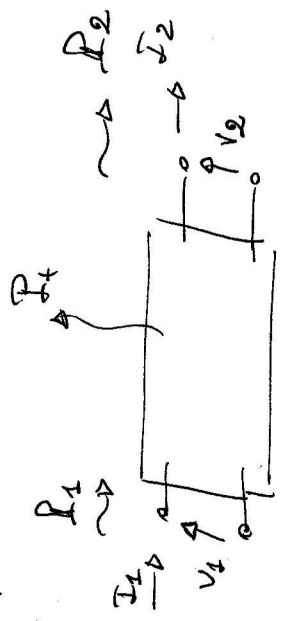


MACCHINE ELETTRICHE

TRASFORMATORE

E' una macchina elettrica statica che trasferisce energia elettrica tra due o più circuiti elettrici.



PRIMARIO

SECONDARIO

TRASFORMATORI IDEALI:

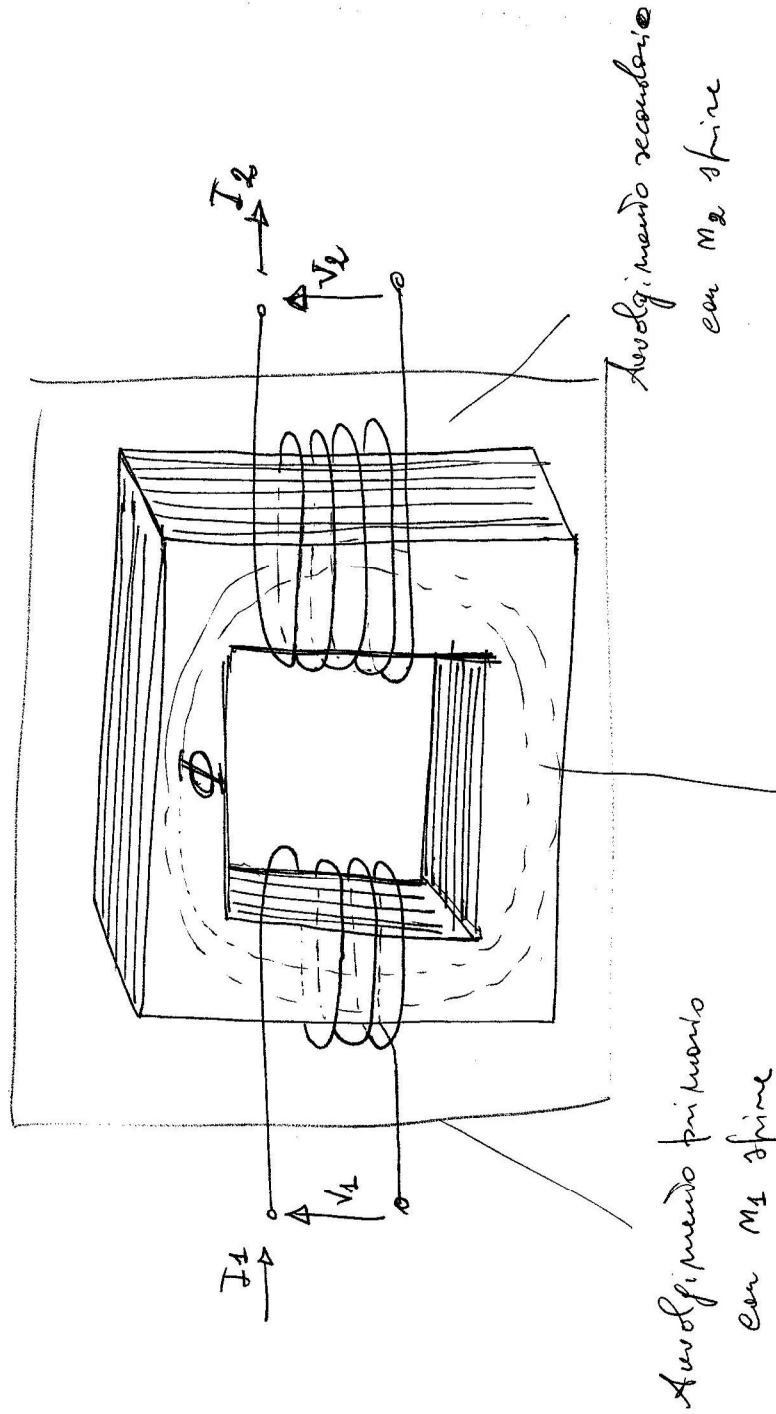
$P_1 = P_2, P_t = 0, \eta_t = 1!$

$I_1 \cdot I_2 = I_2 \cdot I_1$

Si definisce rapporto di trasformazione, k:

$k = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k}$

REALIZZAZIONE DEL TRASFORMATORE



nocchio di materiale ferromagnetico

Alimentando il primario con una tensione di valore V_1 e sinusoidale a frequenza industriale (in Italia $f = 50 \text{ Hz}$), per effetto dell'induzione elettromagnetica tra il circuito primario e quello secondario, si può ottenere una serie di spinte con tensione di valore pari a V_2 , sempre sinusoidale a frequenza pari a quella della tensione V_1 .

Il trasformatore risulterebbe ideale se:

- in assenza di carico sul secondario ($I_2 = 0$) sono dissipabile una $I_2 \neq 0$ per $I_1 = 0$;
- fossero nulle le perdite per indurre magnetiche e per correnti parassite nel nucleo;
- fossero nulle le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti primario e secondario;
- tutto il flusso concatenato con l'avvolgimento primario si concatenasse con l'avvolgimento secondario.



1) Fermo ideale:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{fe} = \infty, R_{fe} = 0 \\ R_{fe} = 0, \Phi_{disp} = 0 \end{array} \right.$$

2) Avvolgimenti ideali: $p_{ovv} = 0$

TRASFORMATORE REALE

Per ottenere un trasformatore pseudo può sembrare simile al trasformatore ideale si oseranno alcuni accorgimenti:

