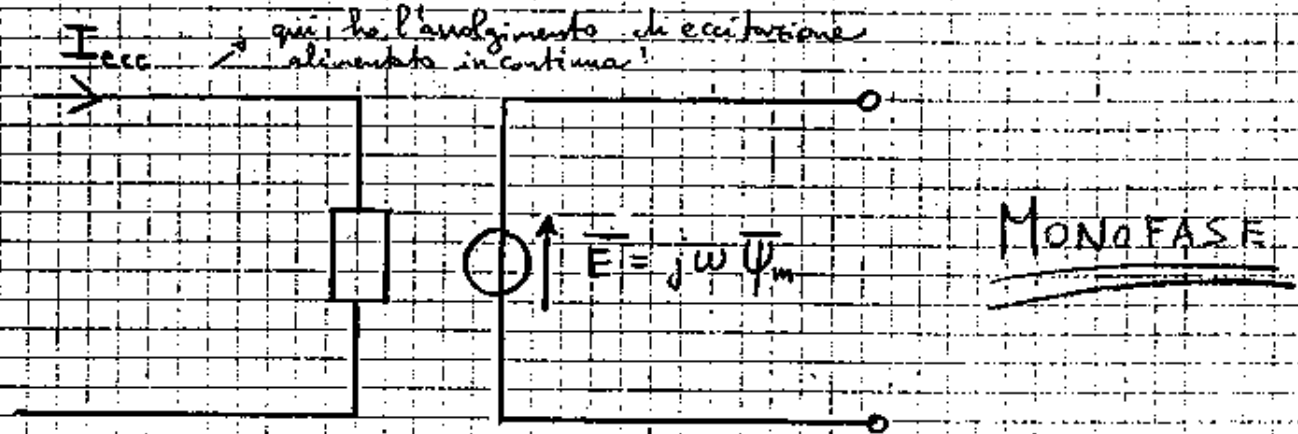


In questo modo ho realizzato un generatore sinusale trifase

Le macchine trifase sono molto più preferibili alle macchine monofase!
 Ricorda che, se ho 1 solo avvolgimento ho una macchina monofase, se ho 3 avvolgimenti indipendenti ho un generatore trifase!!
 I morsetti esterni sono 6 (per ogni avvolgimento ho 2 capi!!), li collego come al solito, tipicamente a stella, e ho i 3 morsetti di un generatore trifase!!



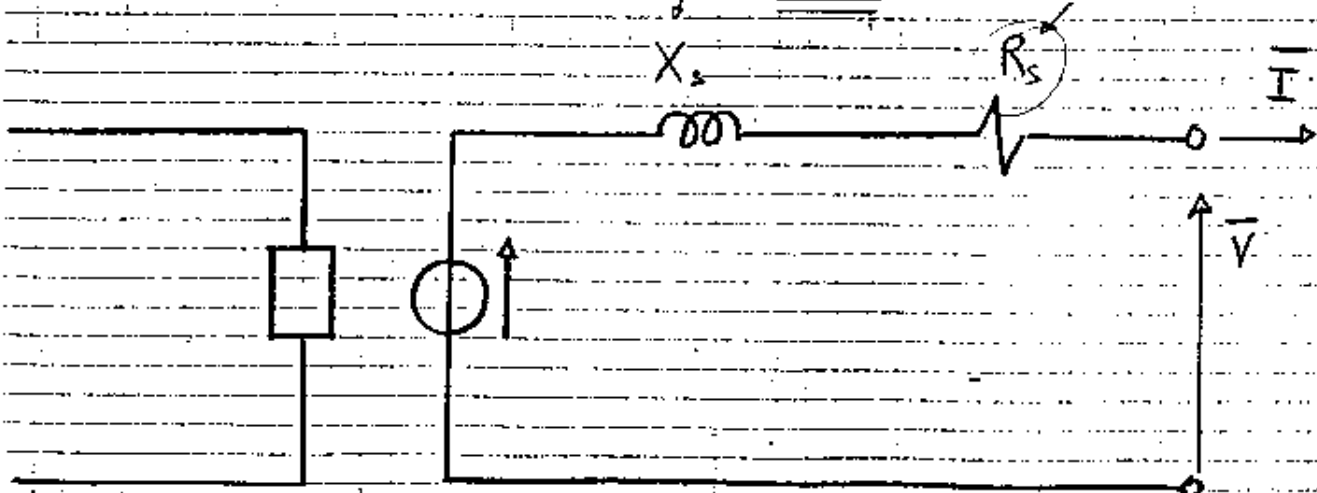
Un generatore monofase di ferro lo rappresenta così:



La macchina genera potenza elettrica se incomincia a circolare corrente!!
 Bene, nel momento in cui circola corrente dobbiamo però introdurre un elemento che è la caduta di tensione di tipo induttivo e resistivo nelle correnti di indotto (dello statore!!)

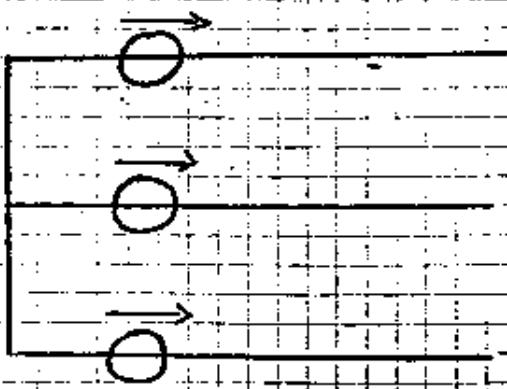
reattanza sincrona, ed è un valore molto elevato!!

resistenza degli avvolgimenti di statore



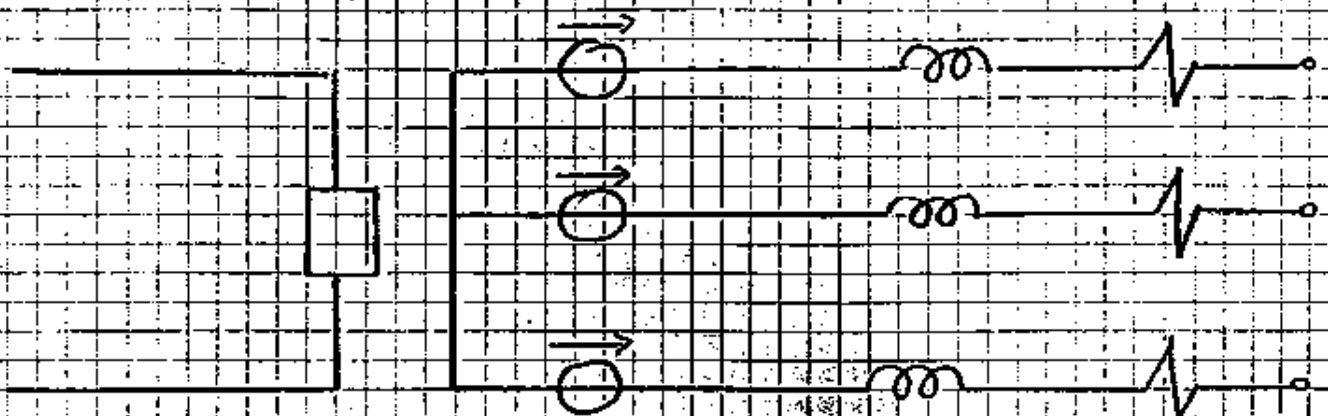
Un generatore trifase di feni lo rappresento così:

(8)



Ho 3 forze elettromotrici sfasate tra di loro di 120° costruttivamente!!

TRIFASE



Ricordo che la macchina sincrona trifase può essere vista come un monofase equivalente!! (tenendo tutto simmetrico ed equilibrato!!)

