

## MACCHINE ELETTRICHE:

Macchine sono dispositivi in grado di alterare lo svolgimento di un lavoro. Oggi sono convertitori di energia.

Macchine elettrica: converte energia elettrica in altre forme di energia. Tipicamente questa conversione è reversibile.

Si può avere trasformazione di energia elettrica in meccanica oppure di energia elettrica in energia elettrica.

Nelle macchine elettriche che convertono in elettrico in elettrico rientrano anche i convertitori statici <sup>di corrente</sup> quali raddrizzatori; inverter.

Noi studieremo solo macchine di tipo elettro-magnetico.

Divideremo le macchine e secondo se coinvolgono corrente continua o alternata.

Per quanto riguarda le macchine in c.c. studieremo quasi solo i motori.

Le macchine in c.e. saranno divise in trasformatori e in macchine rotanti. Le macchine rotanti si basano sul principio del campo magnetico rotante (queste si suddividono in sincrone e asincrone).

Se il rotore ruota in modo sincrone con il campo magnetico rot. sono dette sincrone.

Nelle macchine elettriche il rendimento, in generale, è definito

$$\text{come: } \eta = \frac{P_u}{P_i} < 1, \quad \eta = \frac{P_u}{P_u + P_j}$$

Nel trasformatore le perdite sono dovute ai materiali attivi del trasformatore (Cu e Fe).

Le macchine elettriche sono tra quelle a rendimento più elevato.

Il trasformatore può raggiungere un rendimento del 99,9%. I motori elettrici possono raggiungere il 90%.

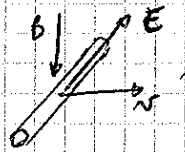
Nelle macchine elettriche bisogna provare limitare  $P_j$  per motivi di costruzione, infatti  $P_j$  sono perdite joule (cioè in calore) e quindi le macchine si riscaldano. Se si surriscaldano, allora rischiano di "bruciare". (si brucia l'isolamento del rame).

Macchine rotanti:

Si basano su  $B$   $I$   $H$  ed  $E$ .

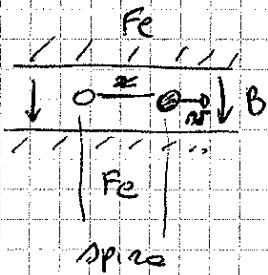
$F = B i L$  Forza di Lorentz

$E = B v L$



Queste 2 leggi non verranno usate perché valgono solo per mezzi isotropi.

Esempio: di utilizzo fuorviante buono



il conduttore dello spira ha lunghezza  $L$

$E = BL\omega$

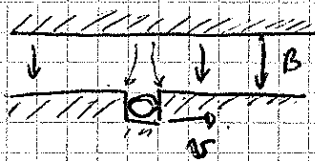
$E = \frac{d\phi}{dt}$

$\phi = BxL$

$E = BL \frac{dx}{dt}$

queste espressione è valida in generale

Esempio: di utilizzo fuorviante



$E = ?$

il conduttore è lungo  $L$

Se il ferro avesse  $\mu$  infinito il conduttore non subirebbe  $B$ .

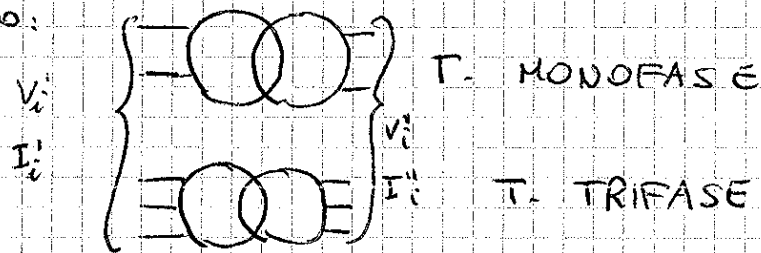
In realtà  $E$  è lo stesso che nel caso precedente.

Levi non tiene conto del mezzo anisotropo.

# TRASFORMATORE

Converte l'energia elettrica in energia elettrica solo in corrente alternata.

Schema normativo:



$V_i''$  e  $I_i''$  sono diversi da  $V_i'$  e  $I_i'$  ma sono tali per cui l'energia e la potenza si conserva a meno di perdite.

Trasformatori si dividono in elevatori o elevatori di tensione.

Poiché il trafo è una macchina simmetrica posso inventare primario e secondario.

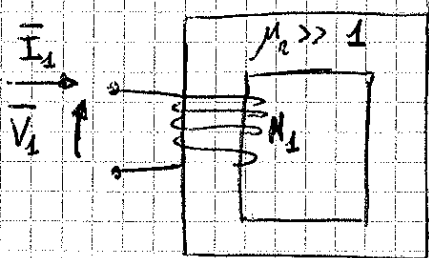
Il trasformatore è utile per il trasporto dell'energia, si rischia di spendere troppa energia per portare in loco la energia elettrica.

A 230 V si porta corrente per qualche centinaio di metri che non è conveniente.

Per trasportare la corrente si moltiplica la tensione a qualche centinaio di kilovolt, così l'energia si può trasportare a lunghe distanze. Il fatto di poter usare il trafo ha reso la c.a. più utilizzata rispetto a quella continua.

Esistono anche i trasformatore a rapporto di trasformazione unitario. Rapporto di trasformazione  $\frac{V_i'}{V_i''}$ . Questo tipo di trasformatore è utile perché isola  $V_i''$  in modo galvanico il circuito primario rispetto al secondario.

Si possono usare anche usare i trasformatore per misurare e effettuare misure.



Tipicamente  $\mu_2 \approx 1000 - 5000$

$$\begin{aligned} V_1 &= j\omega L I_1 = \\ &= j\omega N_1 \bar{\Phi} \\ L &= \frac{N_1 \bar{\Phi}}{I_1} \\ \bar{\Phi} &= \frac{N_1 I_1}{R} \end{aligned}$$



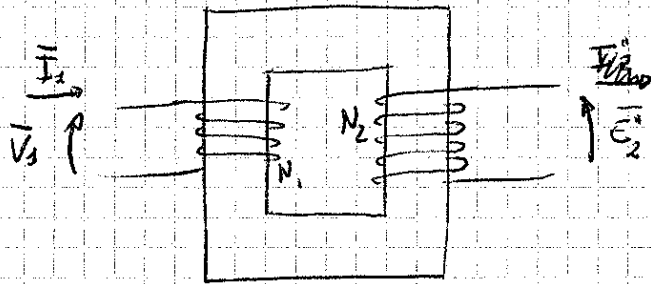
Induttanza è il rapporto tra il flusso concatenato ad un certo spunto e la corrente

Ricordiamo che  $R = \frac{1}{\mu} \frac{l_{je}}{S_{je}}$

La tensione  $\bar{V}_1$  è quindi:  $\bar{V}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}$

Se il ferro saturasse la relazione non è lineare.

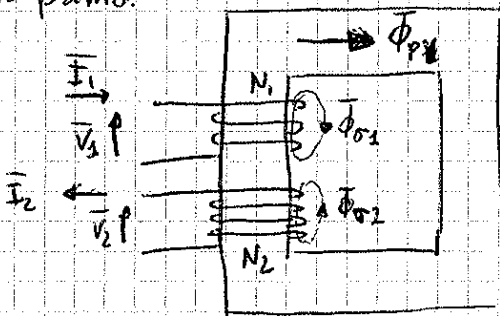
Avvolgiamo un secondo avvolgimento



$\bar{E}_2' = j\omega N_2 \bar{\Phi}$   
 $\bar{E}'' = \omega N_2 \bar{\Phi}$   
 $\bar{V}_1 = \omega N_1 \bar{\Phi}$

$t = \frac{V_1}{E''} = \frac{N_1}{N_2}$

Se collego il circuito secondario e pona corrente tale quello che ho scritto prima:



Ip: Avvolgimenti equivalenti

Scelgo flusso positivo quello generato da  $\bar{I}_1$

$\bar{\Phi}_{p1}$  è il flusso principale

C'è un canale d'aria tra conduttore e ferro e si possono creare dei flussi che si concatenano solo con l'avvolgimento primario - Questo viene detto flusso disperso  $\bar{\Phi}_{s1}$

Dobbiamo studiare 3 circuiti magnetici

$\bar{\Phi}_p = \frac{N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2}{R_p}$

$\bar{\Phi}_{s1} = \frac{N_1 \bar{I}_1}{R_{s1}}$

$\bar{\Phi}_{s2} = \frac{N_2 \bar{I}_2}{R_{s2}}$

equazioni magnetiche della struttura.

