NUMERO: 1925A - ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Santoro Stefano

MATERIA: Macchine elettriche - Prof. Cavagnino

MACCHINE ELETTRICHE

30/4/'13

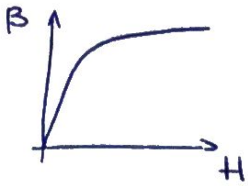
Lez. $\boxed{2}$ (1 saltata per Roma)

MATERIALI MAGNETICI

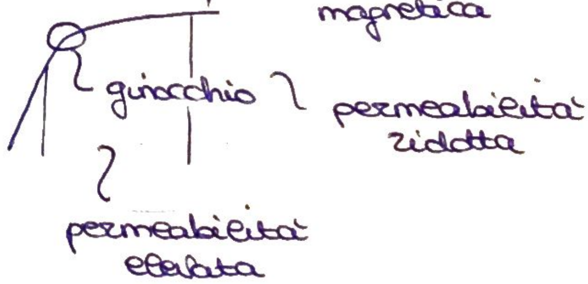
- Materiali ferromagnetici sono attivi dal punto di vista magnetico.
- Hanno una struttura cristallina "a domini (dipoli) magnetici" che interagiscono con campi magnetici prodotti esternamente.
- I domini sono polarizzati in modo casuale, per cui per il materiale risulta una magnetizzazione complessivamente nulla.

- Sotto l'azione di un campo esterno H (prodotto da una corrente), i domini tendono a disporsi in modo da favorire il campo eccitante.
I domini già polarizzati nel verso del campo esterno si espandono a spese di quelli orientati nel verso opposto.

$\boxed{B=\mu H}$ → ma μ non costante

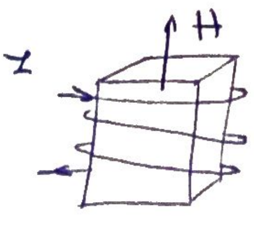


→ Curva di prima magnetizzazione

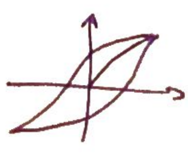


Prima magnetizzazione:
materiale nuovo sottoposto alla corrente per la prima volta.

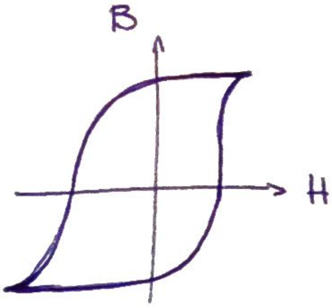
ISTERESI = Una volta arrivati alla saturazione, riportando il campo H a zero rimane un orientamento residuo nei domini, detta magnetizzazione residua.



Sottoponendo ad un (certo) ciclo simmetrico si ottiene il CICLO DI ISTERESI.



- Sono usati per la produzione di magneti permanenti.



↳ Sono molto difficili da smagnetizzare.

- In caso di magnetizzazione con un campo alternato si verificano delle perdite di potenza:

↳ La corrente varia nel tempo

  - dovute a isteresi magnetica
  - dovute a correnti parassite

Perdite per isteresi: $\boxed{E_i = K_i \cdot \hat{B}^{\eta}}$ $[J/m^3]$

- Se la frequenza di magnetizzazione è f:

$$\boxed{P_i = K \cdot f \cdot \hat{B}^{\eta}} \quad [W/kg]$$

- Posso ridurle riducendo ciclo d'isteresi (materiali dolci), ma costa di più rispetto agli altri. Altro modo è mettere del Silicio, viene reso impuro.

Perdite per correnti parassite: se il flusso magnetico è variabile nel tempo in un materiale ferromagnetico massiccio si inducono delle fem che tendono a contrastare le variazioni di flusso. Se corrente è continua, il flusso magnetico è continuo, perdite nulle per correnti parassite.

$$\underbrace{E}_{fem} \boxed{E \propto \omega \cdot \hat{B}}$$

ω = pulsazione del campo

$\hat{B}$ = valore di picco dell'induzione magnetica

- Poiché il ferro non è un isolante, la fem prodotta da' origine a delle correnti di circolazione limitate dalla resistenza ohmica del materiale. A causa di queste resistenze avrò delle perdite pari a:

$$\boxed{P = RI^2}$$

$$\Phi(t) = \Phi_{MAX} \, sen(\omega t) \qquad E(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \Phi_{MAX} \cos(\omega t) \cdot \omega_e =$$

$$= \hat{B}_{MAX} \cdot S_{Fe} \cdot \omega_e \cdot \cos(\omega_e t)$$

$\hat{B}$ = Valore di picco dell' induzione magnetica (SFRUTTAMENTO MAGNETICO)-

• CIFRA DI PERDITA = perdita specifica in un chilo di materiale sottoposto a magnetizzazione sinusoidale a 50 Hz con $\hat{B} = 1,5\,T$-

- Lo stesso materiale avrà perdite diverse a seconda dello spessore, dipende dalle correnti parassite-

Lamierino 25 35 → 0,35 mm
→ 10 volte superiore alla cifra di perdita 2,5 W/kg

• ORIENTATI hanno perdite specifiche maggiori dei NON ORIENTATI-

MATERIALI CONDUTTORI → Rame e Alluminio

- Hanno bassa resistività ρ $[\Omega m]$-
- Permettono il passaggio di corrente con basse cadute di tensione e poche perdite-

→ Più il metallo è nobile, più bassa è la resistività-

RESISTENZA $\boxed{R = \rho \frac{\ell}{S}}$ $[\Omega]$ ℓ = lunghezza
S = sezione costante

• La resistività aumenta con la temperatura-

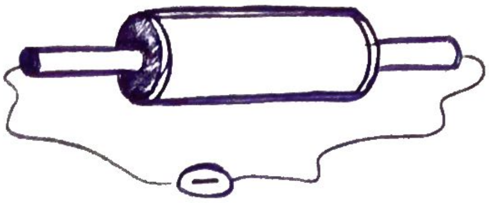
$\boxed{\rho = f(\text{temperatura})}$ → in modo lineare-

$$\left[R_2 = R_1 \cdot \frac{234,5 + \theta_2}{234,5 + \theta_1} \right] \quad (\text{rame})$$ → Posso sfruttare la dipendenza di R da T

- Un conduttore attraversato da corrente dissipa corrente per effetto Joule-

DENSITÀ DI CORRENTE = $\boxed{\delta = \frac{I}{S}}$ $\Rightarrow$ $\boxed{P} = RI^2 = \rho \frac{\ell}{S} \cdot (\delta S)^2 =$
$= \boxed{\rho \cdot \delta^2 \cdot \text{Volume}}$

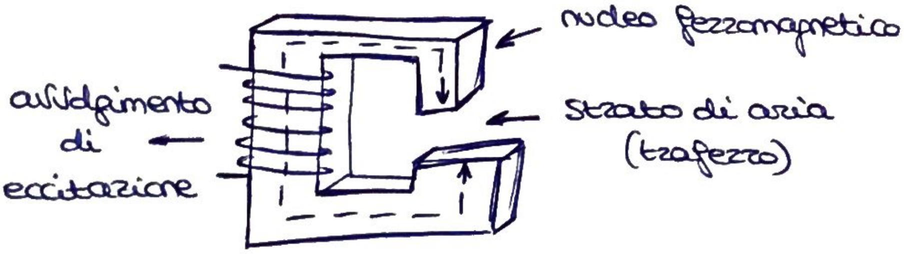
• Le perdite specifiche dielettriche sono del tutto trascurabili.



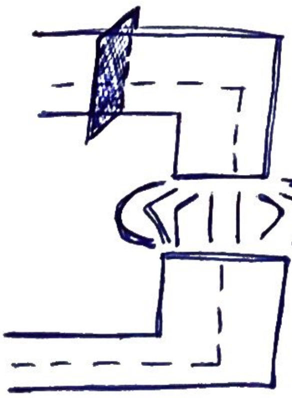
- Molto delicati, subiscono aggressioni meccaniche, termiche, chimiche, sovratensioni, ma e' invecchiamento dei materiali é dato soprattutto dalla TEMPERATURA.

→ In base alle proprietà di resistenza alla temperatura vengono definite le CLASSI DI ISOLAMENTO. Queste vengono date dalle norme CEI.
Le esigenze di durata dipendono dall' applicazione considerata.

ELETTROMAGNETI = struttura costituita da un nucleo di materiale ferromagnetico per convogliare il flusso magnetico prodotto da un avvolgimento di eccitazioni in DC oppure AC.



• Il nucleo é considerato come un TUBO DI FLUSSO a causa dell'alta permeabilità del materiale ferromagnetico.



É un circuito NON LINEARE, perché varia la permeabilità magnetica.

↳ Dobbiamo trovare la caratteristica dell' elettromagnete, ovvero il legame tra il FLUSSO del tubo di flusso e la CORRENTE che percorre la bobina.

Per ottenere il flusso concatenato λ, considero $N\phi$ e di conseguenza NI (che é la forza ~~elettro~~ magneto matrice).

→ Magnetizzare il traferro costa moltissimo -

‖ $H_m \ell_m$ sono la quantità di ampère spire che devo spendere per magnetizzare un determinato tronco del mio circuito -

$$N \cdot I = H_m \ell_m + H_{tr} \ell_{tr}$$

$$\downarrow$$

$$N \cdot I = \ell_m \cdot \frac{B_m}{\mu} + \ell_{tr} \frac{B_{tr}}{\mu}$$

LEGGE DI HOPKINSON

$$\downarrow$$

$$\boxed{N \cdot I = \frac{\ell_m}{\mu \cdot S_m} \cdot \phi + \frac{\ell_{tr}}{\mu_0 \cdot S_{tr}} \phi = R_m \phi + R_{tr} \phi}$$

R_m = RILUTTANZA MAGNETICA DEL TRONCO A SEZIONE COSTANTE $[H^{-1}]$

• Nel caso di sezione non costante

$$\boxed{R_m = \int \frac{\ell}{\mu S} d\ell}$$

- Nel caso più generale, la corrente concatenata si può scrivere

$$\longrightarrow I_{conc} = \sum_K N_K I_K = \begin{cases} \sum_{tronchi} \bar{H}_{tronco} \times \bar{\ell}_{tronco} & \text{LEGGE CIRCUITAZIONE} \\ \sum_{tronchi} R_{tronco} \times \phi_{tronco} & \text{LEGGE HOPKINSON} \end{cases}$$

ANALOGIA CIRCUITI ELETTRICI

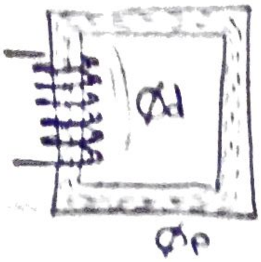
$$\underbrace{N \cdot I}_{fmm} = R_m \cdot \phi + R_{tr} \cdot \phi$$

• TENSIONE V → FORZA MAGNETO MOTRICE
• CORRENTE → FLUSSO MAGNETICO
• RESISTENZA → RILUTTANZA
• DENSITÀ DI CORRENTE → DENSITÀ DI FLUSSO
• CONDUCIBILITÀ ELETTRICA → PERMEABILITÀ MAGNETICA

$$\boxed{L} = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N}{I}\cdot\frac{NI}{R_{eq}} = \boxed{\frac{N^2}{R_{eq}}} \quad [H]$$

• In una bobina con nucleo ferromagnetico l'induttanza NON è costante.

→ L'induttanza è una proprietà che esiste anche se non la uso, perché le riluttanze dipendono solo dalla geometria.



Φ_p = flusso principale (si richiude solo nel nucleo)

Φ_d = flusso disperso (si richiude nell'aria)

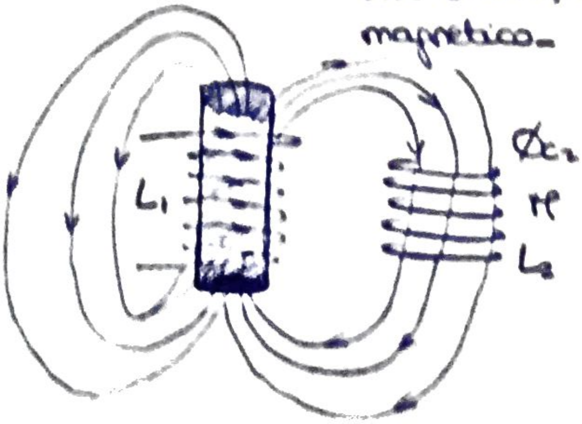
→ flusso concatenato totale della bobina $\lambda = N\cdot(\Phi_p+\Phi_d) = \lambda_p+\lambda_d$

→ induttanza totale della bobina $L = \frac{\lambda}{I} = \frac{\lambda_p}{I}+\frac{\lambda_d}{I} = \frac{N^2}{R_p}+\frac{N^2}{R_d} = L_p+L_d$

• R_d = riluttanza del tubo di flusso di dispersione (difficile da calcolare).

quota di dispersione, fa cadere la tensione.

MUTUA INDUTTANZA = esprime quanto flusso concatenato si scambiano due bobine, dà una misura dell'accoppiamento magnetico.



Φ_{c1} = flusso creato dalla bobina 1 e concatenato alla bobina 2.

• Le due bobine hanno la loro induttanza propria L_1 e L_2.

$$\lambda_{c1} = N_2\Phi_{c1} = N_2\frac{N_1 I_1}{R_{eq}} = \frac{N_2 N_1}{R_{eq}}\cdot I_1$$

// R_{eq} = riluttanza del tubo di flusso Φ_{c1}

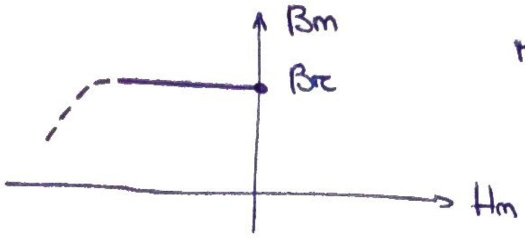
$$\boxed{M_{(21)}} = \lambda_{c1}/I_1 = \boxed{\frac{N_2 N_1}{R_{eq}}}$$

concatenato

analogia

→ M = coefficiente di mutua induttanza

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 138



Magnete Ideale = generatore di flusso -

- Un magnete può cedere al max la sua magnetizzazione residua (1,2 - 1,3), ma il ferro comincia a saturare a 1,4; inoltre, montato nel circuito, il punto di lavoro sarà più basso - Pesano solo traferri e magneti -

⟹ FERRO NON SATURA -

→ Il calcolo di un magnete consiste nel determinare il punto di lavoro del magnete -

Dalle:

(1) $H_m \ell_m + H_{tr} \ell_{tr} + H_{Fe} \ell_{Fe} = 0$

(2) $B_m S_m = B_{tr} S_{tr}$

- Si ottiene una relazione lineare

$$\boxed{B_m = -\mu_0 H_m \frac{\ell_m S_{tr}}{\ell_t S_m}}$$

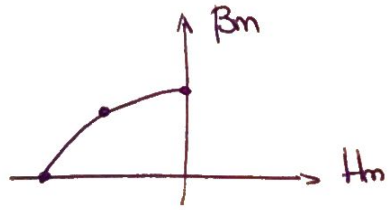
retta di carico del magnete

→ Il punto di lavoro è l'intersezione tra il ciclo d'isteresi e la retta di carico del magnete - Se questo punto cade vicino al ginocchio, ho "ucciso" il magnete, l'ho smagnetizzato -

Calcolo dimensioni del magnete:

$$S_m = \frac{\Phi_{tr}}{B_m} = \frac{B_{tr} S_{tr}}{B_m}$$ (vedere slide)

- Punto di lavoro di massimo sfruttamento: punto dove si ha il massimo prodotto $H_m B_m$ -



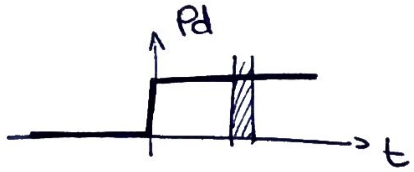
- L'energia oppure la coenergia si possono utilizzare per calcolare le varie coppie/forze scambiate tra i vari componenti del circuito.

RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

→ Una macchina elettrica dissipa molta energia (Joule, isteresi, attrito, ecc.) che devono essere allontanate, altrimenti si va incontro ad un surriscaldamento della macchina, che può arrivare a rottura.