La macchina sincrona è utilizzata principalmente come generatore sincrono, però può benissimo funzionare anche come motore. Naturalmente è essenziale la Conversione elettromeccanica!!

$$\vec{E} = j \omega \vec{\Psi}_m$$

↑
n° di coppie poli

$$\omega = n \Omega$$

↑
velocità angolare della macchina
(velocità meccanica effettiva)

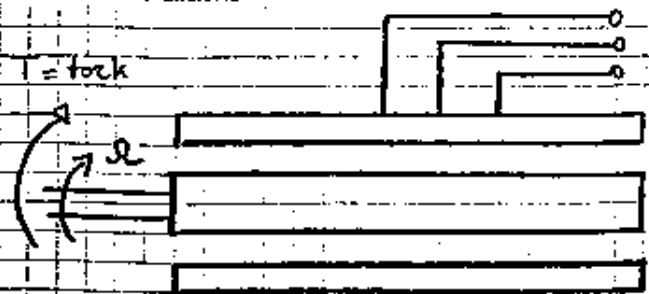
↑
pulsazione (rad/s)

Da notare che ω non è la velocità angolare della macchina, ma la velocità angolare della macchina moltiplicata per il numero di coppie poli!!!

Se siamo in regime alternato sinusoidale:
potenza elettrica attiva generata

$$P = \text{Re}(\vec{E} \vec{I}) \quad (\text{MONOFASE})$$

$$P = 3 \text{Re}(\vec{E} \vec{I}) \quad (\text{TRIFASE})$$



La potenza attiva generata eguaglia la potenza meccanica assorbita dalla macchina:

potenza meccanica assorbita dalla macchina

$$P = 3 \operatorname{Re}(\bar{E} \underline{I}) = T \cdot \Omega$$

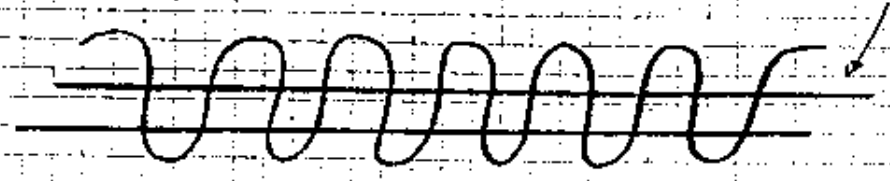
deriva dal fatto che $p(t)$ è una sinusoide

La potenza istantanea

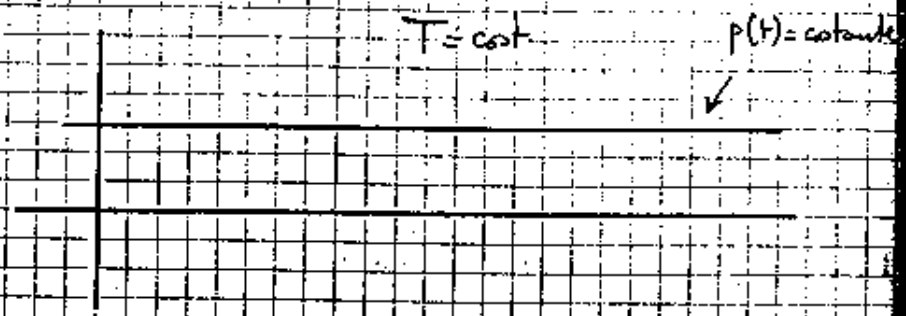
nella macchina monofase:

$$T(t)$$

valore medio



Nella macchina trifase (simmetrica ed equilibrata):

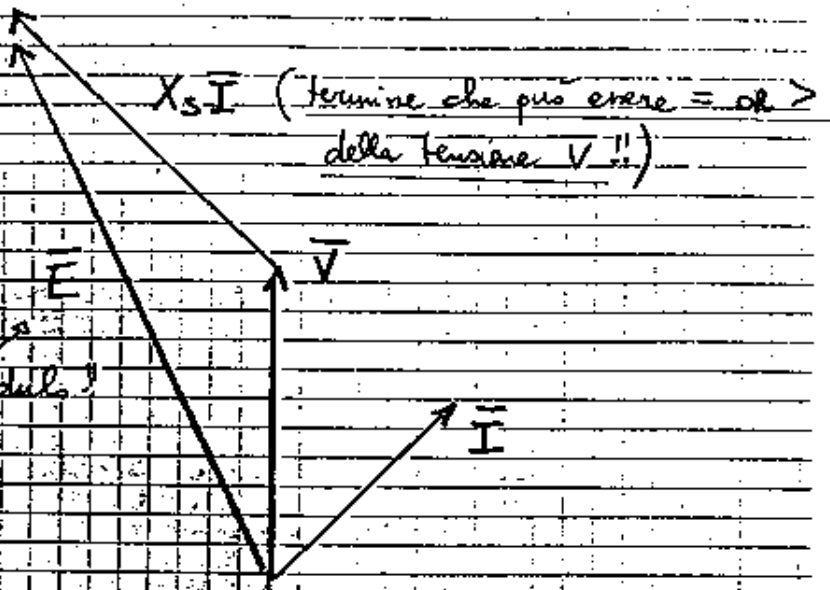
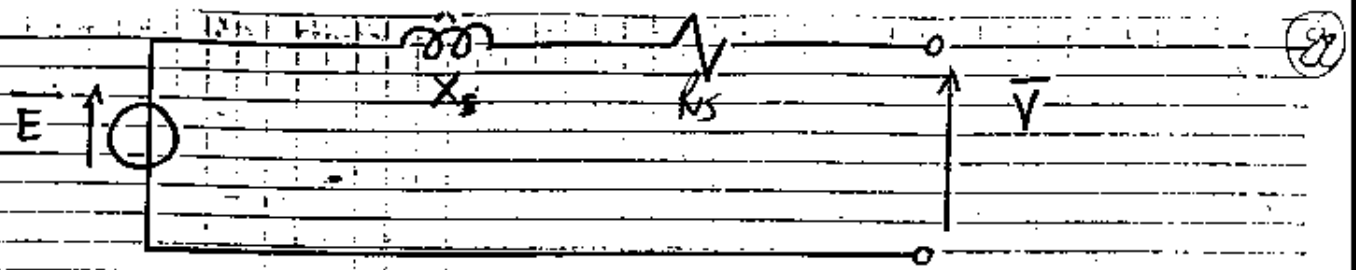


La Regolazione della macchina è fatta su 2 variabili:

- 1) la corrente di eccitazione (per dare il flusso magnetico)
- 2) la velocità di rotazione della macchina Ω (che determina la pulsazione e quindi la frequenza!)

$$I_{ecc.} \longrightarrow \psi_m$$

$$\Omega \longrightarrow \omega$$



$X_s I$ (termine che può essere ≈ 0 della tensione V !!)

che impone in modo!

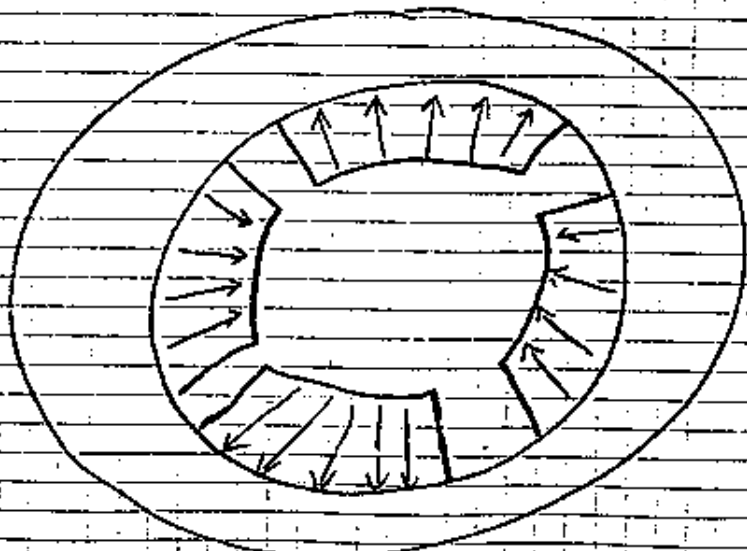
Come si regola la fem E ?