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + j\omega N_1 \bar{\Phi}_1 \\ \bar{V}_2 &= -R_2 \bar{I}_2 + j\omega N_2 \bar{\Phi}_2 \end{aligned} \right\} \text{equazioni elettriche.}$$

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_p + \bar{\Phi}_{\sigma 1}$$

$$\bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_p - \bar{\Phi}_{\sigma 2}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{V}_1 &= R_1 \bar{I}_1 + j\omega N_1 (\bar{\Phi}_p + \bar{\Phi}_{\sigma 1}) = R_1 \bar{I}_1 + j\omega N_1 \bar{\Phi}_{\sigma 1} + \underbrace{j\omega N_1 \bar{\Phi}_p}_{\bar{E}_{1p}} \\ \bar{V}_2 &= -R_2 \bar{I}_2 + j\omega N_2 (\bar{\Phi}_p - \bar{\Phi}_{\sigma 2}) = -R_2 \bar{I}_2 - j\omega N_2 \bar{\Phi}_{\sigma 2} + \underbrace{j\omega N_2 \bar{\Phi}_p}_{\bar{E}_{2p}} \end{aligned} \right.$$

$$\bar{\Phi}_{\sigma 1} = \frac{N_1 I_1}{R_{\sigma 1}} \Rightarrow V_1 = R_1 I_1 + j\omega \underbrace{\frac{N_1^2}{R_{\sigma 1}}}_{L_{\sigma 1}} I_1 + \bar{E}_{1p}$$

$L_{\sigma 1}$ : induttanza di dispersione primaria del trasformatore

$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_{\sigma 1} \bar{I}_1 + \bar{E}_{1p}$$

per analogia

$$\bar{V}_2 = -R_2 \bar{I}_2 - jX_{\sigma 2} \bar{I}_2 + \bar{E}_{2p}$$

$$\bar{V}_1 = (R_1 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_1 + j\omega N_1 \frac{N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2}{R_p}$$

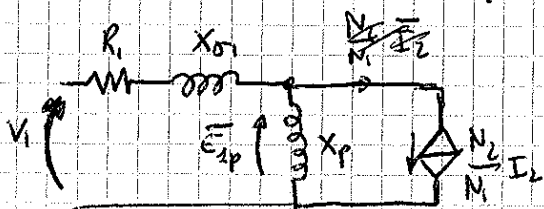
$$\bar{V}_1 = (R_1 + jX_{\sigma 1}) \bar{I}_1 + j\omega \frac{N_1^2}{R_p} \bar{I}_1 - j\omega \frac{N_1 N_2}{R_p} \bar{I}_2 = (R_1 + jX_{\sigma 1}) \bar{I}_1 + \underbrace{j\omega \frac{N_1^2}{R_p}}_{X_p} \left( \bar{I}_1 - \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \right)$$

$$\bar{V}_1 = (R_1 + jX_{\sigma 1}) \bar{I}_1 + jX_p \left( \bar{I}_1 - \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2 \right)$$

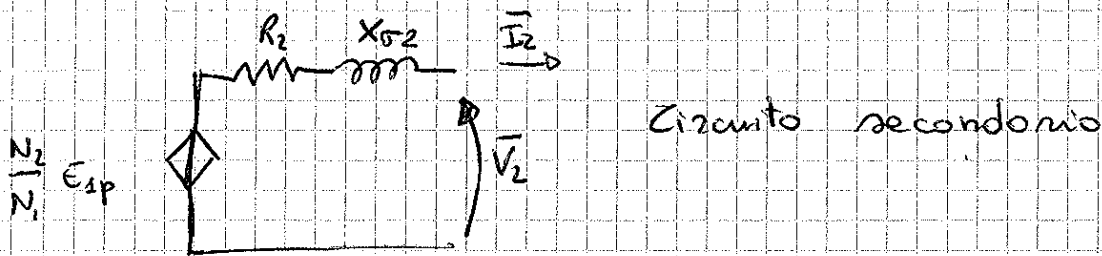
$$\bar{V}_2 = -(R_2 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_2 + \bar{E}_2$$

Poiché  $\begin{cases} \bar{E}_{1p} = j\omega N_1 \bar{\Phi}_p \\ \bar{E}_{2p} = j\omega N_2 \bar{\Phi}_p \end{cases}$  si ha

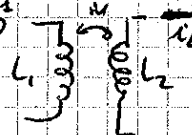
$$V_2 = -(R_2 + jX_{\sigma 2}) I_2 + \frac{N_2}{N_1} \bar{E}_{1p}$$



Circuito primario



In elettrotecnica si usa il simbolo } { per rappresentare il trasformatore ideale. La reazione di indotto si ha su ogni macchina elettrica. Perché si usa un circuito equivalente complicato quando si potrebbero usare due induttanze mutualmente accoppiate? I due circuiti sono equivalenti, ma nella realtà si ha il fenomeno della saturazione del ferro (noi lo abbiamo supposto con  $\mu \rightarrow \infty$ ). I parametri induttivi sono effetti della saturazione magnetica. Nelle rappresentazioni  $\vec{i}_1$   $\vec{i}_2$  tutti i parametri sono



effetti dell'errore di saturazione magnetica ( $L_1 = L_1(i_1, i_2)$   
 $L_2 = L_2(i_1, i_2)$   $M = M(i_1, i_2)$ ). Di conseguenza si ha una relazione non lineare.

Nel circuito equivalente solo  $X_p$  è effetto di errore e dipende da  $\bar{I}_1 - \bar{I}_2$  dove  $\bar{I}_1' = \frac{N_2 \bar{I}_2}{N_1}$ . I parametri  $X_{\sigma 1}$  e  $X_{\sigma 2}$  possono essere ritenuti costanti.

La corrente  $\bar{I}_1 - \bar{I}_2'$  è la corrente di magnetizzazione del trasformatore. Questa corrente diventa reale ~~ed è la~~ solo quando  $\bar{I}_2$  diventa 0 ed è detta corrente di magnetizzazione a vuoto.

Analizziamo ora le equazioni del circuito equivalente

$$\begin{cases} V_1 = (R_1 + jX_{\sigma 1}) \bar{I}_1 + jX_p (\bar{I}_1 - \bar{I}_2') \\ V_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1} - (R_2 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_2 \\ \bar{I}_2' = \frac{N_1}{N_2} \bar{I}_2 \end{cases} \quad \begin{array}{l} 2 \text{ equazioni in} \\ 2 \text{ incognite} \\ (\bar{I}_2 \text{ ed } E_1) \end{array}$$



Il loop può essere eliminato attraverso una trasformazione di variabili. Voglio eliminare i gen. dipendenti trasformando ~~la rete~~ il circuito in una rete passiva. Effettuo quindi l'operazione del Rapporto ~~se~~ primario.

Prendo la II equazione e la moltiplico per  $\frac{N_1}{N_2}$

$$\frac{N_1}{N_2} \bar{V}_2 = \bar{E}_1 - \frac{N_1}{N_2} (R_2 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_2$$

Se ho un carico  $Z_c$  collegato al terzo. allora  $\frac{N_1}{N_2} \bar{V}_2 = Z_c \bar{I}_2$

molte  $\bar{I}_2 = \frac{N_1}{N_2} \bar{I}_2'$

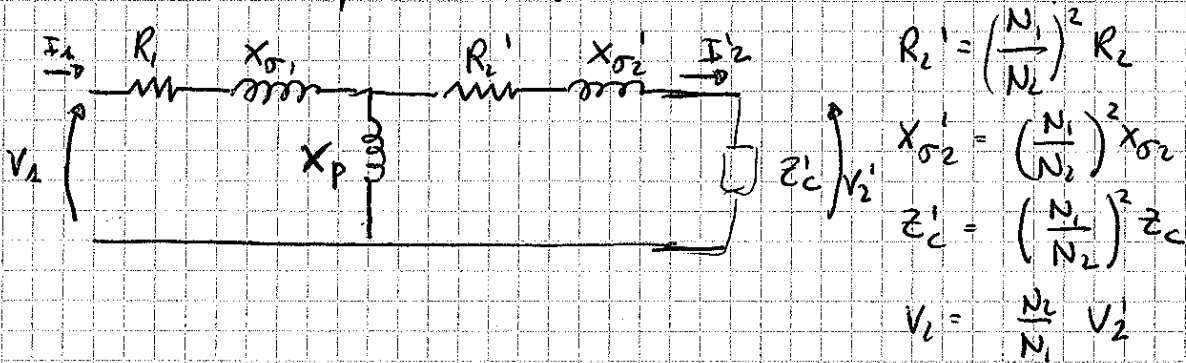
Da cui ottengo

$$\frac{N_1}{N_2} \bar{V}_2 = \bar{E}_1 - \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 (R_2 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_c \bar{I}_2'$$

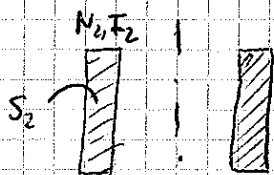
chiamo  $\bar{V}_2' = \frac{N_1}{N_2} \bar{V}_2$  e ottengo

$$\bar{V}_2' = \bar{E}_1 - \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 (R_2 + jX_{\sigma 2}) \bar{I}_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_c \bar{I}_2'$$

Ora il circuito può essere visto così:



Consideriamo la reazione  $R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2$  - Consideriamo anche una bobina cilindrica



$$R_2 = \rho \frac{N_2 L_m}{S_2} = \rho \frac{L_m}{S_2} N_2^2$$

Indichiamo con  $L_m$  la lunghezza netta delle spire delle bobine.