- materiali ferromagnetici con $\mu_r \rightarrow \infty$
- il nucleo è realizzato con laminari di materiale ferromagnetico accoppiati insieme ma isolati l'uno dall'altro per minimizzare le perdite per correnti parassite
- avvolgimenti realizzati con materiali a bassissima resistenza (solitamente rame!)
- gli avvolgimenti sono disposti intorno al nucleo secondo soluzioni che consentano di minimizzare i flussi dispersi oie la differenza tra il flusso concatenato con il primario e quello concatenato con il secondario.

RELAZIONI FONDAMENTALI

PER IL TRASFORMATORE REALE

Funzionamento a vuoto:

$$I_2 = 0$$

Alimentando l'avvolgimento primario con una tensione di valore V_1 e V_2 , il trasformatore smorbina dalle rese di chiimentazione una corrente di valore I_0 , detta corrente a vuoto, che da luogo ad una ~~forza~~ magnetomotrice $M_1 I_0$

che generere nel nucleo un flusso di valore pari a Φ che si concatenere con l'empolimento secondario di modo che il totale sarà pari a \mathcal{V}_2 .
 Se il trasformatore ha caratteristiche tendenti a quelle del trasformatore ideale:

• $\mathcal{V}_1 \rightarrow 0$,
 • le perdite negli avvolgimenti tendono a zero ed essi si comportano come circuiti passivamente induttivi $\rightarrow \mathcal{I}_0$ è in quadratura con \mathcal{V}_1

• i flussi dispersi tendono a zero $\rightarrow \frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_2} = K = \frac{M_1}{M_2}$

• le forze elettromotrici indotte nel primario f.e.m.1 = $-M_1 \frac{d\Phi}{dt}$ e nel secondario f.e.m.2 = $-M_2 \frac{d\Phi}{dt}$ tendono, rispettivamente, a \mathcal{V}_1 e \mathcal{V}_2 .