Attraverso la corrente di eccitazione che fa variare il flusso!!

Regolazione di E attraverso I_{cc} che $\rightarrow \psi_m$!!

(essendo $E = \frac{d\psi_m}{dt}$!!!) Regolo E perché non voglio fare variare la frequenza del sistema!!

Esistono macchine sincrone molto semplici, di cui il rotore anziché con circuiti alimentati in continua, è costituito da magneti permanenti.



ROTORE A

4 POLI!!

Pertanto posso mettere questi magneti permanenti che creano il flusso magnetico Ψ_m !!

Il rotore a magneti permanenti ha il vantaggio di essere più semplice (non ho bisogno del circuito di eccitazione!) e con il vantaggio che X_s è molto più piccola !!

Lo svantaggio è che non posso regolare il flusso magnetizzante che così mi risulta costante !!

$$\Psi_m = \text{costante} \Rightarrow \underline{\underline{E = \text{costante}}}$$

Da notare che X_s è molto piccola perché i magneti permanenti hanno una forte riluttanza !!

MACCHINA ASINCRONA

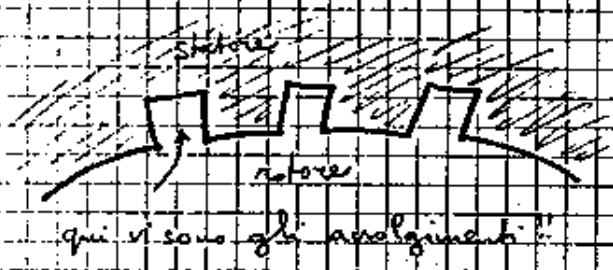
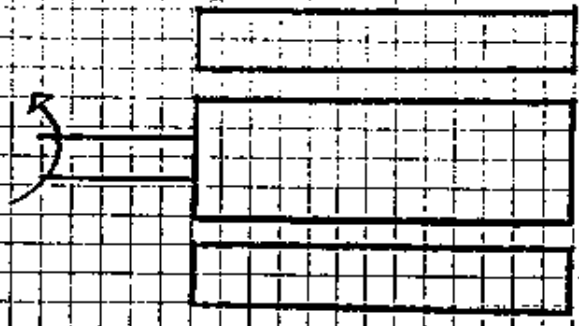
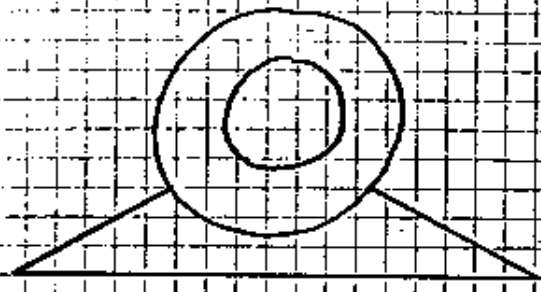
(Macchina ad induzione)

11-1-2002

95

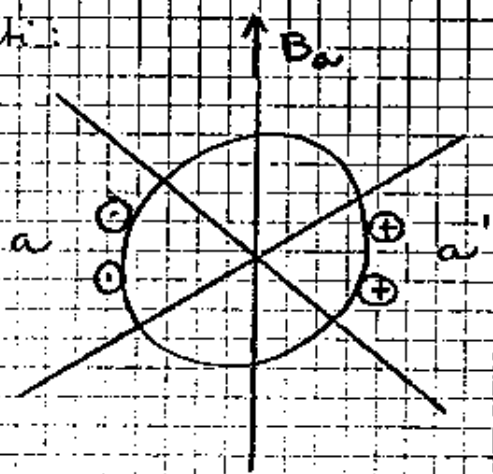
È una macchina trifase rotante, ha lo statore ed il rotore esattamente come la macchina sincrona!!

stesso statore della macchina sincrona!!



Sullo statore c'è un sistema trifase di avvolgimenti in struttura a cave!

Lo statore è diviso in 6 settori, e su ogni settore si trovano gli avvolgimenti:

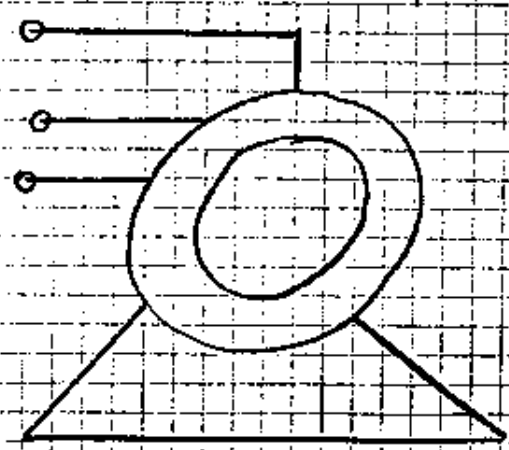


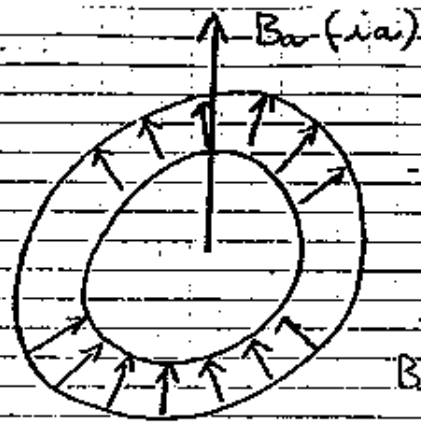
Gli avvolgimenti danno luogo a correnti che a loro volta danno luogo nel ferro della macchina al campo di induzione magnetica B !!

Tutto questo lo vediamo ora come motore!!

La macchina è trifase, dall'esterno la macchina viene alimentata con un sistema trifase simmetrico nelle tensioni ed equilibrato nelle correnti!!

Ogni avvolgimento è percorso dalla propria corrente!!





Gli avvolgimenti della fase a, che sono percorsi dalla propria corrente, danno luogo all'interno del traferro ad un campo magnetico dovuto alla fase a!!

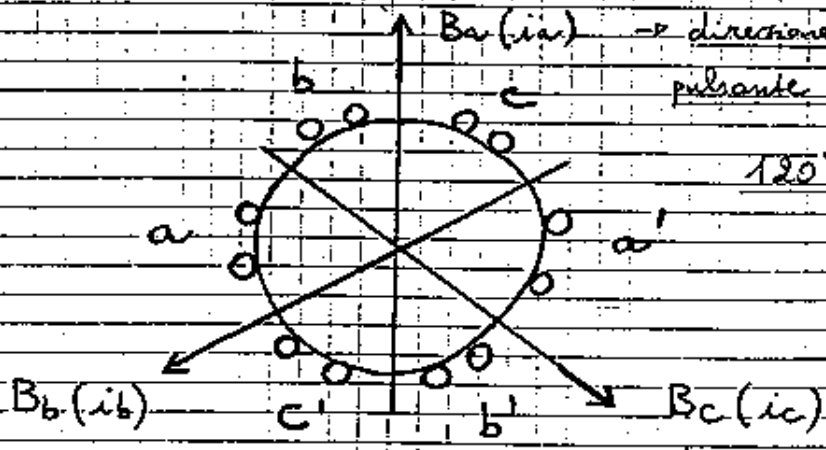
Bene, se abbiamo questi conduttori, il campo magnetico dovuto alla fase a ha una distribuzione ^(spaziale) sinusoidale lungo il traferro

Campo di induzione magnetica B dovuto alla fase a!!



È una sinusoida pulsante nel tempo!! Questo perché il valore di induzione B è funzione della corrente I_a ; la corrente è alternata sinusoidale e quindi la forma d'onda di induzione cambia sinusoidalmente nel tempo!!