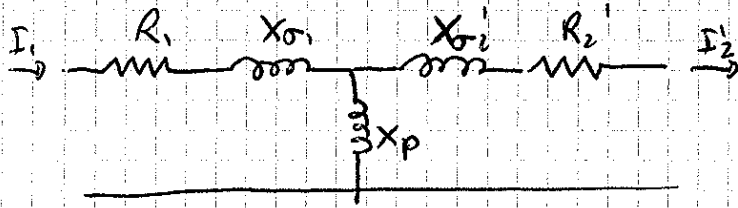
Se le parti di ingombro sono netture  $N_1$  spire avrà resistenza

$$R_2' = \rho \frac{L_m}{S_2} N_1^2$$

Le tensioni  $V_2$  sono uguali  $V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2$  e  $I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2$

Il rapporto a primario consiste nel vedere il tratto a rapporto di trasformazione unitario venendo il carico e impedente.

Considerazioni su circuito equivalente rapporto a primario.



Gl. ordini di grandezza dei parametri pu capire se qualcosa pu essere trascurato

$$X_{01}, X_{02}' = \omega \frac{N_{1,2}^2}{R_{01,2}}$$

$$X_p = \omega \frac{N_1^2}{R_p}$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_r &= 1 \\ \mu_{fe} &= 10^3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

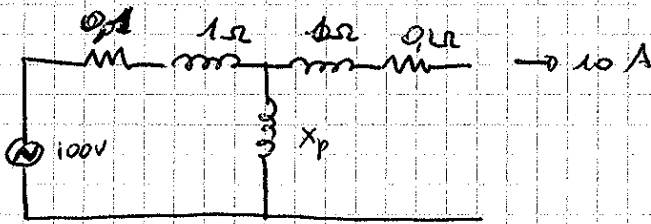
$$R_{01,2} \approx 10^3 R_p$$

$$X_p \approx 10^3 X_{01} \approx 10^3 \Omega$$

$$X_{01} \approx 1 \Omega$$

Nei grandi trasformati  $R_1, R_2' \approx 0,1 \Omega$

Analizzando un trasformatore a pieno carico si pu trascurare  $X_p$  perch l'energia e trascurabile.



$X_p$  made per 0,1 A che possono essere trascurati rispetto ai 10 A. molto possono essere trascurate anche le resistenze

$R_1$  e  $R_2'$  sono le cause della "pendenza nel rame". cioe:

$$P_{\text{son}} = R_1 I_1^2 + R_2' \cdot I_2'^2 = R_1 I_1^2 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right) I_2^2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$$

Nonostante il rapporto a primario le perdite sono ancora significative.

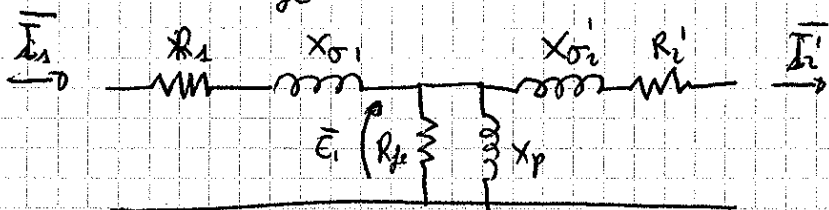
Le perdite nel ferro sono  $P_{fe} = P_c + P_h \propto B^2 \propto \phi_p^2 \propto E_1^2$

$P_c$  sono dovute a correnti parassite

$P_h$  sono le perdite per isteresi

$$P_{fe} = \frac{1}{R_{fe}} E_1^2$$

$R_{fe}$  ve disposte in parallelo a  $X_p$



$$R_{fe} \approx 10^4 \Omega$$



Nei trasformatori  $I_1$  e  $I_2$  sono praticamente uguali.

$$\frac{N_1 I_1 - N_2 I_2}{R_p} = \phi_p \quad \text{se } R_p \text{ è molto piccola allora}$$

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 \approx 0$$

Un trasformatore alimentato in tensione è una macchina a flusso costante. Cioè il flusso magnetico all'interno del traf. rimane costante in ampiezza.

Inoltre si può ritenere  $\bar{V}_1 \approx \bar{E}_1$ .

Di conseguenza  $E_1 = j\omega N_1 \phi_p$ , ma  $\omega N_1$  è costante,  $E_1$  è costante quindi  $\phi_p$  è costante.

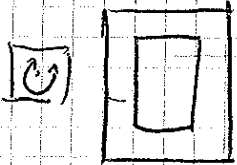
### ASPETTI COSTRUTTIVI TRASFORMATORE MONOFASE

Componenti elettromagnetiche

a) nucleo magnetico


b) avvolgimento.

#### NUCLEO



materiali ferromagnetici ad alta permeabilità (e piccole perdite <sup>nel ferro</sup> per ridurre alta  $R_p$ )

Nascono forze elettromotrici nel ferro per opporsi alla magnetizzazione (fenomeno delle correnti parassite)

Si possono interrompere le correnti parassite ~~isolando~~ <sup>selezionando</sup> il ferro e isolando . Il nucleo è laminato. Normalmente lo spessore delle lamiere è  $d = 0,3 \div 0,5 \text{ mm}$ . Si possono trovare anche lamiere più sottili ( $d = 0,01 \text{ mm}$ ) utilizzate per potenze minori. Una volta venivano isolate con carta, oggi con altri tipi di isolanti.

In relazione agli spessori si parla di un coefficiente di skippamento  $k_{fe} = \frac{S_{p \text{ netta}}}{S_{p \text{ lorda}}} \approx 0,95 \div 0,97$

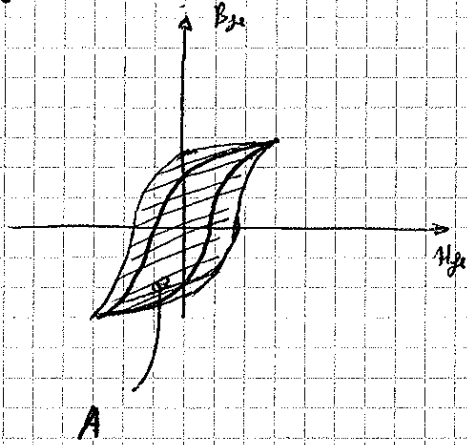
molto per ridurre le perdite si può usare una lega di ferro e silicio che <sup>diminuisce</sup> la resistenza del materiale e <sup>diminuisce</sup> le correnti parassite. L'aggiunta di silicio è del 1-6%. Un ulteriore

aggiunta di silicio renderebbe la lega difficile da lavorare.

Ritorno alle perdite per correnti parassite

$$P_{cp} \propto \frac{1}{\rho} d^2 B_{max}^2 f^2$$

Il ferro è anche causa di perdite per isteresi



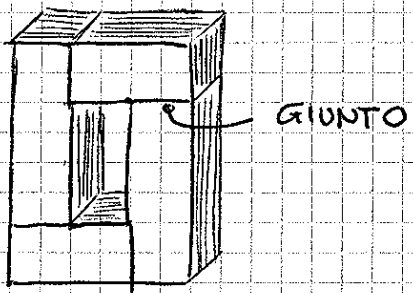
L'area  $A$  indica l'energia <sup>per unità di  $V$</sup>  persa  $V_e$  a ciascuna corsa del materiale per produrre un ciclo di magnetizzazione.