- Per ridurre queste dissipazioni introduco dei modelli termici:
  - Macchina costituita da materiale omogeneo
  - Temperatura uniformemente distribuita

Θ T macchina
Θ_a T ambiente
G massa macchina
S area scambio



$$dQ = Pd \cdot dt = cG\,d\Theta + \underbrace{KS(\Theta-\Theta_a)dt}_{\text{calore "buttato" nell'aria}} \ [J]$$

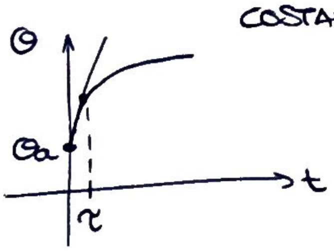
Dividendo per dt:

$$Pd = cG\frac{d\Theta}{dt} + KS(\Theta-\Theta_a)$$

$$\Rightarrow \boxed{\Theta(t) = \Theta_a + \frac{Pd}{KS}\left(1-e^{-t/\tau}\right)} \qquad \tau = \frac{cG}{KS}$$

- $(\Theta-\Theta_a)$ → sovratemperatura della macchina rispetto all'ambiente.

La Θregime è la temperatura che viene sopportata dagli isolanti, è importante conoscerla.



COSTANTE DI TEMPO TERMICA τ
$\begin{cases} \text{decine di minuti (piccole potenze)} \\ > 1 \text{ ora (grandi potenze)} \end{cases}$

CLASSIFICAZIONE MACCHINE ELETTRICHE

$W_{el} \rightarrow W_{el}$ { Trasformatori / Convertitori elettrici di potenza (CEdP)

$W_{el} \rightarrow W_{mec}$ Motori

$W_{mec} \rightarrow W_{el}$ Generatori { Dinamo (corrente continua DC) / Alternatore (corrente alternata AC)

Macchine Elettriche
- Statiche { Trasformatori / Convertitori
- Rotanti { Motori / Generatori

- Motori AC
  - Asincroni → da' coppia a una velocità variabile
  - Sincroni → da' coppia a una velocità precisa, quella di sincronismo

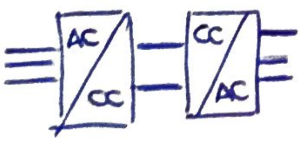
$$\boxed{\omega_{SINCRONISMO} = \frac{2\pi f}{p}}$$

$\boxed{\text{CedP}}$ = Lavorano sempre con energia elettrica

AC → DC Ponti Raddrizzatori
- NON CONTROLLATI: non controlla, da' in uscita una costante
- SEMI CONTROLLATI: controlla tra 0 e un valore massimo
- TOTAL CONTROLLATI (+ costoso): posso controllare il valore medio della corrente in uscita

Non possono invertire la corrente a causa della presenza di diodi

DC → AC Inverter (monofase o trifase)
- Regolano la frequenza e danno una frequenza e una tensione d'uscita variabile.

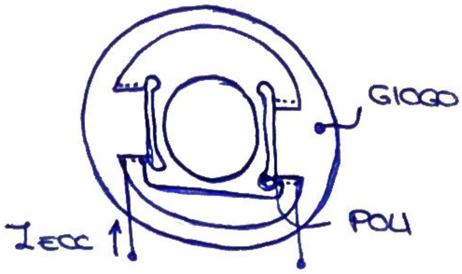


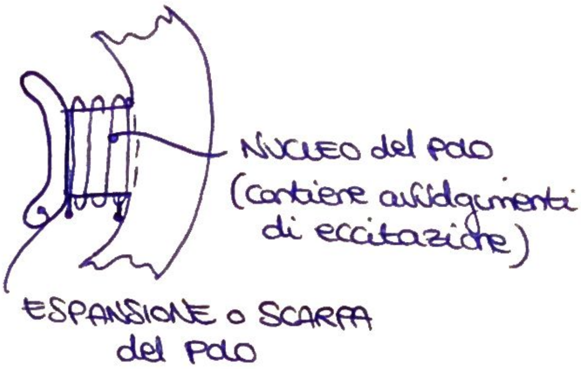
DC → DC Chopper: "affettano" la tensione dandola e togliendola al motore in modo molto rapido, in modo che il motore senta solo il valore medio.

IL TERMINE QUADRANTE È RIFERITO ALLE CORRENTI.

- 1Q (1 quadrante): tensione da 0 a V_{max} e $I_m > 0$
- 2Q: tensione da 0 a V_{MAX}, ma I_m < o > 0
- 4Q (+ costoso): può gestire $V_m \lessgtr 0$ e $I_m \gtrless 0$

INDUTTORE = Non è cilindro perfetto, ha delle protuberanze che sporgono verso l'interno.



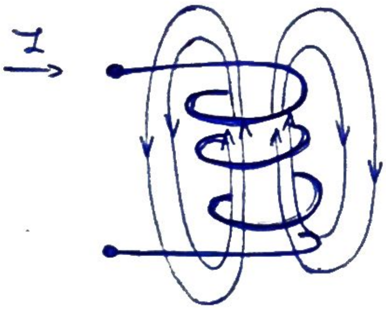


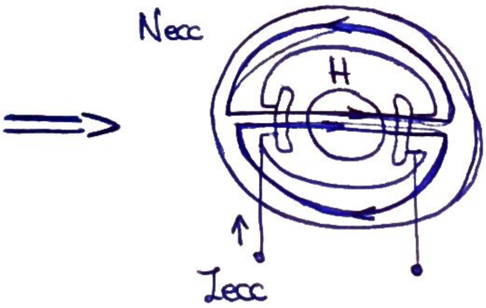
- POLO = crea flusso d'eccitazione, cioè il flusso utile di macchina. È collegato all'altro polo in modo da fare tutti gli avvolgimenti ed uscire.

→ Altro modo è usare un magnete permanente:

Il campo è avvolto all'interno.

→ Struttura a 4 poli





È un elettromagnete, anche se complicato.

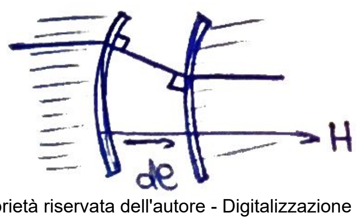
↳ Posso risolverlo calcolando H

$$\oint_{\ell} \overline{H} \cdot d\overline{\ell} = N_{ecc} \cdot I_{ecc}$$

↓

$$\underset{\approx 0}{H_{Fe}\ell_{Fe}} + H_{tr}\ell_{tr} = N_{ecc} \cdot I_{ecc}$$

- Facciamo l'ipotesi che i ferri non saturino (spendo poche ampère-spire), avrò una caduta di tensione quasi nulla, molto inferiore a quella che spendo per magnetizzare il traferro.



- Lungo il traferro il campo è radiale, in ogni punto punta al centro, è ⊥ alla tangente.

$H_{Fe} \cdot \ell_{Fe} = N \cdot I$ con ℓ = circonferenza media

$\rightarrow \ell_{Fe} = \pi \cdot d_m = \pi \cdot \frac{d_{int} + d_{ext}}{2} = \pi \cdot 50 \text{ cm} = 0{,}5 \cdot \pi \text{ m} = \boxed{1{,}571 \text{ m}}$

$\rightarrow$ Essendo $\phi = B_{Fe} \cdot S_{Fe}$, ottengo:

$$B_{Fe} = \frac{\phi}{S_{Fe}} = \frac{0{,}0147}{100 \cdot 10^{-4}} = \boxed{1{,}47 \text{ T}}$$

- Non posso considerare permeabilità costante, uso la tabella per trovare l' H_{Fe} corrispondente con un' interpolazione:

B_{Fe}	H_{Fe} [A/m]
1,45	990
1,47	x
1,50	1550

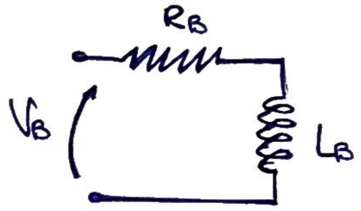
$\cancel{x = \frac{1{,}47 - 1{,}45}{1{,}50 - 1{,}45}}$

$$x = 990 + (1550 - 990)\left(\frac{1{,}47 - 1{,}45}{1{,}50 - 1{,}45}\right)$$

$\rightarrow H_{Fe} = \boxed{1214 \text{ A/m}}$

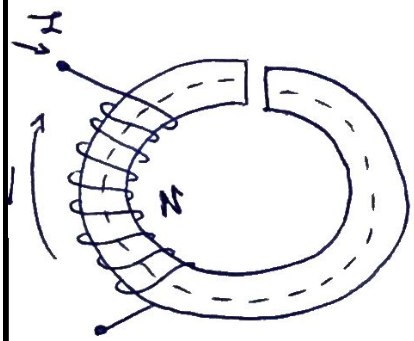
$$I = \frac{H_{Fe} \cdot \ell_{Fe}}{N} = \boxed{3{,}814 \text{ A}}$$

$\rightarrow$ Non avendo info, consideriamo corrente continua:



$$V_B = R_B \cdot I = \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot I = \underbrace{\frac{\rho \cdot \ell_{sp} \cdot N}{S}}_{} \cdot I = \boxed{38{,}62 \text{ V}}$$

$$\frac{18 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}45 \cdot 500}{0{,}4 \cdot 10^{-6}} = 10{,}125\ \Omega$$



$$N I' = H_{Fe} \cdot \ell'_{Fe} + H_{tr} \cdot \ell_{tr}$$

$\llcorner (\ell_{Fe} - 3\text{mm}) = 1{,}568 \text{ m}$

$\rightarrow$ Poiché il flusso è lo stesso, $B_{Fe} = B_{tr}$ non cambia, continua ad essere costante. Perciò anche H_{Fe} continua ad avere lo stesso valore, manca solo H_{tr}, ma conosco la sua permeabilità:

$\mu_0 = [\text{H/m}]$

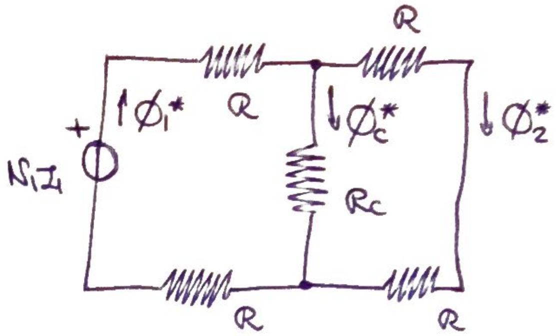
$$H_{tr} = \frac{B_{tr}}{\mu_0} = \frac{1{,}47}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1'169'790 \text{ A/m}$$

$$I' = \frac{H_{Fe} \cdot \ell'_{Fe} + H_{tr} \cdot \ell_{tr}}{N} = \frac{1214 \cdot 1{,}568 + 1169790 \cdot 0{,}003}{500} = \boxed{10{,}82 \text{ A}}$$

$$M_{21} = \frac{\lambda_{21}}{I_1} \rightarrow \frac{\lambda_{21}}{I_1} = \frac{N_2 \phi_2^*}{I_1}$$

avvolgimento

corrente



$$\phi_2^* = \phi_1^* \cdot \frac{R_c}{R_c + 2R}$$

$$\phi_2^* = \frac{N_1 I_1}{R_{eq1}} \cdot \frac{R_c}{2R + R_c} = \frac{N_1 I_1}{R_{eq}^*} = \frac{180 \cdot \phi_1 / 4}{R_{eq}^*}$$

$\phi_1^* \neq L_1 I_1$ ~ flusso concatenato

$$\rightarrow M_{21} = \ominus \frac{N_1 N_2}{R_{eq1}} \cdot \frac{R_c}{R_c + 2R} = \boxed{-0{,}002327\ H} = M_{12}$$

sono discordi

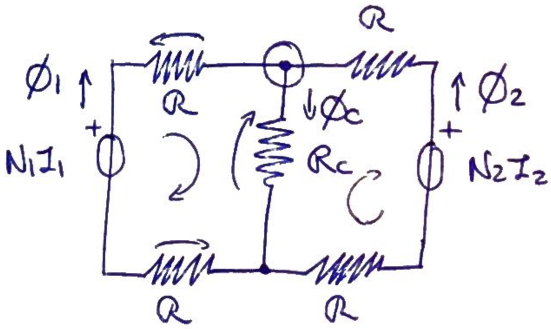
Lez. $\boxed{6}$

8/5/'23

CONTINUAZIONE

→ Connessione in serie tra le bobine (messe in modo che ci sia corrente unica e quindi unica autoinduttanza L') -

$$\boxed{L' = \frac{\lambda}{I}}$$



$$\lambda = N_1 \phi_1 + N_2 \phi_2$$

- Ma stavolta ϕ_1 e ϕ_2 sono generati dalla stessa corrente, non da correnti diverse -

Kirchhoff
$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_2 = \phi_c \\ N_1 I_1 = 2R\phi_1 + R_c \phi_c \\ N_2 I_1 = 2R\phi_2 + R_c \phi_c \end{cases}$$

- Come trovo I? La pongo pari a 1A, posso farlo perché è lineare -

↳ Se vale 2A, ϕ sarà il doppio -

$I = 1A$

- $\phi_2 = 2{,}8 \cdot 10^{-5}$ Wb
- $\phi_1 = 5{,}816 \cdot 10^{-5}$ Wb

$$\underbrace{V(t) = e(t)}_{\text{Kirchhoff maglia}} = \frac{d\lambda(t)}{dt}$$

LE TENSIONI IMPONGONO I FLUSSI -

↳ anche nella saturazione, dove la corrente non impone -

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = \sqrt{2}\,V_0 \cos(\omega t + \varphi_V) = \frac{d(N\phi(t))}{dt}$$

lo scelgo uguale a zero

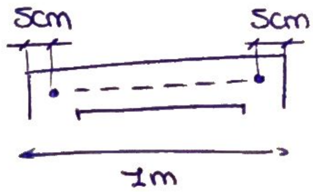
$$\phi(t) = \frac{1}{N}\int_0^T V(t)\,dt = \frac{1}{N}\int_0^T \sqrt{2}\,V_0 \cos(\omega t + \cancel{\varphi_V}) = \frac{\sqrt{2}\,V_0}{\omega N} \operatorname{sen}(\omega t + \cancel{\varphi_V})\Big|_0^T =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\omega N} V_0 \operatorname{sen}\omega T$$ → é massimo quando $\operatorname{sen}(\omega t) = 1$

$$\boxed{\phi_{max} = \frac{\sqrt{2}\,V_0}{\omega N}} \qquad \phi_{max} = \frac{\sqrt{2}\cdot 220}{314{,}15\cdot 100} = \boxed{0{,}0099\ Wb}$$

→ LEGGE HOPKINSON:

$$NI = R\phi \implies N\hat{I} = R\phi_{max}$$ (esprimo in termini di valore massimo)



$$R = \frac{l_N}{\mu_R\,\mu_0\,S} = \frac{4\cdot(1-0{,}1)}{2800\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 10^{-2}} =$$

lunghezza nucleo

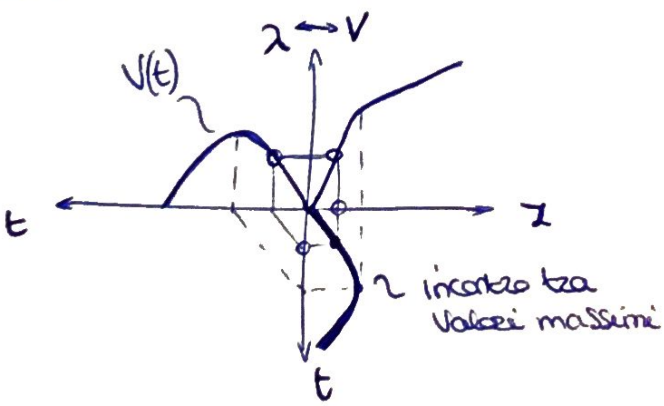
$$= 102\cdot 314\ H^{-1}$$

$$\rightarrow \hat{I} = \frac{R\,\phi_{max}}{N} = \frac{102314\cdot 0{,}0099}{100} = \boxed{10{,}13\ A}$$

$$I \overset{*}{=} \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{10{,}13}{\sqrt{2}} = \boxed{7{,}16\ A}$$

* Vale solo perché c'é continuità magnetica, linearità, L é costante -

→ Altro modo é usare il metodo della circuitazione -



$$\hat{\phi}_S = \frac{N \cdot \Delta \hat{I}}{R_N} = \frac{10 \cdot 0{,}003 \cdot \sqrt{2}}{100'000} = 4{,}24 \cdot 10^{-6}\ Wb$$