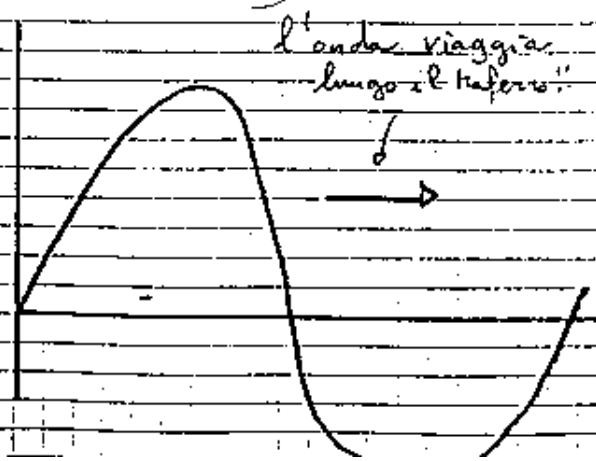
Per la fase b e la fase c, il discorso è analogo!!



→ direzione della sinusoida pulsante dovuta alla fase a!!

120° spaziali tra le varie sinusoidi!!

La somma delle 3 sinusoidi pulsanti, sfasate tra di loro di 120° dà luogo a un'onda di induzione B che risulta costante in modulo e rotante lungo il traferro!!



Da notare che abbiamo uno sfasamento spaziale dovuto al fatto che gli avvolgimenti sono costruttivamente messi a 120° l'uno su l'altro; e abbiamo uno sfasamento temporale dovuto al fatto che le correnti delle 3 fasi sono sfasate tra di loro di 120° (nel tempo!!)

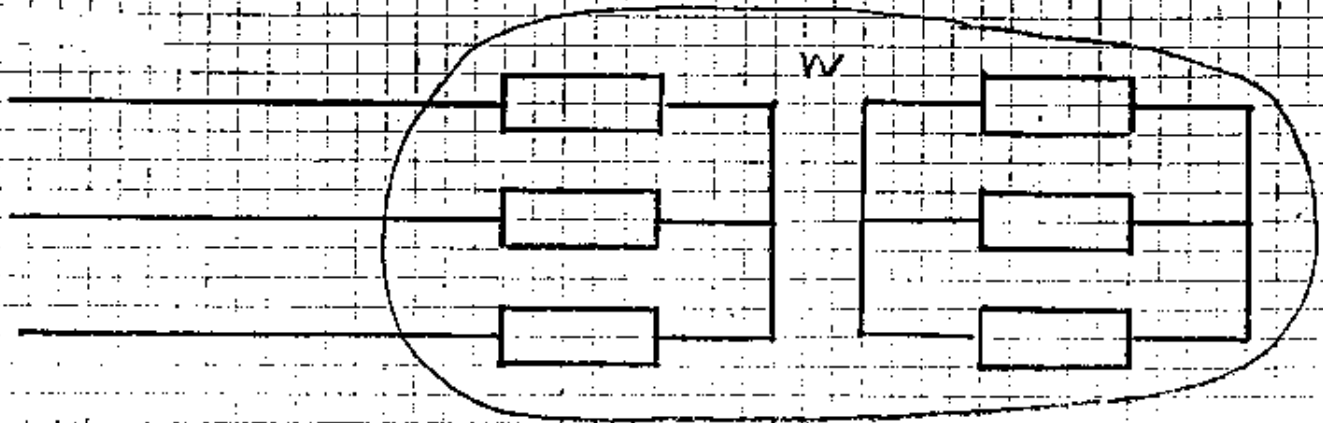
La velocità di rotazione dell'onda è pari alla pulsazione ω dell'alimentazione!!

Questo per una macchina a due poli (= 1 coppia polare). Se aumenta il n° di poli, diminuiscono i giri al minuto, come abbiamo già visto.

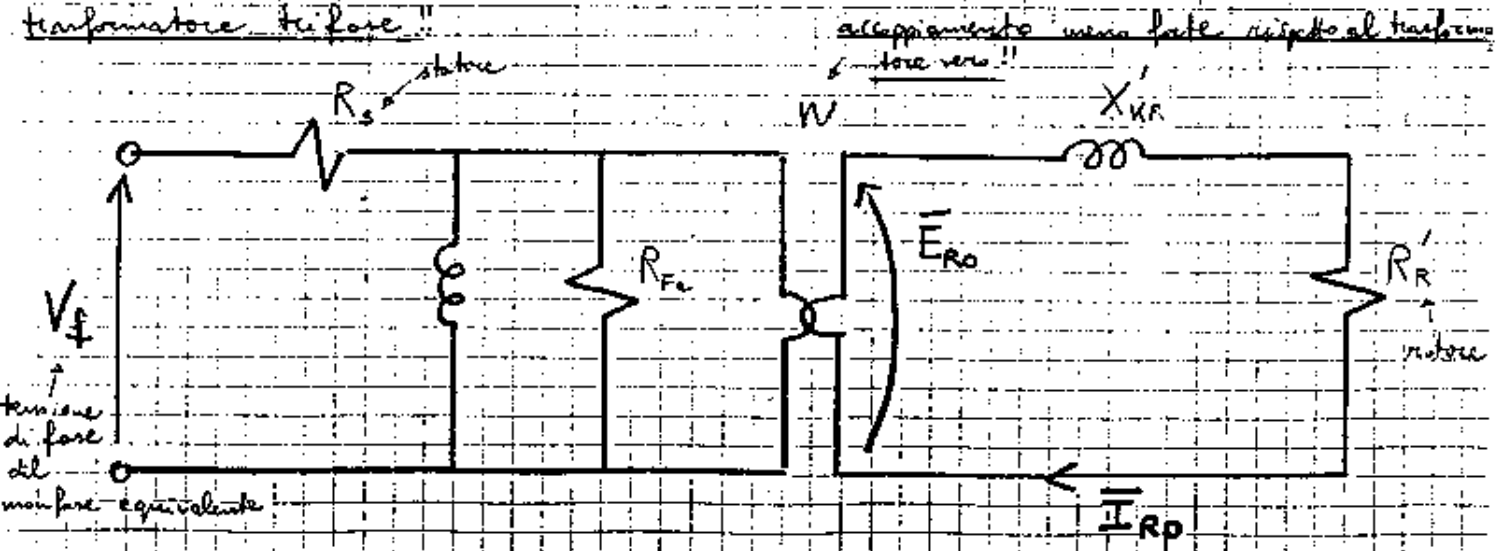
La macchina asincrona trifase realizza questo campo rotante trifase che permette in modo molto efficiente la conversione elettromeccanica di funzionamento come motore elettrico!!

N.B. = Se la macchina fosse monofase invece che trifase, non si verrebbe a creare un campo rotante, ma solo un campo pulsante.

La macchina è trifase: lo statore è formato da 3 avvolgimenti di tipo trifase, il rotore per adesso lo consideriamo dello stesso tipo dello statore, cioè una terna di avvolgimenti trifase cortocircuitati tra di loro.



A questo punto la macchina asincrona si presenta esattamente come un trasformatore trifase!!



Consideriamo per adesso la macchina asincrona ferma, cioè con rotore fermo e tutto funziona come un trasformatore, il cui secondario è cortocircuitato!

Vediamo cosa succede quando la macchina si mette in movimento:

Ho il campo \vec{B} che ruota lungo il traferro alla pulsazione ω !

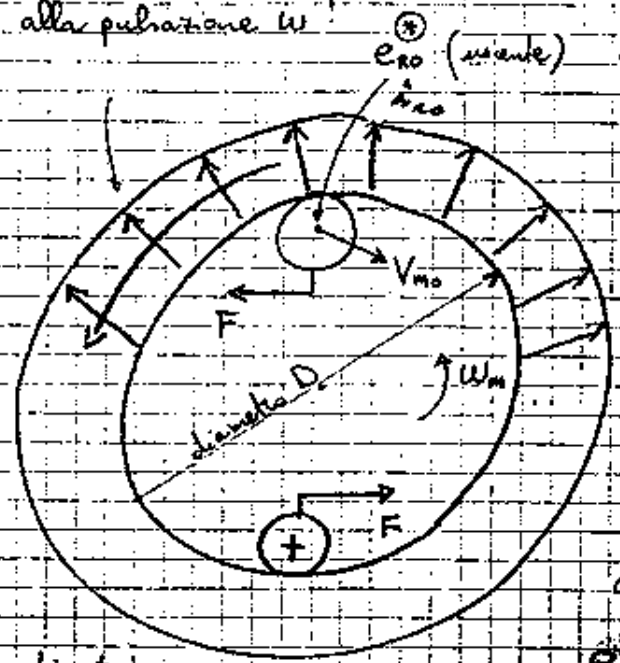
Lo statore è percorso da corrente!