La potenza dissipata sarà  $P_e \propto A f$ . L'aggiunta di silicio riduce l'area del ciclo di

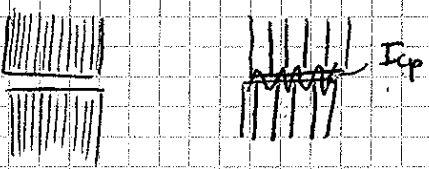
isteresi. Ricordiamo che  $A = f(B_{max}) = K B^{1,6 \div 2,2}$

Il materiale è caratterizzato dalle cifre di perdite  $([C_p] = \frac{W}{kg})$ . Numero di Watt persi da 1kg della lamina quando questa è soggetta <sup>sollecitata</sup> ad un campo magnetico e  $f = 50 Hz$  con  $B_{max} = 1,5 T$ .  $C_p$  ha ordine di grandezza  $1 \div 10 \frac{W}{kg}$ .

Costruzione di un nucleo:



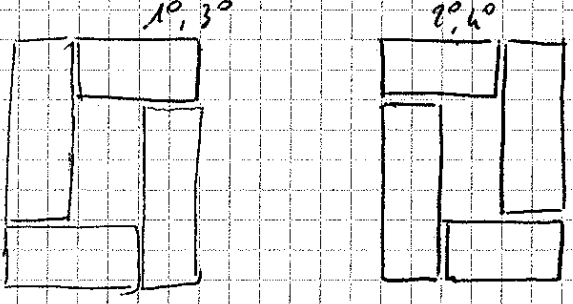
Ogni giunto costituisce un traguardo per il passaggio di  $\Phi$  - inoltre ogni giunto ha dei materiali isolati per ridurre le correnti parassite.



Non ci sarà un perfetto allineamento tra i laminari e si potrà avere delle situazioni in cui le correnti parassite passano lo stesso. Per evitare il passaggio di queste correnti si mette un isolante

tra i blocchi del giunto. Il traguardo modifica il flusso magnetico.

Un rete più efficiente è questo



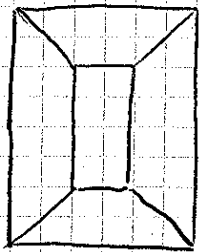
I traguardi esistono solo geometricamente perché le linee di campo by-passano il traguardo.

Questo tipo di costruzione è detta a giunti intrecciati.

Con le laminazioni e questo si possono creare materiali a grani orientati. Questi però non vanno bene con la costruzione a giunti.

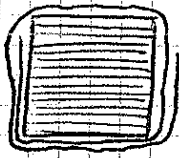
Il materiale a grani orientati è più costoso del FeSi.

Per risolvere il problema dei giunti vengono usati giunti a 45°.

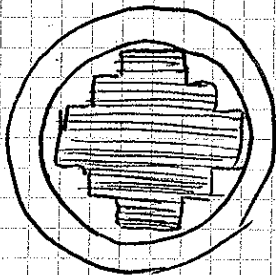


Si utilizzano anche in questo caso i giunti interrotti.

Nella forma più semplice la sezione del ferro è quadrata

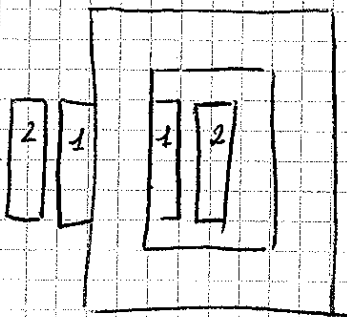


l'isolamento può essere visto in forma quadrata se la potenza molto bene. Questo selgo di potenza per non rischiare di risonanze e isolate sono costruiti a forme circolari. Aumento <sup>quindi</sup> la sezione di ferro in modo da avere una buona dispersione in aria. Inoltre essendo una migliore sezione del Fe sono ~~meno~~ <sup>meno</sup> spire con il rame.



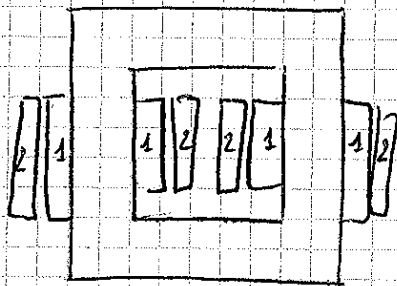
Per evitare i disturbi i due avvolgimenti devono essere i più vicini possibile.

In un nucleo ad O si possono disporre così



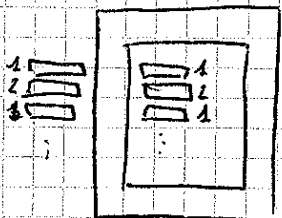
In questo caso si hanno gli avvolgimenti concentrici.

Un'altra soluzione utilizzata può essere la seguente



tipicamente l'avvolgimento più vicino al nucleo è quello in bassa tensione, mentre quello esterno è in alta tensione.

Avvolgimento <sup>discordale</sup> a bobine intercalate (esiste per ad 1 che e 2 colonne).



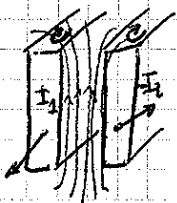


Tanto più si fraziona l' avvolgimento e lo si intercala tanto più sono minori le dispersioni. Tipicamente gli avvolgimenti concentrici hanno le colonne in verticale, mentre quelli a bobine intercalate in orizzontale. Questo per motivi termici di raffreddamento. (Di solito si hanno liquidi per raffreddare, questi devono utilizzare i noti convettivi al meglio).

Bisogna cercare anche di diminuire al minimo le resistenze degli avvolgimenti. Il rame perde di più ~~che in~~ corrente alternata che non in continua. Questo a causa dell' effetto pelle. Di conseguenza la sezione utile è una ~~sezione~~ <sup>corona</sup> circolare. Di conseguenza la resistenza del rame è maggiore. Si ha però una perdita addizionale oltre a quelle valutabili in cc. Questo fenomeno prende il nome di corrente parassita che sono prodotte dai flussi dispersi.



$N_1 I_1$  e  $N_2 I_2$  dovranno essere uguali ed opposte di segno. Immaginiamo che le bobine abbiano raggio di curvatura  $\rightarrow \infty$ . (Aprox. per copre).



Le linee di campo fanno parte del flusso disperso. Alcune si concatenano solo con l' avvolgimento 1 e altre solo con l' avvolgimento 2. Di conseguenza nel conduttore si manifesta corrente di circolazione per effetto del flusso alternato (poiché le correnti  $I_1$  e  $I_2$  sono alternate).

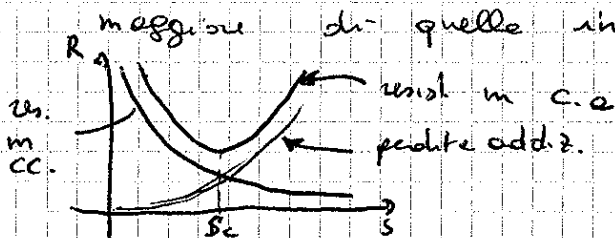
Di conseguenza avviene questa distribuzione di corrente



Si ha il max addensamento di corrente su <sup>superficie</sup> ~~ferro~~ ~~efficiate~~. Per diminuire questo effetto si possono

usare fettine verticali anziché orizzontali e riempire lo spazio perso. Questo fatto è previsto nella normativa per le collaudi dei trasformatori.

Se ho preso un conduttore di sezione  $S$  e lo voglio aumentare di  $\Delta S$  in corrente continua la resistenza diminuisce. In alternata posso avere il rischio che la resistenza <sup>finale</sup>  $\frac{R_{finale}}{1.12}$  è maggiore di quelle iniziali.



$S_c$ : sezione critica

La sezione critica del rame a  $20^\circ\text{C}$  è  $1,5 \text{ cm}^2$  a  $50 \text{ Hz}$ .  
 L'avvolgimento viene performed. Si avvolgono gli avvolgimenti intorno a  
 dei cantoni. Dopo di che si riveste un gruppo, si riveste l'avvolgimento  
 e si riveste il gruppo.

I materiali non attivi (isolanti) condizionano la potenza del trafo.  
 Infatti questa è limitata dal suo riscaldamento. Il riscaldamento non  
 deve eguagliare il calore scambiato con il liquido refrigerante. La  
 sovratemperatura del trafo deve essere compatibile con le temperature  
 sopportate dall'isolante. Se le temperature sono troppo alte si accelerano  
 le reazioni chimiche che comportano la rovina dell'isolante. Gli isolanti sono  
 divisi in classi in base alle temperature sopportate.

Se un isolante regge ad alte temperature si può aumentare la potenza.  
 L'isolante condiziona la corrente nominale del trasformatore.