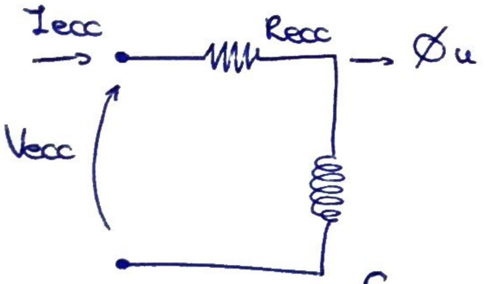
$$R_N = \frac{\ell}{\mu_R \mu_0 S} = \frac{2\pi r_m}{\mu_R \mu_0 S} = \frac{2\pi \cdot 0{,}05}{5000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 100'000\ H^{-1}$$

$$N_S = \frac{\sqrt{2}\,\hat{\phi}_S}{\omega\,\hat{\phi}_S} = \boxed{2122 \text{ Spire}}$$ → numero intero, arrotondo

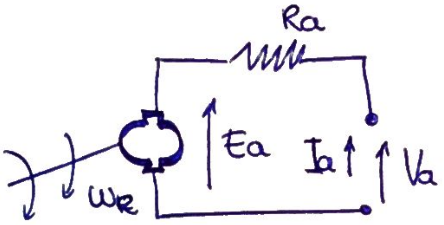
Lez. 7

13/5/'13

ECCITAZIONE SEPARATA



Indotto



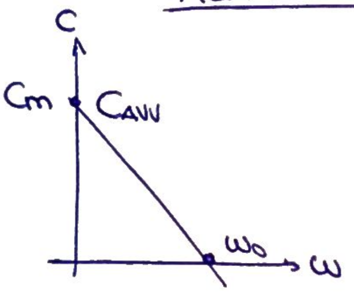
Armatura

$E_a = K \phi_u \omega_R$

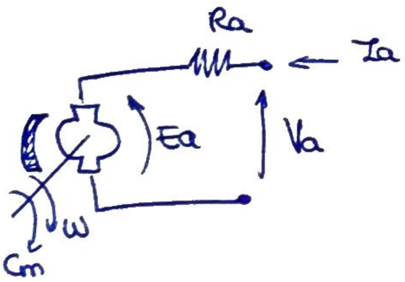
$C_m = K \phi_u I_a$

$V_a = R_a I_a + E_a$

$V_{ecc} = R_{ecc} I_{ecc}$



$\boxed{P_N = C_N \omega_N}$



 = magnete permanente

$E_a = K\phi_u \omega_R = K_E \cdot \omega_R$ ← costante di forza elettromotrice

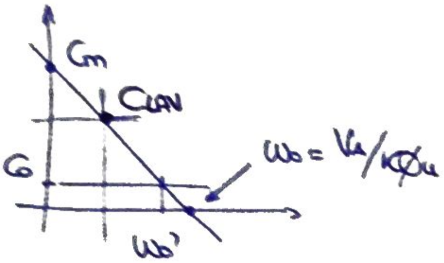
$C_m = K\phi_u I_a = K_T \cdot I_a$

↳ costante di torn (coppia)

- K_E = misurata in condizione a vuoto (no corrente d'armatura)
- K_T = misurata a rotore bloccato (con corrente d'armatura)

- Il flusso tende a scendere un poco.

- Reale = ci sono perdite meccaniche (attriti alle spazzole, cuscinetti, ...), dovrà esercitare una coppia, detta COPPIA A VUOTO, consumata da sé stessa per compensare queste perdite.



spero sia bassa

la velocità a vuoto reale

NON c'è carico meccanico, gira a vuoto.

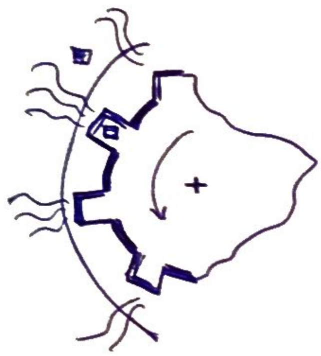
P_{Ja} = perdite Joule d'armatura

$\boxed{P_{Ja} = R_a I_0^2}$ (spero sia piccola)

- Cm continua a valere 0, ma la macchina sta generando una coppia per sé stessa. La potenza assorbita vale:

$$P_0 = E_0 I_0$$ → ma dove va a finire?

$$\boxed{P_{mecc} = \underbrace{P_{attrito\ cuscinetti}}_{K_1 \cdot \omega} + \underbrace{P_{attrito\ spazzole}}_{K_2 \cdot \omega}}$$



$$\boxed{P_{vent} = K_3 \cdot \omega^3}$$

perdite per ventilazione

P_{Fe}

perdite nel ferro, sono ROTAZIONALI, assumono valore solo quando è in moto, le linee di campo variano e non stanno concentrate nei denti come quando è ferma.

$$P_{mecc_0} = P_{mecc} + P_{vent}$$

$$\boxed{P_{mecc_0} + P_{Fe} = E_0 I_0}$$

$$\boxed{E_0 I_0 = C_0 \omega_0'}$$ → Non è una coppia su cui posso fare affidamento, se la mangia il motore.

- Quanto vale la corrente assorbita I_0?

$$\boxed{I_0 = \frac{C_0}{K\Phi_u}}$$ → È generata dalla macchina, la legge deve valere!

→ Se la P_0 è trascurabile, non la considero.

$$\boxed{P_0 = C_0 \cdot \omega_0'}$$

Comodo perché P_0 è un dato, mentre ω_0' è molto difficile da calcolare.

RENDIMENTO (in una certa condizione operativa)

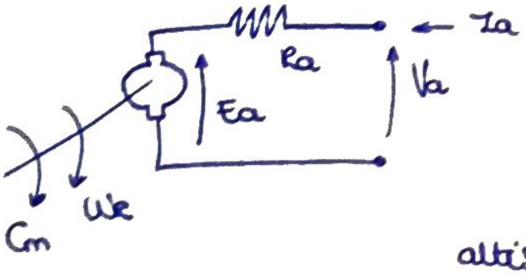
- A vuoto η vale 0 (non ho potenza utile)
- A rotore bloccato η vale 0 (non c'è potenza meccanica)

$$\boxed{\eta = \frac{P_{UTILE}}{P_{SPESA}}} = \frac{P_{SPESA} - \Sigma \text{Perdite}}{P_{SPESA}} = \frac{P_{UTILE}}{P_{UTILE} + \Sigma \text{Perdite}}$$

$$\Sigma \text{Perdite} = P_{Ja} + \underbrace{P_{mecc} + P_{Fe}}_{P_0}$$

- La potenza spesa vale $V \cdot I$, al suo interno sono già contenute le perdite, che sono sennò molto complicate da calcolare. Nella potenza spesa deve finirci anche la perdita d'eccitazione (anch'esse contenute in $V \cdot I$).

PUNTO DI LAVORO - AVVIAMENTO



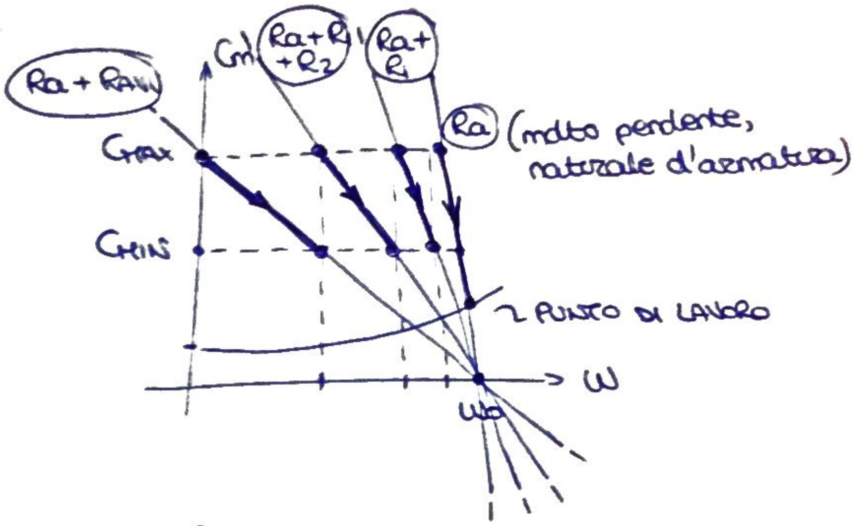
- All'avviamento, il motore è fermo, e la forza elettromotrice è nulla.

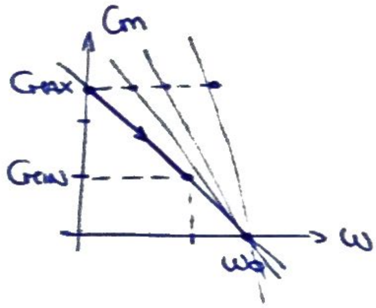
$$I_{AVV} = \frac{V_a}{R_a}$$ altissima

[Si spera che la caduta Ra sia piccola.]

→ Il motore sta dando una coppia molto alta, perché la corrente d'avviamento è molto elevata (anche 100 volte quella nominale), ma deve partire subito, se no si ha una perdita pari a $R_a I_a^2$ che brucia la macchina.

- Come si regola la tensione continua? Grazie ai CONVERTITORI ELETTRONICI di POTENZA, che permettono di regolarla.

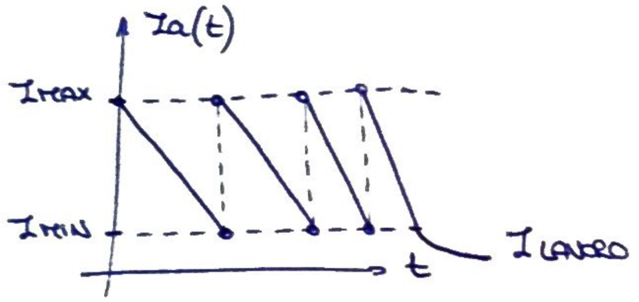




- All'inizio percorre la caratteristica con Ra + RAVV, fino a raggiungere la ω corrispondente alla CMIN. A questo punto si toglie una R3 e si "salta" sulla caratteristica Ra+R1+R2, fino alla ω della CMIN, e rifà questa operazione.

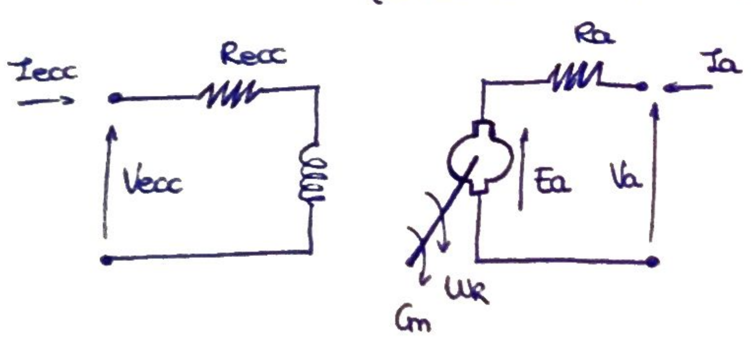
↳ Esempio del tram, si muove con corrente elettrica.

- Nel tempo, il guidatore dovrà gestire la corrente d'avviamento entro un certo intervallo:



Un amperometro ci dice quando togliere la resistenza, cioè quando siamo alla IMIN.

- REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ NEL MOTORE A CORRENTE CONTINUA (eccitazione separata)

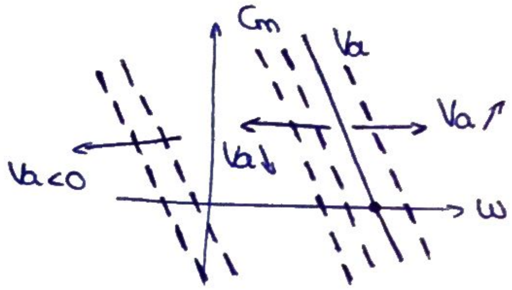


$E_a = K\phi_u\,\omega$

$C_m = K\phi_u\,I_a$

- La macchina ad eccitazione separata ha due circuiti, posso cambiare uno di quelli o entrambi.

1) ~~V_a~~ $\phi_u = cost.$ (Vecc costante)

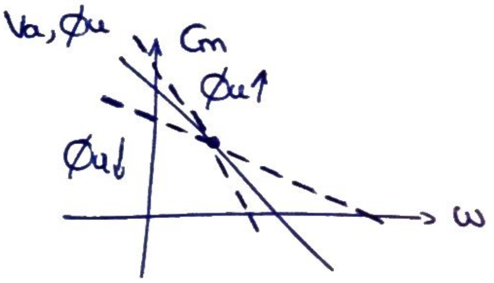


$$C_m = K\phi_u \frac{V_a}{R_a} - (K\phi_u)^2 \frac{\omega_R}{R_a}$$

- Data una certa Va e aumentandola, non cambia la pendenza della caratteristica, ma aumenta la ω_0. Allo stesso modo, riducendo Va riduco la ω_0, la retta si sposta sempre // a sé stessa.

Per poter avere Va<0 devo avere qualcosa in grado di farlo, è un costo gravoso.

2) $V_a = cost.$ ~~ϕ_u~~ (~~Vecc~~)



- Diminuendo Vecc (e quindi ϕ_u):

$$\omega_0 = \frac{V_a}{K\phi_u}$$

$$C_{AVV} = K\phi_u \frac{V_a}{R_a}$$

- Variando il flusso, ho una rototraslazione, la caratteristica "scivola" sugli assi. Diminuire ϕ_u non è bello (spreco ferro), ma a volte è utile, mentre aumentare ϕ_u rispetto alle condizioni nominale non ha senso, serve una Iecc molto alta.

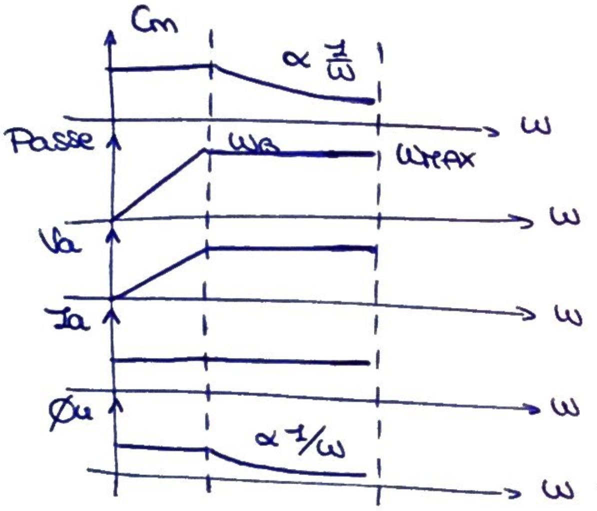
LE MACCHINE A MAGNETI PERMANENTI REGOLANO LA VELOCITÀ SOLO SULL'ARMATURA (caso 1, non varia mai ϕ_u), MENTRE QUELLE A CAMPO AVVOLTO POSSONO VARIARE LA VELOCITÀ IN DUE MODI.

$$P_{mecc} = C_m \cdot \omega = \underbrace{K \phi_u}_{\text{LO REGOLO IO!}\ \alpha \frac{1}{\omega}} I_a \cdot \omega = \text{costante}$$

→ Semplificando $K\phi_u$ con $\frac{1}{\omega}$ otteniamo che $P_{mecc} = K \frac{1}{\cancel{\omega}} I_a \cdot \cancel{\omega}$, rimane che la I_a rimanga costante per far sì che la P_{mecc} rimanga costante, e di conseguenza anche

$$E_a = K \phi_u \omega = K \frac{1}{\cancel{\omega}} \cdot \cancel{\omega} = \text{costante}$$

Abbiamo un grande vantaggio perchè $\boxed{E_a = cost.}$ -

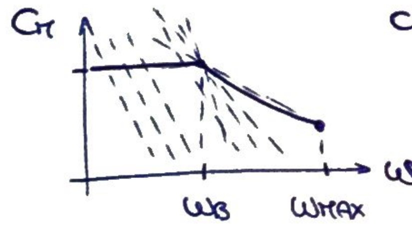


• Il problema è che ω_{MAX} non è tanto alta -

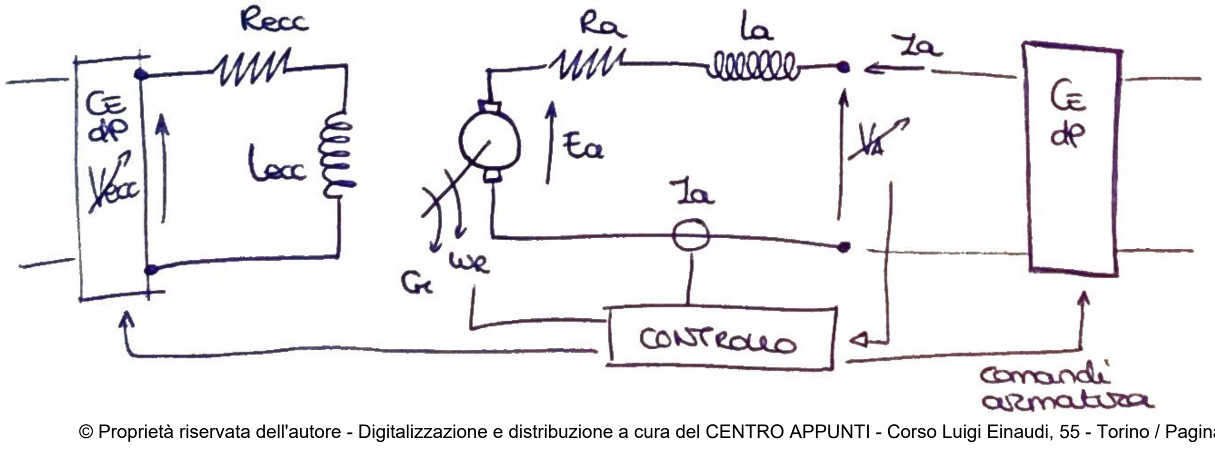
→ dev'essere regolato come $\frac{1}{\omega}$, se no crolla tutto -