Altri punti:

• $\mathcal{I}_0 \neq 0$ e $\bar{\mathcal{I}}_0 = \mathcal{I}_{0\text{attiva}} + j \mathcal{I}_{0\text{reattiva}}$

• $\mathcal{V}_1 \neq \text{f.e.m.1} = \mathcal{E}_1$, $\mathcal{V}_2 \neq \text{f.e.m.2} = \mathcal{E}_2$

e $\frac{\mathcal{V}_1}{\mathcal{V}_2} \neq K = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$, e' un'altra delle ipotesi avolf: mendr

primario e secondario e sono una, se for possibile, costole di tensione ohmico-induttiva.

Funzionamento sotto carico, $I_2 \neq 0$

Se l'avvolgimento secondario alimenta un carico su detto circuito circola una corrente, I_2 , diversa da zero che, che l'altro, produce nel nucleo del trasformatore una f.m.m. = $N_2 I_2$ che altera il flusso Φ , prima prodotto dalle sole f.m.m. = $N_1 I_0$. In queste condizioni si crea uno squilibrio tra le tensioni di alimentazione del primario, V_1 , e la f.e.m. indotta nell'avvolgimento primario, E_1 , tale squilibrio comporta un accoppiamento di corrente della rete di alimentazione, I_1' , che va ad aggiungersi alla corrente erogata dalla rete nelle condizioni di funzionamento a vuoto:

$$I_1 = \text{corrente erogata} = I_0 + I_1'$$

otto carico

Si ha inoltre che:

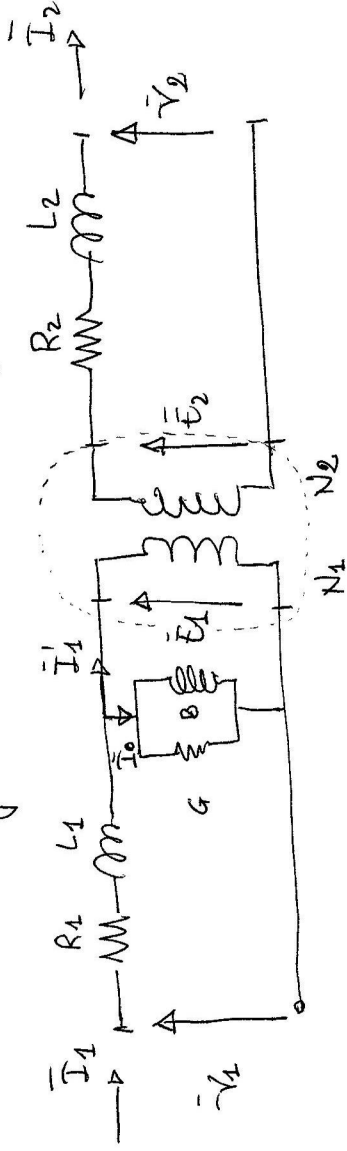
$$N_2 I_2 = -N_1 I_1' \Rightarrow \boxed{\frac{I_2}{I_1'} = \frac{N_1}{N_2}}$$

In termini pratici:

$$\left. \begin{aligned} I_0 &\approx 5\% I_1 \\ I_1' &\approx 95\% I_1 \end{aligned} \right\}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRASFORMATORE

Un trasformatore può essere elettricamente modellato tramite il seguente circuito equivalente:



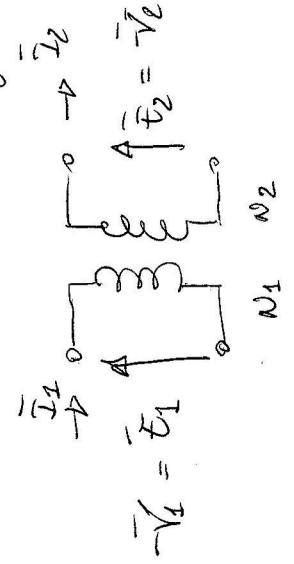
- R_1 tiene conto delle perdite nel rame (effetto Joule) dell'avvolgimento primario
- L_1 tiene conto dei flussi dispersi che avvengono primario ed avvolgimento secondario oltre alla differenza che il flusso complessivamente concatenato con il primario ed il flusso complessivamente concatenato con il secondario
- G tiene conto delle perdite di potenza dovute nel ferro (correnti parassite nel nucleo)
- B tiene conto delle proprietà magnetiche non ideali del nucleo ($I_0 \neq 0$ anche se $F_2 = 0$!)
- R_2 tiene conto delle perdite nel rame dell'avvolgimento secondario