### Metodi di raffreddamento

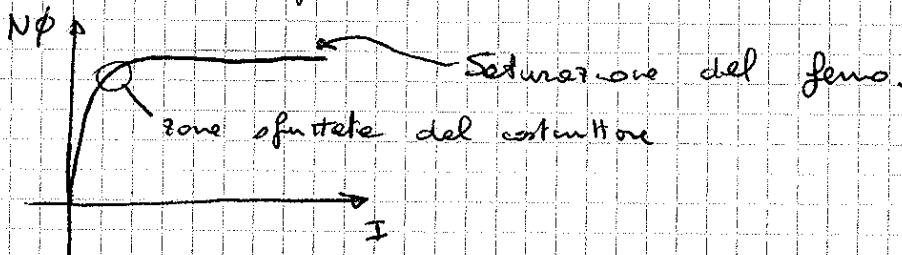
- Piccola potenza in olio o raffreddamento nucleare (anche alcuni grandi  
 \* trasformatori sono raffreddati in olio).
- Grandi potenze microonde o ventole/estratori oppure si sostituisce olio  
 con olio (le circ. naturali o forzate).

### DATI di TARGA

$V_{1 \text{ nom}}$  } tensione di normale esercizio del trasformatore  
 $V_{2 \text{ nom}}$  }  $= V_{20}$  tensione a vuoto quando il primario è alimentato a tensione nom.

$t$ : rapporto di trasformazione  $\frac{V_{2 \text{ nom}}}{V_{1 \text{ nom}}}$

Se so aumento la  $V_{1 \text{ nom}}$  rispetto alla  $V_{1 \text{ nom}}$  corrente gli enervamenti  
 a vuoto. Infatti:



Il costituente sfrutta la zona ancora linearmente permeabile. Se  
 so aumento la tensione, il flusso aumenta il ferro diventa  
 talmente saturo e  $I$  può diventare maggiore della corrente  
 nominale.

La tensione nominale non è legata all'isolamento, bensì alle saturazioni del ferro e ai margini di corrente.

Altro dato di targa

$I_{nom}$ : corrente tollerata dal trasformatore e dell'isolante

$$V_1 = E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_{max} = 4,44 f N_1 \Phi_{max}$$

Altri dati di targa

$$\left. \begin{matrix} I_{1nom} \\ I_{2nom} \end{matrix} \right\} I_{1nom} V_{1nom} = I_{2nom} V_{2nom} \text{ per normativa}$$

$$S_{nom} = I_{nom} V_{nom} \text{ [VA]}$$

La potenza è apparente perché bisogna tenere conto anche della potenza reattiva. L'utilizzo della potenza apparente è usato per le macchine che generano energia elettrica.

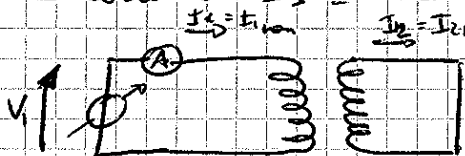
Sulle targe deve comparire anche

$f_{nom}$ : frequenza nominale

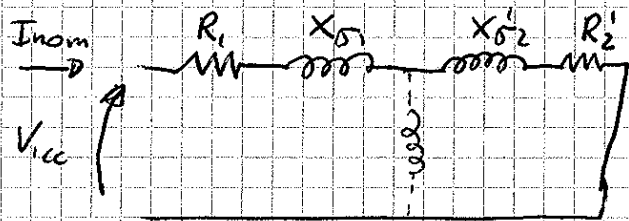
Tensione di corto circuito del trasf. (e primario e e secondario)

La tensione di corto circuito: supponiamo di chiudere il cortocircuito il secondario e poi di applicare una tensione crescente e di misurare la corrente  $I_1$ . Quando  $I_1 = I_{1nom}$  definisco

$$V_1 = V_{1cc}$$



Vediamo come viene sollecitato il ferro durante questa prova



$$V_{1cc} \approx 6\% V_{1nom}$$

La tensione di corto circuito è circa del 6-7% del valore della  $V_{nom}$ .

Per venire la  $V_{cc}$  in gioco sulle reattanze  $X_{01}$  e  $X_{02}$

modificando la disposizione degli avvolgimenti.

Il valore di  $V_{cc}$  dato in percentuali a da a quali



ma la corrente di corto circuito e ci permette di stimare le perdite:

Una  $V_{cc}$  del 6%  $V_{nom}$  è un compromesso tra perdite e cadute di tensione.

$Z_{cc,1} = R_{cc,1} + j X_{cc,1}$  Impedenza di corto circuito

$R_{cc,1} = R_1 + R_2' \quad X_{cc,1} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}'$

$\cos \varphi_{cc} = \frac{R_{cc,1}}{Z_{cc,1}}$

Ovviamente le prove di corto circuito può essere eseguite chiudendo in corto circuito il primario. Misurando un'alta tensione di corto circuito, ma il valore percentuale sarà sempre lo stesso.

$\bar{V}_{cc} = \left[ R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \right] \bar{I}_{2nom} + j \left[ X_{\sigma 1} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{\sigma 2} \right] \bar{I}_{2nom}$

$\bar{V}_{cc} = \left[ R_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + R_2 \right] \bar{I}_{2nom} + j \left[ X_{\sigma 1} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + X_{\sigma 2} \right] \bar{I}_{2nom}$

$Z_{2cc} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 Z_{cc}$

$\bar{V}_{cc} = Z_{cc} \bar{I}_{2nom}$

$\bar{V}_{cc} = Z_{cc} \bar{I}_{2nom}$

$V_{cc\%} = \frac{V_{cc}}{V_{nom}} \cdot 100 = 100 \cdot Z_{cc} \frac{I_{2nom}}{V_{nom}}$

$V_{cc\%} = \frac{V_{cc}}{V_{nom}} \cdot 100 = 100 \cdot Z_{2cc} \cdot \frac{I_{2nom}}{V_{2nom}}$

} ->

=>  $= 100 \cdot Z_{cc} \frac{I_{2nom} \frac{N_2}{N_1}}{V_{nom} \frac{N_1}{N_2}} = 100 \cdot Z_{cc} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \frac{I_{2nom}}{V_{2nom}}$

$= 100 \cdot Z_{cc} \frac{I_{2nom}}{V_{2nom}} = 100 \cdot Z_{2cc} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \frac{I_{2nom}}{V_{2nom}}$

Amplificano ora la potenza:

$S_n = V_m I_m = 4,44 f N_1 \phi_{max} \cdot I_{rms} S_{cu,1} =$

$= 4,44 f B_{max} I_{rms} S_{Fe} N_1 S_{cu,1}$

La potenza del trasformatore cresce con  $S_{Fe}$  esponente 4 rispetto alle dimensioni lineari. Se raddoppio la freq. raddoppio la potenza (motivo per cui gli aerei funzionano a 400 Hz).

Il volume e il peso variano con la 3<sup>a</sup> potenza delle dim. lineari. (Rapporto potenza/volume diventa raddoppiato all'aumentare delle potenze).

Le perdite del ferro ~~esistono con il volume~~ <sup>ma per u.d.V. un magno tel.</sup> il come le  
 le seguenti perdite per unità di volume  $\frac{R_u}{V} = \rho J^2$ . Quindi anche  
 il core mette le perdite per u.d.V. Di conseguenza le perdite  
 decrescono con l'aumento di potenza.

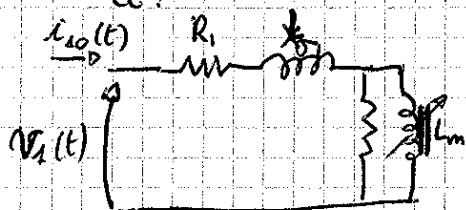
Le superfici aumentano con la 2<sup>a</sup> potenza delle misure lineari. Il trafo  
 più grande di potenza più ve in crisi termica. Bisogna aumentare  
 le superfici o ridurre gli indici di sfruttamento. Namelmente si nettano  
 delle superfici elettrolite o degli radiatori e poi cercato di migliorare il  
 raffreddamento con convezioni forzate e metodi migliori dell'aria.

## LIMITI del FUNZIONAMENTO di un TRASFORMATORE

FUNZIONAMENTO a VUOTO:

- 1 forma d'onda corrente a vuoto
- 2 correnti di inserzione di un trafo su rete.

1) forma d'onda: tipicamente distorta rispetto ad una forma sinusoidale.

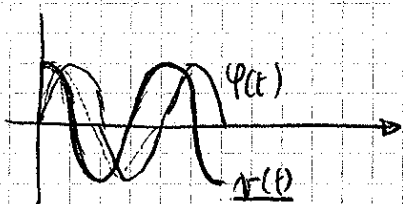


Nei ragionamenti trascuriamo  $R_1$  e  $L_1$ .  
 Determiniamo la forma d'onda.