Lez. 9

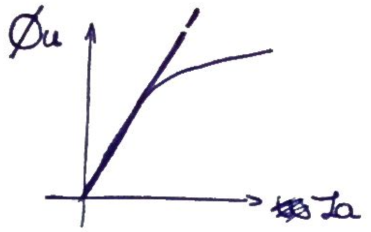
15/5/'13



CLASSICA DOMANDA DA ESAME



- M dipende dall'avvolgimento, é una costante pari al coefficiente angolare della retta che descrive il primo tratto della funzione Φ_u -



NB

$$\circledast \quad V_a = R_T I_a + E_a = R_T I_a + K_T I_a \cdot \omega$$

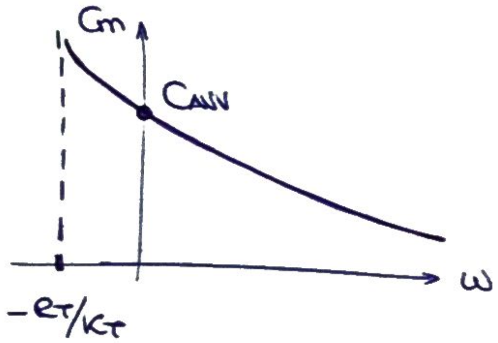
$$\boxed{I_a = \frac{V_a}{R_T + K_T \omega}}$$

↳ Caratteristica elettromecc. corrente - velocita'

$$\Longrightarrow \boxed{C_m} = K_T I_a^2 = \boxed{K_T \frac{V_a^2}{(R_T + K_T \omega)^2}}$$

→ Non é lineare, c'é un ω al quadrato!

↳ É UN RAMO D'IPERBOLE (non 2, tanto non posso passare l'asintoto)



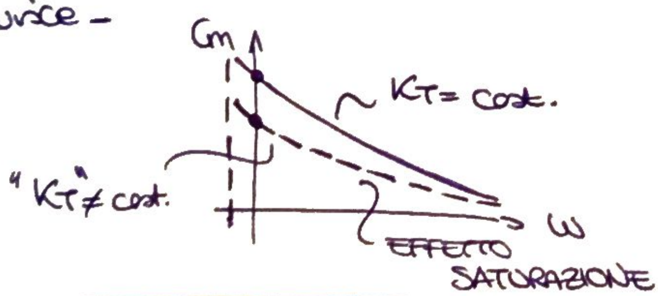
- Se non avesse asintoto verticale, ma avesse come asintoto l'asse y, darebbe una coppia ∞ per velocita' tendente a 0^+, non esiste!

→ In questo caso, comunque, la corrente al quadrato da' origine a una coppia altissima - Vale:

$$\omega_R = 0 \quad \Longrightarrow \quad \boxed{C_{AVV} = K_T \left(\frac{V_A}{R_T}\right)^2}$$

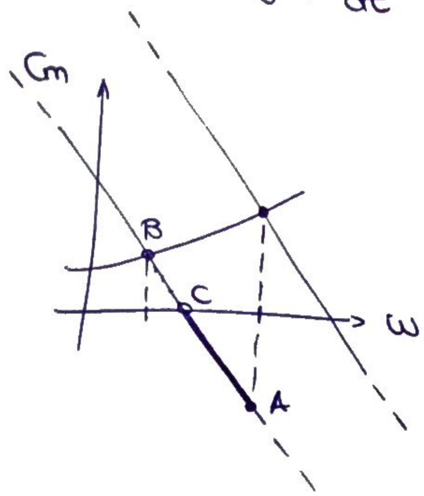
- Ho flusso (perché ho I_{AVV}), ma non ho forza elettromotrice $(E_a = 0)$ -

→ Se non avessi ipotesi di linearita', la caratteristica sara' vera solo per basse correnti (prima della saturazione), ma se no la coppia diminuisce -



FRENATURA RIGENERATIVA

$$C_m - C_e = J_{eq} \frac{d\omega}{dt}$$



- Se devo abbassare la velocità per delle richieste del carico, ci sono degli interruttori che abbassano la tensione (trasla la caratteristica).

La macchina però va a lavorare nel punto A, ma può farlo solo se la coppia è negativa, se cioè posso fornire una corrente negativa (devo avere minimo in 2 quadranti per poterlo fare).

→ Finché la corrente è negativa, funziona come DINAMO, è un freno ATTIVO, è il mondo elettrico che frena, assorbendo energia cinetica. Tra B e C la corrente è positiva, la coppia diminuisce, è una frenatura per INERZIA (la coppia non basta più per superare l'inerzia).

- L'energia ottenuta nella frenatura viene immagazzinata in super condensatori o viene utilizzata per ricaricare la batteria.

Altro modo è buttare energia nella rete, mettendola a disposizione di altre macchine (metropolitana, due treni VICINI, uno accelera e uno frena, sfruttano stessa energia). Con i treni non funziona perché non sono vicini né sincronizzati.

Lez. $\boxed{10}$ (4h e mezza!! o_O') 16/5/'13

ESERCITAZIONE (non fare esercizio 2)

$\boxed{4}$

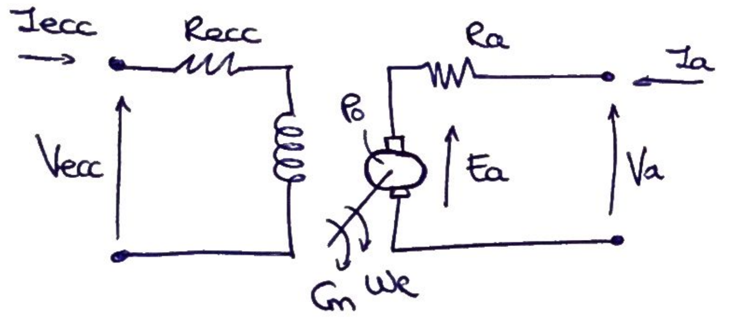
$P_N = 10\ kW$
$V_N = 110\ V$
$n_N = 1000\ rpm$
$\eta_N = 0{,}84$
$R_a = 0{,}07\ \Omega$
$V_{ecc} = 50\ V$
$R_{ecc} = 3{,}665\ \Omega$

- Nell' ipotesi di avere I_{ecc} = costante (cioè ϕ_u = costante), calcolare:

$P_{fe} + P_{mecc} = P_0$?

C_0 ?

$C_{avv} = 2(C_0 + C_N)$ R_{avv} = ?



- Il rendimento nominale (coerente con i dati del punto di lavoro nominale) é per definizione:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \Sigma Perdite} = \frac{P_N}{P_N + P_0 + altro}$$

$$\to \boxed{\Sigma Perdite} = \left(\frac{1}{\eta_N} - 1\right) P_N = \left(\frac{1}{0{,}84} - 1\right) \cdot 10'000 = \boxed{1905\ W}$$

$$\Sigma Perdite = P_0 + \underbrace{R_a I_a^2}_{P_{Ja}} + \underbrace{R_{ecc} I_{ecc}^2}_{P_{Jecc}}$$

$$P_0 = \Sigma Perdite - R_a I_a^2 - R_{ecc} I_{ecc}^2$$

→ Devo trovare la corrente nominale: non posso usare $\frac{V_N^2}{R_a}$ perché spesso che la caduta sia maggiore nella forza elettromotrice -

$$\to V_N = E_a + \underbrace{R_a I_a}_{\text{spesso piccola}}$$

$K\phi u = \frac{C_0 + C_N}{I_N} = \boxed{0{,}982 \ Nm/A}$ → Tiene conto della P_0

(Volessi I_0, darò usare $C_0/K\phi u$, ma userò il $K\phi u$ che tiene conto della P_0)-

$I_0 = C_0/K\phi u = \frac{4{,}73}{0{,}982} = \boxed{4{,}82 \ A}$ → Corrente non sfruttabile dall' utente

→ In avviamento, $\omega = 0$, e quindi $E_a = 0$ - Di conseguenza:

→ V_N si perde tutta sulle resistenze, ma serve la I_{AVV}-

$I_{AVV} = \frac{C_{AVV}}{K\phi u} = \frac{2(C_0 + C_N)}{K\phi u} = \frac{2(4{,}82 + 95{,}5)}{0{,}982} = \boxed{204 \ A}$

quello con P_0

$R_{AVV} = \frac{V_N}{I_{AVV}} - R_a = \frac{110}{204} - 0{,}07 = \boxed{0{,}469 \ \Omega}$

↳ SOSTITUIRE SEMPRE I NUMERI, SE NO PENSA ALLA COPIATURA!

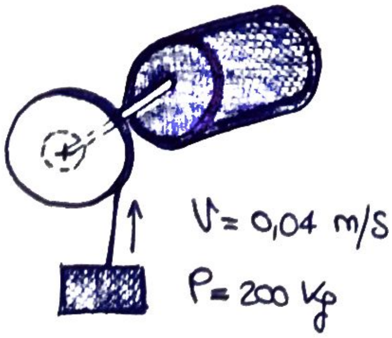
$\boxed{5}$

$R_a = 1 \ \Omega$
$V_N = 210 \ V$
$I_N = 10 \ A$
$n_N = 191 \ rpm$ $(I_0 \approx 0 \ A)$

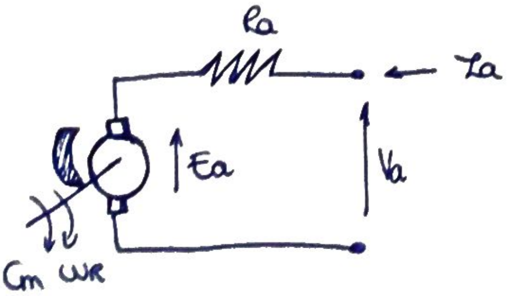
$K\phi u = K_E$?
↳ è motore a magneti permanenti

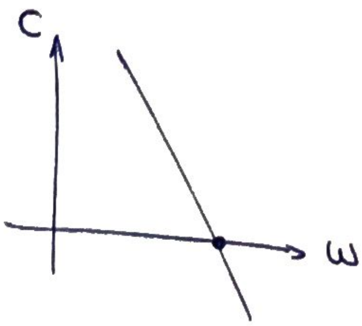
C_N? η_N?

d = 10 cm



$I_a = ?$
$V_a = ?$





$\boxed{7}$

$P_N = 10\ kW$

$n = 600\ rpm$

$V_a = 110\ V$

$I_a = 60\ A$

$\eta = 0{,}75$

$R_a = 0{,}1\ \Omega$

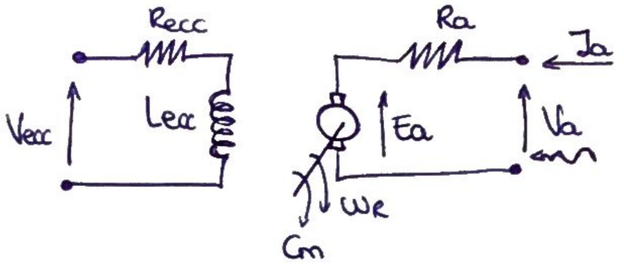
} Non dice che sono nominali

P_{asse}?

P_{Ja}?

$P_0 = P_{mecc} + P_{fe}$?

V_a'? / $n' = 2n$, $I_a' = 50\ A$



• Non parlano del circuito d'eccitazione, lo trascuriamo.

$$\eta = \frac{P_{asse}}{V_a I_a + \cancel{\frac{V_{ecc}^2}{R_{ecc}}}_{\approx 0}} \longrightarrow P_{asse} = V_a I_a \eta = 0{,}75 \cdot 110 \cdot 60 = \boxed{4950\ W}$$

Potenza usata in questa condizione, dev'essere $< P_N$.

$$P_{Ja} = R_a I_a^2 = 0{,}1 (60)^2 = \boxed{360\ W}$$

$$\Sigma\, Perdite = \Sigma\, Perdite_{ARM} = V_a I_a - P_{asse} = \boxed{1650\ W}$$

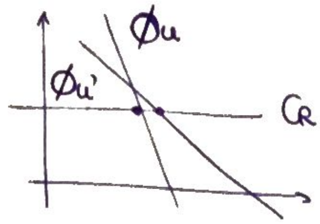
per ipotesi, $P_{Jecc} \approx 0$; $(P_{Ja} + P_0)$

$$P_0 = \Sigma\, Perdite - P_{Ja} = 1650 - 360 = \boxed{1290\ W}$$

$$K\phi_u = \frac{V_a - R_a I_a}{\omega} = \frac{E_a}{\omega} = \frac{110 - 0{,}1 \cdot 60}{\frac{2\pi}{60} \cdot 600} = \boxed{1{,}66\ Vs/rad}$$

$$V_a' = \underbrace{K\phi_u\, \omega'}_{E_a'} + R_a I_a' = \boxed{213\ V}$$

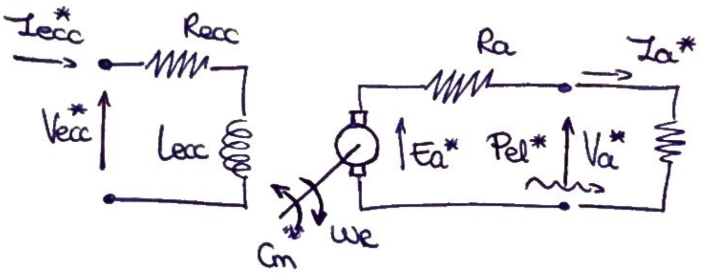
$$n' = \frac{Ea'}{K\phi_u'} \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{990}{5,09} \cdot \frac{60}{2\pi} = \boxed{1857\ rpm} \quad \text{(più veloce)}$$



→ Rototraslazione, Scivola lungo l'asse x

$$\eta' = \boxed{0,816}$$

- Nell'ipotesi di avere una dinamo con $Va^* = 1200\ V$ e $n^* = 1600\ rpm$, voglio che eroghi una $P^*_{elett} = 600\ KW$ – Trovare C^*_m e V^*_{ecc} –



(Po continua ad essere nulla)

Per giustificare il verso di Ia, Ea*, Va* –

- Il prodotto $C_m \omega_e$ dovrà uguagliare $E_a I_a$ sommato da P^*_{Ja} e P^*_{elet} –

$$C^*_m \omega_e = Ea^* Ia^* = P^*_{elet} + P^*_{Ja} = P^*_{elet} + Ra\, Ia^{2*}$$

$$Ia^* = \frac{P^*_{elet}}{Va^*} = \frac{600'000}{1'200} = \boxed{500\ A} \quad \text{(è un caso che rimanga uguale)}$$

$$Cm^* = \frac{600'000 + (0,35)(500)^2}{2\pi/60 \cdot 1600} = \boxed{4103\ Nm}$$

$$K\phi_u^* = \frac{Cm^*}{Ia^*} = \frac{4103}{500} = \boxed{8,2\ Nm/A}$$

$$V^*_{ecc} = V_{ecc_N} \cdot \frac{K\phi_u^*}{K\phi_{uN}} = \boxed{242\ V}$$

• Avendo C'_m o I''_a entro in tabella ed esco con i corrispondenti I'_a e C''_m:

$$C'_m = 100\ Nm \longrightarrow I'_a = 40 + (60-40)\cdot\frac{100-91,5}{177,5-91,5} = \boxed{42\ A}$$

Sfruttando la fem, passo trovare la n':

$$E_a' = V_a - R_T I_a' = 380 - (0,4)\cdot(42) = \boxed{363,2\ V}$$

-> Non ci sono Pd:

$$E_a' I_a' = C'_m n' \cdot \frac{60}{2\pi} \longrightarrow \omega' = \frac{E_a' I_a'}{C'_m} = \frac{363,2\cdot 42}{100} = \boxed{152,5\ rad/s}$$

Potenze

$$n' = \frac{60}{2\pi}\cdot 152,5 = \boxed{1457\ rpm}$$

TEMA ESAME $\boxed{11}$

$n_N = 1220$ rpm

$I_N = 440$ A

$R_T = 0,05\ \Omega$

C [Nm]	2300	1800	1400	1160	980
n [rpm]	1100	1200	1300	1400	1500

• Nell'ipotesi di macchina lineare, determinare:

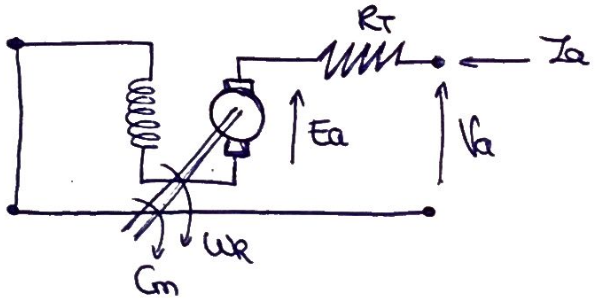
$C_N = ?$

$V_N = ?$

$\eta_N = ?$

$I' = ?$ / $n' = 1450$ rpm

$V'' = ?$ / $C''_{AVV} = 2C_N$



$$C_N\ (\text{da tabella}) = \frac{n_N - 1200}{1300-1200}(1400-1800) + 1800 = \boxed{1720\ Nm}$$

$$K_T = \frac{C_N}{I_N^2} = \frac{1720}{(440)^2} = \boxed{8,88\cdot 10^{-3}\ Nm/A^2}$$

↳ IMPO!!