In questa macchina è lo statore che crea il campo di induzione magnetica \vec{B} ! Per questo lo statore viene chiamato anche induttore!

Il rotore è l'indotto!!

Considero un conduttore sul rotore!

Sappiamo che la forza elettromotrice è su di un conduttore può essere vista dalla formula:



$$e_{ro} = B l v_{mo}$$

velocità meccanica di traslazione del conduttore rispetto al campo magnetico

condizione di macchina ferma (cioè il periferico del puledro o rotore fermo)

potenziale di rete all'alimentazione

$$V_{mo} = \omega \cdot \frac{D}{2}$$

diametro

A questo punto, questa fem fa circolare corrente nel rotore!!

Queste sono le grandezze del singolo conduttore, mentre nella pagina precedente ho i fasori che tengono conto delle grandezze di tutta la macchina!!

Il fatto che circola corrente, dà luogo ad una generazione di forza meccanica!! (F)

Pertanto, poiché circola corrente nasce una forza meccanica per ogni singolo conduttore, data dalla legge:

$$F = B l i_o \rightarrow i_o = i_{ro}$$

Momentaneamente consideriamo che la corrente circoli nello stesso senso della forza elettromotrice (28)

Riassumendo: $\vec{B} \rightarrow \vec{E}_{RO} \rightarrow i_{RO} \rightarrow F$

Le due forze mi danno luogo ad una coppia meccanica!!

La forza agisce nel senso del campo rotante!! Cioè il campo rotante trascina il rotore in movimento! Se il rotore è libero di muoversi, si mette in movimento con una velocità ω_m ! (velocità meccanica)

Prima ancora che il rotore si metta in movimento, abbiamo una frequenza sul rotore che è pari alla frequenza dello statore! (legato alla pulsazione ω dalla relazione:)

$$f_{R0} = f_S = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{pulsazione dell'alimentazione!}$$

$$\vec{I}_{R0} = \frac{\vec{E}_{R0}}{R'_R + jX'_{KR}} \quad (\text{Questo a rotore fermo!!})$$

Il rotore a questo punto si mette in movimento, e incomincia a ruotare alla velocità ω_m (velocità meccanica!!) (rad/s)

Il campo di induzione magnetica è ancora presente e vediamo cosa succede

prima, a rotore fermo: $\vec{E}_{R0} = B l v_{m0}$ velocità del campo rotante nel conduttore / velocità dovuta al movimento del rotore

adesso, a rotore in movimento: $\vec{E}_R = B l (v_{m0} - v_m)$, $v_m = \omega_m \cdot \frac{D}{2}$

La forza elettromotrice indotta diminuisce, perché è cambiata (è diminuita) la velocità relativa tra campo rotante e conduttore!!

Cambia anche la frequenza, che diminuisce:

$$f_R = \frac{\omega - \omega_m}{2\pi} \quad !$$

Le forze sono sempre date da: $F = B l i$

La corrente nel rotore, quando il rotore è in movimento, diventa:

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{E}_R}{R'_R + j \frac{f_R}{f_{R0}} X'_{KR}}$$

nuova fem!! (rotore in movimento!)
 che quindi è diminuita con la diminuzione della frequenza!!

Considero ora il rapporto fra fem di rotore in movimento e fem di rotore fermo:

$$\frac{E_c}{E_{c0}} = \frac{V_{m0} - V_m}{V_{m0}} = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} = S$$

SCORRIMENTO
(parametro adimensionale)

Quando S=1 => la macchina è ferma!! ($\omega_m = 0$!!)

→

$$\begin{cases} \vec{E}_R = S \vec{E}_{R0} \\ f_R = S f_{R0} \\ \vec{I}_R = S \vec{I}_{R0} \end{cases}$$

N.B. -
 frequenza a rotore fermo che è incalza la frequenza di stator!!
 $S < 1$!!

Quando tutto è fermo => ho il circuito equivalente di prima!!

Faccio ora una elaborazione: dato l'espressione di \vec{I}_R , divido numeratore e denominatore per S:

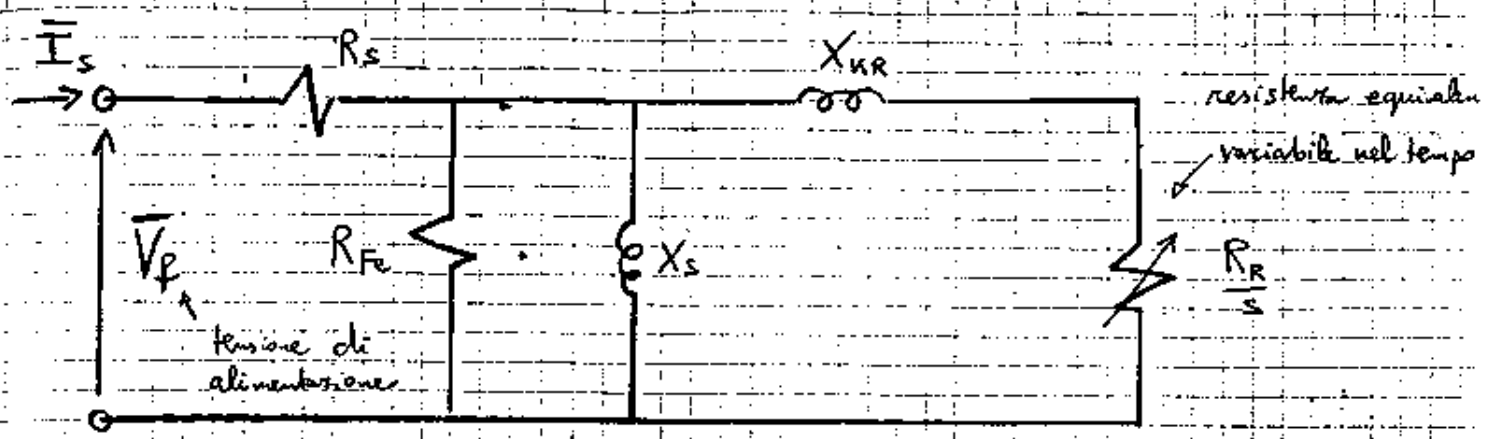
$$\vec{I}_R = \frac{\vec{E}_{R0}}{\left(\frac{R'_R}{S}\right) + j X'_{KR}}$$

nel mio circuito equivalente,

$$R'_R \text{ diventa } \frac{R'_R}{S} !!$$

circuito equivalente generale a rotore in movimento!
 $S=1$ => rotore fermo!!

Posso eliminare il trasformatore ideale e avere questo circuito equivalente



A macchina ferma ($s=1, \omega_m=0$), la corrente di statore che è la corrente assorbita ai morsetti della macchina è elevata!!

$I_s \text{ elevata} \approx 3 \div 5 I_n$!!

Caso limite:

$W_m = W \Rightarrow s = 0$

condizione in cui il rotore ruota alla stessa velocità del campo rotante

Condizione di Sincronismo!!

$I_R = 0$

Non abbiamo più niente!!

Se $I_R = 0$ siamo nelle condizioni di funzionamento A VUOTO!!

A vuoto: $I_s \text{ piccola} = \frac{1}{3} \div \frac{1}{5} I_n$!!