Non possiamo risolvere il circuito con  $v(t) = L_m \frac{di_{10}}{dt}$  !!

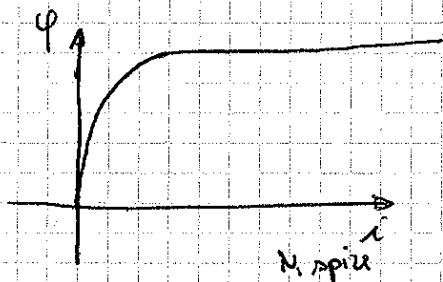
Dobbiamo risolverlo con questa equazione:  $v(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt}$

$$V_{max} \cos(\omega t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \phi = \frac{V_{max}}{N_1 \omega} \sin(\omega t)$$

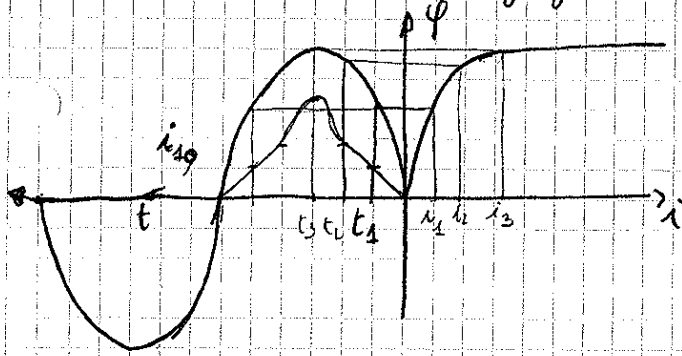


questo a regime.  $\phi_{max}$

Posso mettere in relazione  $\phi$  ed  $i$ .



Uniamo ora i due grafici:



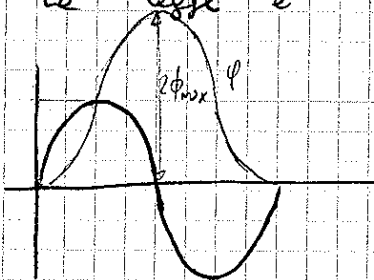
Si omettono solo armoniche dispari:  
 $1^{\circ}, 3^{\circ}, 5^{\circ}$ . Ci restano quindi i 50Hz,  
 i 150 Hz, i 250 Hz.

Questa forma distorta può causare  
 cadute di tensioni armoniche o problemi.  
 Normalmente la corrente è molto piccola

e quindi non dà problemi. L'anel impedire che corrente raggi max un  
 4% di quella nominale. L'isteresi del flusso causa un anticipo delle  
 corrente rispetto al flusso e quindi di un assorbimento di potenza attiva.

2) correnti di inserzione. In regime a corrente costante questo diventa un trasformatore  
 scelto la protezione di max corrente. Il fenomeno è legato alle saturazioni  
 magnetiche e al fatto che il trasformatore lavora nel ginocchio delle  
 curve  $\Phi-i$ .

La legge è  $\Phi = \frac{V_{max} \times t}{N_1 \omega} \sin(\omega t)$



Supponiamo di chiudere e intermettere questo

$$V(t) = 0$$

In questo caso  $V_{max} \sin(\omega t) = N \frac{d\Phi}{dt}$

$$\Phi = -\frac{V_{max}}{N_1 \omega} \cos \omega t + K \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Phi(t) = \Phi_{max} (1 - \cos \omega t)$$

Questa forma tende a ripetersi a regime, ma il flusso  
 di funzionamento si sposta e 2 volte il flusso normale quindi  
 8-10 volte la corrente nominale.

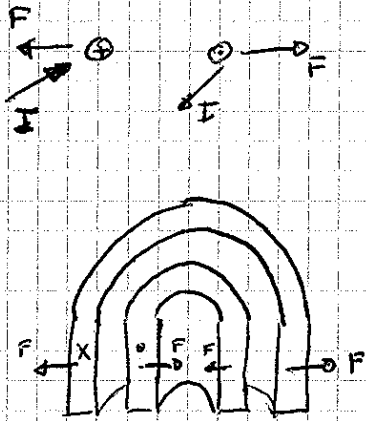
Il flusso tende a essere:





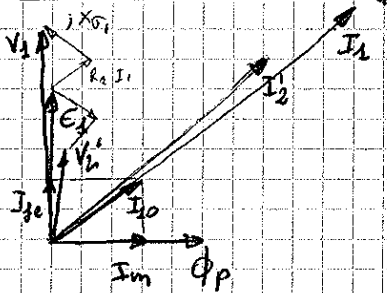
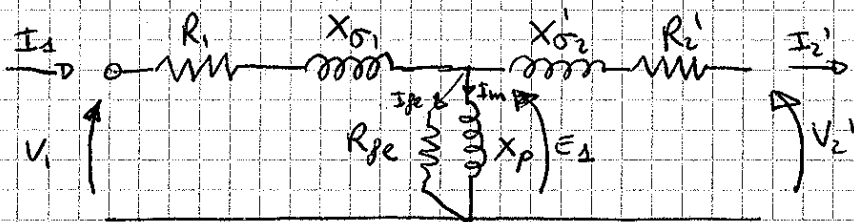
## FUNZIONAMENTO IN CORTO CIRCUITO

Le protezioni devono intervenire nell'ordine di qualche secondo. Il fenomeno termico è di tipo integrale, quindi si ha un margine di tempo entro cui intervenire. Si ha poi un fenomeno istantaneo. È un fenomeno meccanico che avviene sulle bobine del traf.



Pensavo alle due bobine di un traf. ad avvolgimenti concentrici: l'avvolgimento interno tende a schiacciarsi e quello esterno ad allargarsi. Il costruttore ancora gli avvolgimenti in modo che non subiscano danni. Se le correnti aumentano notevolmente la forza agente sarà esponente 2. Queste forze può provocare lo schiacciamento del cilindro interno e l'esplosione di quello esterno. Per questo motivo la tensione di corto circuito non deve essere troppo bassa.

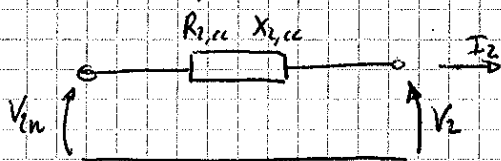
## FUNZIONAMENTO NORMALE di un TRAF. O



Nel normale funzionamento  $I_1$  e  $I_2$  sono praticamente indistinguibili.

Normalmente si studia il funzionamento di un traf. a carico sotto  $R_{ge}$  e  $X_p$ . Quindi considerando  $I_1 = I_2$ .

A carico il traf. viene rappresentato così: Dove in più mostrano il circuito equivalente al secondario

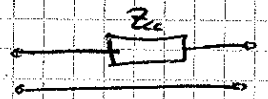


$R_{cc}$  e  $X_{cc}$  devono essere piccoli, per non avere grosse reazioni di tensione.

Nel funzionamento a carico  $\bar{I}_1 \approx \bar{I}_2$

$$\bar{I}_1 - \bar{I}_2 = \bar{I}_0 \approx 0$$

Possiamo rappresentare il trafo nel funzionamento a carico e il circuito equivalente a secondary



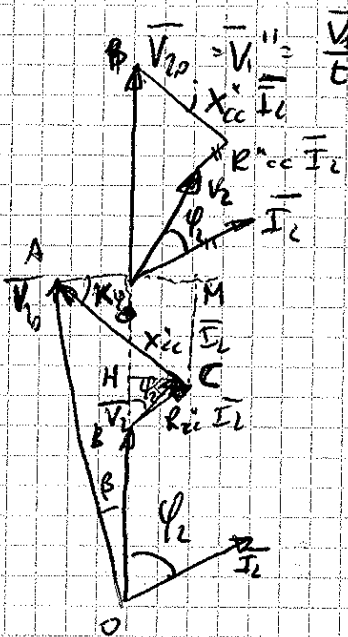
$$V_1'' = \frac{V_1}{t} \quad \text{NORME } I \in C \quad t = \frac{V_m}{\omega}$$

$$t \approx n = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\bar{Z}_{cc}'' = \underbrace{\left( \frac{R_1}{t^2} + R_2 \right)}_{R_{cc}''} + j \underbrace{\left( \frac{X_{\sigma 1}}{t^2} + X_{\sigma 2} \right)}_{X_{cc}''}$$

$$I_1'' = I_1 \cdot t$$

la caduta di tensione induttuale  $\Delta V = |\bar{V}_{20}| - |\bar{V}_2|$



$I_2$  in fase con  $R_{cc}''$

$$\overline{OK} = \sqrt{\bar{V}_{20}^2 - \overline{AK}^2}$$

$$\overline{AK} = \overline{AM} - \overline{KM} \quad \overline{AM} = X_{cc}'' \bar{I}_2 \cos \varphi_2$$

$$\overline{KM} = \overline{HC} = R_{cc}'' \bar{I}_2 \sin \varphi_2$$

$$V_2 = \overline{OK} - \overline{KB} = \overline{OK} - \overline{KM} - \overline{HB} =$$

$$\overline{OK} - X_{cc}'' \bar{I}_2 \sin \varphi_2 - R_{cc}'' \bar{I}_2 \cos \varphi_2$$

$$V_2 = V_{20} \left( 1 - \frac{I^2 (X_{cc}'' \cos \varphi_2 - R_{cc}'' \sin \varphi_2)}{2 V_{20}^2} \right) - (X_{cc}'' \sin \varphi_2 - R_{cc}'' \cos \varphi_2) I_2$$