• L_2 tiene conto dei flussi dispersi che scendono e salgono

• N_1 è il n° di spire dell' avvolgimento primario

• N_2 è il n° di spire dell' avvolgimento secondario

Si noti che se si ipotizza che il trasformatore è ideale il suo circuito equivalente si riduce a:



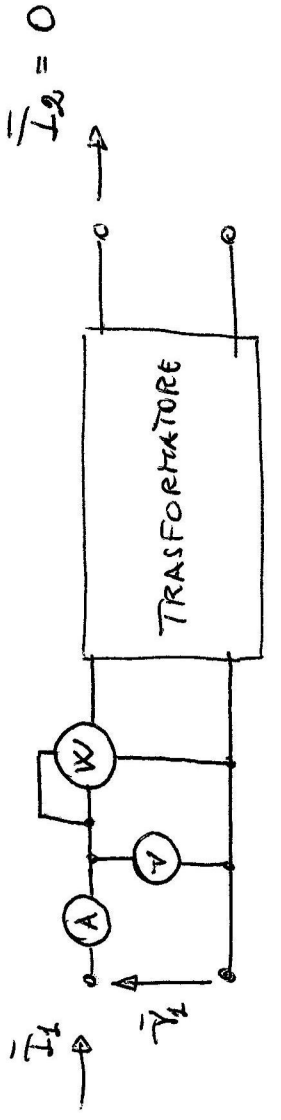
Come:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\vec{V}_1}{\vec{I}_1} &= \frac{\vec{V}_2}{\vec{I}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \\ \vec{I}_2 &= k \vec{I}_1, \quad P_{em} = 0, \quad P_{fe} = 0, \quad I_0 = 0 \end{aligned} \right.$$

9) DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEL CIRCUITO EQUIVALENTE:

PROVE SUI TRASFORMATORE

PROVA A VUOTO:



Con il secondario aperto vengono misurate la corrente nominale della rete, \bar{I}_1 , (Amperemetro!), la tensione di alimentazione del primario, \bar{V}_1 , (voltmetro!) e la potenza attiva erogata dalla rete (Wattmetro!), P_1 .

Essendo $\bar{I}_1 = \bar{I}_0$ che è molto piccola (5% di I_1 nominale!) si possono trascurare le cadute di tensione su R_1 e X_1 e

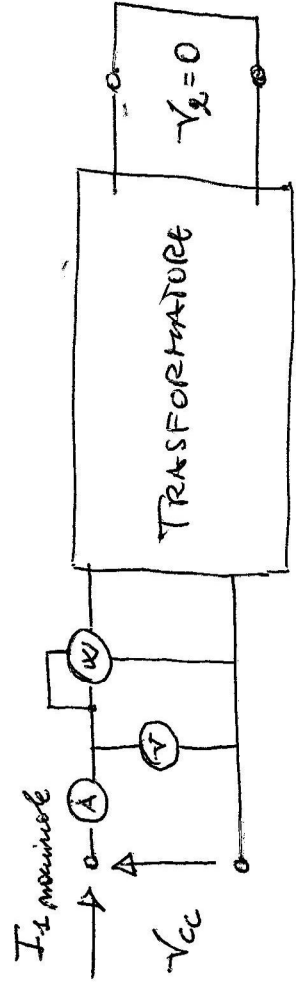
allora: $P_1 \approx P_{fe} = \gamma_1 I_1 \cos \phi_0$

$$\cos \phi_0 = \frac{P_{fe}}{\gamma_1 I_1}$$

$$G = \frac{I_1 \cos \phi_0}{\gamma_1}$$

$$B = \frac{I_1 \sin \phi_0}{\gamma_1}$$

PROVA IN CORTO CIRCUITO



Con il secondario in corto circuito, si fa variare il valore della tensione di alimentazione del primario fino ad ottenere un valore di corrente assorbite dalla rete pari al valore nominale. Il valore di tensione che fa circolare al primario una corrente pari al valore nominale è il secondario è in corto circuito fa parte il nome di "tensione di corto circuito", V_{cc} . Nelle stesse condizioni si misura, altresì, la potenza assorbita dalla rete, P_1 .