Avendo a che fare con un motore elettrico, i parametri importanti sono:

P_n = potenza nominale meccanica

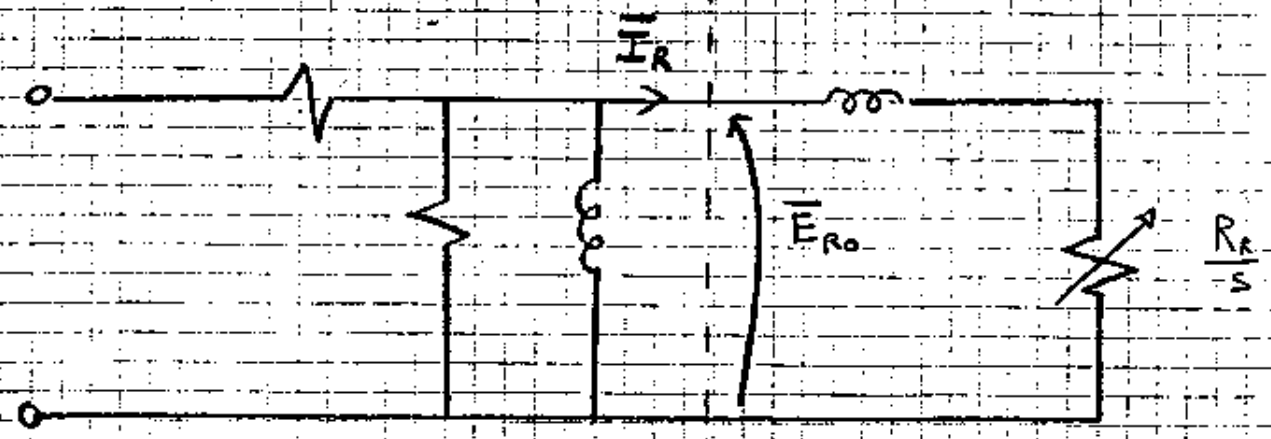
I_n = corrente nominale di statore

$A_n = 3 V_{np} I_n$

potenza apparente nominale

tensione di fase nominale

Analizziamo ora l'aspetto energetico della macchina asinrona, essendo le per la conversione elettromeccanica.



P_{TR} = potenza che lo statore trasmette al rotore

P_{TR} = potenza attiva (trasmessa)

$$P_{TR} = 3 \frac{R_R}{s} I_R^2 \quad (\text{potenza attiva trasmessa})$$

Però, per le perdite rotorighe ha $P_R = 3 R_R I_R^2 = s P_{TR}$

una potenza che va nella resistenza rotoriga!!

La differenza tra le due è la potenza meccanica, cioè la potenza elettrica che viene trasformata in potenza meccanica!!

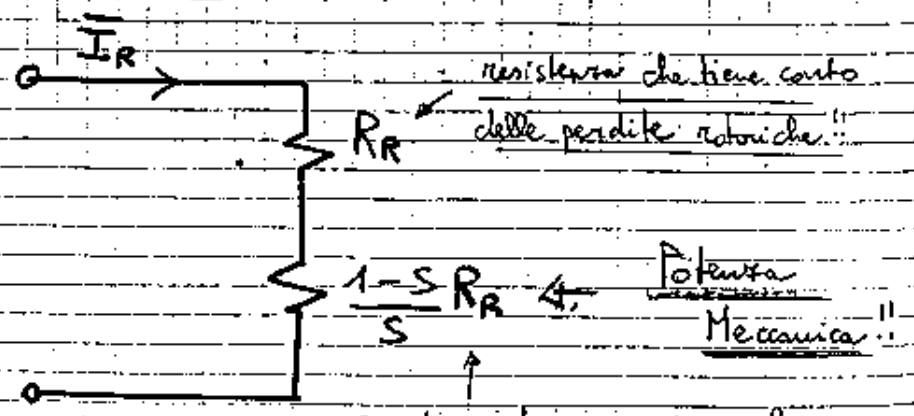
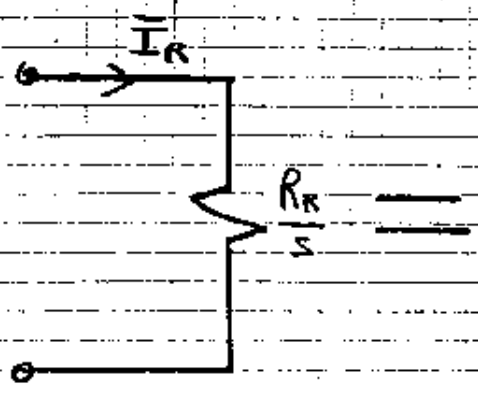
coppia elettromagnetica (generata dalla macchina)

$$P_{me} = P_{TR} - P_R = P_{TR} (1-s) = T \cdot \Omega_m$$

potenza meccanica

velocità meccanica

Posso vedere la resistenza rotoriga $\frac{R_R}{s}$ divisa in 2 parti:



resistenze da tenere conto delle perdite rotorighe!!

potenza meccanica

resistenze di conversione che

corrisponde alla potenza meccanica

$S_m = \frac{W_m}{W}$ Sapendo che $1 - S = \frac{W_m}{W}$, arriviamo alla
 espressione della coppia:

$$T \cdot S_m = \frac{W_m}{W} \cdot 3 \frac{R_R}{S} I_R^2$$

$$I_R^2 = \frac{E_{R0}^2}{\left(\frac{R_R}{S}\right)^2 + X_{KR}^2}$$

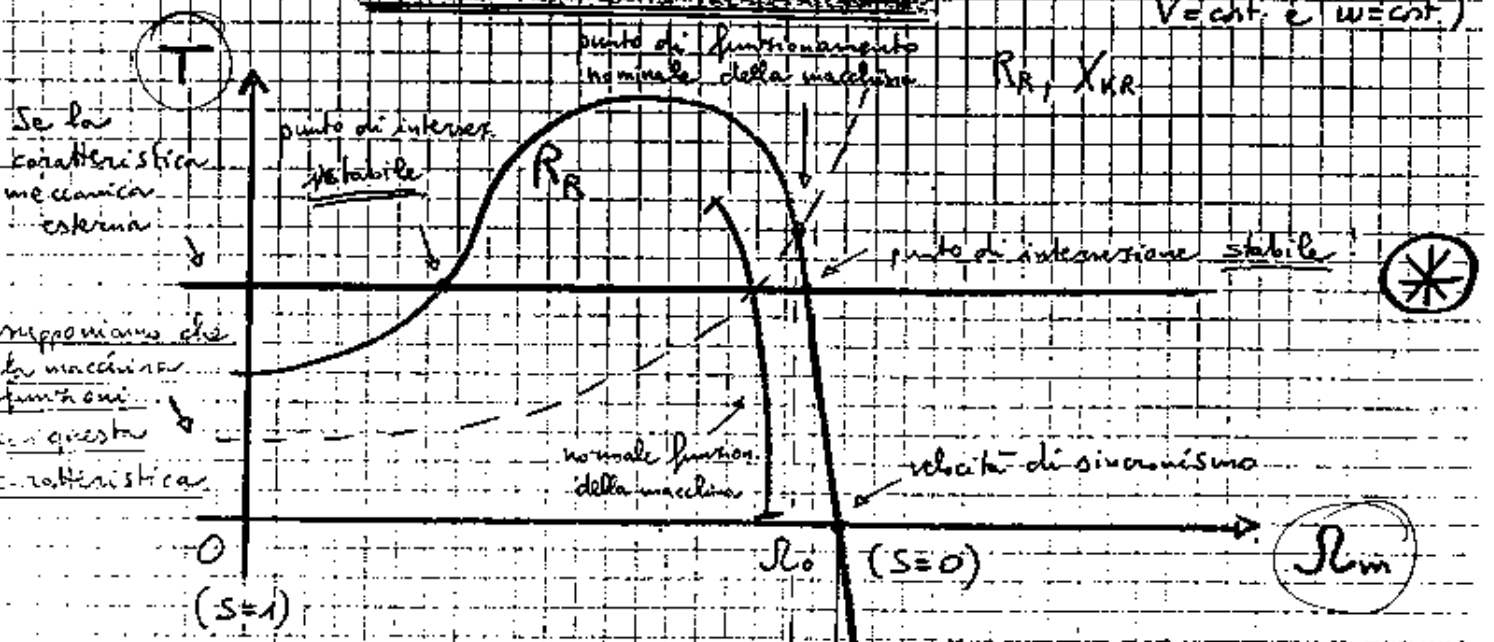
tensione di alimentazione esterna

$V_e = \frac{V}{\sqrt{3}}$ costante

$$T = \frac{\eta \cdot 3 E_{R0}^2}{W} \cdot \frac{S R_R}{R_R^2 + S^2 X_{KR}^2} \approx \left(\frac{\eta V_e^2}{W} \right) \frac{S R_R}{R_R^2 + S^2 X_{KR}^2}$$

$E_{R0} \approx V_e$

Vediamo ora la ~~CARATTERISTICA MECCANICA~~ (A tensione costante V_e cost. e W cost.)



proporzionale a P_{TR}

potenza meccanica

proporzionale alle perdite rottriche!!