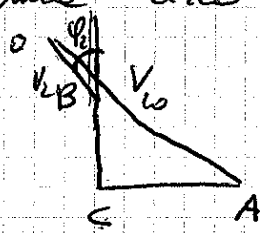
Se  $\beta \approx 0$  allora  $\overline{AO} \approx \overline{OK}$  in questo caso

$$V_2 = V_{20} - (X_{cc}'' \sin \varphi_2 - R_{cc}'' \cos \varphi_2) I_2$$

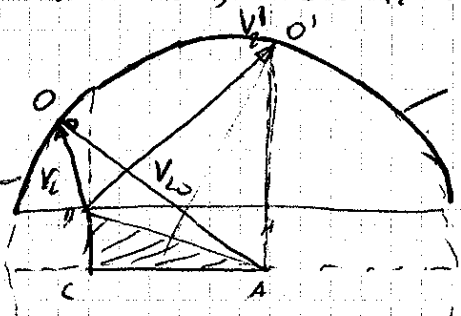
Per la pot. del trafo la tensione sul cc del trafo non deve essere troppo bassa, dall'altro non deve essere troppo alta perché se no ci sarebbe troppi sbalzi.

Se il carico è capacitivo  $\cos \phi_2 < 0$ . E'è possibile che  $V_1 > V_2$

Diagramma circolo KAPP ( $I_2 \cos \phi_2$ ,  $\cos \phi_2$  variab).



carico resist. indutt.



carico resist. capacitivo

$O'H \propto P$  punti  $O'H = V_2' \cos \phi_2'$   
e  $I_2 = \cos \phi_2'$

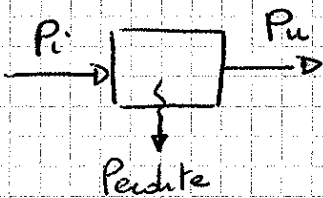
La max caduta di tensione si ha quando  $\phi_2'$  è uguale allo sfasamento del carico.

La max potenza attiva si ha per un carico leggermente capacitivo.

Il trafo scag ha max rendimento per un  $\cos \phi_2 < 1$  capacitivo

Rendimento del TRAF

$\eta = \frac{P_u}{P_i} < 1$ . Il rendimento è al carico nominale (uo è a piena potenza nominale). Il rendimento è variabile in base alla potenza.



Le perdite sono nel ferro e nel rame.

Il rendimento è funzione del carico, delle temperature di esercizio

$\eta = \frac{P_i - \text{Perdite}}{P_i}$  Le perdite sono funzione delle Temp. degli

avvolgimenti. ( $f(\theta)$ ). Infatti  $P_{cu} = P_{cu,0} \left(1 - \frac{\theta}{234,5}\right)$ . Quindi le perdite sono funzione delle temperature e causa dell'aumento delle temperature.

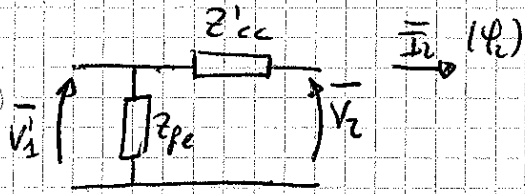
Le perdite del ferro non ~~sono~~ devono essere riportate alla temperatura convenzionale (almeno secondo @ norme).

Le norme dicono che il rendimento nominale va fornito alla temperatura di  $75^\circ C$ .

Sono interessanti i rendimenti e  $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{4}{4}$  e  $\frac{5}{4}$  del carico nominale.



Analizziamo il rendimento del traf.  $\eta$ .



$$P_u = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

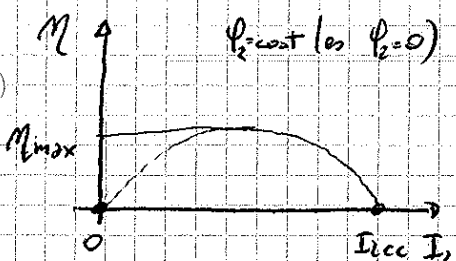
$$\eta = \frac{P_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{cu} + P_{fe}}$$

Il termine  $P_{fe}$  non dipende né da  $I_2$  né da  $\varphi_2$ , ma possiamo considerarlo costante.

invece:  $P_{cu} = R''_{cc} I_2^2$

inoltre  $V_2 = f(I_2, \varphi_2)$

Ci sono due condizioni in cui  $\eta = 0$ . Quando  $\varphi_2 = \pm 90^\circ$  in generale  $\cos \varphi_2 \neq 0$ . Inoltre  $\eta = 0$  quando il traf. funziona a vuoto ( $I_2 = 0$ ) e quando il traf. è cortocircuitato ( $V_2 = 0$ )



Per trovare il rendimento la nome prevede di supporre  $V_2 = V_{20}$ . Questa approx. permette di fare una stima del rendimento nelle condizioni di funzionamento.

$$\eta_{conv} = \frac{V_{10} I_2 \cos \varphi_2}{V_{10} I_2 \cos \varphi_2 + P_{fe} + P_{cu}}$$

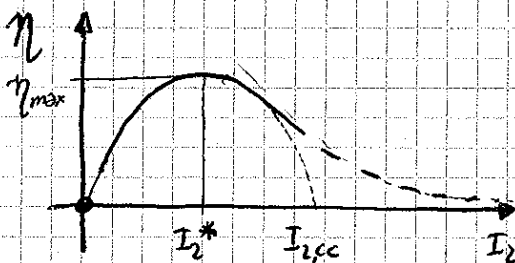
A partire da  $I_2$  il rendimento sono

max se  $\varphi_2 = 0$  (non vero come si vede dal diagramma di KAPP)

Consideriamo  $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_{conv} = \frac{V_{10} I_2}{V_{10} I_2 + P_{fe} + P_{cu}} = \frac{V_{10} I_2}{V_{10} I_2 + R''_{cc} I_2^2 + P_{fe}}$$

Proviamo a diagrammare  $\eta_{conv}$ .



$$\eta_{conv} = \frac{V_2}{V_{20} + R''_{cc} I_2 + \frac{P_{fe}}{I_2}}$$

Dobbiamo rendere minimo il denominatore  
inoltre  $R''_{cc} I_2 + \frac{P_{fe}}{I_2} = \text{cost.}$  inoltre

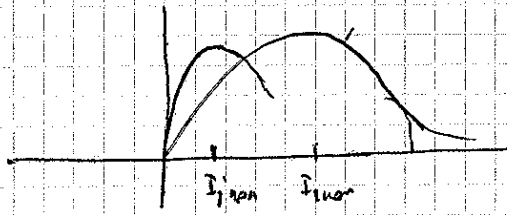
$$R''_{cc} I_2^2 = P_{fe}$$

Il rendimento max si ha

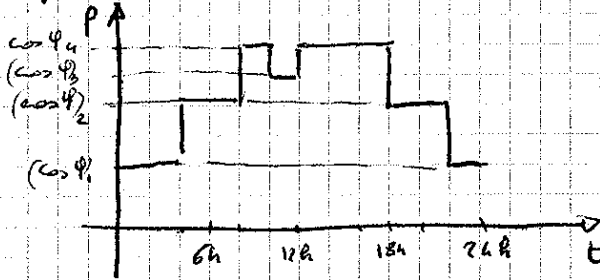
per quel valore di corrente per cui le perdite nel core sono uguali a quelle nel ferro.