Considerando che: $V_{cc} \ll V_1$ nominale, nelle condizioni di corto circuito: $P_f \approx 0 \Rightarrow P_1 \approx P_{cu}$,

essendo P_{cu} la somma delle potenze dissipate sul rame dell'avvolgimento primario e dell'avvolgimento secondario. In altre parole:

$$P_1 = P_{cu} = R_{1TOT} \cdot I_1^2 \Rightarrow R_{1TOT} = \frac{P_{cu}}{I_1^2} = R_1 + k^2 R_2$$

essendo $k^2 R_2$ la resistenza dell'avvolgimento secondario "rifondato" al primario.

Avensi anche misurato la $V_1 = V_{oc}$, si può esprimere anche la resistenza totale al primario X_{TOT} :

$$X_{TOT} = X_1 + k^2 X_2 = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_2}\right)^2 - (R_{TOT})^2}$$

essendo $k^2 X_2$ la resistenza dell'avvolgimento secondario "rifondato" al primario.

Facciamo seguito alle misure "a vuoto" ed "in corto circuito", ogni trasformatore è caratterizzato da una "Targa" sulle quale vengono riportate, oltre a:

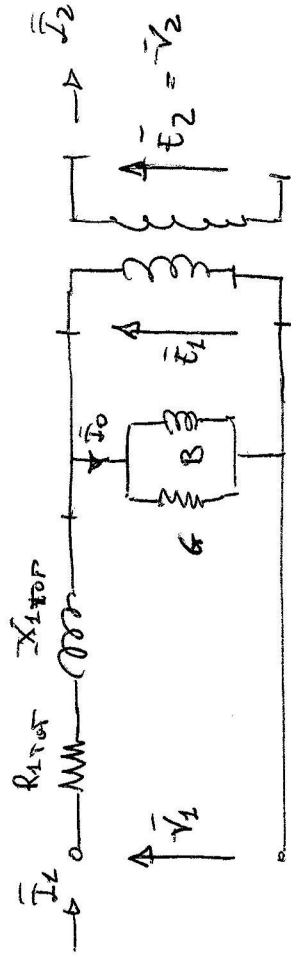
- tensione e corrente nominali al primario
- tensione e corrente nominali al secondario
- rapporto di trasformazione

anche:

- Perdite nel ferro
- Perdite nel rame
- tensione di corto circuito

Seppure etc, e fornire dai dati di targa di un trasformatore, è sempre possibile escludere il valore dei parametri del suo circuito equivalente.

NOTA: de prova "a vuoto" ed "in corto circuito" condurrano al seguente circuito equivalente del trasformatore:



nel quale i parametri R_{1TOT} e X_{1TOT} includono, oltre ai valori di R_1 ed X_1 necessariamente definiti, anche i valori di R_2 ed X_2 "riflessi" al primario con:

$$R_1' = k^2 R_2 \quad e \quad X_1' = k^2 X_2 \quad \text{In altre parole:}$$

$$R_{1TOT} = R_1 + k^2 R_2 \quad e \quad X_{1TOT} = X_1 + k^2 X_2 \quad \text{A fornire da}$$

questi ultimi è possibile risalire a R_1, R_2, X_1 e X_2 ipotizzando l'equivalenza delle potenze d'ingresso in assenza

$$\text{di perdite nel primario ed al secondario} \quad (R_1 I_1^2 = R_2 I_2^2 \Rightarrow \underline{\underline{R_{1TOT} = 2R_1}})$$

e che i flussi d'aspirazione sono proporzionali al quadrato del numero di spine dei nuclei avvolgimenti

$$\left(\frac{X_1}{X_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \Rightarrow \underline{\underline{X_{1TOT} = 2X_1}} \right).$$