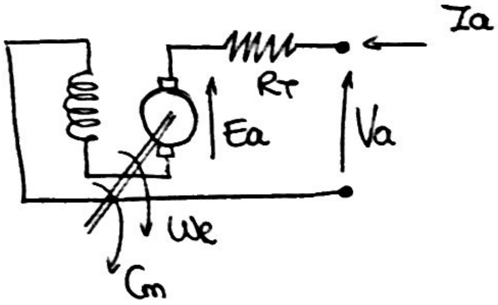
$\{ C_N \cdot \cancel{\omega_R} = K_T \cdot I_N \cdot I_N \}$

↳ macchina in serie

$$E_a = K_T\cdot I_a \cdot \omega_R = 8,88\cdot 10^{-3}\ 440 \cdot 2\pi/60 \cdot 1220 =$$

$$V_N = E_a + R_T (I_N) = \boxed{521,4\ V}$$

$$K_T = \frac{C_{AN}}{(I_{AN})^2} = \frac{7000}{(400)^2} = \boxed{0,04375} \ Nm/A^2$$



$$I_N = \sqrt{\frac{C_N}{K_T}} = \sqrt{\frac{3600}{0,04375}} = \boxed{286,9 \ A}$$

$$E_a = V_N - R_T I_N = 1000 - (0,3)(286,9)$$

$$\omega_N = \frac{E_a}{K_T I_N} = \frac{V_N - R_T I_N}{K_T I_N} = \boxed{72,81 \ \frac{rad}{s}}$$

$$\Rightarrow \quad n_N^* = 72,81 \cdot \frac{\cancel{60}^{30}}{\cancel{2\pi}} = \boxed{695,3 \ rpm}$$

$$n_N' = 1,1 \cdot 695,3 \quad \Rightarrow \quad \omega_N' = 1,1 \cdot 72,81 = \boxed{82,81 \ rad/s}$$

$$C' = 1,1 \cdot C_N = \boxed{3960 \ Nm}$$

Nuova condizione operativa

$$I' = \sqrt{\frac{C'}{K_T}} = \sqrt{\frac{3960}{0,04375}} = \boxed{300,8 \ A}$$

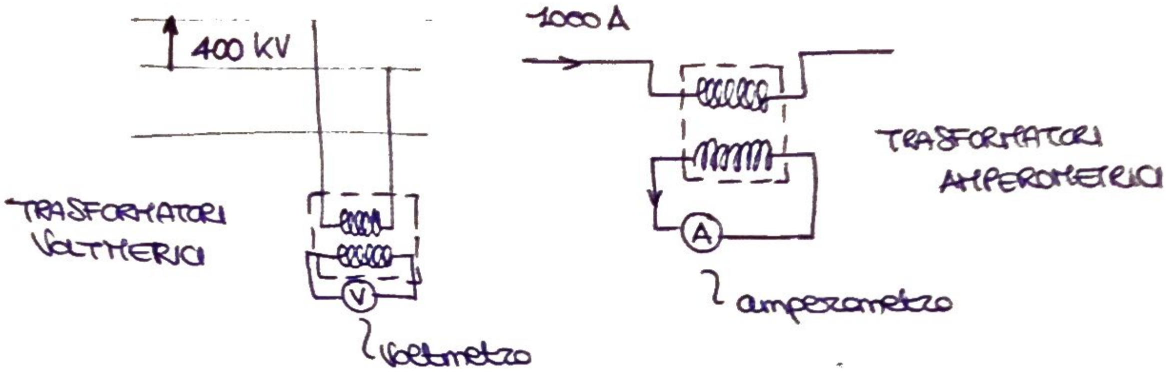
- Trovo la E_a' o passo per la potenza:

$$E_a' = \frac{C' \cdot \omega_N'}{I_a'} = \frac{3960 \cdot 82,81}{300,8} = \boxed{1054,2 \ V}$$

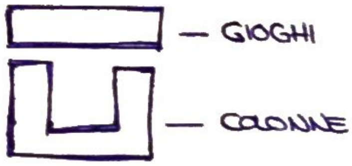
$$V' = E_a' + R_T I' = 1054,2 + (0,3)(300,8) = \boxed{1144 \ V}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 138

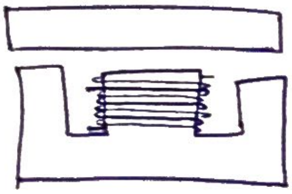
- Adattamento di impedenze (esempio nelle casse musicali)
- Strumento di misura:



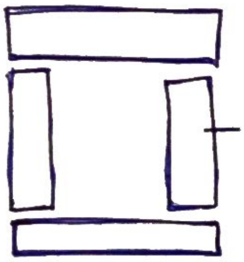
DETTAGLI COSTRUTTIVI = é formato da lamierini, é aperto, perché avvolgere delle bobine in una struttura chiusa é molto costosa.



NUCLEO CORAZZATO

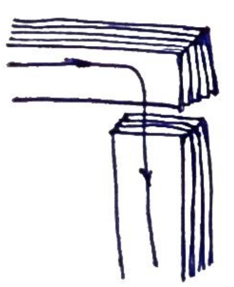


In questo caso entrambi gli avvolgimenti sono fatti attorno alla colonna centrale, separati da uno strato d'isolamento. Le colonne laterali sono la metà, prendono metà del flusso.



Giunti, possono essere di vario tipo:

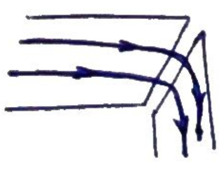
GIUNTO PIALLATO = ha un difetto, porta del traferro parassita, magneticamente fa schifo.



~ Va bene solo per lamierini non orientati.

Meccanicamente non é robusto.

- Per cristalli orientati giunti a 45°:



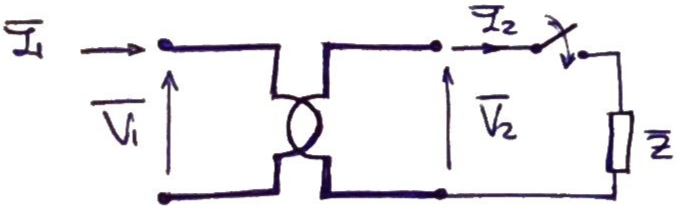
~ tende a scivolare

- Nella V_1 ho usato convenzione degli UTILIZZATORI, perché a monte c'é ciò che alimenta il mio sistema, che diventa carico, mentre V_2 ha la convenzione dei GENERATORI, perche' alla sua destra si trova il carico.
  - i esce dal polo positivo del voltaggio.

TRASFORMATORE IDEALE ($\eta = 1$)

- No perdite Joule avvolgimenti ($p_{Cu} = 0$) $\Rightarrow R_1 = R_2 = 0$
- No perdite nel ferro
  - no isteresi (ciclo ad area nulla).
  - no correnti parassite (Fe con resistività infinita, in modo da non permettere il loro passaggio).
- No saturazione.
- Permeabilità del Fe μ_{Fe} infinita (non richiede ampère spire per essere magnetizzato).
  - Non c'é flusso disperso $\Rightarrow$ TUBO FLUSSO CON ASSENZA DI FLUSSO DISPERSO.

SIMBOLO



$$V_1(t) = E_1(t) = \frac{d\lambda_1}{dt}$$

$$\boxed{V_1(t) = + N_1 \frac{d\phi_P}{dt}}$$

$$\phi_P(t) = \phi_{PMAX} \operatorname{sen}(\omega t)$$ → Espresso in termini di valor massimo e non di valor efficace

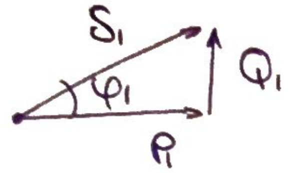
$$\hat{\phi}_P = \phi_{PMAX} \angle 0°$$

$$\boxed{\overline{V_1}} = j \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \hat{\phi}_P = \boxed{j\, 4{,}44\, N_1 f\, \hat{\phi}_P}$$

f = frequenza

$$V_2(t) = -\frac{d\lambda_2}{dt}$$ → negativo per convenzione di segno usata

$$\boxed{V_2(t) = - N_2 \frac{d\phi_P}{dt}} \qquad \boxed{\overline{V_2} = -j\, 4{,}44\, N_2 f\, \hat{\phi}_P}$$



21/5/'13

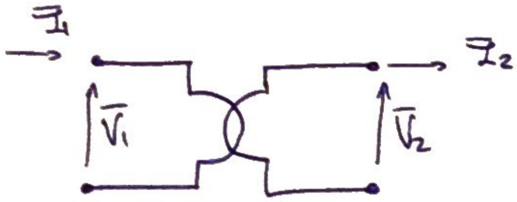
Lez. 12

Potenza

$S_2 = V_2 \cdot I_2 = \frac{V_1}{k} \cdot k I_1 = V_1 I_1$ (la potenza attiva si conserva)

$P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_2 = \frac{V_1}{k} k I_1 \cos\varphi_1 = V_1 I_1 \cos\varphi_1$ (potenza attiva si conserva)

CASO REALE ↳ $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2$



$\mu_{Fe} < \infty \longrightarrow \mathcal{R}_{N} > 0$
(devo spendere ampère spire per creare il flusso)

$N_1 \bar I_1 + N_2 \bar I_2 = \mathcal{R}_{N} \bar\Phi_P$

Il nucleo è magnetizzato dalla differenza di produzione tra le bobine (sbilancio delle forze magnetomotrici).

$\mathcal{R}_{N} \cdot \bar\Phi_P = N_1 \cdot \bar I_m$

↳ corrente magnetizzazione

↳ per H_e, viene creato dal PRIMARIO.

$$\boxed{\bar I_1 = -\frac{N_2}{N_1}\bar I_2 + \frac{N_1}{N_1}\bar I_m}$$

→ la corrente $\bar I_1$ è data dalla somma di due componenti, diversamente al caso ideale.

$\bar I_1 = +\bar I_2' + \bar I_m$, devo introdurre un'impedenza che assorba la corrente di magnetizzazione.

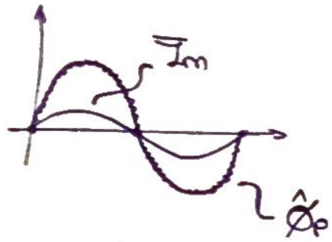
Da $\mathcal{R}_N \cdot \bar\Phi_P = N_1 \bar I_m \rightarrow \bar I_m = \frac{\mathcal{R}_N \cdot \bar\Phi_P}{N_1}$

$$\bar\Phi_P = \frac{N_1 \bar I_m}{\mathcal{R}_N} = \frac{N_1 \bar I_m}{\mathcal{R}_P} \qquad \hat\Phi_P = \sqrt{2}\,\bar\Phi_P$$

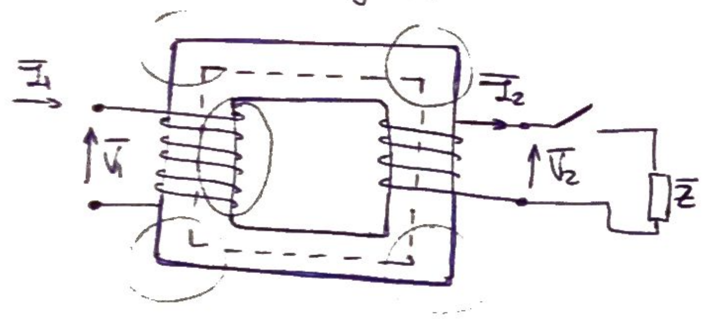
$$\boxed{\bar E_1} = j \overbrace{\frac{2\pi}{\cancel{\sqrt{2}}} f}^{\omega} \underbrace{N_1 \frac{N_1 \bar I_m}{\mathcal{R}_N}}_{L_m} \cdot \cancel{\sqrt{2}} = \boxed{j\omega L_m \bar I_m}$$

↳ INDUTTANZA DI MAGNETIZZAZIONE

→ le correnti magnetizzanti $\bar{I}_m$ sono IN FASE con il flusso $\hat{\phi}_P$ -



FLUSSI DISPERSI → solitamente nei giunti



$$\bar{E}_{1\,TOT} = \frac{d\lambda_{1\,TOT}}{dt} =$$

$$= \frac{d(N_1 \phi_P + N_1 \phi d_1)}{dt} =$$

$$= \frac{d(N_1 \phi_P)}{dt} + \frac{d(N_1 \phi d_1)}{dt}$$

$$\bar{E}_{1\,TOT} = \underbrace{j\,4{,}44\, N_1 f \hat{\phi}_P}_{\bar{E}_1} + j\,4{,}44\, N_1 f \hat{\phi} d_1$$

↳ È una tensione che devo mettere in conto -

$$N_1 \bar{I}_1 = R d_1 (\bar{\phi} d_1 \cdot \sqrt{2})$$

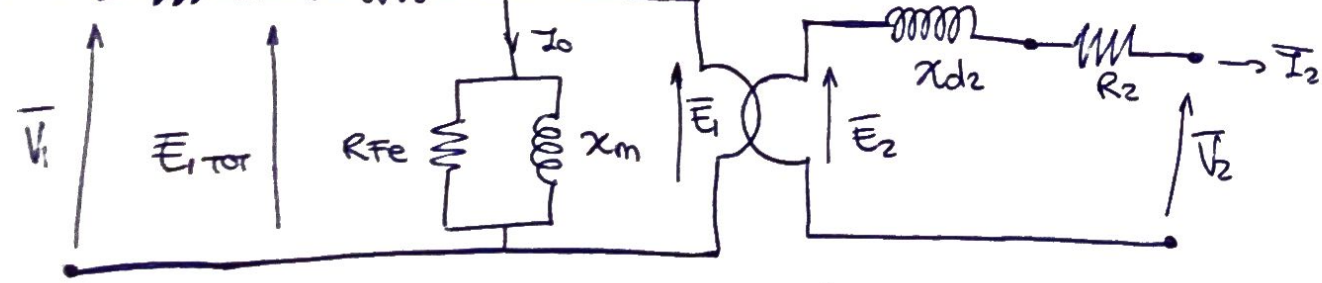
~ circuitazione attorno alla linea media della prima bobina -

↳ molto difficile da calcolare

$$\bar{E}_{1\,TOT} = \bar{E}_1 + j\omega \left(\frac{N_1^2}{Rd_1} \cdot \bar{I}_1 \right)$$ → Ricavando $\hat{\phi} d_1$ dalla precedente

~ Ld_1 = induttanza magnetica

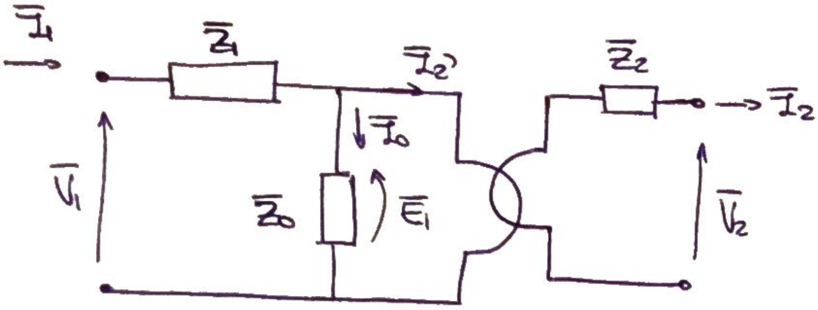
CIRCUITO COMPLETO



$Xd_1 = \omega L d_1$

R_1 = resistenza dei fili $= R_2$

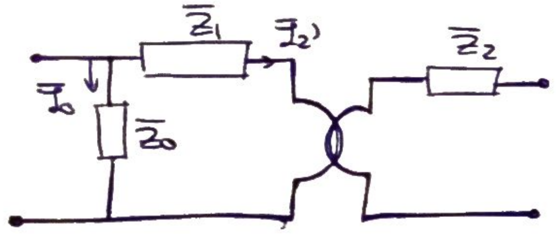
MODELLO DELLE NON-LINEARITA'



$\boxed{\bar{Z}_1 = R_1 + jX_{d1}}$ $\boxed{\bar{Z}_2 = R_2 + jX_{d2}}$

$\boxed{\bar{Z}_0} = R_{Fe} /\!/ jX_m = \boxed{\dfrac{R_{Fe}\, jX_m}{R_{Fe} + jX_m}}$

- Per ottenere il circuito operativo, cerchiamo di semplificarlo, non ci piace l'impedenza $\bar{Z}_0$, perché ci porta a dover fare diagrammi fasoriali. Possiamo spostarla, perche' $\bar{Z}_0$ é un'impedenza molto grande, passa poca corrente,

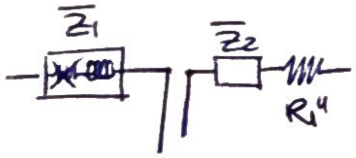


$\bar{Z}_1$ invece é molto piccola, passa molta corrente, non crea un errore molto grande, é un'approssimazione.