Di solito si tende a scegliere  $I_{2nom} > I_2^*$ . Se  $I_2^*$  è posizionato nel nodo corretto il trasformatore potrebbe essere in grado di lavorare sempre con  $\eta > \eta_{nom}$ .

Se il carico ha periodicità giornaliera bisogna valutare l'energia persa durante la giornata. A seconda della corrente nominale è bene valutare attentamente il rendimento del trafo. A bene corrente è più probabile che sia migliore un trafo piccolo rispetto ad uno più grande che ha rendimento elevato maggiore.



Esempio



| $\Delta t$   | $I_2$    | $P_{cu} \Delta t$ (KWH)   | $P_{fe} \Delta t$        |
|--------------|----------|---|--------------------------|
| $\Delta t_1$ | $I_2(t)$ | $P_{cu, nom} \left( \frac{I_2(t)}{I_{1, nom}} \right)^2 \Delta t_1$ | $P_{fe} \Delta t(t)$     |
| $\Delta t_2$ | $I_2(t)$ | ;   | ;                        |
| ;            | ;        | ;   | ;                        |
| $\Sigma$     |          | $\Sigma P_{cu} \Delta t$  | $\Sigma P_{fe} \Delta t$ |

Qui posso però usare alle correnti richieste al trafo.

$$A = \frac{P}{\cos \phi} \Rightarrow I_2 = \frac{A}{V_{1, nom}}$$

A: potenza apparente.

Creo una tabella con i valori di corrente. Poi mi costruisco una

tabella di perdite d'energia.

Devo possedere  $P_{cu, nom}$  e  $P_{fe, nom}$ .

In fondo alla tabella faccio la

somma. In base ai valori ottenuti

è possibile stabilire quali sia il

trafo da consentire di avere meno perdite. Si potrebbe anche valutare il risparmio dei cavi.

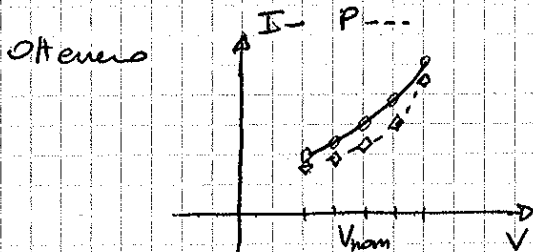
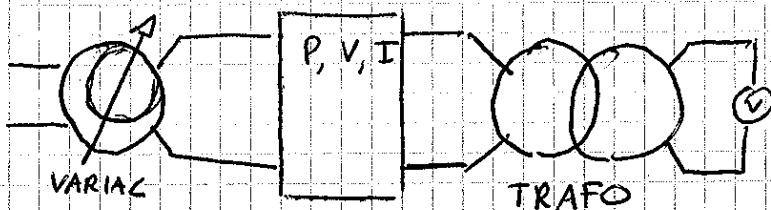
Prove per la definizione del rendimento e delle perdite

Sono sostanzialmente 2: a vuoto e in cortocircuito. Ci sono anche

altre prove. Attraverso le prove a vuoto e in cortocircuito si possono definire le perdite.

Prove a vuoto: alimentare il trafo alla tensione nominale (anche ad altre tensioni nel range dell'elimitazione serate).

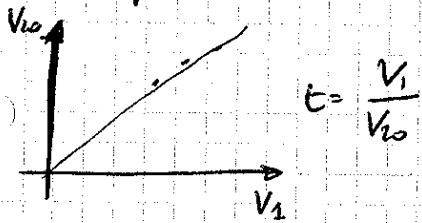
MISURA



Per interpolazione si può trovare la tensione a vuoto ed il valore di perdite alla tensione nominale.

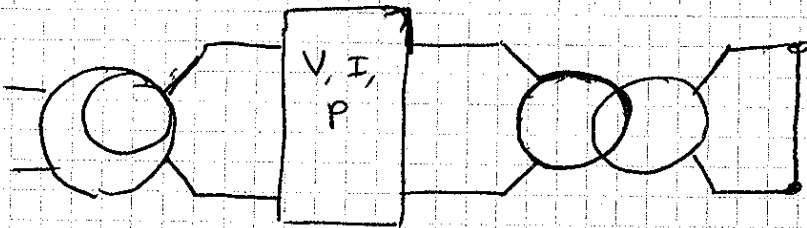
Ritorno  $I_{10, nom}$  e  $P_{10, nom}$

Contemporaneamente nel secondario legge  $V_2$ .

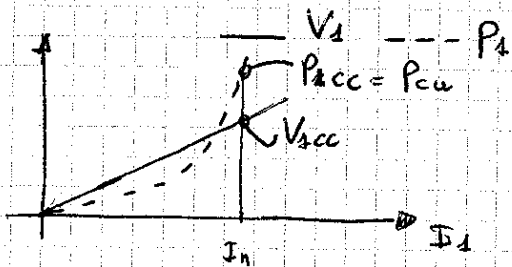


La potenza erogata nelle prove a vuoto dipende da  $P_{fe}$  e  $P_{cu}$ . Ma  $P_{cu}$  sono molto basse, quindi la norma le attribuisce solo a  $P_{fe}$ . ( $P_{cu}$  dell'ordine del % rispetto a  $P_{fe}$ ). Non ci sono limitazioni della temperatura. Le  $P_{fe}$  sono ritenute costanti sia a vuoto, sia a carico. Si può determinare  $\cos \phi_0 = \frac{P_0}{V_{1p} I_0}$

Prove di corto circuito



Tiene eseguita controllando la corrente  $I$  erogata del primario. Le tensioni misurate sono molto basse. Si altera la tensione fino a che  $I_1 = I_{sn}$ . Le norme prevedono che  $P_{cc}$  e  $V_{acc}$  siano



riportate ad una temperatura prestabilita. Difficilmente la temperatura di prova ( $\theta_p$ ) sarà coincidente con la temperatura convenzionale ( $\theta_{conv}$ ). Durante la prova di

corto circuito la prova va fatta a temperatura ambiente. ( $\theta_p = \theta_{amb}$ ). Le prove di cortocircuito va fatta in tempi molto brevi. Al termine delle prove si può misurare la temperatura per verificare di quanto è aumentata durante la prova.

Le prove di d.c.t.o. deve essere preceduta da una misura di  $R_1$  e  $R_2$  in corrente continua. Dopo la prova poter misurare la resistenza e risalire all'aumento di temperatura.

Riportare le misure alla temperatura convenzionale.

$$R_{1cc} = \frac{P_{cc}}{I_{sn}^2} \quad Z_{1cc} = \frac{V_{acc}}{I_{sn}} \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{1cc}^2 - R_{1cc}^2} \quad \cos \phi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{acc} \cdot I_{sn}}$$

Robbiano confrontare  $R_{1cc}$  con le  $R_{1cc}$  misurate in continua



$$R_{acc}^* = R_1^* + k^2 R_2^*$$

$R_{acc}^*$  e  $R_{acc}$  dovrebbero risultare uguali. Nei grossi trafilati di solito si ha che  $R_{acc}^* < R_{acc}$ . Di solito la differenza è  $< 30\%$ .

Se  $R_{acc}^* \neq R_{acc}$  allora si separa  $R_{acc}$  nelle componenti omiche ed addizionale.

$$R_{acc,ohm} = R_{acc}^*$$

$$R_{s,add} = R_{acc} - R_{acc,ohm}$$

Per riportare la resistenza alla  $\theta_{conv}$  si fa così:

$$R(t_c) = R(t_a) \left( \frac{234,5 + T_c}{234,5 + T_a} \right) \quad 234,5 \text{ è tipico del Rame.}$$

La resistenza omica si avvale direttamente delle formule di cui sopra.

$$R_{s,ohm}(\theta_{conv}) = R_{acc,ohm}(\theta_{amb}) \cdot K T$$

$$R_{s,add}(\theta_{conv}) = R_{s,add}(\theta_{amb}) / K T$$

$$R_{acc}(\theta_{conv}) = R_{s,ohm}(\theta_{conv}) + R_{s,add}(\theta_{conv})$$

$$Z_{s,cc}(\theta_{conv}) = \sqrt{R_{acc}(\theta_{conv})^2 + X_{s,cc}^2}$$

$$V_{s,cc}(\theta_{conv}) = Z_{s,cc}(\theta_{conv}) I_{s,nom}$$

$$P_{cc}(\theta_{conv}) = R_{acc}(\theta_{conv}) I_{s,nom}^2$$

$$\cos(\varphi)_{cc}(\theta_{conv}) = \frac{P_{cc}(\theta_{conv})}{V_{s,cc}(\theta_{conv}) I_{s,nom}}$$