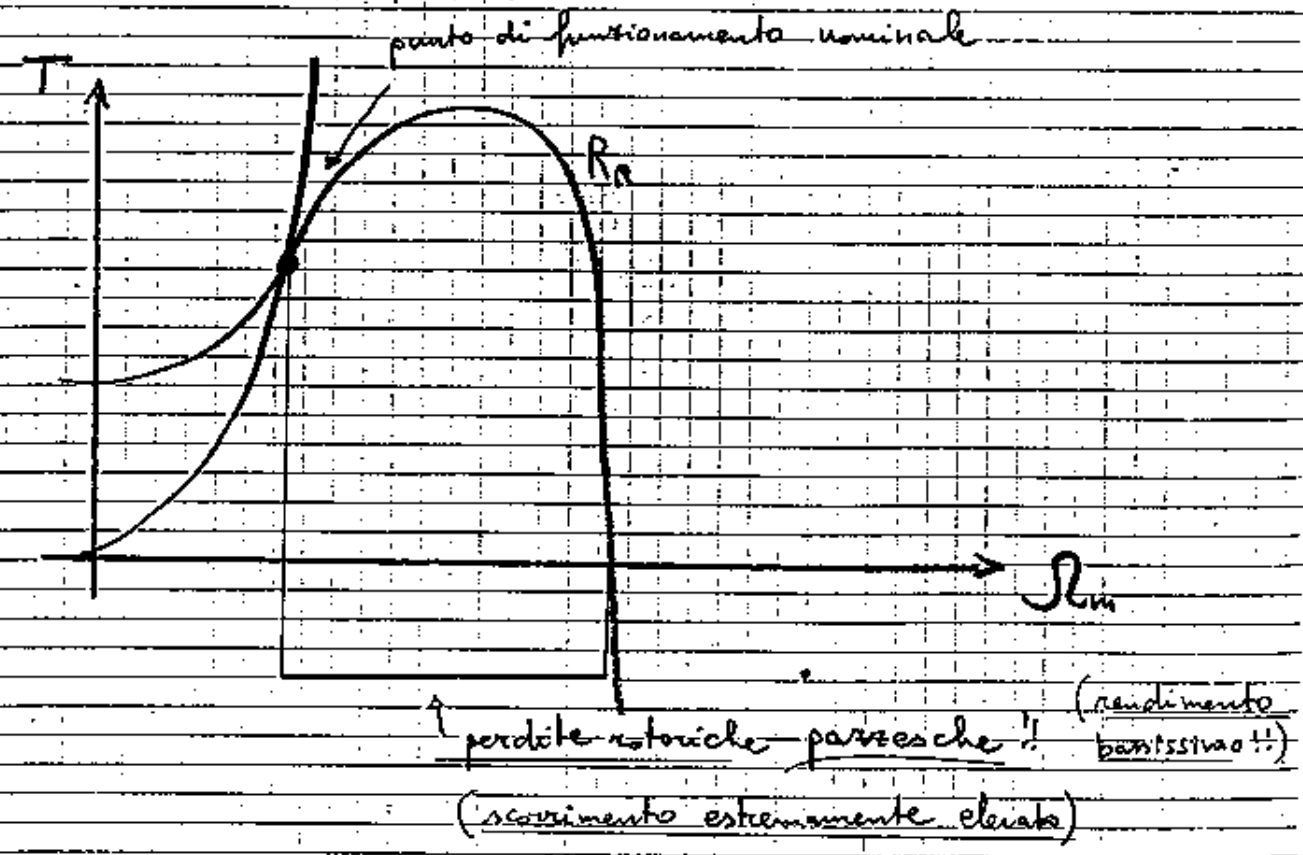
(fatto dovuto allo scorrimento!!
 Scorrimento elevato
 elevate perdite rottriche!!)

Da notare che la macchina lavora sempre ad una velocità Ω_m molto vicina alla sua velocità di sincronismo!!

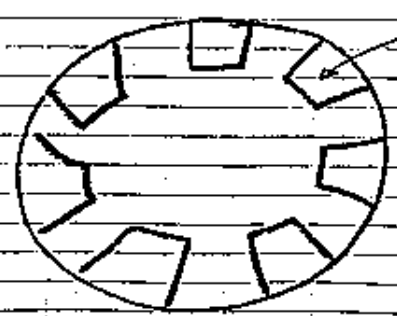
La macchina si chiama **ASINCRONA** perché non ruota alla sua velocità di sincronismo, anche se la sua velocità angolare è molto vicina alla velocità di sincronismo!!

* Se la caratteristica meccanica esterna fosse questa, cioè una costante, avremmo punti stabili e instabili!!

Se la caratteristica della coppia resistente fosse estremamente pendente, la macchina parte e si ferma nel suo punto di funzionamento: ma così avremmo delle perdite rotoriche parvesche!!