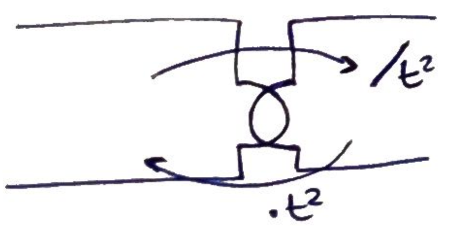
CONCETTO D'EQUIVALENZA → porto R_1 nel circuito secondario.

$P_{J1} = R_1 I_2'^2 = R_1'' I_2^2$ dove $\boxed{R_1''} = R_1 \left(\dfrac{I_2'}{I_2}\right)^2 = \boxed{\dfrac{R_1}{t^2}}$

Resistenza primaria riferita al secondario



- Posso passare da un circuito all'altro:

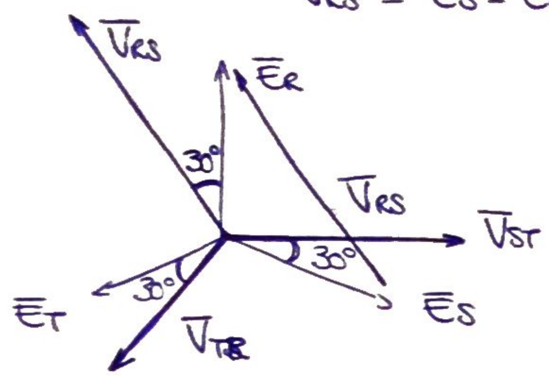


Dove ho alta tensione i parametri devono essere piccoli (abbasso, divido), mentre dove la tensione é bassa alzo il valore dei parametri (moltiplico).

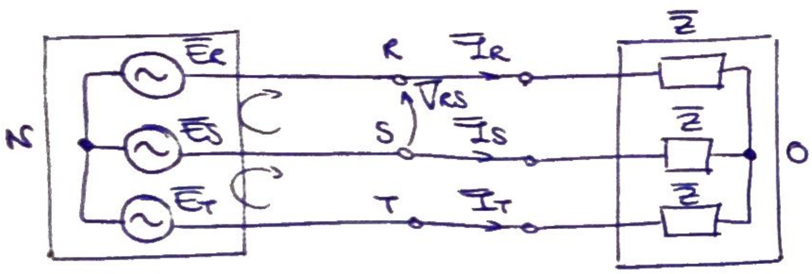
$Q_{xd_1} = X_{d1} \bar{I}_2'^2 = X_{d1}'' I_2^2$ $\qquad X_{d1}'' = \dfrac{X_{d1}}{t^2}$

- Facendo equazione alla maglia, ottengo

$$\bar V_{RS} = \bar E_S - \bar E_R$$



Sistema dei potenziali sfasato di 30° gradi rispetto alle $\bar E$.



- Nel caso di carico equilibrato a triangolo, passo alla stella con la formula:

$$\boxed{\bar Z_\lambda = \frac{\bar Z_\Delta}{3}}$$

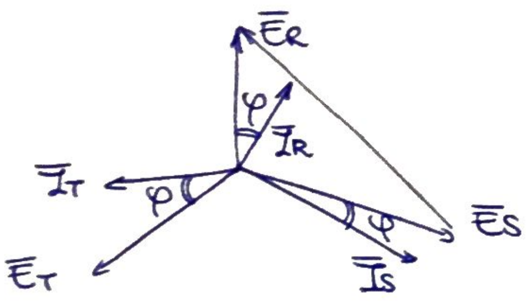
- Usando Millmann:

$$\boxed{V_{NO}} = \frac{\frac{\bar E_R}{\bar Z} + \frac{\bar E_S}{\bar Z} + \frac{\bar E_T}{\bar Z}}{\frac{3}{\bar Z}} = \frac{1}{\bar Z}\left(\frac{\overbrace{\bar E_R + \bar E_S + \bar E_T}^{\text{nulla}}}{3}\right) = \boxed{0}$$

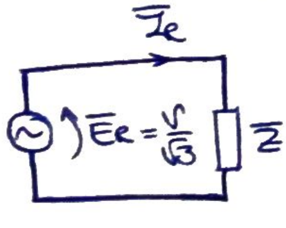
in ogni istante

$\bar I_S = \frac{\bar E_S}{\bar Z}$, ma sono fasori, come faccio a rappresentarli?

↳ Sono sfasati dello angolo φ dell'impedenza, in ritardo rispetto alle E.

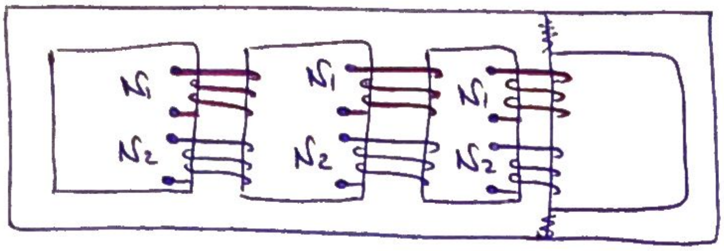


- Posso operare a livello di una singola maglia per ricavare la corrente:



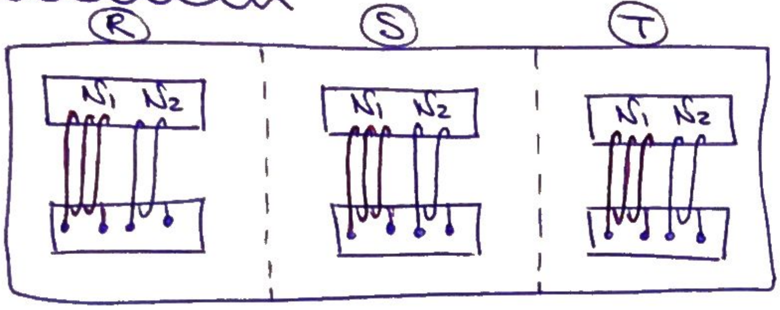
→ Non è rete MONOFASE, è una FASE di un sistema TRIFASE equilibrato.

NUCLEO A 5 COLONNE = più basso di quello a 3 colonne (in senso meno alto)



- le colonne laterali servono per chiudere i flussi.

NUCLEO CORAZZATO



Ancora più basso
⇓
Trasportabile più facilmente su strada

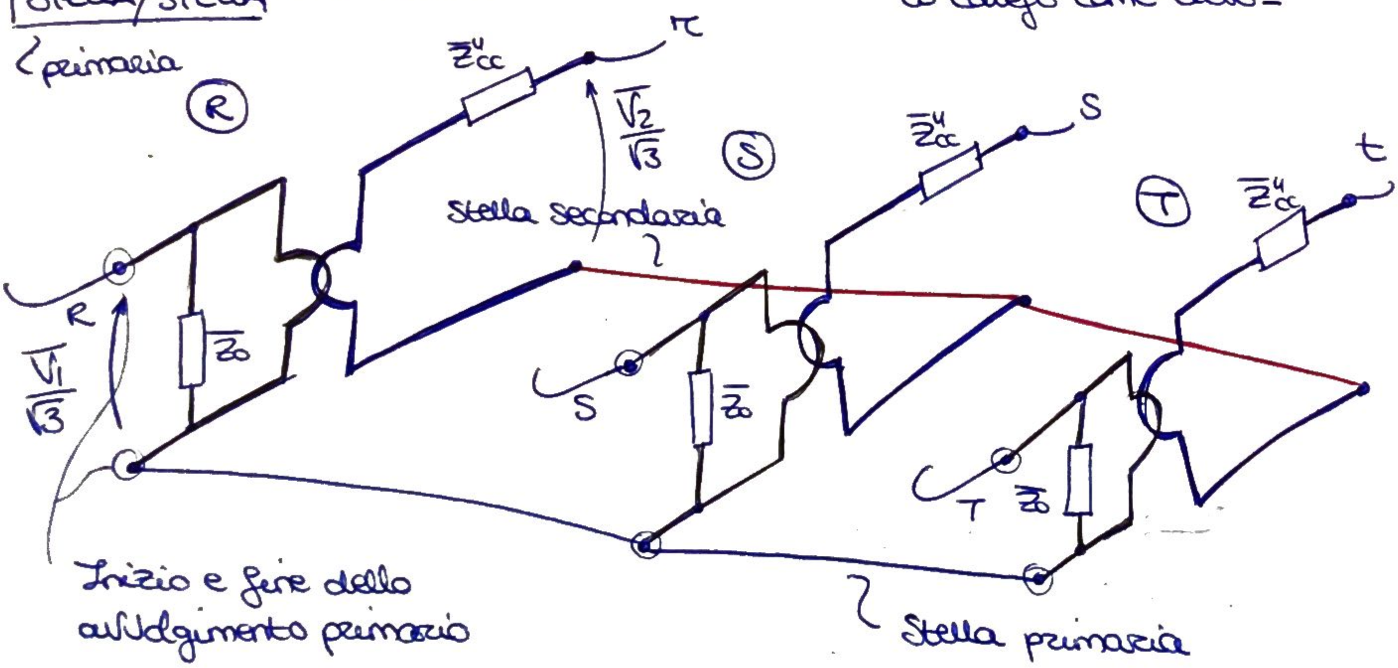
- Per fare i calcoli, devo trovare un sistema equivalente:

FASI "SEPARATE"
1) PERFETTA SIMMETRIA MAGNETICA ($\overline{\Phi}_0 \to 0$)
2) PERFETTA SIMMETRIA "ELETTRICA" INTERNA (bobine identiche in tutto)
3) SISTEMA ALIMENTAZIONE SIMMETRICO
4) SISTEMA CARICHI EQUILIBRATO

↳ ognuno porta un terzo della potenza trifase ⟹ Equivale a 3 TRASFORMATORI MONOFASE

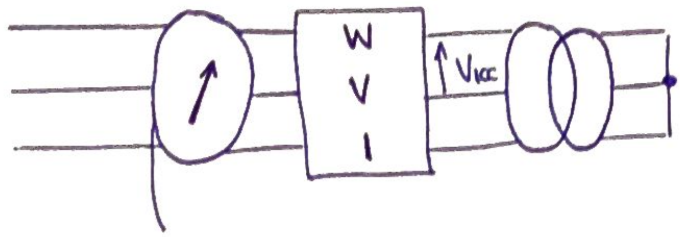
$\boxed{\text{STELLA/STELLA}}$ ~ secondaria
primaria

Uso questo circuito e lo collego come devo.



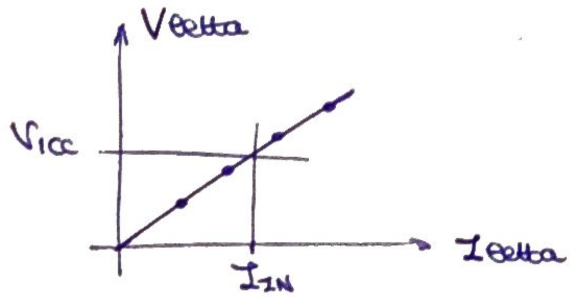
• PROVA DI CORTOCIRCUITO (c'è sempre all'esame!) → NON È IL GUASTO DI CORTOCIRCUITO

- Serve per trovare $\bar{Z}''_{cc} = R''_{cc} + j X''_{cc}$, va fatta ad una tensione di cortocircuito. V_{1cc} è la tensione da applicare a due morsetti quando gli altri morsetti sono collegati in cortocircuito per far circolare la corrente nominale.



~ nodo per creare il cortocircuito

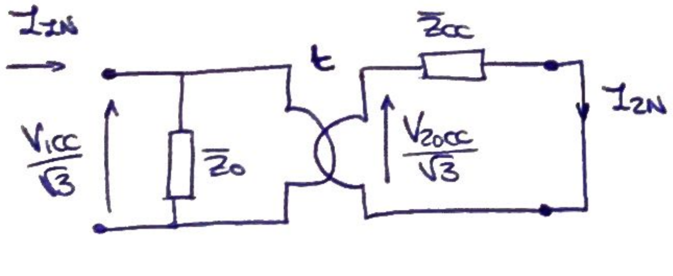
• Sto dando tensioni molto basse (qualche % di quella nominale).



• Se ci sono dei punti molto scostanti so che c'è stato un problema.

• Imponendo I_N leggo la corrispondente V_{1cc}.

• Anche in questo caso trovo la potenza di cortocircuito imponendo I_{1N}.



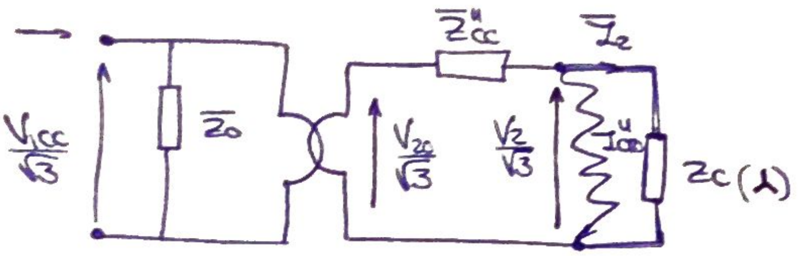
Do basse tensioni al fine di avere delle correnti nominali.

Reattanza dispersa = flussi dispersi in aria.

$\{V_{cc}, I_N, P_{cc}\}$

└ Devo conoscerla io, se no non posso ricavare nulla

GUASTO DI CORTOCIRCUITO



= cortocircuito

Senza impedenze coinvolte

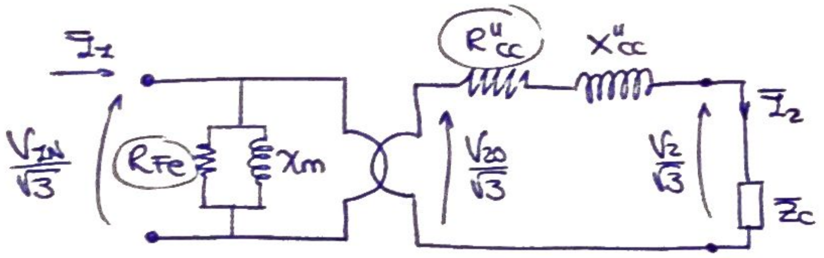
CORTOCIRCUITO FRANCO AI MORSETTI DI USCITA DEL TRASFORMATORE

- In caso di cortocircuito, la tensione agli estremi del circuito secondario è nulla, nel carico non circola corrente, circola una corrente di guasto I''_{cto} (altissima!!).

corrente di cortocircuito

$$\boxed{I''_{cto} = \frac{V_{20}}{\sqrt{3}\, Z''_{cc}}}$$

Alta perché ho tolto una impedenza.



$$\boxed{P_{Cu} = 3\, R''_{cc} \cdot I_2^2} \neq \boxed{P_{cc} = 3 R''_{cc} I_{2N}^2}$$

Perdite nel rame non sono quelle di cortocircuito, lo sono solo quando metto un carico che fa circolare la corrente nominale.

$$\boxed{P_{Fe} = \frac{V_1^2}{R_{Fe}}} \rightarrow \text{senza il 3, monofase = trifase} \quad \left(\left(\frac{V_1}{\cancel{\sqrt{3}}}\right)^2 \cdot \cancel{3} \cdot \frac{1}{R_{Fe}}\right)$$

- P_{Fe} sono uguali alle $P_0 = \frac{V_{1N}^2}{R_{Fe}}$? Solo quando la tensione d'alimentazione è la stessa di quella nominale.

$$\boxed{\Delta V_{IND} = V_{20} - V_2 = \sqrt{3}\, I_2 \left(R''_{cc} \cos\varphi_2 + \cancel{j} X''_{cc} \operatorname{sen}\varphi_2 \right)}$$

Noto il carico, basta avere la corrente e i parametri.

→ Dato ΔV_{IND}, posso ricavarmi V_{20} o V_2.

VIETATO

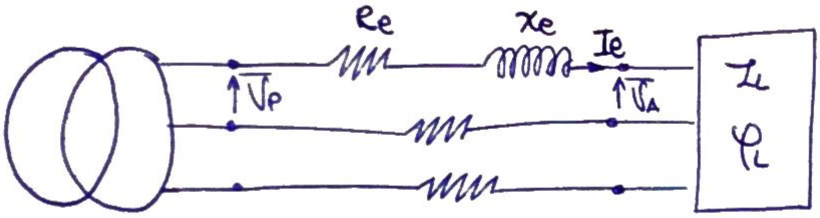
$$V_{20} = V_2 + \sqrt{3}\, Z''_{cc} I_2$$

Anche se non viene troppo diverso!

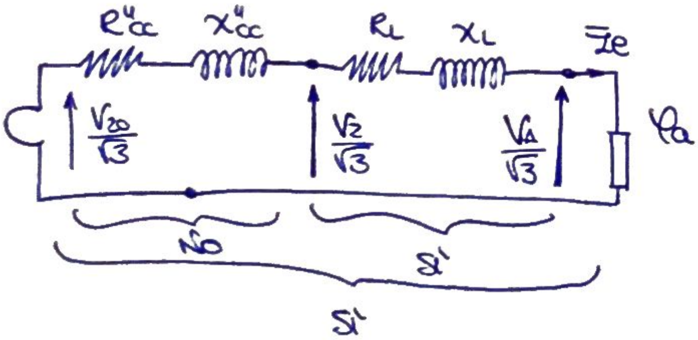
$\sqrt{3} Z''_{cc} I_2$ é il modulo della $\Delta V_{REPETTO}$, non posso sommarlo a V_2 perché NON SONO IN FASE!!

• Negli esercizi in cui ci viene data I_2 e φ_2, e' unico modo per risolverli é passare dalla ΔV_{IND}. Possiamo applicarla anche alle linee, cioé sistemi con una R e una X.

P = partenza
A = arrivo



$$\Delta V^{e}_{IND} = V_P - V_a = \sqrt{3}\, I_L \left(R_L \cos\varphi_a + X_L \operatorname{sen}\varphi_a \right)$$



• Dove non posso farlo? Dove non conosco φ (se me lo ricavo, poi posso usarlo).

η_{conv} sarà massima quando il denominatore è minimo:

$$\frac{\partial(\text{DENOM})}{\partial\alpha}=0 \longrightarrow P_{cc}-\frac{P_0}{\alpha^2}=0 \qquad \alpha^2 P_{cc}=P_0$$

$\Longrightarrow$ $\boxed{P_{cu}=P_0}$ Trovare il rendimento massimo vuol dire capire quando le perdite nel rame sono uguali alle perdite nel ferro!!

(Domanda esame)

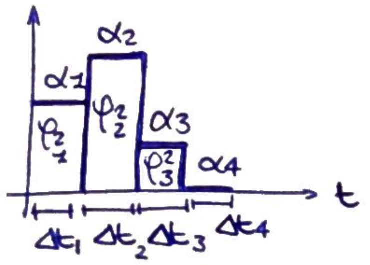
$\left[3R''_{cc}\, I^2_{2\,\eta_{MAX}} = P_0\right]$ Dosando le perdite, riusciamo a dosare il η_{MAX}, solitamente in modo che $\alpha_{\eta_{MAX}}$ sia intorno a 0,7÷0,8 -

$\boxed{\alpha_{\eta_{MAX}}=\sqrt{P_0/P_{cc}} \approx 0{,}7\div 0{,}8}$ → Noi lo sfrutteremo ad un margine dalla I_{2N}, il costruttore lo sa e si adatta -

↳ Lavoriamo con margine in condizione di η_{MAX} -

• Ma se il carico è variabile?

↳ alternatore distribuzione domestica



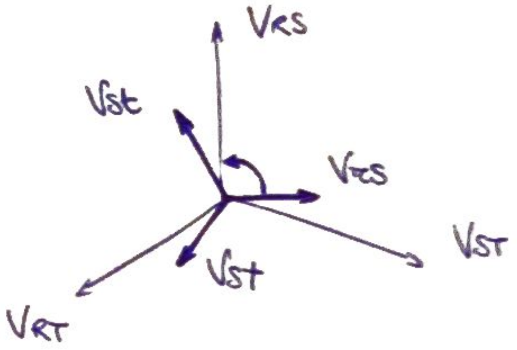
Per ogni intervallo di tempo avrò un α_i e un φ_i diverso, in base al carico collegato -

$$W_{\substack{\text{TOTALE}\\ \text{erogata}}}=\sum_i\left(\sqrt{3}\,\alpha_i S_N \cos\varphi_{2i}\right)\cdot\Delta t_i$$

Contatore ∼∼ $\boxed{W_{\substack{\text{TOTALE}\\ \text{erogata}}}=\sum_i\left(\alpha_i\sqrt{3}\,S_N\cos\varphi_{2i}\right)\Delta t_i}$

$$\boxed{W_{PERSA}=\sum_i\left(\alpha^2 P_{cc}+P_0\right)\Delta t_i}$$

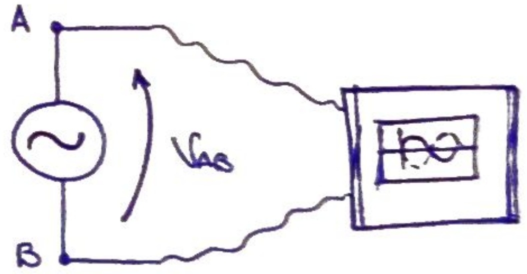
$$\boxed{W_{\substack{\text{TOTALE}\\ \text{assorbita}}}=W_{\substack{\text{TOTALE}\\ \text{erogata}}}+W_{PERSA}}$$



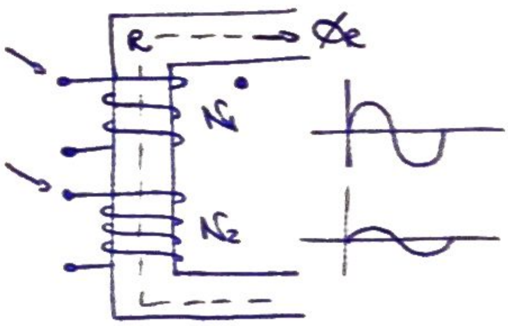
$\alpha = 90°$ ⟹ GRUPPO $= \frac{90}{30} = \boxed{3}$

- ESISTONO 12 GRUPPI (dallo zero all'undici).

Oscilloscopio

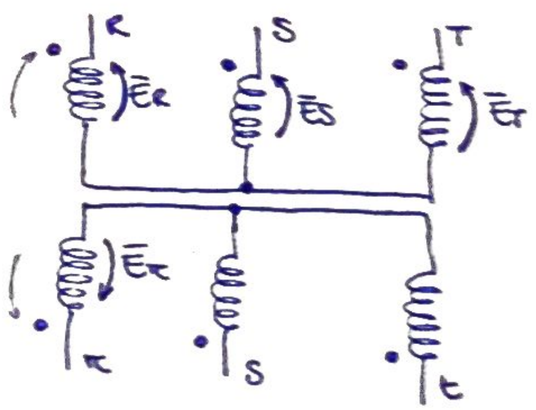


Se si invertono i fili, avremo una rappresentazione sullo oscilloscopio pari all'inverso di quella convenzionale.

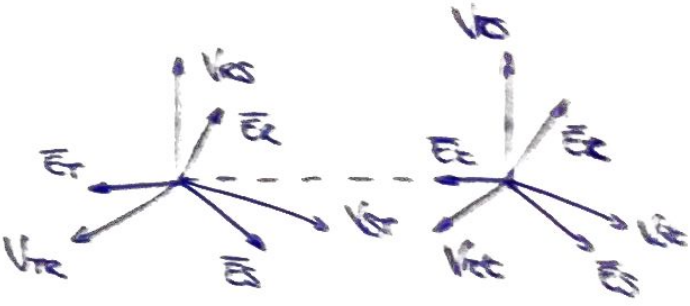


Flusso unico ⟶ Derivata unica, se prendo gli stessi capi sono in fase, variano ampiezza con N.

GRUPPO ZERO



Yy0 (Stella - Stella zero)



$\alpha = 0°$

GRUPPO $= \frac{0}{30} = \boxed{0}$

$\bar{E}_R$ e $\bar{E}_r$ puntano entrambe il pallino, come le altre fasi.

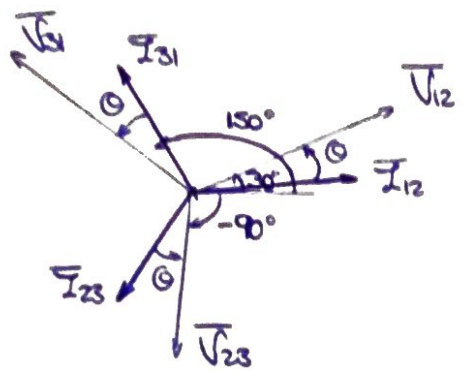
$Z_\Delta = \sqrt{(19,8)^2 + (9,6)^2} = 22\ \Omega$

$\Theta = \arctan\left(\frac{9,6}{19,8}\right) = 25,8°$

$\overline{I}_{12} = \dfrac{V e^{j30°}}{Z e^{j25,8°}} = \dfrac{400\, e^{j30°}}{22\, e^{j25,8°}} = \boxed{18,2\ e^{j4,2°}\ A}$

$\overline{I}_{23} = \dfrac{400\, e^{-j90°}}{22\, e^{j25,8°}} = \boxed{18,2\ e^{-j115,8°}\ A}$

$\overline{I}_{31} = 18,2\, e^{j(150°-25,8°)} = \boxed{18,2\ e^{j124,2°}}$

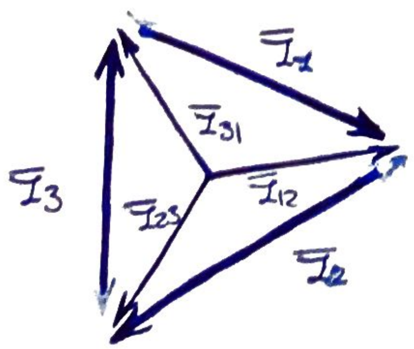


- Usando le leggi di Kirchhoff per le correnti:

① $\overline{I}_1 + \overline{I}_{31} - \overline{I}_{12} = 0 \longrightarrow \boxed{\overline{I}_1 = \overline{I}_{12} - \overline{I}_{31}}$

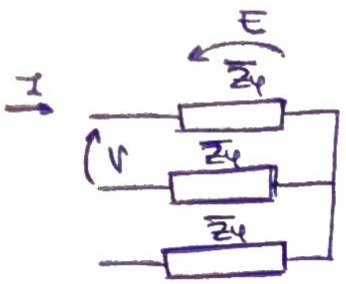
② $\boxed{\overline{I}_2 = \overline{I}_{23} - \overline{I}_{12}}$

③ $\boxed{\overline{I}_3 = \overline{I}_{31} - \overline{I}_{23}}$



$\boxed{I_{linea}} = \sqrt{3}\, I_{fase} = \boxed{31,5\ A}$

$\cos\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2} \longrightarrow P = \sqrt{3}\,VI\cos\varphi \qquad I = \frac{P}{\sqrt{3}\cos\varphi} = \boxed{20{,}6\ A}$



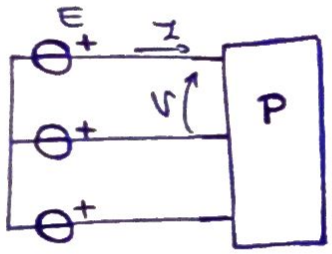
$E = \frac{V}{\sqrt{3}} = 230\,V$

$Z_Y = \frac{E}{I} = \frac{230}{20{,}6} = \boxed{11{,}2\ \Omega}$

→ L'angolo dell'impedenza φ é uguale a quello di sfasamento:

$$\bar{Z}_Y = z(\cos\varphi + j\,\mathrm{sen}\,\varphi) = 11{,}2\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + j\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \boxed{7{,}85 + j\,7{,}85\ \Omega}$$

3



$V = 400\,V$
$P = 50\ kW$
$I = 100\,A$

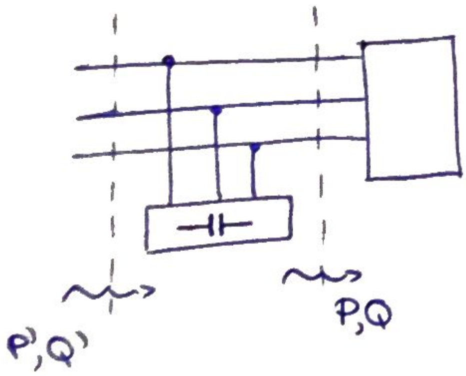
rifasamento
$\cos\varphi' = 0{,}9$

• E' necessario rifasare?

ricavo φ

$P = \sqrt{3}VI\cos\varphi \longrightarrow \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}VI} = \frac{50'000}{\sqrt{3}\,400\cdot 100} = \boxed{0{,}72} < 0{,}9$

≀ rifasamento utile



Essendo generatori, la potenza attiva non varia:

$P' = P$

mentre varia quella reattiva:

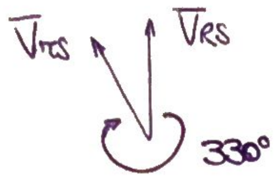
$Q' = Q + Q_c$

$\tan\varphi' = \frac{Q'}{P'} = 0{,}484 \Longrightarrow Q' = P'\cdot(0{,}484) \Longrightarrow Q_c = 0{,}484\,P' - Q$

$\Longrightarrow \boxed{Q_c} = 0{,}484\,P - \tan\varphi\,P = P(0{,}484 - \tan\varphi) = 50'000(0{,}484 - 0{,}96) =$

≀ 0,96

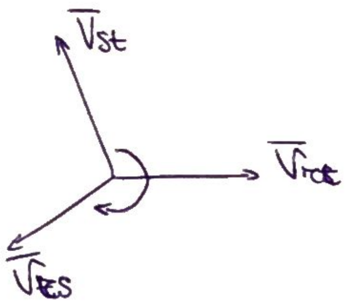
$= \boxed{-23800\ VAr}$ → deve venire negativa, é reattiva!



$$GR = \frac{\alpha}{30} = \frac{330}{30} = \boxed{11}$$

GR = 8

• Se cambio il nome ai morsetti, di che gruppo diventa il trasformatore?



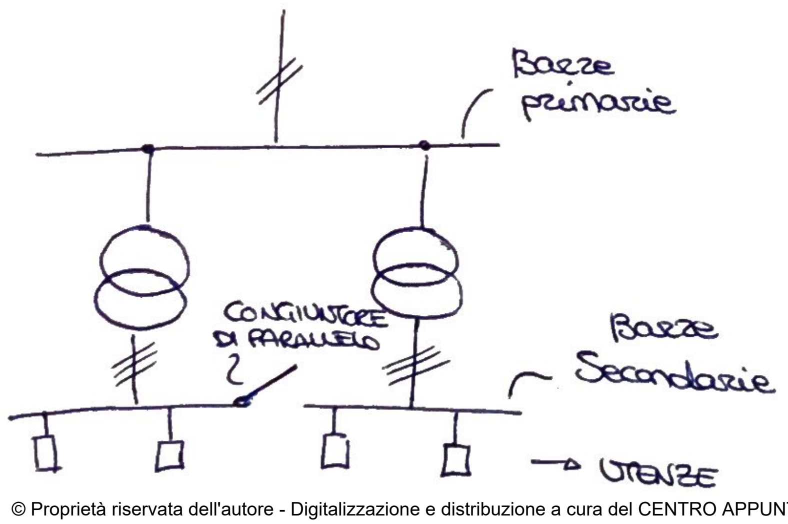
$$GR = 8 + 4 = \boxed{0}$$

riparte da capo ciclo

• Devo sommare 4 al gruppo, perche' una permutazione comporta uno sfasamento di 120° (4 gruppi), crea una rotazione. Se faccio una permutazione multipla continuo a sommare 4, creo una permutazione ciclica, é comoda perché permette di non cambiare trasformatore ma variare l'ordine dei morsetti per avere i valori desiderati.