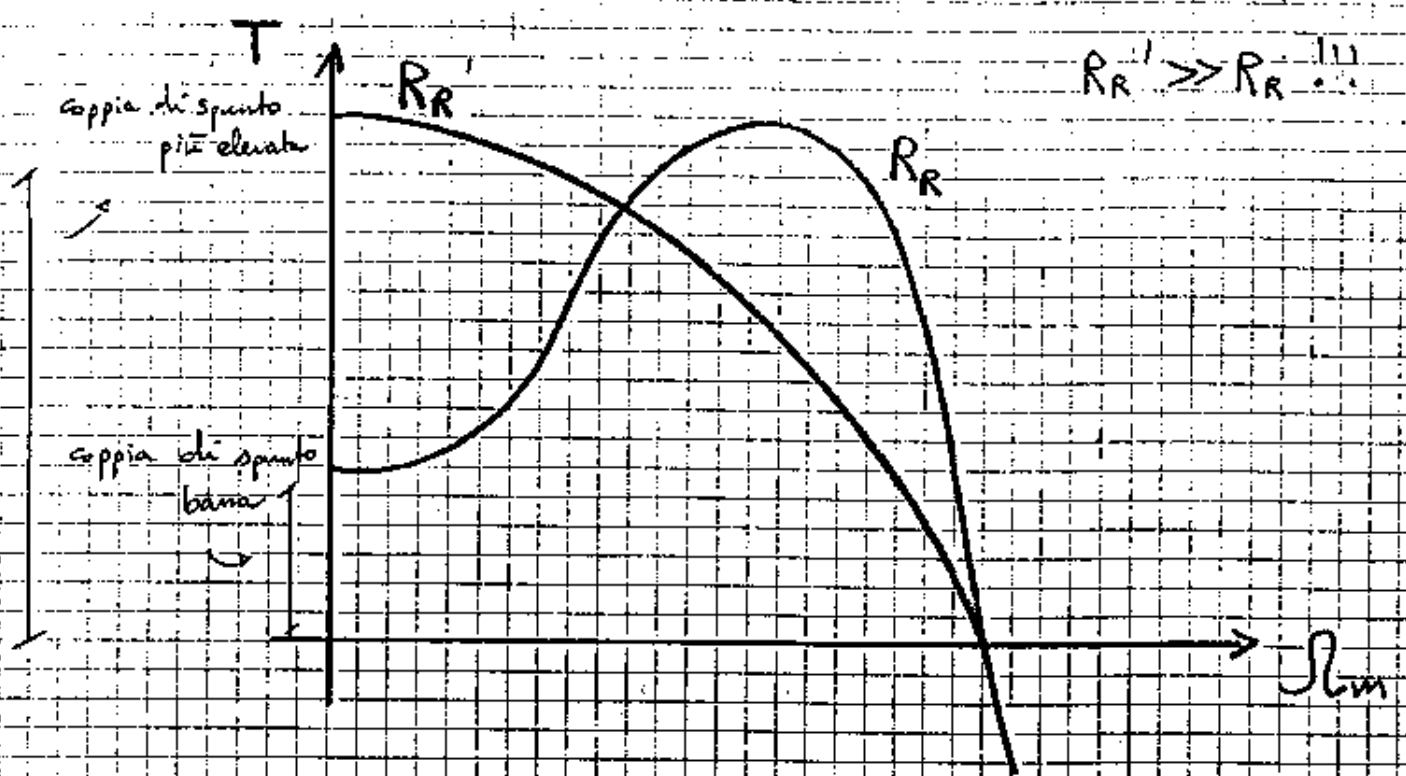


ROTORE A GABBIA DI SCALATTOLO

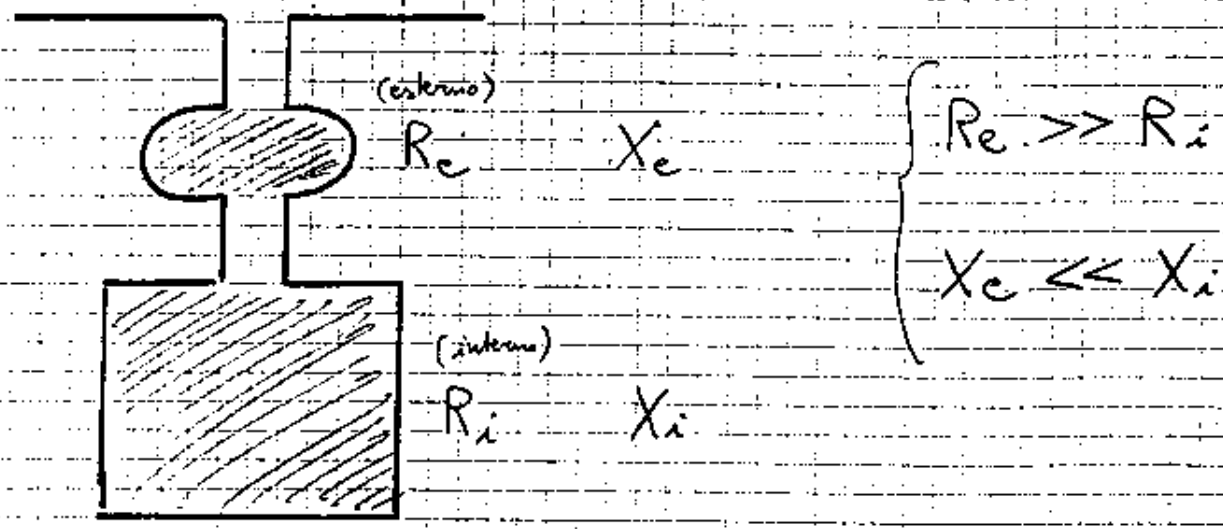


nelle cavità sono alloggiati i conduttori elettrici!!
(generalmente fatti in alluminio)

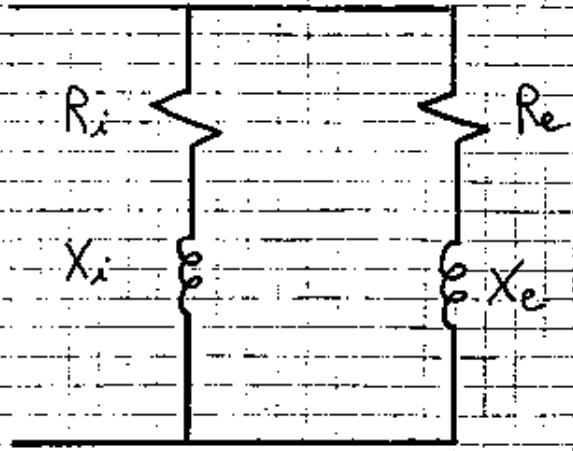
Ora, la macchina asincrona vista finora, aveva una coppia di spunto (3) piuttosto bassa. Invece, per esempio i motori di piccola potenza, hanno una resistenza rotorica molto più elevata, con conseguente coppia di spunto più elevata!!! (questo a parità di tutto il resto!!!)



È vero che ho una coppia di spunto più elevata, ma anche una resistenza rotorica molto elevata!!! Si ovvia con questo stratagemma: si costruisce il rotore con 2 livelli di gabbie:



Dal punto di vista circuibile e come avere: il motore fatto un da un unico elemento, ma da:

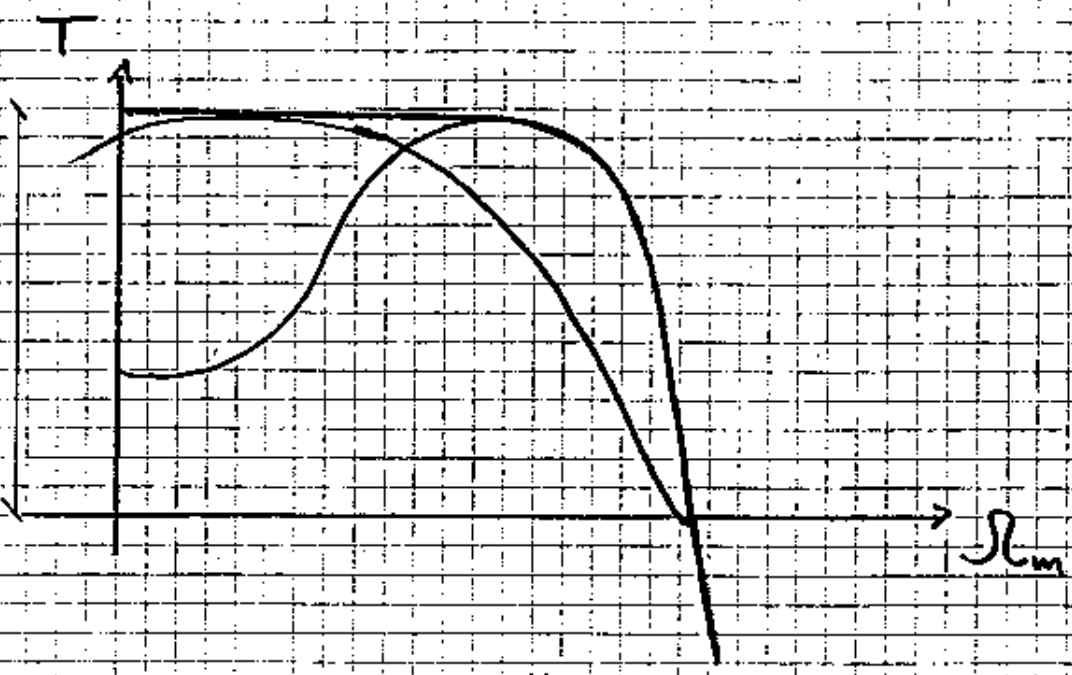


con frequenza $f = 50 \text{ Hz}$

$$R_e^2 \ll R_i^2 = R^2 + jX^2$$

la corrente passa prevalentemente qui

copra di punto molto più elevata!



FINE

CORSO ...