PRINCIPALI		DERIVATI
0	→	4,8
5	→	1,9
6	→	2,10
11	→	3,7

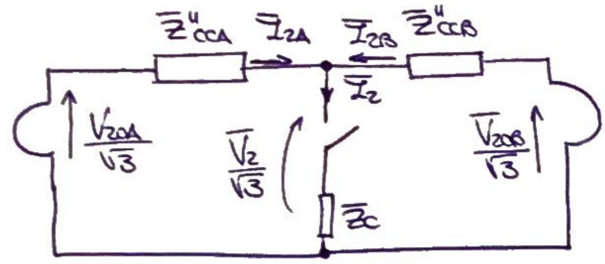
PARALLELO DI TRASFORMATORI TRIFASE



NB: Se il trasformatore è MONOFASE e l'ipotesi sul gruppo non ha significato - Inoltre, scompaiono i $\sqrt{3}$ nello schema -

- Se tento di risparmiare (vario leggermente εe t) devo essere conscio di avere delle correnti di circolazione, devo fare in modo che siano piccole-

Funzionamento a carico



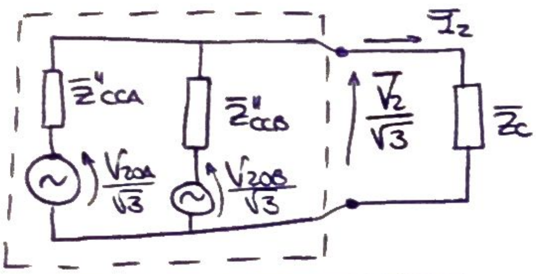
$$\frac{S_{NA}}{S_{NB}} = \frac{I_{2A}}{I_{2B}} = \frac{\cancel{\sqrt3}\,\cancel{V_{20A}}\cdot I_{2NA}}{\cancel{\sqrt3}\,\cancel{V_{20B}}\cdot I_{2NB}}$$

se vale il //

$$\Rightarrow \boxed{\frac{S_{NA}}{S_{NB}} = \frac{I_{2NA}}{I_{2NB}}}$$

NON dipende dal carico -

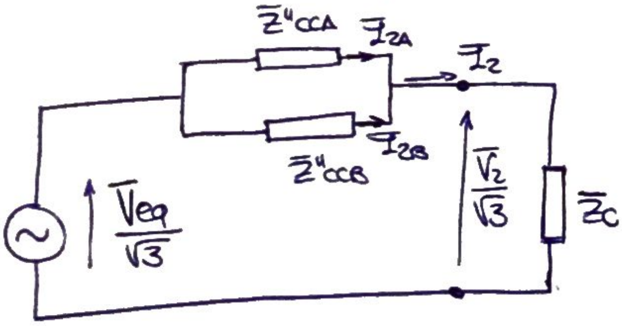
Facendo Thévenin ai capi del carico:



$$\boxed{\bar Z_{eq//} = \frac{\bar Z''_{ccA}\cdot \bar Z''_{ccB}}{\bar Z''_{ccA} + \bar Z''_{ccB}}}$$

$$\boxed{\frac{\bar V_{eq}}{\sqrt3} = -\bar Z''_{cc\,eq}\cdot \bar I_{CIRC} + \frac{V_{20A}}{\sqrt3} = \frac{\bar V_{20B}}{\sqrt3} + \bar Z''_{ccB}\cdot \bar I_{CIRC}}$$

- Nel caso di parallelo perfetto $\bar I_{CIRC} = 0$, ottengo perciò $\frac{\bar V_{02A}}{\sqrt3} = \frac{\bar V_{20B}}{\sqrt3}$ -



$$Z''_{ccA}\cdot I_{2A} = \bar Z''_{ccB}\cdot I_{2B}$$

$$\frac{Z''_{ccB}}{Z''_{ccA}} = \frac{I_{2A}}{I_{2B}}$$

→ Io voglio che $\frac{I_{2NA}}{I_{2NB}} = \frac{I_{2A}}{I_{2B}}$, come faccio?

$$\boxed{\frac{I_{2A}}{I_{2B}}}\cdot\frac{\sqrt3}{\sqrt3} = \frac{\overbrace{\sqrt3\, Z''_{ccB}\cdot I_{2NB}}^{V''_{ccB}}}{\underbrace{\sqrt3\, Z''_{ccA}\cdot I_{2NA}}_{V''_{ccA}}}\cdot\frac{I_{2NA}}{I_{2NB}} = \boxed{\frac{V''_{ccB}}{V''_{ccA}}\cdot\frac{I_{2NA}}{I_{2NB}}}$$

$$\boxed{\eta_L} = \frac{\text{P che va nel carico}}{\text{P che arriva alla linea}} = \underbrace{\frac{P_c}{P_c + 3R_L I_2^2}}_{P_2} = \frac{52502}{55409} = \boxed{0,9475}$$

↳ rapporto tra potenze

Potenza erogata alla linea

$$\boxed{\eta_T} = \frac{P_c + 3R_L I_2^2}{P_c + 3R_L I_2^2 + 3R''_{cc} I_2^2 + P_{Fe}} =$$

$P_{Fe} \to 0$ (il testo dice trascurabile)

$(P_0) \sim V_1 \equiv V_{1N}$

$$= \frac{P_c + 3R_L I_2^2}{P_c + 3R_L I_2^2 + 3R''_{cc} I_2^2} = \frac{55409}{---} = \boxed{0,991}$$

$$P_c = \sqrt{3}\, V_c I_2 \cos\varphi_c = 3 R_c I_2^2$$

$$P_2 = \sqrt{3}\, V_2 I_2 \cos\varphi_2 = P_c + 3R_L I_2^2$$

ignoto

Boucherot "a salire" (sommo le perdite)

$$\boxed{\eta_{tot}} = \frac{P_c}{P_c + 3R_L I_2^2 + 3R''_{cc} I_2^2 + P_{Fe}} = \boxed{0,939}$$

$P_{Fe} \to 0$

↳ PRODOTTO DI η_{TR} e η_L, VALE SOLO PER I SISTEMI SERIE!!

2

$S_N = 100$ KVA

$t = \frac{10'000}{400}$ V

$V_{cc}\% = 2,5\%$

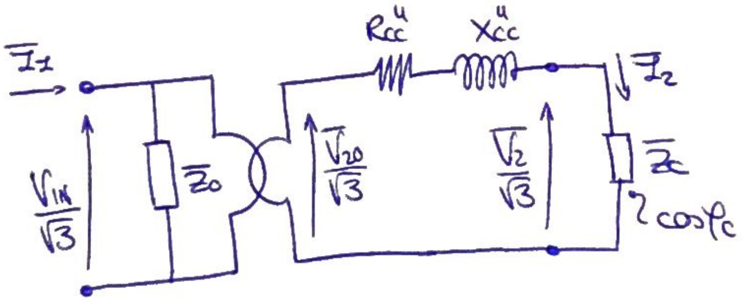
$P_{cc}\% = 1,3\%$

$P_{Fe}\% = 1,2\% = P_0\%$

$I_2 = \frac{3}{4} I_{2N}$ $(0,75\, I_{2N})$

$\cos\varphi_c = 0,8 = \cos\varphi_2$

V_2? ΔV_{ind}? η_T? I''_{cc}?



$$V_{cc}\% = \frac{V_{2cc}}{V_{2N}} \cdot 100 \rightarrow \boxed{V_{2cc}} = \frac{V_{cc}\% \cdot V_{2N}}{100} = 0,025 \cdot 400 = \boxed{10\ V}$$

$$P_{cc}\% = \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 \rightarrow \boxed{P_{cc}} = \frac{P_{cc}\% \cdot S_N}{100} = 0,013 \cdot 100'000 = \boxed{1300\ W}$$

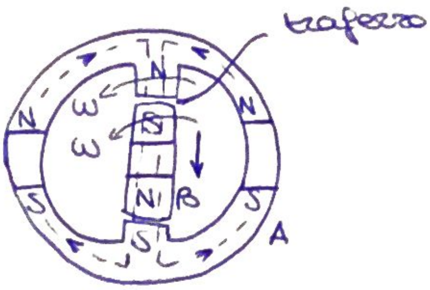
$$S_N = \sqrt{3}\, V_{20} I_{2N} \rightarrow \boxed{I_{2N}} = \frac{100'000}{\sqrt{3} \cdot 400} = \boxed{144,3\ A}$$

Lez. 18

30/5/'23

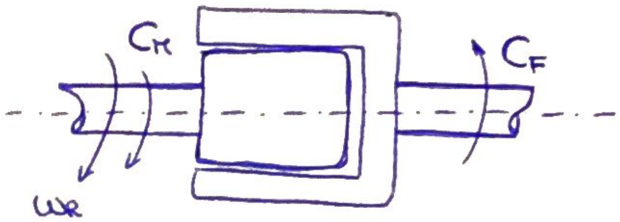
CAMPO MAGNETICO ROTANTE

- È il fenomeno su cui si basano le macchine a c.c. e c.a. -



Le due parti usano magneti permanenti, è condizione di equilibrio stabile -

Se impongo una velocità all'esterno, quello interno ruota sincrona, a qualsiasi velocità, senza considerare però gli attriti -



Le due parti non si toccano, ho un giunto omocinetico che trasmette coppia - ↳ elastico

- Se impongo una coppia frenante a B, essa ritarderà di un angolo costante γ rispetto ad A - La massima coppia trasmissibile corrisponde a un $\gamma = 90°$ -

$\gamma > 90°$ la coppia rimane positiva anche se diminuisce

$\gamma > 180°$ la coppia diventa negativa, si oppone al moto imposto -

- Se coppia frenante > coppia max ottenibile dall'interazione magnetica, si crea un moto relativo, γ varia nel tempo - In questa situazione il giunto perde la sua funzionalità, i due alberi sono disaccoppiati -

Il problema è creare un campo magnetico rotante con una struttura fissa, ossia uno statore -

$\Rightarrow$ $A = H_t \cdot \ell_t = \frac{N_1 \cdot I}{2}$

FORZA MAGNETO-MOTRICE AL TRAFERRO

- La f.m.m. è in modulo costante (il traferro passato è sempre lo stesso), ma a sinistra va dal rotore allo statore, quindi do' un segno negativo per convenzione.

- Su tutto il traferro:

$$\boxed{A(\alpha) = \frac{N_1 \cdot I}{2} \, sqw(\alpha)} \quad [A \text{ spire}]$$

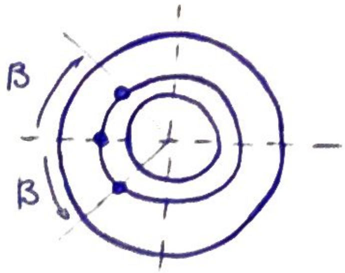
dove sqw è un'onda quadra, con rispettiva fondamentale $A_1 = \frac{4}{\pi} \frac{N_1}{2} \cdot I$

$[A \text{ fondamentale} = A_1 \operatorname{sen}\alpha]$

quella che genera coppia

- Per ridurre il moto armonico (l'ampiezza di sqw, è fastidiosa), non concentro tutte le spire in un'unica bobina, ma le metto in più cave contigue, attraversate tutte dalla STESSA CORRENTE (sono in serie).

Mettendo 33% spire in 3 bobine, messe una centrata e due sfasate in modo simmetrico di un angolo β.



Le sqw rispettive partiranno da un'ampiezza prefissata, la loro composizione da' una gradinata simile a una sinusoide, da' meno disturbo delle armoniche (molto lontane dalla fondamentale, che è sinusoidale).

VICINANZA / LONTANANZA alla FONDAMENTALE = POCHI / TANTI DISTURBI

DISTRIBUZIONE AL TRAFERRO:

- Assenza di saturazione magnetica
- Traferro costante

$\Downarrow$

$$\boxed{B = \mu_0 H_t = \mu_0 \cdot \frac{A(\alpha)}{\ell_t}}$$

$$B_{t\,fondam} = \mu_0 \cdot H_{t\,fondam} = \mu_0 \cdot \frac{\hat{A}_{fondam}}{\ell_t}$$

→ La presenza delle cave produce una diminuzione dei valori di picco delle distribuzioni spaziali.

Variazione dovuta alla corrente:

$$i(t) = \hat{I} \cdot \cos(\omega t) = \sqrt{2} I \cos(2\pi f t)$$

$\Downarrow$

$$\boxed{H_{t\,fondam}(\alpha, t) = \frac{N_1' I}{\ell_t} \operatorname{sen}(p\alpha)\cos(\omega t)}$$

FUNZIONE DELLO SPAZIO MA ANCHE DEL TEMPO.

- Usando le formule di trigonometria:

$$H_{t\,fondam} = \frac{N_1' I}{2\ell_t} \operatorname{sen}(p\alpha + \omega t) + \frac{N_1' I}{2\ell_t} \operatorname{sen}(p\alpha - \omega t)$$

2 costante

↓ ONDA CONTROROTANTE

↓ ONDA ROTANTE

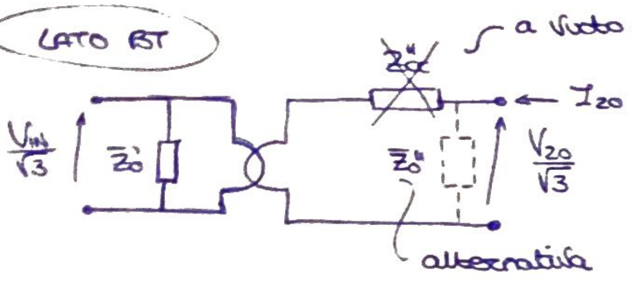
→ 1 avvolgimento non dà frutti, perché crea un campo pulsante. Nella pratica, uso spesso il trifase, in modo da riuscire a sfruttare la simmetria ogni 120° meccanici.

→ Nel cortocircuito viene eseguita la corrente nominale: $I_{cc} = I_{1N}$

$$S_N = \sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 30 = \boxed{51960\ VA}$$

$$I_{1N} = \frac{I_{2N}}{t} \Rightarrow I_{2N} = t \cdot I_{1N} = 4 \cdot 30 = \boxed{120\ A}$$

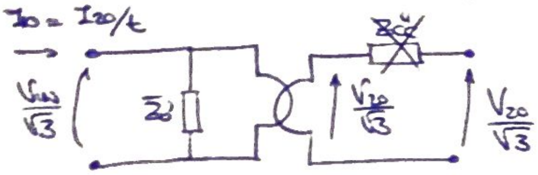
LATO BT

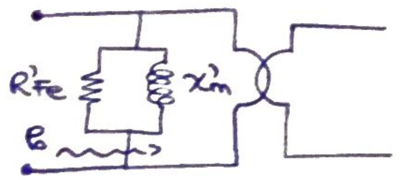


Dobbiamo calcolare tutte le grandezze del circuito equivalente.

Avessimo fatto la prova a primario:

$I_0 = I_{20}/t$





$$\boxed{R'_{Fe}} = \frac{V_{1N}^2}{P_0} = \frac{(1000)^2}{375} = \boxed{2666,6\ \Omega} \approx 2667\ \Omega$$ → alto, deve frenare la corrente

$Q_0 = P_0 \tan\varphi_0$ → $\tan\varphi_0 = \frac{Q_0}{P_0}$

$$\boxed{\cos\varphi_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3}\, V_{1N}\, I_{10}} = \frac{375}{1000 \cdot \sqrt{3} \cdot (7{,}5/4)} = \boxed{0{,}115}$$

$$\boxed{Q_0} = P_0 \tan\varphi_0 = 375 \tan(\arccos(0{,}12)) = \boxed{3\quad VAr}$$ → alto perché $\cos\varphi$ basso

$$\boxed{X'_m} = \frac{V_{1N}^2}{Q_0} = \frac{(1000)^2}{\quad} = \boxed{3\ ,\ \Omega}$$

- Per portarlo al secondario (BT) divido per t^2.